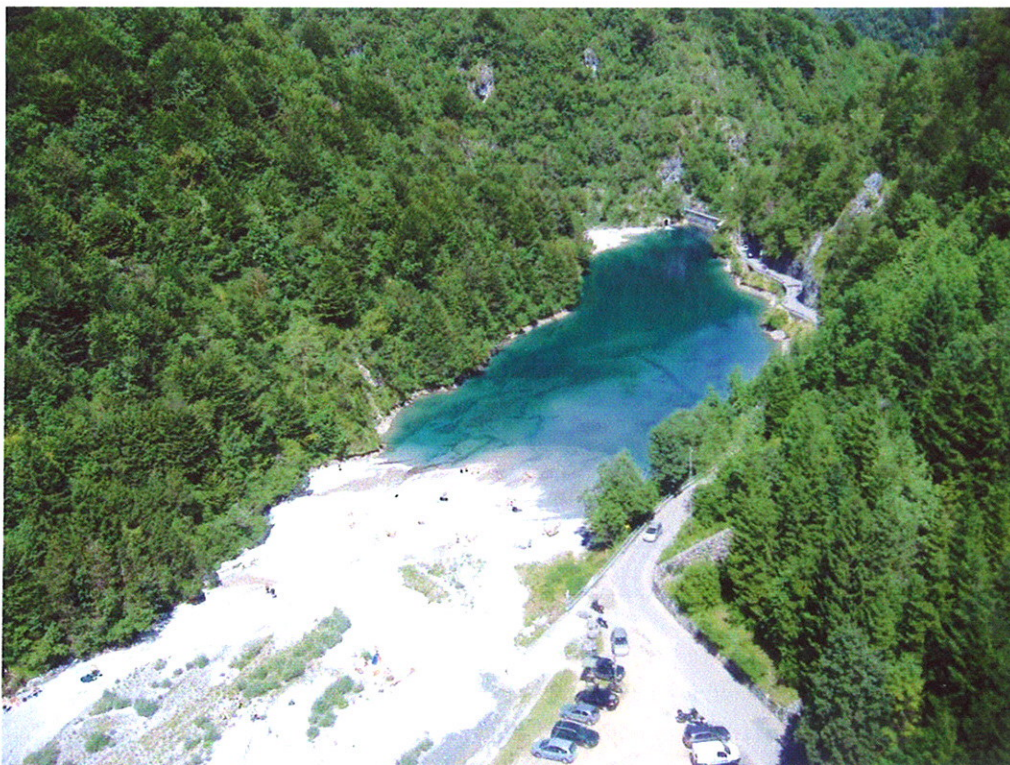


## Diga di Cassiglio

### VERIFICHE DELLA SICUREZZA



**p.c.: Italgen S.p.a.**

<i>Documento</i> <b>RdC_020_2018</b>	<i>Data</i> <b>Gennaio 2018</b>	<i>Pagine relazione</i> <b>167</b>
<i>Revisione</i> <b>---</b>	<i>data revisione</i> <b>---</b>	<i>Allegati</i> <b>Allegato 1: Risultati dei calcoli Allegato 2: Dinamica ambientale</b>
<i>Timbro e firma</i> <b>Ing. Paolo Panzeri</b>		

Via Pastrengo, 9  
24068 Seriate (BG)  
tel. 035 32 35 7 ☐ fax 035 32 35 750  
[www.pepconsultingengineers.it](http://www.pepconsultingengineers.it)

## INDICE

<b>1. PREMESSA .....</b>	<b>5</b>
<b>2. DIGA ESISTENTE .....</b>	<b>7</b>
2.1 CARATTERISTICHE GENERALI DEL SERBATOIO.....	7
2.2 CARATTERISTICHE DELLA DIGA .....	9
<b>3. CONOSCENZA DELL’OPERA.....</b>	<b>13</b>
3.1 STUDI SULLA CARATTERIZZAZIONE DEL CALCESTRUZZO DELLA DIGA .....	13
3.1.1 <i>Indagini ISMES del 1987-1988 (serie n.1)</i> .....	13
3.1.1.1 <i>Indagini tomografiche</i> .....	15
3.1.2 <i>Carotaggi del 1989 (serie n.2 e serie n.3)</i> .....	18
3.2 STUDI SULLA CARATTERIZZAZIONE DELLA ROCCIA DI FONDAZIONE DELLA DIGA .....	20
3.2.1 <i>Indagini ISMES del 1987-1988 (serie n.1)</i> .....	20
3.2.2 <i>Indagini so.ge.tec.del 2005 (serie n.2)</i> .....	22
3.2.3 <i>Rilievi con sonda televisiva in fori di sondaggio</i> .....	24
3.2.4 <i>Indagini Sial.tec. del 2017</i> .....	25
3.3 STATO DI CONSISTENZA E CONSERVAZIONE DEL MANUFATTO.....	26
3.4 MONITORAGGIO DELLA DIGA .....	27
3.4.1 <i>Risultati del monitoraggio</i> .....	30
3.5 SISTEMA DRENANTE.....	33
3.5.1 <i>Lavori di adeguamento sistema drenante del 1989</i> .....	33
3.6 INTERVENTO DI IMPERMEABILIZZAZIONE.....	36
3.7 INTERRIMENTO .....	36
<b>4. OPERA DI APPESANTIMENTO.....</b>	<b>39</b>
4.1 DESCRIZIONE DELL’INTERVENTO .....	39
4.2 CALCESTRUZZO DELL’APPESANTIMENTO .....	42
4.3 VERIFICA DEI DISPOSITIVI DI SCARICO DELLA DIGA .....	43
<b>5. VERIFICHE DELLA SICUREZZA E DELLE PRESTAZIONI DELLA DIGA APPESANTITA IN ACCORDO AL D.M. 26/06/2014 .....</b>	<b>48</b>
5.1 DEFINIZIONE DELLE AZIONI E DELLE SITUAZIONI PROGETTUALI .....	49
5.1.1 <i>Peso proprio</i> .....	50
5.1.2 <i>Spinta idrostatica</i> .....	50
5.1.3 <i>Coazioni dovute alla variazione di temperatura</i> .....	51
5.1.4 <i>Calore di idratazione e coazioni da ritiro</i> .....	59
5.1.5 <i>Sottospinte</i> .....	59

5.1.6	<i>Spinta del ghiaccio</i> .....	60
5.1.7	<i>Spinta dovuta all'interrimento</i> .....	61
5.1.8	<i>Azioni sismiche</i> .....	61
5.1.9	<i>Azioni inerziali dell'acqua invasata</i> .....	68
5.2	GLI STATI LIMITE E LA COMBINAZIONE DELLE AZIONI .....	69
5.3	LE PROPRIETÀ DEI MATERIALI.....	72
5.3.1	<i>Calcestruzzo esistente</i> .....	72
5.3.1.1	Trattazione statistica delle prove di laboratorio .....	72
5.3.1.2	Parametri messi in conto in progetto .....	79
5.3.2	<i>Calcestruzzo dell'appesantimento</i> .....	80
5.3.3	<i>Roccia di fondazione</i> .....	81
5.3.4	<i>Barre di connessione</i> .....	81
5.4	DESCRIZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO E TIPO DI ANALISI .....	82
5.5	STUDIO RISPOSTA SIMICA LOCALE.....	85
5.5.1	<i>Indagine sismica attiva con metodo MASW</i> .....	85
5.5.2	<i>Indagine HVSR su terreno</i> .....	85
5.6	CALIBRAZIONE DEL MODELLO FEM DI CALCOLO MEDIANTE RAFFRONTO CON PROVA DINAMICA AMBIENTALE.....	86
5.7	VALIDAZIONE DEL MODELLO FEM .....	99
5.7.1	<i>Confronto delle risultanti delle azioni esterne sollecitanti</i> .....	99
5.7.2	<i>Confronto degli sforzi sollecitanti il corpo diga</i> .....	102
5.8	ANALISI DINAMICA MODALE DELLA DIGA APPESANTITA.....	107
5.9	VERIFICHE SLE .....	113
5.9.1	<i>Verifica sforzi corpo diga</i> .....	114
5.10	VERIFICHE SLU .....	118
5.10.1	<i>Verifica sforzi corpo diga</i> .....	118
5.10.2	<i>Verifiche a ribaltamento e traslazione</i> .....	121
5.11	VERIFICHE FASI DI GETTO .....	125
5.11.1	<i>Trattazione semplificata dello sviluppo del calore di idratazione in fase di getto</i> .....	126
5.11.2	<i>Trattazione approfondita dello sviluppo del calore di idratazione in fase di getto e del ritiro mediante apposita modellazione numerica</i> .....	128
5.12	VERIFICHE DELL'INTERFACCIA TRA DIGA ESISTENTE E GETTO DI APPESANTIMENTO.....	135
5.12.1	<i>Verifiche dell'interfaccia in fase di esercizio della diga</i> .....	140
5.12.2	<i>Verifiche dell'interfaccia in fase di getto</i> .....	153
<b>6.</b>	<b>VERIFICHE DELLA SICUREZZA E DELLE PRESTAZIONI DELLA DIGA ESISTENTE IN ACCORDO AL D.M. 26/06/2014</b> .....	<b>155</b>
6.1	VERIFICHE SLU - VERIFICHE A RIBALTAMENTO E TRASLAZIONE .....	155

<b>7. VERIFICHE DELLA SICUREZZA E DELLE PRESTAZIONI DELLA DIGA IN ACCORDO AL D.M. 24/03/1982.....</b>	<b>158</b>
7.1 DEFINIZIONE DELLE AZIONI DI CALCOLO.....	158
7.1.1 <i>Peso proprio</i> .....	158
7.1.2 <i>Spinta idrostatica</i> .....	158
7.1.3 <i>Sottospinte</i> .....	159
7.1.4 <i>Spinta dovuta all'interrimento</i> .....	159
7.1.5 <i>Azioni sismiche</i> .....	159
7.1.6 <i>Azioni inerziali dell'acqua invasata</i> .....	160
7.2 VERIFICHE DELLA SICUREZZA E DELLE PRESTAZIONI DELLA DIGA APPESANTITA IN ACCORDO AL D.M. 24/03/1982.....	162
7.2.1 <i>VERIFICHE SLU - VERIFICHE A RIBALTAMENTO E TRASLAZIONE</i> .....	162
7.3 VERIFICHE DELLA SICUREZZA E DELLE PRESTAZIONI DELLA DIGA ESISTENTE IN ACCORDO AL D.M. 24/03/1982.....	165
7.3.1 <i>VERIFICHE SLU - VERIFICHE A RIBALTAMENTO E TRASLAZIONE</i> .....	165

**Allegato 1 : Risultati di dettaglio dei calcoli**

**Allegato 2: Rapporto tecnico di prova / RdP\_234\_2017 / “Indagini Sperimentali – Prove dinamiche ambientali sul corpo diga – Prove MASW e HVSR su terreno” Gennaio 2018**



## 1. PREMESSA

La presente relazione riporta l'esito delle verifiche di sicurezza e di prestazione condotte sul progetto di appesantimento della Diga di Cassiglio ubicata in comune di Cassiglio (BG).

La diga è di tipologia muraria in calcestruzzo a gravità e l'attuale Concessionario della diga è la società Italgen Spa con sede in Bergamo.

L'intervento di appesantimento in oggetto si è reso necessario, poiché nel 1988 l'allora gestore dell'opera di sbarramento, Italcementi Spa, avviò una serie di accertamenti sulle condizioni di sicurezza della diga di Cassiglio, che evidenziarono il mancato rispetto di alcuni limiti regolamentari indicati nelle Norme Tecniche dell'epoca DM 24/03/1982.

In particolare, trattandosi di una diga a gravità ordinaria, di altezza massima pari a 20.5 metri, il cui sistema di drenaggio, pur conforme alle indicazioni del Regolamento Dighe, non appariva del tutto efficiente, fu eseguita una rielaborazione della verifica di stabilità allo scorrimento della diga in diverse ipotesi del diagramma delle sottopressioni che ha evidenziato valori del rapporto T/N superiori al valore massimo regolamentare di 0.75.

Nel maggio 1992 l'Ente Concessionario inviò al Servizio Dighe un primo progetto di manutenzione straordinaria per l'adeguamento della diga al DM 24/03/1982 che prevedeva l'appesantimento della diga mediante la realizzazione sul coronamento di un solettone in calcestruzzo di tipo "baritico", caratterizzato da inerti di grosse dimensioni ed elevato peso specifico. Tale progetto è stato esaminato dalla Quarta Sezione del Consiglio Superiore dei LL.PP. che con voto n. 237/94 del 17.11.1994 ha espresso parere favorevole con prescrizioni e raccomandazioni. Sul progetto successivamente ripresentato dal Gestore, il Servizio Nazionale Dighe espresse parere negativo, prescrivendo allo stesso Gestore la riproposizione di un progetto organico, presentato poi nel luglio 2001 al Servizio Nazionale Dighe. Il progetto denominato "Appesantimento corpo diga" è stato esaminato dalla Quarta Sezione del Consiglio Superiore dei LL.PP. Il nuovo progetto prevedeva un appesantimento sul paramento di monte ed un innalzamento della quota di coronamento, quale conseguenza di una significativa rivalutazione della massima piena, rispetto al valore di progetto da 100 m<sup>3</sup>/s a 170 m<sup>3</sup>/s.

L'ufficio Periferico di Milano del Servizio Nazionale Dighe ha trasmesso alla Sede Centrale il progetto dell'appesantimento in oggetto, con propria relazione istruttoria, evidenziando tra l'altro che il progetto di appesantimento così come proposto poteva essere giudicato favorevolmente dall'ufficio Centrale del Servizio Nazionale Dighe, richiedendo però al Gestore alcune ulteriori osservazioni e richieste di chiarimenti.

Nel frattempo si è assistito ad una sostanziale evoluzione della normativa. Nel 2003 è stata introdotta una nuova zonizzazione sismica del territorio italiano, successivamente nel 2008 sono state approvate le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni DM 11/01/2008 coordinate con la circolare esplicativa n.617 del 2/02/2009 ed infine nel 2014 sono entrate in vigore le nuove norme per dighe e traverse DM 26/06/2014 "Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)".

Per tali ragioni si è resa necessaria la stesura di un nuovo documento di verifica della diga appesantita in accordo alle più recenti normative e in grado di recepire le diverse osservazioni e richieste effettuate nel tempo dall'ente di controllo. Inoltre la presente relazione recepisce le osservazioni presenti nella Relazione d'Istruttoria del 27.02.2017 "Diga di Cassiglio (n.arch.617) – Progetto Definitivo di adeguamento statico e idraulico dello sbarramento" redatto dalla Direzione Generale per le Dighe e le infrastrutture idriche ed elettriche – Div. 4 – Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori.

La presente relazione di calcolo sostituisce le precedenti relazioni di seguito riportate:

- Relazione di calcolo (Rev.02) – Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo – Diga di Cassiglio – Appesantimento Corpo Diga – 31/05/2005 – redatta da CTG di Italcementi Group;
- RdC-031-2011 / Relazione di calcolo integrativa per azioni sismiche – Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo – Diga di Cassiglio – Gennaio 2011 – redatta dall'Ing. Aldo Castodi;
- RdC-058-2013 / Verifica sismica – Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo – Diga di Cassiglio – Marzo 2013 – redatta dall'Ing. Aldo Castodi;
- RdC-315-2015-Rev.01 (Maggio 2016) / Diga di Cassiglio – Marzo 2013 – Verifiche della sicurezza - redatta dall'Ing. Aldo Castodi;

## 2. DIGA ESISTENTE

### 2.1 CARATTERISTICHE GENERALI DEL SERBATOIO

La zona interessata dall'invaso creato dalla diga di Cassiglio è situata sul versante meridionale delle Alpi Orobie, montagne che separano la Valtellina dalla Val Brembana.

Il bacino sotteso dalla diga ha un'estensione di 11 km<sup>2</sup> ed è costituito prevalentemente da terreni lapidei ricoperti da bosco ceduo e da conifere. Inoltre nel bacino vengono addotte, mediante canale in galleria, anche le acque del torrente Stabina; l'estensione del bacino allacciato è di 57 km<sup>2</sup>.

La zona d'invaso è molto limitata, con lunghezza di circa 300 m e larghezza di 50-60 m, e occupa una conca alquanto incassata nella formazione lapidea costituita da calcari del Trias.

Le sponde del serbatoio sono per lo più ricoperte da bosco di conifere, interrotto da roccia affiorante specialmente lungo la sponda sinistra, che si presenta più scoscesa.

A valle l'asta torrentizia è molto breve, circa 400 m fino alla confluenza con il torrente Stabina.

Il serbatoio ha funzione di regolazione giornaliera dei deflussi del bacino sotteso e di quelli del bacino allacciato relativo al torrente Stabina, per produrre energia idroelettrica nella centrale di Olmo al Brembo.

Negli anni passati il bacino è stato sottoposto a lavori di pulizia che hanno permesso di rimuovere circa 16000 m<sup>3</sup> di materiale. Dai documenti di progetto dell'invaso è previsto che le operazioni di drenaggio meccanico per la rimozione del materiale depositato siano eseguite ogni 15 anni circa.

#### Dati del serbatoio esistente:

I dati significativi del Serbatoio, desunti dal Foglio di Condizioni per l'Esercizio e la Manutenzione e pertanto nella configurazione attuale dell'opera, sono i seguenti:

- Quota di massimo invasore: 627.80 m s.m.
- Quota di massima regolazione: 626.00 m s.m.
- Volume totale di invasore (ai sensi del D.M. 82): 0.114×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>
- Superficie del bacino imbrifero direttamente sotteso: 11.0 km<sup>2</sup>
- Superficie del bacino imbrifero allacciato: 57.0 km<sup>2</sup>
- Portata di massima piena di progetto: 100 m<sup>3</sup>/s

Di seguito sono riportate alcune immagini del serbatoio a monte della diga:



A sinistra vista dall'alto dell'invaso, a destra vista verso monte dell'invaso



Particolare della conoide della valle dei Faggi e galleria d'adduzione proveniente dalla presa sul torrente Stabina

## 2.2 CARATTERISTICHE DELLA DIGA

La diga di Cassiglio fa parte dell'impianto idroelettrico di Olmo al Brembo e sfrutta a fine energetico le acque dell'alta valle Brembana. Il Gestore dell'impianto è la società Italgem S.p.a. con sede in Bergamo (BG).

La diga è di tipo murario in calcestruzzo, a gravità ordinaria ad asse planimetrico rettilineo e risulta impostata sulla roccia calcarea del substrato.

L'impianto è stato costruito negli anni 1951-1952 ed è stato collaudato il 14.03.1953 ai sensi del R.D. 1.10.1931 n.1370.

La sezione trasversale ha profilo triangolare con inclinazione a monte uniforme pari a 0.05, mentre il paramento di valle è composto da un tratto verticale nella parte superiore, fino a quota 625.56, e da un tratto con inclinazione 0.61 fino al piede. Il vertice del triangolo fondamentale è fissato a quota 628.62 m slm, inferiore di circa 0.7 m alla quota coronamento.

Tutta la parte centrale della diga è interessata dalla soglia di sfioro che costituisce lo scarico di superficie, con larghezza complessiva di 21.00 m sui 67 m della lunghezza totale della diga a coronamento. La sezione sfiorante è perfettamente analoga a quella emergente, ma risulta interrotta a quota 626.00 m slm dalla soglia di sfioro, munita di aggetto verso monte e sagomata secondo un profilo idraulico raccordato al paramento di valle.

Al piede il paramento stesso è collegato con raccordo circolare ad una platea in leggera contropendenza, con soglia finale a quota 610.95 m slm. La parte sfiorante è contenuta entro muri, sporgenti dal corpo diga, convergenti verso il piede, ove la larghezza risulta ridotta a 14 m. Tali muri proseguono lungo tutta la platea di protezione, lunga circa 14 m formando una vasca di contenimento e dissipazione.

La sezione longitudinale dell'opera è caratterizzata da un andamento alquanto regolare, ottenuto con profondi scavi di fondazione, il cui piano di imposta risulta approfondito fino a quota 609.00 circa, per quasi tutta la lunghezza della diga.

La struttura è suddivisa mediante giunti di dilatazione in conci larghi circa 12 m, salvo gli elementi di spalla. I giunti di dilatazione sono costituiti da trave coprigiunto, gettata su uno strato di materiali sintetici impermeabilizzanti e da lamierino di tenuta.

La diga è munita di cunicolo d'ispezione e drenaggio disposto perlopiù in posizione orizzontale a quota 609.5 m slm, di poco sopraelevato rispetto il piano di imposta. Verso sinistra tale cunicolo risulta lievemente sovralzato, mediante alcuni gradini, per un tratto di circa 10 m e quindi prosegue in spalla con due rampe, seguendo il profilo d'imposta fino a quota 615.0 m slm circa. Il cunicolo è accessibile da valle mediante cunicolo trasversale.

Il sistema di drenaggio della diga è costituito attualmente da due serie di canne drenanti, con recapito nel cunicolo di ispezione.

La prima serie, realizzata all'atto costruttivo della diga, comprende nel corpo diga canne drenanti  $\phi 200$  mm con interasse di 2 m, estese dal cunicolo di ispezione fino a quota 623 m s.l.m. circa (inferiore di 3 m alla soglia sfiorante e di 6.3 m al coronamento della diga). Dallo stesso cunicolo si dipartono le canne drenanti della fondazione che raggiungono il piano di imposta della diga.

La seconda serie, realizzata nel 1989 in concomitanza con i lavori di adeguamento del sistema drenante, comprende canne drenanti a interasse di 2 m, intercalate a quelle esistenti, con diametro  $\phi 127$  mm nella parte superiore al cunicolo ( che si prolungano fino al coronamento o alla soglia sfiorante) e  $\phi 215$  mm nella parte inferiore ( nel 1995 furono prolungate nella roccia di fondazione per una profondità di 6 m).

Dalla visione dei documenti di progetto originali della diga, risalenti al 15/04/1951 e da informazioni ottenute dal Gestore dell'opera, non risulta presente nessun diaframma di tenuta.

Nel 1989 sono stati anche eseguiti trattamenti di bonifica del calcestruzzo e del contatto roccia-calcestruzzo per limitare le infiltrazioni e le percolazioni che sono state ravvisate durante le operazioni di realizzazione del nuovo sistema drenante. Il trattamento è stato realizzato mediante iniezioni di miscela cementizia e miscela acrilica.

#### Dati della diga esistente:

I dati significativi per la diga di Cassiglio, desunti dal Foglio di Condizioni per l'Esercizio e la Manutenzione e pertanto nella configurazione attuale dell'opera, sono i seguenti:

- Altezza della diga (ai sensi del D.M. 82): 20.50 m
- Altezza di massima ritenuta: 17.80 m
- Quota coronamento: 629.30 m s.m.
- Franco (ai sensi del D.M. 82): 1.5 m
- Sviluppo del coronamento: 67.15 m
- Volume della diga: 5300 m<sup>3</sup>
- Grado di sismicità assunto nel progetto: S=0

#### OPERE DI SCARICO

Le portate massime scaricabili con livello del serbatoio al massimo invaso, cioè alla quota di 627.80 m s.l.m. sono:

dallo scarico di superficie: 100 m<sup>3</sup>/s

dallo scarico di fondo: 30 m<sup>3</sup>/s

#### Scarico di superficie

Lo scarico di superficie, disposto in corpo diga, è costituito da una soglia sfiorante fissa, con ciglio alla quota massima di regolazione 626.00 m s.m., suddivisa da n.2 pile in n.3 luci da 6.7 m, con lo scivolo ricavato sul paramento di valle della diga con muri di contenimento convergenti verso il basso. Al piede diga lo scivolo, come già accennato, si raccorda ad una platea in leggera contropendenza, con soglia finale a quota 610.95 m s.m.. La portata massima di scarico, con livello alla quota di massimo invaso 627.80 m s.m. risulta pari a 100 m<sup>3</sup>/s.



Scarico di fondo

Lo scarico di fondo, disposto in corpo diga nel concio di spalla destra, è costituito da un imbocco intercettato sul paramento di monte da una paratoia piana  $1.8 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$ , con soglia a quota 612.27 m s.m..

Il canale di scarico è preceduto da un canale sghiaiatore, con funzione di protezione della sovrastante bocca di presa della derivazione idroelettrica, che è disposta sulla sponda destra proprio a filo della struttura della diga e poggia su un massiccio gradone di calcestruzzo con filo esterno coincidente con la parete dello stesso canale sghiaiatore. A valle diga il canale di scarico è munito di breve platea di protezione contro le erosioni, separata dalla vasca di dissipazione dello scarico di superficie.

La portata massima di scarico, con livello alla quota di massimo invaso è pari a  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ . L'azionamento dell'organo di intercettazione è attuabile mediante tre fonti di energia indipendenti: linea elettrica Enel, gruppo elettrogeno e manuale.

Di seguito sono riportate alcune immagini della diga allo stato di fatto:



*Diga stato di fatto – a sx Vista da valle, a dx Vista coronamento e soglia sfiorante*

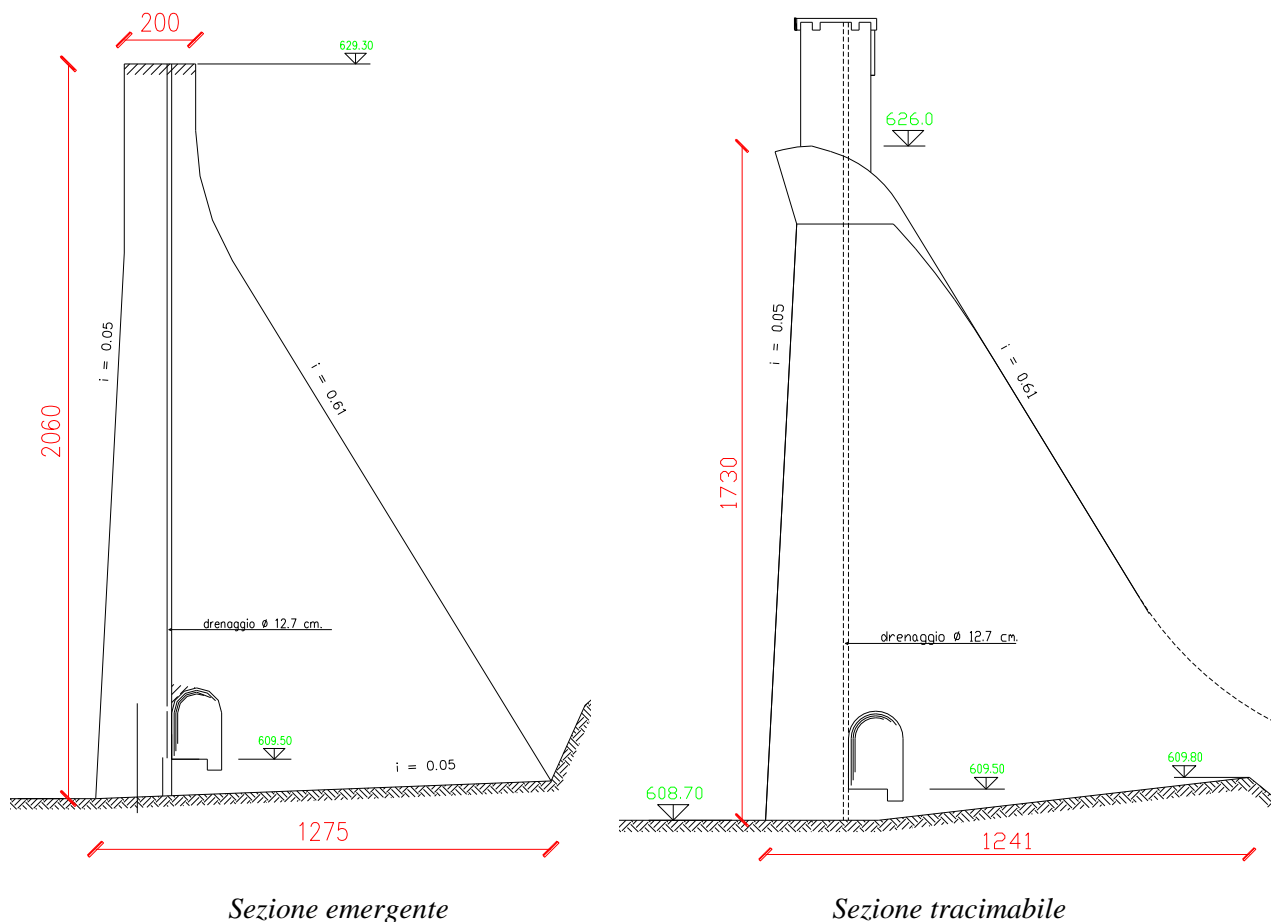


*Diga stato di fatto – a sx Vista da monte del coronamento, a dx Camminamento coronamento diga*



Diga stato di fatto – A sx Vasca di dissipazione, a dx Canale dello scarico di fondo

I disegni seguenti riportano le dimensioni più significative della diga esistente:



### 3. CONOSCENZA DELL'OPERA

#### 3.1 STUDI SULLA CARATTERIZZAZIONE DEL CALCESTRUZZO DELLA DIGA

Di seguito è riportata una sintesi delle indagini e degli studi eseguiti nel corso degli anni per caratterizzare il calcestruzzo della Diga.

##### 3.1.1 Indagini ISMES del 1987-1988 (serie n.1)

Nel periodo compreso tra 07/10/1987 e 22/01/1988 l'ISMES ha eseguito n.2 perforazioni al fine di definire mediante metodi distruttivi (carotaggi) e non distruttivi (indagini geofisiche con metodi sonici) lo stato di conservazione del calcestruzzo, le sue caratteristiche fisico-meccaniche e lo stato della roccia di fondazione della diga di Cassiglio. I risultati delle indagini condotte sono riportati per esteso nelle seguenti relazioni, a cui si rimanda per ogni ulteriore chiarimento e dettaglio:

*“Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo – Diga di Cassiglio – Indagini geotecniche e installazione di strumentazione – Redatta da ISMES - Prog. ASP4019 – Doc. RAT/DIG/013 – Rev 00”;*

*“Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo – Diga di Cassiglio – Indagini sulla muratura in calcestruzzo e nella roccia di fondazione mediante prove di laboratorio su campioni – Redatta da ISMES - Prog. 4019.72/DGM – Doc. REL/DGM/013 – Rev 00”;*

*“Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo – Diga di Cassiglio – Indagini geofisiche con metodi sonici – Redatta da ISMES - Prog. ASP4019 – Doc. RAT/DGF/018 – Rev 00”;*

I sondaggi sono stati eseguiti a rotazione, a carotaggio continuo. Il materiale è stato estratto mediante carotiere doppio con diametro  $\phi 86$  mm.

Le n.2 perforazioni sono state eseguite dal coronamento raggiungendo le seguenti profondità:

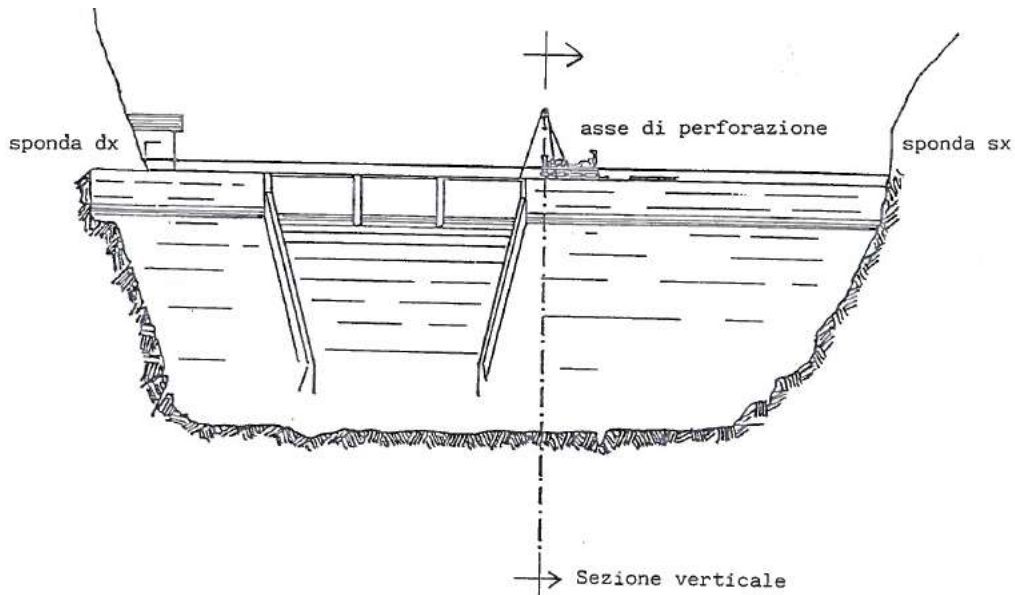
Perforazione (n.)	Inclinazione (°)	Profondità (m)
S1 I	12,05 (verso valle rispetto alla verticale)	33,90
S1 V	-	32,50

Dalle prove di laboratorio eseguite sulle carote di cls (serie n.1) è stato possibile definire i seguenti parametri:

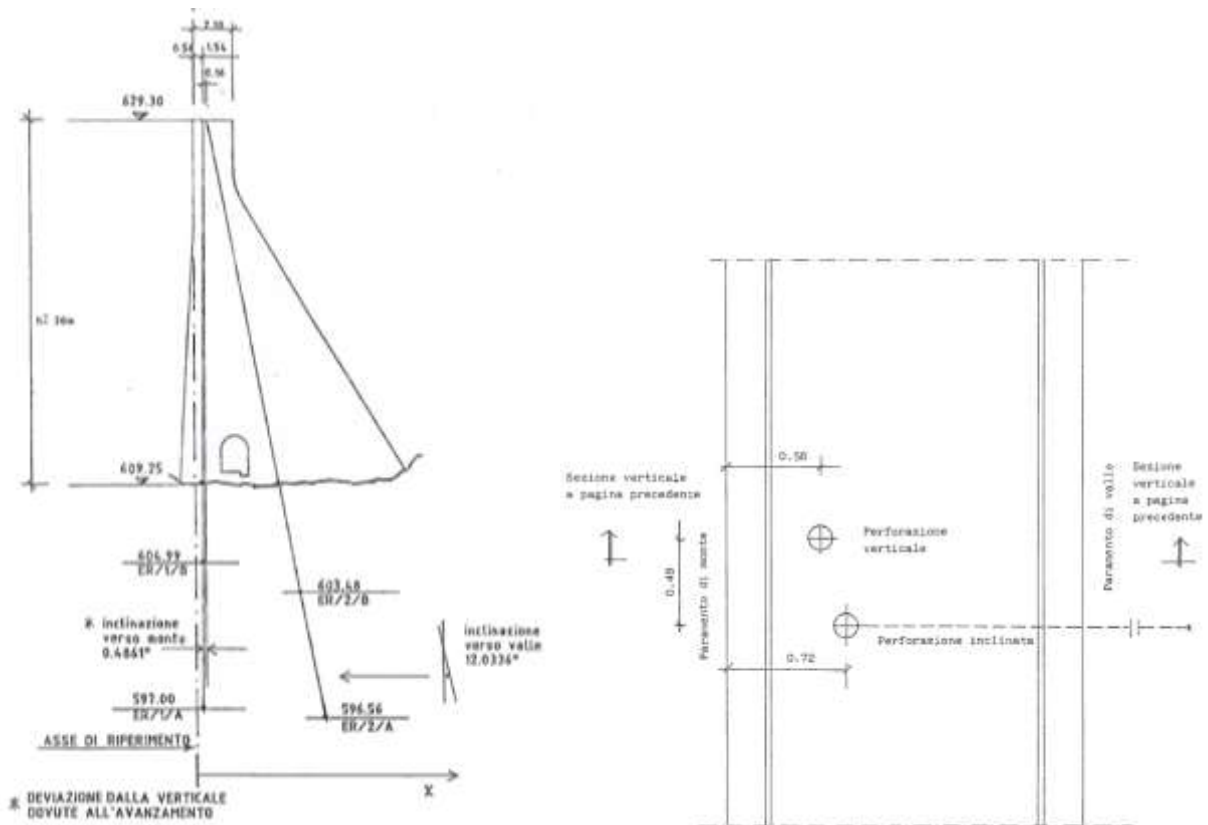
<i>Serie n° 1</i>
-Massa volumica apparente
-Velocità di propagazione di ultrasuoni
-Resistenza alla compressione
-Resistenza a trazione diretta
-Modulo di elasticità statico
-Determinazione del coefficiente di Poisson
-Coefficiente di permeabilità all'acqua
-Modulo elastico dinamico (ricavato in modo indiretto)

I valori di massa volumica furono determinati su provini essiccati a 110°C e la resistenza alla compressione fu determinata su provini tagliati e rettificati con rapporto altezza / diametro costante pari a 2.

Le immagini seguenti riportano l'ubicazione dei n.2 carotaggi eseguiti:



Vista da valle – Ubicazione n.2 perforazioni



A sx. sezione verticale – A dx. vista in pianta - Ubicazione delle n.2 perforazioni

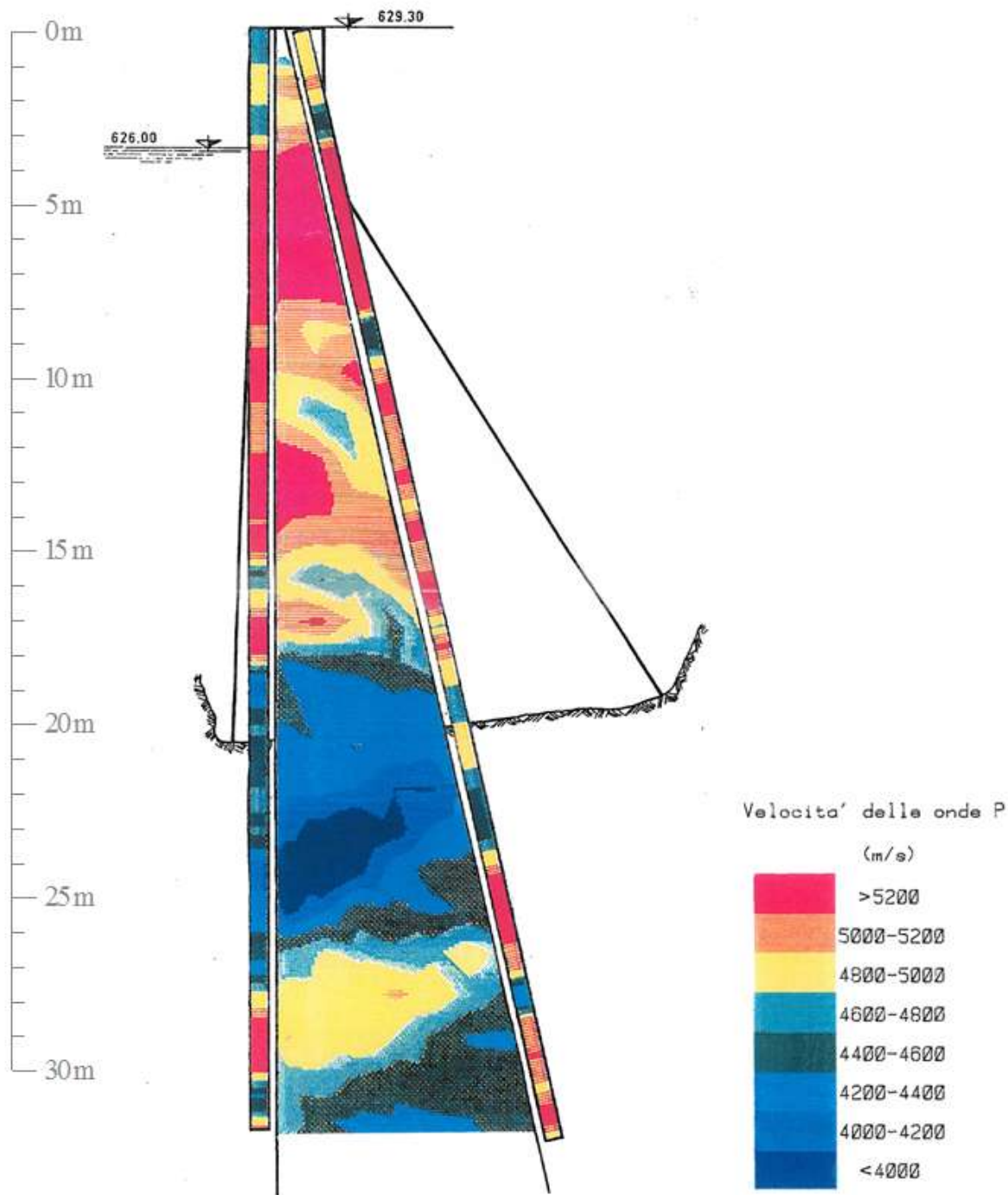
### 3.1.1.1 Indagini tomografiche

Sul calcestruzzo della diga sono state inoltre effettuate le seguenti indagini:

- carotaggio sonico nei n.2 fori verticale e inclinato;
- rilievi di tomografia sonica sulla medesima sezione interessata dalle due perforazioni, con misure sia tra il foro verticale ed il paramento di valle che tra i due fori.

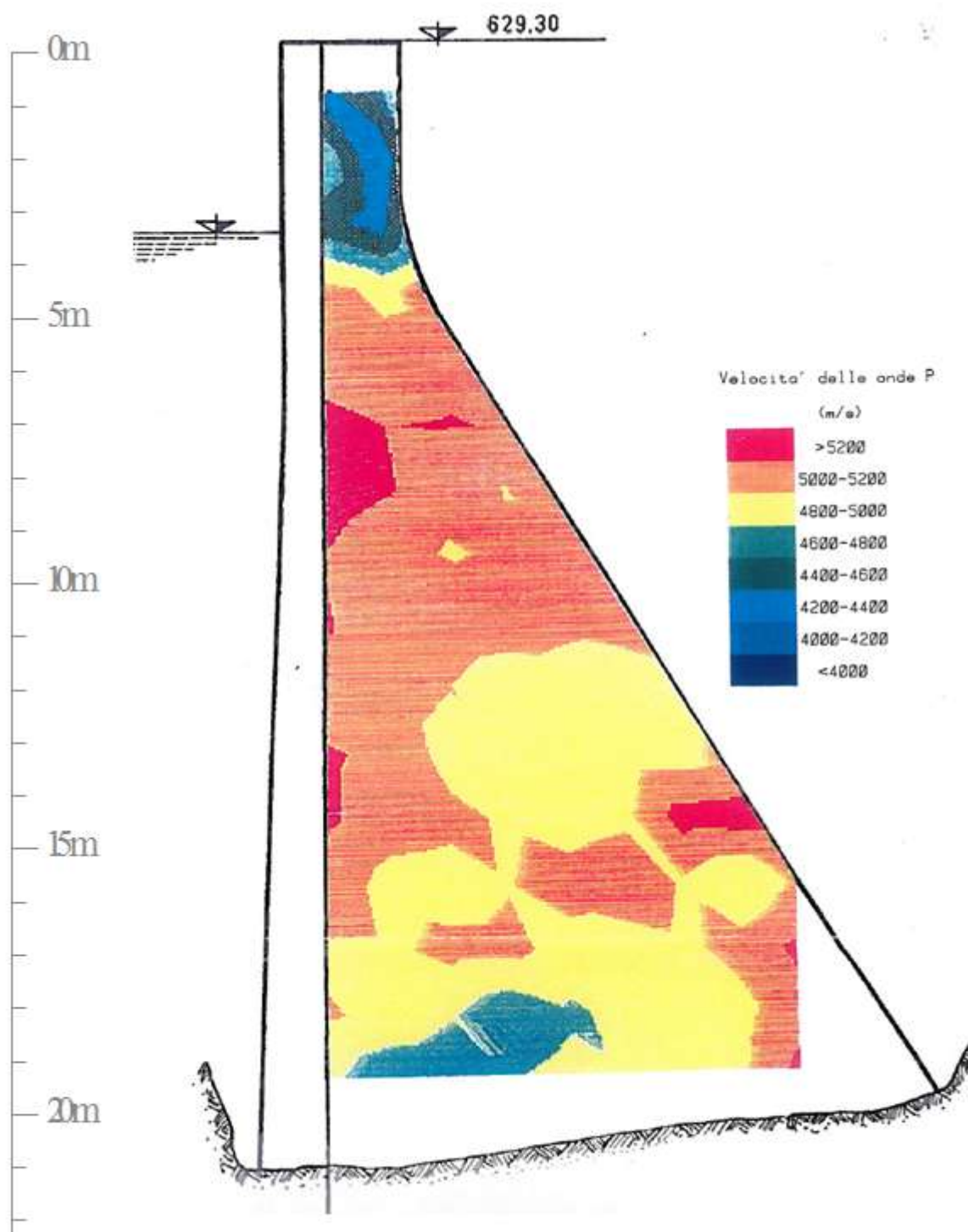
Come riportato in relazione i risultati delle indagini indicano un calcestruzzo caratterizzato da elevati valori di velocità delle onde soniche (4800÷5200 m/s contro valori, per un calcestruzzo di medie caratteristiche di 4200÷4400 m/s). Tali valori di velocità sono dovuti, probabilmente, alle elevate velocità dell'inerte con cui è stato confezionato il calcestruzzo. Vi sono anche zone a minore velocità (4400÷4600 m/s) localizzate appena al di sotto del coronamento per uno spessore di 4-5 m.

Di seguito si riportano le immagini delle tomografie tratte dalla relazione di prova a cui si rimanda per ogni ulteriore dettaglio e particolare:



Misure di tomografia sonica – Campi di velocità – Foro verticale / Foro inclinato





Misure di tomografia sonica – Campi di velocità – Foro verticale / Paramento valle

### 3.1.2 Carotaggi del 1989 (serie n.2 e serie n.3)

Nel 1989 si è provveduto all’impianto di un nuovo sistema drenante sia in corpo diga che in fondazione, poiché il sistema drenante realizzato all’origine, oltre a non soddisfare la normativa vigente, era quasi completamente ostruito da concrezioni calcaree e non convenientemente ripristinabile. Durante tali lavorazioni su n.4 postazioni, prima di procedere con l’impianto del drenaggio è stato eseguito un carotaggio continuo per il prelievo di campioni di calcestruzzo e roccia da sottoporre ad esami fisici e meccanici in laboratorio.

I risultati delle indagini condotte sono riportati per esteso nelle seguenti relazioni, a cui si rimanda per ogni ulteriore chiarimento e dettaglio:

*“Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo – Diga di Cassiglio – Adeguamento sistema drenante e installazione piezometri in fondazione – Redatta da Italcementi Spa – Bergamo 10/05/1989”;*

*“Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo – Diga di Cassiglio – Prove di laboratorio su campioni di carote – Redatta da Italcementi Spa – Bergamo 18/01/1990”;*

*“Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo – Diga di Cassiglio – Integrazioni e modifiche al rapporto finale di sintesi a seguito della nota del Servizio Nazionale Dighe n°1335 del 15.04.1993 – Redatta da Italcementi Spa”;*

*“Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo – Diga di Cassiglio – Prove ufficiali di laboratorio 1993 – Certificati delle prove su carote eseguite da ISMES”;*

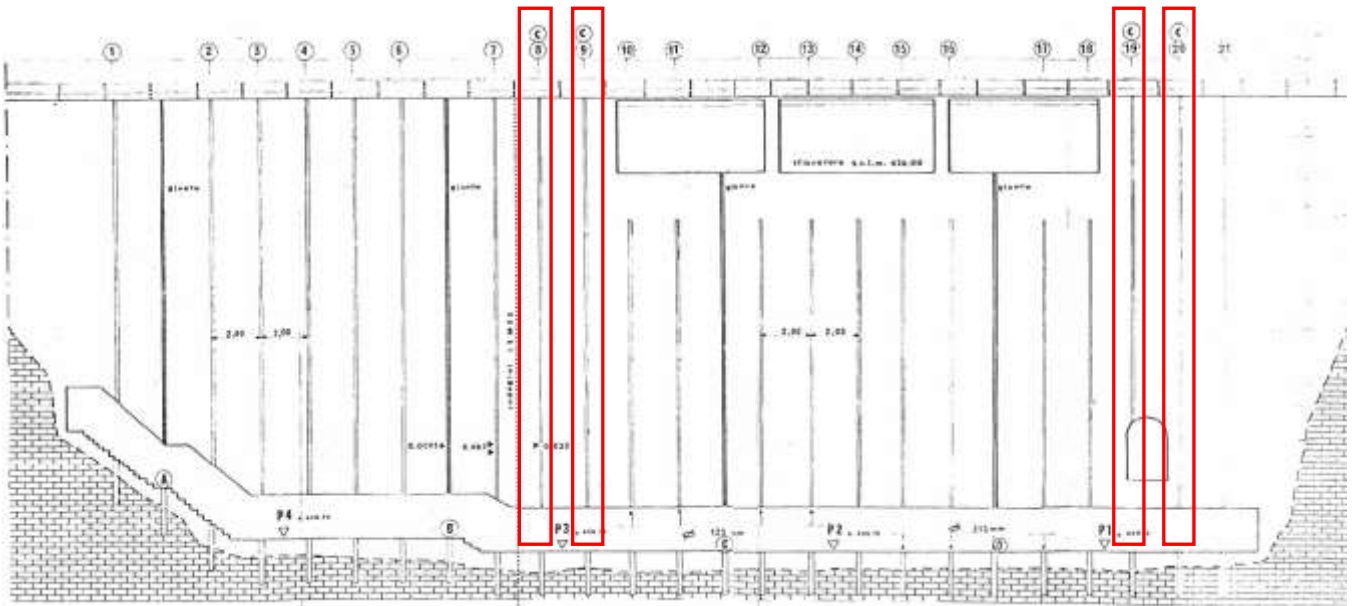
Nel corpo diga sono stati realizzati n.4 sondaggi a partire dal coronamento fino alla fondazione ricavando carote aventi un diametro di 71,9 mm. La denominazione e la lunghezza dei carotaggi sono le seguenti:

<b>Carotaggio</b>	<b>Lunghezza (m)</b>
Pozzo D 9	18,50
Pozzo D 19	14,50
Pozzo D 20	18,65
Pozzo S 8	18,65

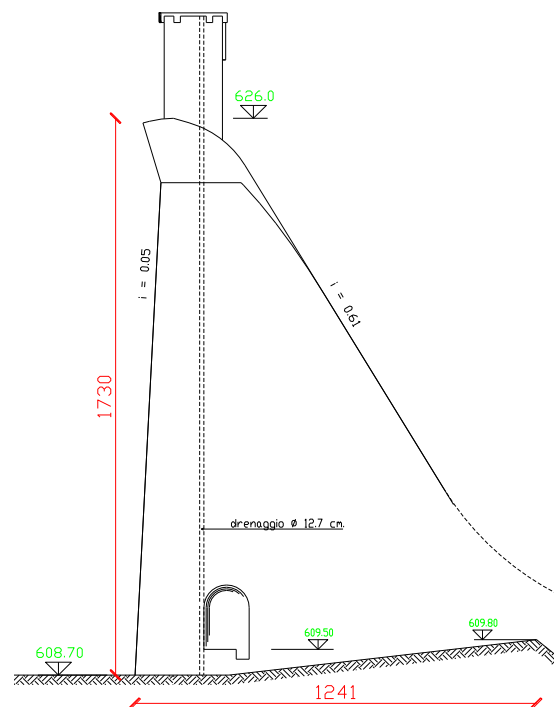
Dalle prove di laboratorio eseguite sulle carote di cls (serie n.2 e serie n.3) è stato possibile definire i seguenti parametri:

<b>Serie n° 2</b>	<b>Serie n°3</b>
-Massa volumica apparente	-Massa volumica
-Massa volumica assoluta	-Resistenza a compressione
-Modulo di elasticità dinamico flessionale e assiale	
-Modulo elastico statico secante	
-Porosità accessibile all’acqua	
-Resistenza a compressione	
-Resistenza a trazione indiretta	

Le immagini seguenti riportano l’ubicazione dei n.4 carotaggi eseguiti:



Vista frontale – Posizione dei dreni con indicate le ubicazioni dei n.4 carotaggi



Sezione trasversale - Ubicazione dei fori di drenaggio

I campioni estratti da questi carotaggi sono stati provati per una quota parte dai laboratori di Italcementi (serie n°2) e per un'altra parte dai laboratori di ISMES (serie n°3).

Le resistenze alla compressione eseguite dal laboratorio Italcementi (Serie n.2) fanno riferimento a provini di diversa snellezza ( $\phi = 71,9$  mm e  $h = 80 \div 220$  mm), i cui risultati sono stati normalizzati ad un rapporto  $h = 2\phi$ , utilizzando fattori correttivi di letteratura. Le resistenze alla compressione eseguite dal laboratorio ISMES furono determinate tutte su provini tagliati e rettificati con rapporto altezza / diametro costante pari a 2.

### 3.2 STUDI SULLA CARATTERIZZAZIONE DELLA ROCCIA DI FONDAZIONE DELLA DIGA

Di seguito è riportata una sintesi delle indagini e degli studi eseguiti nel corso degli anni per caratterizzare la roccia di fondazione della Diga.

#### 3.2.1 Indagini ISMES del 1987-1988 (serie n.1)

Le due perforazioni S1 I e S1 V, cui si è accennato nei capitoli precedenti, hanno interessato anche la roccia di fondazione spingendosi fino alla profondità di 32÷34 m ed hanno permesso sia di estrarre campioni su cui eseguire le prove meccaniche di seguito descritte, sia di effettuare un carotaggio sonico e rilievi di tomografia sonica tra i due fori.

Per quanto riguarda le misure di carotaggio sonico e i rilievi di tomografia, entrambi mostrano una notevole variabilità nella velocità sonica. I carotaggi mostrano variazioni da valori di circa 4000 m/s fino a oltre 5600 m/s. La tomografia sonica in particolare indica che alla quota di circa 605 m è presente una vasta zona caratterizzata da minore velocità (3600÷3800 m/s), indice di maggiore fratturazione e degrado.

Di seguito si riportano in sintesi le risultanze delle prove eseguite nei laboratori ISMES:

Tabella riassuntiva dei campioni in roccia											
Campioni	Sondaggio	Profon	Diametro	Altezza	Massa vol. app.	Massa vol. reale	Porosità	Velocita' sonica	Carico di rottura - fc	Modulo elastico	Coeff. di poisson
		m	mm	mm	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	m/s	MPa	MPa	
11	S1 I	24.4	71.9	143.1	2690	2860	5.94	1350	14.53	5200	0.13
12	S1 I	25.3	71.8	144.0	2710	2850	4.91	1490	17.10	11300	0.50
13	S1 I	25.5	71.8	142.9	2700	2840	4.92	1470	17.28	16700	0.47
14	S1 I	25.8	71.6	142.5	2740	2860	4.19	1560	17.74	10800	0.21
15	S1 I	31.2	71.8	141.9	2760	2860	3.50	1980	20.52	9700	0.60

S1 I: Perforazione inclinata

La tabella seguente riporta in sintesi i valori medi delle principali caratteristiche indagate:

Tabella riassuntiva dei campioni in roccia						
Massa vol. app.	Massa vol. reale	Porosità	Velocita' sonica	Carico di rottura - fc	Modulo elastico	Coeff. di poisson
g/cm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	m/s	MPa	MPa	
2.72	2850	4.7	1570	17.4	10700	0.38

### 3.2.2 Indagini so.ge.tec.del 2005 (serie n.2)

Nei primi mesi del 2005 sono state effettuate dalla società SO.GE.TEC. Srl indagini suppletive di carattere geotecnico sulla roccia di fondazione comprendenti i sondaggi a carotaggio continuo, test in situ nei fori degli stessi sondaggi (prove dilatometriche e Lugeon), test di laboratorio (prove fisiche, monoassiali e triassiali su campioni di roccia), ed infine un rilievo geostrutturale e geomeccanico di dettaglio con determinazione degli indici RMR e GSI.

Tale studio, inserito tra i lavori di ristrutturazione dell'opera d'arte, che prevede l'appesantimento del paramento di monte in conformità con il progetto di adeguamento statico e funzionale, ha permesso di fornire al progettista i parametri geomeccanici indispensabili per la modellazione della nuova opera.

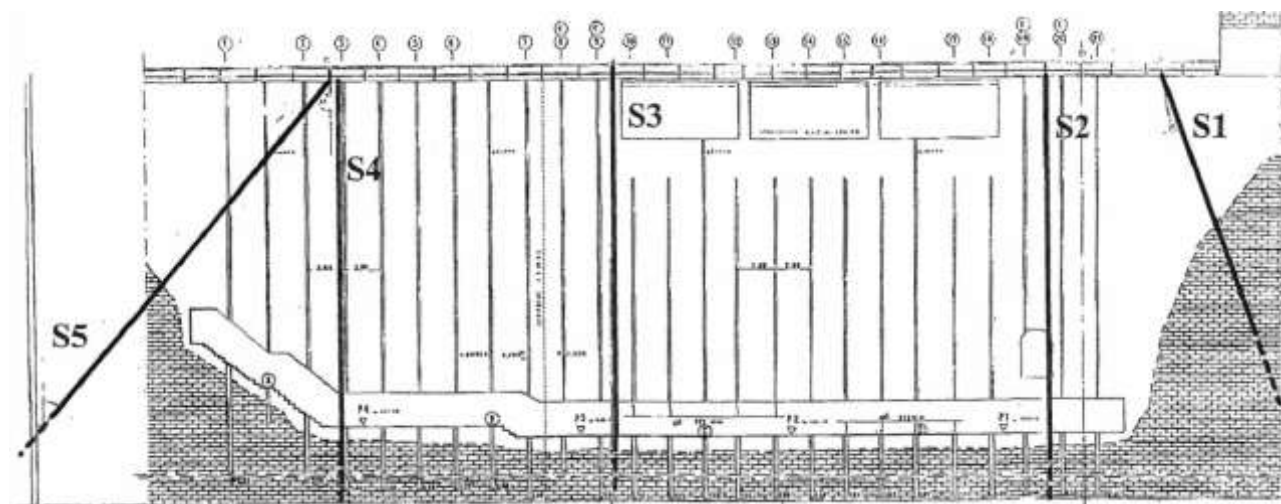
I risultati delle indagini condotte sono riportati per esteso nelle seguenti relazioni, a cui si rimanda per ogni ulteriore chiarimento e dettaglio:

*“Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo – Diga di Cassiglio – Appesantimento corpo diga – 11/ Indagini geostrutturali e geomeccaniche sulla roccia di fondazione – Redatta da CTG Italcementi Group - Bergamo 02/05/2005”;*

*“SO.GE.TEC – Sondaggi e prove di permeabilità – Indagine geognostica con esecuzione di sondaggi stratigrafici a distruzione di nucleo e a carotaggio continuo con prove di permeabilità in foro sulla diga in comune di Cassiglio – Marzo 2005”;*

*“SIAL.TEC ENGINEERING – Prove dilatometriche e prove di laboratorio su campioni di roccia – 07/04/2005”.*

I punti di ubicazione dei carotaggi sono di seguito riportati:



*Sezione diga (verso monte) – Ubicazione indagini*



Prove in sito - Sondaggi a carotaggio continuo in roccia

Si tratta di n.5 sondaggi  $\phi 101$  mm che, dalla passerella del coronamento, attraversano il corpo diga a distruzione di nucleo, continuano a carotaggio continuo presso il contatto calcestruzzo-roccia e penetrano abbondantemente nella roccia stessa di fondazione, sia della base (sondaggi verticali S2,S3 e S4) che delle spalle (sondaggi inclinati S1 e S5). Nella tabella di seguito sono riportati i sondaggi effettuati, le profondità del contatto manufatto-roccia fondazione, la profondità totale raggiunta e l'inclinazione sulla verticale degli stessi.

<b>Sondaggio</b>	<b>Profondità contatto (m)</b>	<b>Profondità totale (m)</b>	<b>Inclinazione (°)</b>
S1	10,60	25	20 verso SE
S2	20,50	35	90
S3	20,50	35	90
S4	20,15	35	90
S5	15,20	30	40 verso W

Prove in sito - Prove di permeabilità Lugeon

Nei fori di sondaggio, in avanzamento durante la perforazione, si sono effettuate n. 25 prove Lugeon (n.5 prove per ogni sondaggio). Nei tratti maggiormente fratturati in corrispondenza del sondaggio S4 realizzato in sponda sinistra sono stati anche raggiunti i valori più elevati di U.L.(8,33), che comunque indicano una permeabilità ridotta ( $47,4 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ) dell'ammasso roccioso. In generale i valori di permeabilità risultano molto bassi e indicano che la roccia, anche nelle zone maggiormente fratturate, è caratterizzata da fratture chiuse e pressoché impervie.

Prove in sito - Prove dilatometriche

Le prove dilatometriche permettono la determinazione delle caratteristiche di deformabilità dell'ammasso roccioso entro i fori di sondaggio. I moduli di deformabilità ricavati con il dilatometro in foro variano da un minimo di 3000 MPa per la roccia più fratturata (RQD=0-10%) ad un massimo di 7000 MPa per quella più integra (90-100%).

Prove di laboratorio – Determinazione della massa volumica apparente

I campioni di laboratorio su spezzoni di carota hanno fornito un valore medio di massa volumica apparente di  $2,81 \text{ g/cm}^3$  ( $2,78 \text{ g/cm}^3$  per il litotipo brecciato).

Prove di laboratorio – Parametri meccanici di resistenza da prove di compressione monoassiale

Nella tabella seguente si riportano per i due tipi di roccia trovati, dolomia e dolomia brecciata, i valori medi del carico di rottura di picco e residuo della compressione monoassiale.

<b>Litotipo</b>	<b>Resistenza a compressione monoassiale</b>	
	<b>Resistenza di picco – <math>\sigma_p</math> [MPa]</b>	<b>Resistenza residua – <math>\sigma_{res}</math> [MPa]</b>
Dolomia	51.21	4.93
Dolomia brecciata	47.22	3.15

I due litotipi dimostrano di avere caratteristiche di resistenza meccanica del tutto simili.

Prove di laboratorio – Parametri meccanici di deformabilità da prove di compressione monoassiale e triassiale

Di seguito si riportano i valori medi del modulo secante e modulo tangente delle curve di compressione e dei rispettivi coefficienti di Poisson, che caratterizzano le rocce della fondazione:

Litotipo	Compressione monoassiale				Compressione Triassiale			
	Modulo Et [MPa]	Modulo Es [MPa]	$\nu_t$	$\nu_s$	Modulo Et [MPa]	Modulo Es [MPa]	$\nu_t$	$\nu_s$
Dolomia	17995	6554	0.34	0.25	46267	31311	0.43	0.28
Dolomia brecciata	15661	5303	0.37	0.18	-	-	-	-

**3.2.3 Rilievi con sonda televisiva in fori di sondaggio**

Le indagini sono state effettuate nel periodo Settembre-Ottobre 1995. Tali indagini condotte dall'ISMES sono consistite in rilievi geostrutturali con sonda televisiva in n. 22 fori drenanti della diga. Tali indagini hanno avuto lo scopo di definire il passaggio calcestruzzo-roccia di fondazione e le principali caratteristiche geomeccaniche dei sistemi di discontinuità presenti nella roccia di fondazione nei primi 6 m.

Di seguito è riportata una sintesi dei risultati delle indagini condotte. Per ogni ulteriore chiarimento e dettaglio si rimanda alle seguenti relazioni:

*“Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo – Diga di Cassiglio – Rilievi con sonda televisiva in fori di sondaggio – Redatta da ISMES - 1995”;*

*“Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo – Diga di Cassiglio – Rilievi con sonda televisiva in fori di sondaggio / Commento alla relazione ISMES – Redatta da CTG - 1996”;*

Dalle indagini ISMES e commento CTG risulta che:

- il contatto calcestruzzo/roccia di fondazione è generalmente ben chiuso; localmente si osservano delle fessure millimetriche, per lo più discontinue, causate da debole dilavamento;
- la roccia di fondazione è rappresentata da dolomia, organizzata in bancate in sponda sinistra e ben stratificata in sponda destra. Generalmente si presenta compatta, localmente a struttura brecciata, ma con microfratture ben serrate o ben cementate da carbonati;
- L'immersione media degli strati è  $216^\circ/40^\circ$ , con una debole differenza passando dalla sponda sinistra a quella destra;
- Ad eccezione dei giunti di stratificazione, dal punto di vista strutturale si osserva una notevole dispersione dei dati. In generale è riconoscibile solamente un'altra famiglia di fratture K1, con immersione media  $59^\circ/61^\circ$ ;
- La roccia risulta in genere poco fratturata, i giunti di strato sono per la maggioranza ben chiusi, localmente aperti con aperture millimetriche, max subcentimetriche.

- Dal punto di vista geomeccanico la roccia esaminata mediante la video sonda può essere denominata da buona ad eccellente, in conformità con la classificazione di Deere. Per quanto riguarda la stabilità dell'ammasso roccioso in corrispondenza del manufatto, l'immersione dei giunti di strato risulta favorevole alla stessa, mentre le discontinuità K1 di per sé sfavorevoli, sono caratterizzate però da scarsa continuità lineare e pertanto risultano ininfluenti.

### **3.2.4 Indagini Sial.tec. del 2017**

Nel mese di ottobre-novembre 2017 sono state effettuate dalla società Sial.tec Engineering Srl indagini suppletive di carattere geotecnico sulla roccia di fondazione comprendenti n. 2 sondaggi S1 e S2.

I risultati delle indagini sono riportati nella seguente relazione a cui si rimanda per ogni dettaglio:

*“Italgen – Diga di Cassiglio – Olmo al Brembo (BG) – Progetto Appesantimento della Diga – Relazione Geotecnica / Gennaio 2018 / Redatta dall’Ing. Stefano Guido e Dr. Geol. Andrea Martignoni”*

La relazione sopra citata contiene anche le verifiche geotecniche relative all’imposta di fondazione della diga.

### 3.3 STATO DI CONSISTENZA E CONSERVAZIONE DEL MANUFATTO

Le visite ispettive eseguite dal Gestore sull'opera hanno evidenziato la mancanza di fenomeni di fessurazioni o dissesti di rilievo nel corpo diga o nei terreni circostanti; inoltre, per quanto è stato possibile accertare dalla documentazione disponibile e dalle dichiarazioni del Gestore, nel periodo di esercizio non si sono mai verificati comportamenti anomali della diga che possano indurre a temere fenomeni d'instabilità. Il paramento di valle della diga presenta un aspetto di relativo invecchiamento, con segni di scolature, distacchi superficiali, frequenti zone ripristinate con intonacatura locale e muschio, ma tuttavia non si evidenziano lesioni o difetti di rilievo. Il paramento di monte per la parte visibile presenta una situazione analoga a quello di valle. All'interno del corpo diga, lungo il cunicolo d'ispezione, sono presenti estese concrezioni calcaree, uno stillicidio diffuso, ma di entità molto limitata, e depositi calcarei all'interno delle canalette di raccolta. I giunti di dilatazione risultano serrati e per lo più individuabili solo per la presenza di più marcate concrezioni calcaree, ma non si riscontrano perdite concentrate.

In merito al sistema drenante dalla relazione istruttoria dell'Ufficio di Milano del SND si ricavano le seguenti osservazioni:

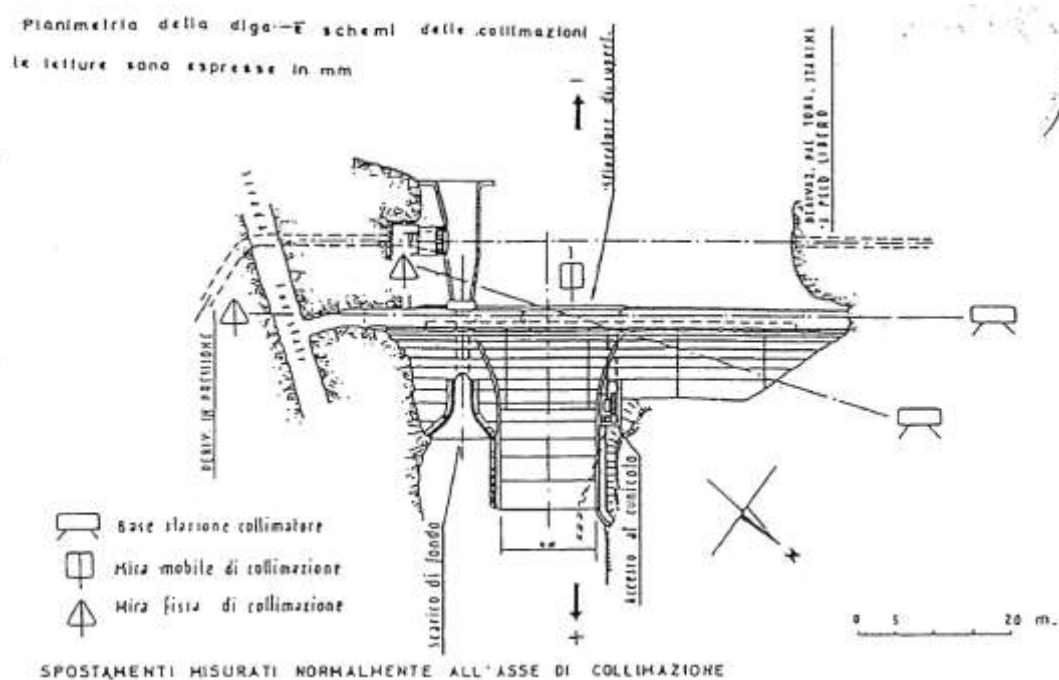
- *“I dreni originali non danno alcun apporto e sono da considerare per lo più otturati, non tanto per occlusione del foro, quanto per saturazione delle pareti, e zona limitrofa, evidenziata dalle estese incrostazioni calcaree;*
- *I dreni di recente realizzazione sono attualmente funzionanti con stillicidio modesto, ma continuo;*
- *I dreni di fondazione risultano in genere pieni d'acqua fino al bordo superiore, senza apprezzabile movimento idrico; la situazione riscontrata può essere rispondente a una portata molto bassa e pressione limitata”.*

### 3.4 MONITORAGGIO DELLA DIGA

La diga è dotata di un sistema di monitoraggio descritto nel dettaglio nel documento “*Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo – Diga di Cassiglio – Appesantimento Corpo Diga – 5 Stato di consistenza del manufatto*” e a cui si rimanda per ogni ulteriore dettaglio.

Il sistema prevede l’effettuazione delle seguenti misure:

- Spostamenti orizzontali e verticali della diga. Sono monitorati mediante collimazione a partire dall’anno 1965 ad oggi. Gli spostamenti planimetrici in direzione monte-valle e gli spostamenti altimetrici sono misurati con frequenza delle letture mensile, mediante n.2 diversi allineamenti di collimazione, con due punti fissi su pilastri disposti in sponda, fuori dalla zona di imposta della diga, ed 1 mira mobile disposta al centro del coronamento. L’immagine seguente riporta l’ubicazione delle basi e delle mire:



*Planimetria della diga con schemi delle collimazioni*

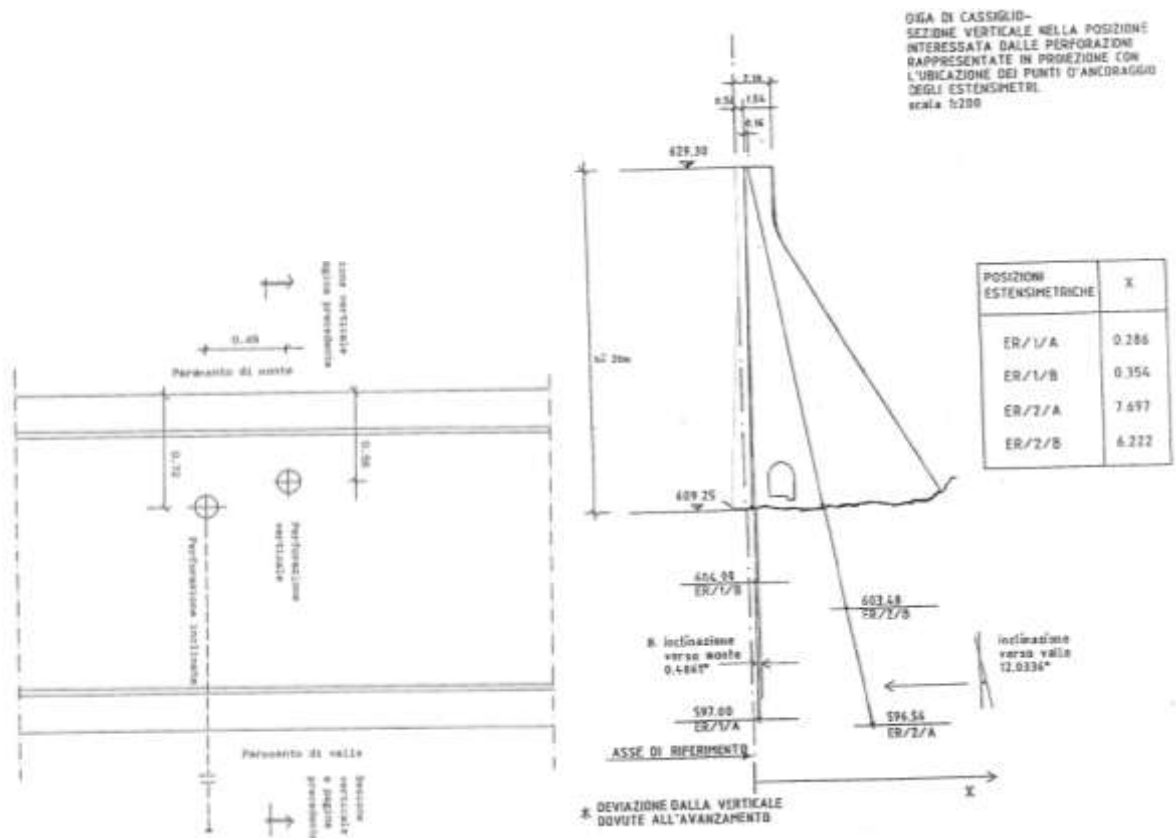
- Deformazione della diga e della roccia d’imposta di fondazione. Sono monitorate mediante quattro basi estensimetriche (aste invar) installate a coppie nel corso dell’anno 1988 nelle due perforazioni S11 e S1V già descritte nei precedenti capitoli. Le perforazioni sono eseguite in sezione maestra (teleacquisizione automatica e manuale con frequenza quindicinale). Gli estensimetri attraversano tutto il corpo diga e si approfondiscono per circa 15 m nella roccia di fondazione e sono ancorati nella roccia a profondità diverse. La prima coppia di estensimetri ER/1/A ed ER/1/B è disposta in posizione pressoché verticale con lunghezza delle basi rispettivamente di 32 e 24 m, mentre la seconda coppia, ER/2/A ed ER/2/B, è inclinata rispetto alla verticale di circa 12° e la lunghezza delle basi è rispettivamente di 33 e 26 m. Le basi più lunghe “A” permettono di rilevare la deformazione della diga e di circa 12 m della fondazione, mentre le basi “B” rilevano la deformazione della diga e dello strato più superficiale della fondazione. La

differenza delle misure delle due basi A-B permette di quantificare la deformazione della roccia compresa tra le zone di ancoraggio.

Dalla elaborazione delle letture estensimetriche sono stati ricavati gli spostamenti planimetrici del coronamento della diga in direzione monte-valle. Queste elaborazioni sono disponibili per il periodo 1989÷2000.

Gli estensimetri installati sono del tipo CD33 ad aste invar. Sono adatti a controllare i movimenti profondi della roccia: in particolare essi misurano le variazioni di distanza tra un riscontro esterno ed uno o più basi di ancoraggio distribuite a profondità diverse entro il foro. Ognuna delle basi è formata da una batteria di aste  $\phi 10$  in acciaio invar, concentrica ad una batteria di aste cave in alluminio  $\phi 1/2''$  che ha la funzione di preservare le prime dall'attrito del terreno. Quindi le aste invar sono libere di scorrere all'interno del tubo in alluminio grazie anche a degli appositi centratori. Un eventuale movimento del terreno è segnalato dalla variazione di misura tra l'asta interna e il riscontro sulla testata estensimetrica. Tale variazione viene misurata sia elettricamente (con trasduttori lineari di spostamento) che meccanicamente (con comparatore centesimale). Per la buona riuscita dell'installazione dello strumento è stata prestata particolare attenzione alla fase di cementazione: si è cementato dal basso verso l'alto in modo da assicurare un completo intasamento; tale operazione, a causa del ritiro del cemento, è stata ripetuta più volte. La testata è stata sigillata con del cemento rapido VICAT R/425 per evitare che l'acqua proveniente dal contatto giunto roccia potesse con il tempo dilavare la cementazione e quindi compromettere le misure.

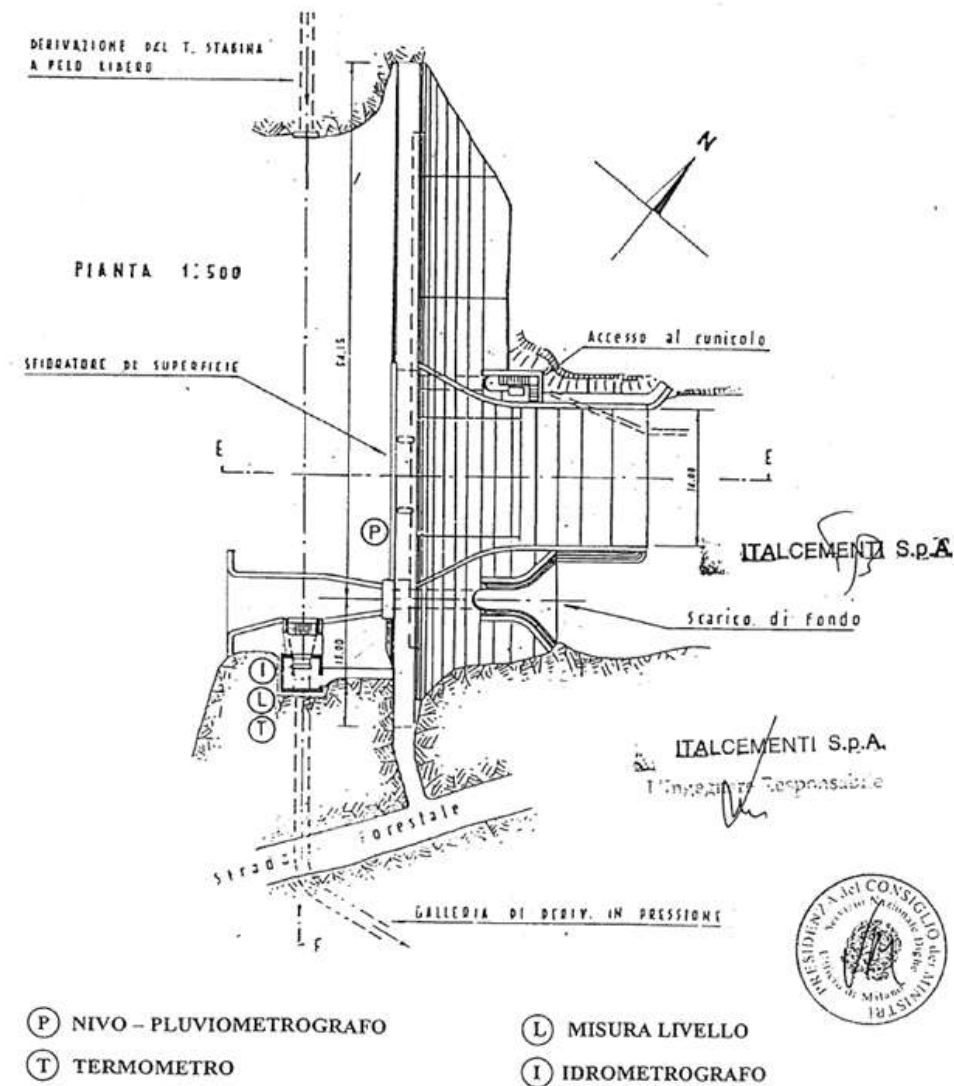
Le immagini di seguito riportate mostrano l'ubicazione degli estensimetri sopra descritti:



A sx dettaglio della pianta e a dx sezione diga con indicata l'ubicazione degli estensimetri

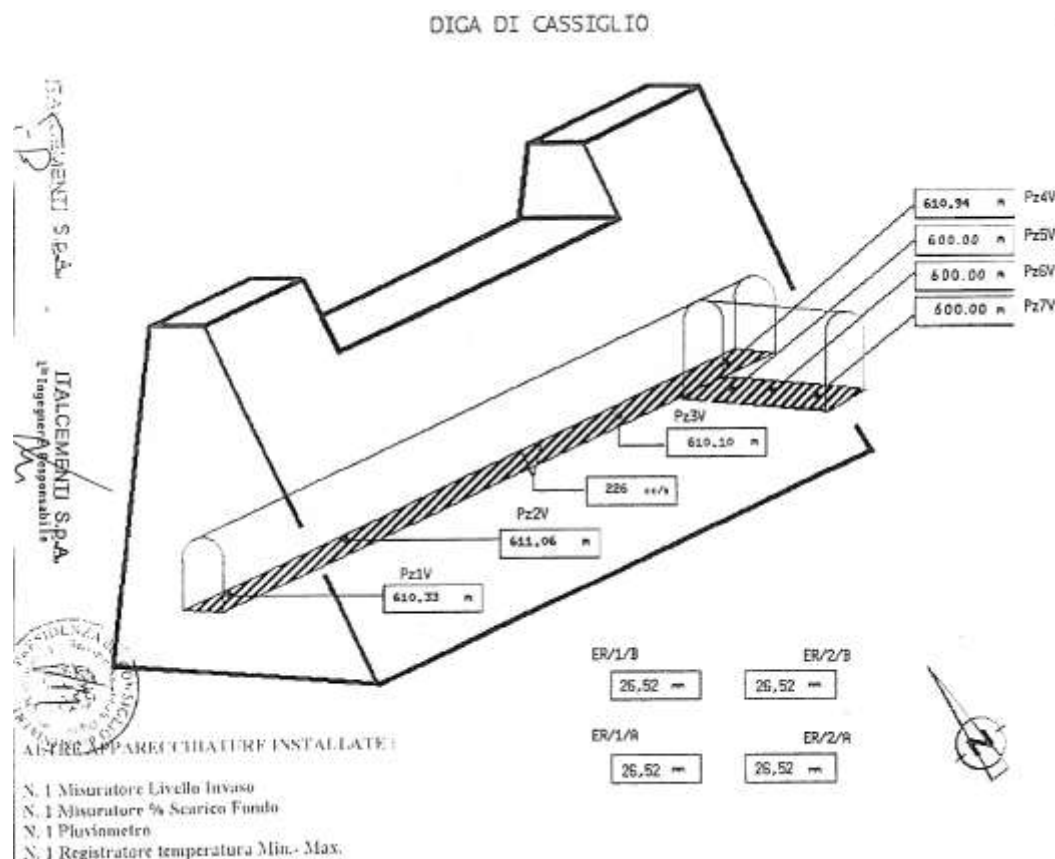


- Le grandezze idrometeorologiche. Sono monitorate con frequenza giornaliera e riguardano il livello di invaso, la temperatura massima e minima dell'aria, la temperatura dell'acqua in superficie ed a 5 metri di profondità, ed infine la quantità della pioggia. Il livello d'invaso è rilevato a vista mediante aste idrometriche disposte sul paramento di monte della diga oppure mediante bilancia dinamometrica di tipo pneumatico, con rilevamento automatico. Di seguito è riportata un immagine con l'ubicazione dei punti di misura delle grandezze idrometeorologiche:



*Ubicazione dei punti di misura delle grandezze idrometeorologiche*

- Le sottopressioni al piano d'imposta. Sono monitorate mediante n.7 piezometri a cella di pressione di tipo elettrico, a lettura automatica e manuale con frequenza settimanale, di cui n.4 disposti nel cunicolo d'ispezione e n.3 nel cunicolo trasversale. Di seguito è riportata un immagine con l'ubicazione dei piezometri:



#### *Ubicazione dei piezometri*

- Le infiltrazioni nel corpo diga. Sono monitorate con frequenza giornaliera, mediante vaschetta di raccolta disposta nel cunicolo d'ispezione, all'intersezione con il cunicolo d'accesso, ed anche munita di stramazzo e sonda di pressione per rilevamento automatico del livello idrico.

#### **3.4.1 Risultati del monitoraggio**

I dati ottenuti dal monitoraggio sono riportati per esteso nelle diverse relazioni rilasciate con cadenza semestrale dall'ente incaricato della gestione del sistema di monitoraggio. A tali relazioni si rimanda per ogni ulteriore chiarimento, di seguito si riportano le osservazioni più significative tratte dalle suddette relazioni.

Dal monitoraggio emerge un comportamento regolare della struttura, che risente principalmente delle variazioni del carico termico; non si sono evidenziati particolari anomalie o fenomeni di deriva nel tempo.

Il livello d'invaso presenta generalmente oscillazioni inferiori al metro attorno alla quota di massima regolazione, le perdite mantengono mediamente un andamento costante attorno a valori assai contenuti.

Gli spostamenti misurati dalla collimazione hanno anch'essi un andamento regolare legato principalmente all'evoluzione della temperatura stagionale.

Gli estensimetri a lunga base, installati nel corso dell'anno 1988, hanno evidenziato un regolare funzionamento ad hanno permesso di riconoscere e valutare con grande affidabilità e precisione il comportamento della diga e della roccia di fondazione; l'andamento delle misure raccolte è strettamente correlato e dipendente dalle variazioni termiche esterne.

### Invaso

Il bacino di Cassiglio è utilizzato con regolazione di tipo giornaliera; le misure del livello di invaso, che sono raccolte a partire dal luglio 1953, oscillano generalmente fra le quote di 623 e 626 m s.m.

L'andamento nell'arco dell'anno del livello d'invaso è caratterizzato generalmente dal mantenimento della quota di massima regolazione (626 m s.m.) nel periodo primaverile, mentre nei restanti periodi dell'anno si registrano variazioni giornaliere di circa 0,5 m a partire dalla quota di massima regolazione.

Si osserva un periodo di completo svaso nei mesi di Luglio, Agosto, Settembre 1987 e Marzo 1995 ed uno svaso parziale fino alla quota 621 m s.m. nei mesi di Settembre-Ottobre 1989.

### Collimazione orizzontale e verticale

Le misure di collimazione orizzontale e verticale sono state eseguite a partire dal Settembre 1964. Dai diagrammi delle misure e della relativa media mobile emerge l'assenza di fenomeni di deriva.

Le misure sono caratterizzate negli ultimi 5 anni, da escursioni annuali molto contenute e di entità inferiore a 1-2 mm, sia in direzione verticale che Monte-Valle ed il valore medio delle misure per la direzione orizzontale e verticale si mantiene mediamente stabile su tutto il periodo preso in esame.

Per la collimazione orizzontale non esiste un apprezzabile correlazione con le misure dell'invaso, mentre è riconoscibile una modesta e coerente correlazione con la temperatura dell'aria, caratterizzata dall'aumentare dello spostamento verso monte al crescere della temperatura. Per la collimazione verticale non si evidenziano particolari correlazioni né con la variazione del livello d'invaso né con la variazione della temperatura dell'aria.

### Estensimetri

Il diagramma delle misure rilevate dagli estensimetri dall'anno 1989 mostra un andamento regolare. Gli andamenti storicamente osservati sono caratterizzati da cicli stabili e ripetitivi nel tempo con escursioni annuali al massimo pari a 2-3 mm, sia per la base verticale che per quella inclinata verso valle. Tali andamenti sono fondamentalmente e logicamente correlati alle variazioni termiche della struttura: evidenziando allungamenti della base nel periodo estivo e analoghi accorcimenti nel periodo invernale. Le misure raccolte da entrambe le basi, per lo stesso foro, evidenziano misure in pratica coincidenti, a conferma dei modesti contributi legati alla deformazione della roccia di fondazione.

Componendo le deformazioni registrate dagli estensimetri si è potuto calcolare lo spostamento orizzontale in direzione monte valle e lo spostamento verticale in direzione alto-basso. Questi spostamenti sono stati confrontati con i medesimi misurati dalla collimazione; tale confronto evidenzia la diversa qualità di risposta fornita dai due sistemi di misura: rispetto alle misure di collimazione le misure estensimetriche presentano una maggiore regolarità e definizione, frutto della maggiore precisione di misura e frequenza d'acquisizione.

### Temperatura dell'aria

L'andamento della temperatura dell'aria è caratterizzato dal classico andamento a sinusoidale tipico del clima continentale. La temperatura media invernale è pari a circa  $-2\div 0^{\circ}\text{C}$ , mentre la temperatura media estiva risulta di circa  $18\div 20^{\circ}\text{C}$ . L'escursione termica giornaliera calcolata come media mensile, è risultata di circa  $10^{\circ}\text{C}$  nei mesi estivi e di circa  $5^{\circ}\text{C}$  nei mesi invernali.

### Temperatura dell'acqua

I valori della temperatura dell'acqua alla profondità di 5 metri sono registrati a partire dal Settembre 1983, mentre la temperatura dell'acqua in superficie è stata registrata a partire dal Gennaio 1968.

Le misure delle temperature in superficie e in profondità presentano andamenti regolari e praticamente coincidenti tra loro, con un'escursione annuale compresa tra  $3^{\circ}\text{C}$  e  $10^{\circ}\text{C}$ .

### Perdite

La misura delle perdite della diga è acquisita a partire dal Luglio 1953. I valori registrati durante i primi anni hanno presentato un andamento decrescente legato alla presenza di alcune perdite di permeazione che vennero contrastate ed eliminate mediante successive campagne di iniezione; negli anni 1953-1957 i valori di perdita registrati sono infatti gradatamente diminuiti passando da 0,5-0,6 l/s dell'anno 1953 a circa 0,1 l/s nell'anno 1957. Successivamente tali valori sono ulteriormente diminuiti assestandosi definitivamente, durante l'anno 1961, attorno al valore di 0,05 l/s; tale valore di perdita è stato registrato per tutti gli anni a seguire.

Durante l'anno 1989 si è avuto un brusco aumento della misura nel periodo da Marzo a Settembre con valori prossimi a 0,5 l/s; tale aumento è da associare all'intervento di ripristino della piena funzionalità dei drenaggi. Dal mese di Ottobre 1989 ad Agosto 1995, con l'approfondimento dei dreni fino a circa 6 m, le perdite sono lievemente aumentate, fino ad attestarsi su valori di circa 0,2-0,3 l/s.

### 3.5 SISTEMA DRENANTE

Il sistema drenante, costituito da canne di drenaggio della struttura  $\phi 125$  mm e da quelle di fondazione  $\phi 215$  mm, con interasse di 2 m, è in buono stato e funziona correttamente. Esso è stato ripristinato e riportato a normativa nell'anno 1989.

#### 3.5.1 Lavori di adeguamento sistema drenante del 1989

Nel 1989 sono stati eseguiti lavori di adeguamento del sistema drenante che oltre a non soddisfare più la normativa vigente dell'epoca, era quasi completamente ostruito da concrezioni calcaree e non convenientemente ripristinabile. Si è perciò provveduto all'impianto di un nuovo sistema drenante sia in corpo diga che in fondazione.

Di seguito è riportata una sintesi delle operazioni di adeguamento del sistema drenante descritte in dettaglio dalla relazione a cui si rimanda per ogni ulteriore chiarimento e dettaglio:

*“Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo – Diga di Cassiglio – Adeguamento sistema drenante e installazione piezometri in fondazione – Redatta da Italcementi - 1989”;*

Sono state eseguite n.21 perforazioni realizzando elementi drenanti del diametro  $\phi 125$  mm in corpo diga e del diametro  $\phi 215$  mm in fondazione.

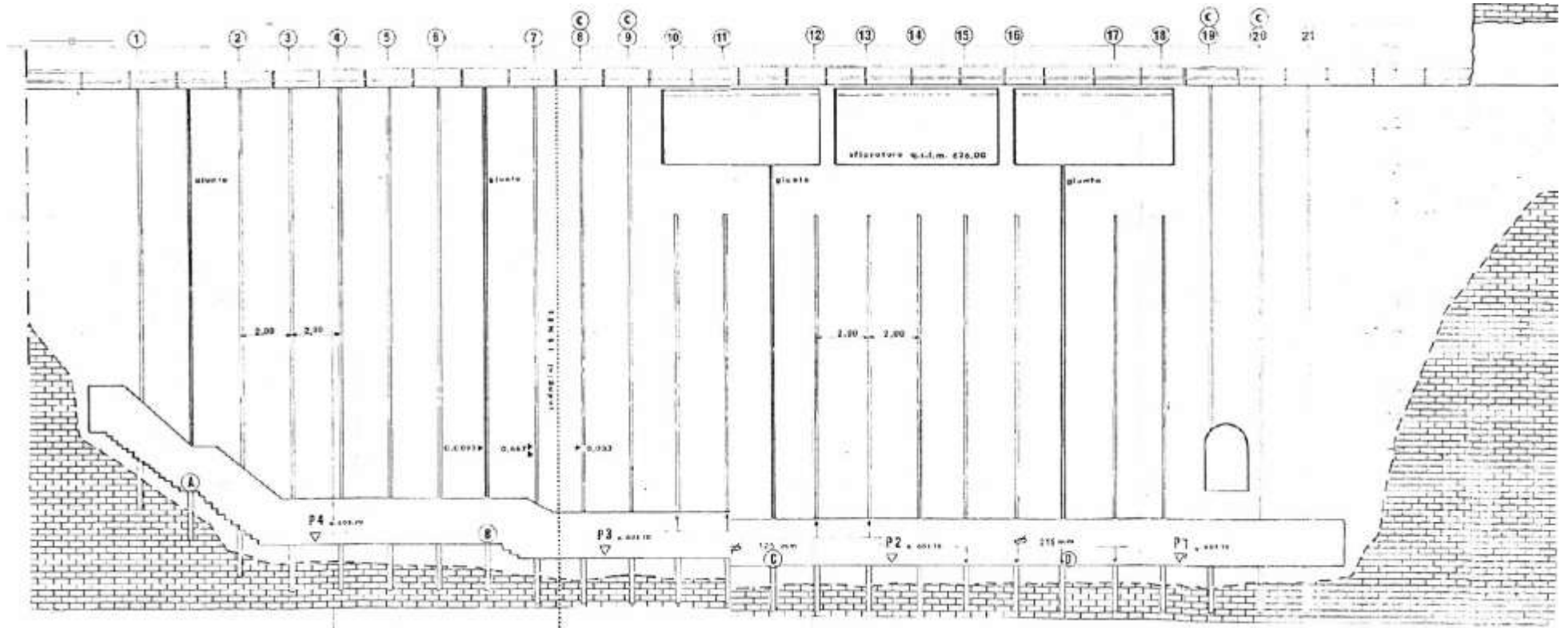
I drenaggi eseguiti dal coronamento in corrispondenza della soglia sfiorante sono stati successivamente chiusi e sigillati per un tratto di 2 m nella parte sommitale.

In fondazione, in corrispondenza dei giunti della soglia sfiorante sono stati eseguiti ulteriori n.2 dreni di diametro  $\phi 215$  mm operando con attrezzatura leggera direttamente da cunicolo. Le perforazioni sono state spinte all'interno della roccia fino ad una profondità pari al 20% del battente massimo di acqua (4 m).

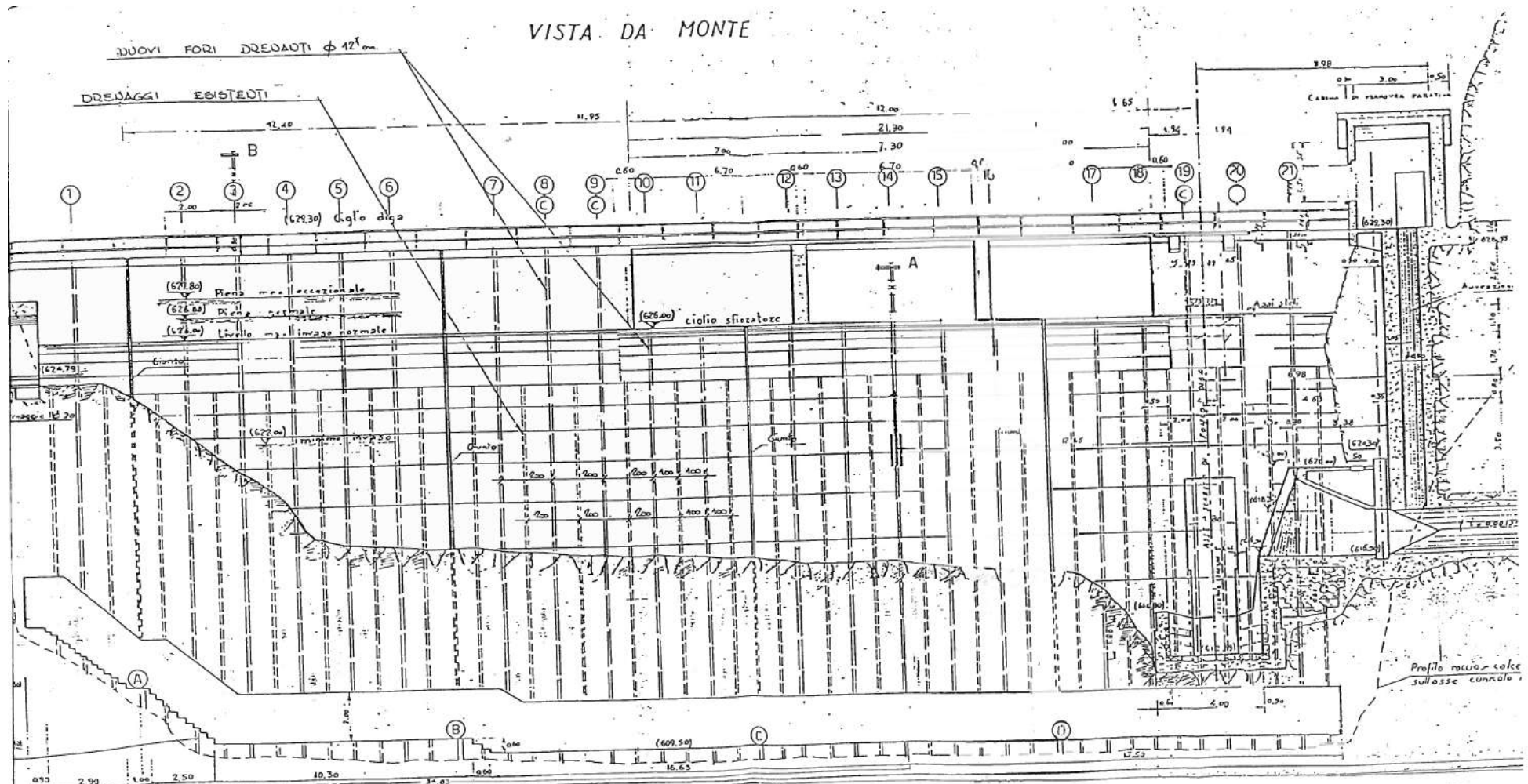
La situazione riscontrata al termine dei lavori è la seguente:

- Infiltrazioni e percolazioni in corpo diga, prescindendo dagli stillicidi, sono concentrate in una zona limitata compresa tra i drenaggi n.6 e n.10 ed intorno ad una quota di 15-16 m dal coronamento;
- I dreni di sottopressione, pur tenendo conto del carico idrostatico ridotto, hanno portate limitate, le perdite sono per trabocco lento dal foro senza regimi turbolenti;
- Il contatto roccia fondazione è, di norma chiuso e ben collegato, fa eccezione l'area nell'intorno dei dreni n.8 e n.9 (dove è stata svolta anche l'indagine diretta ISMES- Serie 1);
- Lo stato del calcestruzzo si presenta ad un esame visivo generalmente in buono stato, tenuto conto anche dell'età dell'opera e con le eccezioni rilevate nella stratigrafie in particolare in corrispondenza dei carotaggi n.8 e n.9.

Le immagini seguenti illustrano il sistema di drenaggio originario e quello aggiunto con i lavori eseguiti nel 1989:



*Vista da monte con riportata l'ubicazione del sistema di drenaggio originario*



Vista da monte con riportata l'ubicazione del sistema di drenaggio originario e quello aggiunto nel 1989

### 3.6 INTERVENTO DI IMPERMEABILIZZAZIONE

Nel 1989 sono state eseguiti trattamenti di bonifica del calcestruzzo e del contatto roccia-calcestruzzo per limitare le infiltrazioni e le percolazioni che sono state ravvisate durante le operazioni di realizzazione del nuovo sistema drenante. Il trattamento è stato realizzato mediante iniezioni di miscela cementizia e miscela acrilica. Le iniezioni sono state realizzate a partire dal coronamento della diga, a quota 629.3 m nel masso di calcestruzzo, a monte del nuovo sistema drenante. Il tratto interessato dall'intervento, di circa 10 m, è compreso tra i drenaggi 6, 7, 8, 9 e il giunto B. Ciascun foro è stato eseguito attraverso 20.3 m di calcestruzzo (corpo diga) e per 3.0 m in roccia fino alla quota di 606 m.

Con tale intervento si sono limitate le infiltrazioni e percolazioni ravvisate in sito, ed in particolare allo stramazzone di controllo, a valle dei drenaggi: riferendoci alle portate di esercizio di filtrazione cioè 2.5 l/min, erano state registrate perdite di circa 34.2 l/min, che con l'iniezione cementizia, sono state ridotte a 3.3 l/min ed infine a 2.8 l/min con la miscela acrilica. Pertanto sono stati raggiunti assorbimenti globali contenuti nei limiti previsti dal progetto.

Per ogni ulteriore chiarimento e dettaglio sugli interventi di impermeabilizzazione realizzati si rimanda alla seguente relazione:

*“Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo – Diga di Cassiglio – Intervento di impermeabilizzazione – Redatta da Italcementi - 1989”*

### 3.7 INTERRIMENTO

I dati e le informazioni riguardanti l'interrimento del bacino sono stati ricavati dal progetto di gestione dell'invaso approvato con Decreto n. 8848 del 03/10/2013 dalla Regione Lombardia.

Dai documenti del progetto di gestione dell'invaso è stato dedotto quanto di seguito sinteticamente riportato. Una valutazione del volume o della velocità di interrimento che ha interessato il bacino è stata effettuata in modo indiretto confrontando la capacità originale dell'invaso alla quota di 625.1 m ( riferimento batimetrico), stimata in 63152 m<sup>3</sup> sulla base di informazioni topografiche precedenti la costruzione della diga e la capacità di 38175 m<sup>3</sup> valutata nel corso di una serie di indagini condotte nel 2005 dal Centro Studi Biologia e Ambiente di Erba (CO). Partendo da questi dati è stata stimato il volume di sedimenti presenti nell'invaso in 24977 m<sup>3</sup>.

Poichè lo sbarramento era in esercizio da 52 anni circa e considerato il fatto che i rilievi batimetrici effettuati nel 2005 hanno indicato un volume pari a 25000 m<sup>3</sup> di materiale depositato nel serbatoio a cui vanno aggiunti circa 16000 m<sup>3</sup> di materiale rimosso durante i precedenti lavori di pulizia, risulta che nell'arco di vita dell'invaso si sono depositati circa 800 m<sup>3</sup> all'anno.

Dai documenti di progetto dell'invaso è previsto che le operazioni di drenaggio meccanico per la rimozione del materiale depositato siano eseguite ogni 15 anni circa.

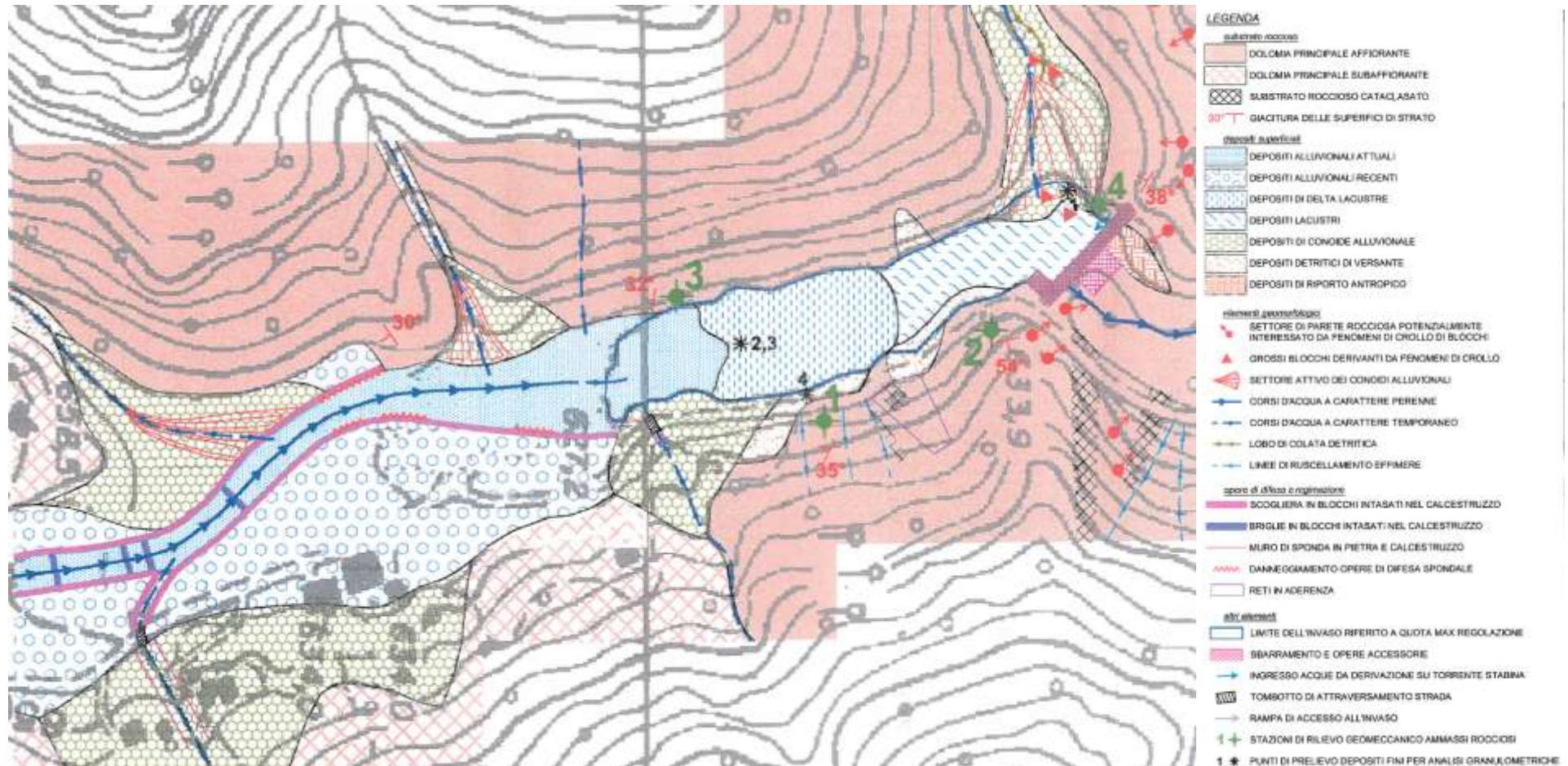
La caratterizzazione granulometriche e tessiture dei depositi superficiali presenti nell'area dell'invaso di Cassiglio e nell'immediato intorno sono state valutate con l'osservazione diretta di terreno ed analisi



granulometriche di laboratorio; in particolare queste ultime hanno interessato la frazione più fine (sabbiosa-limoso) dei depositi.

Dalle analisi dei sedimenti presenti nell'invaso di Cassiglio, emerge un quadro tipico associato ai bacini di montagna a forte trasporto solido, caratterizzati da depositi deltizi molto sviluppati, ma limitati in prossimità dello sbocco a lago degli immissari e modesti depositi per lo più di materiale molto fine vicino alla diga e nelle parti più lontane dagli immissari.

I “*depositi lacustri*” (vedi tavola seguente) occupano il fondo dell'invaso nel tratto indicativamente compreso tra la metà e lo sbarramento. Si tratta di depositi fini costituiti da limo (79%) sabbioso (21%). La sabbia è in prevalenza fine e finissima, quella grossolana è assente. Lo spessore di tali depositi è limitato (20-30 cm circa all'anno 2009) in quanto sul fondo sono ancora riconoscibili alcune strutture presenti prima della realizzazione dell'invaso (in particolare il corpo di una briglia). Considerando che la precedente rimozione di materiale dall'invaso è avvenuta nel 1995 significa che tali depositi si sono accumulati in circa 14 anni. Per tali depositi possono essere considerati come rappresentativi i seguenti parametri: peso di volume  $\gamma' = 16 \text{ kN/m}^3$ , angolo di attrito  $\phi = 25-26^\circ$ , coesione  $c = 5 \text{ kPa}$ .



*Invaso di Cassiglio: Indagine geologica relativa alla valutazione delle condizioni di stabilità delle sponde e alla stima della distribuzione granulometrica dei depositi al suo interno*

## 4. OPERA DI APPESANTIMENTO

### 4.1 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO

L'adeguamento statico-funzionale della diga consta in un getto di appesantimento in cls sul lato del paramento di monte di spessore variabile in funzione dell'altezza. Partendo dal substrato roccioso, posto nella sezione di massima altezza a quota 608,70 m.s.l.m., fino a quota 612,30 m.s.l.m., si prevede un getto avente uno spessore di base pari a 4 metri e superficie di contatto con l'acqua verticale. Da quota 612,30 m.s.l.m. fino a quota 624,00 m.s.l.m., lo spessore del paramento di monte si riduce da 3,53 m a 2 m, esso poi rimane costante fino alla sommità per la sezione emergente, mentre per quella tracimabile il getto si raccorda con il precedente ciglio sfiorante. Nel nuovo appesantimento è previsto un cunicolo che corre parallelo a quello esistente: esso raccoglie le perdite dei dreni di fondazione (passo 2,0 m e diametro  $\Phi$  215 mm) e dei dreni nel nuovo paramento del corpo diga.

Il collegamento tra vecchio e nuovo getto viene assicurato tramite barre di acciaio inox ad aderenza migliorata, immorsate con resina nel corpo diga esistente per una lunghezza pari a 120 cm (110 cm nella parte più alta), e sporgenti 150 cm (fino a 80 cm nella parte più alta). Il passo delle barre varia con la distanza dalla superficie di base: partendo con ferri ogni 75/75 cm immediatamente sopra il substrato roccioso, si passa ad una maglia 75/150 cm ed infine a 150/150 cm.

La superficie di contatto tra vecchio e nuovo getto viene preparata tramite idrodemolizione e stesura di uno strato di resina.

Il nuovo appesantimento è a conci, posizionati in corrispondenza di quelli esistenti sul corpo diga, ed aventi larghezza massima pari a circa 12 m. Tra concio e concio si prevede la realizzazione del giunto mediante l'interposizione di una doppia membrana elastomerica bitumata di spessore 4 mm: la sigillatura dei giunti verticali avviene esternamente mediante un sistema di tenuta a bandella. Lungo il perimetro delle superfici di ripresa di getto si posa un profilo idroespandente, tale da delimitare perfettamente la porzione di calcestruzzo interessata.

La nuova portata di piena considerata nei calcoli idraulici ha reso necessario l'innalzamento del vecchio corpo diga e della passerella sullo sfioratore per avere un franco netto regolamentare. Si fa comunque notare che non è stata modificata la quota del ciglio sfiorante. Pertanto il nuovo coronamento ha quota 630,10 m.s.l.m., con una variazione rispetto al precedente di 80 cm. Per la particolare conformazione dell'ingresso alla diga, che avviene tramite galleria dalla strada forestale, non è stato possibile estendere tale intervento a tutta la lunghezza del coronamento: sono state comunque previste delle strutture a tenuta idraulica in calcestruzzo, con estradosso pure a quota 630,10 m, per mantenere inalterato il franco netto regolamentare.

Il raccordo tra la quota di ingresso in galleria ed il nuovo coronamento è realizzato tramite una rampa con pendenza 8,8% che consente l'accesso alla passerella anche ai mezzi di manutenzione. La casetta di guardia con la sala comandi posta a lato della diga, in corrispondenza dell'opera di presa da cui parte la galleria in

pressione per la centrale di Olmo al Brembo, non verrà modificata. L'unico intervento necessario risulta essere il posizionamento di un tubo metallico per spostare più in alto la presa d'aria della condotta forzata: l'attuale presa d'aria situata sotto la casetta, infatti, risulterebbe sommersa in caso di piena millenaria. Le chiusure sul pavimento, a quota 629,30 m, sono realizzate a tenuta.

Per allargare la luce libera tra le pile fino alla distanza regolamentare si demoliscono gli attuali due sostegni e se ne ricostruirà solamente uno in posizione centrale, opportunamente sagomato per meglio accompagnare, in caso di sfioro, la vena fluida sul paramento di valle.

La nuova portata di progetto rende necessaria inoltre la demolizione della vecchia vasca di deflusso e la costruzione di una nuova vasca dissipatrice. Sulla base dei calcoli effettuati, tale vasca si estende per circa 34 m dal giunto con il corpo diga, mantenendo la larghezza attuale. Alla fine della vasca, un gradino di 3,10m (che si estende per altri 7,15 m) consente la dissipazione dell'energia accumulata mantenendo il risalto idraulico entro il manufatto e restituendo l'acqua in alveo alla velocità critica. In corrispondenza del gradino ed a livello della pavimentazione, una tubazione di diametro 600 mm permette di mantenere vuota la vasca in condizioni non sfioranti. Muri di altezza pari a circa 7,0 m consentono di contenere la vena fluida, anche in condizioni estreme di piena millenaria. La vasca, di spessore 130 cm, è ancorata stabilmente al fondo tramite barre in acciaio inox inghisati per 120 cm nella roccia dell'alveo, e disposti a quinconce con passo 150 cm.

In corrispondenza dello scarico di fondo si lascia nel nuovo getto un'apertura (230\*180□300 cm) con architrave opportunamente smussata ed imbocco ad imbuto per il regolare deflusso dell'acqua. Per poter effettuare lo sfilamento e quindi la manutenzione della paratoia, è prevista una feritoia a tutta altezza avente dimensione 200\*90 cm, in cui corrono anche le aste di comando della serranda.

#### Dati della diga e del serbatoio modificati con il progetto di appesantimento:

Alcuni dati significativi del serbatoio sono stati modificati a seguito della rivalutazione idrologica proposta dal Servizio Idrografico e Mareografico di Parma, recepita nelle verifiche di cui alla presente:

- Quota di massimo invaso: 628.62 m s.m.
- Quota coronamento: 630.00 m s.m.
- Portata di massima piena di progetto: 170 m<sup>3</sup>/s
- Tempo di ritorno: 1000 anni

Per ogni ulteriore chiarimento sull'opera di appesantimento si rimanda alle tavole progettuali di seguito elencate e riportate in allegato:

AUTORE	FILE E REVISIONE	TITOLO
CTG	980-003-708_00	Corografia
CTG	980-003-723_00	Situazione attuale - Planimetria 1:100
CTG	980-003-729_00	Planimetria generale
CTG	980-003-730_02	Sezione e vista sullo scarico di fondo
Pegoraro	980-003-731_04	Particolari illuminazione e barriere a quota coronamento
Pegoraro	980-003-732_02	Planimetria 1:100
Pegoraro	980-003-733_02	Sezione tracimabile e sezione emergente - Carpenteria
Pegoraro	980-003-734_02	Vista da monte - Armatura di connessione
Pegoraro	980-003-735_02	Sezione tracimabile e sezione emergente - Armatura di connessione
Pegoraro	980-003-736_02	Sezione tracimabile e sezione emergente - Armatura
Pegoraro	980-003-737_02	Particolare giunto
Pegoraro	980-003-739_02	Schema sistema drenante
Pegoraro	980-003-742_01	Sezione longitudinale tracimabile
Pegoraro	980-003-800_00	Conci - Vista da monte - Posizionamento conci
Pegoraro	980-003-801_00	Conci - Sezione tracimabile e emergente
Pegoraro	980-003-802_00	Modifiche cabina di manovra

- Rel. CAS-R-00: “*DIGA DI CASSIGLIO – Relazione generale*” – Data 20/02/2018 – Redatta da Ing. Marco Pegoraro;
- Rel. CAS-R-02\_1: “*DIGA DI CASSIGLIO – Organizzazione preliminare cantiere - Cronoprogramma demolizioni e getti di appesantimento*” – Data 12/01/2018 – Redatta da Ing. Marco Pegoraro;
- Rel. CAS-R-03\_1: “*DIGA DI CASSIGLIO – Trattamenti superficiali calcestruzzo*” – Data 04/12/2017 – Redatta da Ing. Marco Pegoraro;
- Rel. CAS-R-04\_1: “*DIGA DI CASSIGLIO – Programma preliminare di sperimentazione su materiali e getti e prove in corso d'opera*” – Data 11/1/2018 – Redatta da Ing. Marco Pegoraro;
- RT-038-2018 “*Diga di Cassiglio – Progetto del calcestruzzo*” – Anno 2018 – Redatta da Ing. Paolo Panzeri;
- “*Italgen – Diga di Cassiglio – Olmo al Brembo (BG) – Progetto Appesantimento della Diga – Relazione Geotecnica / Gennaio 2018 / Redatta dall'Ing. Stefano Guido e Dr. Geol. Andrea Martignoni*”

Fanno parte della serie storica del progetto anche i seguenti documenti e relazioni a cui si rimanda per ogni chiarimento o dettaglio:

- Rel.2/3: “Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo – DIGA DI CASSIGLIO – APPESANTIMENTO CORPO DIGA – 2/3 – Sintesi geologica/Sintesi geotecnica” – Anno 2001 – Redatta da CTG - Dott. F.Bailo;
- Rel.4: “Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo – DIGA DI CASSIGLIO – APPESANTIMENTO CORPO DIGA – 4 – Relazione idrologica (rev.1)” – Anno 2002 – Redatta da CTG/SICV;
- Rel.10: “Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo – DIGA DI CASSIGLIO – APPESANTIMENTO CORPO DIGA – 10 – Relazione idraulica integrativa” – Anno 2005 – Redatta da CTG / DCTI / SICV;
- Rel.11: “Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo – DIGA DI CASSIGLIO – APPESANTIMENTO CORPO DIGA – 11 – Indagini geostrukturali e geomeccaniche sulla roccia di fondazione” – Anno 2005 – Redatta da CTG – Dott. F.Bailo - Dott. G.Paris;
- Rel.12: “Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo – DIGA DI CASSIGLIO – APPESANTIMENTO CORPO DIGA – 12 – Studio su modello idraulico delle opere di sfioro e di dissipazione della diga di Cassiglio” – Anno 2006 – Redatta da CTG – Università degli Studi di Pavoda Dipartimento di Ingegneria IMAGE

Fanno altresì parte i seguenti allegati alle suddette relazioni:

1. ISMES – RAT-DPM-596/95, Rev.00 – 13.11.1995 - Diga di Cassiglio – Rilievi con sonda televisiva in fori di sondaggio
2. CTG/SSEO/d.BAI/bai – dott. F. Bailo - 19.01.1996 – Diga di Cassiglio – Rilievi con sonda televisiva in fori di sondaggio – Commento alla relazione ISMES di cui sopra
3. CTG/Direzione Laboratori/Servizio Analisi e Valutazione Materiali L.V.M. – Relazione n° 34 – Geom. C. Fogaccia ing. P. Ursella - 12.10.1998 - Diga di Cassiglio – Stato di conservazione del paramento di monte
4. ITC – Dott. Antonio Torrente – 04.1951 – Relazione geognostica
5. ISMES – RAT-DIG-013, Rev.00 – 03.1988 – Diga di Cassiglio – Indagini geotecniche e installazione di strumentazione
6. ISMES – REL-DGM-031, Rev.00 – 29.06.1988 – Diga di Cassiglio – Indagini sulla muratura in calcestruzzo e nella roccia di fondazione mediante prove di laboratorio su campioni
7. ISMES – RAT-DGF-018, Rev.00 – 14.06.1988 – Diga di Cassiglio – Indagini geofisiche con metodi sonici
8. Italcementi – 10.05.1989 – dott. Rovaris – Adeguamento sistema drenante e installazione piezometri in fondazione
9. Italcementi – Relazione n° 5 – 18.01.1990 – ing. P. Ursella p.ch. G. Moretti – Indagine sul calcestruzzo della diga di Cassiglio – Prove di laboratorio su campioni di carote
11. Italcementi – Indagine sul calcestruzzo – Prove ufficiali di laboratorio 1993
12. Rodio – Relazione n° 21084 – 10.10.1989 – Diga di Cassiglio - Intervento di impermeabilizzazione
13. ALLEGATO 1 (SO.GE.TEC.) - Sondaggi e prove di permeabilità - 2005;
14. ALLEGATO 2 (SIAL.TEC ENGINEERING) - Prove dilatometriche e prove di laboratorio su campioni di roccia – 2005.

#### 4.2 CALCESTRUZZO DELL'APPESANTIMENTO

Il calcestruzzo dell'opera di appesantimento è di classe C25/30. Le caratteristiche dei materiali per la confezione del calcestruzzo sono riportate nel seguente documento a cui si rimanda per ogni dettaglio:

RT-038-2018 “Diga di Cassiglio – Progetto del calcestruzzo” – Anno 2018 – Redatta da Ing. Paolo Panzeri

### 4.3 VERIFICA DEI DISPOSITIVI DI SCARICO DELLA DIGA

Lo studio degli aspetti idrologici della diga di Cassiglio è trattato nelle seguenti relazioni a cui si rimanda per ogni ulteriore chiarimento e dettaglio:

*“Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo – Diga di Cassiglio – Appesantimento corpo diga – 4 / Relazione idrologica – Redatta da CTG / Italcementi Group”;*

*“Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo – Diga di Cassiglio – Appesantimento corpo diga – 12 / Studio su modello idraulico delle opere di sfioro e di dissipazione della diga di Cassiglio – Redatta da CTG / Italcementi Group”.*

Un aggiornamento del progetto dei dispositivi di scarico della diga rispetto a quanto previsto nel progetto originario si è reso necessario per rispettare le indicazioni delle nuove norme tecniche per la progettazione e costruzione degli sbarramenti di ritenuta che impongono di tener conto della piena corrispondente al periodo di ritorno di 1000 anni.

Mentre infatti la portata di piena allo sfioro degli anni 50 (anni di costruzione della diga) era stata assunta sulla base dei dati pluviometrici in  $Q=100\text{ m}^3/\text{s}$ , per la piena millenaria si è adottato il valore elaborato, pur con margini di prudenza elevata, dal Servizio idrografico e mareografico di Parma in  $Q=170\text{ m}^3/\text{s}$ .

Il dimensionamento e la verifica delle opere di sfioro e di dissipazione della diga in queste condizioni è stato affrontato attraverso uno studio su modello idraulico affidato al Dipartimento di Ingegneria Idraulica, marittima Ambientale e Geotecnica dell'Università di Padova.

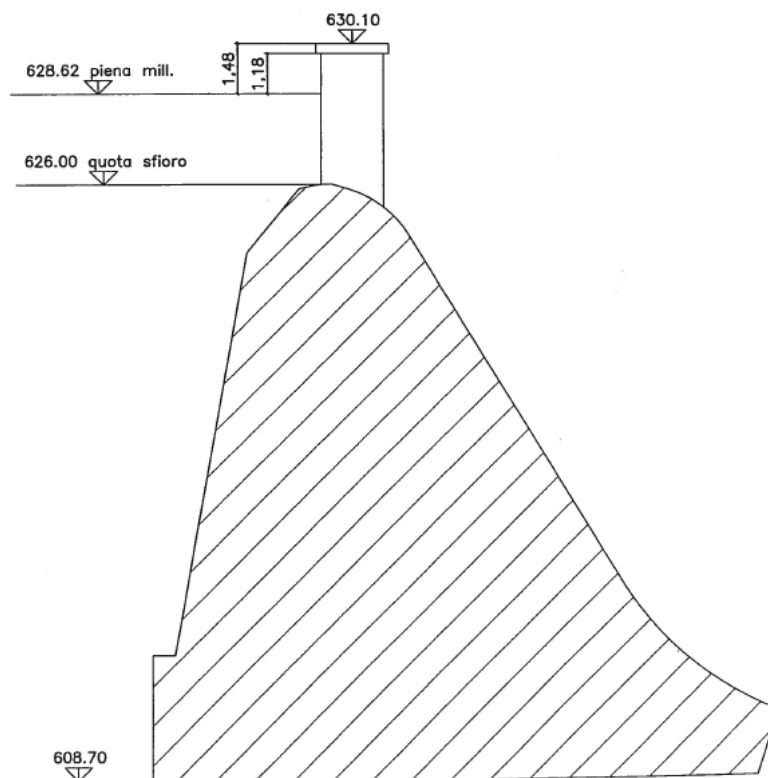
Nel modello lo scarico di superficie è costituito da uno sfioratore a soglia libera a quota 626,00 m s.m.m. sagomato secondo un profilo Creager-Scimemi dello sviluppo complessivo di 21,3 m. Il profilo Creager-Scimemi dello sfioratore è raccordato con il paramento di valle a pendenza costante  $i=0,61$  e, successivamente, con un arco di cerchio di raggio 12 m, fino al fondo della vasca di dissipazione posto a quota 608,18 m s.m.m. Dal punto di vista planimetrico la vasca di dissipazione si stringe da 21,30 m (a quota 626,00 m s.m.m.) a 14,00 m (a quota 608,18 m s.m.m.) con una opportuna sagomatura dei muri di contenimento laterali.

Per la vasca di dissipazione larga 14 m si sono studiate diverse lunghezze, allungandola nella configurazione definitiva, da 14 m a 34 m, con un gradino finale che risultava sagomato con soglia piana a forma trapezia con sviluppo planimetrico di circa 3,6 m e sommità a quota 311,10 m. La sommità dei muri laterali della vasca è stata portata a quota 615 m.

Con la portata millenaria  $Q=170\text{ m}^3/\text{s}$ , il livello massimo di invaso raggiunge quota 628,62 m s.l.m.. Poiché il piano di coronamento attuale è a quota +629,3 m s.l.m., il franco netto risulterebbe  $f=0,68\text{ m}$ , inferiore a quello consentito dalla norma. Per tale motivo è stato previsto l'innalzamento del piano di coronamento, e quindi anche della passerella, fino a quota 630,1 m s.l.m.. Il franco netto risulta così essere  $f=1,48\text{ m}$ , e la vena sfiorante sulla sezione tracimabile ha un franco di 1,18 m rispetto all'intradosso della passerella. Si fa notare che la quota di sfioro e di massimo invaso non viene modificata (626 m s.l.m.).

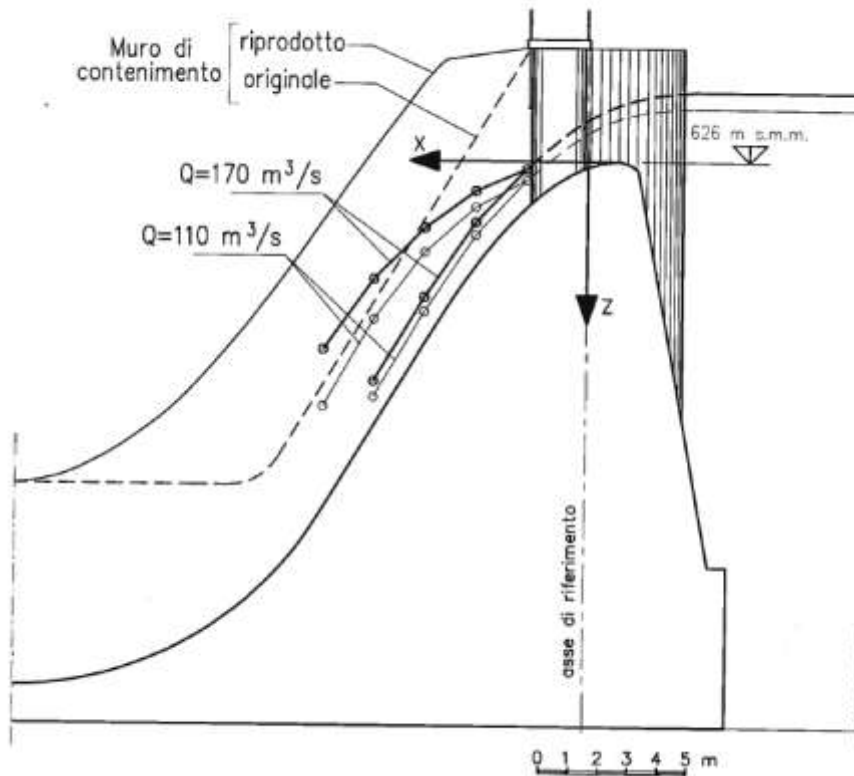
Con tale configurazione si sono ottenuti i seguenti risultati:

- In corrispondenza della portata di piena millenaria e in condizioni stazionarie dello scarico di superficie e della vasca di dissipazione la quota del lago risulta di 628,41 m inferiore a quella prevista per il massimo invaso pari a 628,62.
- La quota di 615,00 m prevista per la sommità dei muri laterali della vasca di dissipazione è risultata adeguata a contenere il risalto; inoltre gli effetti del rigurgito legati alla risalita dell'acqua nel tratto dell'alveo in destra alla vasca di dissipazione, attuale sede dello scarico di fondo, sono risultati estremamente limitati.
- L'altezza attuale dei muri laterali sul corpo diga è risultata inadeguata a contenere il sopralzo del profilo liquido in corrispondenza dei muri stessi come risulta dalla tabella allegata; i muri saranno dunque sopraelevati come indicato nel disegno allegato.
- I disturbi creati dalla pila di sostegno della passerella che sostituisce le due attualmente esistenti non richiedono particolari interventi nella configurazione della testata.



Sezione tracimabile con livello indicato il livello della piena millenaria e il franco disponibile

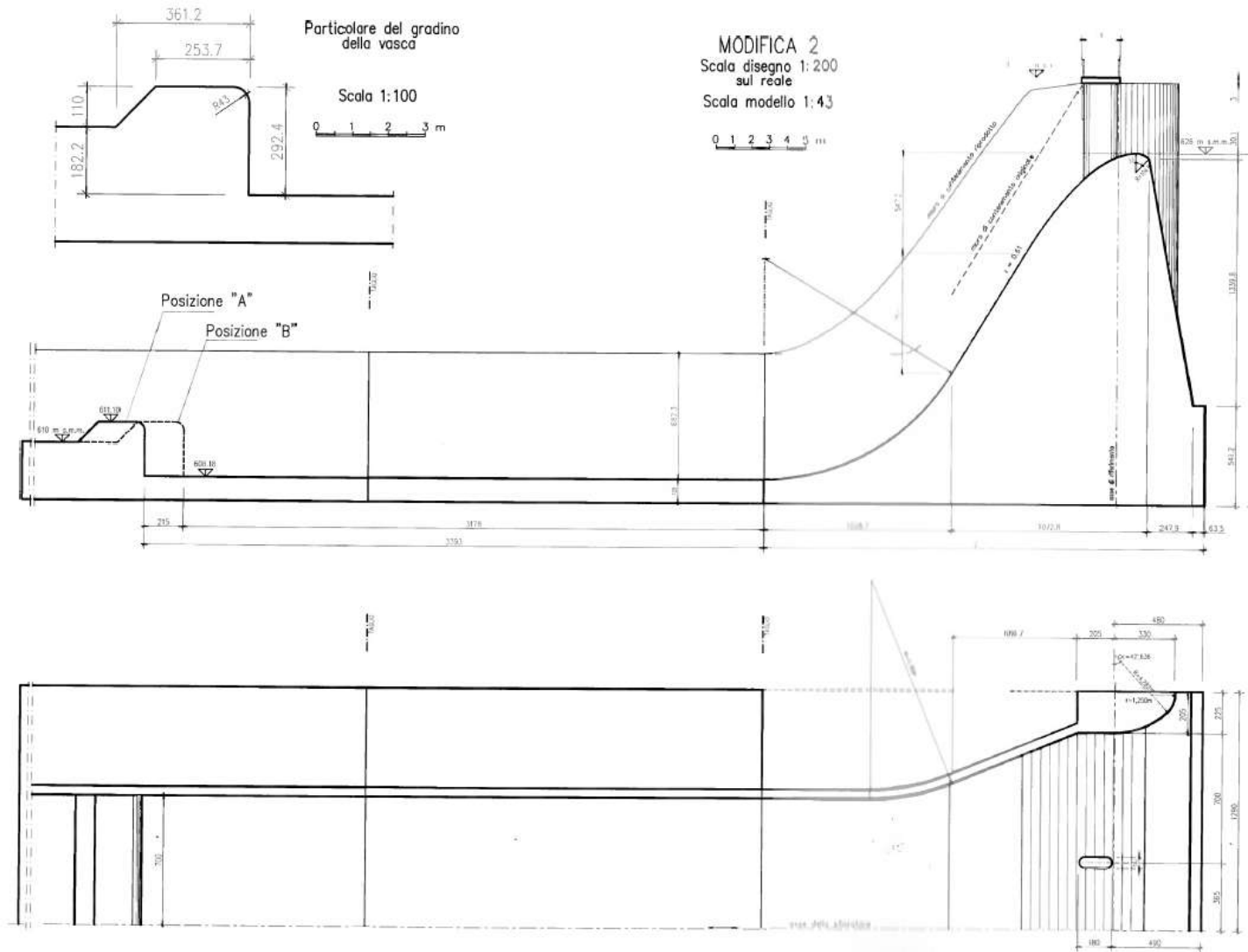




Rilievo del profilo della vena sullo scivolo a ridosso del muro e in condizione indisturbata per le portate su prototipo di 110 e 170 m<sup>3</sup>/s

Q [m <sup>3</sup> /s]	X1=205 [cm]	X2=377 [cm]	X3=549 [cm]	X4=721 [cm]	X5=893 [cm]	
110	Z1=65	Z2=156	Z3=309	Z4=535	Z5=832	A ridosso del muro
170	Z1=26	Z2=101	Z3=227	Z4=400	Z5=639	
110	Z1=65	Z2=250	Z3=510	Z4=800	-	In condizione indisturbata
170	Z1=26	Z2=206	Z3=461	Z4=745	-	

Profilo della vena sullo scivolo a ridosso del muro e in condizione indisturbata per le portate su prototipo di 110 e 170 m<sup>3</sup>/s



Profilo sfiorante della diga e geometria della vasca di dissipazione

MODULARIO  
P.C.M. - S.I.M. - 5

## ALLEGATO 1

MOD. 5

Presidenza del Consiglio dei Ministri

PARMA

UFFICIO IDROGRAFICO E MAREOGRAFICO

PARMA

Di

N.°

SHL

Proposta al Foglio del

N.°

Allegati

Spett.le CTG Italcementi  
Via G. Camozzi, 124  
24121 Bergamo  
Alla c.a. dell'ing. Marco Pegoraro

**OGGETTO:** Portate centennale, cinquecentennale e millenaria del torrente  
Cassiglio alla sezione dello sbarramento di Cassiglio

e p.c. Uff. Idr. del Po (sez. di Milano)  
Via Marina 5, Milano

Provv. OO.PP.  
Via Marina 5, Milano

Con riferimento alla richiesta del 05.12.95 della C.T.G. S.p.A. si fa presente che questo Ufficio non dispone attualmente di stazioni idrometrografiche né per la misura di portate nelle sezioni fluviali indicate in oggetto.

Le serie storiche delle portate, disponibili per il passato, presentano periodi di osservazione troppo brevi per poter effettuare un'affidabile regolarizzazione delle portate al colmo o quantomeno per permettere di utilizzare soltanto tale metodo di calcolo.

Di conseguenza i valori delle portate di piena sono stati determinati tenendo conto sia di metodi diretti che indiretti e per analogia con le caratteristiche idrologiche di bacini similari.

Dalle elaborazioni di carattere statistico-probabilistico ed empirico si sono ricavati i seguenti valori:

**Torrente Cassiglio alla sezione dello sbarramento di Cassiglio:**

Bacino imbrifero direttamente sotteso: circa 11 kmq  
Portata con tempo di ritorno centennale: 135 mc/s  
Portata con tempo di ritorno cinquecentennale: 160 mc/s  
Portata con tempo di ritorno millenario: 170 mc/s

E' d'obbligo sottolineare che le elaborazioni di cui sopra sono il risultato delle attuali disponibilità di dati e conoscenze, che la carenza delle stesse per il periodo più recente, soprattutto per quanto riguarda i regimi delle portate, conducono a risultati non esenti da margini di incertezza.

Si raccomanda pertanto l'adozione di franchi e coefficienti di sicurezza sovradimensionati per tutte quelle opere, impianti o parte di essi che abbiano particolare attinenza con la pubblica incolumità, con particolare riguardo per quanto concerne il materiale trasportato in sospensione o in superficie dalla corrente, in special modo nel caso di gallerie o di copertura alvei.

IL DIRETTORE  
Dott. Ing. LUIGI CIARMATORI

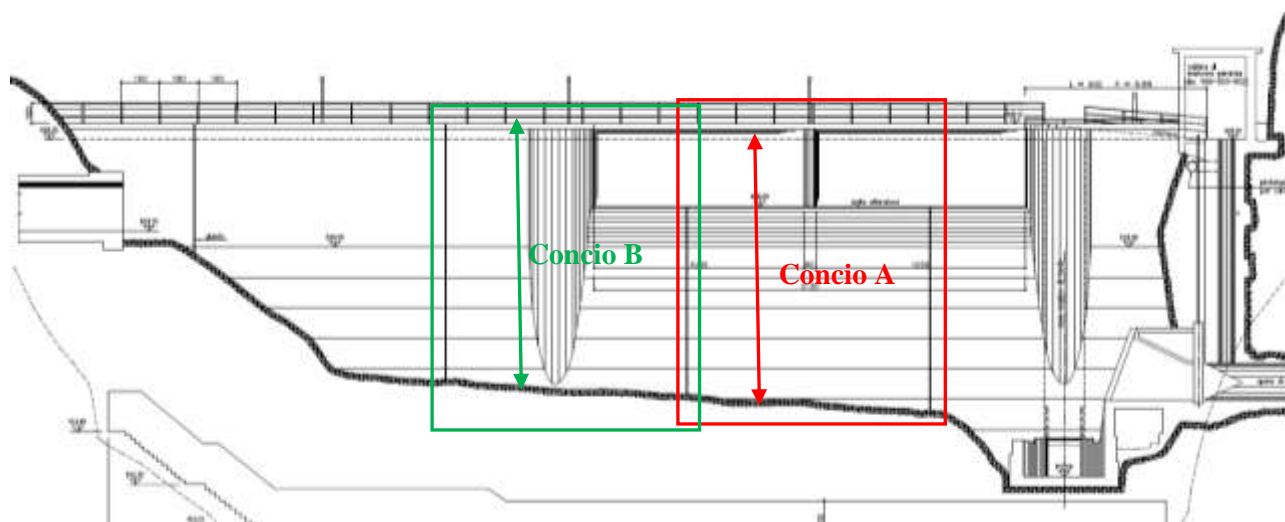
Portate calcolate dal Servizio Idrografico e Mareografico di Parma

## 5. VERIFICHE DELLA SICUREZZA E DELLE PRESTAZIONI DELLA DIGA APPESANTITA IN ACCORDO AL D.M. 26/06/2014

Le verifiche sono state eseguite sia sulla diga nella sua attuale configurazione che nella condizione finale di diga appesantita in accordo con la normativa vigente:

- D.M. 26/06/2014 “*Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)*” in accordo al D.M. 14/01/2008 coordinato con la Circolare esplicativa n.617 del 2/02/2009

Le verifiche hanno riguardato due sezioni caratteristiche dello sviluppo della diga: la “sezione tracimabile” appartenente ad un concio centrale dello sbarramento (concio A) rappresentativa della zona di sfioro superficiale e la “sezione emergente” appartenente ad un concio anch’esso centrale (concio B) e rappresentativa delle zone di contenimento dell’invaso.



*Ubicazione del concio A (con sezione tracimabile) e concio B (sezione emergente)*

L’analisi è stata eseguita mediante l’utilizzo di software strutturale ad elementi finiti: il codice MIDAS GEN 2015 (Ver. 2.1) e il codice Strauss 7 per le analisi termiche. I modelli fem implementati sono meglio descritti nei successivi capitoli.

La relazione di seguito citata contiene le verifiche geotecniche di portanza della roccia di fondazione sottoposta ai carichi di progetto sollecitanti la diga e calcolati nei capitoli successivi:

*“Italgen – Diga di Cassiglio – Olmo al Brembo (BG) – Progetto Appesantimento della Diga – Relazione Geotecnica / Gennaio 2018 / Redatta dall’Ing. Stefano Guido e Dr. Geol. Andrea Martignoni”*

## 5.1 Definizione delle azioni e delle situazioni progettuali

Sono state prese in esame le situazioni progettuali indicate al capitolo C8 del decreto con le precisazioni successivamente indicate:

- fase costruttiva: ha riguardato il getto del corpo di appesantimento; si sono prese in considerazione le sue diverse fasi costruttive;
- a termine costruzione e a serbatoio vuoto;
- a serbatoio pieno con il livello alla massima regolazione; non si è ritenuto significativo effettuare verifiche per livelli intermedi;
- a serbatoio pieno con il livello del massimo invaso;
- rapida vuotatura del serbatoio; tale situazione non è stata esaminata perché non significativa nel caso di dighe in calcestruzzo;
- in presenza di sisma, con il livello alla quota massima di regolazione (ma non a livelli intermedi non considerati significativi) nonché a serbatoio vuoto;

Sono state individuate e classificate secondo il capitolo C6 del DM le azioni che possono interessare gli scenari precedentemente descritti:

Azioni permanenti (G1):

- Peso proprio del calcestruzzo della diga esistente;
- Peso proprio del calcestruzzo dell'appesantimento;
- Peso proprio dell'acqua (livello massimo di regolazione);
- Peso dei fanghi;
- Spinta dell'acqua (livello massimo di regolazione);
- Spinta dei fanghi;
- Coazioni da ritiro;

Azioni variabili (Q):

- Coazioni di origine termica dovute alla variazione della temperatura;

Azioni eccezionali (A):

- Peso proprio dell'acqua (livello massimo invaso);
- Spinta dell'acqua (livello massimo invaso);

Azioni sismiche (E):

- Forze d'inerzia del corpo diga;
- Pressioni dovute all'azione inerziale dell'acqua;

Di seguito sono riportate le diverse azioni e i diversi carichi messi in conto nelle verifiche della diga appesantita.

### 5.1.1 *Peso proprio*

Sul calcestruzzo della diga esistente sono state eseguite prove e indagini i cui risultati sono stati riportati nei precedenti capitoli. Per il peso specifico del calcestruzzo esistente, a favore di sicurezza nei calcoli è stata assunta la media aritmetica dei valori minimi di confidenza ottenuti per ogni campagna di indagine pari a  $\gamma = 2372 \text{ kg/m}^3$ . Per il calcestruzzo nuovo dell'appesantimento è stato assunto un peso specifico pari a  $2400 \text{ kg/m}^3$ .

### 5.1.2 *Spinta idrostatica*

Come indicato nei paragrafi precedenti, il valore della massima portata di piena millenaria è pari a  $Q_{100} = 170 \text{ m}^3/\text{s}$ , come proposto dal Servizio Idrografico e Mareografico di Parma.

La spinta idrostatica sul paramento a monte è stata valutata facendo riferimento alle situazioni progettuali di seguito descritte.

*Combinazioni statiche (SLU e SLE):*

- per le combinazioni statiche fondamentali SLU e SLE è stato preso in esame il serbatoio vuoto e il serbatoio pieno con il livello alla massima regolazione (senza sfioro) (+626.0 m s.m.);
- per la combinazione eccezionale è stato preso in esame il serbatoio pieno con livello al massimo invaso (con sfioro) (+628.62 m s.m.);

Livelli intermedi non sono significativi ai fini delle verifiche.

*Combinazioni sismiche (SLU e SLE):*

- per le combinazioni sismiche è stato preso in esame il serbatoio vuoto e il serbatoio pieno con il livello alla quota di massima regolazione (senza sfioro) (+626.0 m s.m.)

Livelli intermedi non sono significativi ai fini delle verifiche.

### 5.1.3 Coazioni dovute alla variazione di temperatura

Nel calcolo sono state messe in conto le coazioni dovute alle variazioni di temperatura ambientale durante le stagioni che determinano escursioni di temperatura tra il paramento di monte e quello di valle.

La diga è soggetta a due contributi dovuti alle coazioni di tipo termico:

- coazioni dovute alla distribuzione della temperatura all'interno del corpo diga valutata in un certo istante temporale (contributo dovuto alla variazione di temperatura esistente tra il paramento di monte e valle);
- coazioni stagionali dovute alla differenza tra la temperatura del corpo diga nell'istante preso in esame e la temperatura annuale media dell'opera (esemplificativamente è il contributo dovuto alla variazione di temperatura tra il corpo diga nella condizione presa in esame, ad esempio quella invernale e la temperatura media del corpo diga che viene ipotizzata la condizione di origine indeformata);

Il calcolo della distribuzione della temperatura all'interno del corpo diga è stato eseguito mediante un calcolo a elementi finiti (software Strauss 7 ) con modellazione del problema della trasmissione del calore per conduzione governata dalla seguente equazione:

$$\nabla(k\nabla T) + Q = \rho c \dot{T}$$

dove:

k è la conduttività termica [J/ms°C]

c è il calore specifico [J/kg°C]

$\rho$  è il peso specifico [kg/mc]

$T=T(x,y,z,t)$  è la temperatura [°C]

t è il tempo [s]

I parametri utilizzati nel corso delle analisi sono riportati di seguito:

Calore specifico  $c = 1100 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$

Conduttività termica  $k = 0.0014 \text{ J/mm s}^\circ\text{C}$

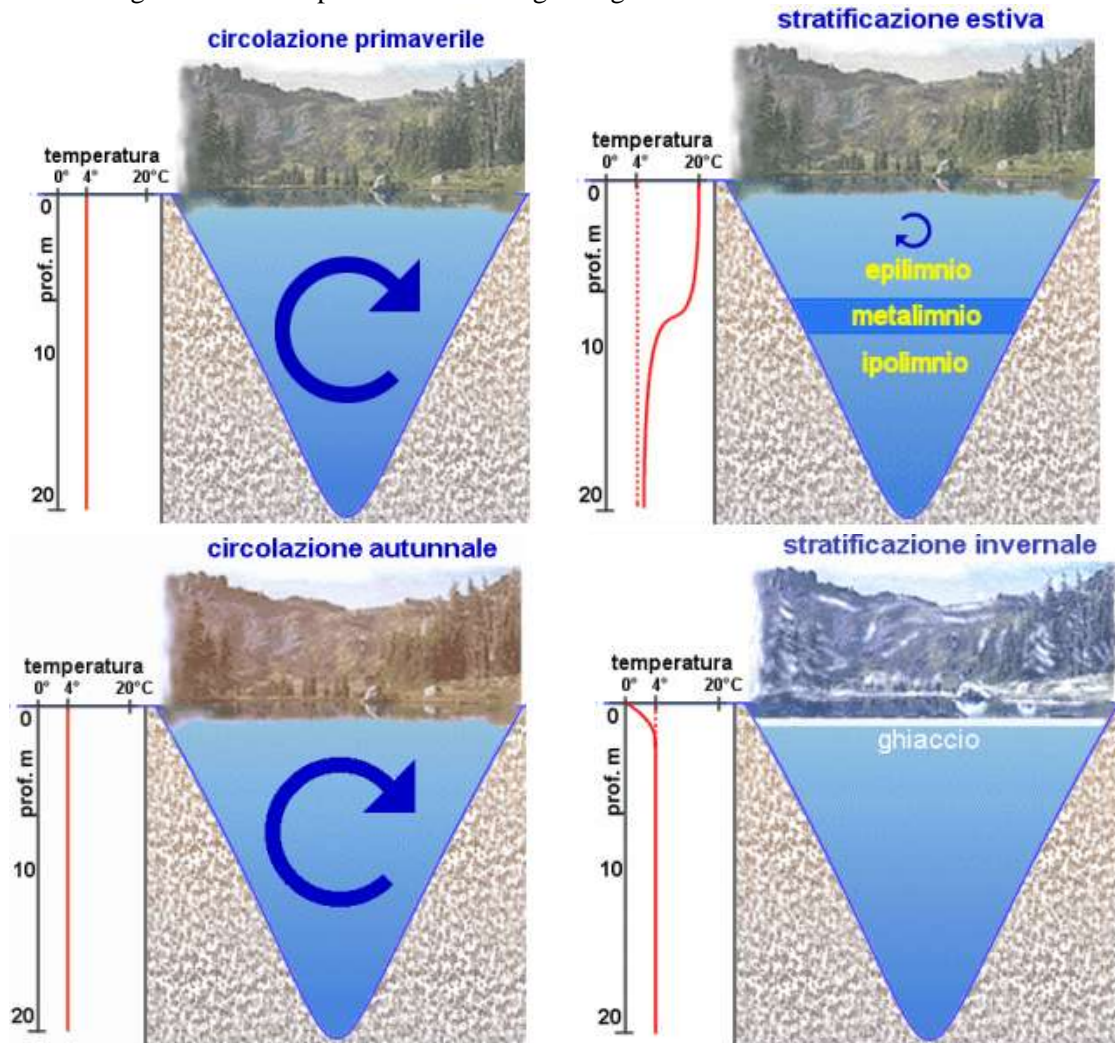
Per quanto concerne la densità sono stati assunti i valori ottenuti dalle prove, mentre per quanto riguarda il calore specifico e la conduttività termica sono stati utilizzati i valori usualmente adottati in letteratura per il materiale calcestruzzo.

Una descrizione rigorosa e realistica delle condizioni al contorno di temperatura è piuttosto complessa. Infatti occorrerebbe tenere conto oltre che della evoluzione della temperatura dell'aria e dell'acqua anche di fenomeni quali la trasmissione di calore per irraggiamento e per convezione. Nella pratica corrente si impongono direttamente le condizioni al contorno in termini di temperatura su tutte le superficie che delimitano la diga (paramento di monte, paramento di valle e superficie a contatto con la roccia)

**Temperatura del bacino d'acqua di monte**

Nel corso dell'anno il bacino d'acqua dell'invaso presenta un profilo termico variabile con la profondità.

Da studi di letteratura per bacini montani simili a quelli di Cassiglio ubicati in zone temperate e di profondità di circa 20 m è noto che il profilo della temperatura dell'acqua con la profondità segue indicativamente gli andamenti riportati nelle immagini seguenti:



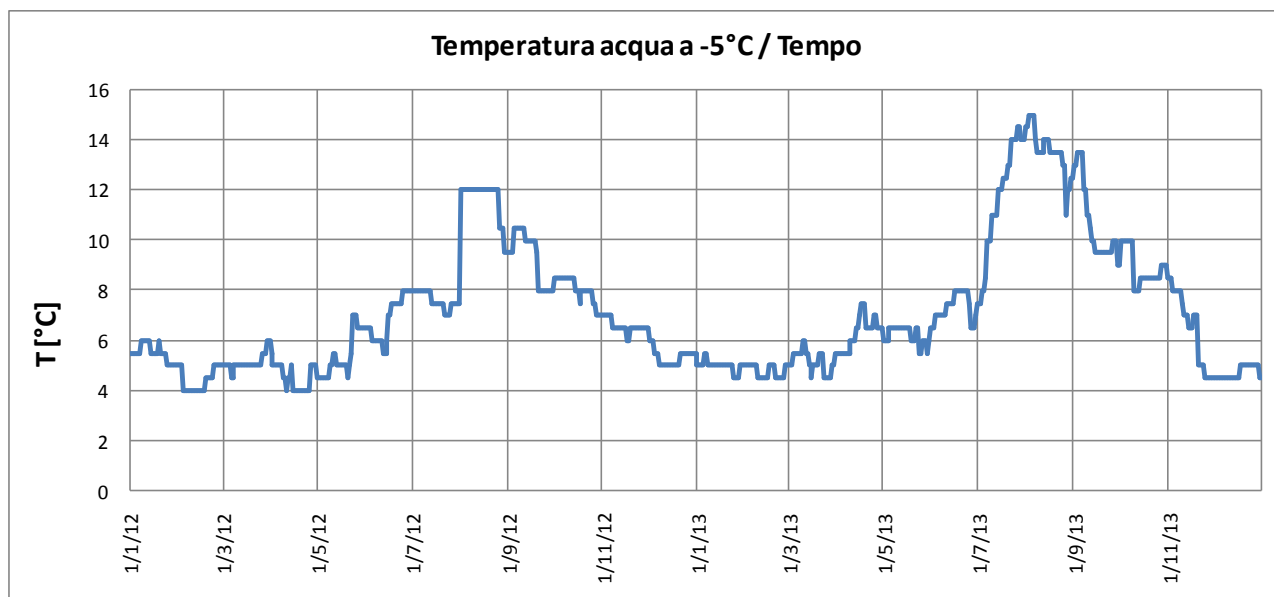
*Andamento della temperatura dell'acqua con la profondità con riferimento ad un ipotetico lago della regione temperata con una profondità di 20 metri (La densità dell'acqua è massima a circa 4°C. Se la temperatura dell'acqua è superiore o inferiore a circa 4°C la sua densa risulta minore)*



Le acque del bacino di Cassiglio alla fine della stagione invernale presentano, a tutte le profondità una temperatura uniforme di circa 4-5°C. Questa è la temperatura di massima densità dell'acqua.

Nei mesi primaverili e autunnali l'apporto di calore attraverso la radiazione solare determina un innalzamento della temperatura delle acque superficiali. Il lavoro meccanico del vento opera un rimescolamento delle acque più superficiali (più calde e quindi meno dense) con quelle immediatamente sottostanti (più fredde e quindi più dense), contribuendo così alla distribuzione del calore dagli strati più superficiali a quelli via via più profondi, mantenendo sostanzialmente la temperatura del bacino costante. Con il progredire della stagione calda tra acque superficiali ed acque profonde andrà formandosi un gradiente termico, e quindi di densità, sempre più elevato e comunque tale da impedire il rimescolamento ad opera del vento. Nella stagione calda, quindi, si avrà nel lago uno strato superficiale caldo (epilimnio) separato dalle acque profonde uniformemente fredde (ipolimnio) da uno strato di passaggio (metalimnio), caratterizzato da un rapido abbassamento della temperatura con il crescere della profondità.

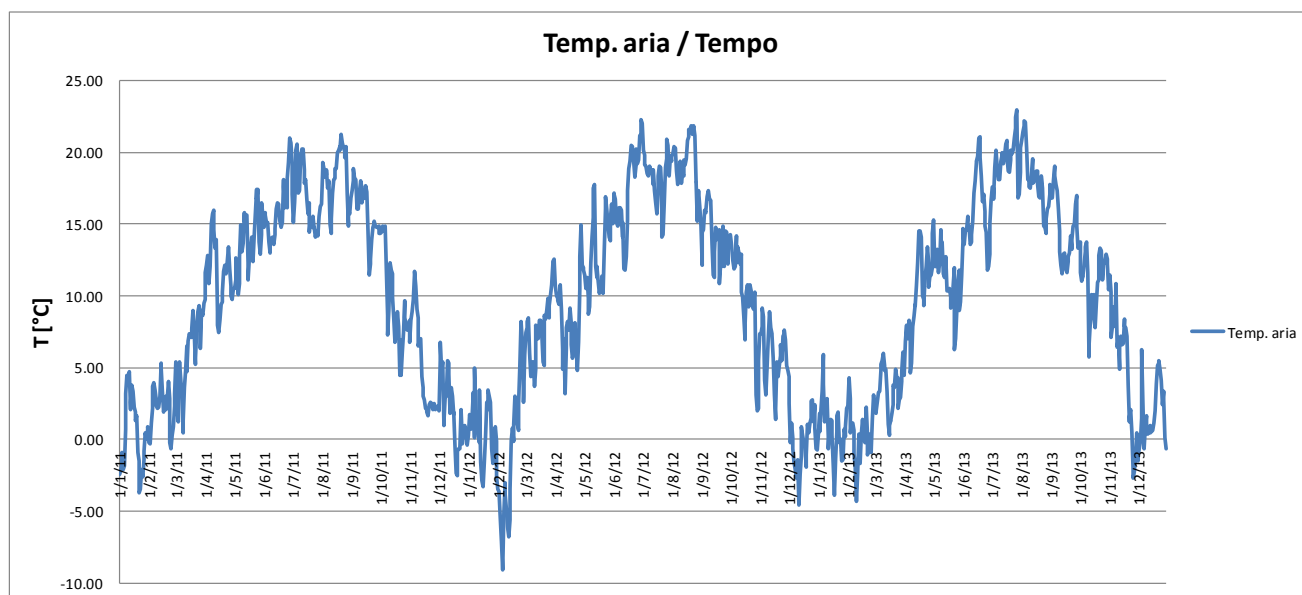
Le misure di temperatura dell'acqua a -5 m di profondità del bacino di Cassiglio risultano costanti con piccole variazioni attorno alla temperatura di circa 4÷7 °C per i mesi invernale, primaverile e autunnale, mentre nel mese estivo si verifica un riscaldamento dello strato superficiale di acqua con una temperatura massima media pari a circa 14 °C. Le misurazioni di temperatura dell'acqua del bacino di Cassiglio alla profondità di -5 m risultano pertanto allineate e coerenti con la distribuzione di temperatura esemplificativa per le diverse stagioni riportata negli schemi precedenti. Tali schemi di distribuzione della temperatura dell'acqua con la profondità sono stati applicati ai nodi del modello fem a contatto con l'acqua sul paramento di monte.



*A titolo esemplificativo è riportato il grafico della temperatura dell'acqua registrata con cadenza giornaliera nel periodo tra 1/1/2012 e 1/11/2013*

### Temperatura dell'aria

Il grafico seguente riporta l'andamento della temperatura dell'aria monitorato in sito con valore medio giornaliero:



*Grafico che riporta a titolo esemplificativo l'andamento della temperatura dell'aria nel tempo (2011÷2013) con valori medi giornalieri*

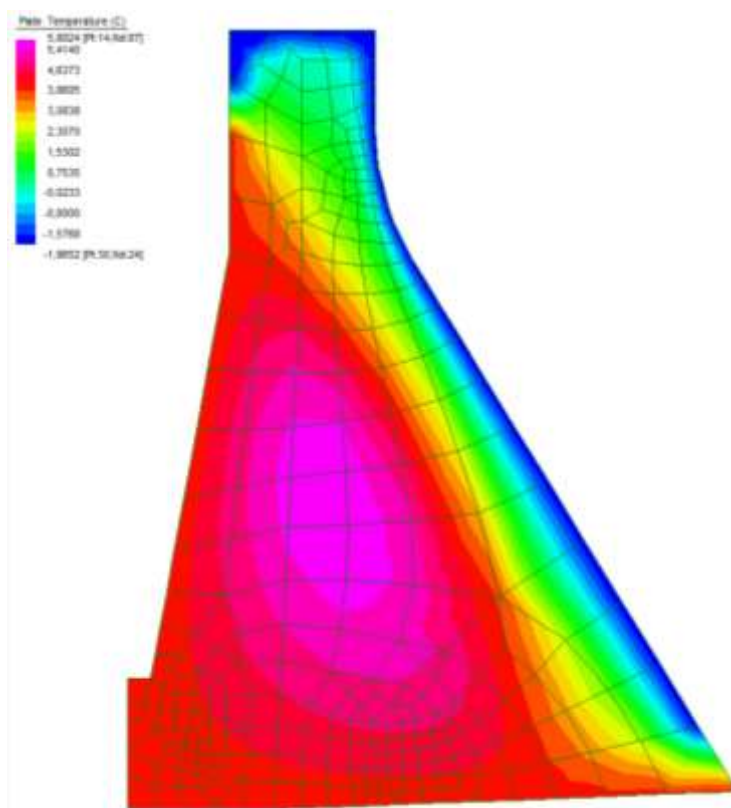
L'andamento della temperatura dell'aria riportato nel grafico precedente è stato applicato ai nodi del modello fem presenti sul contorno della diga esposto alle variazioni di temperatura dell'aria (es. paramento di valle).

### Temperatura sul contatto roccia-diga

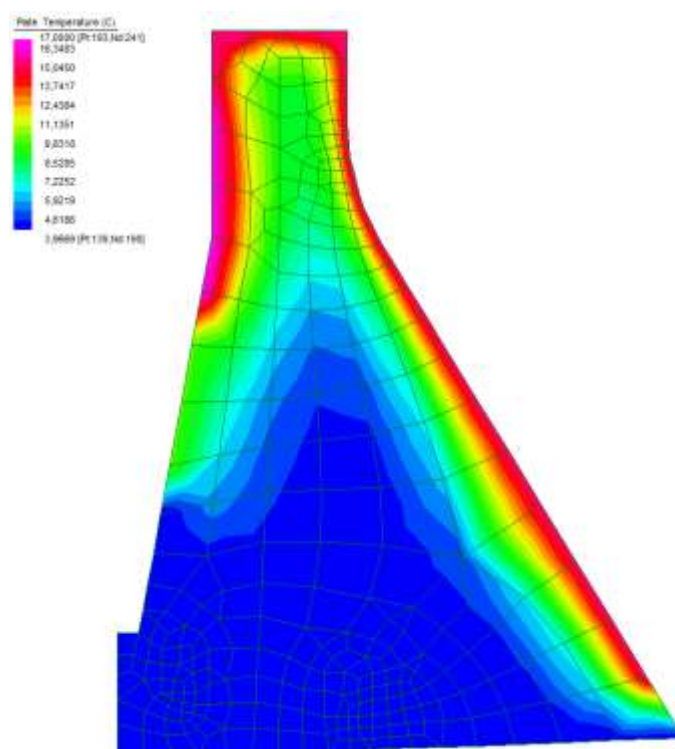
Per le porzioni di contorno a contatto con la roccia, in assenza di dati più precisi della temperatura del terreno in sito, si è assunto ragionevolmente che tali superfici siano esposte ad una temperatura costante per tutto il periodo dell'anno, e considerata pari a 4°C. Tale valore, così come l'ipotesi di temperatura costante è stata determinata e giudicata come coerente sulla base di analisi e monitoraggi svolti su altre dighe situate in Valtellina con caratteristiche simili.

### Risultati del calcolo termico

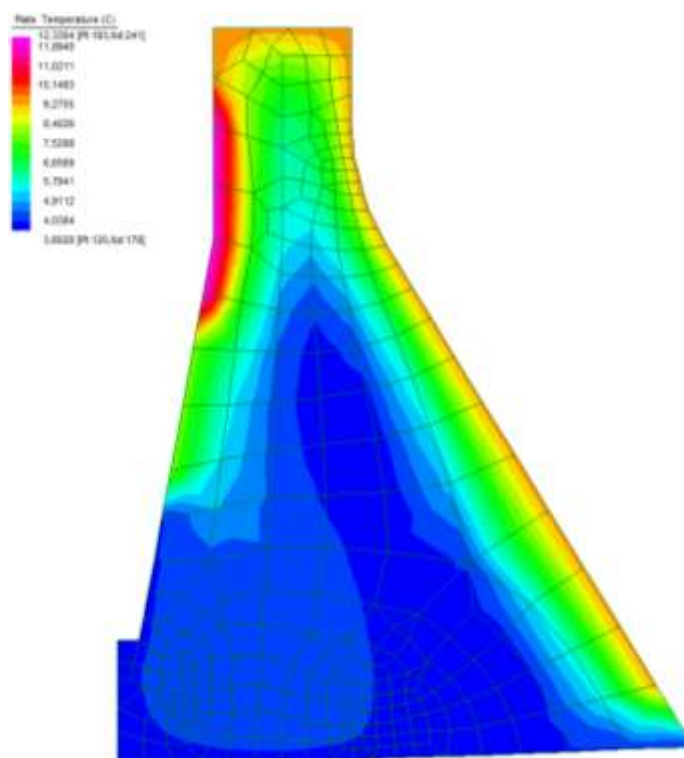
Dal modello termico sono state ricavate le distribuzioni di temperatura all'interno del corpo diga per la sezione emergente e per la sezione tracimabile con riferimento alla condizione invernale, condizione estiva e condizione di temperatura media stagionale (primaverile). Di seguito sono riportate le distribuzioni di temperatura all'interno del corpo diga messe poi in conto nei calcoli in combinazione con le altre azioni sollecitanti:



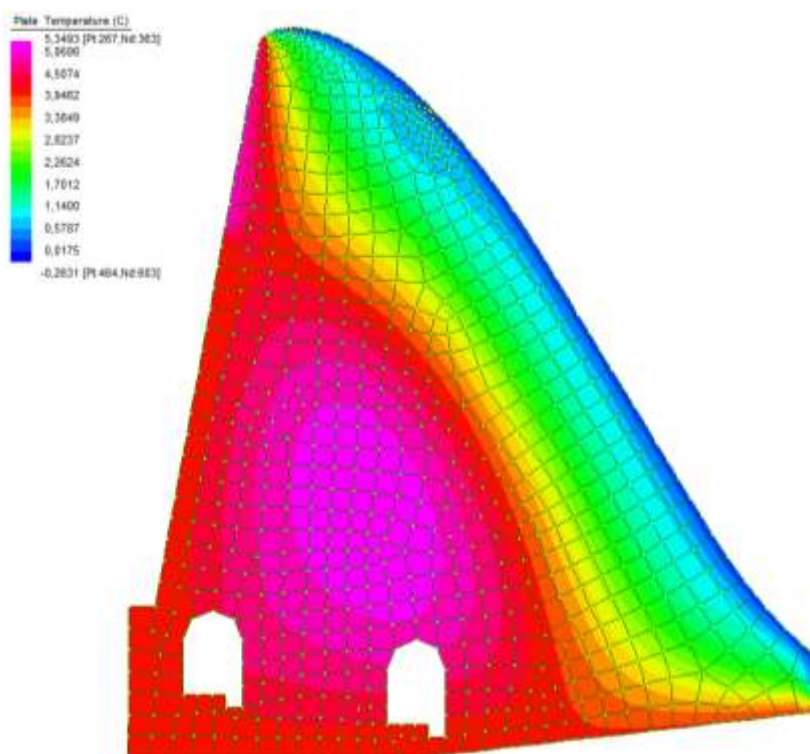
Sezione emergente – Distribuzione della temperatura invernale



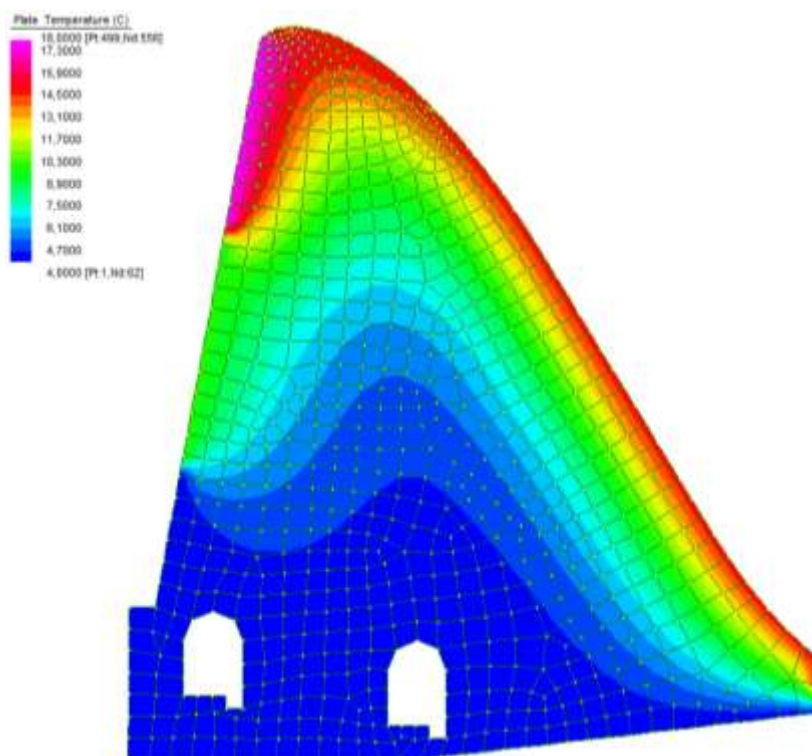
Sezione emergente – Distribuzione della temperatura estiva



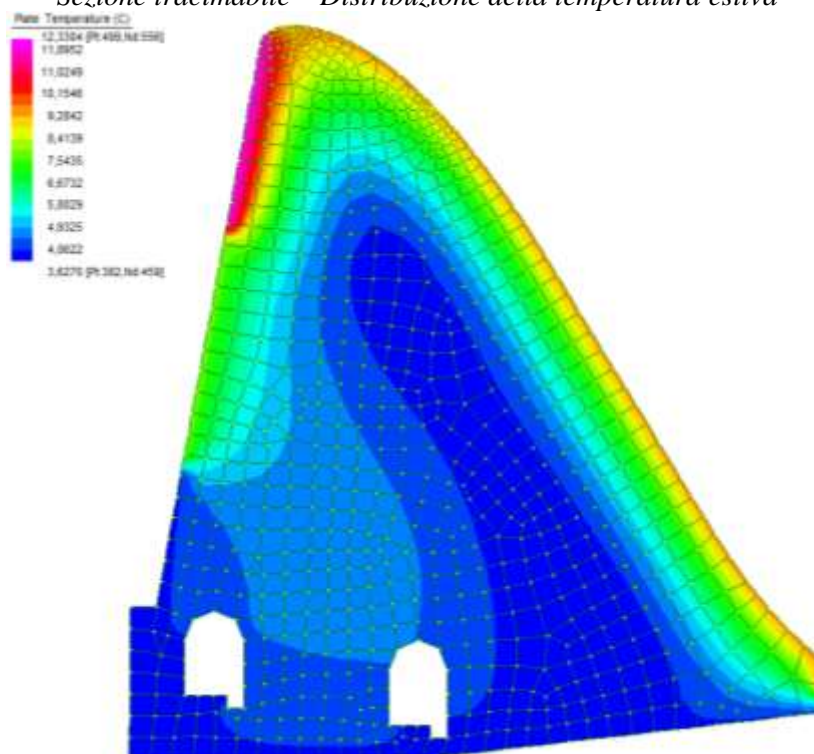
*Sezione emergente – Distribuzione della temperatura media annua*



*Sezione tracimabile – Distribuzione della temperatura invernale*



*Sezione tracimabile – Distribuzione della temperatura estiva*



*Sezione emergente – Distribuzione della temperatura media annua*

I calcoli relativi alle sole azioni termiche sono basati sull'ipotesi che il modulo di elasticità del calcestruzzo sia ridotto di un fattore 0,5. Tale riduzione del modulo di elasticità, interviene, come noto, per tenere conto, in linea con quanto suggerito dalla letteratura (cfr. Stucky, Smmartino, Oberti, Ippolito) e normativa, degli effetti viscoelastici del mteriale dovuti alle variazioni termiche. Vi sono infatti diversi fattori che smorzano

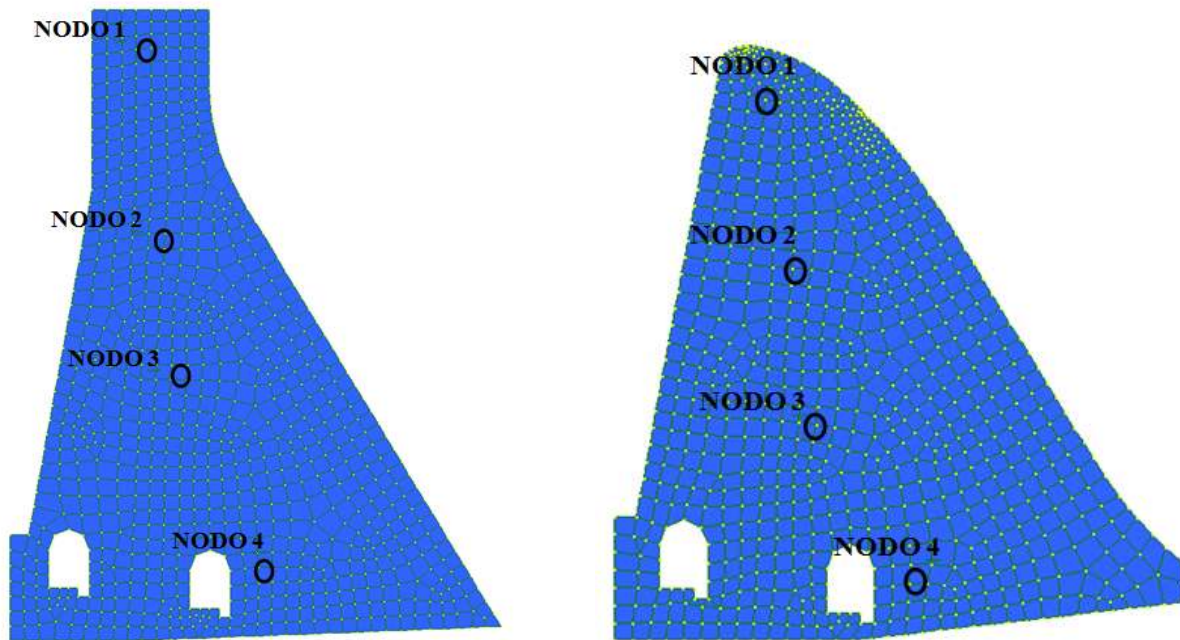


gli effetti delle variazioni termiche della struttura e che pertanto limitano il valore delle tensioni corrispondenti: il fluage, l'adattamento degli inerti, la lenta influenza delle variazioni termiche, la redistribuzione interna delle tensioni, la microfessurazione.

Per quanto riguarda l'ampiezza effettiva delle oscillazioni termiche medie rispetto il valore medio annuo, è noto che esse, all'interno della struttura, sono inferiori a quelle dei paramenti. Questo fenomeno è colto dall'analisi termica eseguita come di seguito illustrato.

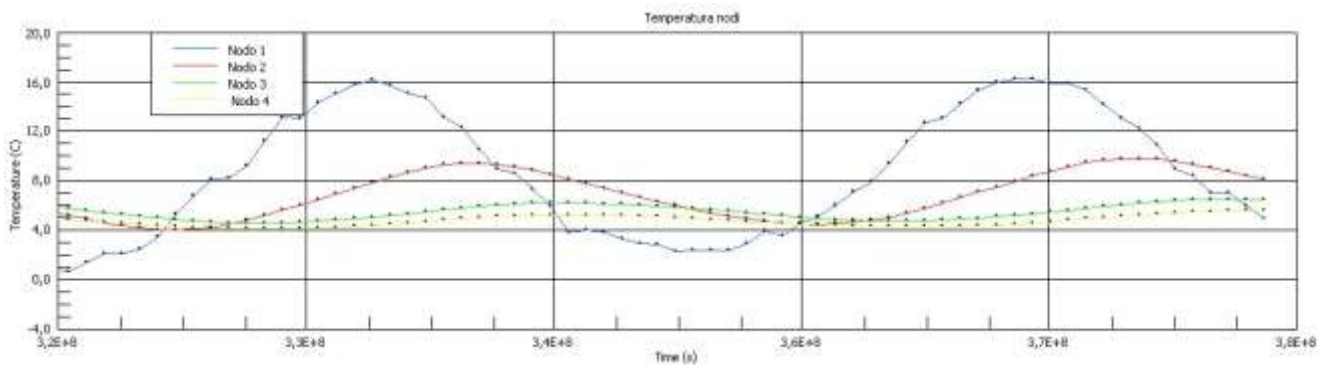
L'esame degli andamenti della temperatura nei vari punti mette in chiara evidenza la diminuzione dell'ampiezza del ciclo termico per i nodi più interni e il crescere del ritardo con cui si verificano i massimi dei cicli all'aumentare della distanza del nodo dalla superficie.

Per la sezione tracimabile e per la sezione emergente, è riportata di seguito l'ubicazione dei nodi 1, 2, 3, 4, per i quali viene diagrammato l'andamento della temperatura nel tempo:

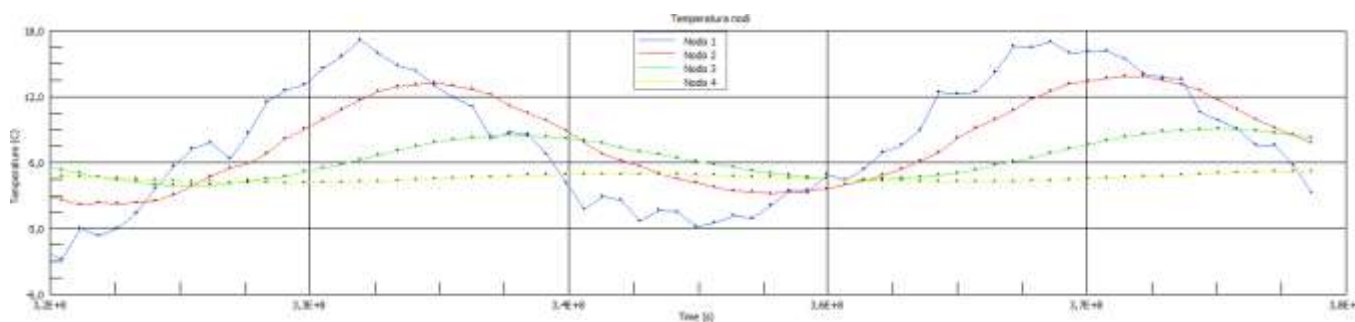


Ubicazione dei nodi 1, 2, 3 e 4

Di seguito si riportano i grafici che rappresentano l'andamento della temperatura nel tempo a regime per i nodi sopra indicati:



Andamento temperatura nodi interni sezione tracimabile a regime



*Andamento temperatura nodi interni sezione emergente a regime*

#### 5.1.4 Calore di idratazione e coazioni da ritiro

Come prescritto dalla normativa sono state messe in conto nei calcoli gli effetti dovuti al calore di idratazione e al ritiro che si sviluppano essenzialmente durante la fase iniziale di getto.

Nello specifico capitolo “Verifiche fasi di getto” sono descritte nel dettaglio le modalità con cui tali azioni sono stati considerati nei calcoli.

Si osserva comunque che in getti di calcestruzzo di così notevoli dimensioni e sulla superficie non esposta all’atmosfera presa ed indurimento avvengono senza innescare fenomeni di autotensione determinanti ai fini dei calcoli come mostrato dall’esperienza di Italgem Spa basata sui recenti lavori di appesantimento effettuati sulle dighe di Alto Mora e Ponte dell’Acqua. La prima diga è stata appesantita a monte nella zona della spalla sinistra con un nuovo getto di spessore pari a 2 m nella parte bassa e 1 m nella parte superiore; nella seconda l’appesantimento è stato effettuato a valle, con spessori dell’ordine massimo di 4 metri. In entrambi i casi, anche dopo qualche anno dalla conclusione dei lavori e della messa in esercizio dell’impianto, non si sono manifestati problemi di ritiro, fessurazione e distacco con conseguente percolazione d’acqua tra il vecchio e il nuovo getto. Per Cassiglio è comunque previsto in progetto il posizionamento di un’opportuna armatura nel nuovo getto di appesantimento.

#### 5.1.5 Sottospinte

Le sottospinte sono state definite in accordo a quanto specificato nella normativa.

Come specificato dal D.M. 26/06/2014 al paragrafo D.2.2.1, quando la diga è munita di canne o fori drenanti, nel corpo ed entro la fondazione, a distanza tra loro non superiore a m 2.50 e di diametro non inferiore a 200 mm in fondazione e 120 mm nel corpo, i valori caratteristici delle sottopressioni determinanti la spinta dell’acqua possono essere assunti linearmente decrescenti in direzione monte-valle, da un valore pari alla massima pressione idrostatica di invaso in corrispondenza del parametro di monte, alla pressione idrostatica massima che si può verificare lungo la linea dei drenaggi tenuto conto della quota di libero efflusso di essi, indi al valore della massima pressione idrostatica che può verificarsi in corrispondenza del parametro di valle. Le massime pressioni idrostatiche a monte e a valle della diga sono state determinate in funzione dei livelli di invaso corrispondenti alle specifiche situazioni di progetto. La pressione lungo la linea dei drenaggi è stata assunta pari alla pressione idrostatica di valle aumentata di 0,35 volte la differenza tra la pressione idrostatica di monte e quella di valle.

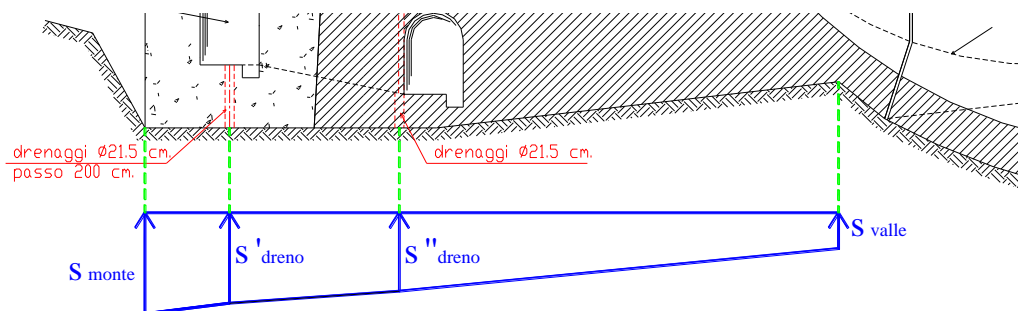
Nel caso specifico risultano soddisfatte le condizioni sulla geometria dei dreni:

$i = 2 \text{ m} < 2.5 \text{ m}$  (interasse dreni)

$\phi 1 = 125 \text{ mm} > 120 \text{ mm}$  (diametro dreni in corpo diga)

$\phi 2 = 215 \text{ mm} > 200 \text{ mm}$  (diametro dreni in fondazione)

I valori relativi alle quote del pelo libero dell'acqua a monte e a valle sono i medesimi descritti precedentemente. L'immagine seguente riporta lo schema delle sottopressioni in fondazione:



*Schema delle sottopressioni in fondazione*

La pressione a monte varia a seconda del livello idrostatico preso in esame per le diverse combinazioni di carico:

- per le combinazioni SLU e SLE fondamentali e per le combinazioni sismiche è stata assunta a monte la pressione corrispondente al livello di massima regolazione +626.0 m s.m.. A favore di sicurezza, a valle è stata comunque messa in conto una pressione corrispondente ad un'altezza idrostatica dell'acqua di 1,3 m pur non essendo previsto sfioramento per la condizione di massima regolazione;
- per la combinazione eccezionale è stata assunta a monte la pressione corrispondente al livello di massimo invaso +628.62 m s.m.. A valle è stata messa in conto una pressione corrispondente ad un'altezza idrostatica dell'acqua di 1,3 m, considerando la possibilità di infiltrazioni di acqua nel calcestruzzo della vasca di dissipazione.

Nel calcolo delle sottopressioni è stato considerato un livello idrostatico a valle pari a 1,3 m. Tale valore corrisponde all'altezza della suola dello scivolo nell'ipotesi che si possa generare infiltrazione all'interno del calcestruzzo. L'acqua che tracima dalla diga viene rilasciata in alveo circa 40 m più a valle della diga, pertanto la pressione idrostatica a valle della diga dovrebbe essere a rigore pari a zero, a meno appunto della presenza di possibili infiltrazioni.

A favore di sicurezza, l'andamento delle sottopressioni è stato assunto lineare tra il nuovo dreno realizzato a monte e la pressione di valle, senza quindi mettere in conto l'ulteriore contributo di riduzione delle sottopressioni dovuto alla presenza del dreno esistente nel corpo diga di valle.

### 5.1.6 Spinta del ghiaccio

La spinta del ghiaccio può essere trascurata, in quanto non è possibile la formazione di strati di spessore considerevole vista l'altitudine e le temperature del sito di ubicazione.



### 5.1.7 Spinta dovuta all'interrimento

In base ai rilievi effettuati nel 2005 e riportati nei precedenti capitoli, mettendo in conto che le operazioni di rimozione del materiale depositato nel bacino siano eseguite ogni 15 anni, lo spessore del materiale che può depositarsi a ridosso dello sbarramento è valutato di circa 30÷35 cm.

In ogni caso, in accordo con il Gestore, è stata assunto nei calcoli a favore di sicurezza un interrimento pari a 200 cm sia per la sezione emergente che per la sezione tracimabile. Tale valore massimo di interrimento dovrà essere sempre garantito anche successivamente a straordinari eventi di piena. Pertanto saranno utili periodici controlli dell'altezza di interrimento durante la vita dell'opera anche mediante operazioni di batimetria del bacino da effettuarsi in prossimità dello sbarramento.

### 5.1.8 Azioni sismiche

Le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto della sicurezza nei diversi stati limite, sono state definite a partire dalla “pericolosità sismica di base” del sito di costruzione facendo riferimento a quanto definito nelle NTC.

La diga in oggetto con intervento di appesantimento viene considerata come un’“opera esistente” (in merito si è già espressa la IV Sezione del Consiglio dei Lavori Pubblici con seduta del 15/05/2014) pertanto è stata assunta una vita nominale pari a  $V_N=50$  anni.

La diga è classificata come “strategica” (dighe che realizzano serbatoi a prevalente utilizzazione idroelettrica). Il coefficiente d’uso  $C_U$  risulta pari a 2.

Il periodo di riferimento,  $V_R$ , per l’azione sismica è definito in funzione della vita nominale,  $V_N$ , e del coefficiente d’uso,  $C_U$ , dalla relazione:

$$V_R = V_N \times C_U = 50 \times 2 = 100 \text{ anni}$$

Per la definizione degli spettri ai diversi stati limite SLC (ultimo - collasso), SLV (ultimo - salvaguardia vita), SLD (esercizio - danno); SLO (esercizio – operatività) sono inoltre stati considerati i seguenti parametri:

- categoria sottosuolo: A (ammasso roccioso affiorante – la categoria di sottosuolo A è stata anche confermata dall’esecuzione di un’indagine sismica di tipo MASW che ha permesso di caratterizzare il terreno tramite il calcolo della velocità equivalente  $V_{s,30}$  di propagazione delle onde di taglio entro i primi 30 m di profondità:  $V_{s,30} = 1681 \text{ m/s} > 800 \text{ m/s}$  (Categoria A);
- condizioni topografiche: T1;

Di seguito vengono forniti i parametri dei diversi spettri con riferimento alla componente elastica orizzontale e verticale.

STATO LIMITE	SLC
$a_s$	0.086 g
$F_0$	2.706
$T_c$	0.311 s
$S_s$	1.000
$C_s$	1.000
$S_T$	1.000
$q$	1.000

**Parametri dipendenti**

S	1.000
$\eta$	1.000
$T_B$	0.104 s
$T_C$	0.311 s
$T_D$	1.943 s

**Espressioni dei parametri dipendenti**

$$S = S_1 \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = \sqrt{10 \cdot (\xi + \xi)} \geq 0,55; \eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.6; §. 3.2.3.5})$$

$$T_B = T_c / 3 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.8})$$

$$T_C = C_s \cdot T_c \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.7})$$

$$T_D = 4,0 \cdot a_s / g + 1,6 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.9})$$

**Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.4)**

$$0 \leq T < T_B \quad S_o(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left[ \frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_o(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_0$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_o(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_o(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left( \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right)$$

Lo spettro di progetto  $S_d(T)$  per le verifiche agli Stati Limite Ultimi è ottenuto dalle espressioni dello spettro elastico  $S_e(T)$  sostituendo  $\eta$  con  $1/q$ , dove  $q$  è il fattore di struttura. (NTC-08 § 3.2.3.5)

T [s]	Se [g]
0.000	0.086
0.104	0.232
0.311	0.232
0.368	0.186
0.466	0.155
0.544	0.133
0.622	0.116
0.699	0.103
0.777	0.093
0.855	0.084
0.933	0.077
1.010	0.071
1.088	0.066
1.166	0.062
1.244	0.058
1.321	0.055
1.399	0.052
1.477	0.049
1.555	0.046
1.632	0.044
1.710	0.042
1.788	0.040
1.866	0.039
1.943	0.037
2.041	0.034
2.139	0.031
2.237	0.028
2.335	0.026
2.433	0.024
2.531	0.022
2.629	0.020
2.727	0.019
2.825	0.018
2.923	0.017
3.021	0.017
3.119	0.017
3.217	0.017
3.314	0.017
3.412	0.017
3.510	0.017
3.608	0.017
3.706	0.017
3.804	0.017
3.902	0.017
4.000	0.017

STATO LIMITE	SLC
$a_{sv}$	0.034 g
$S_s$	1.000
$S_T$	1.000
$q$	1.000
$T_B$	0.050 s
$T_C$	0.150 s
$T_D$	1.000 s

**Parametri dipendenti**

$F_0$	1.070
S	1.000
$\eta$	1.000

**Espressioni dei parametri dipendenti**

$$S = S_1 \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 §. 3.2.3.5})$$

$$F_0 = 1,35 \cdot F_0 \cdot \left( \frac{a_s}{g} \right)^{0,1} \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.11})$$

**Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.10)**

$$0 \leq T < T_B \quad S_o(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left[ \frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_o(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_0$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_o(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_o(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left( \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right)$$

T [s]	Se [g]
0.000	0.034
0.050	0.092
0.150	0.092
0.235	0.059
0.320	0.043
0.405	0.034
0.490	0.028
0.575	0.024
0.660	0.021
0.745	0.018
0.830	0.017
0.915	0.015
1.000	0.014
1.094	0.012
1.188	0.010
1.281	0.008
1.375	0.007
1.469	0.006
1.563	0.006
1.656	0.005
1.750	0.004
1.844	0.004
1.938	0.004
2.031	0.003
2.125	0.003
2.219	0.003
2.313	0.003
2.406	0.002
2.500	0.002
2.594	0.002
2.688	0.002
2.781	0.002
2.875	0.002
2.969	0.002
3.063	0.001
3.156	0.001
3.250	0.001
3.344	0.001
3.438	0.001
3.531	0.001
3.625	0.001
3.719	0.001
3.813	0.001
3.906	0.001
4.000	0.001

Spettro orizzontale/verticale elastico allo stato limite di collasso (SLC)

STATO LIMITE	SLV
$a_{ov}$	0.070 g
$F_{0z}$	2.664
$T_{0z}$	0.298 s
$S_{0z}$	1.000
$C_{0z}$	1.000
$S_T$	1.000
$q$	1.000

Parametri dipendenti

$S$	1.000
$\eta$	1.000
$T_B$	0.099 s
$T_C$	0.298 s
$T_D$	1.880 s

Espressioni dei parametri dipendenti

$$S = S_1 \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = \sqrt{10 \cdot (3 + \xi)} \geq 0,55; \eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.6; §. 3.2.3.5})$$

$$T_B = T_C / 3 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.8})$$

$$T_C = C_C \cdot T_C \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.7})$$

$$T_D = 4,0 \cdot a_z / g + 1,6 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.9})$$

Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.4)

$$0 \leq T < T_B \quad S_d(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left[ \frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_d(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_0$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_d(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_d(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left( \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right)$$

Lo spettro di progetto  $S_d(T)$  per le verifiche agli Stati Limite Ultimi è ottenuto dalle espressioni dello spettro elastico  $S_e(T)$  sostituendo  $\eta$  con  $1/q$ , dove  $q$  è il fattore di struttura. (NTC-08 § 3.2.3.5)

T [s]	Se [g]
0.000	0.070
0.099	0.187
0.298	0.187
0.373	0.149
0.448	0.124
0.524	0.106
0.599	0.093
0.674	0.082
0.750	0.074
0.825	0.067
0.901	0.062
0.976	0.057
1.051	0.053
1.127	0.049
1.202	0.046
1.277	0.044
1.353	0.041
1.428	0.039
1.504	0.037
1.579	0.035
1.654	0.034
1.730	0.032
1.805	0.031
1.880	0.030
1.961	0.027
2.042	0.024
2.123	0.022
2.204	0.020
2.285	0.018
2.366	0.017
2.447	0.016
2.528	0.016
2.608	0.014
2.689	0.014
2.770	0.014
2.851	0.014
2.931	0.014
3.012	0.014
3.093	0.014
3.174	0.014
3.254	0.014
3.335	0.014
3.415	0.014
3.496	0.014
3.576	0.014
3.657	0.014
3.738	0.014
3.819	0.014
3.899	0.014
4.000	0.014

STATO LIMITE	SLV
$a_{ov}$	0.025 g
$S_{0z}$	1.000
$S_T$	1.000
$q$	1.000
$T_B$	0.050 s
$T_C$	0.150 s
$T_D$	1.000 s

Parametri dipendenti

$F_v$	0.952
$S$	1.000
$\eta$	1.000

Espressioni dei parametri dipendenti

$$S = S_1 \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 §. 3.2.3.5})$$

$$F_v = 1,35 \cdot F_0 \cdot \left( \frac{a_z}{g} \right)^{0,1} \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.11})$$

Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.10)

$$0 \leq T < T_B \quad S_d(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left[ \frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_d(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_v$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_d(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_d(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left( \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right)$$

T [s]	Se [g]
0.000	0.025
0.050	0.067
0.150	0.067
0.235	0.043
0.320	0.031
0.405	0.025
0.490	0.020
0.575	0.017
0.660	0.015
0.745	0.013
0.830	0.012
0.915	0.011
1.000	0.010
1.094	0.008
1.188	0.007
1.281	0.006
1.375	0.005
1.469	0.005
1.563	0.004
1.656	0.004
1.750	0.003
1.844	0.003
1.938	0.003
2.031	0.002
2.125	0.002
2.219	0.002
2.313	0.002
2.406	0.002
2.500	0.002
2.594	0.001
2.688	0.001
2.781	0.001
2.875	0.001
2.969	0.001
3.063	0.001
3.156	0.001
3.250	0.001
3.344	0.001
3.438	0.001
3.531	0.001
3.625	0.001
3.719	0.001
3.813	0.001
3.906	0.001
4.000	0.001

Spettro orizzontale elastico allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV)

STATO LIMITE	SLD
$a_{av}$	0.035 g
$F_a$	2.624
$T_B$	0.219 s
$S_B$	1.000
$C_C$	1.000
$S_T$	1.000
$q$	1.000

**Parametri dipendenti**

$S$	1.000
$\eta$	1.000
$T_B$	0.073 s
$T_C$	0.219 s
$T_D$	1.740 s

**Espressioni dei parametri dipendenti**

$$S = S_B \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = \sqrt{10 / (S + 5)} \geq 0,55; \eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.6; §. 3.2.3.5})$$

$$T_B = T_C / 3 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.8})$$

$$T_C = C_C \cdot T_C \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.7})$$

$$T_D = 4,0 \cdot a_{av} / g + 1,6 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.9})$$

**Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.4)**

$$0 \leq T < T_B \quad S_e(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left[ \frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_e(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_o$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_e(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_e(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left( \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right)$$

Lo spettro di progetto  $S_d(T)$  per le verifiche agli Stati Limite Ultimi è ottenuto dalle espressioni dello spettro elastico  $S_e(T)$  sostituendo  $\eta$  con  $1/q$ , dove  $q$  è il fattore di struttura. (NTC-08 § 3.2.3.5)

T [s]	Se [g]
0.000	0.035
0.073	0.092
0.219	0.092
0.292	0.069
0.364	0.055
0.436	0.046
0.509	0.040
0.581	0.035
0.654	0.031
0.726	0.028
0.799	0.025
0.871	0.023
0.943	0.021
1.016	0.020
1.088	0.018
1.161	0.017
1.233	0.016
1.305	0.015
1.378	0.015
1.450	0.014
1.523	0.013
1.595	0.013
1.667	0.012
1.740	0.012
1.848	0.010
1.955	0.009
2.063	0.008
2.170	0.007
2.278	0.007
2.386	0.006
2.493	0.006
2.601	0.005
2.709	0.005
2.816	0.004
2.924	0.004
3.031	0.004
3.139	0.004
3.247	0.003
3.354	0.003
3.462	0.003
3.570	0.003
3.677	0.003
3.785	0.002
3.892	0.002
4.000	0.002

STATO LIMITE	SLD
$a_{av}$	0.009 g
$S_B$	1.000
$S_T$	1.000
$q$	1.000
$T_B$	0.050 s
$T_C$	0.150 s
$T_D$	1.000 s

**Parametri dipendenti**

$F_v$	0.662
$S$	1.000
$\eta$	1.000

**Espressioni dei parametri dipendenti**

$$S = S_B \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 §. 3.2.3.5})$$

$$F_v = 1,35 \cdot F_o \cdot \left( \frac{a_s}{g} \right)^{0,1} \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.11})$$

**Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.10)**

$$0 \leq T < T_B \quad S_e(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left[ \frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_e(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_v$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_e(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_e(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left( \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right)$$

T [s]	Se [g]
0.000	0.009
0.050	0.023
0.150	0.023
0.235	0.015
0.320	0.011
0.405	0.009
0.490	0.007
0.575	0.006
0.660	0.005
0.745	0.005
0.830	0.004
0.915	0.004
1.000	0.003
1.094	0.003
1.188	0.002
1.281	0.002
1.375	0.002
1.469	0.002
1.563	0.001
1.656	0.001
1.750	0.001
1.844	0.001
1.938	0.001
2.031	0.001
2.125	0.001
2.219	0.001
2.313	0.001
2.406	0.001
2.500	0.001
2.594	0.001
2.688	0.000
2.781	0.000
2.875	0.000
2.969	0.000
3.063	0.000
3.156	0.000
3.250	0.000
3.344	0.000
3.438	0.000
3.531	0.000
3.625	0.000
3.719	0.000
3.813	0.000
3.906	0.000
4.000	0.000

Spettro orizzontale elastico allo stato limite di danno (SLD)



STATO LIMITE	SLO
$a_{av}$	0.029 g
$F_a$	2.579
$T_B$	0.203 s
$S_B$	1.000
$C_C$	1.000
$S_T$	1.000
$q$	1.000

**Parametri dipendenti**

$S$	1.000
$\eta$	1.000
$T_B$	0.068 s
$T_C$	0.203 s
$T_D$	1.717 s

**Espressioni dei parametri dipendenti**

$$S = S_1 \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = \sqrt{10 / (5 + \xi)} \geq 0,55; \eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.6; §. 3.2.3.5})$$

$$T_B = T_C / 3 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.8})$$

$$T_C = C_C \cdot T_C \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.7})$$

$$T_D = 4,0 \cdot a_y / g + 1,6 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.9})$$

**Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.4)**

$$0 \leq T < T_B \quad S_e(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left[ \frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_e(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_o$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_e(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_e(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left( \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right)$$

Lo spettro di progetto  $S_d(T)$  per le verifiche agli Stati Limite Ultimi è ottenuto dalle espressioni dello spettro elastico  $S_e(T)$  sostituendo  $\eta$  con  $1/q$ , dove  $q$  è il fattore di struttura. (NTC-08 § 3.2.3.5)

T [s]	Se [g]
0.000	0.029
0.068	0.075
0.203	0.075
0.275	0.056
0.347	0.044
0.419	0.036
0.491	0.031
0.563	0.027
0.635	0.024
0.707	0.022
0.780	0.020
0.852	0.018
0.924	0.017
0.996	0.015
1.068	0.014
1.140	0.013
1.212	0.013
1.284	0.012
1.356	0.011
1.429	0.011
1.501	0.010
1.573	0.010
1.645	0.009
1.717	0.009
1.826	0.008
1.934	0.007
2.043	0.006
2.152	0.006
2.261	0.005
2.369	0.005
2.478	0.004
2.587	0.004
2.695	0.004
2.804	0.003
2.913	0.003
3.022	0.003
3.130	0.003
3.239	0.003
3.348	0.002
3.456	0.002
3.565	0.002
3.674	0.002
3.783	0.002
3.891	0.002
4.000	0.002

STATO LIMITE	SLO
$a_{av}$	0.007 g
$S_B$	1.000
$S_T$	1.000
$q$	1.000
$T_B$	0.050 s
$T_C$	0.150 s
$T_D$	1.000 s

**Parametri dipendenti**

$F_v$	0.595
$S$	1.000
$\eta$	1.000

**Espressioni dei parametri dipendenti**

$$S = S_1 \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 §. 3.2.3.5})$$

$$F_v = 1,35 \cdot F_o \cdot \left( \frac{a_x}{g} \right)^{0,1} \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.11})$$

**Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.10)**

$$0 \leq T < T_B \quad S_e(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left[ \frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_e(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_v$$

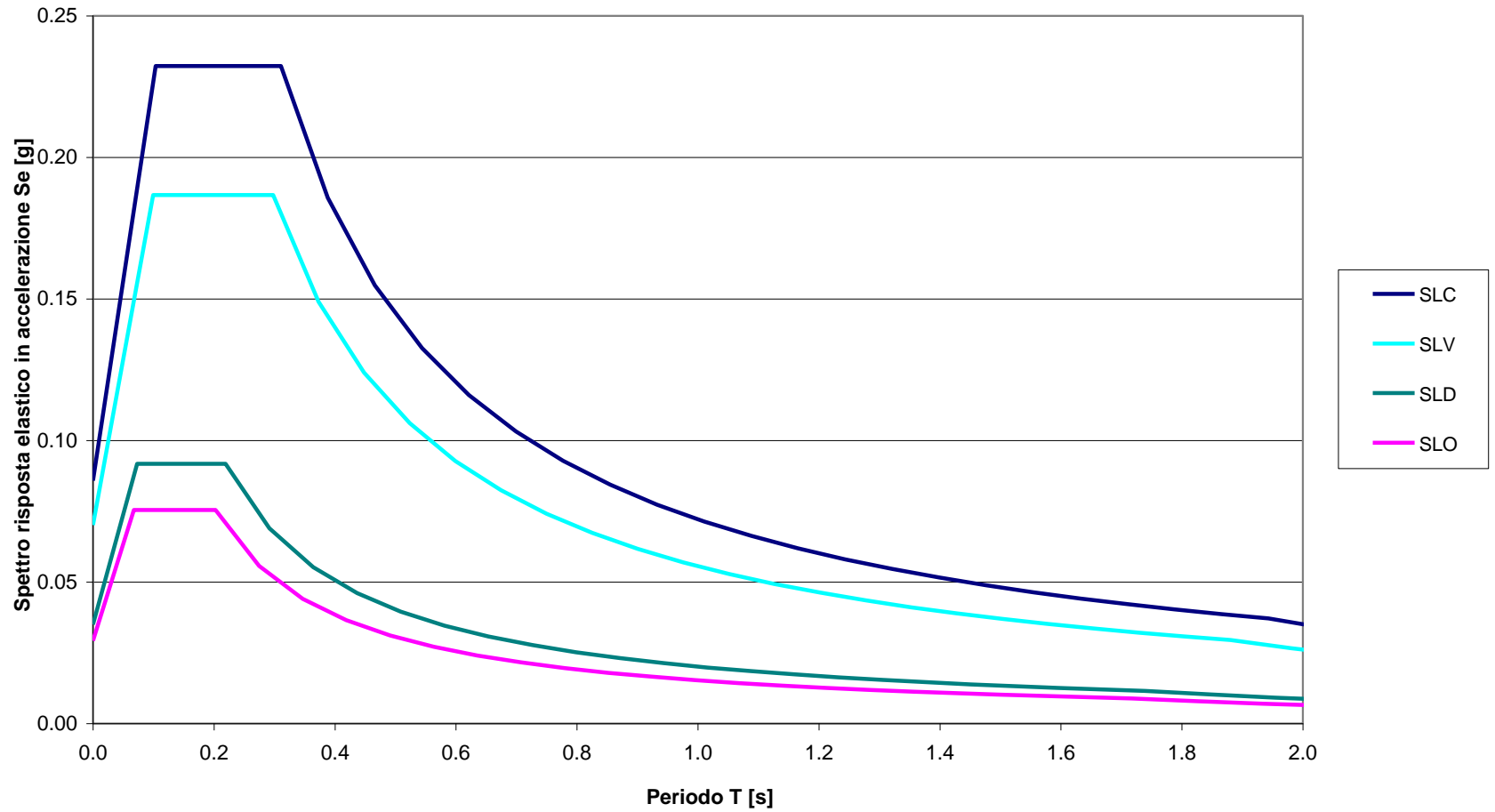
$$T_C \leq T < T_D \quad S_e(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_e(T) = a_s \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left( \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right)$$

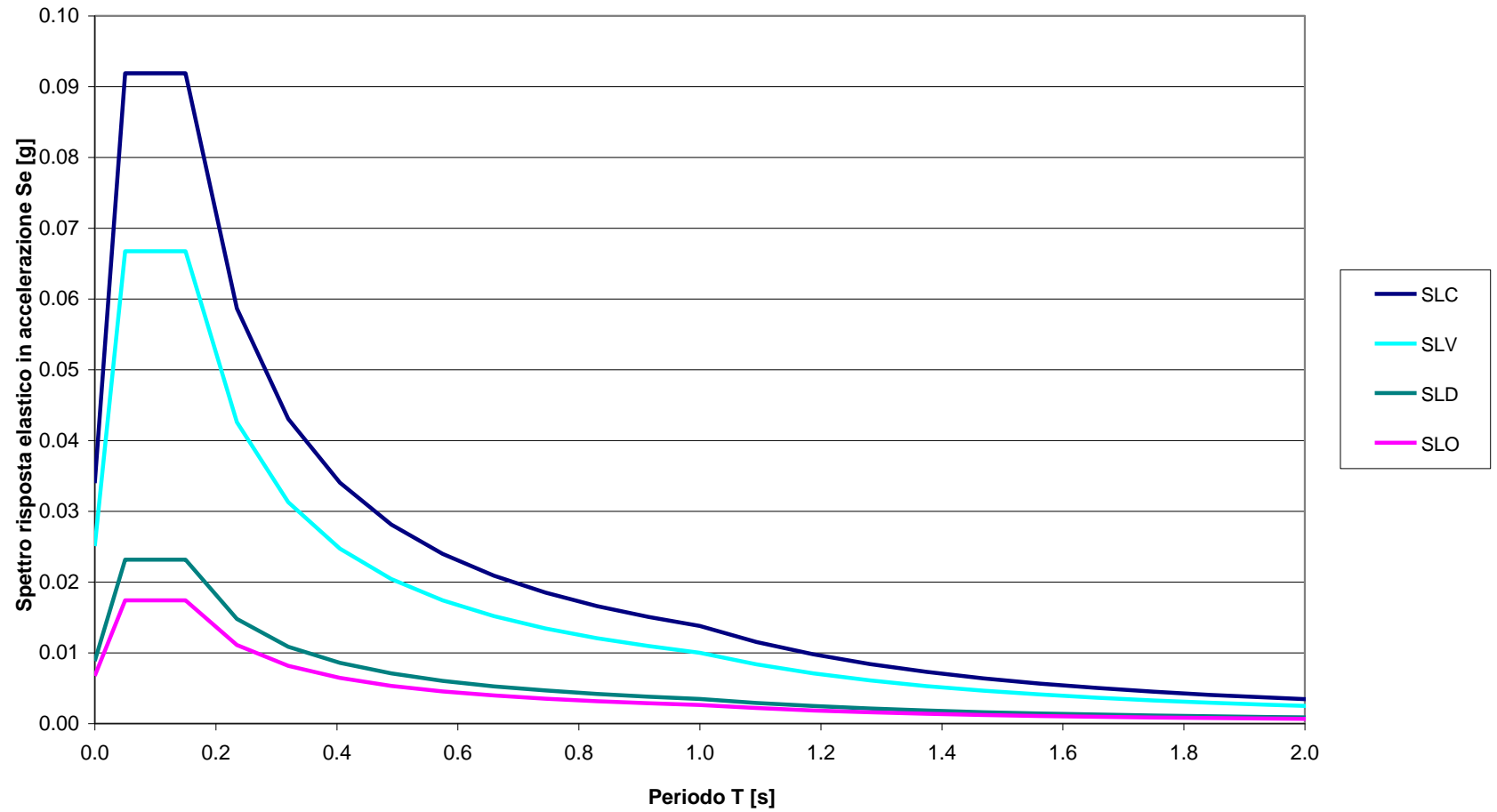
T [s]	Se [g]
0.000	0.007
0.050	0.017
0.150	0.017
0.235	0.011
0.320	0.008
0.405	0.006
0.490	0.005
0.575	0.005
0.660	0.004
0.745	0.004
0.830	0.003
0.915	0.003
1.000	0.003
1.094	0.002
1.188	0.002
1.281	0.002
1.375	0.001
1.469	0.001
1.563	0.001
1.656	0.001
1.750	0.001
1.844	0.001
1.938	0.001
2.031	0.001
2.125	0.001
2.219	0.001
2.313	0.000
2.406	0.000
2.500	0.000
2.594	0.000
2.688	0.000
2.781	0.000
2.875	0.000
2.969	0.000
3.063	0.000
3.156	0.000
3.250	0.000
3.344	0.000
3.438	0.000
3.531	0.000
3.625	0.000
3.719	0.000
3.813	0.000
3.906	0.000
4.000	0.000

Spettro orizzontale elastico allo stato limite di operatività (SLO)

### Spettro elastico orizzontale



### Spettro elastico verticale



### 5.1.9 Azioni inerziali dell'acqua invasata

Le azioni di inerzia dell'acqua, da aggiungere a quelle di inerzia della massa muraria, sono state assimilate ad una distribuzione di pressione sul paramento a monte della diga di valore:

$$p = a \times \rho \times c \times y_0$$

dove:

$a$  = accelerazione orizzontale massima al sito (0.086 per SLC);

$\rho$  = massa per unità di volume dell'acqua;

$y_0$  = differenza tra la quota dell'acqua presente nella combinazione sismica e la quota del punto più depresso dell'alveo naturale al piede del paramento;

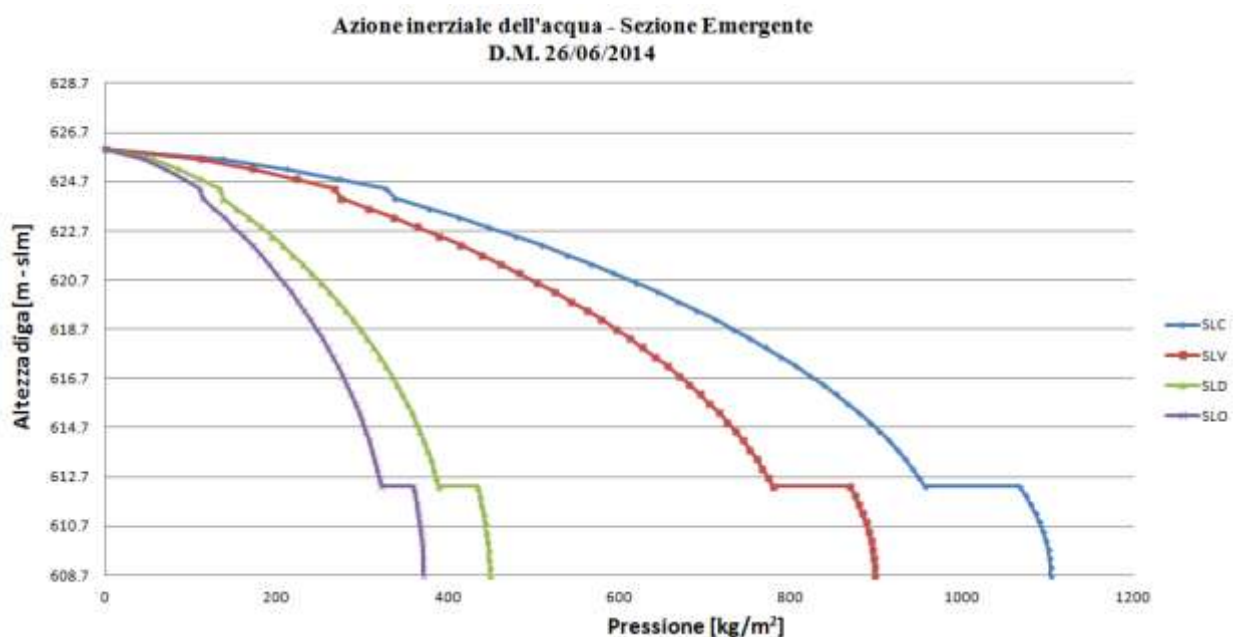
$y$  = differenza tra la quota dell'acqua presente nella combinazione sismica e la quota del punto generico del paramento a cui è associata la pressione  $p$ ;

$$c = \frac{c_m}{2} \left[ \frac{y}{y_0} \left( 2 - \frac{y}{y_0} \right) + \sqrt{\frac{y}{y_0} \left( 2 - \frac{y}{y_0} \right)} \right]$$

$c_m = -0.0073 \times \alpha + 0.7412$  in cui  $\alpha$  è l'angolo di inclinazione del paramento rispetto alla verticale espresso in gradi sessagesimali. Per  $\alpha > 60^\circ$  si assumerà  $c_m = 0.3$ .

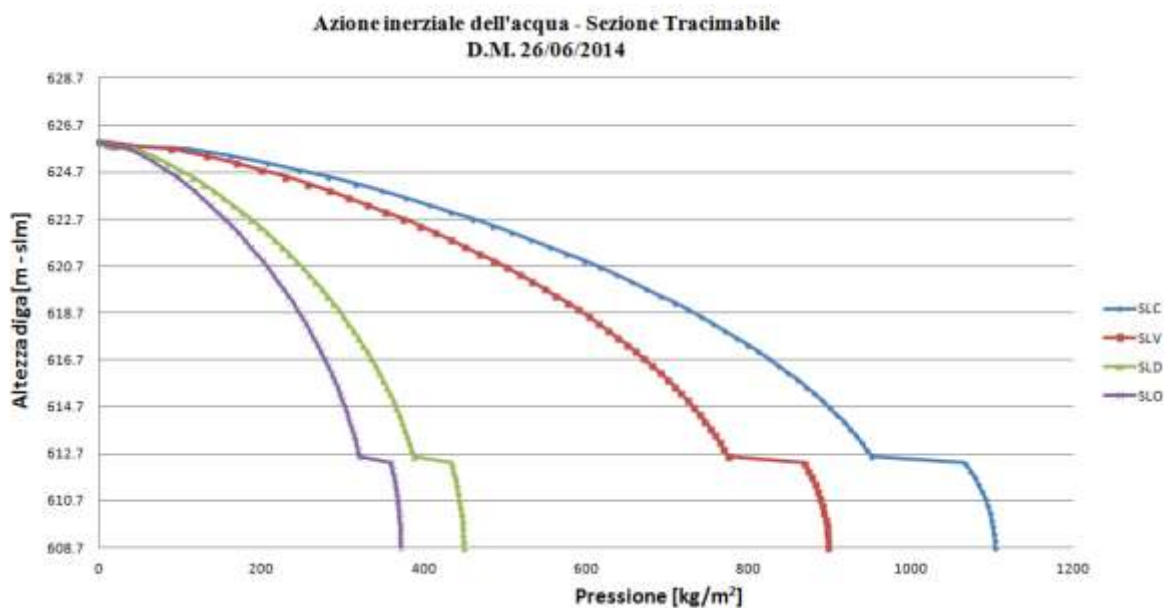
Se il paramento a monte ha inclinazione non costante si introdurrà per  $c_m$  il valore medio pesato in base all'estensione dei singoli tratti di diversa inclinazione fra i valori sopra indicati con riferimento alla sezione maestra; per le eventuali zone con inclinazione negativa (a strapiombo) si introdurrà per  $c_m$  il valore 0.74.

Il grafico seguente riporta il valore delle azioni inerziali dell'acqua invasata:



*Azioni inerziali dell'acqua invasata per la sezione emergente calcolate in accordo al D.M. 26.06.2014*





Azioni inerziali dell'acqua invasata per la sezione tracimabile calcolate in accordo al D.M. 26.06.2014

## 5.2 Gli stati limite e la combinazione delle azioni

Le verifiche sono state condotte rispetto ai seguenti stati limite indicati dalla normativa:

Condizioni della diga	Sato limite	Situazioni caratteristiche che definiscono lo stato limite	
Normale funzionamento	SLO	SLE -1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eccesso di tensioni o deformazioni del corpo diga e/o nei terreni di fondazione</li> </ul>
Danni riparabili, senza rilascio incontrollato di acqua	SLD	SLE-2 SLE-3 SLE-4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Danneggiamento degli organi di scarico superficiali o profondi</li> <li>Danneggiamento delle opere di derivazione</li> <li>Danneggiamento dei sistemi di misura e controllo</li> </ul>
Danni non riparabili, senza rilascio incontrollato dell'acqua	SLV	SLU-1 SLU-2 SLU-3 SLU-4 SLU-5 SLU-6	<ul style="list-style-type: none"> <li>Instabilità del corpo diga e dei terreni o ammassi rocciosi d'imposta di imposta</li> <li>Instabilità per scorrimento, anche parziale, del corpo diga o meccanismi di rottura locali</li> <li>Rottura per erosione interna: fessurazioni nel corpo diga, nei terreni o ammassi rocciosi di fondazione, negli elementi di tenuta o nelle superfici di contatto manufatto terreno, tali da provocare una filtrazione incontrollata</li> <li>Deformazioni del corpo diga e/o dei terreni o ammassi rocciosi di fondazione, tali da provocare danni strutturali allo sbarramento o la tracimazione</li> <li>Rottura o danno degli organi di scarico e in generale delle opere accessorie che impediscano il deflusso controllato del serbatoio.</li> <li>Condizione di piena che porti alla tracimazione del coronamento con conseguenti danni gravi fino alla possibilità di collasso dello sbarramento</li> </ul>
Danni che determinano il rilascio incontrollato di acqua o comunque rischio di perdite di vite umane	SLC	SLU-7	<ul style="list-style-type: none"> <li>Collasso della diga</li> </ul>
Collasso della struttura			

Allo stato limite di esercizio sono state condotte verifiche con riferimento all'eccesso di tensioni e deformazioni del corpo diga in modo da garantire il normale funzionamento dell'opera.

Per gli stati limite ultimi sono state condotte verifiche con riferimento all'eccesso di tensioni del corpo diga, verifiche delle barre di connessione, delle azioni sollecitanti la superficie di interfaccia tra getto nuovo e calcestruzzo esistente, e verifiche di tipo globale relative a scorrimento e ribaltamento della diga. Le verifiche geotecniche di portanza della roccia di fondazione sottoposta ai carichi di progetto sollecitanti la diga sono riportate nella seguente relazione:

*“Italgen – Diga di Cassiglio – Olmo al Brembo (BG) – Progetto Appesantimento della Diga – Relazione Geotecnica / Gennaio 2018 / Redatta dall'Ing. Stefano Guido e Dr. Geol. Andrea Martignoni”*

Per la combinazione tra azioni sismiche nella direzione orizzontale e nella direzione verticale sono stati assunti i seguenti coefficienti di concomitanza (tabella C5 del DM):

Direzione	Direzione orizzontale Monte – Valle e Valle - Monte	Direzione verticale
Coeff. di concomitanza	1.0	0.3
	0.3	1.0

Nella definizione delle combinazioni delle azioni che possono agire contemporaneamente, le azioni variabili vengono combinate con i coefficienti di combinazione  $\psi$  di cui alla seguente tabella (tabella C6 del DM):

Azioni	Coeff. di combinazione delle azioni variabili		
	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$
Coazione da calore di idratazione	0.6	0.6	0.5
Coazione da variazione termiche esterne	0.6	0.6	0.5
Spinta del ghiaccio	0.7	0.5	0.2

I coefficiente amplificativi  $\gamma$  utilizzati nelle combinazioni di carico sono riportati nella seguente tabella:

		Coeff. $\gamma$	EQU	STR
Carichi permanenti	Favorevoli	$\gamma_{G1}$	0.9	1.0
	Sfavorevoli		1.1	1.3
Carichi permanenti non strutturali	Favorevoli	$\gamma_{G2}$	0.0	0.0
	Sfavorevoli		1.5	1.5
Carichi variabili	Favorevoli	$\gamma_Q$	0.0	0.0
	Sfavorevoli		1.5	1.5

Di seguito sono riportate le combinazioni di carico prese in esame:

#### SLE – Stato Limite di Esercizio

- Stato Limite di Danno (SLD) utilizzando la combinazione sismica di seguito riportata:

$$E + G_1 + G_2 + \psi_{21} \times Q_{k1} + \psi_{22} \times Q_{k2} + \dots$$

- Stato Limite di immediata Operatività (SLO) utilizzando la combinazione sismica di seguito riportata:  
 $E + G_1 + G_2 + \psi_{21} \times Q_{k1} + \psi_{22} \times Q_{k2} + \dots$
- Stato Limite di Esercizio (SLE) utilizzando la combinazione caratteristica quasi permanente di seguito riportata:  
 $G_1 + G_2 + \psi_{21} \times Q_{k1} + \psi_{22} \times Q_{k2} + \dots$
- Stato Limite di Esercizio (SLE) utilizzando la combinazione caratteristica rara di seguito riportata:  
 $G_1 + G_2 + Q_{k1} + \psi_{02} \times Q_{k2} + \dots$

#### SLU – Stato Limite Ultimo

- Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV) utilizzando la combinazione sismica di seguito riportata:  
 $E + G_1 + G_2 + \psi_{21} \times Q_{k1} + \psi_{22} \times Q_{k2} + \dots$
- Stato Limite di Collasso (SLC) utilizzando la combinazione sismica di seguito riportata:  
 $E + G_1 + G_2 + \psi_{21} \times Q_{k1} + \psi_{22} \times Q_{k2} + \dots$
- Stato Limite Ultimo (SLU) utilizzando la combinazione fondamentale di seguito riportata (esercizio normale - fase costruttiva - fine costruzione):  
 $\gamma_{G1} \times G_1 + \gamma_{G2} \times G_2 + \gamma_{Q1} \times Q_{k1} + \gamma_{Q2} \times \psi_{02} \times Q_{k2} + \dots$
- Stato Limite Ultimo (SLU) utilizzando la combinazione eccezionale di seguito riportata (massimo invasivo):  
 $G_1 + G_2 + A_d + \psi_{21} \times Q_{k1} + \psi_{22} \times Q_{k2} \dots$

dove:

G: sono le azioni permanenti descritte nei precedenti capitoli

Q : sono le azioni variabili descritte nei precedenti capitoli

A: sono le azioni eccezionali descritte nei precedenti capitoli

E: sono le azioni sismiche descritte nei precedenti capitoli

### 5.3 Le proprietà dei materiali

Tenuto conto della tipologie e numerosità delle indagini effettuate si può considerare un livello di conoscenza dei materiali e della struttura nel suo complesso “LC2”.

I valori resistenti del calcestruzzo esistente ( $X_{rd}$ ) messi in conto nelle verifiche sono stati ottenuti a partire dai valori medi ( $X_m$ ) risultanti dalle campagne di indagini descritte ai precedenti capitoli e ridotti con i coeff. di seguito riportati:

- fattore di confidenza FC per conoscenza adeguata pari a 1.2;
- coeff. parziale di sicurezza  $\gamma_c$  relativo al calcestruzzo pari a 1.5;

pertanto il valore di resistenza del materiale  $X_{rd}$  è stato assunto pari a:

$$X_{rd} = X_m / (FC \times \gamma_c)$$

I valori resistenti dei materiali di nuova realizzazione sono stati definiti in accordo a quanto riportato nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (DM 14/01/2008).

#### 5.3.1 Calcestruzzo esistente

##### 5.3.1.1 Trattazione statistica delle prove di laboratorio

Per definire i valori delle proprietà meccaniche del calcestruzzo esistente da assumere nei calcoli è stata eseguita una trattazione statistica dei dati delle prove di laboratorio eseguite nel corso degli anni.

Considerato il numero elevato di prove sul calcestruzzo e la variabilità registrata, si ritiene opportuna una loro interpretazione di tipo statistico, fornendo ulteriori considerazioni sui dati e sulle loro modalità di acquisizione.

#### Omogeneità e confrontabilità dei dati

##### Massa volumica

I risultati delle prove delle tre campagne hanno restituito valori del peso specifico apparente, per cui i dati si ritengono omogenei e comparabili.

Con riferimento alla tabella di seguito riportata, l'unità di misura adottata per il peso specifico apparente è [daN/m<sup>3</sup>].

##### Modulo di elasticità

Come per la massa volumica, i dati del modulo di elasticità si possono ritenere omogenei e comparabili in quanto tutti i valori processati si riferiscono al modulo elastico secante.

Con riferimento alla tabella di seguito riportata, l'unità di misura adottata per il modulo elastico secante è [MPa].

### Valore di resistenza a compressione

I valori di resistenza per le prove ISMES 88 e ISMES 93 sono stati ottenuti da provini con diametro  $\Phi \approx 72$  mm e rapporto  $h/d \approx 2$ . Le prove ITC 90 sono state condotte per provini aventi diametro  $\Phi \approx 72$  mm, ma rapporti  $h/d$  variabili. Tuttavia tali risultati “sono espressi sia in termini di sforzo di rottura, determinato dal rapporto fra carico e superficie, che “normalizzati” per  $h/d=2$ ”. I valori da noi considerati per l’analisi dei dati sono quelli normalizzati. Pertanto i dati si ritengono omogenei e comparabili. Con riferimento alla tabella di seguito riportata, l’unità di misura adottata per la resistenza a compressione è [MPa].

### Valore di resistenza a trazione

La resistenza a trazione deriva sia da prove di trazione diretta (ISMES 88) che da prove a trazione indiretta (prova brasiliana – ITC 90 normate attualmente da UNI EN 12390-6: 2010). L’Eurocodice 2 (3.1.2.) suggerisce cautelativamente di valutare la resistenza a trazione come:

$$f_{ct,ax} = 0.9 f_{ct,sp}$$

I valori delle prove del 1990 sono stati quindi moltiplicati per il coefficiente 0,9, rendendo i dati di tutte le prove omogenei e comparabili.

Con riferimento alla tabella di seguito riportata, l’unità di misura adottata per la resistenza a trazione è [MPa].

### Elaborazione statistica

Per ottenere un valore medio di tutte e quattro le grandezze da inserire nel modello di calcolo tenendo conto della dispersione dei dati, si è ricorso alla funzione statistica dell’intervallo di confidenza. L’intervallo di confidenza rappresenta un parametro di fondamentale importanza nei casi in cui la variabilità del campione (molto spesso dovuta al fatto che il campione è piccolo) possa rendere aleatoria l’interpretazione dei risultati. Esso fornisce informazioni riguardo alla precisione dei valori ottenuti attraverso lo studio di un campione. Ad esempio, un intervallo di confidenza 95% (il più comunemente adottato) comprende un intervallo di valori che tiene conto della variabilità del campione, in modo tale che si può confidare, con un margine di certezza ragionevole (appunto il 95%), che quell’intervallo contenga il valore vero dell’intera popolazione che non si ha avuto modo di esaminare.

I passi sono i seguenti:

- si sceglie la variabile statistica da considerare (nel nostro caso la media);
- si calcola la media del campione e si stima la deviazione standard della popolazione;
- si sceglie il livello di confidenza desiderato (95%);
- si calcola il margine di errore attraverso la formula  $m_e = Z_{\alpha/2} * \sigma / \sqrt{(n)}$ ;

- si setta l'intervallo di confidenza sottraendo e sommando alla media il margine di errore  $\bar{x} \pm m_e$

Nelle formule sopra esposte:

- $Z_{\alpha/2}$  = valore di distribuzione normale standardizzata in corrispondenza di  $\alpha/2$ , ovvero  $\alpha/2=0,95/2=0,475$  nel nostro caso.  $Z_{0,475}$  vale 1,960;
- $\sigma$  = stima della deviazione standard della popolazione;
- $n$  = numerosità del campione;
- $\bar{x}$  = media del campione.

Quanto sopra risulta valido per campioni aventi numerosità  $n > 30$ . Quando, come nel caso delle prove ISMES88 o ITC90 per la resistenza a trazione, il campione è meno numeroso, bisogna sostituire alla funzione  $Z$  la funzione  $t_{(1-\alpha)/2, n-1}$  di Student, che dipende non solo dal livello di confidenza considerato, ma anche dalla numerosità del campione.

Questa analisi viene effettuata per ogni grandezza e per ogni campagna di prove di laboratorio.

A favore di sicurezza, nei calcoli per ogni grandezza si tiene conto della media aritmetica dei valori minimi di confidenza ottenuti per ogni campagna di indagine.

La tabella seguente riporta la trattazione statistica dei dati relativi al peso specifico apparente.

Il valore ottenuto è  $\rho_a = 2372 \text{ kN/m}^3$ .

pa [daN/m <sup>3</sup> ]					
88	90				93
2.410	2.300	2.530	2.480	2.500	2.300
2.480	2.410	2.490	2.520	2.510	2.380
2.500	2.480	2.500	2.680	2.590	2.400
2.380	2.510	2.520	2.550	2.530	2.390
2.270	2.430	2.430	2.490	2.610	2.300
2.290	2.330	2.520	2.610	2.420	2.460
2.490	2.340	2.550	2.530	2.530	2.470
2.140	2.400	2.500	2.540	2.570	2.490
2.150	2.490	2.600	2.540	2.300	2.300
2.460	2.530	2.453	2.580	2.440	2.460
2.300	2.340	2.500	2.500	2.580	2.460
2.530	2.480	2.430	2.400	2.520	2.400
2.560	2.520	2.570	2.490	2.570	2.490
2.280	2.570	2.580	2.690	2.500	2.380
2.390	2.470	2.490	2.370	2.380	2.470
2.410	2.420	2.400	2.440	2.370	2.390
2.270	2.490	2.560	2.480	2.520	2.420
2.070	2.370	2.530	2.400	2.530	2.410
2.440	2.430	2.570	2.390	2.320	2.420
2.310	2.440	2.560	2.480	2.390	2.450
	2.360	2.530	2.490	2.220	2.430
	2.380	2.520	2.470	2.340	2.480
	2.390	2.500	2.490	2.110	2.460
	2.550	2.500	2.480	2.280	2.480
	2.540	2.350	2.290	2.390	2.460
	2.440	2.420	2.280	2.460	2.260
	2.420	2.500	2.190	2.350	2.250
	2.410	2.440	2.310	2.340	2.270
	2.560	2.480	2.470	2.450	2.420
	2.290	2.570	2.520	2.510	2.490
	2.230	2.450	2.470	2.370	2.390
	2.330	2.450	2.550	2.440	2.400
	2.470	2.420	2.340	2.420	2.470
	2.610	2.480	2.420	2.340	2.500
	2.490	2.460	2.480	2.560	2.530
	2.510	2.500	2.410	2.570	2.470
	2.530	2.510	2.400	2.230	2.390
	2.520	2.500	2.490	2.440	2.390
	2.360	2.370	2.510	2.350	2.310
	2.440	2.530	2.320	2.440	2.300
	2.090	2.120	2.390	2.480	
	2.410	2.490	2.380	2.510	
	2.330	2.540	2.440		
	2.480	2.510	2.390		
	2.340	2.520	2.380		

n	20
$\sigma$	136
max	2.560
$\mu$	2.357
min	2.070
$t_{\alpha/2, n-1}$ oppure $Z_{\alpha/2}$	2,093
margine di errore	64
val min int. di confidenza	<b>2.293</b>
val max int. di confidenza	2.420

177	40
100	74
2.690	2.530
2.452	2.410
2.090	2.250
1,960	1,960
15	23
<b>2.437</b>	<b>2.387</b>
2.467	2.433

pa inf medio [daN/m <sup>3</sup> ]	<b>2.372</b>
------------------------------------	--------------

La tabella seguente riporta la trattazione statistica dei dati relativi al modulo elastico secante.

Il valore ottenuto è  $E_{sec} = 32.679$  MPa

Esec [Mpa]	
88	90
52.600	34.970
40.450	35.740
37.900	54.860
39.400	51.050
23.650	53.280
23.100	35.260
29.750	49.870
44.850	42.350
38.500	30.710
37.600	57.090
15.500	39.580
23.050	41.480
	45.800
	46.980
	51.160
	26.220
	46.640
	28.980
	42.580
	52.030
	54.870
	57.080
	49.050
	41.880
	35.500
	34.550
	32.360
	28.240
	17.250
	52.350
	27.870
	33.540
	49.640
	41.020

n	12	34
$\sigma$	10.824	10.251
max	52.600	57.090
$\mu$	33.863	41.819
min	15.500	17.250
$t_{\alpha/2, n-1}$ oppure $Z_{\alpha/2}$	2,201	1,960
margine di errore	6.877	3.446
val min int. di confidenza	26.985	38.373
val max int. di confidenza	40.740	45.264

Esec inf medio[Mpa]	32.679
---------------------	--------



La tabella seguente riporta la trattazione statistica dei dati relativi alla resistenza a compressione.

Il valore ottenuto è  $f_{cm} = 31,98$  MPa

fc [Mpa]			
88	90		93
42,10	23,10	50,50	17,50
31,97	26,10	48,60	67,20
36,48	52,30	71,60	56,90
23,96	28,10	90,20	34,40
16,25	32,70	69,70	54,40
14,59	49,10	8,50	34,70
21,47	45,60	49,30	40,60
61,39	60,20	57,60	41,10
24,45	39,70	87,60	44,00
29,41	36,70	54,40	64,40
9,67	69,10	39,70	27,00
14,06	9,80	65,70	40,90
	28,60	6,70	26,90
	77,10	16,70	27,90
	30,90	35,60	43,90
	37,90	17,00	36,80
	75,60	34,80	55,30
	45,20	11,70	87,90
	43,40	21,30	66,10
	12,50	27,20	71,20
	67,20	28,40	54,50
	57,50	53,30	75,40
	4,00	22,10	25,00
	18,80	27,20	71,70
	8,90	59,80	60,40
	47,00	68,60	64,20
	11,70	16,70	34,60
	23,70	59,60	48,90
	22,80	49,80	66,10
	41,30	18,00	73,20
	47,70	18,00	81,60
	45,50	20,50	30,60
	59,90	31,60	17,20
	52,70	10,70	19,60
	91,00	9,80	51,80
	49,50	31,80	71,50
	31,30	36,00	45,20
	26,80	48,40	30,60
	37,50	16,50	52,30
	43,10	51,60	65,50
	43,50	34,70	52,20
	24,80	38,70	58,10
	24,30		44,60
	42,80		17,70
	48,80		42,40
			27,40
			57,90
			36,10

n	12
$\sigma$	14,51
max	61,39
$\mu$	27,15
min	9,67
t $\alpha/2$ , n-1 oppure Z $\alpha/2$	2,201
margin di errore	9,22
val min int. di confidenza	17,93
val max int. di confidenza	36,37

87	48
20,41	18,30
91,00	87,90
39,22	48,24
4,00	17,20
1,960	1,960
4,29	5,18
34,93	43,06
43,51	53,41

fc inf medio [Mpa]	31,98
--------------------	-------

La tabella seguente riporta la trattazione statistica dei dati relativi alla resistenza a trazione.

Il valore ottenuto è  $f_{ctm}=2,03$  MPa

fct [Mpa]	
88	90 (*)
0,99	2,05
1,40	3,13
1,90	2,11
0,97	5,47
	4,59
	3,02
	3,79
	7,58
	5,33
	5,37
	5,86
	3,03
	6,05
	5,27
	2,93
	3,13
	2,63
	2,57
	4,78
	3,82
	5,47
	2,91
	3,69
	2,17

n	4	24
$\sigma$	0,44	1,50
max	1,90	7,58
$\mu$	1,32	4,03
min	0,97	2,05
$t_{\alpha/2, n-1}$	3,182	2,069
margin di errore	0,70	0,60
val min int. di confidenza	<b>0,62</b>	<b>3,43</b>
val max int. di confidenza	2,01	4,63

fct inf medio [Mpa]	<b>2,03</b>
---------------------	-------------

(\*) Valori delle prove di trazione alla brasiliana moltiplicati per 0,9

### Ulteriori considerazioni circa i valori adottati nei calcoli

Gli atti di Collaudo dell'epoca a firma dell'ing. Lamberto Canali, capo della Commissione di Collaudo (14.03.1953), riportano gli esiti delle prove ufficiali di 40 provini, da cui si ricava che a 28 giorni il peso specifico medio del calcestruzzo è di 2.530 daN/m<sup>3</sup> e le resistenze con valore medio di 33,6 MPa. Tali valori, testati su 22 provini a 90 giorni, sono rispettivamente 2.520 daN/m<sup>3</sup> e 36,9 MPa.

I valori di compressione testati nelle 3 campagne di indagine (88, 90 e 93) sottostimano sicuramente i reali valori di resistenza alla compressione dei calcestruzzi esistenti, in quanto a parità di materiale:

- minore è il diametro delle carote, maggiore è la dispersione dei dati relativi alla resistenza di compressione;
- minore è il diametro delle carote, minore è la resistenza di compressione;
- maggiore è il rapporto h/d delle carote, minore è la resistenza a compressione.

Bisogna tenere conto anche dell'azione del carotiere, che può determinare la comparsa di microlesioni interne tanto più accentuate quanto più scadente è la qualità del calcestruzzo in opera.

Tutti i fattori sopra descritti sono quantificabili con coefficienti tabellati in letteratura, e tutti porterebbero, nel nostro caso, ad aumentare i valori di resistenza stimati.

Il valori di resistenza utilizzati nei calcoli sono pertanto estremamente a favore di sicurezza.

#### **5.3.1.2 Parametri messi in conto in progetto**

##### Resistenza cilindrica a compressione

$f_{cm} = 31,98$  MPa (resistenza cilindrica a compressione che tiene conto della trattazione statistica con confidenza al 95%)

$\gamma_c = 1,5$  (coeff. di sicurezza del calcestruzzo)

F.C. = 1,2 (fattore di confidenza)

$f_{cd} = 31,98 / (1,5 \times 1,2) = 17,77$  MPa (resistenza cilindrica a compressione)

##### Resistenza a trazione semplice

$f_{ctm} = 2,03$  MPa (resistenza media a trazione che tiene conto della trattazione statistica con confidenza al 95%)

$\gamma_c = 1,5$  (coeff. di sicurezza del calcestruzzo)

F.C. = 1,2 (fattore di confidenza)

$f_{ctd} = 2,03 / (1,5 \times 1,2) = 1,13$  MPa (resistenza a trazione semplice)

Modulo elastico

$E_{cm} = 32679$  MPa (modulo elastico secante che tiene conto della trattazione statistica con confidenza al 95%)

Il valore del modulo elastico secante ottenuto dalle prove di laboratorio pari a  $E_{cm} = 32679$  MPa risulta coerente con le relazioni teoriche proposte dalle NTC che legano il valore del modulo elastico secante al valore della resistenza a compressione ( $f_{cm}=31.98$  MPa) del calcestruzzo:  $E_{cm} = 22000 \times (f_{cm}/10)^{0.3} = 31181$  MPa. Questo permette di confermare la validità e correttezza del valore del modulo elastico ottenuto mediante le prove sperimentali di laboratorio.

Massa volumica apparente

$\gamma = 2372$  kg/m<sup>3</sup> (massa volumica apparente che tiene conto della trattazione statistica con confidenza al 95%)

Nei calcoli delle verifiche a scorrimento è stata considerata a favore di sicurezza la massa volumica apparente minima pari a 2372 kg/m<sup>3</sup>, mentre nelle calcoli per la definizione dell'azione sismica agente è stata considerata la massa volumica apparente media pari a 2406 kg/m<sup>3</sup>.

**5.3.2 Calcestruzzo dell'appesantimento**

Il calcestruzzo dell'appesantimento è previsto di classe C25/30. Tale classe di calcestruzzo dell'appesantimento soddisfa la classe di esposizione e durabilità XC2 (corrosione indotta da carbonatazione) in ambiente bagnato che richiede per l'appunto una minima classe di resistenza pari a C25/30 (contenuto minimo di cemento pari a 300 kg/m<sup>3</sup>) e un massimo rapporto acqua/cemento pari a 0,6.

Resistenza cilindrica a compressione

$f_{ck} = 25$  MPa (resistenza caratteristica cilindrica a compressione)

$f_{cm} = f_{ck} + 8 = 33$  MPa (resistenza media cilindrica a compressione)

$f_{cd} = 0.85 \times f_{ck} / \gamma_c = 0.85 \times 25 / 1,5 = 14,2$  MPa (resistenza di progetto cilindrica a compressione)

Resistenza a trazione semplice

$f_{ctm} = 0,3 \times (f_{ck})^{2/3} = 2,56$  MPa (resistenza media a trazione semplice)

$f_{ctd} = f_{ctm} / 1,5 = 1,71$  MPa (resistenza di progetto a trazione semplice)

Modulo elastico

$E' = 22000 \times (f_{cm}/10)^{0.3} = 31400$  MPa (modulo elastico medio secante)

Massa volumica apparente

$\gamma' = 2400$  kg/m<sup>3</sup> (massa volumica apparente media)

La seguente relazione:

*RT-038-2018 “Diga di Cassiglio – Progetto del calcestruzzo” – Anno 2018*

descrive in dettaglio le caratteristiche del calcestruzzo, nonché la previsione degli studi e della fase di prequalifica necessari per ottimizzare la scelta del calcestruzzo.

### **5.3.3 Roccia di fondazione**

Le caratteristiche della roccia di fondazione sono riportate in dettaglio nella seguente relazione geotecnica a cui si rimanda per ogni dettaglio:

*“Italgen – Diga di Cassiglio – Olmo al Brembo (BG) – Progetto Appesantimento della Diga – Relazione Geotecnica / Gennaio 2018 / Redatta dall’Ing. Stefano Guido e Dr. Geol. Andrea Martignoni”*

### **5.3.4 Barre di connessione**

Il sistema di connessione è costituito da barre inox di diametro  $\phi 30$  mm ad aderenza migliorata con le seguenti caratteristiche di resistenza:

$f_{yk} \geq 450$  MPa (sforzo a snervamento)

$f_{tk} \geq 500$  MPa (sforzo a rottura)

$E = 210000$  MPa

il valore di resistenza dell’acciaio assunto nei calcoli è il seguente:

$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s = 450 / 1,15 = 391$  MPa (sforzo di snervamento di progetto)

passo pari a 75×75 cm nei primi 6 m (da quota 608.7 m s.l.m. a quota 614.7 m s.l.m.),

passo pari a 75×150 cm da 6 m a 10 m (da quota 614.7 m s.l.m. a quota 618.7 m s.l.m.)

passo pari a 150×150 cm per il restante tratto (da quota 618.7 m s.l.m. a quota 626 m s.l.m.).

Per ogni ulteriore dettaglio si vedano le tavole di progetto.

## 5.4 DESCRIZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO E TIPO DI ANALISI

È stato considerato un modello ad elementi finiti tridimensionale, utilizzando elementi solidi a 8 nodi. La mesh del modello è stata opportunamente definita ed è realizzata da elementi di dimensioni 25×60×100 cm.

Per il calcolo è stato utilizzato il software di calcolo MIDAS Gen 2015 (Ver.2.1).

Il getto di appesantimento è stato modellato solidale con il vecchio corpo diga, quindi ipotizzando congruenza di spostamento dei nodi posti sulla superficie di separazione tra i due corpi.

Il metodo di analisi eseguito è l'analisi lineare dinamica con spettro di risposta. L'analisi dinamica lineare è consistita:

- nella determinazione dei modi di vibrare della costruzione;
- nel calcolo degli effetti dell'azione sismica, rappresentata dallo spettro di risposta di progetto, per ciascuno dei modi di vibrare considerati;
- nella combinazione di questi effetti.

Sono stati considerati tutti i modi con massa partecipante significativa, tutti i modi con massa partecipante superiore al 5% e comunque un numero di modi la cui massa partecipante totale fosse superiore all'85%.

La combinazione degli effetti relativi ai singoli modi è stata effettuata valutando la combinazione come radice quadrata della somma dei quadrati (SRSS) degli effetti relativi a ciascun modo, secondo l'espressione:

$$E = (\sum E_i^2)^{1/2}$$

E : valore combinato dell'effetto ;  $E_i$  = valore dell'effetto relativo al modo i

L'interazione terreno-struttura è stata messa in conto nel modello di calcolo considerando opportune molle alla Winkler poste sul contatto tra il corpo diga e la roccia di fondazione. Il valore delle costanti di Winkler sono state fornite da uno specifico studio geotecnico/geomeccanico eseguito dall'Ing. Stefano Guido e dal Dr. Geol. Andrea Martignoni e riportato nel seguente documento a cui si rimanda per ogni dettaglio:

*“Italgen – Diga di Cassiglio – Olmo al Brembo (BG) – Progetto Appesantimento della Diga – Relazione Geotecnica / Gennaio 2018 / Redatta dall'Ing. Stefano Guido e Dr. Geol. Andrea Martignoni”*

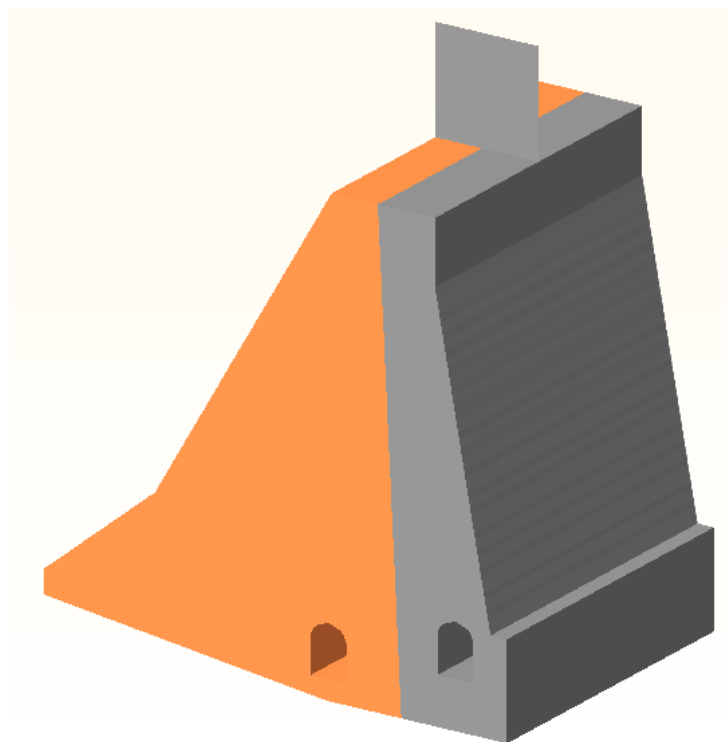
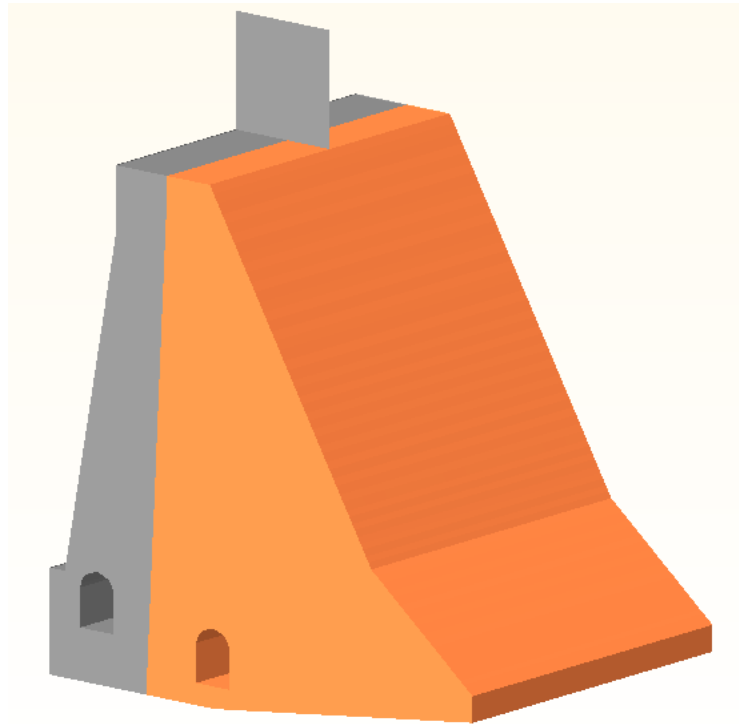
Le costanti di Winkler sono state definite per differenti sezioni del corpo diga sulla base delle indagini eseguite in sito che hanno permesso di caratterizzare il comportamento meccanico della roccia di fondazione e dell'interazione diga-roccia. Il valore delle costanti di Winkler è stato calcolato mediante la realizzazione di uno specifico modello geotecnico della roccia con applicati i carichi sollecitanti calcolati nei capitoli successivi e che per via iterativa giunti a convergenza ha permesso di calcolare i corretti valori delle molle da applicare al modello di calcolo. I valori delle costanti di Winkler utilizzati nei modelli fem sono i seguenti:

diga zona sponda destra :  $k_{\text{verticale}} = 24,9 \text{ kg/cm}^3$  e  $k_{\text{orizzontale}} = 15,3 \text{ kg/cm}^3$

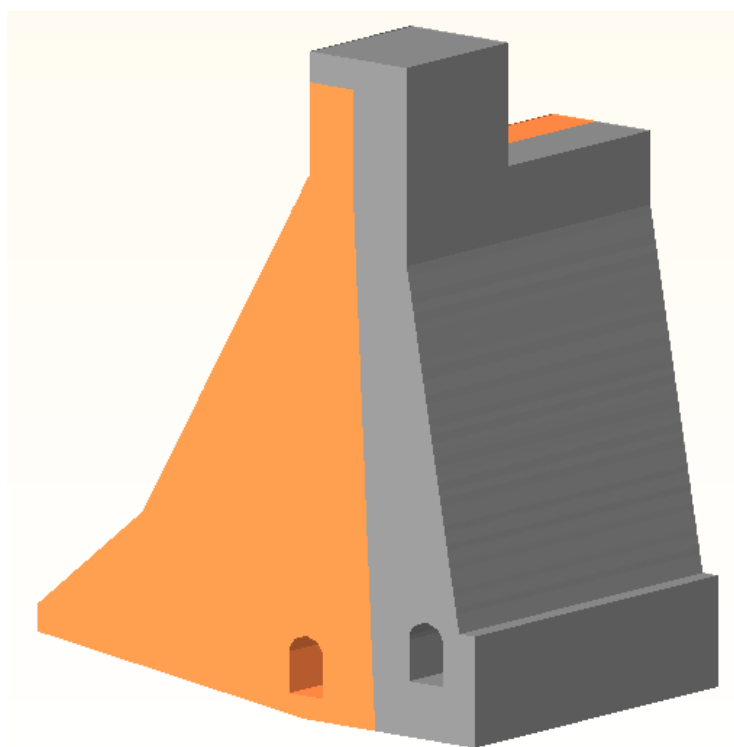
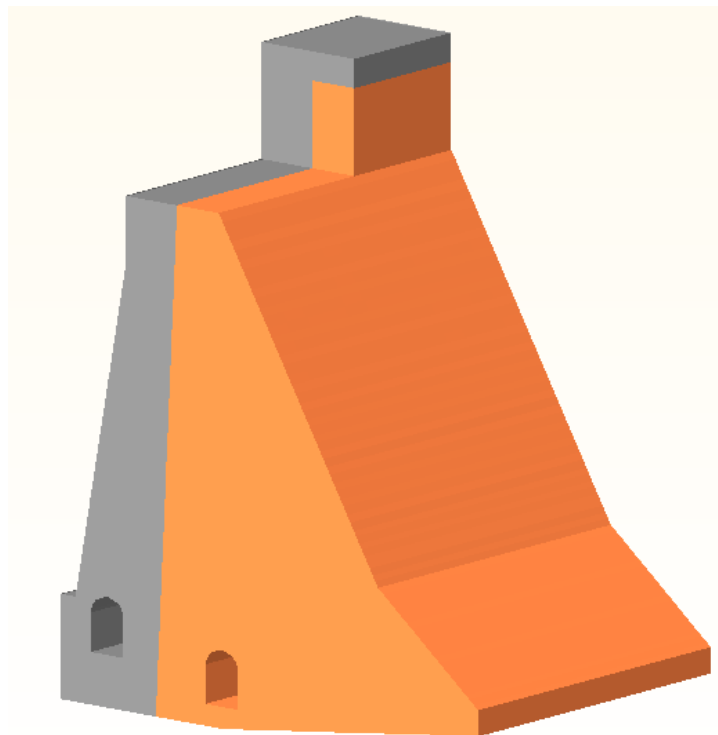
diga zona centrale :  $k_{\text{verticale}} = 24,9 \text{ kg/cm}^3$  e  $k_{\text{orizzontale}} = 15,3 \text{ kg/cm}^3$

diga sponda sinistra :  $k_{\text{verticale}} = 28,0 \text{ kg/cm}^3$  e  $k_{\text{orizzontale}} = 20,0 \text{ kg/cm}^3$

I calcoli degli sforzi sollecitanti il corpo diga sono stati ottenuti mediante n.2 modelli fem. Un modello per riprodurre il comportamento del concio A con sezione tracimabile ubicato nella zona centrale dello sbarramento e un modello per riprodurre il comportamento del concio B con sezione emergente sempre ubicato nella zona centrale dello sbarramento. Le immagini seguenti mostrano i modelli fem realizzati:



*Modello fem del concio A centrale con sezione tracimabile*



*Modello fem del concio B centrale con sezione emergente*



## 5.5 STUDIO RISPOSTA SIMICA LOCALE

La risposta sismica locale è stata valutata conducendo in sito le seguenti specifiche indagini:

- indagine sismica attiva con metodo MASW
- indagine HVSR su terreno

Considerato i risultati della prova MASW, della prove HVSR e il profilo stratigrafico dedotto dalle indagini geotecniche eseguite in sito (roccia) non si è ritenuto necessario l'esecuzione di ulteriori specifiche analisi per la definizione della risposta sismica locale. Inoltre non è necessario uno specifico studio sismotettonico del sito poichè  $a_g(T=475 \text{ anni}) = 0,057g < 0,15g$  (acc. bassa).

I risultati della prova MASW e HVSR sono riportati nella seguente relazione a cui si rimanda per ogni dettaglio:

*RdP-234-2017 “Rapporto tecnico di prova / Impianto Idroelettrico di Olmo al Brembo - Diga di Cassiglio - Indagini sperimentali - Prove dinamiche ambientali sul corpo diga / Prove MASW e HVSR su terreno “*  
*Gennaio 2018 – P&P Consulting Engineers*

### 5.5.1 Indagine sismica attiva con metodo MASW

La risposta sismica locale è stata valutata mediante un approccio semplificato in accordo a quanto prescritto nelle NTC al capitolo 3.2.2, che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento. Ai fini dell'identificazione della categoria è stata condotta una prova MASW per la valutazione della velocità delle onde di taglio nei primi 30 m di profondità.

La velocità è risultata pari a 1681 m/s: Categoria A (ammassi rocciosi) confermando le diverse indagini geotecniche eseguite in fondazione.

### 5.5.2 Indagine HVSR su terreno

La prova a stazione singola, nota anche come prova HVSR, consiste nella valutazione sperimentale dei rapporti di ampiezza spettrale fra le componenti orizzontali (H) e la componente verticale (V) delle vibrazioni ambientali sulla superficie del terreno misurati in un punto con un apposito sismometro a tre componenti. Il risultato di questa prova è una curva sperimentale che rappresenta il valore del rapporto fra le ampiezze spettrali medie delle vibrazioni ambientali in funzione della frequenza di vibrazione. Le frequenze alle quali la curva H/V mostra dei massimi sono legate alle frequenze di risonanza del terreno al di sotto del punto di misura. Pertanto, questa prova ha lo scopo principale di mettere in luce la possibile presenza di fenomeni di risonanza sismica.

La prova HVSR è stata condotta su una zona pianeggiante di terreno posta a valle della diga. I risultati forniti dall'indagine in termini di frequenza di risonanza pari a  $f_0 = 9,82 \pm 0,11$  Hz risultano indicare la presenza di uno strato di copertura di circa 6,0 - 7,0 m costituito da terreno collocato sopra strati rocciosi. Dal grafico sono anche evidenti frequenze più basse comprese da 0,5 fino a 3-4 Hz che mostrano la presenza di amplificazioni in una banda larga di frequenza che corrisponde alla stratigrafia rocciosa sottostante con transizioni tra roccia fratturata e roccia sana. Situazione quest'ultima che corrisponde in effetti al sito su cui poggia la diga posta appena più a monte. Ora, tenuto conto che la prima frequenza propria di vibrare della diga è a 7,6 Hz (frequenza diga calcolata ai successivi capitoli), vi è da ritenere che non sussistono particolari problematiche relative ad effetti di doppia risonanza suolo-struttura.

## 5.6 CALIBRAZIONE DEL MODELLO FEM DI CALCOLO MEDIANTE RAFFRONTO CON PROVA DINAMICA AMBIENTALE

Sulla diga esistente sono state eseguite prove dinamiche ambientali sperimentali che hanno permesso di calibrare il modello fem della diga esistente in termini di rigidezza e massa (frequenze proprie di vibrare) e al contempo di verifica che il comportamento dell'opera fosse regolare e non presentasse anomalie e degradi strutturali.

I risultati delle prove sperimentali sono riportati nel seguente rapporto di prova a cui si rimanda per ogni ulteriore approfondimento:

*RdP-234-2017 / Rapporto Tecnico di Prova / Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo / Diga di Cassiglio / Indagini sperimentali / Prove dinamiche ambientali sul corpo diga e Prove MASW e HVSR su terreno – Novembre 2017 – P&P Consulting Engineers*

La calibrazione del modello fem della diga esistente permette anche di calibrare e quindi cogliere il corretto comportamento dinamico della diga con appesantimento nel quale al corpo diga esistente è aggiunto il corpo di appesantimento a monte e ad esso solidale.

Sono stati realizzati diversi modelli fem della diga esistente da confrontare con i risultati sperimentali.

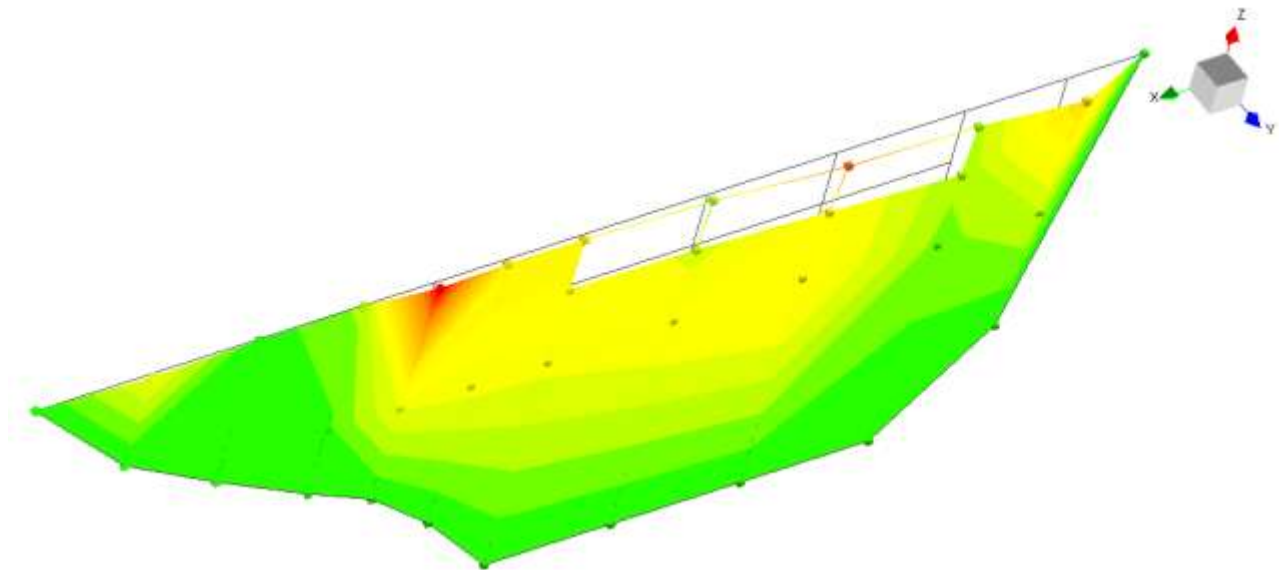
Un modello è realizzato senza mettere i conto i giunti tra i conci della diga e quindi considerando tutti i conci solidali tra loro. Durante la prova dinamica ambientale la diga risulta eccitata da microtremori che sono per lo più dovuti all'immissione nel bacino del torrente Stabina a ridosso dello sbarramento. Questi microtremori risultano di bassissima intensità e non sono di fatto in grado di eccitare il comportamento della diga con conci efficacemente separati, in quanto le vibrazioni non sono di intensità tale da vincere l'attrito comunque presente nei giunti tra i conci.

Di seguito sono riportati i risultati dell'analisi dinamica modale della diga esistente considerata senza giunti messi a confronto con i risultati ottenuti dalla sperimentazione dinamica ambientale. Il valore delle frequenze e le forme delle deformate modali ottenute mediante modello di calcolo fem risultano cogliere in modo corretto i risultati sperimentali.

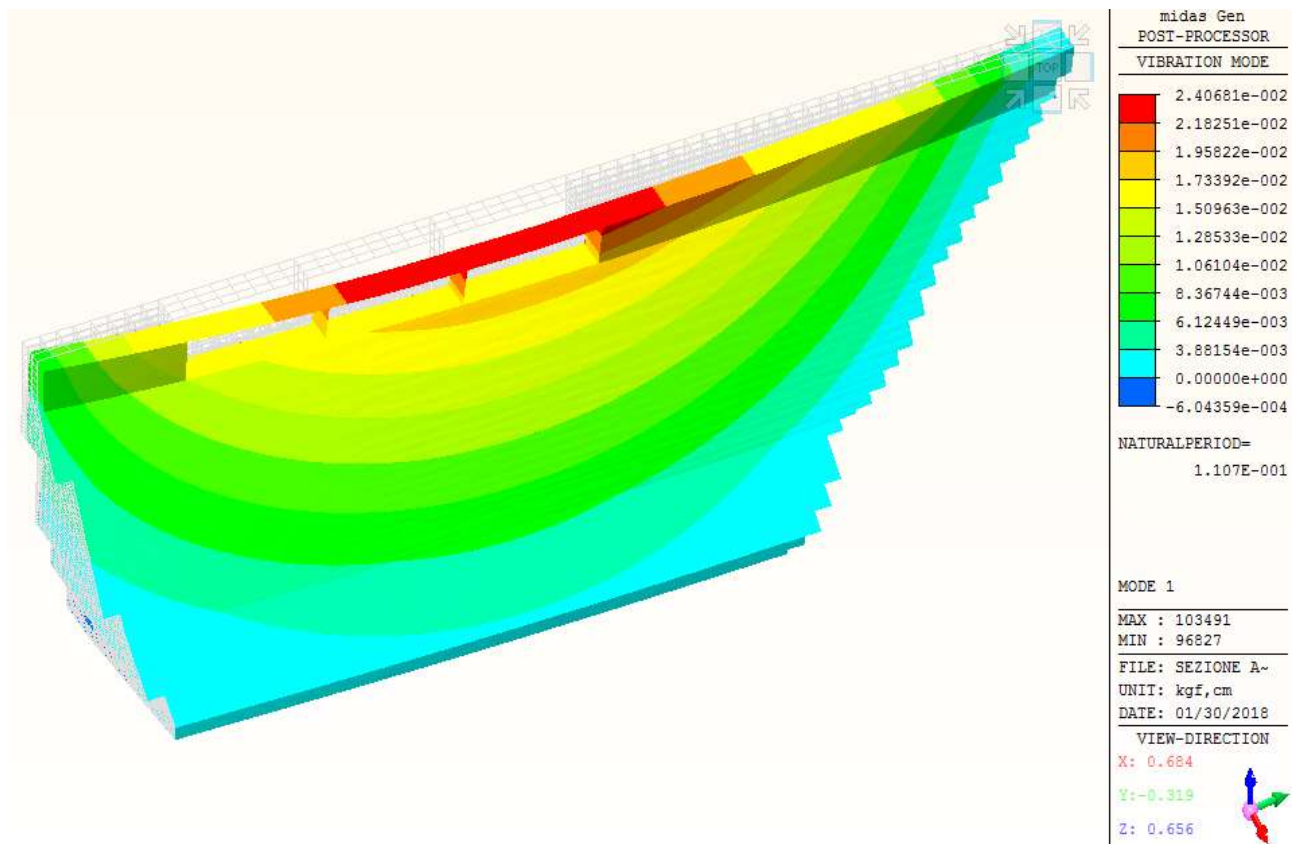
	<i>Modo di vibrare da modello FEM</i>		<i>Modo di vibrare da sperimentazione dinamica ambientale</i>
	$f_{fem}$ (Hz)	M (%)	$f_{amb}$ (Hz)
<i>f1</i>	9,0 Hz	61,6 %	9,4 Hz
<i>f2</i>	18,7 Hz	10,8 %	18,5 Hz
<i>f3</i>	24,7 Hz	19,9 %	25,0 Hz
<i>f4</i>	29,8 Hz	4,6 %	30,6 Hz
<i>f5</i>	38,9 Hz	1,1 %	37,5 Hz
		98,0 %	

M (%) : massa partecipante al modo di vibrare

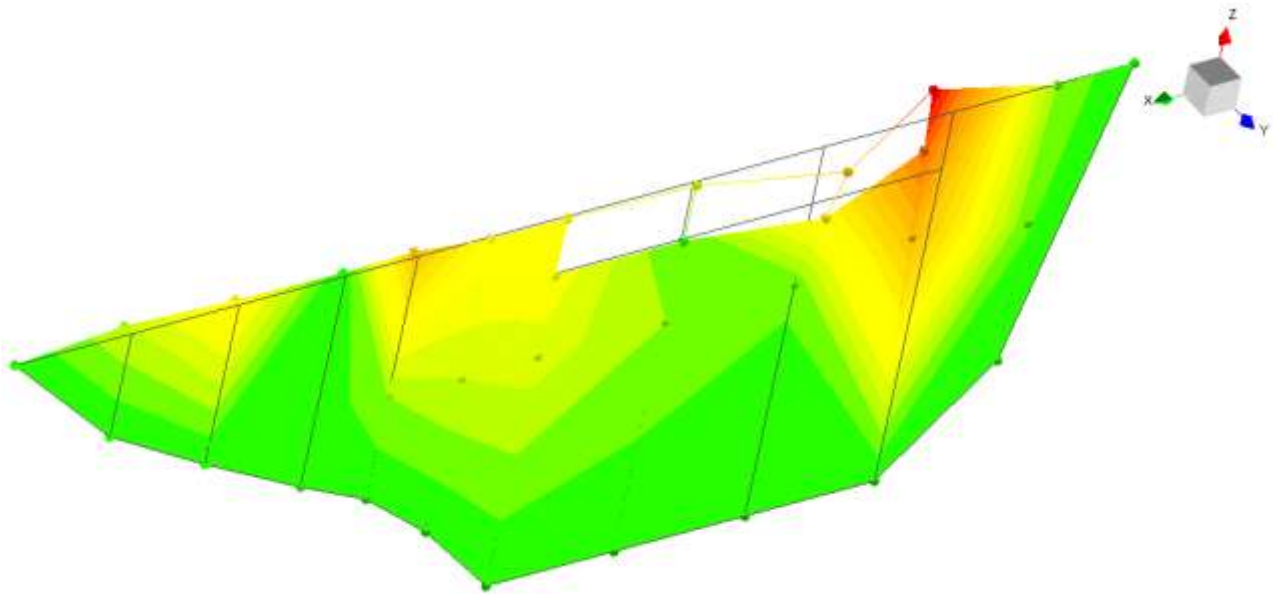
Di seguito si riporta un confronto tra le forme delle defomate modali ottenute da modello di calcolo e da sperimentazione:



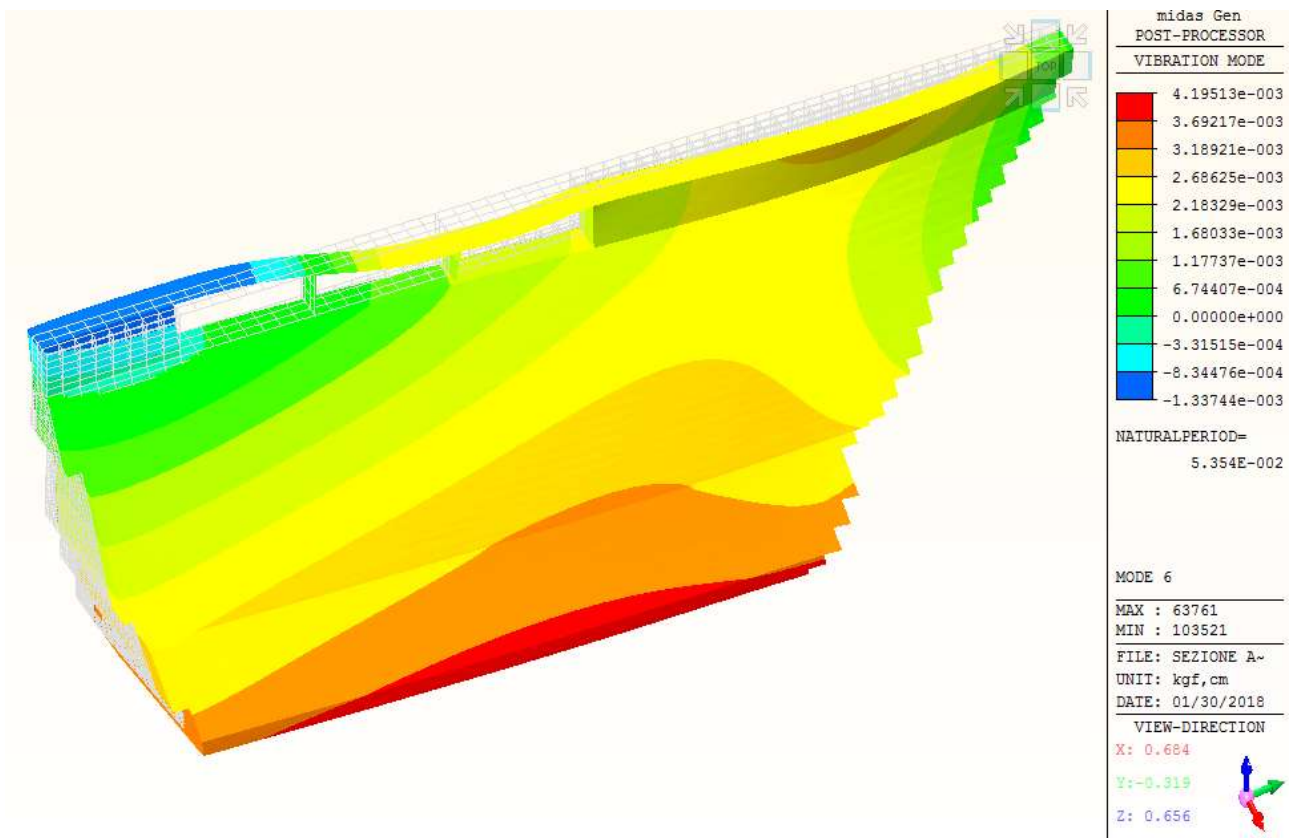
**Sperimentazione / Modo 1 – Frequenza 9,4 Hz**



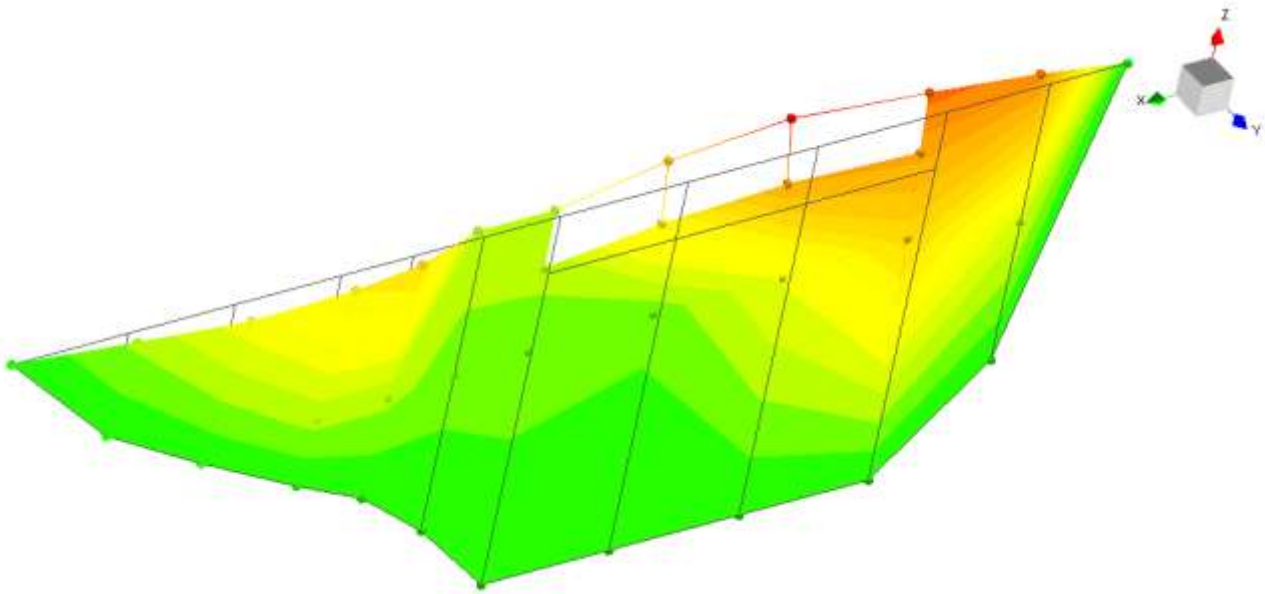
**Modello FEM / Modo 1 – Frequenza 9,0 Hz**



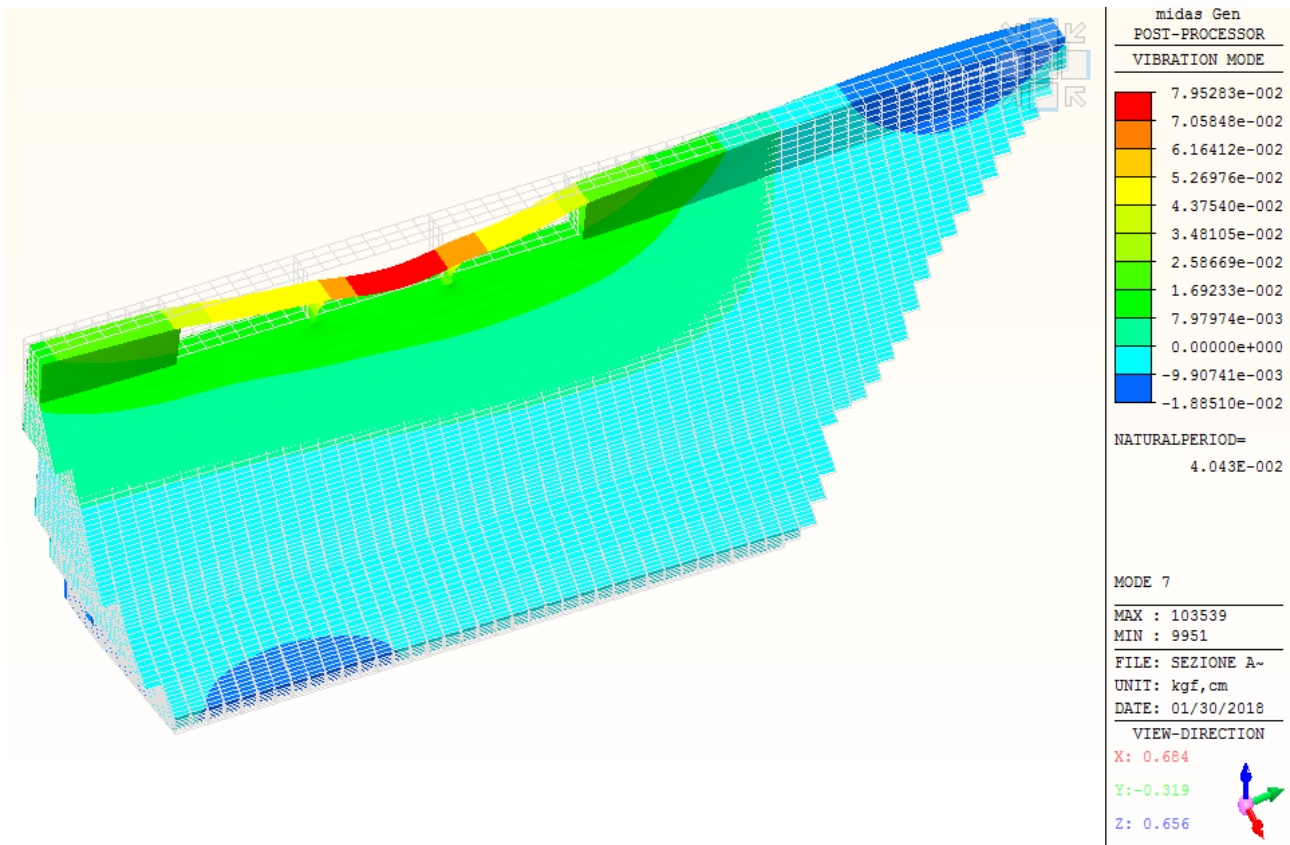
**Sperimentazione / Modo 2 – Frequenza 18,5 Hz**



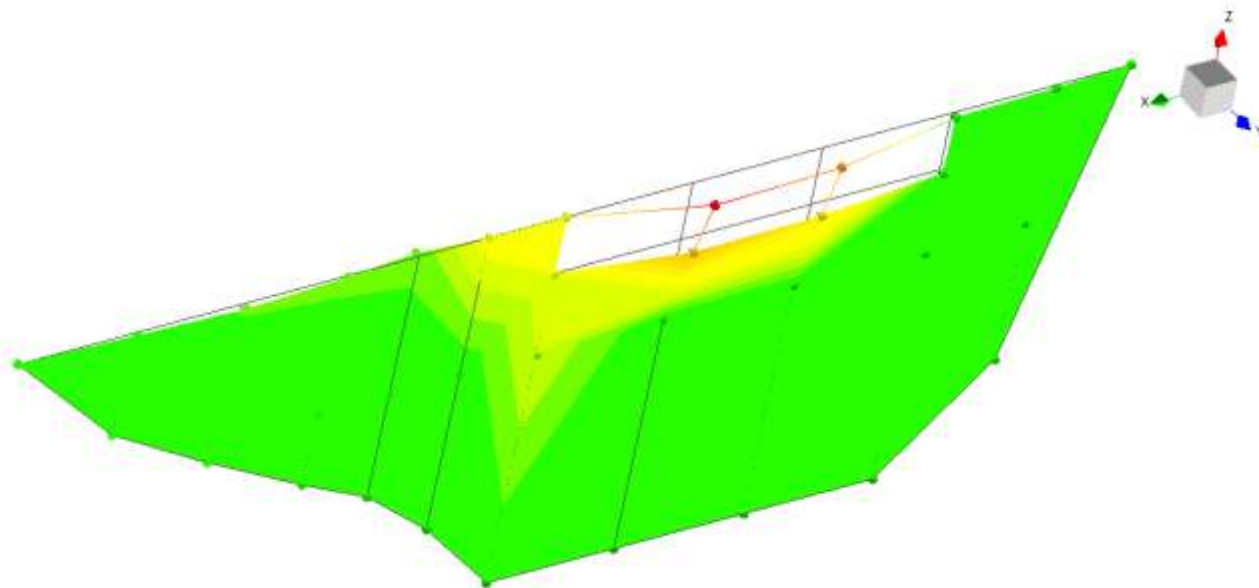
**Modello FEM / Modo 2 – Frequenza 18,7 Hz**



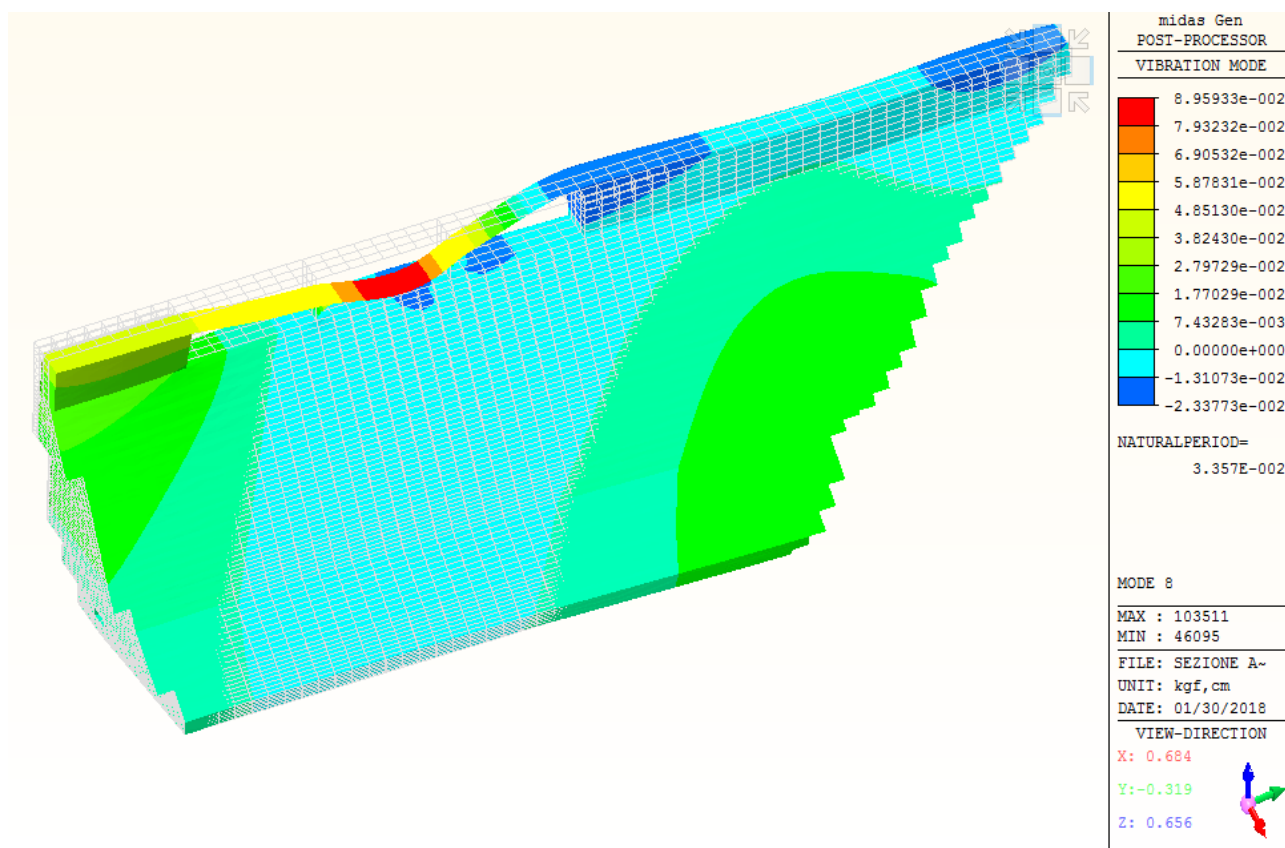
Sperimentazione / Modo 3 – Frequenza 25,0 Hz



Modello FEM / Modo 3 – Frequenza 24,7 Hz

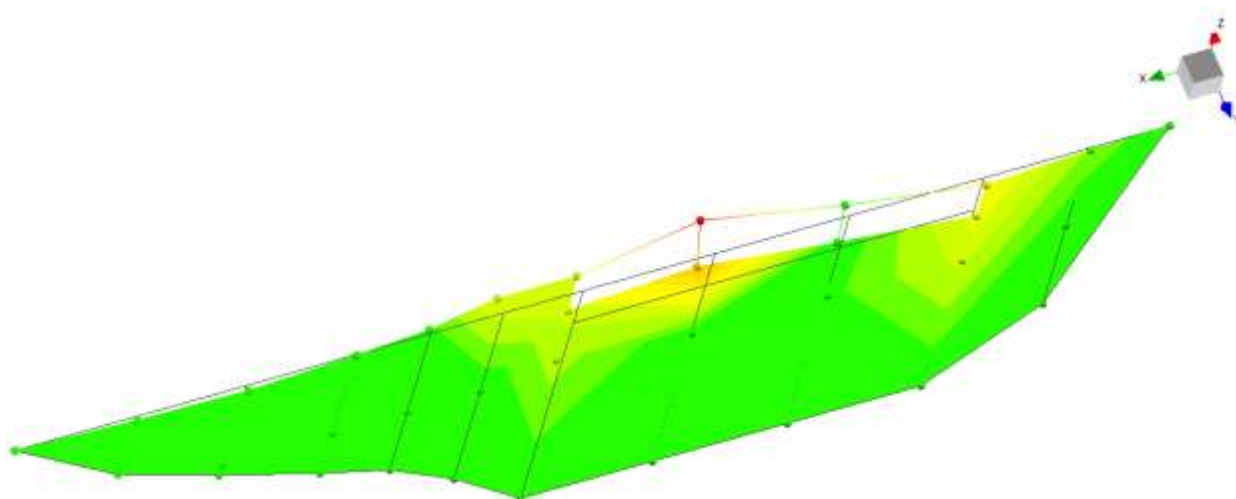


Sperimentazione / Modo 4 – Frequenza 30,6 Hz

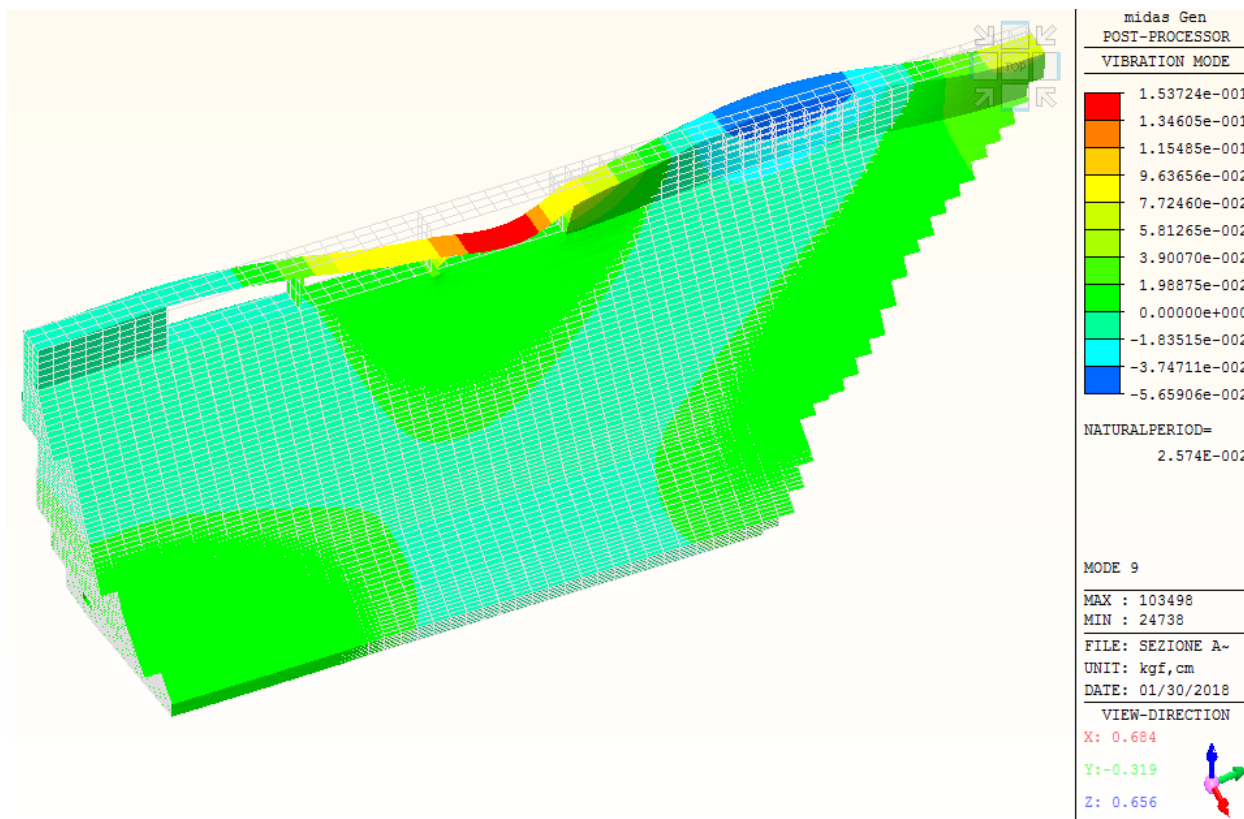


Modello FEM / Modo 4 – Frequenza 29,8 Hz



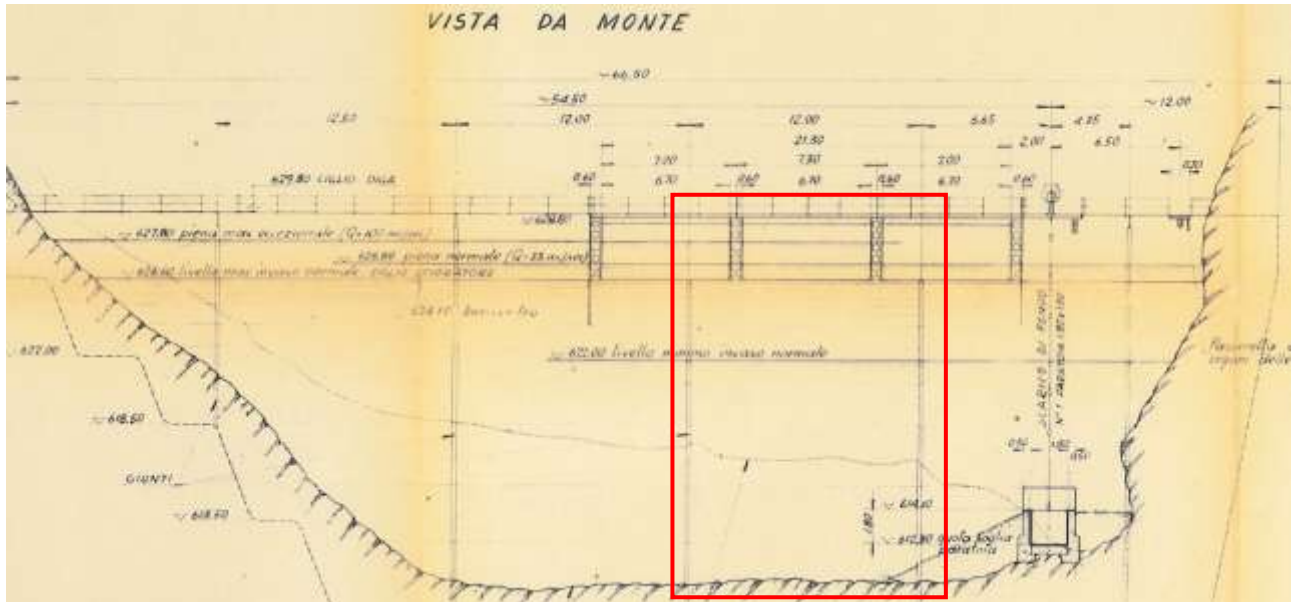


Sperimentazione / Modo 5 – Frequenza 37,5 Hz



Modello FEM / Modo 5 – Frequenza 38,9 Hz

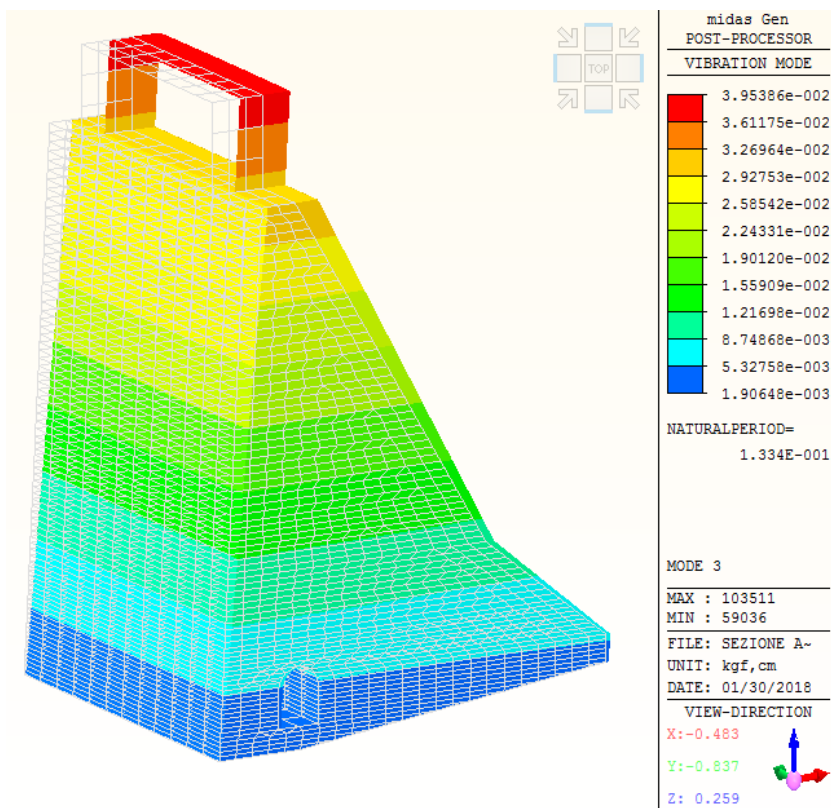
E' stato realizzato anche un modello della diga considerando i singoli conci indipendenti, nell'ipotesi che con forze agenti di intensità superiori a quelle dei microtremori ambientali (es. quelle sismiche) i giunti risultino essere efficaci. Di seguito sono messe a confronto i risultati ottenuti dalla prova dinamica ambientale con i risultati ottenuti da modello fem di un singolo concio (concio A) ubicato nella zona centrale con sezione tracimabile e di un concio nella zona centrale con sezione emergente (concio B) (modi di vibrare in direzione orizzontale perpendicolare all'asse della diga):



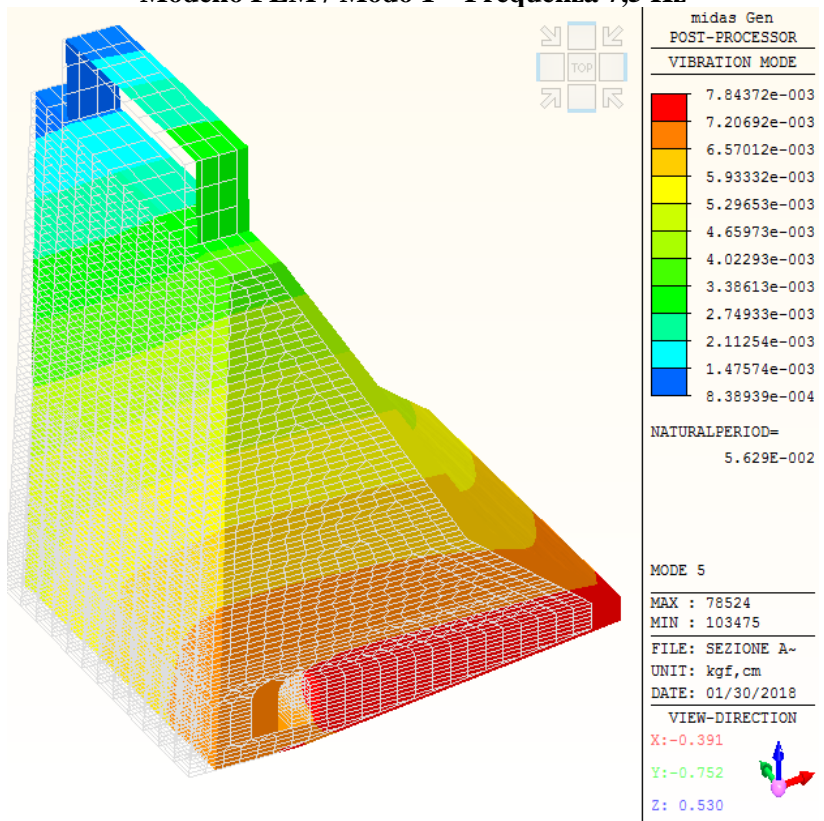
Sezione della diage sistente – Concio zona centrale con sezione tacimabile

	Modo di vibrare da modello FEM		Modo di vibrare da sperimentazione dinamica ambientale
	$f_{fem}$ (Hz)	M (%)	$f_{amb}$ (Hz)
$f1$	7,5 Hz	64,3 %	9,4 Hz
$f2$	17,8 Hz	10,0 %	18,5 Hz
$f3$	24,8 Hz	22,8 %	25,0 Hz
$f4$	33,5 Hz	1,2 %	30,6 Hz
$f5$	--- Hz	--- %	37,5 Hz
		98,3 %	

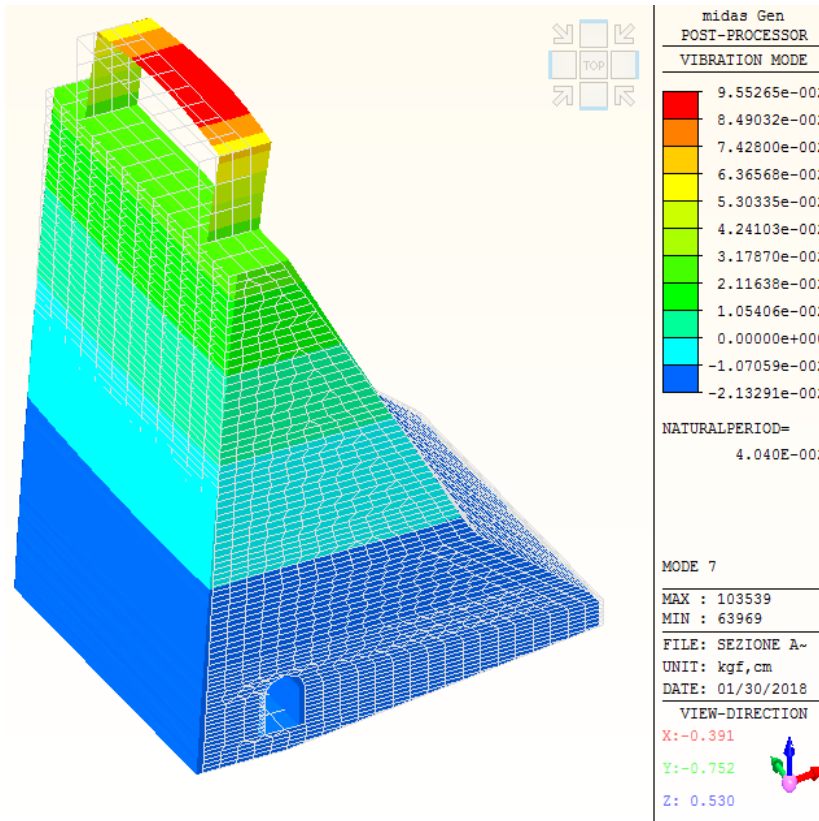




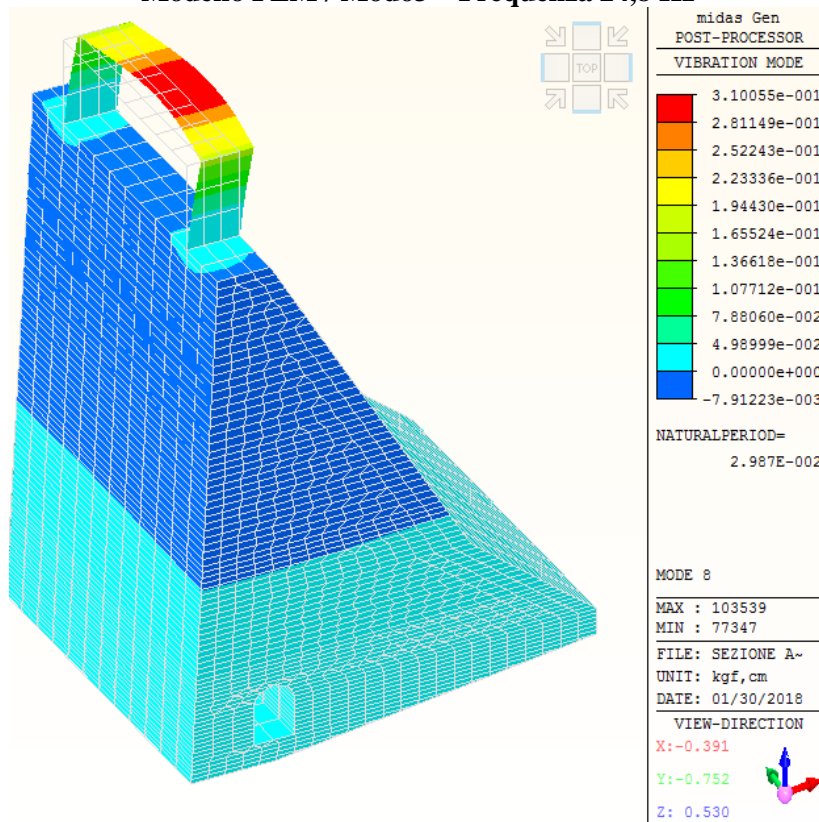
Modello FEM / Modo 1 – Frequenza 7,5 Hz



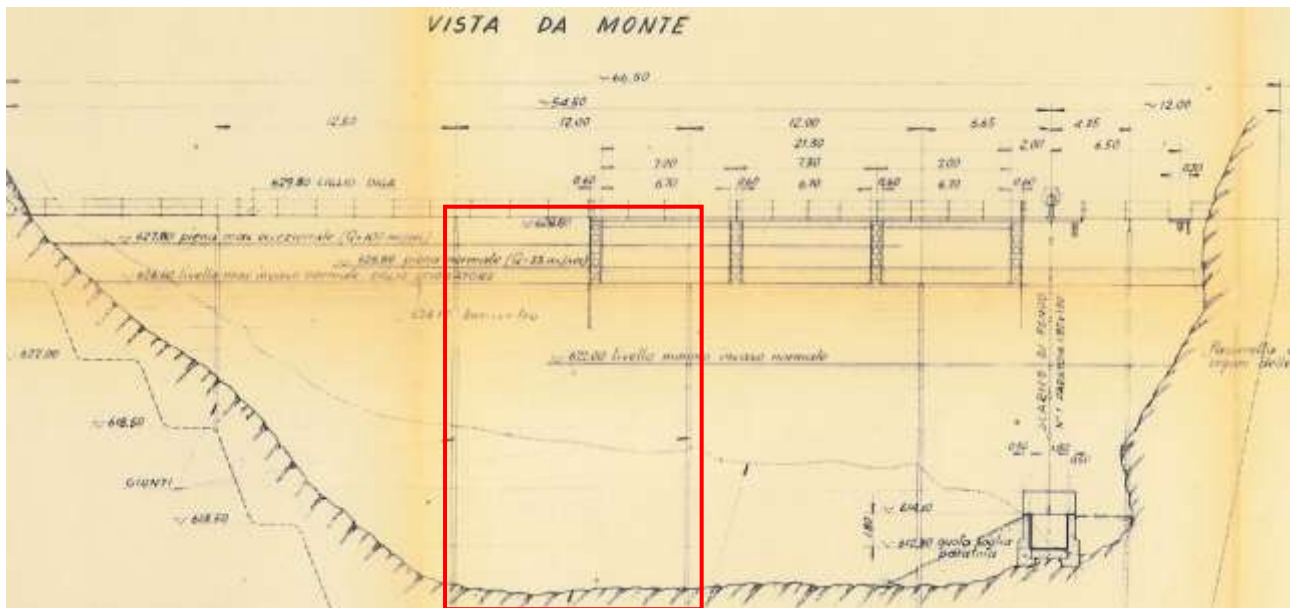
Modello FEM / Modo2 – Frequenza 17,8 Hz



Modello FEM / Modo3 – Frequenza 24,8 Hz

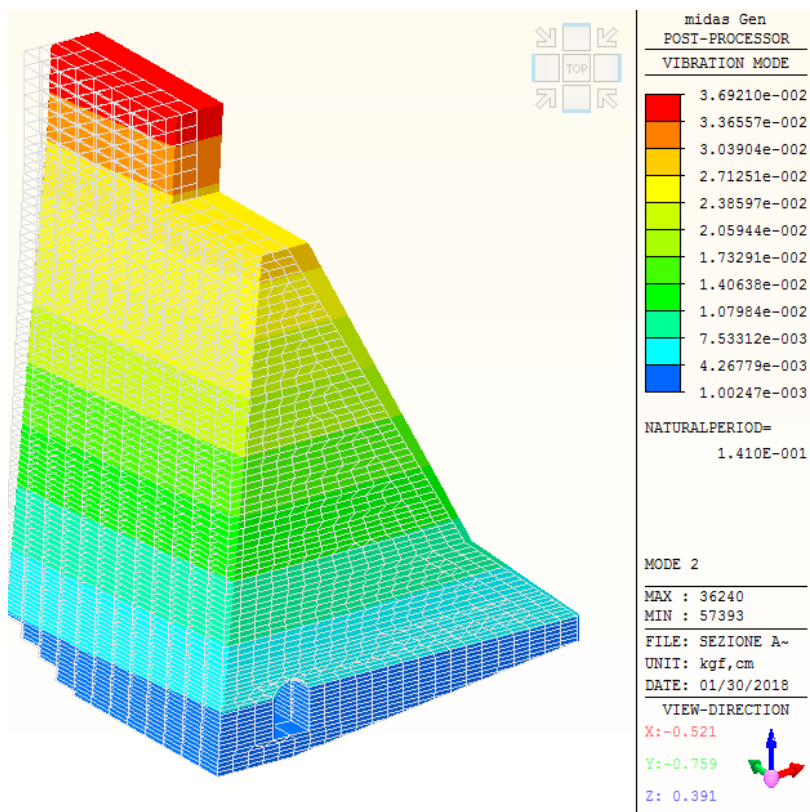


Modello FEM / Modo4 – Frequenza 33,5 Hz

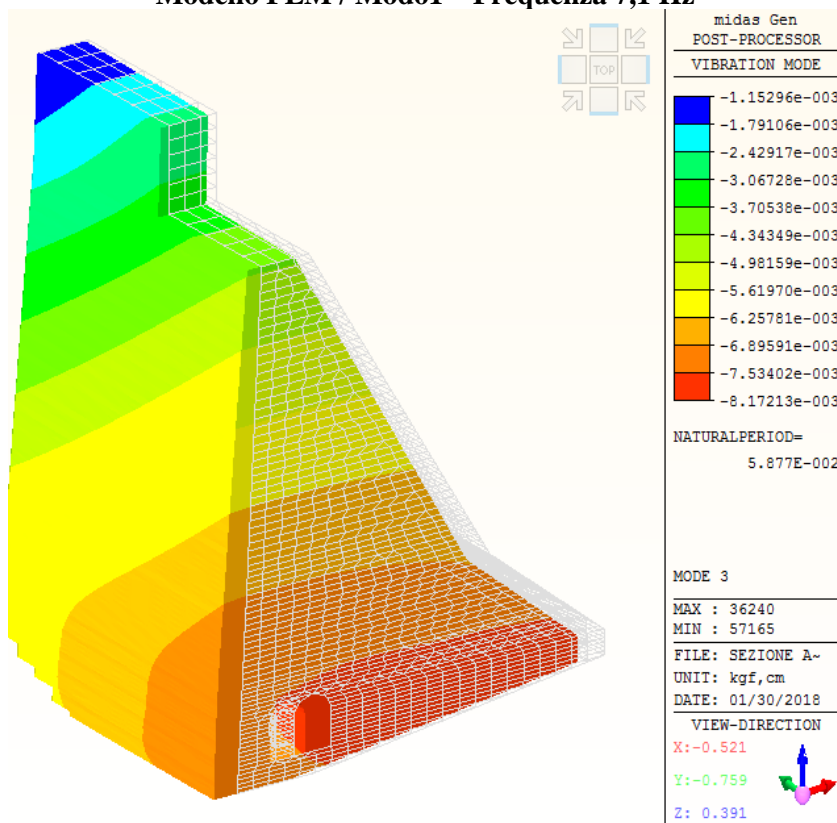


Sezione della diga sistente – Concio zona centrale con sezione emergente/tacimabile

	Modo di vibrare da modello FEM		Modo di vibrare da sperimentazione dinamica ambientale
	$f_{fem}$ (Hz)	$M$ (%)	$f_{amb}$ (Hz)
$f1$	7,1 Hz	62,8 %	9,4 Hz
$f2$	17,0 Hz	12,6 %	18,5 Hz
$f3$	23,6 Hz	23,2 %	25,0 Hz
$f4$	40,6 Hz	1,0 %	30,6 Hz
$f5$	--- Hz	--- %	37,5 Hz
		99,6 %	

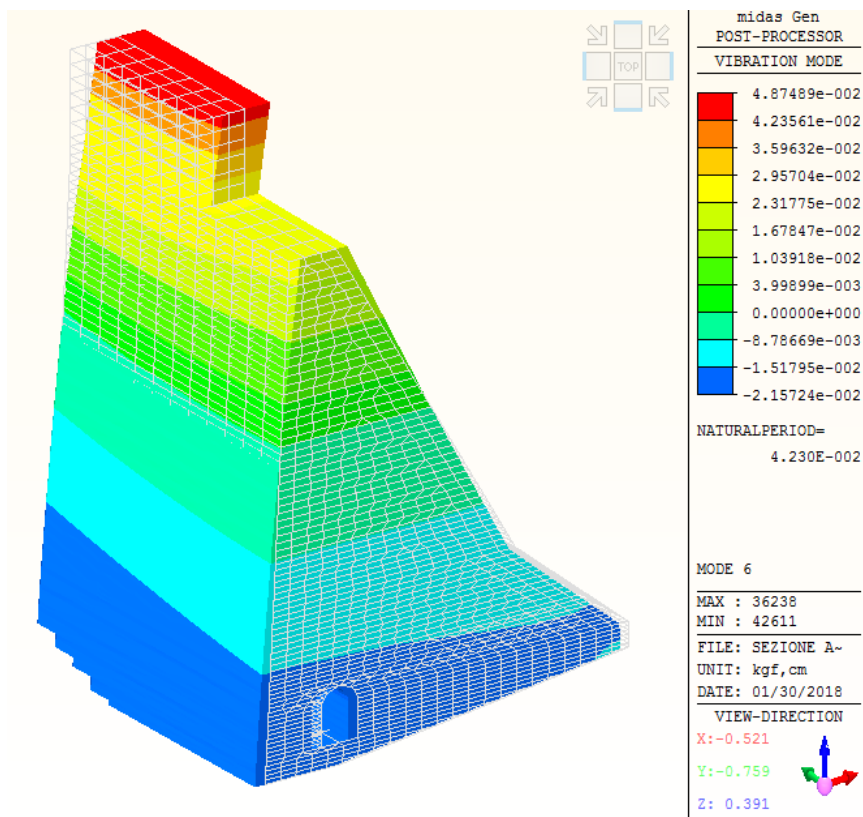


**Modello FEM / Modo1 – Frequenza 7,1 Hz**

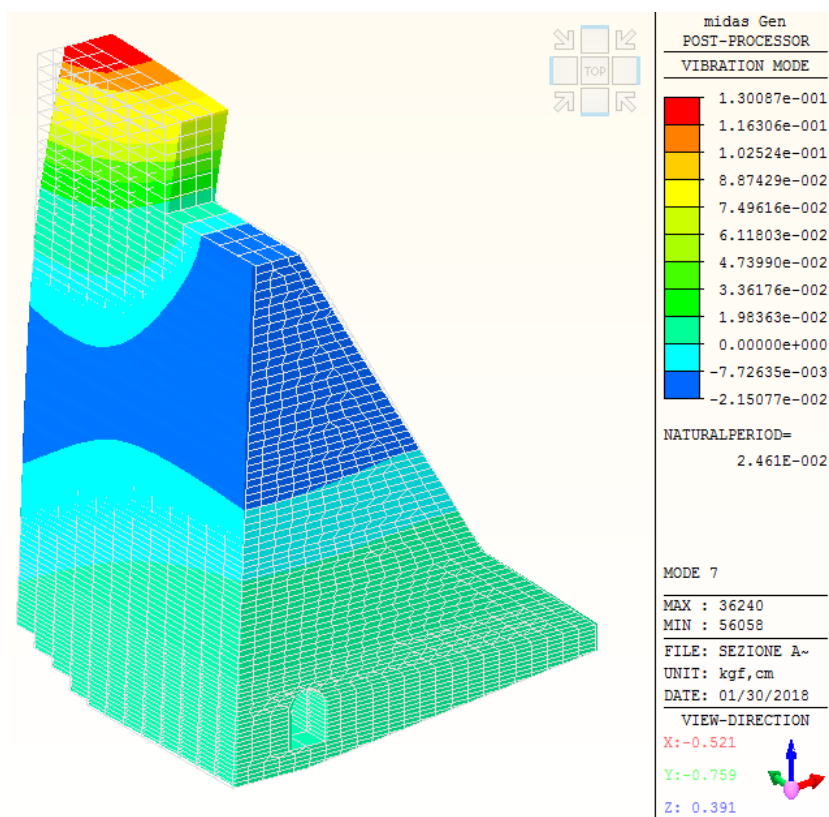


**Modello FEM / Modo2 – Frequenza 17,0 Hz**





Modello FEM / Modo3 – Frequenza 23,6 Hz



Modello FEM / Modo4 – Frequenza 40,6 Hz

I risultati del comportamento dinamico ottenuti dai modelli fem di un singolo concio (concio A e concio B) risultano fornire delle frequenze di vibrare in genere allineate, ma leggermente inferiori rispetto a quelle ottenute dalla prova dinamica ambientale. Questo si verifica in quanto le frequenze di vibrare ottenute dalla prova dinamica ambientale sono state ottenute per bassi livelli di sollecitazione ambientale che non sono in grado di vincere gli attriti presenti tra i giunti. Pertanto il comportamento dell'opera durante la prova dinamica ambientale appare più rigido (frequenze leggermente superiori ) rispetto al reale comportamento che avrebbe la diga con livelli di sollecitazione superiori (come ad esempio per azioni sismiche).

Pertanto il comportamento dinamico della diga è stato messo in conto considerando i modelli fem del concio A e concio B indipendenti e che rappresentano il reale comportamento dell'opera in condizioni sismiche.

## 5.7 VALIDAZIONE DEL MODELLO FEM

Di seguito sono riportate alcune verifiche atte a validare il modello fem realizzato. E' stato eseguito un confronto tra le risultanti delle azioni ottenute da modello fem con le risultati delle azioni calcolate "a mano" ed è stato eseguito un confronto tra gli sforzi ottenuti da modello fem e quelli calcolati da semplici calcoli di verifica.

### 5.7.1 Confronto delle risultanti delle azioni esterne sollecitanti

La tabella seguente riporta un confronto tra le risultanti delle azioni esterne calcolate da modello fem con le risultanti delle azioni esterne calcolate da semplici calcoli di verifica:

	<i>Concio B</i>		
	Modello fem	Calcolo di verifica	Differenza (%)
<b>G<sub>1,Concio</sub>: peso proprio</b>	52163 kN	51507 kN	1,2 %
<b>G<sub>2,Concio</sub>: spinta idrostatica Livello max regolazione</b>	18402 kN	17958 kN	2,4 %
<b>G<sub>3,Concio</sub>: spinta interrimento</b>	160 kN	151 kN	5,6 %
<b>E<sub>x,SLC,Concio</sub> : azione sisma (direzione Monte-Valle)</b>	8711 kN (direzione Monte-Valle)	10539 kN	(*)
	3653 kN (direzione Base-Coronamento)	---	
<b>E<sub>z,SLC,Concio</sub> : azione sisma (in verticale)</b>	1497 kN (direzione Valle-Monte)	---	(**)
	4401 kN (Direzione Base-Coronamento)	4265 kN	
<b>I<sub>Concio</sub> : Azione inerziale dell'acqua invasata</b>	1698 kN	1680 kN	0,06 %

(\*) Nel modello fem nasce anche una componente dell'azione sismica in direzione verticale perchè la base dello sbarramento risulta in parte leggermente inclinata. L'azione sismica orizzontale calcolata "a mano" risulta superiore rispetto all'azione sismica calcolata con modello fem in quanto l'azione ottenuta da modello fem è ricava da una combinazione con segno dei diversi modi di vibrare come radice quadrata della somma dei quadrati (SRSS). Il calcolo di verifica è stato eseguito mediante una semplice sovrapposizione lineare tra i diversi modi sommati in valore assoluto che hanno quindi fornito un valore superiore della risultante dell'azione sismica orizzontale. Considerato quanto detto i valori ottenuti risultano essere allineati.

(\*\*) Nel modello fem nasce anche una componente dell'azione sismica in direzione orizzontale perchè la base dello sbarramento risulta in parte leggermente inclinata. Il valore dell'azione sismica verticale risulta allineata con il valore calcolato a mano.

Di seguito si riporta il calcolo di verifica delle risultanti di alcune azioni esterne agenti sul concio preso in esame per confronto con le risultati delle azioni esterne ottenute da modello fem:

### **Peso proprio G1**

Il peso proprio della sezione trascinabile appesantita presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{cls, esist} = 117,5 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 2787 \text{ kN/m} \text{ (peso diga esistente)}$$

$$G_1' = A_c \times \rho_{cls, nuovo} = 53,3 \text{ m}^2 \times 24,00 \text{ kN/m}^3 = 1279 \text{ kN/m} \text{ (peso appesantimento)}$$

$$G_{tot} = G_1 + G_1' = 4066 \text{ kN/m} \text{ (peso totale sezione trascinabile)}$$

Il peso proprio della sezione emergente appesantita presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{cls, esist} = 127,7 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 3029 \text{ kN/m} \text{ (peso diga esistente)}$$

$$G_1' = A_c \times \rho_{cls, nuovo} = 58,3 \text{ m}^2 \times 24,00 \text{ kN/m}^3 = 1399 \text{ kN/m} \text{ (peso appesantimento)}$$

$$G_{tot} = G_1 + G_1' = 4428 \text{ kN/m} \text{ (peso sezione emergente)}$$

Il peso totale del concio risulta pari a:

$$G_{1, \text{Concio}} = (4066 \text{ kN/m} \times 4,5 \text{ m}) + (4428 \text{ kN/m} \times 7,5 \text{ m}) = 18297 \text{ kN} + 33210 \text{ kN} = 51507 \text{ kN}$$

### **Spinta idrostatica G2 (Livello max regolazione)**

La spinta idrostatica dovuta al livello di massima regolazione risulta pari a :

$$H_{max, reg} = 17,3 \text{ m} \text{ (livello acqua massima regolazione)}$$

$$p_{max} (H=17,3 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max, reg} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 17,3 \text{ m} = 173 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua alla base)}$$

$$S_r = (p_{max} \times H_{max, reg})/2 = (173 \text{ kN/m}^2 \times 17,3 \text{ m})/2 = 1496,5 \text{ kN/m} \text{ (spinta orizzontale)}$$

$$G_{2, \text{Concio}} = 1496,5 \text{ kN/m} \times 12 \text{ m} = 17958 \text{ kN}$$

### **Spinta interrimento G3**

La spinta dovuta all'interrimento risulta pari a :

$$H_{max, int} = 2,1 \text{ m} \text{ (livello interrimento)}$$

$$p_{max} (H=2,1 \text{ m}) = \rho_f \times H_{max, int} = 6 \text{ kN/m}^3 \times 2,1 \text{ m} = 12,6 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione alla base)}$$

$$G_{3, \text{Concio}} = 12,6 \text{ kN/m}^2 \times 12 \text{ m} = 151 \text{ kN}$$



**Azione Sisma  $E_{x,SLC}$** 

Entrando nello spettro SLC con i periodi principali di vibrare della diga si ottengono le seguenti accelerazioni per i vari modi di vibrare:

Periodo (frequenza)	Massa partecipante al modo (%)	Accelerazione
$f_1 = 7,6 \text{ Hz}$ ( $T_1=0,13 \text{ s}$ )	68,0 %	$a_g = 0,23g$
$f_2 = 16,1 \text{ Hz}$ ( $T_2=0,06 \text{ s}$ )	7,1 %	$a_g = 0,17g$
$f_3 = 22,8 \text{ Hz}$ ( $T_3=0,04 \text{ s}$ )	24,1 %	$a_g = 0,15g$

Pertanto l'azione sismica orizzontale totale risulta pari a:

$$E_{x,SLC,Concio} = (51507 \text{ kN} \times 0,68 \times 0,23) + (51507 \text{ kN} \times 0,071 \times 0,17) + (51507 \text{ kN} \times 0,241 \times 0,15) = 10539 \text{ kN}$$

**Azione Sisma  $E_{z,SLC}$** 

Entrando nello spettro SLC con i periodi principali di vibrare della diga si ottengono le seguenti accelerazioni per i diversi modi:

Periodo (frequenza)	Massa partecipante al modo (%)	Accelerazione
$f_2 = 16,1 \text{ Hz}$ ( $T_2=0,06 \text{ s}$ )	91,7 %	$a_g = 0,09g$

Pertanto l'azione sismica orizzontale totale risulta pari a:

$$E_{x,SLC,Concio} = 51507 \text{ kN} \times 0,92 \times 0,09 = 4265 \text{ kN}$$

**Azione inerziale dell'acqua invasata I**

L'azione inerziale dell'acqua invasata risulta pari a :

$$I = 140 \text{ kN/m} \text{ (Spinta inerziale totale)}$$

$$I_{Concio} = 140 \text{ kN/m} \times 12 \text{ m} = 1680 \text{ kN} \text{ (Azione inerziale totale dell'acqua invasata agente sul concio in direzione Monte-Valle)}$$

### 5.7.2 Confronto degli sforzi sollecitanti il corpo diga

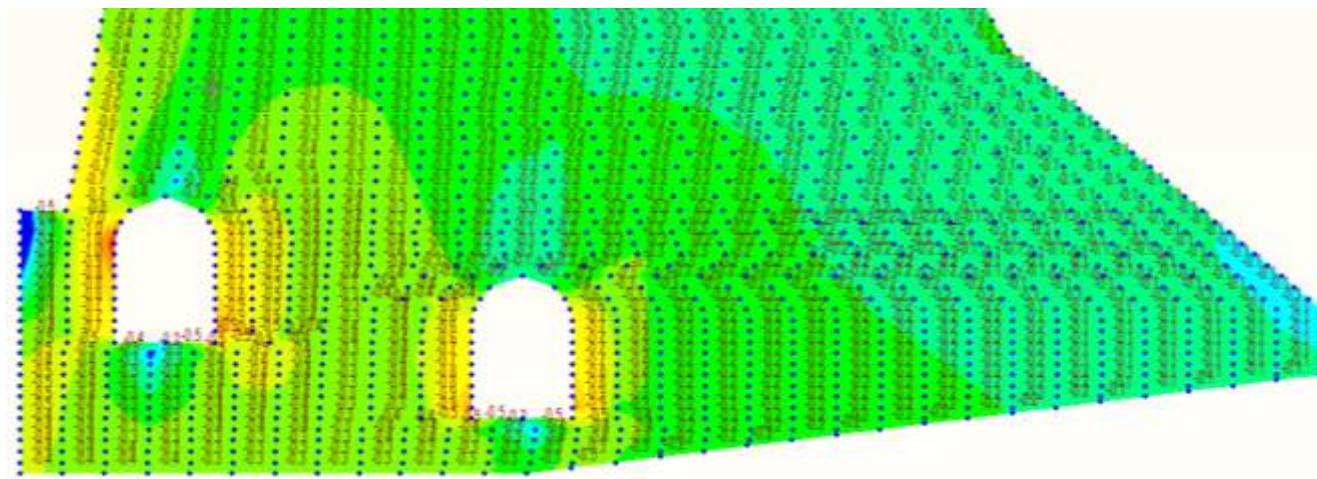
Di seguito è riportato un confronto tra gli sforzi sollecitanti ottenuti da modello fem con gli sforzi calcolati mediante semplici calcoli di verifica con riferimento alle principali azioni sollecitanti la diga:

#### **Peso proprio G1**

Lo sforzo verticale in corrispondenza della sezione di base dovuto al peso proprio risulta pari a:

$\sigma_{zz,concio} = (51507 \times 10^3 \text{ kN}) / (17920 \times 12000 \text{ mm}^2) = -0,24 \text{ MPa}$  (sforzo medio distribuito uniformemente sulla sezione di base dello sbarramento, senza considerare la pendenza dei paramenti di monte e valle e la presenza dei cunicoli che nel modello fem determinano alla base delle concentrazioni di sforzo)

L'immagine seguente riporta gli sforzi sollecitanti la base della diga dovuti all'azione del solo peso proprio ottenuti mediante modello fem:



*Sforzo in direzione verticale  $\sigma_{zz}$  (MPa)*

Da modello fem si ottiene alla base uno sforzo massimo pari a -0,4 MPa sul paramento di monte e uno sforzo minimo pari a -0,1 MPa sul paramento di valle. Da calcolo di verifica si ottiene uno sforzo medio pari a -0,24 MPa. I valori ottenuti da modello fem risultano essere coerenti con quelli calcolati “a mano” considerando che nel modello fem sono messi in conto anche gli effetti dovuti alla presenza dei cunicoli e delle pendenze dei paramenti di monte e valle che determinano delle diverse distribuzioni di sforzo.

#### **Spinta idrostatica G2 (Livello max regolazione)**

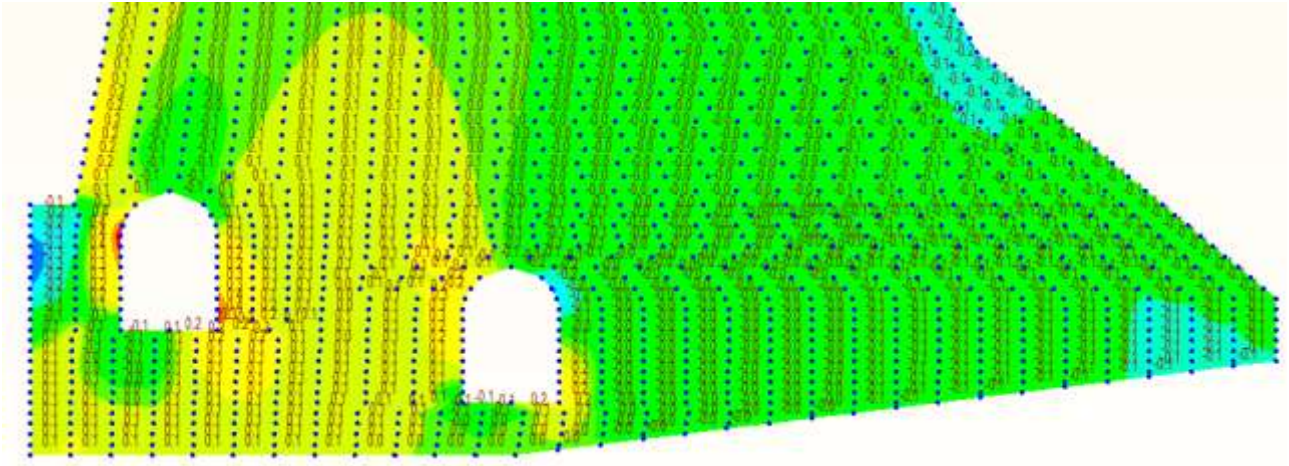
Lo sforzo verticale in corrispondenza della sezione di base dovuto alla spinta idrostatica con livello di massima regolazione risulta pari a:

$M_{G2,Concio} = G_{2,Concio} \times (H_{max.reg}/3) = 17958 \text{ kN} \times 17,3 \text{ m} / 3 = 103558 \text{ kNm}$  (momento alla base dovuto alla spinta idrostatica)

$\sigma_{zz,concio} = M_{G2,Concio} / W = 103558 \times 10^6 \text{ Nmm} / 6,42 \times 10^{11} \text{ mm}^3 = \pm 0,16 \text{ MPa}$  (sforzo sulla sezione di base dello sbarramento, senza considerare la pendenza della sezione di imposta, la pendenza dei paramenti di monte e valle e la presenza dei cunicoli che nella realtà determinano alla base delle concentrazioni di sforzo)

$$W = b \times h^2 / 6 = (17920^2 \times 12000) / 6 = 6,42 \times 10^{11} \text{ mm}^3 \text{ (modulo di resistenza)}$$

L'immagine seguente riporta gli sforzi sollecitanti la base della diga dovuti all'azione della spinta idrostatica ottenuti mediante modello fem:



*Sforzo in direzione verticale  $\sigma_{zz}$  (MPa)*

Da modello fem si ottiene alla base uno sforzo massimo pari a +0,1 MPa (trazione) sul paramento di monte e uno sforzo minimo pari a -0,1 MPa (compressione) sul paramento di valle. Da calcolo di verifica si ottiene uno sforzo pari a  $\pm 0,16$  MPa. I valori ottenuti da modello fem risultano essere coerenti con quelli calcolati "a mano" considerando che nel modello fem sono anche messi in conto gli effetti dovuti alla presenza dei cunicoli e delle pendenze dei paramenti di monte e valle che determinano delle particolari distribuzioni di sforzo.

### **Azione Sisma $E_{x,SLC}$**

Lo sforzo verticale in corrispondenza della sezione di base dovuto all'azione sismica  $E_{x,SLC}$  (azione sismica agente in direzione Monte-Valle) risulta pari a:

$$E_{x,SLC,Concio} = 10539 \text{ kN (Azione sismica orizzontale Monte-Valle)}$$

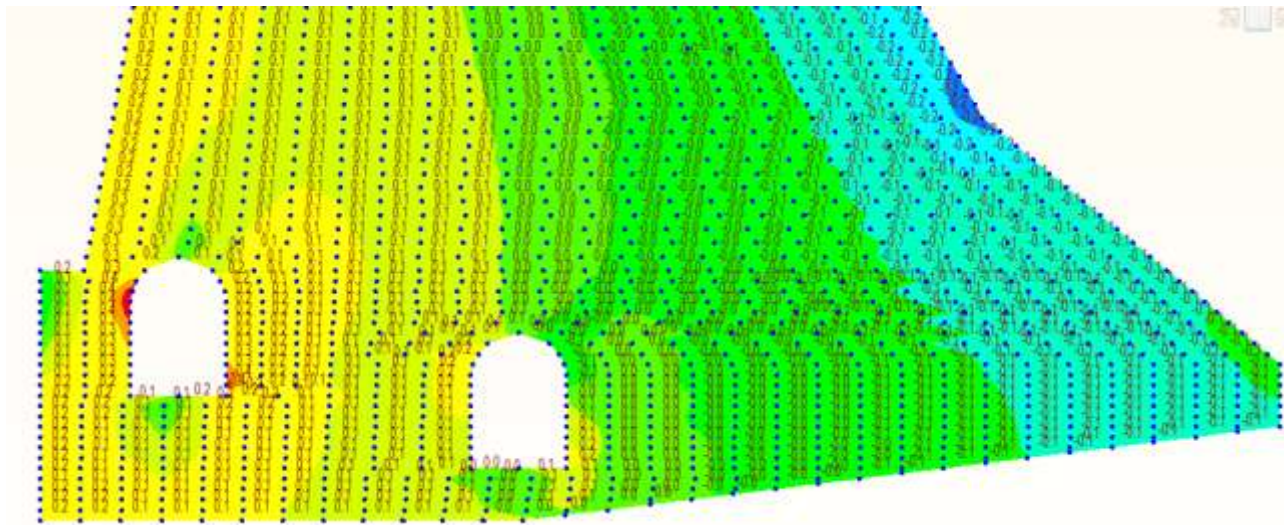
$$M_{Ex,SLC,Concio} = E_{x,SLC,Concio} \times h_{-Ex,SLC} = 10539 \text{ kN} \times 7,427 \text{ m} = 78273 \text{ kNm (momento alla base dovuto all'azione sismica orizzontale)}$$

$$\sigma_{zz,concio} = M_{Ex,SLC,Concio} / W = 78273 \times 10^6 \text{ Nmm} / 6,42 \times 10^{11} \text{ mm}^3 = \pm 0,12 \text{ MPa (sforzo sulla sezione di base dello sbarramento, senza considerare la pendenza della sezione di imposta, la pendenza dei paramenti di monte e valle e la presenza dei cunicoli che nella realtà determinano alla base delle concentrazioni di sforzo)}$$

$$W = b \times h^2 / 6 = (17920^2 \times 12000) / 6 = 6,42 \times 10^{11} \text{ mm}^3 \text{ (modulo di resistenza)}$$

$$h_{-Ex,SLC} = 7,427 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

L'immagine seguente riporta gli sforzi sollecitanti la base della diga dovuti all'azione del sisma orizzonta in direzione Monte-valle ottenuti mediante modello fem:



*Sforzo in direzione verticale  $\sigma_{zz}$  (MPa)*

Da modello fem si ottiene alla base uno sforzo massimo pari a +0,2 MPa (trazione) sul paramento di monte e uno sforzo minimo pari a -0,1 MPa (compressione) sul paramento di valle. Da calcolo di verifica si ottiene uno sforzo pari a  $\pm 0,12$  MPa. I valori ottenuti da modello fem risultano essere coerenti con quelli calcolati “a mano” considerando che nel modello fem sono messi in conto anche gli effetti dovuti alla presenza dei cunicoli e delle pendenze dei paramenti di monte e valle che determinano delle particolari distribuzioni di sforzo.

### **Azione Sisma $E_{z,SLC}$**

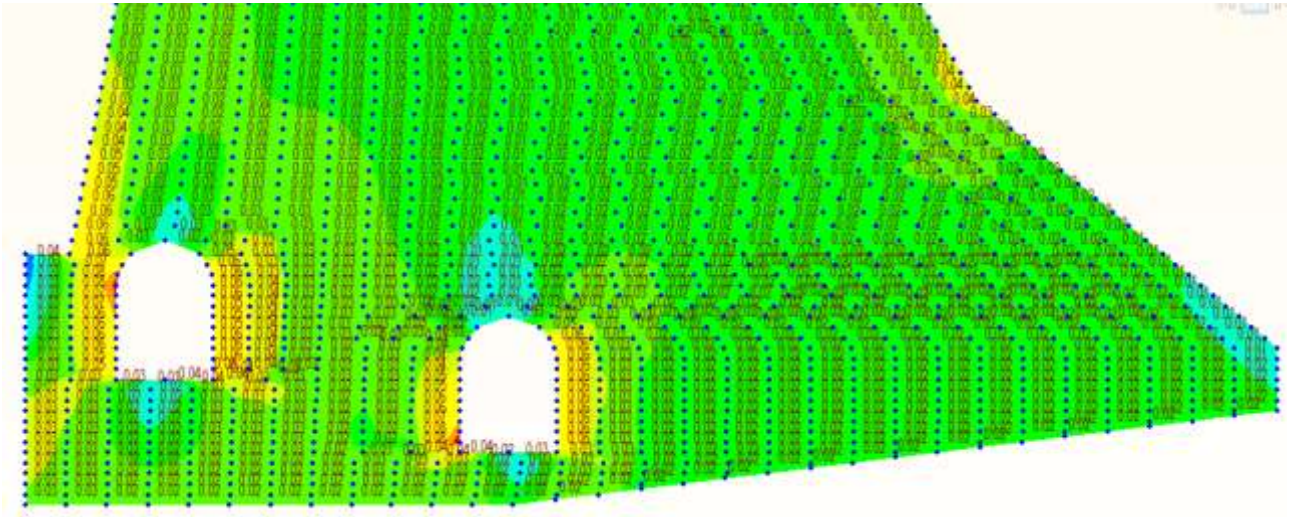
Lo sforzo verticale in corrispondenza della sezione di base dovuto all'azione sismica  $E_{z,SLC}$  (azione sismica agente in direzione verticale Base-Coronamento) risulta pari a:

$$E_{x,SLC,Concio} = 51507 \text{ kN} \times 0,92 \times 0,09 = 4265 \text{ kN}$$

$\sigma_{zz,concio} = (4265 \times 10^3 \text{ kN}) / (17920 \times 12000 \text{ mm}^2) = 0,02 \text{ MPa}$  (sforzo medio distribuito uniformemente sulla sezione di base dello sbarramento, senza considerare la pendenza dei paramenti di monte e valle e la presenza dei cunicoli che nella realtà determinano alla base delle concentrazioni di sforzo)

L'immagine seguente riporta gli sforzi sollecitanti la base della diga dovuti all'azione del sisma verticale in direzione Base-Coronamento ottenuti mediante modello fem:





*Sforzo in direzione verticale  $\sigma_{zz}$  (MPa)*

Da modello fem si ottiene alla base uno sforzo massimo pari a +0,03 MPa (trazione) sul paramento di monte e uno sforzo minimo pari a +0,02 MPa (trazione) sul paramento di valle. Da calcolo di verifica si ottiene uno sforzo pari a +0,02 MPa. I valori ottenuti da modello fem risultano essere coerenti con quelli calcolati “a mano” considerano che nel modello fem sono messi in conto anche gli effetti dovuti alla presenza dei cunicoli e delle pendenze dei paramenti di monte e valle che determinano delle particolari distribuzioni di sforzo.

### **Azione inerziale dell’acqua invasata I**

Lo sforzo verticale in corrispondenza della sezione di base dovuto all’azione inerziale dell’acqua invasata I (azione agente in direzione orizzontale Monte-Valle) risulta pari a:

$M_{I,Concio} = I_{Concio} \times h_I = 1680 \text{ kN} \times 6,29 \text{ m} = 10567 \text{ kNm}$  (momento alla base dovuto all’azione inerziale dell’acqua invasata)

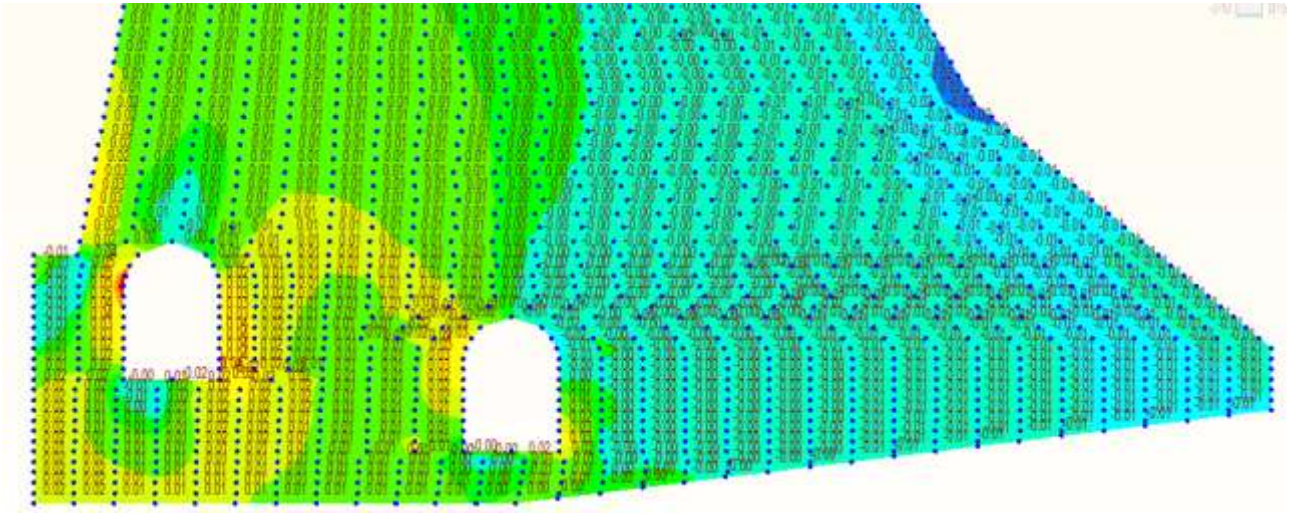
$\sigma_{zz,concio} = M_{I,Concio} / W = 10567 \times 10^6 \text{ Nmm} / 6,42 \times 10^{11} \text{ mm}^3 = \pm 0,02 \text{ MPa}$  (sforzo sulla sezione di base dello sbarramento, senza considerare la pendenza della sezione di imposta, la pendenza dei paramenti di monte e valle e la presenza dei cunicoli che nella realtà determinano alla base delle concentrazioni di sforzo)

$W = b \times h^2 / 6 = (17920^2 \times 12000) / 6 = 6,42 \times 10^{11} \text{ mm}^3$  (modulo di resistenza)

$I_{Concio} = 140 \text{ kN/m} \times 12 \text{ m} = 1680 \text{ kN}$  (Azione inerziale totale dell’acqua invasata agente sul concio in direzione Monte-Valle)

$h_I = 6,29 \text{ m}$  (braccio verticale)

L’immagine seguente riporta gli sforzi sollecitanti la base della diga dovuti all’azione inerziale dell’acqua invasata in direzione Monte-valle ottenuti mediante modello fem:



*Sforzo in direzione verticale  $\sigma_{zz}$  (MPa)*

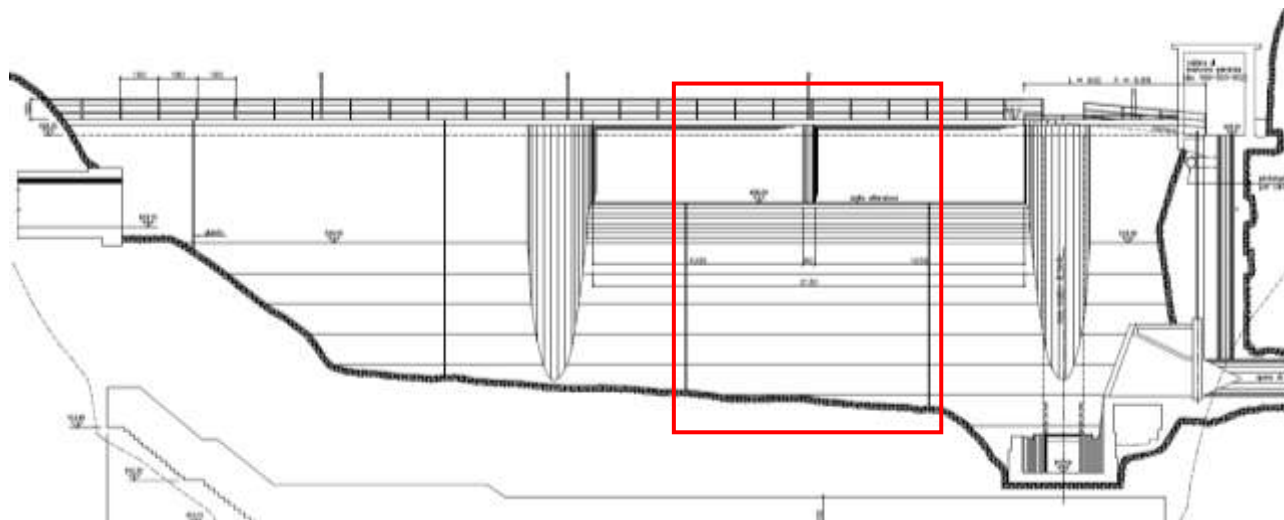
Da modello fem si ottiene alla base uno sforzo massimo pari a +0,02 MPa (trazione) sul paramento di monte e uno sforzo minimo pari a -0,01 MPa (compressione) sul paramento di valle. Da calcolo di verifica si ottiene uno sforzo pari a  $\pm 0,02$  MPa. I valori ottenuti da modello fem risultano essere coerenti con quelli calcolati “a mano” considerando che nel modello fem sono messi in conto anche gli effetti dovuti alla presenza dei cunicoli e delle pendenze dei paramenti di monte e valle che determinano delle particolari distribuzioni di sforzo.

## 5.8 ANALISI DINAMICA MODALE DELLA DIGA APPESANTITA

Di seguito sono riportati i risultati dell'analisi dinamica modale della diga con l'appesantimento.

L'analisi è stata eseguita prendendo in esame n.2 conci ubicati nella zona centrale dello sbarramento: concio A con sezione tracimabile e concio B con sezione emergente.

### Modello fem del concio centrale con sezione tracimabile (concio A)

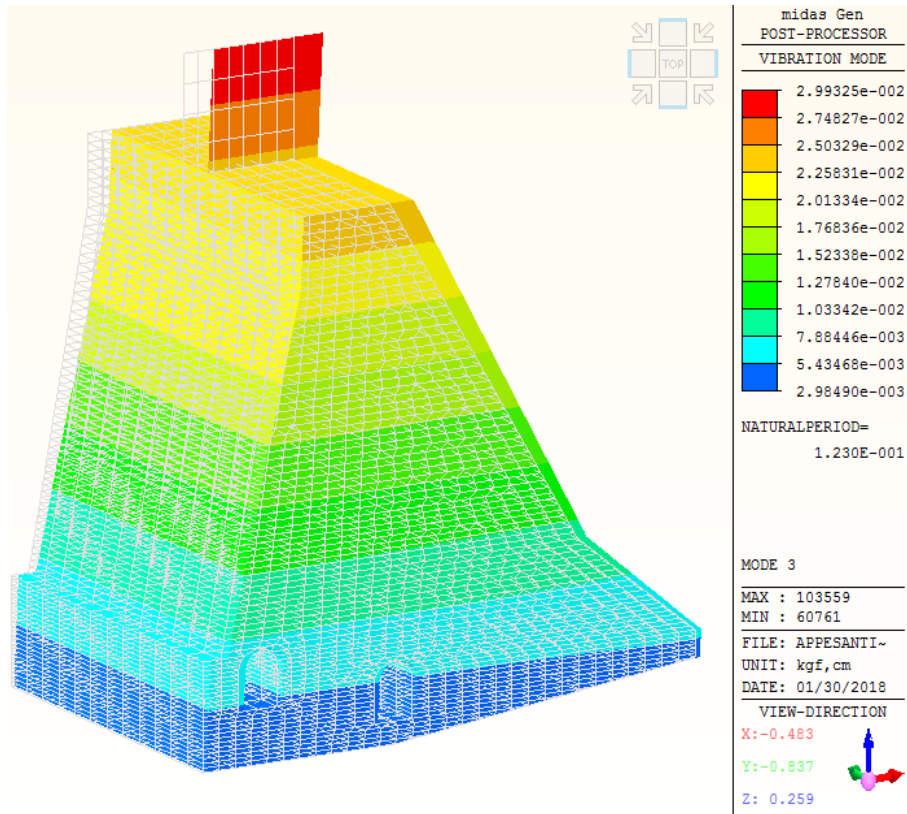


*Ubicazione del concio centrale con sezione traciabile*

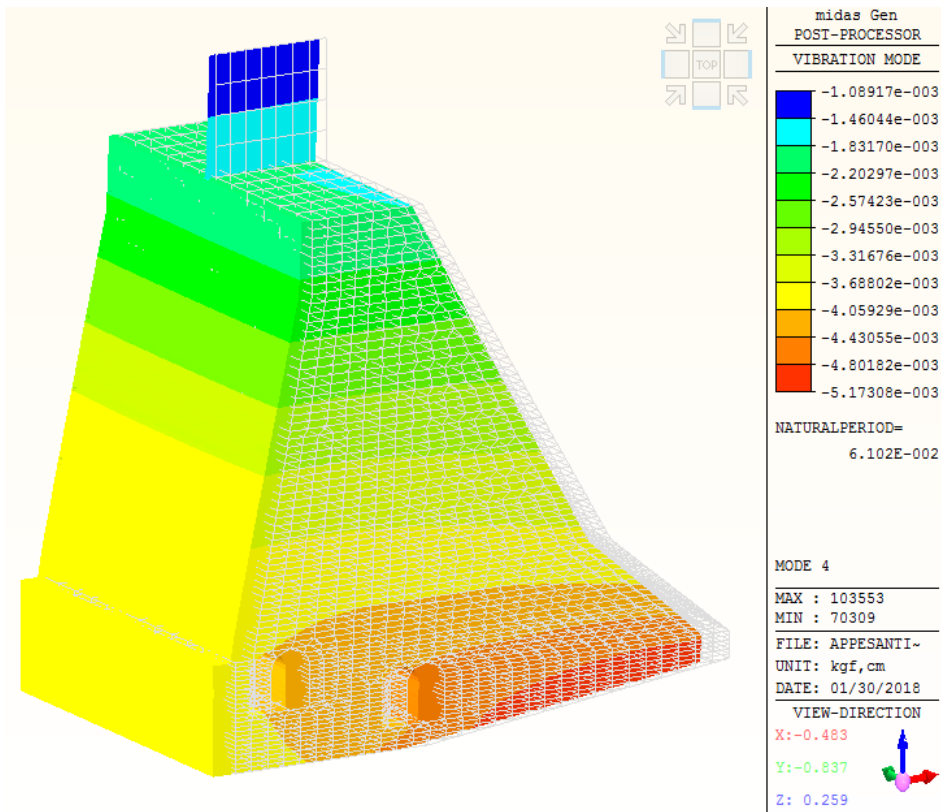
Con riferimento al concio ubicato in posizione centrale dello sbarramento con sezione interamente tracimabile (vedi immagine sopra riportata), la tabella seguente riporta le frequenze delle forme modali principali e il valore percentuale delle rispettive masse partecipanti:

<i>Modo di vibrare da modello FEM</i>		
<i>Modi di vibrare in direzione orizzontale perpendicolare all'asse della diga</i>		
	$f_{fem}$ (Hz)	M (%)
<i>f1</i>	8,1 Hz	70,0 %
<i>f2</i>	16,4Hz	7,0 %
<i>f3</i>	23,8 Hz	23,0 %
		100,0 %

<i>Modo di vibrare da modello FEM</i>		
<i>Modi di vibrare in direzione verticale</i>		
	$f_{fem}$ (Hz)	M (%)
<i>f2</i>	16,4 Hz	92,2 %

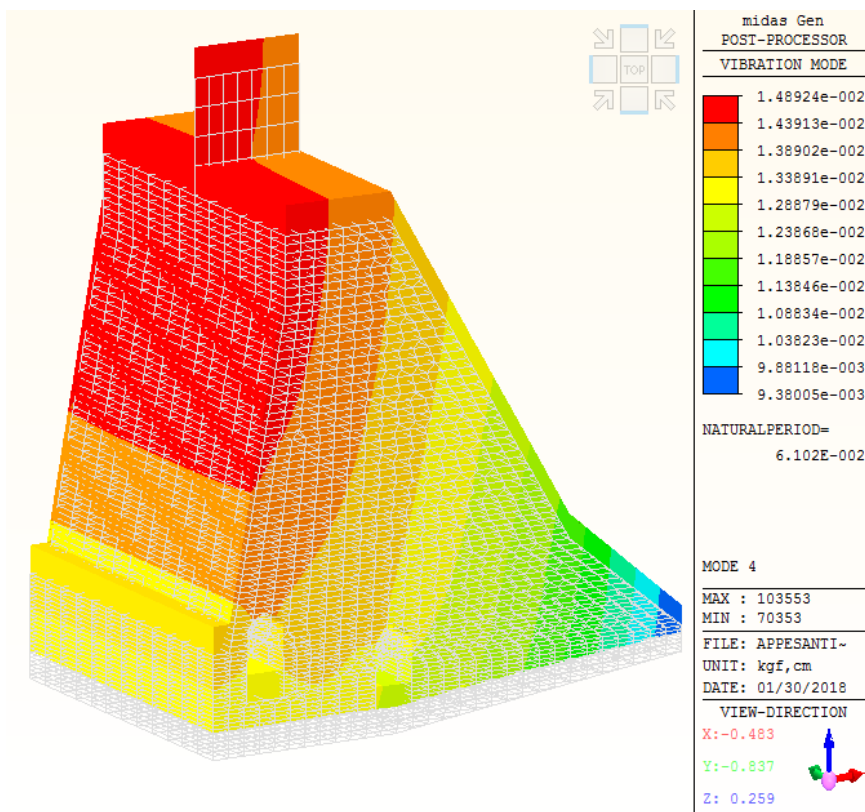


**Modello FEM / Modo1 – Frequenza  $f_1=8,1$  Hz (componente direzione orizzontale)**

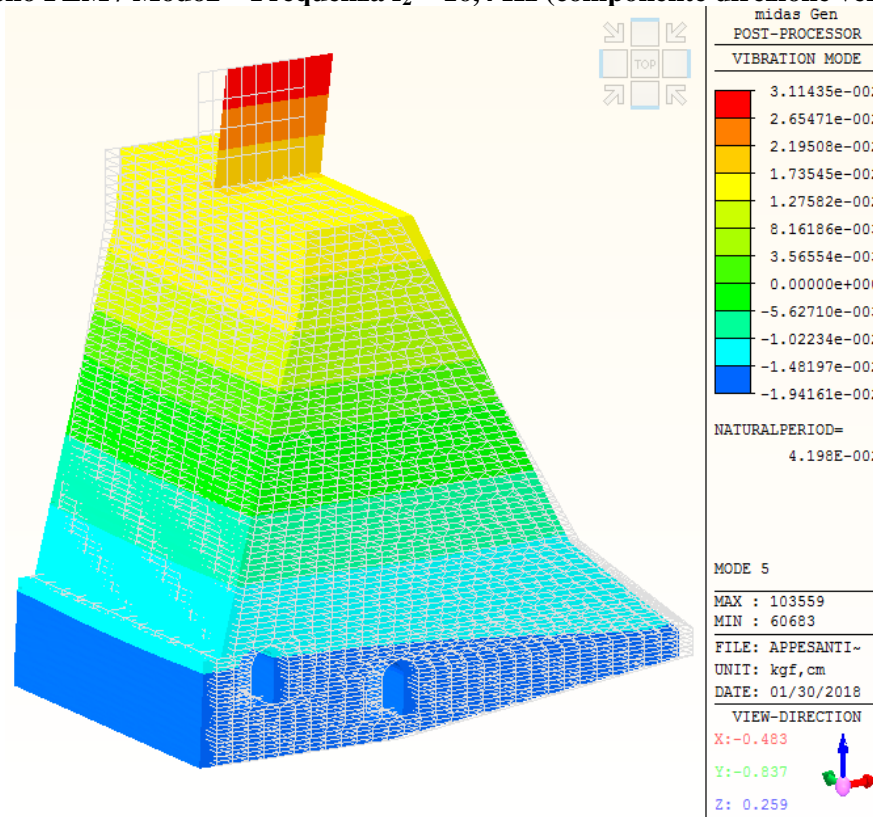


**Modello FEM / Modo2 – Frequenza  $f_2 = 16,4$  Hz (componente direzione orizzontale)**



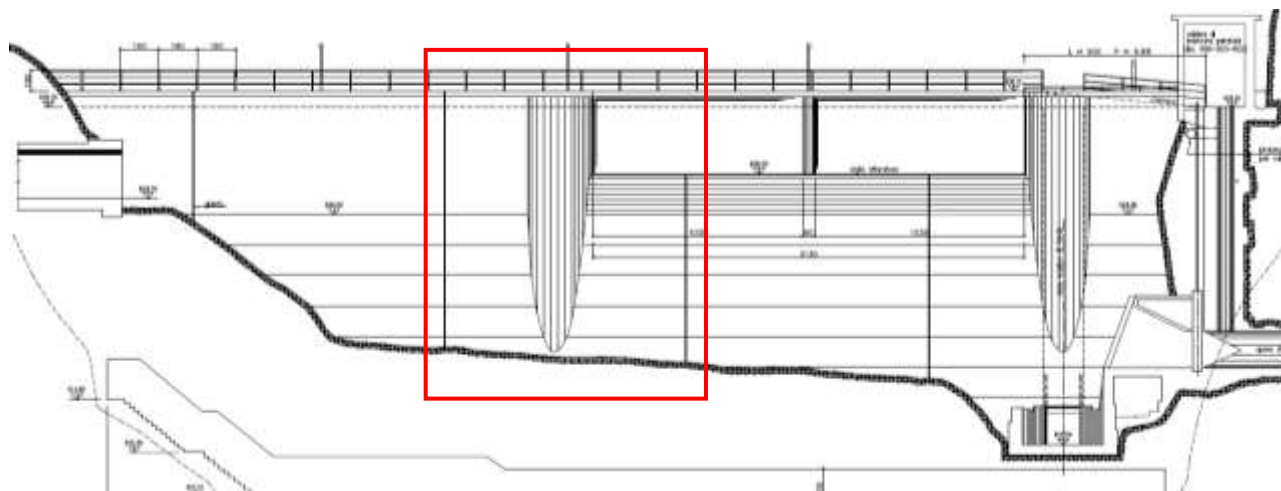


**Modello FEM / Modo2 – Frequenza  $f_2 = 16,4$  Hz (componente direzione verticale)**



**Modello FEM / Modo3 – Frequenza  $f_3 = 23,8$  Hz (componente direzione orizzontale)**

Modello fem concio centrale emergente/tracimabile (Concio B)

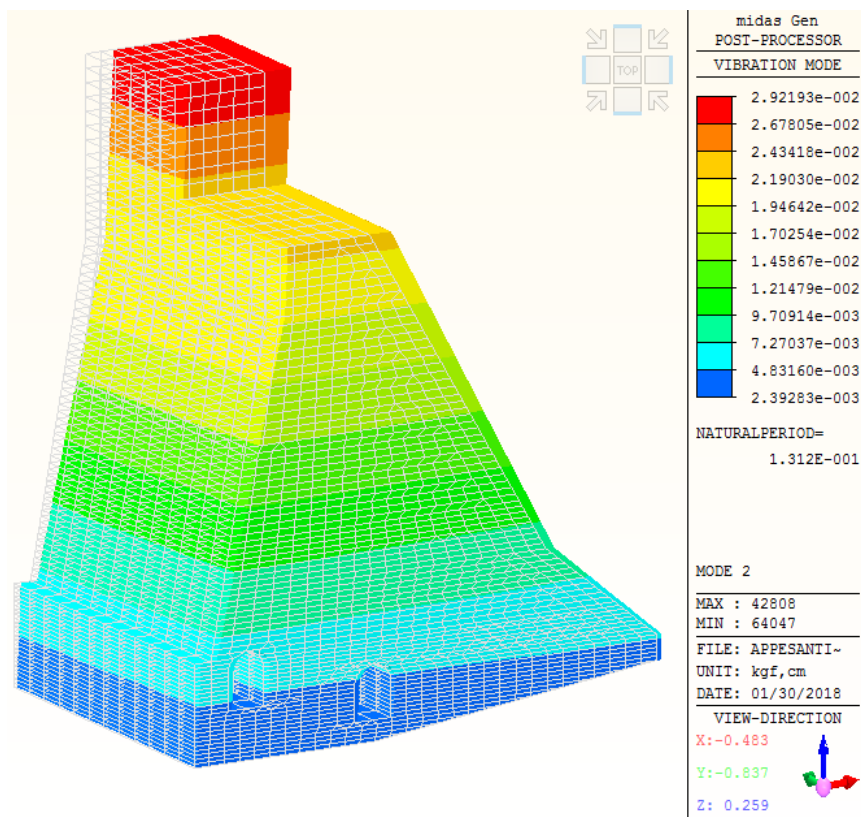


*Ubicazione del concio centrale con sezione in parte emergente e in parte tracimabile*

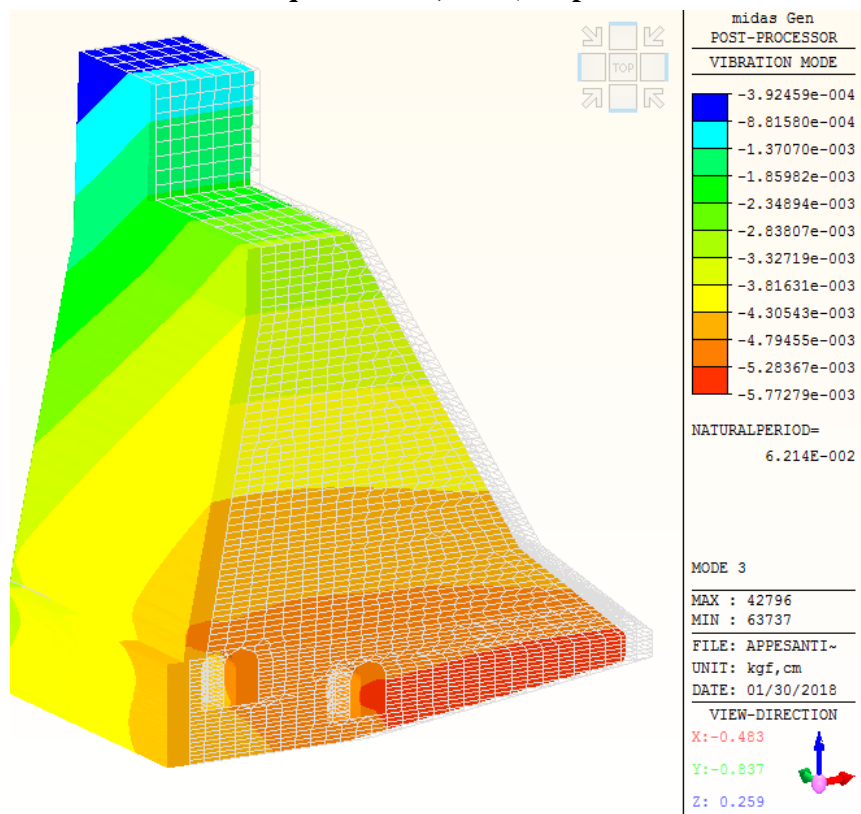
Con riferimento al concio ubicato in posizione centrale dello sbarramento con sezione in parte emergente e in parte tracimabile (vedi immagine sopra riportata), la tabella seguente riporta le frequenze delle forme modali principali e il valore percentuale delle rispettive masse partecipanti:

<b>Modo di vibrare da modello FEM</b>		
<b>Modi di vibrare in direzione orizzontale perpendicolare all'asse della diga</b>		
	$f_{fem}$ (Hz)	M (%)
$f1$	7,6 Hz	68,0 %
$f2$	16,1 Hz	7,1 %
$f3$	22,8 Hz	24,1 %
		99,2 %

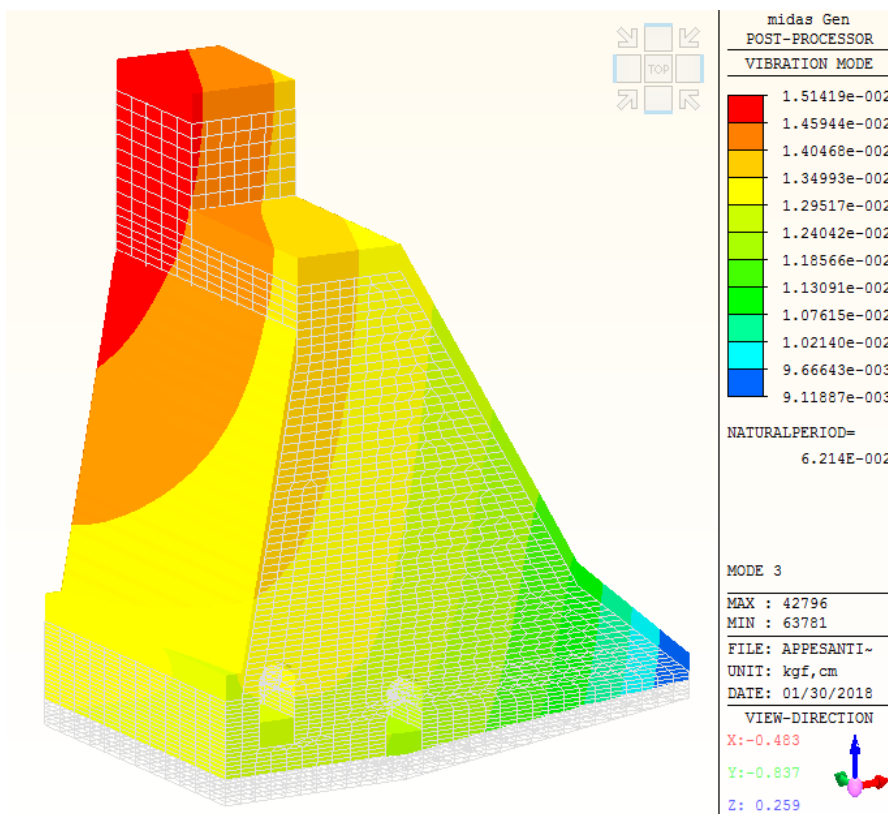
<b>Modo di vibrare da modello FEM</b>		
<b>Modi di vibrare in direzione verticale</b>		
	$f_{fem}$ (Hz)	M (%)
$f2$	16,1 Hz	91,7 %



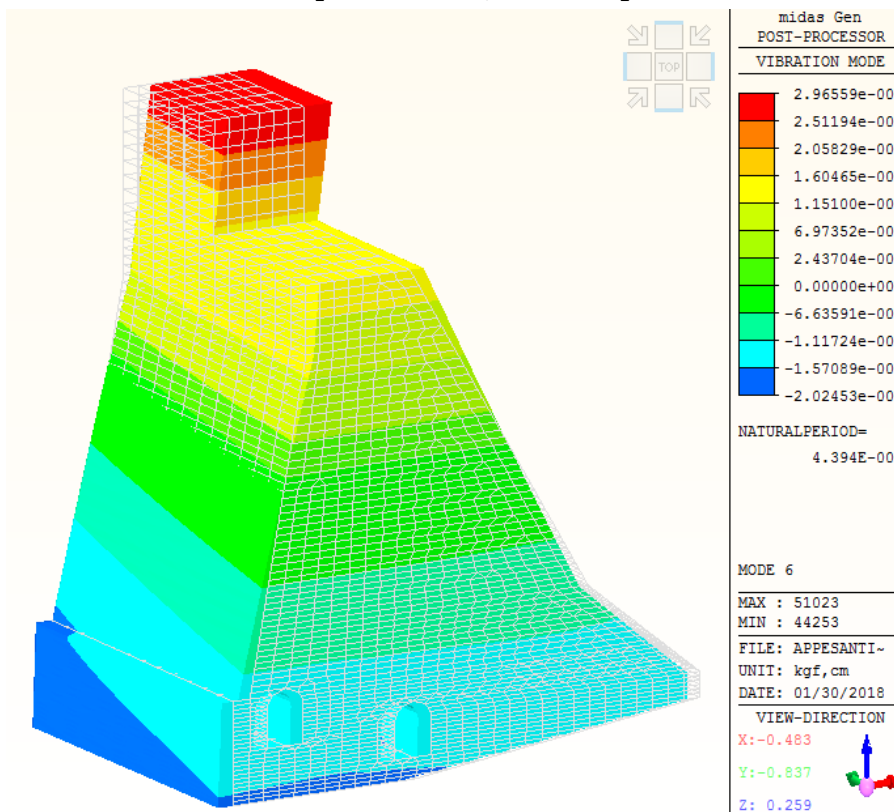
**Modello FEM / Modo1 – Frequenza  $f_1 = 7,6$  Hz (componente direzione orizzontale)**



**Modello FEM / Modo2 – Frequenza  $f_2 = 16,1$  Hz (componente direzione orizzontale)**



**Modello FEM / Modo2 – Frequenza  $f_2 = 16,1$  Hz (componente direzione verticale)**



**Modello FEM / Modo3 – Frequenza  $f_3 = 22,8$  Hz (componente direzione orizzontale)**

## 5.9 Verifiche SLE

Le verifiche agli SLE sono condotte verificando le tensioni di esercizio nel corpo diga esistente e di appesantimento in accordo ai limiti e a quanto riportato nel D.M 26/06/2014:

Combinazione caratteristica rara e sismiche SLO e SLD:

Gli sforzi sollecitanti il calcestruzzo devono rispettare i seguenti limiti:

$$\sigma_{c,min} \leq 0,25 \times f_{ck} \text{ (per compressione)}$$

$$\sigma_{c,max} < 0,21 \times f_{ctm} \text{ (per trazione)}$$

**Limiti per il calcestruzzo esistente:**

$$\sigma_c \leq 0,25 \times f_{ck} = 0,25 \times (23,98/1,2) = 4,99 \text{ MPa (per compressione)}$$

$$\sigma'_c \geq 0,21 \times f_{ctm} = 0,21 \times (2,03/1,2) = 0,35 \text{ MPa (per trazione)}$$

dove:

$f_{cm} = 31,98 \text{ MPa}$  (resistenza cilindrica a compressione che tiene conto dei valori minimi di confidenza al 95%)

$f_{ck} = f_{cm} - 8 = 31,98 - 8 = 23,98 \text{ MPa}$  (resistenza a compressione caratteristica)

$FC = 1,2$  (fattore di confidenza)

$f_{ctm} = 2,03 \text{ MPa}$  (resistenza media a trazione che tiene conto dei valori minimi di confidenza al 95%)

**Limiti per il calcestruzzo nuovo:**

$$\sigma_c \leq 0,25 \times f_{ck} = 0,25 \times 25 = 6,25 \text{ MPa (per compressione)}$$

$$\sigma'_c \leq 0,21 \times f_{ctm} = 0,21 \times 2,56 = 0,54 \text{ MPa (per trazione)}$$

dove:

$f_{ck} = 25 \text{ MPa}$  (resistenza a compressione caratteristica cilindrica)

$f_{ctm} = 2,56 \text{ MPa}$  (resistenza media a trazione)

Combinazione caratteristica quasi permanente (riferito agli sforzi del paramento di monte):

$$\sigma_{c,min} \leq 0,25 \times f_{ck} \text{ (per compressione)}$$

$$\sigma_{c,max} < 0 \text{ MPa (per trazione)}$$

**Limiti per il calcestruzzo nuovo del paramento di monte:**

$$\sigma_c \leq 0,25 \times f_{ck} = 0,25 \times 25 = 6,25 \text{ MPa (per compressione)}$$

$$\sigma'_c < 0,0 \text{ MPa (per trazione)}$$

dove:

$f_{ck}=25$  MPa (resistenza a compressione caratteristica cilindrica)

### **5.9.1 Verifica sforzi corpo diga**

Di seguito si riportano le verifiche tensionali per le condizioni SLE sismiche (SLO e SLD) e statiche (caratteristica rara e quasi permanente).

La tabella seguente riporta per le combinazioni di carico selezionate più gravose un quadro di sintesi delle verifiche degli sforzi sollecitanti il corpo diga in condizioni SLE. Le verifiche hanno fornito esito positivo.

Le verifiche di dettaglio con le immagini degli sforzi sollecitanti il corpo diga sono riportate nell'allegato 1.

<b>Concio A (Sezione trascinabile)</b>				
<b>Combinazione SLE / Statica Rara</b>				
	<b>Sforzi diga esistente</b>		<b>Sforzi diga appesantimento</b>	
<b>Cmb.1:</b> <b>G1+G2+G3</b>	$\sigma_{\max} = +0,26 < +0,35$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,94  <  -4,99 $ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\max} = +0,10 < +0,54$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,69  <  -6,25 $ MPa (Verifica positiva)
<b>Cmb.2:</b> <b>G1+G2+G3+Q<sub>1,inverno</sub></b>	$\sigma_{\max} = +0,34 \leq +0,35$ MPa (*) (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,96  <  -4,99 $ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\max} = +0,20 < +0,54$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,60  <  -6,25 $ MPa (Verifica positiva)
<b>Cmb.3:</b> <b>G1+G2+G3+Q<sub>1,estate</sub></b>	$\sigma_{\max} = +0,28 < +0,35$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,85  <  -4,99 $ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\max} = +0,22 < +0,54$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,92  <  -6,25 $ MPa (Verifica positiva)
<b>Combinazione SLE / Sismica SLO e Sismica SLD</b>				
	<b>Sforzi diga esistente</b>		<b>Sforzi diga appesantimento</b>	
<b>Cmb.4(SLD):</b> <b>G1+G2+G3+E<sub>x,SLD</sub>+0,3E<sub>z,SLD</sub> +</b> <b>I<sub>x,SLD</sub>+0,5×Q<sub>1,inverno</sub></b>	$\sigma_{\max} = +0,31 < +0,35$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,92  <  -4,99 $ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\max} = +0,11 < +0,54$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,58  <  -6,25 $ MPa (Verifica positiva)
<b>Cmb.5(SLD):</b> <b>G1+G2+G3+E<sub>x,SLD</sub>+0,3E<sub>z,SLD</sub> +</b> <b>I<sub>x,SLD</sub>+0,5×Q<sub>1,estate</sub></b>	$\sigma_{\max} = +0,18 < +0,35$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,87  <  -4,99 $ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\max} = +0,11 < +0,54$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,73  <  -6,25 $ MPa (Verifica positiva)
<b>Combinazione SLE / Statica Quasi Permanente</b>				
	<b>Sforzi diga appesantimento (Paramento di monte)</b>			
<b>Cmb.6:</b> <b>G1+G2+G3+0,5×Q<sub>1,inverno</sub></b>	$\sigma_{\max} = +0,0 \leq +0,0$ MPa (nessuna trazione) (Verifica positiva)		$\sigma_{\min} =  -0,60  <  -6,25 $ MPa (Verifica positiva)	
<b>Cmb.7:</b> <b>G1+G2+G3+0,5×Q<sub>1,estate</sub></b>	$\sigma_{\max} = +0,0 \leq +0,0$ MPa (nessuna trazione) (Verifica positiva)		$\sigma_{\min} =  -0,60  <  -6,25 $ MPa (Verifica positiva)	

<b>Concio B (Sezione emergente)</b>				
<b>Combinazione SLE / Statica Rara</b>				
	<b>Sforzi diga esistente</b>		<b>Sforzi diga appesantimento</b>	
<b>Cmb.1:</b> <b>G1+G2+G3</b>	$\sigma_{\max} = +0,28 < +0,35$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -1,00  <  -4,99 $ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\max} = +0,10 < +0,54$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,74  <  -6,25 $ MPa (Verifica positiva)
<b>Cmb.2:</b> <b>G1+G2+G3+Q<sub>1,inverno</sub></b>	$\sigma_{\max} = +0,33 \leq +0,35$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -1,04  <  -4,99 $ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\max} = +0,20 < +0,54$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,67  <  -6,25 $ MPa (Verifica positiva)
<b>Cmb.3:</b> <b>G1+G2+G3+Q<sub>1,estate</sub></b>	$\sigma_{\max} = +0,30 < +0,35$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -1,05  <  -4,99 $ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\max} = +0,25 < +0,54$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,97  <  -6,25 $ MPa (Verifica positiva)
<b>Combinazione SLE / Sismica SLO e Sismica SLD</b>				
	<b>Sforzi diga esistente</b>		<b>Sforzi diga appesantimento</b>	
<b>Cmb.4(SLD):</b> <b>G1+G2+G3+E<sub>x,SLD</sub>+0,3E<sub>z,SLD</sub> + I<sub>x,SLD</sub>+0,5×Q<sub>1,inverno</sub></b>	$\sigma_{\max} = +0,32 < +0,35$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,97  <  -4,99 $ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\max} = +0,11 < +0,46$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,61  <  -6,25 $ MPa (Verifica positiva)
<b>Cmb.5(SLD):</b> <b>G1+G2+G3+E<sub>x,SLD</sub>+0,3E<sub>z,SLD</sub> + I<sub>x,SLD</sub>+0,5×Q<sub>1,estate</sub></b>	$\sigma_{\max} = +0,28 < +0,35$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,97  <  -4,99 $ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\max} = +0,14 < +0,46$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,74  <  -6,25 $ MPa (Verifica positiva)
<b>Combinazione SLE / Statica Quasi Permanente</b>				
	<b>Sforzi diga appesantimento (Paramento di monte)</b>			
<b>Cmb.6:</b> <b>G1+G2+G3+0,5×Q<sub>1,inverno</sub></b>	$\sigma_{\max} = +0,0 \leq +0,0$ MPa (nessuna trazione) (Verifica positiva)		$\sigma_{\min} =  -0,60  <  -6,25 $ MPa (Verifica positiva)	
<b>Cmb.7:</b> <b>G1+G2+G3+0,5×Q<sub>1,estate</sub></b>	$\sigma_{\max} = +0,0 \leq +0,0$ MPa (nessuna trazione) (Verifica positiva)		$\sigma_{\min} =  -0,60  <  -6,25 $ MPa (Verifica positiva)	



Dove:

G1 : Peso proprio (carico permanente);

G2 : Spinta idrostatica con livello massima regolazione (carico permanente);

G3: Spinta fanghi (carico permanente);

Q1 : Coazioni di origine termica dovute alla variazione della temperatura esterna ( $Q_{1,estate}$  e  $Q_{1,inverno}$ );

+Ex : Azione sismiche in direzione Monte-Valle

+Ez : Azione sismiche in direzione Base-Coronamento

+Ix : Azioni inerziali dell'acqua invasata in direzione Monte-Valle

$\sigma_{max}$  : sforzo principale massimo di trazione ( $>0$ )

$\sigma_{min}$  = sforzo principale massimo di compressione ( $<0$ )

## 5.10 Verifiche SLU

Le verifiche degli sforzi massimi che sollecitano il corpo diga in condizioni SLU sono condotti verificando che le tensioni nel corpo diga esistente e di appesantimento rispettino i limiti secondo quanto riportato nel D.M 26/06/2014.

### *Combinazioni SLU statiche e sismiche*

Gli sforzi in condizioni SLU devono rispettare i seguenti limiti:

$\sigma_{c,min} \leq f_{cd}$  (per compressione) ;

$\sigma_{c,max} < f_{ctd}$  (per trazione)

con:

$\sigma_{c,max}$  : sforzo principale massimo di trazione

$\sigma_{c,min}$  : sforzo principale massimo di compressione

### *Limiti per il calcestruzzo esistente*

I limiti di resistenza allo SLU del calcestruzzo esistente sono di seguito riportati:

$\sigma_{c,min} < f_{cd} = 17,77$  MPa (resistenza a compressione di calcolo)

$\sigma_{c,max} < f_{ctd} = 1,13$  MPa (resistenza a trazione di calcolo)

### *Limiti per il calcestruzzo nuovo:*

I limiti di resistenza allo SLU del calcestruzzo nuovo sono di seguito riportati:

$\sigma_{c,min} < f_{cd} = 14,20$  MPa (resistenza a compressione di calcolo)

$\sigma_{c,max} < f_{ctd} = 1,71$  MPa (resistenza a trazione di calcolo)

### *5.10.1 Verifica sforzi corpo diga*

Di seguito si riportano le verifiche tensionali per le condizioni SLU sismiche (SLC e SLV) e statiche.

La tabella seguente riporta per le combinazioni di carico selezionate più gravose un quadro di sintesi delle verifiche degli sforzi sollecitanti il corpo diga in condizioni SLU. Le verifiche hanno fornito esito positivo.

Le verifiche di dettaglio con le immagini degli sforzi sollecitanti il corpo diga sono riportate nell'allegato 1.

<b>Concio A (Sezione trascinabile)</b>				
<b>Combinazione SLU / Statica Fondamentale</b>				
	<b>Sforzi diga esistente</b>		<b>Sforzi diga appesantimento</b>	
<b>Cmb.1:</b> $1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3$	$\sigma_{\max} = +0,34 < +1,13$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -1,22  <  -17,77 $ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\max} = +0,12 < +1,71$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,90  <  -14,20 $ MPa (Verifica positiva)
<b>Cmb.2:</b> $1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3 + 1,5 \times Q_{1,inverno}$	$\sigma_{\max} = +0,68 \leq +1,13$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -1,25  <  -17,77 $ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\max} = +0,21 < +1,71$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,80  <  -14,20 $ MPa (Verifica positiva)
<b>Cmb.3:</b> $1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3 + 1,5 \times Q_{1,estate}$	$\sigma_{\max} = +0,28 \leq +1,13$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -1,13  <  -17,77 $ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\max} = +0,23 < +1,71$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -1,10  <  -14,20 $ MPa (Verifica positiva)
<b>Combinazione SLU / Statica Eccezionale</b>				
	<b>Sforzi diga esistente</b>		<b>Sforzi diga appesantimento</b>	
<b>Cmb.4:</b> $G1 + G3 + A + 0,5 \times Q_{1,inverno}$	$\sigma_{\max} = +0,45 \leq +1,13$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,97  <  -17,77 $ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\max} = +0,10 < +1,71$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,63  <  -14,20 $ MPa (Verifica positiva)
<b>Cmb.5:</b> $G1 + G3 + A + 0,5 \times Q_{1,estate}$	$\sigma_{\max} = +0,19 \leq +1,13$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,92  <  -17,77 $ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\max} = +0,11 < +1,71$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,78  <  -14,20 $ MPa (Verifica positiva)
<b>Combinazione SLU / Sismica (SLC – SLV)</b>				
	<b>Sforzi diga esistente</b>		<b>Sforzi diga appesantimento</b>	
<b>Cmb.6:</b> $G1 + G2 + G3 + E_{x,SLC} + 0,3E_{z,SLC} + I_{x,SLC} + 0,5 \times Q_{1,inverno}$	$\sigma_{\max} = +0,50 \leq +1,13$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,95  <  -17,77 $ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\max} = +0,14 < +1,71$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,51  <  -14,20 $ MPa (Verifica positiva)
<b>Cmb.7:</b> $G1 + G2 + G3 + E_{x,SLC} + 0,3E_{z,SLC} + I_{x,SLC} + 0,5 \times Q_{1,estate}$	$\sigma_{\max} = +0,30 \leq +1,13$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,83  <  -17,77 $ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\max} = +0,11 < +1,71$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,66  <  -14,20 $ MPa (Verifica positiva)

<b>Concio B (Sezione emergente)</b>				
<b>Combinazione SLU / Statica Fondamentale</b>				
	<b>Sforzi diga esistente</b>		<b>Sforzi diga appesantimento</b>	
<b>Cmb.1:</b> $1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3$	$\sigma_{\max} = +0,37 < +1,13$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -1,30  <  -17,77 $ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\max} = +0,13 < +1,71$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,96  <  -14,20 $ MPa (Verifica positiva)
<b>Cmb.2:</b> $1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3 + 1,5 \times Q_{1,inverno}$	$\sigma_{\max} = +0,66 \leq +1,13$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -1,31  <  -17,77 $ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\max} = +0,21 < +1,71$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,88  <  -14,20 $ MPa (Verifica positiva)
<b>Cmb.3:</b> $1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3 + 1,5 \times Q_{1,estate}$	$\sigma_{\max} = +0,35 \leq +1,13$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -1,31  <  -17,77 $ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\max} = +0,27 < +1,71$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -1,14  <  -14,20 $ MPa (Verifica positiva)
<b>Combinazione SLU / Statica Eccezionale</b>				
	<b>Sforzi diga esistente</b>		<b>Sforzi diga appesantimento</b>	
<b>Cmb.4:</b> $G1 + G3 + A + 0,5 \times Q_{1,inverno}$	$\sigma_{\max} = +0,45 \leq +1,13$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -1,02  <  -17,77 $ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\max} = +0,10 < +1,71$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,67  <  -14,20 $ MPa (Verifica positiva)
<b>Cmb.5:</b> $G1 + G3 + A + 0,5 \times Q_{1,estate}$	$\sigma_{\max} = +0,27 \leq +1,13$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -1,02  <  -17,77 $ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\max} = +0,14 < +1,71$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,80  <  -14,20 $ MPa (Verifica positiva)
<b>Combinazione SLU / Sismica (SLC – SLV)</b>				
	<b>Sforzi diga esistente</b>		<b>Sforzi diga appesantimento</b>	
<b>Cmb.6:</b> $G1 + G2 + G3 + E_{x,SLC} + 0,3E_{z,SLC} + I_{x,SLC} + 0,5 \times Q_{1,inverno}$	$\sigma_{\max} = +0,50 \leq +1,13$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -1,05  <  -17,77 $ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\max} = +0,14 < +1,71$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,51  <  -14,20 $ MPa (Verifica positiva)
<b>Cmb.7:</b> $G1 + G2 + G3 + E_{x,SLC} + 0,3E_{z,SLC} + I_{x,SLC} + 0,5 \times Q_{1,estate}$	$\sigma_{\max} = +0,21 \leq +1,13$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -1,01  <  -17,77 $ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\max} = +0,14 < +1,71$ MPa (Verifica positiva)	$\sigma_{\min} =  -0,82  <  -14,20 $ MPa (Verifica positiva)

Dove:

G1 : Peso proprio (carico permanente);

G2 : Spinta idrostatica con livello massima regolazione (carico permanente);

G3: Spinta fanghi (carico permanente);

Q1 : Coazioni di origine termica dovute alla variazione della temperatura esterna ( $Q_{1,estate}$  e  $Q_{1,inverno}$ );

+Ex : Azione sismiche in direzione Monte-Valle

+Ez : Azione sismiche in direzione Base-Coronamento

+Ix : Azioni inerziali dell'acqua invasata in direzione Monte-Valle

A: Azione eccezione - Spinta idrostatica con livello massimo invasato

$\sigma_{max}$  : sforzo principale massimo di trazione ( $>0$ )

$\sigma_{min}$  = sforzo principale massimo di compressione ( $<0$ )

### 5.10.2 Verifiche a ribaltamento e traslazione

La seguente tabella riporta una sintesi delle verifiche a traslazione e ribaltamento della diga calcolate per le combinazioni di carico più gravose. Le verifiche hanno fornito esito positivo.

Le verifiche di dettaglio sono riportate nell'allegato 1.

Le verifiche sono state condotte considerando le azioni sollecitanti una "striscia" di diga appesantita di larghezza 1 m.

Per quanto riguarda le verifiche a scorrimento eseguite in corrispondenza della fondazione e delle riprese di getto del calcestruzzo è stato adottato un coefficiente di attrito pari a 0,75 corrispondente al valore previsto dal DM 20.03.82 e comunque coerente con le buone caratteristiche presenti all'interfaccia tra diga e roccia riscontrate dalle indagini eseguite in sito.

Sono state prese in esame a titolo esemplificativo n.3 sezioni di verifica (indicate nell'allegato 1) che corrispondono rispettivamente alla sezione di base (quota 608,7 m), alla sezione 1-1 (quota 612,3 m) e sezione 2-2 (quota 618,3 m).

<b>Concio A (Sezione trascinabile)</b>		
<b>Combinazione statica SLU / Fondamentale (<math>1 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3</math>)</b>		
<b>Sezioni di verifica</b>	<b>Verifica ribaltamento</b> $\alpha = M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante}$	<b>Verifica traslazione</b> $\beta = V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante}$
Sezione di base	$\alpha = 1,66 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,05 > 1$ (Verifica positiva)
Sezione 1-1	$\alpha = 1,74 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,16 > 1$ (Verifica positiva)
Sezione 2-2	$\alpha = 1,92 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,41 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Combinazione statica SLU / Eccezionale (<math>1 \times G1 + 1 \times A + 1 \times G3</math>)</b>		
<b>Sezioni di verifica</b>	<b>Verifica ribaltamento</b> $\alpha = M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante}$	<b>Verifica traslazione</b> $\beta = V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante}$
Sezione di base	$\alpha = 1,96 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,41 > 1$ (Verifica positiva)
Sezione 1-1	$\alpha = 2,00 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,50 > 1$ (Verifica positiva)
Sezione 2-2	$\alpha = 2,03 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,57 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Combinazione sismica / SLC (<math>G1 + G2 + G3 + E_{x,slc-valle/monte} + 0,3 \times E_{z,slc-Basso/Alto} + I_{x,slc}</math>)</b>		
<b>Sezioni di verifica</b>	<b>Verifica ribaltamento</b> $\alpha = M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante}$	<b>Verifica traslazione</b> $\beta = V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante}$
Sezione di base (serbatoio pieno)	$\alpha = 1,65 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,04 > 1$ (Verifica positiva)
Sezione di base (serbatoio vuoto)	$\alpha = 5,53 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 4,10 > 1$ (Verifica positiva)
Sezione 1-1 (serbatoio pieno)	$\alpha = 1,75 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,10 > 1$ (Verifica positiva)
Sezione 1-1 (serbatoio vuoto)	$\alpha = 6,01 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 4,18 > 1$ (Verifica positiva)
Sezione 2-2 (serbatoio pieno)	$\alpha = 1,91 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,23 > 1$ (Verifica positiva)
Sezione 2-2 (serbatoio vuoto)	$\alpha = 6,44 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 4,18 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Combinazione sismica / SLV (<math>G1 + G2 + G3 + E_{x,slv-valle/monte} + 0,3 \times E_{z,slv-Basso/Alto} + I_{x,slv}</math>)</b>		
<b>Sezioni di verifica</b>	<b>Verifica ribaltamento</b> $\alpha = M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante}$	<b>Verifica traslazione</b> $\beta = V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante}$
Sezione di base	$\alpha = 1,76 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,13 > 1$ (Verifica positiva)

<b>Concio A (Sezione trascinabile)</b>		
<i>(serbatoio pieno)</i>		
<b>Sezione di base</b> <i>(serbatoio vuoto)</i>	$\alpha = 6,97 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 5,13 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 1-1</b> <i>(serbatoio pieno)</i>	$\alpha = 1,87 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,21 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 1-1</b> <i>(serbatoio vuoto)</i>	$\alpha = 7,60 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 5,26 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 2-2</b> <i>(serbatoio pieno)</i>	$\alpha = 2,04 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,36 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 2-2</b> <i>(serbatoio vuoto)</i>	$\alpha = 8,10 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 5,23 > 1$ (Verifica positiva)

<b>Concio B (Sezione emergente)</b>		
<b>Combinazione statica SLU / Fondamentale (<math>1 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3</math>)</b>		
<b>Sezioni di verifica</b>	<b>Verifica ribaltamento</b> $\alpha = M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante}$	<b>Verifica traslazione</b> $\beta = V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante}$
<b>Sezione di base</b>	$\alpha = 1,95 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,17 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 1-1</b>	$\alpha = 2,02 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,41 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 2-2</b>	$\alpha = 2,73 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 2,20 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Combinazione statica SLU / Eccezionale (<math>1 \times G1 + 1 \times A + 1 \times G3</math>)</b>		
<b>Sezioni di verifica</b>	<b>Verifica ribaltamento</b> $\alpha = M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante}$	<b>Verifica traslazione</b> $\beta = V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante}$
<b>Sezione di base</b>	$\alpha = 2,14 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,40 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 1-1</b>	$\alpha = 2,10 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,54 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 2-2</b>	$\alpha = 2,36 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,83 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Combinazione sismica / SLC (<math>G1 + G2 + G3 + E_{x,slc-valle/monte} + 0,3 \times E_{z,slc-Basso/Alto} + I_{x,slc}</math>)</b>		
<b>Sezioni di verifica</b>	<b>Verifica ribaltamento</b> $\alpha = M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante}$	<b>Verifica traslazione</b> $\beta = V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante}$
<b>Sezione di base</b> <i>(serbatoio pieno)</i>	$\alpha = 1,85 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,13 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione di base</b> <i>(serbatoio vuoto)</i>	$\alpha = 5,53 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 4,25 > 1$ (Verifica positiva)

<b>Concio B (Sezione emergente)</b>		
<b>Sezione 1-1</b> <i>(serbatoio pieno)</i>	$\alpha = 1,87 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,29 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 1-1</b> <i>(serbatoio vuoto)</i>	$\alpha = 5,30 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 4,33 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 2-2</b> <i>(serbatoio pieno)</i>	$\alpha = 2,21 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,64 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 2-2</b> <i>(serbatoio vuoto)</i>	$\alpha = 5,00 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 4,33 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Combinazione sismica / SLV (<math>G1 + G2 + G3 + E_{x,slv-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,slv-Basso/Alto} + I_{x,slv}</math>)</b>		
<b>Sezioni di verifica</b>	<b>Verifica ribaltamento</b> $\alpha = M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante}$	<b>Verifica traslazione</b> $\beta = V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante}$
<b>Sezione di base</b> <i>(serbatoio pieno)</i>	$\alpha = 1,99 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,24 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione di base</b> <i>(serbatoio vuoto)</i>	$\alpha = 6,94 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 5,32 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 1-1</b> <i>(serbatoio pieno)</i>	$\alpha = 2,02 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,40 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 1-1</b> <i>(serbatoio vuoto)</i>	$\alpha = 6,65 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 5,44 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 2-2</b> <i>(serbatoio pieno)</i>	$\alpha = 2,43 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,86 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 2-2</b> <i>(serbatoio vuoto)</i>	$\alpha = 6,30 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 5,50 > 1$ (Verifica positiva)



## 5.11 VERIFICHE FASI DI GETTO

Le fasi di realizzazione dei getti di appesantimento sono illustrate nel dettaglio nella seguente specifica relazione tecnica a cui si rimanda per ogni approfondimento:

“CAS-R-02 / Diga di Cassiglio – Organizzazione preliminare cantiere – Cronoprogramma demolizioni e getti di appesantimento / redatta dall’Ing. Marco Pegoraro / 12.01.2018 “

Le immagini sotto riportate tratte dalle tavole di progetto illustrano uno schema grafico delle fasi di getto dell’appesantimento dell’opera:



Immagine tratta dalla tavola di progetto “780-003-800-Rev.00 / Getto di appesantimento – Conci – Vista da monte – Posizionamento conci / 08.01.2018”

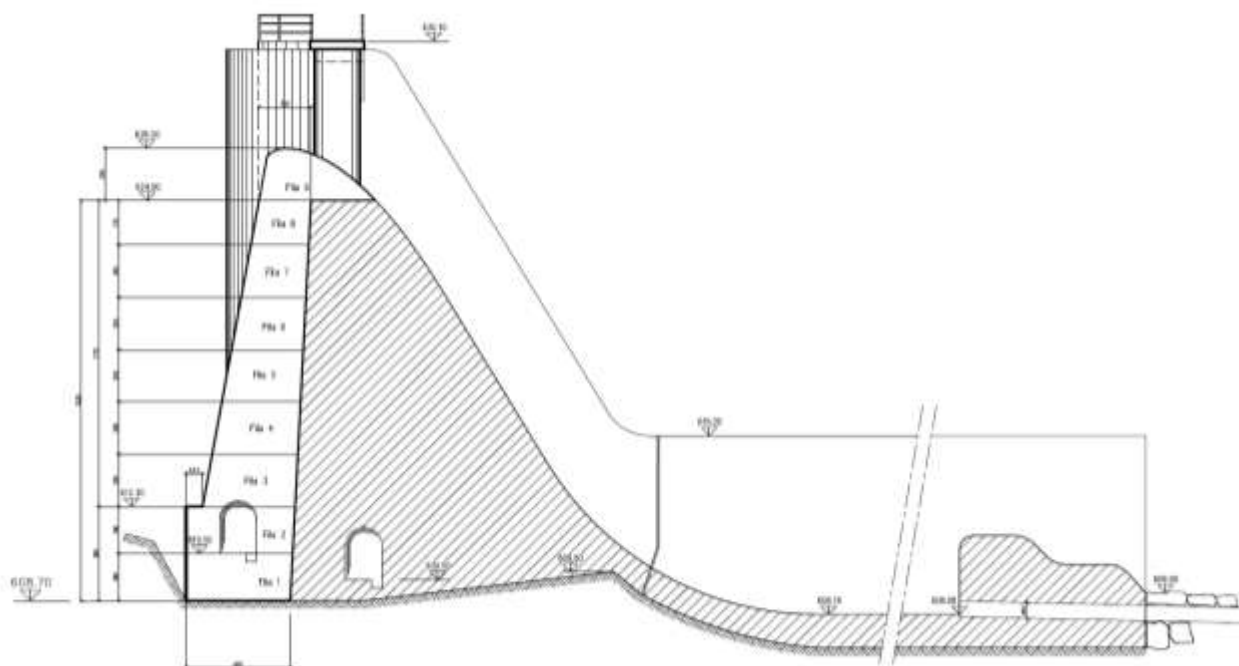
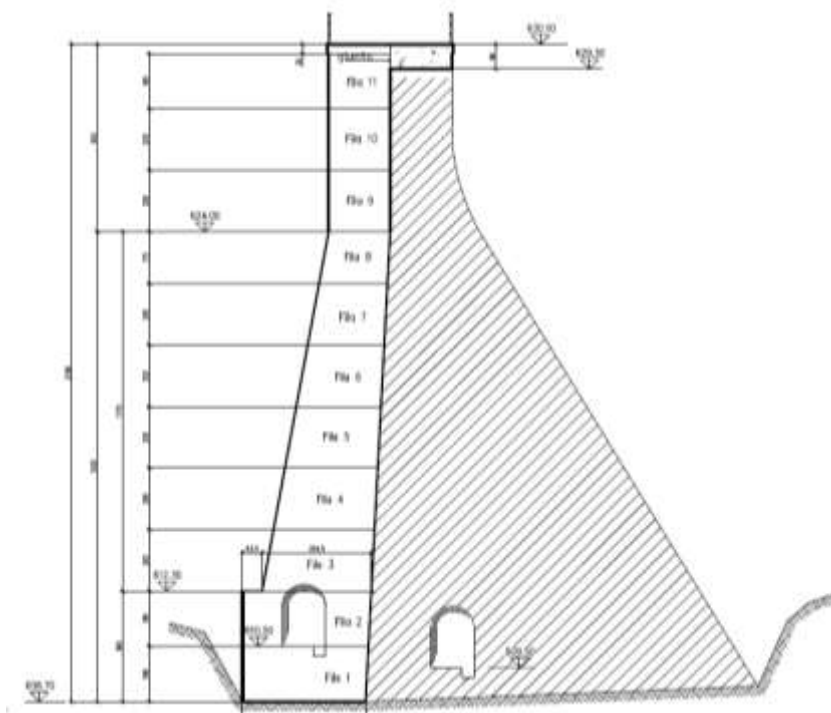


Immagine tratta dalla tavola di progetto “780-003-801-Rev.00 / Getto di appesantimento – Conci – Sezione trascinabile e sezione emergente – Carpenteria / 08.01.2018”



*Immagine tratta dalla tavola di progetto “780-003-801-Rev.00 / Getto di appesantimento – Conci – Sezione tracimabile e sezione emergente – Carpenteria / 08.01.2018”*

Nell’ipotesi di progetto, il getto dell’appesantimento è considerato eseguito durante la stagione primaverile secondo il cronoprogramma riportato nella relazione tecnica sopra citata.

#### **5.11.1 Trattazione semplificata dello sviluppo del calore di idratazione in fase di getto**

L’idratazione del cemento è una reazione esotermica che avviene con sviluppo di calore. Il calore di idratazione, cioè riferito a 1 kg di cemento, dipende dal tipo e dalla classe di resistenza del cemento: maggiore sono il contenuto di clinker Portland e la finezza del cemento (cioè la classe di resistenza), più rapido è lo sviluppo di calore. Il calore di idratazione provoca il riscaldamento del calcestruzzo. In condizioni adiabatiche, cioè in assenza di alcuna perdita di calore del calcestruzzo, l’aumento di temperatura ( $\Delta T_t$ ) ad al tempo  $t$ , può essere così calcolato:

$$q_t \times c = m \times \rho \times (\Delta T_t)_{ad}$$

dove:

$q_t$  (kJ/kg) : calore di idratazione unitario del cemento al tempo  $t$

$c$  (kg/m<sup>3</sup>) : è il dosaggio del cemento nel calcestruzzo

$q_t \times c$  (kJ/m<sup>3</sup>) : calore sviluppato in 1 m<sup>3</sup> di calcestruzzo al tempo  $t$

$m$  (kg/m<sup>3</sup>) : massa di 1 m<sup>3</sup> di calcestruzzo

$\rho = 1,1$  [kJ / (kg×°C)] : calore specifico del calcestruzzo

Nel caso di riscaldamento non adiabatico, come si verifica nelle strutture reali, l'andamento della temperatura sarà prima crescente (nei primi 2-3 giorni il calore di idratazione si sviluppa ad alta velocità), e dopo decrescente (quando la dissipazione del calore del calcestruzzo all'ambiente prevale sullo sviluppo del calore di idratazione che dopo 3 giorni procede più lentamente).

A causa del diverso isolamento termico del calcestruzzo nella zona centrale ed in quella periferica, si instaura un gradiente termico ( $\delta T_t$ ) tra la parte più calda e quella più fredda della struttura.

Se il valore di  $(\delta T_t)_{\max}$  supera  $20 \text{ }^\circ\text{C} / \text{m}$  esiste un rischio di fessurazione, a causa delle tensioni di compressione nel nucleo più caldo che provoca tensioni di trazione sulla superficie più fredda della struttura che si dilata meno del nucleo. Questo tipo di fenomeno non è in genere rilevante, se non in calcestruzzi molto ricchi di cemento ed in climi freddi, perchè inizialmente il modulo elastico è basso e quindi si instaurano delle basse tensioni a causa delle differenze termiche. Inoltre si registra un rilassamento viscoso che mitiga le tensioni insorte tra nucleo e periferia.

Mentre il calcolo  $(\Delta T_t)_{\text{ad}}$  in condizioni adiabatiche è relativamente semplice, il calcolo di  $(\delta T_t)$  è complesso poichè dipende anche da fattori difficilmente prevedibili (condizioni eoliche e termiche nei giorni immediatamente dopo il getto) che influenzano la dispersione del calore, oltre che alle dimensioni, geometria della struttura e condizioni al contorno. Tuttavia è di seguito calcolato il valore di  $(\delta T_t)_{\max}$  nell'ipotesi estrema e conservativa di riscaldamento adiabatico nel nucleo e di dissipazione termica totale in periferia (temperatura sempre uguale a quella dell'ambiente): in queste condizioni il valore di  $(\delta T_t)_{\max}$  coincide con quello di  $(\Delta T_t)_{\text{ad}}$ .

Assumendo realisticamente che il  $(\delta T_t)_{\max}$  è raggiunto solamente a 3 giorni dal getto si può porre:

$$(\delta T_t)_{\max} = (\Delta T_3)_{\text{ad}} = (q_3 \times c) / (m \times \rho)$$

Se si pone  $(\delta T_t)_{\max}$  pari a  $20^\circ\text{C}$  (massimo gradiente termico accettabile, oltre il quale esiste il rischio di fessurazione) si ottiene:

$$q_3 \times c = 20 \text{ }^\circ\text{C} \times 2400 \text{ kg/m}^3 \times 1,1 [ \text{kJ} / (\text{kg} \times \text{ }^\circ\text{C}) ] = 52800 \text{ kJ/ m}^3$$

Mettendo in conto di utilizzare cemento a basso calore di idratazione CEM 32,5 R IV/B (ARS) (cemento pozzolanico tipo IV a resistenza iniziale elevata e ad alta resistenza ai solfati con  $q_3 = 175 \text{ kJ/kg}$ ) si ottiene

$$c = (52800 \text{ kJ/ m}^3) / (175 \text{ kJ/kg}) = 302 \text{ kg/m}^3 \text{ (massimo dosaggio di cemento)}$$

Il dosaggio di cemento risulta compatibile con la classe di esposizione e durabilità dell'opera. La classe di esposizione è la classe XC in ambiente "bagnato raramente asciutto" che richiede un dosaggio minimo di cemento pari a  $300 \text{ kg/m}^3$ .

### 5.11.2 *Trattazione approfondita dello sviluppo del calore di idratazione in fase di getto e del ritiro mediante apposita modellazione numerica*

Il problema del calore di idratazione e del ritiro del calcestruzzo (fenomeni che si sviluppano principalmente nella fase iniziale del getto) sono stati modellati attraverso un modello agli elementi finiti con il programma di calcolo Midas Gen, il quale possiede un algoritmo specifico per le analisi del calore di idratazione dei calcestruzzi ed è possibile al contempo considerare il fenomeno del ritiro.

Il modello è costituito da elementi finiti di tipo solido e riproduce una porzione di getto rappresentativa della sezione della diga (sezione emergente), compreso lo strato corticale di zavorramento previsto in progetto. Sul modello sono state implementate le caratteristiche termofisiche del calcestruzzo, le condizioni al contorno e le fasi di getto simulate attraverso un'analisi di costruzioni per fasi.

Il modello fem considera per le diverse fasi costruttive che il peso proprio di un concio appena gettato sia trasferito direttamente al concio sottostante, già indurito, ma non alla diga esistente attraverso le barre.

Dal modello numerico elasto-meccanico così ottenuto sono state definite le temperature all'interno del getto per ogni fase temporale dell'analisi e stimati i gradienti termici agenti.

Sempre dallo stesso modello, sono stati ricavati gli sforzi nel continuo solido agenti in relazione all'imposizione delle deformazioni termiche dovute alla variazione di temperatura nel getto e al ritiro.

Il modello di calcolo ha anche tenuto conto dell'evoluzione nel tempo delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo, cioè del modulo elastico, della resistenza a compressione e della resistenza a trazione che si incrementano progressivamente con la maturazione del getto. Le curve di maturazione dei parametri meccanici del calcestruzzo sono state definite in accordo alle formule proposte dalla normativa tecnica UNI EN 1992-1 (Eurocodice 2):

$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \times f_{cm}$  (variazione nel tempo della resistenza media a compressione)

$f_{ctm}(t) = [\beta_{cc}(t)]^\alpha \times f_{ctm}$  (variazione nel tempo della resistenza media a trazione)

$E_{cm}(t) = [f_{cm}(t) / f_{cm}]^{0.3} \times E_{cm}$  (variazione nel tempo del modulo elastico)

dove

$\beta_{cc}(t) = \exp[ s \times ( 1 - (28/t)^{1/2} ) ]$

$f_{cm}(t)$  : resistenza media a compressione del calcestruzzo all'età di t giorni ;

$f_{cm}$  : resistenza media a compressione del calcestruzzo a 28 giorni ( $f_{cm} = 25+8 = 33$  MPa);

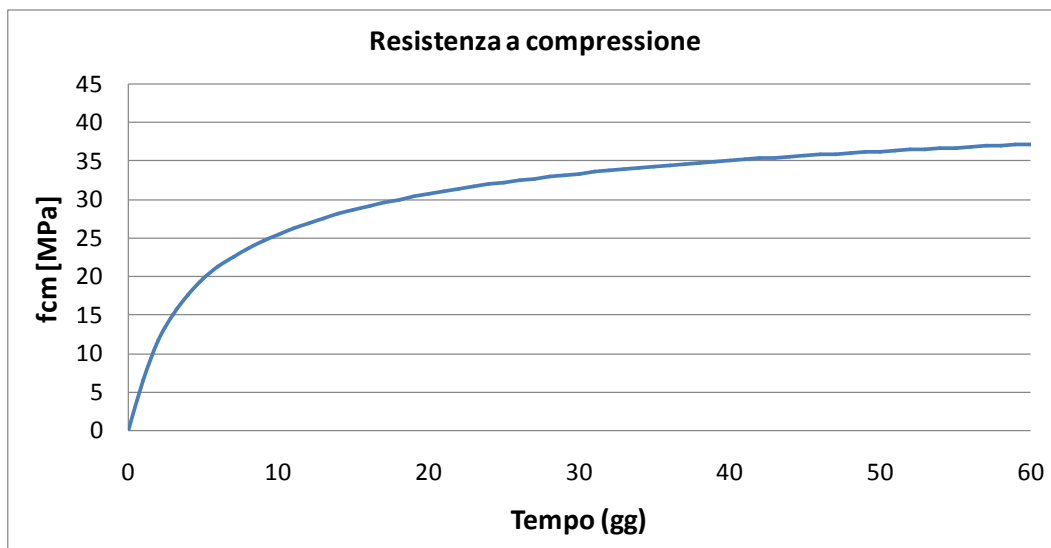
$f_{ctm}$  : resistenza media a trazione del calcestruzzo a 28 giorni ( $f_{ctm} = 2,56$  MPa)

$E_{cm}$  : modulo elastico medio del calcestruzzo (  $E_{cm} = 31400$  MPa );

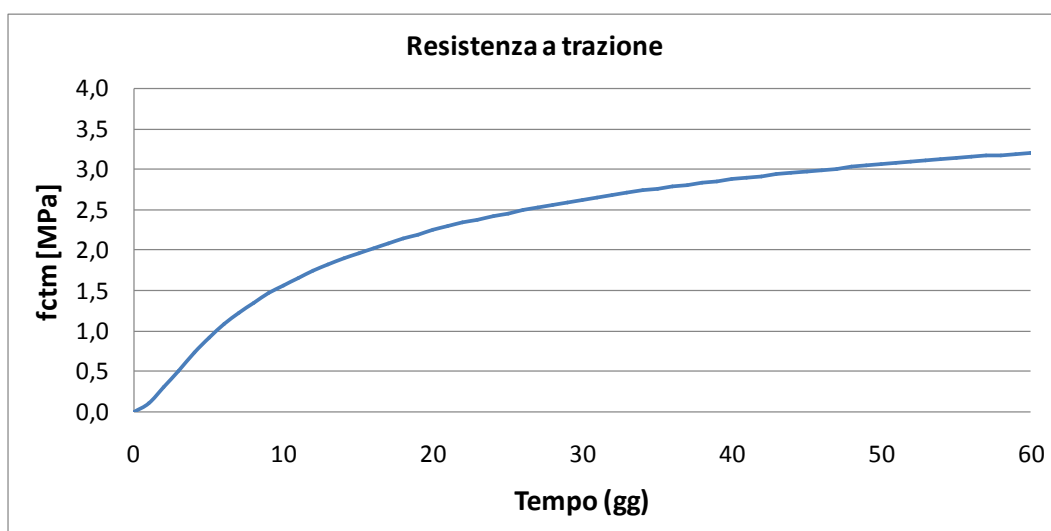
$\beta_{cc}(t)$  : coefficiente che dipende dall'età t del calcestruzzo

t : età del calcestruzzo in giorni; s : coefficiente che dipende dal tipo di cemento (s = 0,38 per CEM 32,5 N)

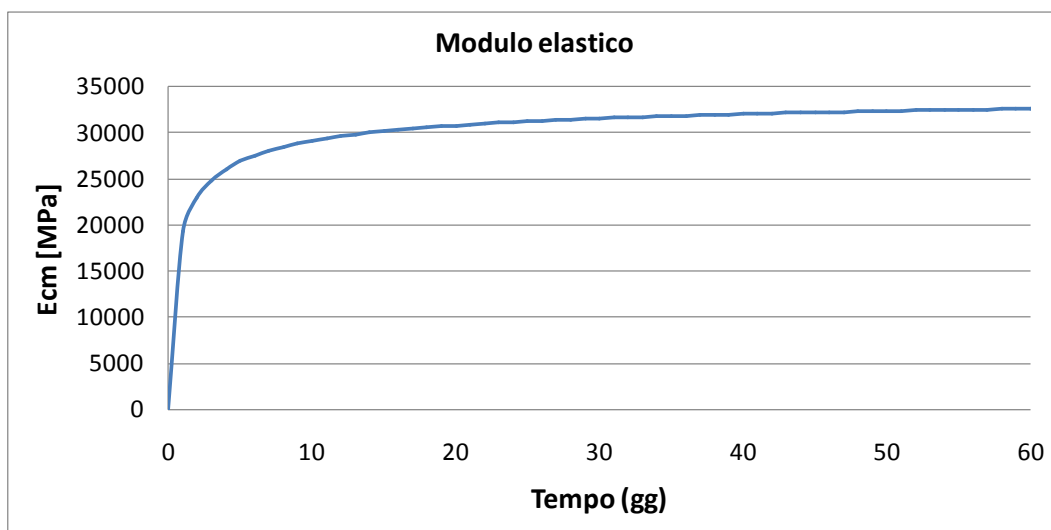
$\alpha = 1$  per  $t < 28$  giorni e  $\alpha = 2/3$  per  $t \geq 28$  giorni



Curva di maturazione della resistenza a compressione del calcestruzzo



Curva di maturazione della resistenza a trazione del calcestruzzo



Curva di maturazione del modulo elastico del calcestruzzo

Il ritiro è stato messo in conto in accordo a quanto previsto dall'Eurocodice2. La deformazione totale del ritiro è data da due componenti, la deformazione da ritiro per essiccamento e la deformazione da ritiro autogeno.

La deformazione da ritiro per essiccamento si sviluppa lentamente, dal momento che è funzione della migrazione dell'acqua attraverso il calcestruzzo indurito. Nel caso dell'appesantimento della diga essendo il nuovo getto a contatto con l'acqua (umidità 100%) tale contributo per essiccamento risulta essere nullo.

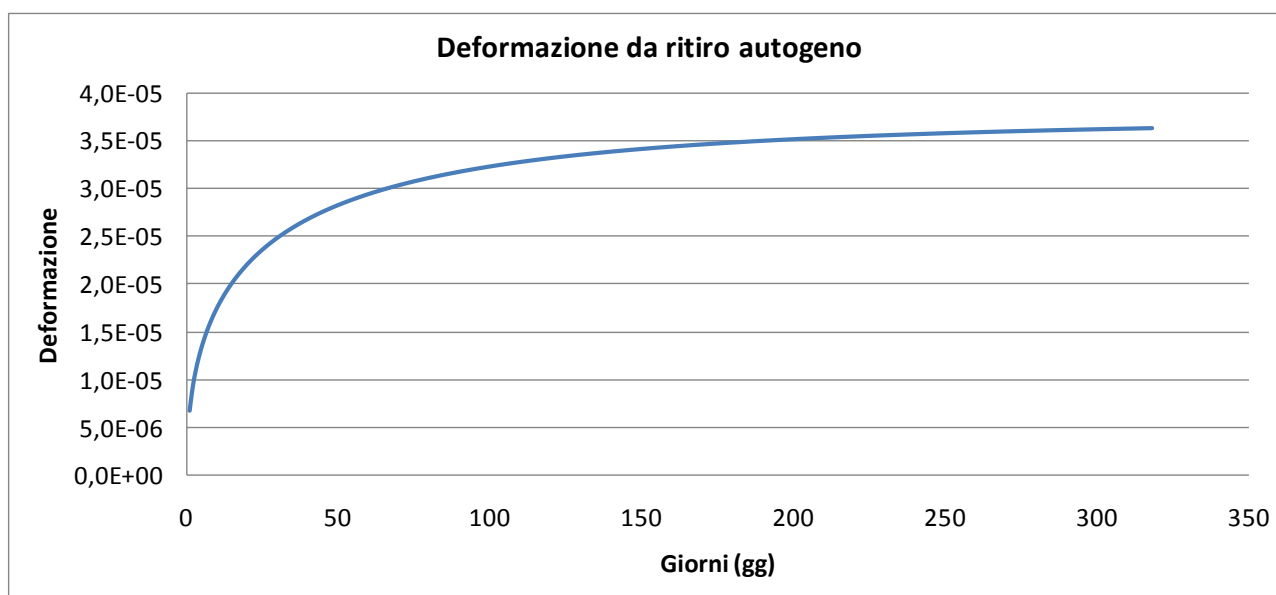
La deformazione da ritiro autogeno si sviluppa durante l'indurimento del calcestruzzo: la maggior parte si sviluppa quindi nei primi giorni successivi al getto. Il ritiro autogeno è una funzione della resistenza del calcestruzzo. Esso si considera specificatamente quando un calcestruzzo fresco è gettato contro un calcestruzzo già indurito. La deformazione da ritiro autogeno è data dalla seguente espressione:

$$\varepsilon_{ca(t)} = \beta_{as}(t) \times \varepsilon_{ca}(\infty)$$

dove:

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \times (f_{ck} - 10) \times 10^{-6}$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2 \times t^{0,5}) \text{ con } t \text{ espresso in giorni}$$



*Grafico della deformazione dovuto al ritiro autogeno*

Al fine di definire correttamente il fenomeno dello sviluppo del calore di idratazione, nella definizione dei parametri di input sono state fatte ipotesi realistiche di cantierizzazione, anche consultando possibili impianti di betonaggio nella zona della diga al fine di definire le velocità di getto. Considerando la possibilità di utilizzare in fase di getto n.4 betoniere all'ora con velocità di scarico del calcestruzzo di 40 m<sup>3</sup>/ora, il getto di un singolo concio potrà essere concluso in poco più di 2 ore, pertanto lo sviluppo del calore di idratazione è considerato avvenga simultaneamente (a favore di sicurezza) per tutto il volume di calcestruzzo di un singolo concio.

L'analisi del calore di idratazione ha permesso di determinare, nello spazio e nel tempo, il campo delle temperature che si sviluppa all'interno del getto conseguente al calore rilasciato dalla reazione esotermica di idratazione dei cementi costituenti l'impasto. Tale analisi è stata impostata per poter quantificare le differenze di temperature tra le parti centrali del getto (più calde) e quelle corticali (più fredde). Infatti, in fase di raffreddamento della massa di calcestruzzo, tali differenze indurranno degli stati di trazione superficiali che, se troppo elevati, potranno generare delle fessurazioni sull'estradosso del getto compromettendo la durabilità delle armature e quindi la funzionalità statica dell'elemento strutturale. Per evitare la fessurazione del calcestruzzo non deve essere superata una variazione di temperatura di 20 °C/m (come indicato in letteratura, ad esempio nel libro "Il nuovo calcestruzzo" di Collepari al capitolo 14,5 "Calore di idratazione, gradienti termici e rischi di fessurazione").

La soluzione del problema è stata ottenuta risolvendo numericamente l'equazione di Fourier in seguito esplicitata:

**Forma generale nelle tre dimensioni spaziali:**

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}_g}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau}$$

**oppure, espressa sinteticamente tramite l'operatore nabla:**

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}_g}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad \text{con} \quad \alpha = \frac{k}{\rho c}$$

dove:

$\alpha$  = diffusività termica

$k$  = conducibilità termica [W/mK]

$\rho$  = densità volumica [kg/m<sup>3</sup>]

$c$  = calore specifico [J/kgK]

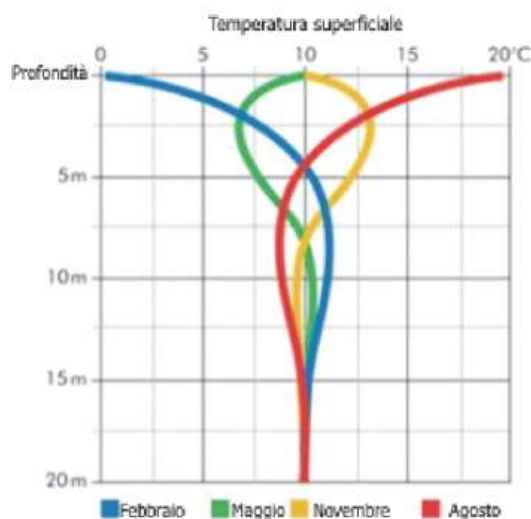
$\dot{q}_g$  = energia generata per unità di tempo e di volume [W/m<sup>3</sup>]

Durante la fase iniziale della stagionatura/maturazione dei getti (primi 7 gg circa) è prevista una protezione termica dei getti mediante o cassaforma isolate in legno, o coperture termoisolanti o superiormente mediante uno strato d'acqua di circa 5 cm. Questo permette di trattenere il calore del getto evitando la dispersione naturale con lo sviluppo di rapidi gradienti termici nel calcestruzzo. Terminata la fase iniziale con protezione del getto, successivamente la superficie superiore dei getti è a contatto con il getto del concio superiore.

La superficie laterale di monte del getto è nella fase iniziale a contatto con le casseforme isolate (primi 7gg circa) e dopo lo scassero è esposta alla temperatura ambientale. La superficie laterale di valle è a contatto con il calcestruzzo della diga esistente che dopo lo svuotamento dell'acqua dal bacino è in equilibrio termico con la temperatura ambientale. La temperatura dell'aria è stata assunta con variazione ciclica giornaliera per la stagione primaverile con riferimento al sito di Cassiglio.

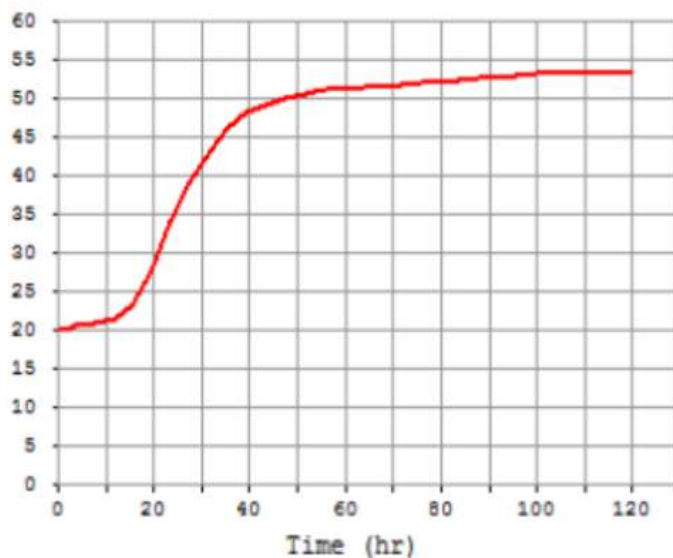
Il flusso di calore all'interno di un getto si sviluppa principalmente in direzione monte-valle, mentre è stato previsto per il flusso di calore in direzione sponda sinistra-sponda destra una condizione di adiabaticità che risulta essere realistica considerando la lunghezza del concio pari a 12 m.

La temperatura del suolo a contatto con il primo getto è assunta costante e pari a 10°C che è il tipico valore del terreno per la stagione primaverile durante la quale è prevista la realizzazione dell'opera.



*Grafico che mostra l'andamento della temperatura del terreno con la profondità (nel mese di Maggio la temperatura superficiale è pari a circa 10 °C – Norma UNI EN 15450:2008)*

Per quanto concerne lo sviluppo del calore del calcestruzzo nel tempo, si adatterà una curva adiabatica tipica per le miscele di calcestruzzo di tipo LH (Lower Hidratation). Tale curva definisce una temperatura iniziale del getto pari a 20°C assumendo quindi che, dalla miscelazione iniziale nell'impianto di betonaggio, nel corso del trasporto in cantiere, la miscela inizi a riscaldarsi in relazione alla reazione esotermica legata appunto all'idratazione del cemento. La curva adiabatica che verrà adottata nelle calcolazioni sarà quella rappresentata nella seguente immagine:



*Curva adiabatica assunta nelle calcolazioni del calore di idratazione*



Il diagramma, in particolare, evidenzia una temperatura massima della miscela di 53°C a circa 120 ore dal getto iniziale originando quindi un delta termico di 33°C. I valori fisici dei parametri nell'analisi numerica sono stati acquisiti sia dalla letteratura piuttosto che da esperienze similari svolte relativamente lo studio del calore di idratazione di getti massivi di altre strutture. I valori dei coefficienti convettivi assunti nell'analisi sono i seguenti:

coefficiente convettivo cls - aria : 10 kcal/m<sup>2</sup>h°C

coefficiente convettivo cls - cassaforma: 6 kcal/m<sup>2</sup>h°C

I tempi dei diversi getti sono stati definiti in accordo al cronoprogramma dei getti indicato nel documento:

“CAS-R-02 / Diga di Cassiglio – Organizzazione preliminare cantiere – Cronoprogramma demolizioni e getti di appesantimento / redatta dall'Ing. Marco Pegoraro / 12.01.2018 “

di seguito si riporta una sintesi dei tempi messi in conto nei calcoli per la sezione presa in esame con riferimento alla nomenclatura dei getti riportata nelle tavole di progetto :

<i>N. elemento</i>	<i>Giorno del getto</i>	<i>Δ = tempo trascorso tra due getti sulla stessa verticale</i>
<b>Getto 1</b>	2° giorno	--
<b>Getto 6</b>	13° giorno	11 giorni
<b>Getto 12</b>	20° giorno	7 giorni
<b>Getto 18</b>	28° giorno	8 giorni
<b>Getto 24</b>	35° giorno	7 giorni
<b>Getto 30</b>	42° giorno	7 giorni
<b>Getto 36</b>	49° giorno	7 giorni
<b>Getto 42</b>	56° giorno	7 giorni
<b>Getto 48</b>	65° giorno	9 giorni
<b>Getto 56</b>	72° giorno	7 giorni
<b>Getto 61</b>	79° giorno	7 giorni

Nel periodo iniziale, l'innalzamento termico provocato dall'idratazione, non produce tensioni elevate all'interno del calcestruzzo giacché il modulo elastico è ancora basso e le sollecitazioni sono compensate dalle deformazioni plastiche.

I risultati di dettaglio dell'analisi sono riportati nell'allegato1. Per le diverse fasi di getto, la tabella seguente riporta la variazione di temperatura massima a metro lineare e il coefficiente di verifica degli sforzi agenti con riferimento alla tensione massima principale nel calcestruzzo dell'appesantimento rapportata alla resistenza a trazione del calcestruzzo valutata all'istante temporale preso in esame.

<b>FASE GETTO</b>	<b><math>\Delta T_{max/m}</math></b>	<b><math>\alpha = \sigma_{max,t}(t) / f_{ct}(t)</math></b>
<b>Getto 1</b>	19,0 °C ≤ 20 °C (Verifica positiva)	$\alpha > 1$ (verifica positiva)
<b>Getto 6</b>	19,0 °C ≤ 20 °C (Verifica positiva)	$\alpha > 1$ (verifica positiva)
<b>Getto 12</b>	14,0°C ≤ 20 °C (Verifica positiva)	$\alpha > 1$ (verifica positiva)
<b>Getto 18</b>	16,0°C ≤ 20 °C (Verifica positiva)	$\alpha > 1$ (verifica positiva)
<b>Getto 24</b>	18,0°C ≤ 20 °C (Verifica positiva)	$\alpha > 1$ (verifica positiva)
<b>Getto 30</b>	18,0°C ≤ 20 °C (Verifica positiva)	$\alpha > 1$ (verifica positiva)
<b>Getto 36</b>	18,0°C ≤ 20 °C (Verifica positiva)	$\alpha > 1$ (verifica positiva)
<b>Getto 42</b>	18,0°C ≤ 20 °C (Verifica positiva)	$\alpha > 1$ (verifica positiva)
<b>Getto 48</b>	20,0°C ≤ 20 °C (Verifica positiva)	$\alpha > 1$ (verifica positiva)
<b>Getto 56</b>	20,0°C ≤ 20 °C (Verifica positiva)	$\alpha > 1$ (verifica positiva)
<b>Getto 61</b>	19,0°C ≤ 20 °C (Verifica positiva)	$\alpha > 1$ (verifica positiva)

Con riferimento alle fasi costruttive, i risultati di calcolo hanno fornito esito positivo. Pertanto non si determinano fessurazioni nel calcestruzzo di appesantimento durante le fasi di getto in seguito allo sviluppo del calore di idratazione e del fenomeno del ritiro. I risultati ottenuti per il concio preso in esame possono essere estesi anche agli altri conci che realizzano la diga di appesantimento.

Nell'analisi termica con riferimento al getto 6 con cunicolo nella zona centrale del getto, durante la fase di sviluppo del calore di idratazione è stata considerata cautelativamente una temperatura interna al cunicolo pari a 20°C dovuta al riscaldamento generato dal processo di idratazione. Il valore della temperatura interna al cunicolo potrà eventualmente essere corretta antropicamente ad esempio mediante getti di acqua calda nebulizzata all'interno del cunicolo per diminuire i gradiente termico. Tale aspetto sarà approfondito in fase esecutiva

## 5.12 VERIFICHE DELL'INTERFACCIA TRA DIGA ESISTENTE E GETTO DI APPESANTIMENTO

Quando due corpi in calcestruzzo sono gettati l'uno contro l'altro in momenti diversi ed il processo di maturazione di uno dei due corpi è ormai terminato, è necessario prendere in considerazione il trasferimento del carico attraverso la superficie di interfaccia. In condizioni di Stato Limite Ultimo, mentre i carichi di trazione devono essere trasferiti tramite le barre di connessione poste all'interfaccia, le forze di taglio con direzione parallela all'interfaccia, forze normali perpendicolari all'interfaccia o una combinazione di queste sono direttamente trasferiti dalla superficie di interfaccia tra calcestruzzo e calcestruzzo.

I principali contributi della resistenza a taglio totale risultano dai seguenti meccanismi:

- incastro meccanico (interlocking) e incollaggio
- effetto “dowel action” di barre poste all'interfaccia

Il meccanismo di trasferimento del carico sulla superficie di interfaccia è stato messo in conto in accordo alle formule riportate nel documento “*Model Code 2010- Volume 1 / Bulletin 65*”.

Nella comune pratica progettuale la rugosità superficiale del calcestruzzo all'interfaccia tra due superfici può essere classificata in 4 categorie:

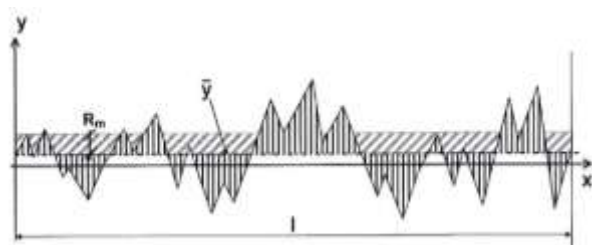
molto liscia:  $R_t$  : non misurabile (per esempio per getti contro casseforme in acciaio)

liscia:  $R_t < 1,5$  mm (superfici non trattate, leggermente irruvidite),

ruvide:  $R_t \geq 1,5$  mm (sabbiate, sabbiatura ad alta pressione),

molto ruvide:  $R_t \geq 3,0$  mm (getti di acqua ad alta pressione, superficie indentata).

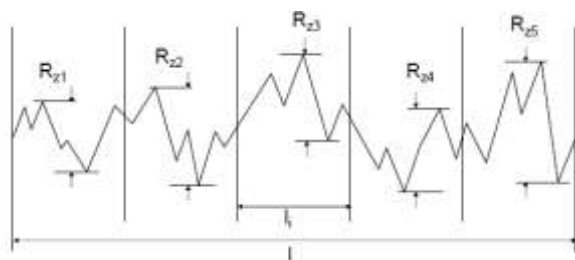
dove  $R_t$  rappresenta la rugosità della superficie calcolata in accordo a quanto esemplificativamente di seguito riportato:



Rugosità media  $R_m$

$$R_z = 1/5 \times \sum R_{zi}$$

$$R_t = R_z / 2 \text{ (parametro di rugosità)}$$



Altezza media da cima a valle

**Adesione per incollaggio , incastro meccanico (interlocking) e resistenza per attrito**

Una adeguata adesione per incollaggio e incastro meccanico si ottengono con misure appropriate quali superfici pulite, rugosità appropriata, buona qualità del calcestruzzo. Un valore rappresentativo per la resistenza a taglio media per calcestruzzi di resistenza inferiore a 50 MPa è di seguito riportata:

Interfaccia ruvida (sabbata) :  $\approx 1,5 - 2,5$  MPa

Interfaccia molto ruvida (getti di acqua ad alta pressione) :  $\approx 2,5 - 3,5$  MPa

Nel caso di forze di compressione perpendicolari alla superficie di interfaccia si può sviluppare un meccanismo di resistenza a taglio per attrito in funzione della rugosità della superficie. Di seguito si riportano dei valori indicativi del coefficiente di attrito all'interfaccia:

Interfaccia liscia :  $\mu = 0,5 - 0,7$

Interfaccia ruvida :  $\mu = 0,7 - 1,0$

Interfaccia molto ruvida :  $\mu = 1,0 - 1,4$

La seguente espressione permette di calcolare la resistenza a taglio considerando gli effetti di adesione per incollaggio, di incastro meccanico e della resistenza per attrito:

$$\tau_{Rdi} = (c_a \times f_{ctd}) + (\mu \times \sigma_n) \leq 0,5 \times v \times f_{cd}$$

dove:

$c_a$  : coefficiente del legame adesivo

$\mu$  : coefficiente di attrito

$\sigma_n$  : sforzo di compressione risultante da una eventuale forza agente in direzione normale all'interfaccia

$f_{ctd}$  : resistenza a trazione del calcestruzzo

$$v = 0,55 \times (30 / f_{ck})^{1/3} < 0,55$$

La tabella seguente fornisce i coefficienti per la resistenza dovuta all'adesione:

<b><i>Caratteristiche della superficie di interfaccia</i></b>	<b><i><math>c_a</math></i></b>
Molto ruvida ( $R_t \geq 3,0$ mm)	0,5

Ruvida ( $R_t \geq 1,5$ mm)	0,4
Liscia	0,2
Molto liscia	0,025

Mettendo in conto il contributo dovuto all'incollaggio delle superfici di interfaccia (considerate ruvide) e trascurando a favore di sicurezza lo sforzo di compressione eventualmente presente all'interfaccia come anche il contributo dovuto alle barre, lo sforzo resistente di taglio all'interfaccia risulta pari a:

$$\tau_{Rdi} = (c_a \times f_{ctd}) + (\mu \times \sigma_n) \leq 0,5 \times v \times f_{cd} = 0,4 \times 1,13 \text{ MPa} = 0,452 \text{ MPa}$$

### Effetto “Dowel Action” (effetto spinotto)

Le barre di connessione presenti all'interfaccia tra le superfici di calcestruzzo forniscono un ulteriore contributo resistente a taglio. L'effetto “Dowel Action” si riferisce alla resistenza a flessione delle barre che attraversano la superficie di interfaccia: un'azione di taglio lungo l'interfaccia determina uno spostamento laterale tra le estremità della barra producendo in tal modo sollecitazioni di flessione nelle barre che sono anche soggette a forze di trazione a causa dell'apertura del giunto.

Mettendo in conto il contributo delle barre di connessione all'interfaccia lo sforzo resistente a taglio può essere calcolato mediante la seguente espressione:

$$\tau_{Rdi} = c_r \times f_{ck}^{1/3} + \mu \times \sigma_n + k_1 \times \rho \times f_{yk} \times (\mu \times \sin \alpha + \cos \alpha) + k_2 \times \rho \times (f_{yd} \times f_{cd})^{0,5} \leq \beta_c \times v \times f_{cd}$$

dove:

$c_r$  : coefficiente dovuto all'effetto di interlock per superfici di interfaccia rugose

$k_1$  : coefficiente di interazione per forze di trazione attivate nella barre all'interfaccia

$k_2$  : coefficiente di interazione per resistenza a flessione

$\mu$  : coefficiente di attrito

$\rho$  : rapporto d'armatura ( $A_s/A_c$ )

$\sigma_n$  : sforzo di compressione risultante da una forza normale agente sulla superficie di interfaccia

$\alpha$  : inclinazione delle barre attraverso l'interfaccia

$\beta_c$  : coefficiente di resistenza di un puntone compresso

La tabella seguente riporta i coefficienti per diverse rugosità delle superfici:

Rugosità della superficie	$c_r$	$k_1$	$k_2$	$\beta_c$	$\mu$	
					$f_{ck} \geq 20 \text{ MPa}$	$f_{ck} \geq 35 \text{ MPa}$
<b>Molto ruvida (<math>R_t \geq 3,0 \text{ mm}</math>)</b>	0,2	0,5	0,9	0,5	0,8	1,0
<b>Ruvida (<math>R_t \geq 1,5 \text{ mm}</math>)</b>	0,1	0,5	0,9	0,5	0,7	
<b>Liscia</b>	0,0	0,5	1,1	0,4	0,6	
<b>Molto liscia</b>	0,0	0,0	1,5	0,3	0,5	

Mettendo in conto il contributo dovuto alle barre di ancoraggio (con superficie considerata ruvida) e trascurando a favore di sicurezza lo sforzo di compressione eventualmente presente all'interfaccia, lo sforzo resistente di taglio all'interfaccia risulta pari a:

$f_{ck} = 25,0 \text{ MPa}$  sforzo resistente caratteristico a compressione del calcestruzzo

$f_{cd} = 14,2 \text{ MPa}$  sforzo resistente di progetto a compressione del calcestruzzo

$\sigma_n = 0 \text{ MPa}$

$c_r = 0,1$  ;  $k_1 = 0,5$  ;  $k_2 = 0,9$  ;  $\beta_c = 0,5$

$f_{yk} = 450 \text{ MPa}$  resistenza di snervamento caratteristica dell'acciaio delle barre di connessione

$f_{yd} = 391 \text{ MPa}$  resistenza di snervamento di progetto dell'acciaio delle barre di connessione

$\mu = 0,7$  (superficie ruvida)

$\alpha = 90^\circ$

$v = 0,55 \times (30 / f_{ck})^{1/3} = 0,55 \times (30 / 25)^{1/3} = 0,58 < 0,55$  quindi  $v = 0,55$

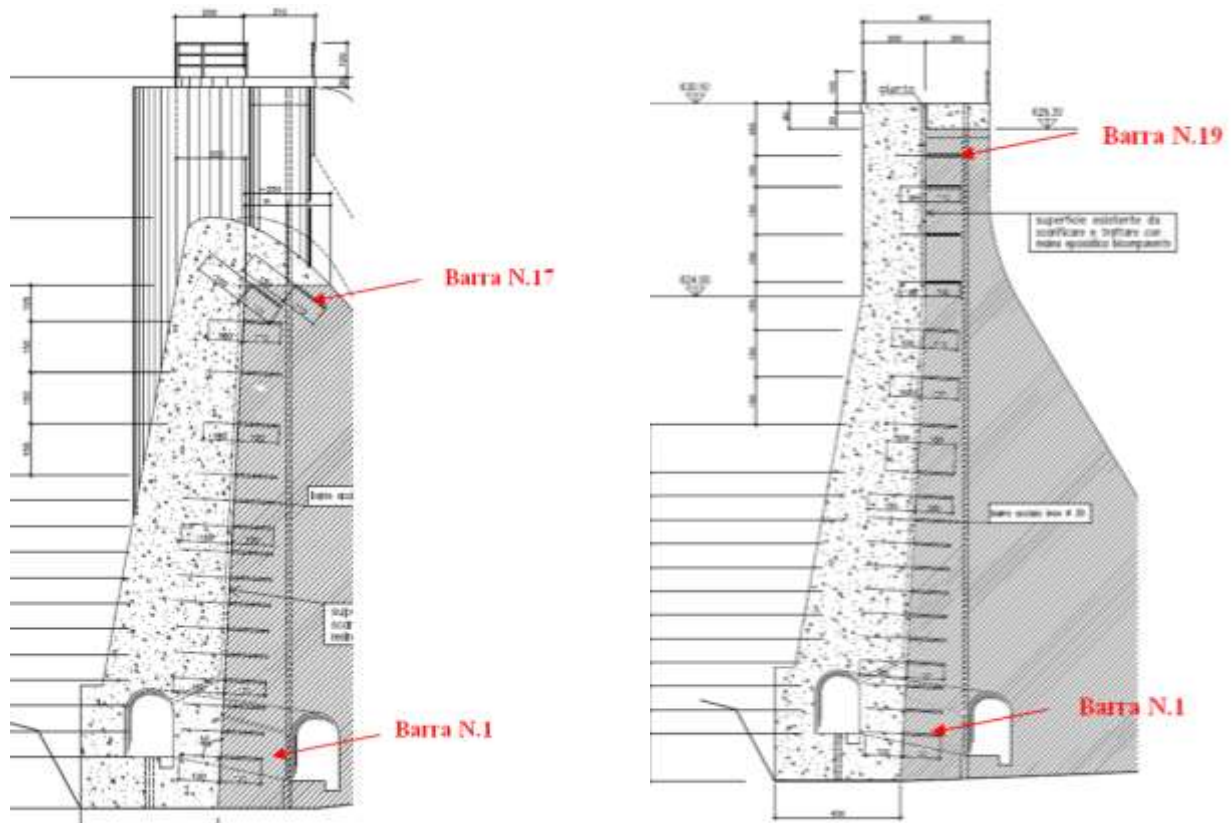
$\rho$  : rapporto d'armatura ( $A_s/A_c$ )

La seguente tabella riporta per ogni barra di connessione relativamente ad una sezione emergente e trascinabile il valore del rapporto geometrico d'armatura:

	Sezione trascinabile	Sezione emergente
Barre	$\rho = A_s/A_c$	$\rho = A_s/A_c$
Barra n.1	0,126 %	0,126 %
Barra n.2	0,126 %	0,126 %
Barra n.3	0,126 %	0,126 %
Barra n.4	0,126 %	0,126 %
Barra n.5	0,126 %	0,126 %
Barra n.6	0,126 %	0,126 %
Barra n.7	0,126 %	0,126 %

Barra n.8	0,063 %	0,063 %
Barra n.9	0,063 %	0,063 %
Barra n.10	0,063 %	0,063 %
Barra n.11	0,063 %	0,063 %
Barra n.12	0,042 %	0,042 %
Barra n.13	0,031 %	0,031 %
Barra n.14	0,031 %	0,031 %
Barra n.15	0,031 %	0,031 %
Barra n.16	0,031 %	0,031 %
Barra n.17	0,031 %	0,031 %
Barra n.18	---	0,037
Barra n.19	---	0,035

L'immagine seguente indica la posizione delle barre all'interfaccia per la sezione trascinabile e la sezione emergente:



Ubicazione barre di interfaccia per la sezione trascinabile e la sezione emergente

## 5.12.1 Verifiche dell'interfaccia in fase di esercizio della diga

Le tabelle seguenti riassumono le verifiche degli sforzi di taglio all'interfaccia tra getto nuovo e getto esistente per le combinazioni di carico più gravose e considerando la sezione emergente e la sezione tracimabile della diga. In corrispondenza della superficie di interfaccia vengono realizzati dreni nel corpo diga che permettono di eliminare eventuali spinte idrauliche dovute a possibili infiltrazioni. In allegato sono riportati i grafici di dettaglio degli sforzi sollecitanti l'interfaccia per le combinazioni di carico più significative:

<b>Concio A – Sezione tracimabile</b>			
<b>Combinazione SLU : <math>1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3</math> (Fondamentale – senza carico termico stagionale)</b>			
<b>Barre</b>	<b><math>\tau_{sd}</math> (MPa)</b>	<b><math>\tau_{Rd}</math> (MPa)</b>	<b>Esito verifica</b>
<b>Barra n.1</b>	$\approx 0,07$ MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.2</b>	$\approx 0,08$ MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.3</b>	$\approx 0,08$ MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.4</b>	$\approx 0,07$ MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.5</b>	$\approx 0,04$ MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.6</b>	$\approx 0,02$ MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.7</b>	$\approx 0,01$ MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.8</b>	$\approx 0,01$ MPa	0,43 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.9</b>	$\approx 0,01$ MPa	0,43 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.10</b>	$\approx 0,01$ MPa	0,43 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.11</b>	$\approx 0,01$ MPa	0,43 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.12</b>	$\approx 0,01$ MPa	0,39 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.13</b>	$\approx 0,01$ MPa	0,36 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.14</b>	$\approx 0,01$ MPa	0,36 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.15</b>	$\approx 0,01$ MPa	0,36 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.16</b>	$\approx 0,02$ MPa	0,36 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.17</b>	$\approx 0,02$ MPa	0,36 MPa	Verifica positiva
<b>Combinazione SLU : <math>1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3 + 1,5 \times Q_{1, inverno}</math> (Fondamentale inverno)</b>			
<b>Barre</b>	<b><math>\tau_{sd}</math> (MPa)</b>	<b><math>\tau_{Rd}</math> (MPa)</b>	<b>Esito verifica</b>
<b>Barra n.1</b>	$\approx 0,06$ MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.2</b>	$\approx 0,06$ MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.3</b>	$\approx 0,04$ MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.4</b>	$\approx 0,02$ MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.5</b>	$\approx 0,03$ MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.6</b>	$\approx 0,04$ MPa	0,58 MPa	Verifica positiva



<b>Barra n.7</b>	≈ 0,05 MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.8</b>	≈ 0,05 MPa	0,43 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.9</b>	≈ 0,04 MPa	0,43 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.10</b>	≈ 0,03 MPa	0,43 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.11</b>	≈ 0,02 MPa	0,43 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.12</b>	≈ 0,04 MPa	0,39 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.13</b>	≈ 0,04 MPa	0,36 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.14</b>	≈ 0,05 MPa	0,36 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.15</b>	≈ 0,05 MPa	0,36 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.16</b>	≈ 0,04 MPa	0,36 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.17</b>	≈ 0,04 MPa	0,36 MPa	Verifica positiva
<b>Combinazione SLU : <math>G1+G3+A+0,5 \times Q1</math>, inverno (Eccezionale inverno)</b>			
<b>Barre</b>	<b><math>\tau_{sd}</math> (MPa)</b>	<b><math>\tau_{Rd}</math> (MPa)</b>	<b>Esito verifica</b>
<b>Barra n.1</b>	≈0,08 MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.2</b>	≈0,07 MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.3</b>	≈0,06 MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.4</b>	≈0,05 MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.5</b>	≈0,02 MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.6</b>	≈0,02 MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.7</b>	≈0,02 MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.8</b>	≈0,01 MPa	0,43 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.9</b>	≈0,01 MPa	0,43 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.10</b>	≈0,02 MPa	0,43 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.11</b>	≈0,02 MPa	0,43 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.12</b>	≈0,04 MPa	0,39 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.13</b>	≈0,04 MPa	0,36 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.14</b>	≈0,03 MPa	0,36 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.15</b>	≈0,03 MPa	0,36 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.16</b>	≈0,04 MPa	0,36 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.17</b>	≈0,04 MPa	0,36 MPa	Verifica positiva
<b>Combinazione sismica SLU : <math>G1+G3+Ex, SLC+0,3Ez, SLC + Ix, SLC +0,5 \times Q1</math>, inverno (Sismica SLC inverno)</b>			
<b>Barre</b>	<b><math>\tau_{sd}</math> (MPa)</b>	<b><math>\tau_{Rd}</math> (MPa)</b>	<b>Esito verifica</b>
<b>Barra n.1</b>	≈0,10 MPa	0,58 MPa	Verifica positiva

<b>Barra n.2</b>	≈0,09 MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.3</b>	≈0,08 MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.4</b>	≈0,06 MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.5</b>	≈0,02 MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.6</b>	≈0,01 MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.7</b>	≈0,01 MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.8</b>	≈0,01 MPa	0,43 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.9</b>	≈0,01 MPa	0,43 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.10</b>	≈0,03 MPa	0,43 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.11</b>	≈0,03 MPa	0,43 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.12</b>	≈0,05 MPa	0,39 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.13</b>	≈0,05 MPa	0,36 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.14</b>	≈0,05 MPa	0,36 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.15</b>	≈0,04 MPa	0,36 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.16</b>	≈0,04 MPa	0,36 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.17</b>	≈0,04 MPa	0,36 MPa	Verifica positiva
<b>Combinazione sismica SLU : <math>G1+G3+Ex,SLV+0,3Ez,SLV + Ix,SLV +0,5\times Q1,inverno</math> (Sismica SLV inverno)</b>			
<b>Barre</b>	<b><math>\tau_{sd}</math> (MPa)</b>	<b><math>\tau_{Rd}</math> (MPa)</b>	<b>Esito verifica</b>
<b>Barra n.1</b>	≈0,09 MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.2</b>	≈0,08 MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.3</b>	≈0,07 MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.4</b>	≈0,04 MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.5</b>	≈0,02 MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.6</b>	≈0,01 MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.7</b>	≈0,01 MPa	0,58 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.8</b>	≈0,01 MPa	0,43 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.9</b>	≈0,01 MPa	0,43 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.10</b>	≈0,02 MPa	0,43 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.11</b>	≈0,03 MPa	0,43 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.12</b>	≈0,04 MPa	0,39 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.13</b>	≈0,04 MPa	0,36 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.14</b>	≈0,05 MPa	0,36 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.15</b>	≈0,03 MPa	0,36 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.16</b>	≈0,03 MPa	0,36 MPa	Verifica positiva
<b>Barra n.17</b>	≈0,03 MPa	0,36 MPa	Verifica positiva

dove:

 $\tau_{sd}$  (MPa) : sforzo di taglio sollecitante l'interfaccia tra le superfici del nuovo getto e diga esistente $\tau_{Rd}$  (MPa) : sforzo resistente all'interfaccia tra le superfici del nuovo getto e diga esistente

<b>Concio B – Sezione emergente</b>			
<b>Combinazione SLU : <math>1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3</math> (Fondamentale – senza carico termico stagionale)</b>			
<b>Barre</b>	<b><math>\tau_{sd}</math> (MPa)</b>	<b><math>\tau_{Rd}</math> (MPa)</b>	<b>Esito verifica</b>
Barra n.1	≈ 0,07 MPa	0,58	Verifica positiva
Barra n.2	≈ 0,09 MPa	0,58	Verifica positiva
Barra n.3	≈ 0,09 MPa	0,58	Verifica positiva
Barra n.4	≈ 0,07 MPa	0,58	Verifica positiva
Barra n.5	≈ 0,04 MPa	0,58	Verifica positiva
Barra n.6	≈ 0,01 MPa	0,58	Verifica positiva
Barra n.7	≈ 0,01 MPa	0,58	Verifica positiva
Barra n.8	≈ 0,01 MPa	0,43	Verifica positiva
Barra n.9	≈ 0,01 MPa	0,43	Verifica positiva
Barra n.10	≈ 0,01 MPa	0,43	Verifica positiva
Barra n.11	≈ 0,01 MPa	0,43	Verifica positiva
Barra n.12	≈ 0,01 MPa	0,39	Verifica positiva
Barra n.13	≈ 0,01 MPa	0,36	Verifica positiva
Barra n.14	≈ 0,01 MPa	0,36	Verifica positiva
Barra n.15	≈ 0,01 MPa	0,36	Verifica positiva
Barra n.16	≈ 0,01 MPa	0,36	Verifica positiva
Barra n.17	≈ 0,01 MPa	0,36	Verifica positiva
Barra n.18	≈ 0,00 MPa	0,38	Verifica positiva
Barra n.19	≈ 0,00 MPa	0,37	Verifica positiva
<b>Combinazione SLU : <math>1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3 + 1,5 \times Q_{1,inverno}</math> (Fondamentale inverno)</b>			
<b>Barre</b>	<b><math>\tau_{sd}</math> (MPa)</b>	<b><math>\tau_{Rd}</math> (MPa)</b>	<b>Esito verifica</b>
Barra n.1	≈ 0,07 MPa	0,58	Verifica positiva
Barra n.2	≈ 0,06 MPa	0,58	Verifica positiva
Barra n.3	≈ 0,05 MPa	0,58	Verifica positiva
Barra n.4	≈ 0,03 MPa	0,58	Verifica positiva
Barra n.5	≈ 0,03 MPa	0,58	Verifica positiva
Barra n.6	≈ 0,04 MPa	0,58	Verifica positiva

<b>Concio B – Sezione emergente</b>			
<b>Barra n.7</b>	≈ 0,04 MPa	0,58	Verifica positiva
<b>Barra n.8</b>	≈ 0,04 MPa	0,43	Verifica positiva
<b>Barra n.9</b>	≈ 0,04 MPa	0,43	Verifica positiva
<b>Barra n.10</b>	≈ 0,03 MPa	0,43	Verifica positiva
<b>Barra n.11</b>	≈ 0,03 MPa	0,43	Verifica positiva
<b>Barra n.12</b>	≈ 0,03 MPa	0,39	Verifica positiva
<b>Barra n.13</b>	≈ 0,03 MPa	0,36	Verifica positiva
<b>Barra n.14</b>	≈ 0,03 MPa	0,36	Verifica positiva
<b>Barra n.15</b>	≈ 0,03 MPa	0,36	Verifica positiva
<b>Barra n.16</b>	≈ 0,03 MPa	0,36	Verifica positiva
<b>Barra n.17</b>	≈ 0,03 MPa	0,36	Verifica positiva
<b>Barra n.18</b>	≈ 0,2 MPa	0,38	Verifica positiva
<b>Barra n.19</b>	≈ 0,02 MPa	0,37	Verifica positiva
<b>Combinazione SLU : G1+G3+A+0,5×Q1,inverno (Eccezionale inverno)</b>			
<b>Barre</b>	<b><math>\tau_{sd}</math> (MPa)</b>	<b><math>\tau_{Rd}</math> (MPa)</b>	<b>Esito verifica</b>
<b>Barra n.1</b>	≈0,09 MPa	0,58	Verifica positiva
<b>Barra n.2</b>	≈0,08 MPa	0,58	Verifica positiva
<b>Barra n.3</b>	≈0,05 MPa	0,58	Verifica positiva
<b>Barra n.4</b>	≈0,04 MPa	0,58	Verifica positiva
<b>Barra n.5</b>	≈0,02 MPa	0,58	Verifica positiva
<b>Barra n.6</b>	≈0,02 MPa	0,58	Verifica positiva
<b>Barra n.7</b>	≈0,02 MPa	0,58	Verifica positiva
<b>Barra n.8</b>	≈0,01 MPa	0,43	Verifica positiva
<b>Barra n.9</b>	≈0,01 MPa	0,43	Verifica positiva
<b>Barra n.10</b>	≈0,02 MPa	0,43	Verifica positiva
<b>Barra n.11</b>	≈0,03 MPa	0,43	Verifica positiva
<b>Barra n.12</b>	≈0,03 MPa	0,39	Verifica positiva
<b>Barra n.13</b>	≈0,03 MPa	0,36	Verifica positiva
<b>Barra n.14</b>	≈0,03 MPa	0,36	Verifica positiva
<b>Barra n.15</b>	≈0,03 MPa	0,36	Verifica positiva
<b>Barra n.16</b>	≈0,02 MPa	0,36	Verifica positiva
<b>Barra n.17</b>	≈0,02 MPa	0,36	Verifica positiva
<b>Barra n.18</b>	≈0,02 MPa	0,38	Verifica positiva
<b>Barra n.19</b>	≈0,02 MPa	0,37	Verifica positiva

<b>Concio B – Sezione emergente</b>			
<b>Combinazione sismica SLU : G1+G3+Ex,SLC+0,3Ez,SLC + Ix,SLC +0,5×Q1,inverno (Sismica SLC inverno)</b>			
<b>Barre</b>	<b><math>\tau_{sd}</math> (MPa)</b>	<b><math>\tau_{Rd}</math> (MPa)</b>	<b>Esito verifica</b>
<b>Barra n.1</b>	≈0,11 MPa	0,58	Verifica positiva
<b>Barra n.2</b>	≈0,010 MPa	0,58	Verifica positiva
<b>Barra n.3</b>	≈0,09 MPa	0,58	Verifica positiva
<b>Barra n.4</b>	≈0,07 MPa	0,58	Verifica positiva
<b>Barra n.5</b>	≈0,03 MPa	0,58	Verifica positiva
<b>Barra n.6</b>	≈0,02 MPa	0,58	Verifica positiva
<b>Barra n.7</b>	≈0,02 MPa	0,58	Verifica positiva
<b>Barra n.8</b>	≈0,02 MPa	0,43	Verifica positiva
<b>Barra n.9</b>	≈0,02 MPa	0,43	Verifica positiva
<b>Barra n.10</b>	≈0,03 MPa	0,43	Verifica positiva
<b>Barra n.11</b>	≈0,04 MPa	0,43	Verifica positiva
<b>Barra n.12</b>	≈0,04 MPa	0,39	Verifica positiva
<b>Barra n.13</b>	≈0,04 MPa	0,36	Verifica positiva
<b>Barra n.14</b>	≈0,04 MPa	0,36	Verifica positiva
<b>Barra n.15</b>	≈0,04 MPa	0,36	Verifica positiva
<b>Barra n.16</b>	≈0,03 MPa	0,36	Verifica positiva
<b>Barra n.17</b>	≈0,03 MPa	0,36	Verifica positiva
<b>Barra n.18</b>	≈0,03 MPa	0,38	Verifica positiva
<b>Barra n.19</b>	≈0,03 MPa	0,37	Verifica positiva
<b>Combinazione sismica SLU : G1+G3+Ex,SLV+0,3Ez,SLV + Ix,SLV +0,5×Q1,inverno (Sismica SLV inverno)</b>			
<b>Barre</b>	<b><math>\tau_{sd}</math> (MPa)</b>	<b><math>\tau_{Rd}</math> (MPa)</b>	<b>Esito verifica</b>
<b>Barra n.1</b>	≈0,10 MPa	0,58	Verifica positiva
<b>Barra n.2</b>	≈0,09 MPa	0,58	Verifica positiva
<b>Barra n.3</b>	≈0,07 MPa	0,58	Verifica positiva
<b>Barra n.4</b>	≈0,05 MPa	0,58	Verifica positiva
<b>Barra n.5</b>	≈0,02 MPa	0,58	Verifica positiva
<b>Barra n.6</b>	≈0,02 MPa	0,58	Verifica positiva
<b>Barra n.7</b>	≈0,02 MPa	0,58	Verifica positiva
<b>Barra n.8</b>	≈0,02 MPa	0,43	Verifica positiva

<b>Concio B – Sezione emergente</b>			
<b>Barra n.9</b>	$\approx 0,01$ MPa	0,43	Verifica positiva
<b>Barra n.10</b>	$\approx 0,02$ MPa	0,43	Verifica positiva
<b>Barra n.11</b>	$\approx 0,02$ MPa	0,43	Verifica positiva
<b>Barra n.12</b>	$\approx 0,02$ MPa	0,39	Verifica positiva
<b>Barra n.13</b>	$\approx 0,01$ MPa	0,36	Verifica positiva
<b>Barra n.14</b>	$\approx 0,01$ MPa	0,36	Verifica positiva
<b>Barra n.15</b>	$\approx 0,01$ MPa	0,36	Verifica positiva
<b>Barra n.16</b>	$\approx 0,01$ MPa	0,36	Verifica positiva
<b>Barra n.17</b>	$\approx 0,01$ MPa	0,36	Verifica positiva
<b>Barra n.18</b>	$\approx 0,01$ MPa	0,38	Verifica positiva
<b>Barra n.19</b>	$\approx 0,01$ MPa	0,37	Verifica positiva

dove:

$\tau_{sd}$  (MPa) : sforzo di taglio sollecitante l'interfaccia tra le superfici del nuovo getto e diga esistente

$\tau_{Rd}$  (MPa) : sforzo resistente all'interfaccia tra le superfici del nuovo getto e diga esistente

La tabella seguente riassume le verifiche degli sforzi agenti in direzione normale all'interfaccia tra getto nuovo e getto esistente per le combinazioni di carico più gravose. Nell'ipotesi di progetto è previsto che le azioni di trazione siano totalmente assorbite dall'acciaio delle barre di connessione presenti all'interfaccia. In allegato sono riportati i grafici di dettaglio degli sforzi sollecitanti l'interfaccia per le combinazioni di carico più significative:

<b>Concio A – Sezione trascinabile</b>					
<b>Combinazione SLU : 1,3×G1+1,5×G2+1,5×G3 (senza carico termico stagionale)</b>					
<b>Barre</b>	<b><math>\sigma_{sd}</math> (MPa) compressione</b>	<b><math>N_{sd}</math> (kN) trazione</b>	<b><math>\sigma_{Rd}</math> (MPa) compressione</b>	<b><math>N_{Rd}</math> (kN)</b>	<b>Esito verifica</b>
<b>Barra n.1</b>	$\approx -0,08$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.2</b>	$\approx -0,09$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.3</b>	$\approx -0,09$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.4</b>	$\approx -0,14$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.5</b>	$\approx -0,17$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.6</b>	$\approx -0,16$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.7</b>	$\approx -0,16$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.8</b>	$\approx -0,15$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.9</b>	$\approx -0,14$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.10</b>	$\approx -0,13$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.11</b>	$\approx -0,12$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.12</b>	$\approx -0,10$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva

<i>Concio A – Sezione trascinabile</i>					
<b>Barra n.13</b>	≈ -0,10 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.14</b>	≈ -0,09 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.15</b>	≈ -0,07 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.16</b>	≈ -0,06 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.17</b>	≈ -0,06MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<i>Combinazione SLU : 1,3×G1+1,5×G2+1,5×G3 +1,5×Q<sub>1,inverno</sub> (Fondamentale inverno)</i>					
<i>Barre</i>	<i>σsd (MPa) compressione</i>	<i>Nsd (kN) trazione</i>	<i>σRd (MPa) compressione</i>	<i>NRd (kN)</i>	<i>Esito verifica</i>
<b>Barra n.1</b>	-	≈ 75 kN	-	276 kN	Verifica positiva
<b>Barra n.2</b>	≈ -0,07 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.3</b>	≈ -0,09 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.4</b>	≈ -0,12 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.5</b>	≈ -0,19 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.6</b>	≈ -0,20 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.7</b>	≈ -0,20 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.8</b>	≈ -0,21 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.9</b>	≈ -0,20 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.10</b>	≈ -0,19 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.11</b>	≈ -0,18 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.12</b>	≈ -0,17 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.13</b>	≈ -0,14 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.14</b>	≈ -0,08 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.15</b>	≈ -0,06 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.16</b>	≈ -0,06 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.17</b>	≈ -0,06 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<i>Combinazione SLU : G1+G3+A+0,5×Q<sub>1,inverno</sub> (Eccezionale inverno)</i>					
<i>Barre</i>	<i>σsd (MPa) compressione</i>	<i>Nsd (kN) trazione</i>	<i>σRd (MPa) compressione</i>	<i>NRd (kN)</i>	<i>Esito verifica</i>
<b>Barra n.1</b>	-	13,5 kN	-	276 kN	Verifica positiva
<b>Barra n.2</b>	≈ -0,06 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.3</b>	≈ -0,07 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.4</b>	≈ -0,11 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.5</b>	≈ -0,17 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva

<i>Concio A – Sezione trascinabile</i>					
<b>Barra n.6</b>	≈ -0,16 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.7</b>	≈ -0,16 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.8</b>	≈ -0,16 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.9</b>	≈ -0,16 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.10</b>	≈ -0,15 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.11</b>	≈ -0,14 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.12</b>	≈ -0,13 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.13</b>	≈ -0,12 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.14</b>	≈ -0,09 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.15</b>	≈ -0,08 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.16</b>	≈ -0,06 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.17</b>	≈ -0,06 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<i>Combinazione sismica SLU : G1+G3+Ex,SLC+0,3Ez,SLC + Ix,SLC +0,5×Q1,inverno (Sismica SLC inverno)</i>					
<i>Barre</i>	<i>σsd (MPa) compressione</i>	<i>Nsd (kN) trazione</i>	<i>σRd (MPa) compressione</i>	<i>NRd (kN)</i>	<i>Esito verifica</i>
<b>Barra n.1</b>	-	13,5 kN	-	276 kN	Verifica positiva
<b>Barra n.2</b>	≈ -0,03 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.3</b>	≈ -0,04 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.4</b>	≈ -0,12 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.5</b>	≈ -0,17 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.6</b>	≈ -0,17 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.7</b>	≈ -0,16 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.8</b>	≈ -0,16 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.9</b>	≈ -0,16 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.10</b>	≈ -0,15 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.11</b>	≈ -0,13 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.12</b>	≈ -0,12 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.13</b>	≈ -0,10 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.14</b>	≈ -0,08 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.15</b>	≈ -0,08 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.16</b>	≈ -0,06 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.17</b>	≈ -0,06 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva



<b>Concio A – Sezione trascinabile</b>					
<b>Combinazione sismica SLU : <math>G1+G3+Ex,SLV+0,3Ez,SLV + Ix,SLV +0,5\times Q1</math>, inverno (Sismica SLV inverno)</b>					
<b>Barre</b>	<b><math>\sigma_{sd}</math> (MPa) compressione</b>	<b><math>N_{sd}</math> (kN) trazione</b>	<b><math>\sigma_{Rd}</math> (MPa) compressione</b>	<b><math>NRd</math> (kN)</b>	<b>Esito verifica</b>
<b>Barra n.1</b>	-	13,5 kN	-	276 kN	Verifica positiva
<b>Barra n.2</b>	$\approx -0,03$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.3</b>	$\approx -0,03$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.4</b>	$\approx -0,11$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.5</b>	$\approx -0,16$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.6</b>	$\approx -0,16$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.7</b>	$\approx -0,16$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.8</b>	$\approx -0,16$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.9</b>	$\approx -0,16$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.10</b>	$\approx -0,14$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.11</b>	$\approx -0,13$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.12</b>	$\approx -0,12$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.13</b>	$\approx -0,10$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.14</b>	$\approx -0,08$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.15</b>	$\approx -0,07$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.16</b>	$\approx -0,06$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.17</b>	$\approx -0,05$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva

dove:

$\sigma_{sd}$  (MPa) : sforzo di compressione agente in direzione perpendicolare alla superficie di interfaccia tra getto nuovo e diga esistente

$\sigma_{Rd}$  (MPa) : sforzo resistente di compressione del calcestruzzo

$N_{sd}$  (kN) : carico di trazione agente in direzione perpendicolare alla superficie di interfaccia. Il carico è stato calcolato integrando gli sforzi di trazione agenti perpendicolari alla superficie

$NRd$  (kN) : azione massima resistente a trazione della barra d'interfaccia calcolata considerando l'acciaio della barra snervato

<b>Concio B – Sezione Emergente</b>					
<b>Combinazione SLU : <math>1,3\times G1+1,5\times G2+1,5\times G3</math> (senza carico termico stagionale)</b>					
<b>Barre</b>	<b><math>\sigma_{sd}</math> (MPa) compressione</b>	<b><math>N_{sd}</math> (kN) trazione</b>	<b><math>\sigma_{Rd}</math> (MPa) compressione</b>	<b><math>NRd</math> (kN)</b>	<b>Esito verifica</b>

<b>Concio B – Sezione Emergente</b>					
<b>Barra n.1</b>	≈ -0,06 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.2</b>	≈ -0,09 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.3</b>	≈ -0,12 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.4</b>	≈ -0,15 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.5</b>	≈ -0,16 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.6</b>	≈ -0,16 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.7</b>	≈ -0,16 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.8</b>	≈ -0,15 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.9</b>	≈ -0,14 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.10</b>	≈ -0,13 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.11</b>	≈ -0,12 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.12</b>	≈ -0,10 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.13</b>	≈ -0,10 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.14</b>	≈ -0,09 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.15</b>	≈ -0,06 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.16</b>	≈ -0,05 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.17</b>	≈ -0,03MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.18</b>	≈ -0,01MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.19</b>	≈ -0,00 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Combinazione SLU : <math>1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3 + 1,5 \times Q_{1, inverno}</math> (Fondamentale inverno)</b>					
<b>Barre</b>	<b><math>\sigma_{sd}</math> (MPa) compressione</b>	<b><math>N_{sd}</math> (kN) trazione</b>	<b><math>\sigma_{Rd}</math> (MPa) compressione</b>	<b><math>NRd</math> (kN)</b>	<b>Esito verifica</b>
<b>Barra n.1</b>	-	≈ 75 kN	-	276 kN	Verifica positiva
<b>Barra n.2</b>	≈ -0,07 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.3</b>	≈ -0,10 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.4</b>	≈ -0,15 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.5</b>	≈ -0,19 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.6</b>	≈ -0,19 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.7</b>	≈ -0,19 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.8</b>	≈ -0,19 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.9</b>	≈ -0,19 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.10</b>	≈ -0,17 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.11</b>	≈ -0,16 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.12</b>	≈ -0,14 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva

<b>Concio B – Sezione Emergente</b>					
<b>Barra n.13</b>	≈ -0,12 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.14</b>	≈ -0,09 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.15</b>	≈ -0,07 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.16</b>	≈ -0,06 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.17</b>	≈ -0,05 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.18</b>	≈ -0,03MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.19</b>	≈ -0,01MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Combinazione SLU : G1+G3+A+0,5×Q1,inverno (Eccezionale inverno)</b>					
<b>Barre</b>	<b><math>\sigma_{sd}</math> (MPa) compressione</b>	<b>Nsd (kN) trazione</b>	<b><math>\sigma_{Rd}</math> (MPa) compressione</b>	<b>NRd (kN)</b>	<b>Esito verifica</b>
<b>Barra n.1</b>	-	13,5 kN	-	276 kN	Verifica positiva
<b>Barra n.2</b>	≈ -0,06 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.3</b>	≈ -0,10 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.4</b>	≈ -0,16 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.5</b>	≈ -0,17 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.6</b>	≈ -0,17 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.7</b>	≈ -0,16 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.8</b>	≈ -0,16 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.9</b>	≈ -0,16 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.10</b>	≈ -0,15 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.11</b>	≈ -0,14 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.12</b>	≈ -0,12 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.13</b>	≈ -0,10 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.14</b>	≈ -0,09 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.15</b>	≈ -0,08 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.16</b>	≈ -0,06 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.17</b>	≈ -0,04 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.18</b>	≈ -0,02 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.19</b>	≈ -0,00 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Combinazione sismica SLU : G1+G3+Ex,SLC+0,3Ez,SLC + Ix,SLC +0,5×Q1,inverno (Sismica SLC inverno)</b>					
<b>Barre</b>	<b><math>\sigma_{sd}</math> (MPa) compressione</b>	<b>Nsd (kN) trazione</b>	<b><math>\sigma_{Rd}</math> (MPa) compressione</b>	<b>NRd (kN)</b>	<b>Esito verifica</b>

<b>Concio B – Sezione Emergente</b>					
<b>Barra n.1</b>	-	13,5 kN	-	276 kN	Verifica positiva
<b>Barra n.2</b>	≈ -0,03 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.3</b>	≈ -0,04 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.4</b>	≈ -0,15 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.5</b>	≈ -0,16 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.6</b>	≈ -0,16 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.7</b>	≈ -0,16 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.8</b>	≈ -0,16 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.9</b>	≈ -0,15 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.10</b>	≈ -0,14 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.11</b>	≈ -0,12 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.12</b>	≈ -0,10 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.13</b>	≈ -0,10 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.14</b>	≈ -0,09 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.15</b>	≈ -0,08 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.16</b>	≈ -0,07 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.17</b>	≈ -0,04 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.18</b>	≈ -0,02 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.19</b>	≈ -0,00 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Combinazione sismica SLU : <math>G1+G3+Ex,SLV+0,3Ez,SLV + Ix,SLV +0,5 \times Q1</math>,inverno (Sismica SLV inverno)</b>					
<b>Barre</b>	<b><math>\sigma_{sd}</math> (MPa) compressione</b>	<b><math>N_{sd}</math> (kN) trazione</b>	<b><math>\sigma_{Rd}</math> (MPa) compressione</b>	<b><math>NRd</math> (kN)</b>	<b>Esito verifica</b>
<b>Barra n.1</b>	-	13,5 kN	-	276 kN	Verifica positiva
<b>Barra n.2</b>	≈ -0,04 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.3</b>	≈ -0,05 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.4</b>	≈ -0,13 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.5</b>	≈ -0,14 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.6</b>	≈ -0,14 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.7</b>	≈ -0,14 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.8</b>	≈ -0,14 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.9</b>	≈ -0,14 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.10</b>	≈ -0,13 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.11</b>	≈ -0,11 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.12</b>	≈ -0,09 MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva

<b>Concio B – Sezione Emergente</b>					
<b>Barra n.13</b>	$\approx -0,08$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.14</b>	$\approx -0,07$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.15</b>	$\approx -0,06$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.16</b>	$\approx -0,04$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.17</b>	$\approx -0,03$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.18</b>	$\approx -0,01$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva
<b>Barra n.19</b>	$\approx -0,00$ MPa	-	-14,2 MPa	-	Verifica positiva

dove:

$\sigma_{sd}$  (MPa) : sforzo di compressione agente in direzione perpendicolare alla superficie di interfaccia tra getto nuovo e diga esistente

$\sigma_{Rd}$  (MPa) : sforzo resistente di compressione del calcestruzzo

$N_{sd}$  (kN) : carico di trazione agente in direzione perpendicolare alla superficie di interfaccia. Il carico è stato calcolato integrando gli sforzi di trazione agenti perpendicolari alla superficie

$N_{Rd}$  (kN) : azione massima resistente a trazione della barra d'interfaccia calcolata considerando l'acciaio della barra snervato

### 5.12.2 Verifiche dell'interfaccia in fase di getto

La tabella seguente riassume, per le diverse fasi di getto, l'esito delle verifiche degli sforzi di taglio all'interfaccia tra getto nuovo e getto esistente. Nel periodo iniziale, l'innalzamento termico provocato dall'idratazione, non produce tensioni di rilievo all'interno del calcestruzzo giacché il modulo elastico è ancora basso e le sollecitazioni sono compensate dalle deformazioni plastiche, inoltre in tale fase l'intero peso del getto è direttamente trasmesso al concio sottostante senza sollecitare l'interfaccia.

<b>Fase iniziale di getto</b>				
<b>Getto</b>	<b>Barre</b>	<b><math>T_{sd,max}</math> (MPa)</b>	<b><math>\tau_{Rd}</math> (MPa)</b>	<b>Esito verifica</b>
<b>Getto 1</b>	---	0,14 MPa	0,29	Verifica positiva
<b>Getto 6</b>	<b>Barra n.1</b>	0,10 MPa	0,58	Verifica positiva
	<b>Barra n.2</b>		0,58	Verifica positiva
	<b>Barra n.3</b>		0,58	Verifica positiva
<b>Getto 12</b>	<b>Barra n.4</b>	0,14 MPa	0,58	Verifica positiva
	<b>Barra n.5</b>		0,58	Verifica positiva
	<b>Barra n.6</b>		0,58	Verifica positiva
<b>Getto 18</b>	<b>Barra n.7</b>	0,20 MPa	0,58	Verifica positiva
	<b>Barra n.8</b>		0,43	Verifica positiva

	<b>Barra n.9</b>		0,43	Verifica positiva
<b>Getto 24</b>	<b>Barra n.10</b>	0,20 MPa	0,43	Verifica positiva
	<b>Barra n.11</b>		0,43	Verifica positiva
<b>Getto 30</b>	<b>Barra n.12</b>	0,20 MPa	0,39	Verifica positiva
	<b>Barra n.13</b>		0,36	Verifica positiva
<b>Getto 36</b>	<b>Barra n.14</b>	0,15 MPa	0,36	Verifica positiva
<b>Getto 42</b>	<b>Barra n.15</b>	0,10 MPa	0,36	Verifica positiva
<b>Getto 48</b>	<b>Barra n.16</b>	0,10 MPa	0,36	Verifica positiva
	<b>Barra n.17</b>		0,36	Verifica positiva
<b>Getto 56</b>	<b>Barra n.18</b>	0,10 MPa	0,38	Verifica positiva
<b>Getto 61</b>	<b>Barra n.19</b>	0,11 MPa	0,37	Verifica positiva

Durante le fasi iniziali del getto (2-3 giorni), il processo di idratazione determina un innalzamento termico con espansione del calcestruzzo in particolare in direzione verso monte e superiormente. In tale fase iniziale non si sviluppano tensioni di rilievo all'interno del calcestruzzo e all'interfaccia giacché il modulo elastico è ancora basso e le sollecitazioni sono compensate dalle deformazioni plastiche. L'intero peso del getto è direttamente trasmesso al concio sottostante senza sollecitare l'interfaccia tra getto nuovo e getto esistente. Con il progredire del processo di maturazione, il calcestruzzo inizia a raffreddarsi e lo sforzo massimo di trazione all'interfaccia in corrispondenza della barra più sollecitata risulta pari a circa  $\sigma_{sd} = 0,25$  MPa e determina un carico massimo di trazione sulla barra pari a:

$N_{sd} = \sigma_{sd} \times A_{inf} = 0,25 \text{ MPa} \times 5,625 \times 10^5 \text{ mm}^2 = 140 \text{ kN}$  (carico di trazione agente sulla barra più sollecitata)

La barra può resistere ad un carico di trazione massimo  $N_{rd}$  pari a :

$N_{rd} = f_{yd} \times A_s = 391 \text{ MPa} \times 707 \text{ mm}^2 = 276 \text{ kN}$

Pertanto la verifica risulta soddisfatta in quanto  $N_{sd} = 140 \text{ kN} < N_{rd} = 276 \text{ kN}$

dove:

$\sigma_{sd} = 0,4 \text{ MPa}$  (sforzo massimo di trazione all'interfaccia)

$A_{inf} = 750 \text{ mm} \times 750 \text{ mm} = 5,625 \times 10^5 \text{ mm}^2$  (area di influenza della barra più sollecitata)

$f_{yd} = 391 \text{ MPa}$  (resistenza a snervamento delle barre di interconnessione)

$A_s = 707 \text{ mm}^2$  (area della barra di connessione  $\Phi=30 \text{ mm}$ )

Tale valore è una stima per eccesso della reale trazione esistente poichè non vengono considerate le deformazioni plastiche del calcestruzzo e per effetto viscoso il valore tenderà a decrementare nel tempo. Inoltre a bacino invasato si determineranno sforzi di compressione agenti perpendicolarmente all'interfaccia tra la superficie della diga esistente e nuovo getto che ridurranno le trazioni agenti nelle barre.

## 6. VERIFICHE DELLA SICUREZZA E DELLE PRESTAZIONI DELLA DIGA ESISTENTE IN ACCORDO AL D.M. 26/06/2014

Per la diga esistente sono riportate di seguito le verifiche di stabilità globale a traslazione e ribaltamento per le combinazioni di carico più gravose eseguite in accordo alla normativa D.M. 26/06/2014.

Si osserva che per alcune combinazioni di carico e in corrispondenza di alcune delle sezioni prese in esame le verifiche a traslazione della diga esistente hanno esito negativo sia con riferimento alla sezione emergente che a quella tracimabile.

Le verifiche di dettaglio sono riportate nell'Allegato 1.

### 6.1 VERIFICHE SLU - VERIFICHE A RIBALTAMENTO E TRASLAZIONE

<i>Concio A (Sezione tracimabile)</i>		
<i>Combinazione statica SLU / Fondamentale (1×G1 + 1,5×G2 + 1,5×G3 )</i>		
<i>Sezioni di verifica</i>	<i>Verifica ribaltamento</i> $\alpha = M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante}$	<i>Verifica traslazione</i> $\beta = V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante}$
<i>Sezione di base</i>	$\alpha = 1,13 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 0,66 < 1$ (Verifica negativa)
<i>Sezione 1-1</i>	$\alpha = 1,35 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 0,78 < 1$ (Verifica negativa)
<i>Sezione 2-2</i>	$\alpha = 1,47 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 0,91 < 1$ (Verifica negativa)
<i>Combinazione statica SLU / Eccezionale (1×G1 + 1×A + 1×G3 )</i>		
<i>Sezioni di verifica</i>	<i>Verifica ribaltamento</i> $\alpha = M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante}$	<i>Verifica traslazione</i> $\beta = V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante}$
<i>Sezione di base</i>	$\alpha = 1,30 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 0,92 < 1$ (Verifica negativa)
<i>Sezione 1-1</i>	$\alpha = 1,49 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,01 > 1$ (Verifica positiva)
<i>Sezione 2-2</i>	$\alpha = 1,43 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,02 > 1$ (Verifica positiva)
<i>Combinazione sismica / SLC (G1 + G2 + G3 + E<sub>x,slc-valle/monte</sub> + 0.3×E<sub>z,slc-Basso/Alto</sub> + I<sub>x,slc</sub>)</i>		
<i>Sezioni di verifica</i>	<i>Verifica ribaltamento</i> $\alpha = M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante}$	<i>Verifica traslazione</i> $\beta = V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante}$
<i>Sezione di base (serbatoio pieno)</i>	$\alpha = 1,19 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 0,74 < 1$ (Verifica negativa)
<i>Sezione di base (serbatoio vuoto)</i>	$\alpha = 4,80 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 4,33 > 1$ (Verifica positiva)
<i>Sezione 1-1 (serbatoio pieno)</i>	$\alpha = 1,41 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 0,84 < 1$ (Verifica negativa)
<i>Sezione 1-1</i>	$\alpha = 5,34 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 4,46 > 1$ (Verifica positiva)

<b>Concio A (Sezione trascinabile)</b>		
(serbatoio vuoto)		
<b>Sezione 2-2</b> (serbatoio pieno)	$\alpha = 1,47 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 0,92 < 1$ (Verifica negativa)
<b>Sezione 2-2</b> (serbatoio vuoto)	$\alpha = 5,34 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 4,46 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Combinazione sismica / SLV (<math>G1 + G2 + G3 + E_{x,slv-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,slv-Basso/Alto} + I_{x,slv}</math>)</b>		
<b>Sezioni di verifica</b>	<b>Verifica ribaltamento</b> $\alpha = M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante}$	<b>Verifica traslazione</b> $\beta = V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante}$
<b>Sezione di base</b> (serbatoio pieno)	$\alpha = 1,26 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 0,81 < 1$ (Verifica negativa)
<b>Sezione di base</b> (serbatoio vuoto)	$\alpha = 6,04 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 5,41 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 1-1</b> (serbatoio pieno)	$\alpha = 1,48 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 0,91 < 1$ (Verifica negativa)
<b>Sezione 1-1</b> (serbatoio vuoto)	$\alpha = 6,72 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 5,62 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 2-2</b> (serbatoio pieno)	$\alpha = 1,58 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,01 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 2-2</b> (serbatoio vuoto)	$\alpha = 6,72 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 5,64 > 1$ (Verifica positiva)

<b>Concio B (Sezione emergente)</b>		
<b>Combinazione statica SLU / Fondamentale (<math>1 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3</math>)</b>		
<b>Sezioni di verifica</b>	<b>Verifica ribaltamento</b> $\alpha = M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante}$	<b>Verifica traslazione</b> $\beta = V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante}$
<b>Sezione di base</b>	$\alpha = 1,26 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 0,65 < 1$ (Verifica negativa)
<b>Sezione 1-1</b>	$\alpha = 1,41 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 0,87 < 1$ (Verifica negativa)
<b>Sezione 2-2</b>	$\alpha = 1,87 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,20 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Combinazione statica SLU / Eccezionale (<math>1 \times G1 + 1 \times A + 1 \times G3</math>)</b>		
<b>Sezioni di verifica</b>	<b>Verifica ribaltamento</b> $\alpha = M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante}$	<b>Verifica traslazione</b> $\beta = V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante}$
<b>Sezione di base</b>	$\alpha = 1,39 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 0,91 < 1$ (Verifica negativa)



<b>Concio B (Sezione emergente)</b>		
<b>Sezione 1-1</b>	$\alpha = 1,46 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 0,99 < 1$ (Verifica negativa)
<b>Sezione 2-2</b>	$\alpha = 1,63 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,08 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Combinazione sismica / SLC (<math>G1 + G2 + G3 + E_{x,slc-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,slc-Basso/Alto} + I_{x,slc}</math>)</b>		
<b>Sezioni di verifica</b>	<b>Verifica ribaltamento</b> $\alpha = M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante}$	<b>Verifica traslazione</b> $\beta = V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante}$
<b>Sezione di base (serbatoio pieno)</b>	$\alpha = 1,28 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 0,79 < 1$ (Verifica negativa)
<b>Sezione di base (serbatoio vuoto)</b>	$\alpha = 4,53 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 4,32 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 1-1 (serbatoio pieno)</b>	$\alpha = 1,38 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 0,89 < 1$ (Verifica negativa)
<b>Sezione 1-1 (serbatoio vuoto)</b>	$\alpha = 4,59 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 4,43 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 2-2 (serbatoio pieno)</b>	$\alpha = 1,62 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,10 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 2-2 (serbatoio vuoto)</b>	$\alpha = 4,30 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 4,41 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Combinazione sismica / SLV (<math>G1 + G2 + G3 + E_{x,slv-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,slv-Basso/Alto} + I_{x,slv}</math>)</b>		
<b>Sezioni di verifica</b>	<b>Verifica ribaltamento</b> $\alpha = M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante}$	<b>Verifica traslazione</b> $\beta = V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante}$
<b>Sezione di base (serbatoio pieno)</b>	$\alpha = 1,34 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 0,85 < 1$ (Verifica negativa)
<b>Sezione di base (serbatoio vuoto)</b>	$\alpha = 5,35 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 5,41 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 1-1 (serbatoio pieno)</b>	$\alpha = 1,48 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 0,97 < 1$ (Verifica negativa)
<b>Sezione 1-1 (serbatoio vuoto)</b>	$\alpha = 5,76 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 5,60 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 2-2 (serbatoio pieno)</b>	$\alpha = 1,77 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,22 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 2-2 (serbatoio vuoto)</b>	$\alpha = 5,10 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 5,59 > 1$ (Verifica positiva)

## 7. VERIFICHE DELLA SICUREZZA E DELLE PRESTAZIONI DELLA DIGA IN ACCORDO AL D.M. 24/03/1982

Come da richiesta dell' Ufficio Dighe e limitatamente alle verifiche di instabilità globale ( a traslazione e a ribaltamento) di seguito sono riportati gli esiti delle verifiche in accordo alla vecchia normativa:

- D.M. 24/03/1982 “*Norme tecniche per la progettazione e la costruzione delle dighe di sbarramento*”

In accordo a quanto specificato al punto B.3. della norma, le verifiche di sicurezza sono state eseguite mettendo in conto le azioni di peso proprio della struttura, di spinta dell'acqua per livello del serbatoio alla quota di massimo invaso, la spinta dei fanghi, nonché le sottopressioni. Per le dighe a gravità ordinarie, la norma non considera le coazioni termiche e da ritiro che invece sono messe in conto per altre tipologie di dighe (dighe a volta) in cui gli effetti termici sono più significativi.

Come riportato al punto D.1. della norma, le verifiche sono state condotte per le seguenti condizioni di carico:

a serbatoio vuoto: per le azioni di peso proprio ed eventualmente sismiche;

a serbatoio pieno: per le azioni di peso proprio, di pressioni idrostatiche sul parametro di monte, spinta dei fanghi e sismiche.

### 7.1 DEFINIZIONE DELLE AZIONI DI CALCOLO

#### 7.1.1 *Peso proprio*

Per il calcestruzzo esistente e quello dell'appesantimento è stato messo in conto nei calcoli il valore del peso specifico riportato nel precedente capitolo §5.1.1.

#### 7.1.2 *Spinta idrostatica*

*Combinazioni statiche:*

- per le combinazioni statiche è stato preso in esame il serbatoio vuoto e il serbatoio pieno con il livello di massimo invaso (+628.62 m s.m.)

Livelli intermedi non sono significativi ai fini delle verifiche.

*Combinazioni sismiche:*

- per le combinazioni sismiche è stato preso in esame serbatoio vuoto e il serbatoio pieno con il livello alla quota +627.6 m s.m.

Livelli intermedi non sono significativi ai fini delle verifiche.

Agli effetti delle verifiche relative alle azioni ordinarie e sismiche concomitanti, essendo la diga dotata di sfioratori in tutto a soglia libera, la portata viene dimezzata per il calcolo della quota massima raggiunta dal livello dell'acqua. Sulla base del valore di piena di portata millenaria dimezzata si determina l'altezza del pelo d'acqua (h) sul ciglio sfiorante con la seguente espressione:

$$Q = \mu \times l \times h \times \sqrt{2 \times g \times h}$$

Dove:

$\mu = 0.45$  (coeff. di deflusso);

$l = 20.1$  m (larghezza ciglio sfiorante)

$g = 9,81$  m/s<sup>2</sup>

$Q = 85$  m<sup>3</sup>/s

Se si ipotizza a favore di sicurezza lo scarico di fondo chiuso, risulta  $h = 1.6$  m. Pertanto il pelo libero d'acqua risulta a quota +627.6 m s.m..

### 7.1.3 Sottospinte

Le sottospinte sono state assunte nei calcoli come riportato nel precedente capitolo §5.1.5.

### 7.1.4 Spinta dovuta all'interrimento

La spinta dovuta all'interrimento è stata assunta come riportato nel precedente capitolo §5.1.7.

### 7.1.5 Azioni sismiche

Le azioni inerziali della massa strutturale sono costituite convenzionalmente dalle seguenti forze unitarie di volume.

Le azioni sismiche orizzontali hanno valore:

$$F_h = C \times W = 0,03 \times W$$

ove:

$C = (S - 2) / 100 = 0,03$  è il coefficiente di intensità sismica;

$S = 5$  è il grado di sismicità per zona sismica 4;

$W$  è il peso unitario di volume del materiale;

Le azioni sismiche verticali, hanno valore pari a:

$$F_v = m \times C \times W = 0,015 \times W$$

dove il coefficiente  $m$  è stato assunto pari a 0,5.

### 7.1.6 Azioni inerziali dell'acqua invasata

Le azioni di inerzia dell'acqua, i cui effetti sono da aggiungere a quelli di inerzia della massa muraria, saranno assimilate ad una distribuzione continua di pressione normale al paramento di monte di intensità:

$$P = C \times \gamma \times c \times y_0$$

dove:

$C = (S - 2) / 100 = 0,03$  è il coefficiente di intensità sismica;

$\gamma = 1000 \text{ kg/m}^3$  è il peso per unità di volume dell'acqua;

$y_0$  = differenza tra la quota massima d'invaso come in appresso specificata e la quota del punto più depresso dell'alveo naturale in corrispondenza del parametro di monte della struttura;

$c$  è la funzione:

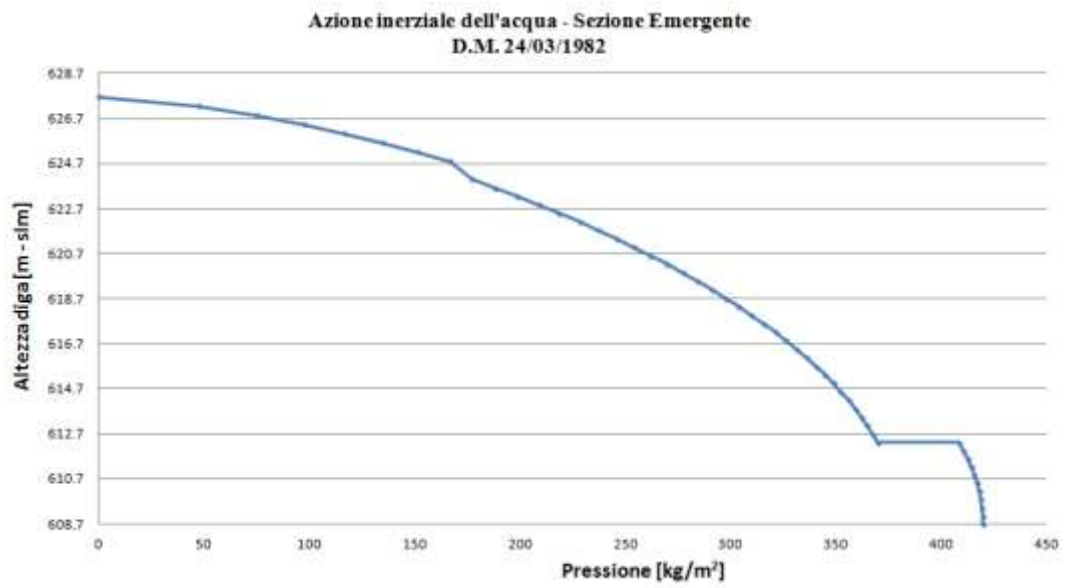
$$c = \frac{c_m}{2} \left[ \frac{y}{y_0} \left( 2 - \frac{y}{y_0} \right) + \sqrt{\frac{y}{y_0} \left( 1 - \frac{y}{y_0} \right)} \right]$$

in cui  $y$  è la differenza tra la quota massima di invaso e la quota del punto generico del paramento a cui è associata la pressione  $p$  sopra indicata e  $c_m$  è un coefficiente dipendente dall'angolo  $\alpha$  di inclinazione del paramento rispetto alla verticale, a cui sono da attribuire i seguenti valori (da interpolare per valori dell'angolo non compresi nella tabella):

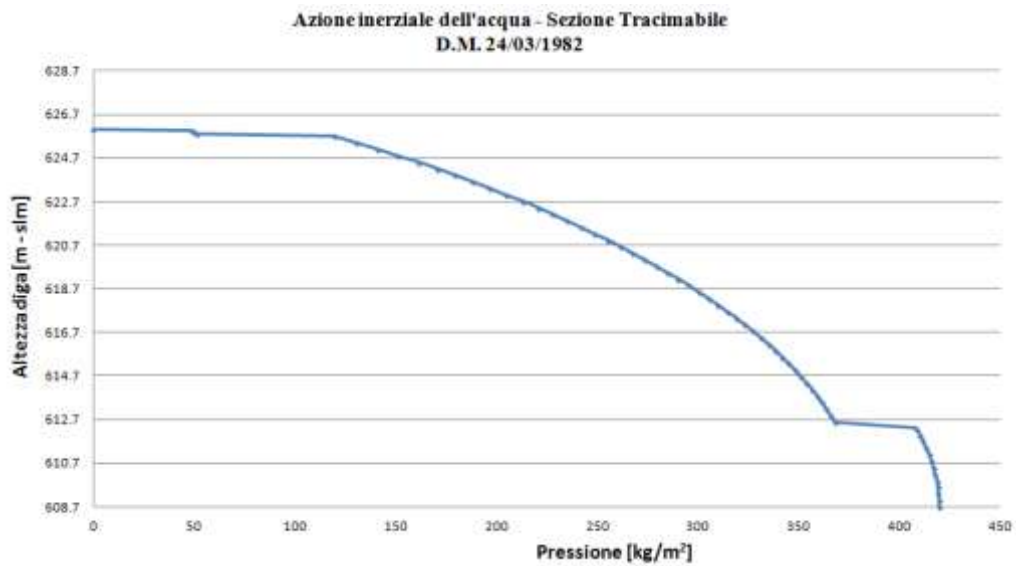
$\alpha$	0°	5°	10°	20°	40°	60° ed oltre
$c_m$	0,74	0,70	0,67	0,60	0,45	0,30

Se il parametro di monte ha inclinazione non costante è da assumere per  $c_m$  il valore medio pesato in base all'estensione dei singoli tratti di diversa inclinazione fra i valori sopra indicati con riferimento alla sezione maestra; per le eventuali zone con inclinazione negativa (a strapiombo) verrà assunto per  $c_m$  il valore 0,74.

Il grafico seguente riporta il valore delle azioni inerziali dell'acqua invasata:



*Azioni inerziali dell'acqua invasata per la sezione emergente calcolate in accordo al D.M. 24.03.1982*



*Azioni inerziali dell'acqua invasata per la sezione tracimabile calcolata in accordo al D.M. 24.03.1982*

## **7.2 VERIFICHE DELLA SICUREZZA E DELLE PRESTAZIONI DELLA DIGA APPESANTITA IN ACCORDO AL D.M. 24/03/1982**

Come da richiesta dell' Ufficio Dighe e limitatamente alle verifiche di instabilità globale ( a traslazione e a ribaltamento) di seguito è riportato l'esito delle verifiche in accordo alla vecchia normativa:

- D.M. 24/03/1982 “*Norme tecniche per la progettazione e la costruzione delle dighe di sbarramento*”

### **7.2.1 VERIFICHE SLU - VERIFICHE A RIBALTAMENTO E TRASLAZIONE**

La seguente tabella riporta una sintesi delle verifiche a traslazione e ribaltamento della diga calcolate per le combinazioni di carico più gravose. Le verifiche hanno fornito esito positivo.

Le verifiche di dettaglio sono riportate nell'allegato 1.

Le verifiche sono state condotte considerando le azioni sollecitanti una “striscia” di diga appesantita di larghezza 1 m.

Per quanto riguarda le verifiche a scorrimento eseguite in corrispondenza della fondazione e delle riprese di getto del calcestruzzo è stato adottato un coefficiente di attrito pari a 0,75 corrispondente al valore previsto dal DM 20.03.82 e comunque coerente con le buone caratteristiche presenti all'interfaccia tra diga e roccia riscontrate dalle indagini eseguite in sito.

Sono state prese in esame a titolo esemplificativo n.3 sezioni di verifica (indicate nell'allegato 1) che corrispondono rispettivamente alla sezione di base (quota 608,7 m), alla sezione 1-1 (quota 612,3 m) e sezione 2-2 (quota 618,3 m).

<b>Concio A (Sezione trascinabile)</b>		
<b>Combinazione statica (<math>1 \times G1 + 1 \times G2 + 1 \times G3</math>)</b>		
<b>Sezioni di verifica</b>	<b>Verifica ribaltamento</b> $\alpha = M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante}$	<b>Verifica traslazione</b> $\beta = V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante}$
<b>Sezione di base</b>	$\alpha = 1,96 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,41 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 1-1</b>	$\alpha = 2,00 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,48 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 2-2</b>	$\alpha = 2,03 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,57 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Combinazione sismica (<math>G1 + G2 + G3 + E_{x,-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,-Basso/Alto} + I_{x,slc}</math>)</b>		
<b>Sezioni di verifica</b>	<b>Verifica ribaltamento</b> $\alpha = M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante}$	<b>Verifica traslazione</b> $\beta = V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante}$
<b>Sezione di base (serbatoio pieno)</b>	$\alpha = 1,99 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,42 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione di base (serbatoio vuoto)</b>	$\alpha = 38,7 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 22,5 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 1-1 (serbatoio pieno)</b>	$\alpha = 2,07 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,51 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 1-1 (serbatoio vuoto)</b>	$\alpha = 43,5 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 25,0 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 2-2 (serbatoio pieno)</b>	$\alpha = 2,17 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,66 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 2-2 (serbatoio vuoto)</b>	$\alpha = 47,4 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 25,0 > 1$ (Verifica positiva)

<b>Concio B (Sezione emergente)</b>		
<b>Combinazione statica (<math>1 \times G1 + 1 \times G2 + 1 \times G3</math>)</b>		
<b>Sezioni di verifica</b>	<b>Verifica ribaltamento</b> $\alpha = M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante}$	<b>Verifica traslazione</b> $\beta = V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante}$
<b>Sezione di base</b>	$\alpha = 2,14 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,40 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 1-1</b>	$\alpha = 2,09 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,54 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 2-2</b>	$\alpha = 2,36 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,83 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Combinazione sismica (<math>G1 + G2 + G3 + E_{x,-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,-Basso/Alto} + I_{x,slc}</math>)</b>		
<b>Sezioni di verifica</b>	<b>Verifica ribaltamento</b>	<b>Verifica traslazione</b>

<b>Concio B (Sezione emergente)</b>		
	<b><math>\alpha = M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante}</math></b>	<b><math>\beta = V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante}</math></b>
<b>Sezione di base (serbatoio pieno)</b>	$\alpha = 2,22 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,43 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione di base (serbatoio vuoto)</b>	$\alpha = 37,0 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 22,6 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 1-1 (serbatoio pieno)</b>	$\alpha = 2,22 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,61 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 1-1 (serbatoio vuoto)</b>	$\alpha = 35,4 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 25,0 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 2-2 (serbatoio pieno)</b>	$\alpha = 2,65 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 2,05 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 2-2 (serbatoio vuoto)</b>	$\alpha = 32,6 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 24,6 > 1$ (Verifica positiva)



### **7.3 VERIFICHE DELLA SICUREZZA E DELLE PRESTAZIONI DELLA DIGA ESISTENTE IN ACCORDO AL D.M. 24/03/1982**

Come da richiesta dell' Ufficio Dighe e limitatamente alle verifiche di instabilità globale ( a traslazione e a ribaltamento) di seguito è riportato l'esito delle verifiche in accordo alla vecchia normativa:

- D.M. 24/03/1982 *“Norme tecniche per la progettazione e la costruzione delle dighe di sbarramento”*

#### **7.3.1 VERIFICHE SLU - VERIFICHE A RIBALTAMENTO E TRASLAZIONE**

La seguente tabella riporta una sintesi delle verifiche a traslazione e ribaltamento della diga calcolate per le combinazioni di carico più gravose.

Si osserva che per alcune combinazioni di carico e in corrispondenza di alcune delle sezioni prese in esame le verifiche a traslazione della diga esistente hanno esito negativo sia con riferimento alla sezione emergente che a quella trascinabile.

Le verifiche di dettaglio sono riportate nell'allegato 1.

Le verifiche sono state condotte considerando le azioni sollecitanti una “striscia” di diga appesantita di larghezza 1 m.

Per quanto riguarda le verifiche a scorrimento eseguite in corrispondenza della fondazione e delle riprese di getto del calcestruzzo è stato adottato un coefficiente di attrito pari a 0,75 corrispondente al valore previsto dal DM 20.03.82 e comunque coerente con le buone caratteristiche presenti all'interfaccia tra diga e roccia riscontrate dalle indagini eseguite in sito.

Sono state prese in esame a titolo esemplificativo n.3 sezioni di verifica (indicate nell'allegato 1) che corrispondono rispettivamente alla sezione di base (quota 608,7 m), alla sezione 1-1 (quota 612,3 m) e sezione 2-2 (quota 618,3 m).

<b>Concio A (Sezione trascinabile)</b>		
<b>Combinazione statica (<math>1 \times G1 + 1 \times G2 + 1 \times G3</math>)</b>		
<b>Sezioni di verifica</b>	<b>Verifica ribaltamento</b> $\alpha = M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante}$	<b>Verifica traslazione</b> $\beta = V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante}$
<b>Sezione di base</b>	$\alpha = 1,10 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 0,85 < 1$ (Verifica negativa)
<b>Sezione 1-1</b>	$\alpha = 1,49 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,01 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 2-2</b>	$\alpha = 1,49 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,01 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Combinazione sismica (<math>G1 + G2 + G3 + E_{x,-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,-Basso/Alto} + I_{x,slc}</math>)</b>		
<b>Sezioni di verifica</b>	<b>Verifica ribaltamento</b> $\alpha = M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante}$	<b>Verifica traslazione</b> $\beta = V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante}$
<b>Sezione di base (serbatoio pieno)</b>	$\alpha = 1,12 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 0,89 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione di base (serbatoio vuoto)</b>	$\alpha = 32,7 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 21,6 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 1-1 (serbatoio pieno)</b>	$\alpha = 1,60 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,07 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 1-1 (serbatoio vuoto)</b>	$\alpha = 38,6 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 24,9 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 2-2 (serbatoio pieno)</b>	$\alpha = 1,60 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,14 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 2-2 (serbatoio vuoto)</b>	$\alpha = 38,4 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 24,7 > 1$ (Verifica positiva)

<b>Concio B (Sezione emergente)</b>		
<b>Combinazione statica (<math>1 \times G1 + 1 \times G2 + 1 \times G3</math>)</b>		
<b>Sezioni di verifica</b>	<b>Verifica ribaltamento</b> $\alpha = M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante}$	<b>Verifica traslazione</b> $\beta = V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante}$
<b>Sezione di base</b>	$\alpha = 1,34 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 0,89 < 1$ (Verifica negativa)
<b>Sezione 1-1</b>	$\alpha = 1,38 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 0,96 < 1$ (Verifica negativa)
<b>Sezione 2-2</b>	$\alpha = 1,45 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,01 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Combinazione sismica (<math>G1 + G2 + G3 + E_{x,-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,-Basso/Alto} + I_{x,slc}</math>)</b>		

<b>Concio B (Sezione emergente)</b>		
<b>Sezioni di verifica</b>	<b>Verifica ribaltamento</b> $\alpha = M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante}$	<b>Verifica traslazione</b> $\beta = V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante}$
<b>Sezione di base (serbatoio pieno)</b>	$\alpha = 1,44 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 0,94 < 1$ (Verifica negativa)
<b>Sezione di base (serbatoio vuoto)</b>	$\alpha = 32,1 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 21,8 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 1-1 (serbatoio pieno)</b>	$\alpha = 1,53 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,04 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 1-1 (serbatoio vuoto)</b>	$\alpha = 32,9 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 24,9 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 2-2 (serbatoio pieno)</b>	$\alpha = 1,73 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 1,19 > 1$ (Verifica positiva)
<b>Sezione 2-2 (serbatoio vuoto)</b>	$\alpha = 30,2 > 1$ (Verifica positiva)	$\beta = 24,7 > 1$ (Verifica positiva)

# ***ALLEGATO 1***

***Risultati di dettaglio  
dei calcoli***

## INDICE

<b>1. CONCIO A / SEZIONE TRACIMABILE (DIGA APPESANTITA – D.M.26/06/2014) .....</b>	<b>10</b>
1.1 VERIFICHE SFORZI DEL CORPO DIGA .....	10
1.1.1 <i>Combinazioni SLE</i> .....	10
1.1.1.1 Cmb.1: $G1+G2+G3$ (Rara) .....	10
1.1.1.2 Cmb.2: $G1+G2+G3+Q_{1,inverno}$ (Rara inverno) .....	12
1.1.1.3 Cmb.3: $G1+G2+G3+Q_{1,estate}$ (Rara estate) .....	14
1.1.1.4 Cmb.4 (SLO): $G1+G2+G3+E_{x,SLO} + 0,3E_{z,SLO} + I_{x,SLO} + 0,5 \times Q_{1,inverno}$ (Sismica SLO inverno) .....	16
1.1.1.5 Cmb.4(SLD): $G1+G2+G3+E_{x,SLD} + 0,3E_{z,SLD} + I_{x,SLD} + 0,5 \times Q_{1,inverno}$ (Sismica SLD inverno) .....	18
1.1.1.6 Cmb.5(SLO): $G1+G2+G3+E_{x,SLO} + 0,3E_{z,SLO} + I_{x,SLO} + 0,5 \times Q_{1,estate}$ (Sismica SLO estate) .....	20
1.1.1.7 Cmb.5(SLD): $G1+G2+G3+E_{x,SLD} + 0,3E_{z,SLD} + I_{x,SLD} + 0,5 \times Q_{1,estate}$ (Sismica SLD estate) .....	22
1.1.1.8 Cmb.6: $G1+G2+G3+0,5 \times Q_{1,inverno}$ (Quasi permanente inverno) .....	24
1.1.1.9 Cmb.7: $G1+G2+G3+0,5 \times Q_{1,estate}$ (Quasi permanente estate) .....	25
1.1.2 <i>Combinazioni SLU</i> .....	26
1.1.2.1 Cmb.1: $1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3$ (Fondamentale) .....	26
1.1.2.2 Cmb.2: $1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3 + 1,5 \times Q_{1,inverno}$ (Fondamentale inverno) .....	27
1.1.2.3 Cmb.3: $1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3 + 1,5 \times Q_{1,estate}$ (Fondamentale estate) .....	28
1.1.2.4 Cmb.4: $G1+G3+A+0,5 \times Q_{1,inverno}$ (Eccezionale inverno) .....	29
1.1.2.5 Cmb.5: $G1+G3+A+0,5 \times Q_{1,estate}$ (Eccezionale estate) .....	30
1.1.2.6 Cmb.6 (SLV): $G1+G3+E_{x,SLV} + 0,3E_{z,SLV} + I_{x,SLV} + 0,5 \times Q_{1,inverno}$ (Sismica SLV inverno) .....	31
1.1.2.7 Cmb.6 (SLC): $G1+G3+E_{x,SLC} + 0,3E_{z,SLC} + I_{x,SLC} + 0,5 \times Q_{1,inverno}$ (Sismica SLC inverno) .....	32
1.1.2.8 Cmb.7 (SLV): $G1+G3+E_{x,SLV} + 0,3E_{z,SLV} + I_{x,SLV} + 0,5 \times Q_{1,estate}$ (Sismica SLV estate) .....	33
1.1.2.9 Cmb.7 (SLC): $G1+G3+E_{x,SLC} + 0,3E_{z,SLC} + I_{x,SLC} + 0,5 \times Q_{1,estate}$ (Sismica SLC estate) .....	34
1.2 VERIFICHE A RIBALTAMENTO E TRASLAZIONE DEL CORPO DIGA .....	35
1.2.1 <i>AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE DI BASE</i> .....	35
1.2.1.1 COMBINAZIONE FONDAMENTALE SLU ( $1 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3$ ) .....	41
1.2.1.2 COMBINAZIONE ECCEZIONALE SLU ( $1 \times G1 + 1 \times A + 1 \times G3$ ) .....	42
1.2.1.3 COMBINAZIONE SISMICA SLC ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slc-valle/monte} + 0,3 \times E_{z,slc-Basso/Alto} + I_{x,slc}$ ) .....	43
1.2.1.3.1 Serbatoio pieno .....	43
1.2.1.3.2 Serbatoio vuoto .....	44
1.2.1.4 COMBINAZIONE SISMICA SLV ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slv-valle/monte} + 0,3 \times E_{z,slv-Basso/Alto} + I_{x,slv}$ ) .....	45
1.2.1.4.1 Serbatoio pieno .....	45
1.2.1.4.2 Serbatoio vuoto .....	46
1.2.1 <i>AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE I-1</i> .....	48
1.2.1.1 COMBINAZIONE FONDAMENTALE SLU ( $1 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3$ ) .....	54
1.2.1.2 COMBINAZIONE ECCEZIONALE SLU ( $1 \times G1 + 1 \times A + 1 \times G3$ ) .....	54
1.2.1.3 COMBINAZIONE SISMICA SLC ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slc-valle/monte} + 0,3 \times E_{z,slc-Basso/Alto} + I_{x,slc}$ ) .....	55

1.2.1.3.1	Serbatoio pieno.....	55
1.2.1.3.2	Serbatoio vuoto .....	56
1.2.1.4	COMBINAZIONE SISMICA SLV ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slv-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,slv-Basso/Alto} + I_{x,slv}$ ).....	57
1.2.1.4.1	Serbatoio pieno.....	57
1.2.1.4.2	Serbatoio vuoto .....	58
1.2.2	AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 2-2.....	60
1.2.2.1	COMBINAZIONE FONDAMENTALE SLU ( $1 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3$ ).....	66
1.2.2.2	COMBINAZIONE ECCEZIONALE SLU ( $1 \times G1 + 1 \times A + 1 \times G3$ ).....	66
1.2.2.3	COMBINAZIONE SISMICA SLC ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slc-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,slc-Basso/Alto} + I_{x,slc}$ ).....	67
1.2.2.3.1	Serbatoio pieno.....	67
1.2.2.3.2	Serbatoio vuoto .....	68
1.2.2.4	COMBINAZIONE SISMICA SLV ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slv-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,slv-Basso/Alto} + I_{x,slv}$ ).....	69
1.2.2.4.1	Serbatoio pieno.....	69
1.2.2.4.2	Serbatoio vuoto .....	70
1.3	VERIFICA SFORZI DI INTERFACCIA TRA CALCESTRUZZO CORPO DIGA ESISTENTE E CALCESTRUZZO DELL' APPESANTIMENTO.....	72
1.3.1	<i>Cmb.1: <math>1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3</math> (Fondamentale)</i> .....	72
1.3.2	<i>Cmb.2: <math>1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3 + 1,5 \times Q1</math>,inverno (Fondamentale inverno)</i> .....	74
1.3.3	<i>Cmb.3: <math>1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3 + 1,5 \times Q1</math>,estate (Fondamentale estate)</i> .....	76
1.3.4	<i>Cmb.4: <math>G1 + G3 + A + 0,5 \times Q1</math>,inverno (Eccezionale inverno)</i> .....	78
1.3.5	<i>Cmb.5: <math>G1 + G3 + A + 0,5 \times Q1</math>,estate (Eccezionale estate)</i> .....	80
1.3.6	<i>Cmb.6 (SLV): <math>G1 + G3 + Ex,SLV + 0,3Ez,SLV + Ix,SLV + 0,5 \times Q1</math>,inverno (Sismica SLV inverno)</i> .....	82
1.3.7	<i>Cmb.6 (SLC): <math>G1 + G3 + Ex,SLC + 0,3Ez,SLC + Ix,SLC + 0,5 \times Q1</math>,inverno (Sismica SLC inverno)</i> .....	84
1.3.8	<i>Cmb.7 (SLV): <math>G1 + G3 + Ex,SLV + 0,3Ez,SLV + Ix,SLV + 0,5 \times Q1</math>,estate (Sismica SLV estate)</i> .....	86
1.3.9	<i>Cmb.7 (SLC): <math>G1 + G3 + Ex,SLC + 0,3Ez,SLC + Ix,SLC + 0,5 \times Q1</math>,estate (Sismica SLC estate)</i> .....	88
2.	CONCIO B / SEZIONE EMERGENTE (DIGA APPESANTITA – D.M.26/06/2014) .....	90
2.1	COMBINAZIONI SLE.....	90
2.1.1	<i>Cmb.1: <math>G1 + G2 + G3</math> (Rara)</i> .....	90
2.1.2	<i>Cmb.2: <math>G1 + G2 + G3 + Q1</math>,inverno (Rara inverno)</i> .....	92
2.1.3	<i>Cmb.3: <math>G1 + G2 + G3 + Q1</math>,estate (Rara estate)</i> .....	94
2.1.4	<i>Cmb.4 (SLO): <math>G1 + G2 + G3 + E_{x,SLO} + 0,3Ez,SLO + Ix,SLO + 0,5 \times Q1</math>,inverno (Sismica SLO inverno)</i> .....	96
2.1.5	<i>Cmb.4(SLD): <math>G1 + G2 + G3 + Ex,SLD + 0,3Ez,SLD + Ix,SLD + 0,5 \times Q1</math>,inverno (Sismica SLD inverno)</i> ...	98
2.1.6	<i>Cmb.5(SLO): <math>G1 + G2 + G3 + Ex,SLO + 0,3Ez,SLO + Ix,SLO + 0,5 \times Q1</math>,estate (Sismica SLO estate)</i> .....	100
2.1.7	<i>Cmb.5(SLD): <math>G1 + G2 + G3 + E_{x,SLD} + 0,3Ez,SLD + Ix,SLD + 0,5 \times Q1</math>,estate (Sismica SLD estate)</i> .....	102
2.1.8	<i>Cmb.6: <math>G1 + G2 + G3 + 0,5 \times Q1</math>,inverno (Quasi permanente inverno)</i> .....	104
2.1.9	<i>Cmb.7: <math>G1 + G2 + G3 + 0,5 \times Q1</math>,estate (Quasi permanente estate)</i> .....	105
2.2	COMBINAZIONI SLU .....	106

2.2.1	<i>Cmb.1: <math>1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3</math> (Fondamentale)</i> .....	106
2.2.2	<i>Cmb.2: <math>1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3 + 1,5 \times Q1, inverno</math> (Fondamentale inverno)</i> .....	107
2.2.3	<i>Cmb.3: <math>1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3 + 1,5 \times Q1, estate</math> (Fondamentale estate)</i> .....	108
2.2.4	<i>Cmb.4: <math>G1 + G3 + A + 0,5 \times Q1, inverno</math> (Eccezionale inverno)</i> .....	109
2.2.5	<i>Cmb.5: <math>G1 + G3 + A + 0,5 \times Q1, estate</math> (Eccezionale estate)</i> .....	110
2.2.6	<i>Cmb.6 (SLV): <math>G1 + G3 + Ex, SLV + 0,3Ez, SLV + Ix, SLV + 0,5 \times Q1, inverno</math> (Sismica SLV inverno)</i> .....	111
2.2.7	<i>Cmb.6 (SLC): <math>G1 + G3 + Ex, SLC + 0,3Ez, SLC + Ix, SLC + 0,5 \times Q1, inverno</math> (Sismica SLC inverno)</i> .....	112
2.2.8	<i>Cmb.7 (SLV): <math>G1 + G3 + Ex, SLV + 0,3Ez, SLV + Ix, SLV + 0,5 \times Q1, estate</math> (Sismica SLV estate)</i> .....	113
2.2.9	<i>Cmb.7 (SLC): <math>G1 + G3 + Ex, SLC + 0,3Ez, SLC + Ix, SLC + 0,5 \times Q1, estate</math> (Sismica SLC estate)</i> .....	114
2.3	VERIFICHE A RIBALTAMENTO E TRASLAZIONE DEL CORPO DIGA.....	115
2.3.1	AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE DI BASE.....	115
2.3.1.1	COMBINAZIONE FONDAMENTALE SLU ( $1 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3$ ).....	122
2.3.1.2	COMBINAZIONE ECCEZIONALE SLU ( $1 \times G1 + 1 \times A + 1 \times G3$ ).....	122
2.3.1.3	COMBINAZIONE SISMICA SLC ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slc-valle/monte} + 0,3 \times E_{z,slc-Basso/Alto} + I_{x,slc}$ ).....	123
2.3.1.3.1	Serbatoio pieno.....	123
2.3.1.3.2	Serbatoio vuoto.....	124
2.3.1.4	COMBINAZIONE SISMICA SLV ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slv-valle/monte} + 0,3 \times E_{z,slv-Basso/Alto} + I_{x,slv}$ ).....	125
2.3.1.4.1	Serbatoio pieno.....	125
2.3.1.4.2	Serbatoio vuoto.....	127
2.3.1	AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 1-1.....	128
2.3.1.1	COMBINAZIONE FONDAMENTALE SLU ( $1 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3$ ).....	134
2.3.1.2	COMBINAZIONE ECCEZIONALE SLU ( $1 \times G1 + 1 \times A + 1 \times G3$ ).....	134
2.3.1.3	COMBINAZIONE SISMICA SLC ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slc-valle/monte} + 0,3 \times E_{z,slc-Basso/Alto} + I_{x,slc}$ ).....	135
2.3.1.3.1	Serbatoio pieno.....	135
2.3.1.3.2	Serbatoio vuoto.....	136
2.3.1.4	COMBINAZIONE SISMICA SLV ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slv-valle/monte} + 0,3 \times E_{z,slv-Basso/Alto} + I_{x,slv}$ ).....	137
2.3.1.4.1	Serbatoio pieno.....	137
2.3.1.4.2	Serbatoio vuoto.....	138
2.3.2	AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 2-2.....	140
2.3.2.1	COMBINAZIONE FONDAMENTALE SLU ( $1 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3$ ).....	146
2.3.2.2	COMBINAZIONE ECCEZIONALE SLU ( $1 \times G1 + 1 \times A + 1 \times G3$ ).....	146
2.3.2.3	COMBINAZIONE SISMICA SLC ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slc-valle/monte} + 0,3 \times E_{z,slc-Basso/Alto} + I_{x,slc}$ ).....	147
2.3.2.3.1	Serbatoio pieno.....	147
2.3.2.3.2	Serbatoio vuoto.....	148
2.3.2.4	COMBINAZIONE SISMICA SLV ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slv-valle/monte} + 0,3 \times E_{z,slv-Basso/Alto} + I_{x,slv}$ ).....	149
2.3.2.4.1	Serbatoio pieno.....	149
2.3.2.4.2	Serbatoio vuoto.....	150

2.4	VERIFICA SFORZI DI INTERFACCIA TRA CALCESTRUZZO CORPO DIGA ESISTENTE E CALCESTRUZZO DELL' APPESANTIMENTO.....	152
2.4.1	<i>Cmb.1: <math>1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3</math> (Fondamentale)</i> .....	152
2.4.2	<i>Cmb.2: <math>1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3 + 1,5 \times Q1, inverno</math> (Fondamentale inverno)</i> .....	154
2.4.3	<i>Cmb.3: <math>1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3 + 1,5 \times Q1, estate</math> (Fondamentale estate)</i> .....	156
2.4.4	<i>Cmb.4: <math>G1 + G3 + A + 0,5 \times Q1, inverno</math> (Eccezionale inverno)</i> .....	158
2.4.5	<i>Cmb.5: <math>G1 + G3 + A + 0,5 \times Q1, estate</math> (Eccezionale estate)</i> .....	160
2.4.6	<i>Cmb.6 (SLV): <math>G1 + G3 + Ex, SLV + 0,3Ez, SLV + Ix, SLV + 0,5 \times Q1, inverno</math> (Sismica SLV inverno)</i> .....	162
2.4.7	<i>Cmb.6 (SLC): <math>G1 + G3 + Ex, SLC + 0,3Ez, SLC + Ix, SLC + 0,5 \times Q1, inverno</math> (Sismica SLC inverno)</i> .....	164
2.4.8	<i>Cmb.7 (SLV): <math>G1 + G3 + Ex, SLV + 0,3Ez, SLV + Ix, SLV + 0,5 \times Q1, estate</math> (Sismica SLV estate)</i> .....	166
2.4.9	<i>Cmb.7 (SLC): <math>G1 + G3 + Ex, SLC + 0,3Ez, SLC + Ix, SLC + 0,5 \times Q1, estate</math> (Sismica SLC estate)</i> .....	168
<b>3.</b>	<b>CONCIO A / SEZIONE TRACIMABILE (DIGA ESISTENTE – D.M.26/06/2014)</b> .....	<b>170</b>
3.1	VERIFICHE A RIBALTAMENTO E TRASLAZIONE DEL CORPO DIGA.....	170
3.1.1	AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE DI BASE.....	170
3.1.1.1	COMBINAZIONE FONDAMENTALE SLU ( $1 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3$ ).....	176
3.1.1.2	COMBINAZIONE ECCEZIONALE SLU ( $1 \times G1 + 1 \times A + 1 \times G3$ ).....	177
3.1.1.3	COMBINAZIONE SISMICA SLC ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slc-valle/monte} + 0,3 \times E_{z,slc-Basso/Alto} + I_{x,slc}$ ).....	177
3.1.1.3.1	Serbatoio pieno.....	177
3.1.1.3.2	Serbatoio vuoto.....	179
3.1.1.4	COMBINAZIONE SISMICA SLV ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slv-valle/monte} + 0,3 \times E_{z,slv-Basso/Alto} + I_{x,slv}$ ).....	179
3.1.1.4.1	Serbatoio pieno.....	180
3.1.1.4.2	Serbatoio vuoto.....	181
3.1.2	AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 1-1.....	182
3.1.2.1	COMBINAZIONE FONDAMENTALE SLU ( $1 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3$ ).....	187
3.1.2.2	COMBINAZIONE ECCEZIONALE SLU ( $1 \times G1 + 1 \times A + 1 \times G3$ ).....	188
3.1.2.3	COMBINAZIONE SISMICA SLC ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slc-valle/monte} + 0,3 \times E_{z,slc-Basso/Alto} + I_{x,slc}$ ).....	189
3.1.2.3.1	Serbatoio pieno.....	189
3.1.2.3.2	Serbatoio vuoto.....	190
3.1.2.4	COMBINAZIONE SISMICA SLV ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slv-valle/monte} + 0,3 \times E_{z,slv-Basso/Alto} + I_{x,slv}$ ).....	190
3.1.2.4.1	Serbatoio pieno.....	190
3.1.2.4.2	Serbatoio vuoto.....	192
3.1.3	AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 2-2.....	193
3.1.3.1	COMBINAZIONE FONDAMENTALE SLU ( $1 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3$ ).....	199
3.1.3.2	COMBINAZIONE ECCEZIONALE SLU ( $1 \times G1 + 1 \times A + 1 \times G3$ ).....	199
3.1.3.3	COMBINAZIONE SISMICA SLC ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slc-valle/monte} + 0,3 \times E_{z,slc-Basso/Alto} + I_{x,slc}$ ).....	200
3.1.3.3.1	Serbatoio pieno.....	200
3.1.3.3.2	Serbatoio vuoto.....	201



3.1.3.4	COMBINAZIONE SISMICA SLV ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slv-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,slv-Basso/Alto} + I_{x,slv}$ )	202
3.1.3.4.1	Serbatoio pieno	202
3.1.3.4.2	Serbatoio vuoto	203
<b>4.</b>	<b>CONCIO B / SEZIONE EMERGENTE (DIGA ESISTENTE – D.M.26/06/2014)</b>	<b>205</b>
4.1	VERIFICHE A RIBALTAMENTO E TRASLAZIONE DEL CORPO DIGA	205
4.1.1	AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE DI BASE	205
4.1.1.1	COMBINAZIONE FONDAMENTALE SLU ( $1 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3$ )	211
4.1.1.2	COMBINAZIONE ECCEZIONALE SLU ( $1 \times G1 + 1 \times A + 1 \times G3$ )	212
4.1.1.3	COMBINAZIONE SISMICA SLC ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slc-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,slc-Basso/Alto} + I_{x,slc}$ )	212
4.1.1.3.1	Serbatoio pieno	212
4.1.1.3.2	Serbatoio vuoto	214
4.1.1.4	COMBINAZIONE SISMICA SLV ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slv-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,slv-Basso/Alto} + I_{x,slv}$ )	214
4.1.1.4.1	Serbatoio pieno	215
4.1.1.4.2	Serbatoio vuoto	216
4.1.2	AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 1-1	217
4.1.2.1	COMBINAZIONE FONDAMENTALE SLU ( $1 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3$ )	222
4.1.2.2	COMBINAZIONE ECCEZIONALE SLU ( $1 \times G1 + 1 \times A + 1 \times G3$ )	223
4.1.2.3	COMBINAZIONE SISMICA SLC ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slc-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,slc-Basso/Alto} + I_{x,slc}$ )	223
4.1.2.3.1	Serbatoio pieno	224
4.1.2.3.2	Serbatoio vuoto	225
4.1.2.4	COMBINAZIONE SISMICA SLV ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slv-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,slv-Basso/Alto} + I_{x,slv}$ )	225
4.1.2.4.1	Serbatoio pieno	225
4.1.2.4.2	Serbatoio vuoto	226
4.1.3	AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 2-2	228
4.1.3.1	COMBINAZIONE FONDAMENTALE SLU ( $1 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3$ )	234
4.1.3.2	COMBINAZIONE ECCEZIONALE SLU ( $1 \times G1 + 1 \times A + 1 \times G3$ )	234
4.1.3.3	COMBINAZIONE SISMICA SLC ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slc-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,slc-Basso/Alto} + I_{x,slc}$ )	235
4.1.3.3.1	Serbatoio pieno	235
4.1.3.3.2	Serbatoio vuoto	236
4.1.3.4	COMBINAZIONE SISMICA SLV ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slv-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,slv-Basso/Alto} + I_{x,slv}$ )	237
4.1.3.4.1	Serbatoio pieno	237
4.1.3.4.2	Serbatoio vuoto	238
<b>5.</b>	<b>VERIFICA DELLE FASI COSTRUTTIVE</b>	<b>240</b>
5.1	FASE 1 – GETTO 1	240
5.2	FASE 2 – GETTO 6	242
5.3	FASE 3 – GETTO 12	244
5.4	FASE 4 – GETTO 18	246

5.5	FASE 5 – GETTO 24.....	248
5.6	FASE 6 – GETTO 30.....	250
5.7	FASE 7 – GETTO 36.....	252
5.8	FASE 8 – GETTO 42.....	254
5.9	FASE 9 – GETTO 48.....	256
5.10	FASE 10 – GETTO 56.....	258
5.11	FASE 11 – GETTO 61.....	260
<b>6.</b>	<b>CONCIO A / SEZIONE TRACIMABILE (DIGA APPESANTITA – D.M.24/03/1982) .....</b>	<b>262</b>
6.1	VERIFICHE A RIBALTAMENTO E TRASLAZIONE DEL CORPO DIGA.....	262
6.1.1	AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE DI BASE.....	262
6.1.1.1	COMBINAZIONE STATICA (1×G1 + 1×G2 + 1×G3 ).....	267
6.1.1.2	COMBINAZIONE SISMICA (G1 + G2 + G3 + E <sub>x, valle/monte</sub> + 0.3×E <sub>z, Basso/Alto</sub> + I <sub>x</sub> ).....	268
6.1.1.2.1	Serbatoio pieno.....	268
6.1.1.2.2	Serbatoio vuoto.....	269
6.1.2	AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 1-1.....	270
6.1.2.1	COMBINAZIONE STATICA (1×G1 + 1×G2 + 1×G3 ).....	274
6.1.2.2	COMBINAZIONE SISMICA (G1 + G2 + G3 + E <sub>x, valle/monte</sub> + 0.3×E <sub>z, Basso/Alto</sub> + I <sub>x</sub> ).....	275
6.1.2.2.1	Serbatoio pieno.....	275
6.1.2.2.2	Serbatoio vuoto.....	276
6.1.3	AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 2-2.....	277
6.1.3.1	COMBINAZIONE STATICA (1×G1 + 1×G2 + 1×G3 ).....	281
6.1.3.2	COMBINAZIONE SISMICA (G1 + G2 + G3 + E <sub>x, valle/monte</sub> + 0.3×E <sub>z, Basso/Alto</sub> + I <sub>x</sub> ).....	282
6.1.3.2.1	Serbatoio pieno.....	282
6.1.3.2.2	Serbatoio vuoto.....	283
<b>7.</b>	<b>CONCIO A / SEZIONE TRACIMABILE (DIGA ESISTENTE – D.M.24/03/1982) .....</b>	<b>284</b>
7.1	VERIFICHE A RIBALTAMENTO E TRASLAZIONE DEL CORPO DIGA.....	284
7.1.1	AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE DI BASE.....	284
7.1.1.1	COMBINAZIONE STATICA (1×G1 + 1×G2 + 1×G3 ).....	289
7.1.1.2	COMBINAZIONE SISMICA (G1 + G2 + G3 + E <sub>x, valle/monte</sub> + 0.3×E <sub>z, Basso/Alto</sub> + I <sub>x</sub> ).....	289
7.1.1.2.1	Serbatoio pieno.....	289
7.1.1.2.2	Serbatoio vuoto.....	291
7.1.1	AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 1-1.....	292
7.1.1.1	COMBINAZIONE STATICA (1×G1 + 1×G2 + 1×G3 ).....	296
7.1.1.2	COMBINAZIONE SISMICA (G1 + G2 + G3 + E <sub>x, valle/monte</sub> + 0.3×E <sub>z, Basso/Alto</sub> + I <sub>x</sub> ).....	297
7.1.1.2.1	Serbatoio pieno.....	297
7.1.1.2.2	Serbatoio vuoto.....	298
7.1.2	AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 2-2.....	299

7.1.2.1	COMBINAZIONE STATICA ( $1 \times G1 + 1 \times G2 + 1 \times G3$ ) .....	303
7.1.2.2	COMBINAZIONE SISMICA ( $G1 + G2 + G3 + E_{x, valle/monte} + 0.3 \times E_{z, Basso/Alto} + I_x$ ) .....	304
7.1.2.2.1	Serbatoio pieno .....	304
7.1.2.2.2	Serbatoio vuoto .....	305
<b>8.</b>	<b>CONCIO B / SEZIONE EMERGENTE (DIGA APPESANTITA – D.M.24/03/1982) .....</b>	<b>306</b>
8.1	VERIFICHE A RIBALTAMENTO E TRASLAZIONE DEL CORPO DIGA .....	306
8.1.1	AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE DI BASE .....	306
8.1.1.1	COMBINAZIONE STATICA ( $1 \times G1 + 1 \times G2 + 1 \times G3$ ) .....	311
8.1.1.2	COMBINAZIONE SISMICA ( $G1 + G2 + G3 + E_{x, valle/monte} + 0.3 \times E_{z, Basso/Alto} + I_x$ ) .....	311
8.1.1.2.1	Serbatoio pieno .....	311
8.1.1.2.2	Serbatoio vuoto .....	313
8.1.2	AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 1-1 .....	314
8.1.2.1	COMBINAZIONE STATICA ( $1 \times G1 + 1 \times G2 + 1 \times G3$ ) .....	318
8.1.2.2	COMBINAZIONE SISMICA ( $G1 + G2 + G3 + E_{x, valle/monte} + 0.3 \times E_{z, Basso/Alto} + I_x$ ) .....	319
8.1.2.2.1	Serbatoio pieno .....	319
8.1.2.2.2	Serbatoio vuoto .....	320
8.1.3	AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 2-2 .....	321
8.1.3.1	COMBINAZIONE STATICA ( $1 \times G1 + 1 \times G2 + 1 \times G3$ ) .....	325
8.1.3.2	COMBINAZIONE SISMICA ( $G1 + G2 + G3 + E_{x, valle/monte} + 0.3 \times E_{z, Basso/Alto} + I_x$ ) .....	326
8.1.3.2.1	Serbatoio pieno .....	326
8.1.3.2.2	Serbatoio vuoto .....	327
<b>9.</b>	<b>CONCIO B / SEZIONE EMERGENTE (DIGA ESISTENTE – D.M.24/03/1982) .....</b>	<b>328</b>
9.1	VERIFICHE A RIBALTAMENTO E TRASLAZIONE DEL CORPO DIGA .....	328
9.1.1	AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE DI BASE .....	328
9.1.1.1	COMBINAZIONE STATICA ( $1 \times G1 + 1 \times G2 + 1 \times G3$ ) .....	333
9.1.1.2	COMBINAZIONE SISMICA ( $G1 + G2 + G3 + E_{x, valle/monte} + 0.3 \times E_{z, Basso/Alto} + I_x$ ) .....	333
9.1.1.2.1	Serbatoio pieno .....	333
9.1.1.2.2	Serbatoio vuoto .....	335
9.1.1	AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 1-1 .....	336
9.1.1.1	COMBINAZIONE STATICA ( $1 \times G1 + 1 \times G2 + 1 \times G3$ ) .....	340
9.1.1.2	COMBINAZIONE SISMICA ( $G1 + G2 + G3 + E_{x, valle/monte} + 0.3 \times E_{z, Basso/Alto} + I_x$ ) .....	341
9.1.1.2.1	Serbatoio pieno .....	341
9.1.1.2.2	Serbatoio vuoto .....	342
9.1.2	AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 2-2 .....	343
9.1.2.1	COMBINAZIONE STATICA ( $1 \times G1 + 1 \times G2 + 1 \times G3$ ) .....	347
9.1.2.2	COMBINAZIONE SISMICA ( $G1 + G2 + G3 + E_{x, valle/monte} + 0.3 \times E_{z, Basso/Alto} + I_x$ ) .....	348
9.1.2.2.1	Serbatoio pieno .....	348

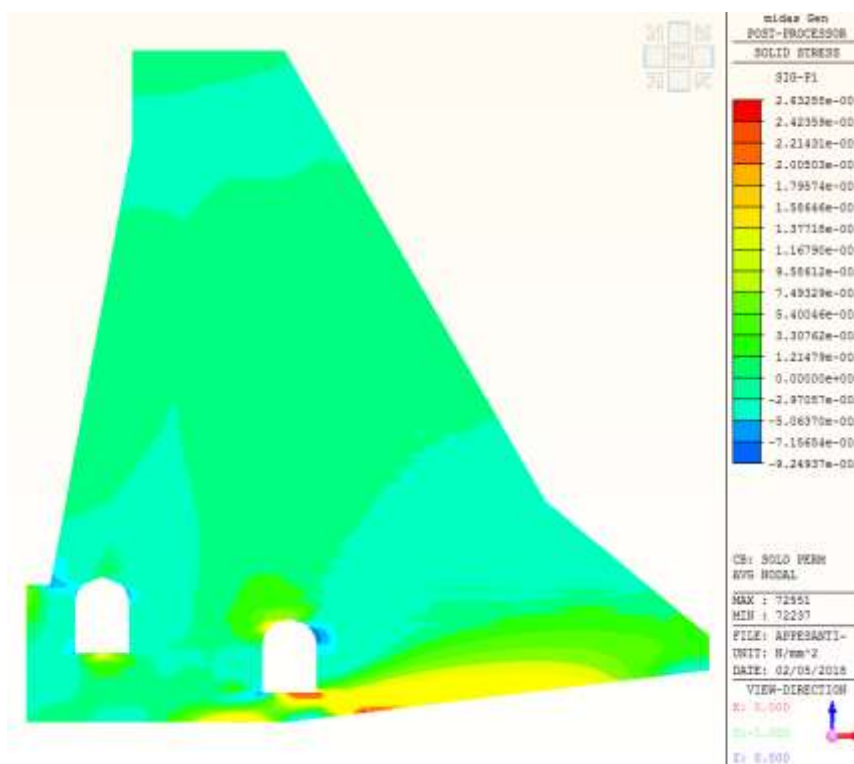
9.1.2.2.2 Serbatoio vuoto .....349

**1. CONCIO A / SEZIONE TRACIMABILE (DIGA APPESANTITA – D.M.26/06/2014)**

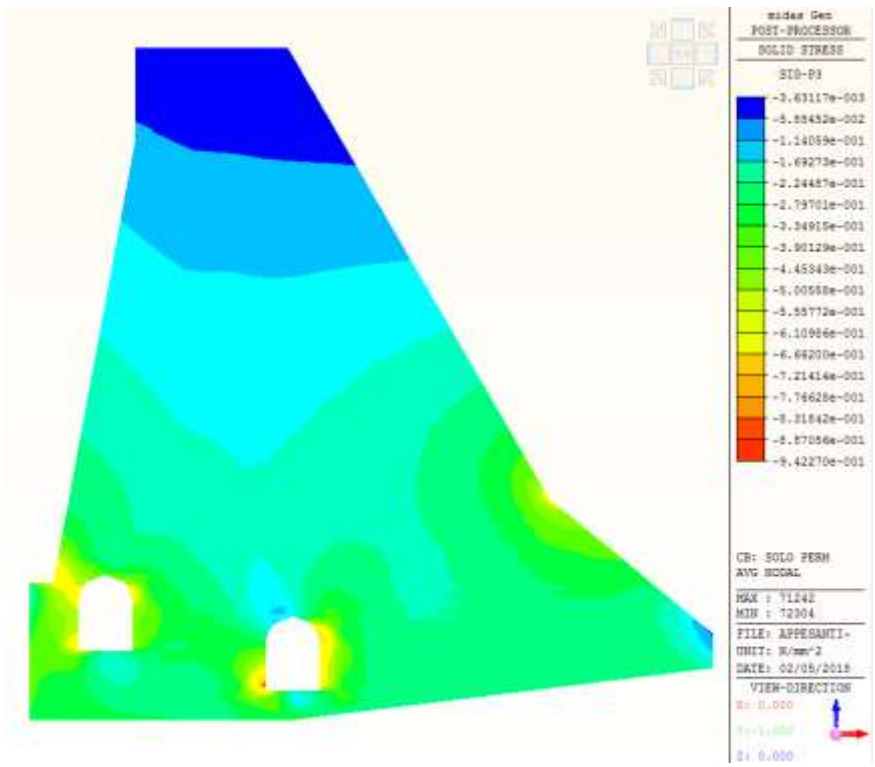
**1.1 VERIFICHE SFORZI DEL CORPO DIGA**

**1.1.1 Combinazioni SLE**

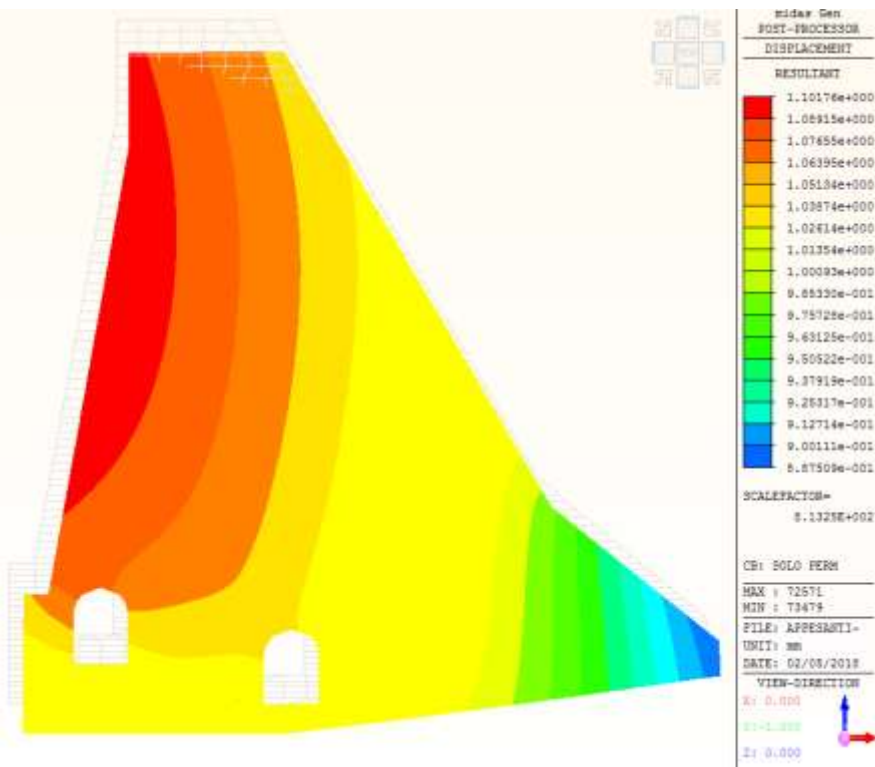
*1.1.1.1 Cmb.1: G1+G2+G3 (Rara)*



*Sforzo principale di trazione (MPa)*

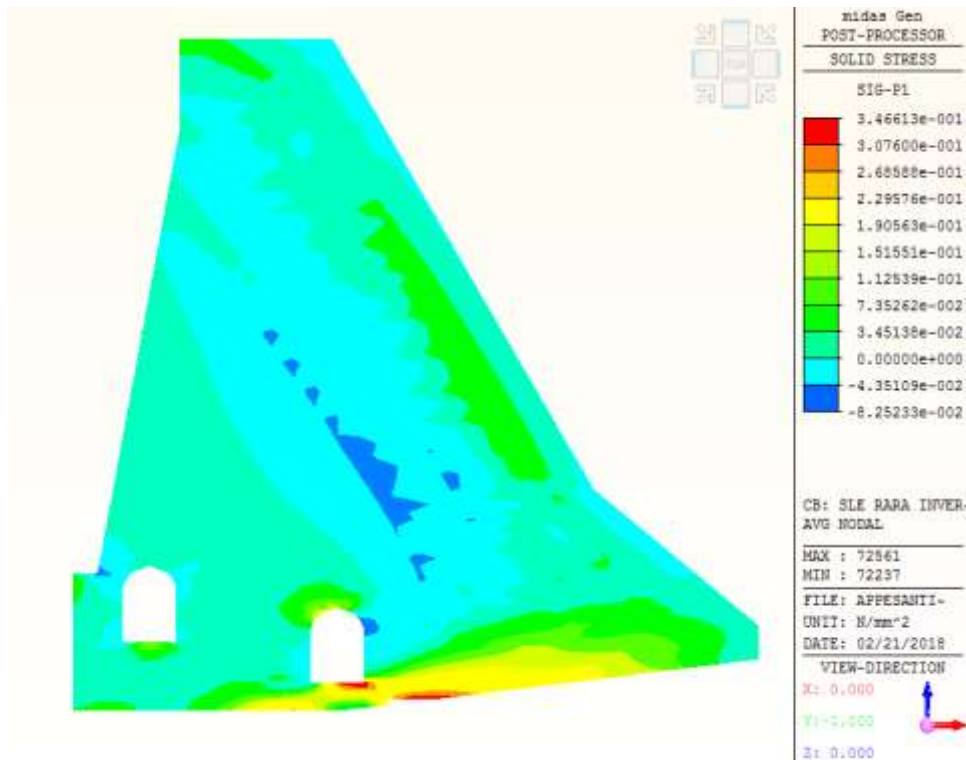


Sforzo principale di compressione (MPa)

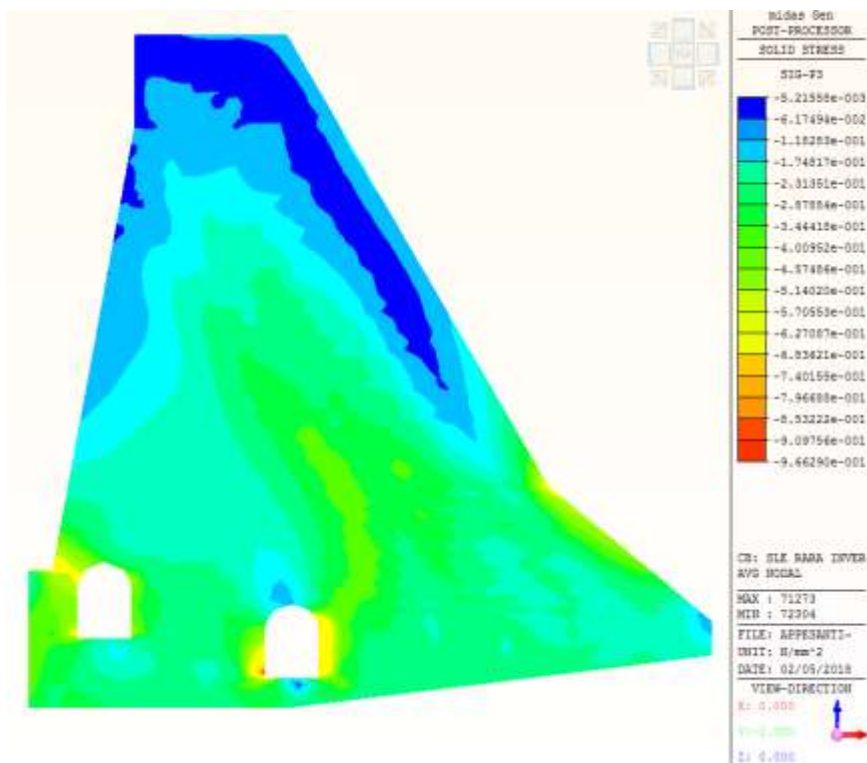


Deformazione risultante (mm)

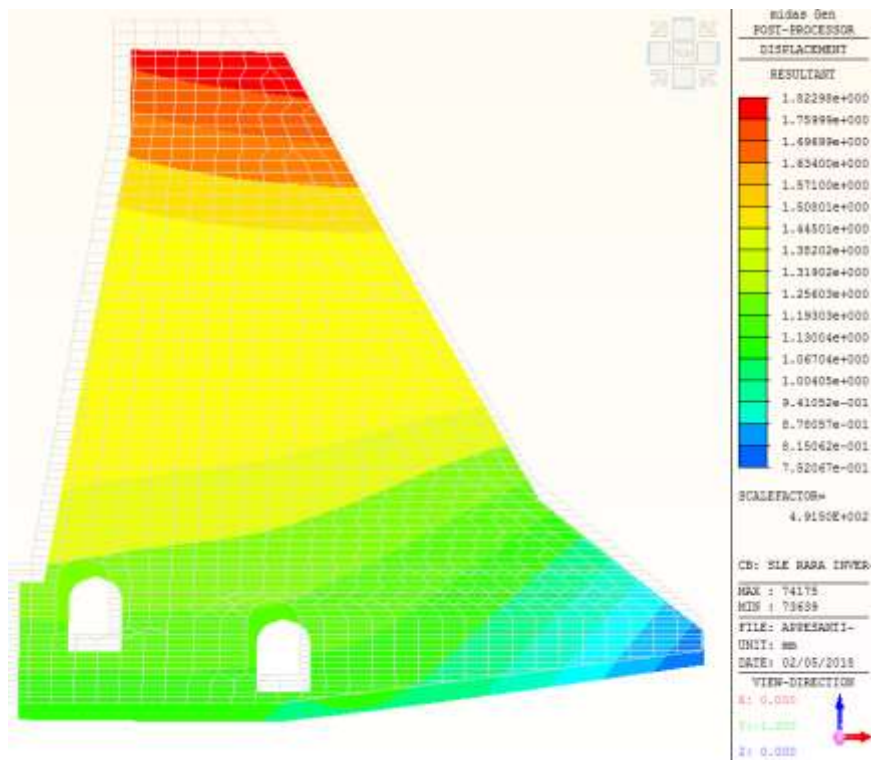
1.1.1.2 Cmb.2:  $G1+G2+G3+Q_{1,inverno}$  (Rara inverno)



Sforzo principale di trazione (MPa)



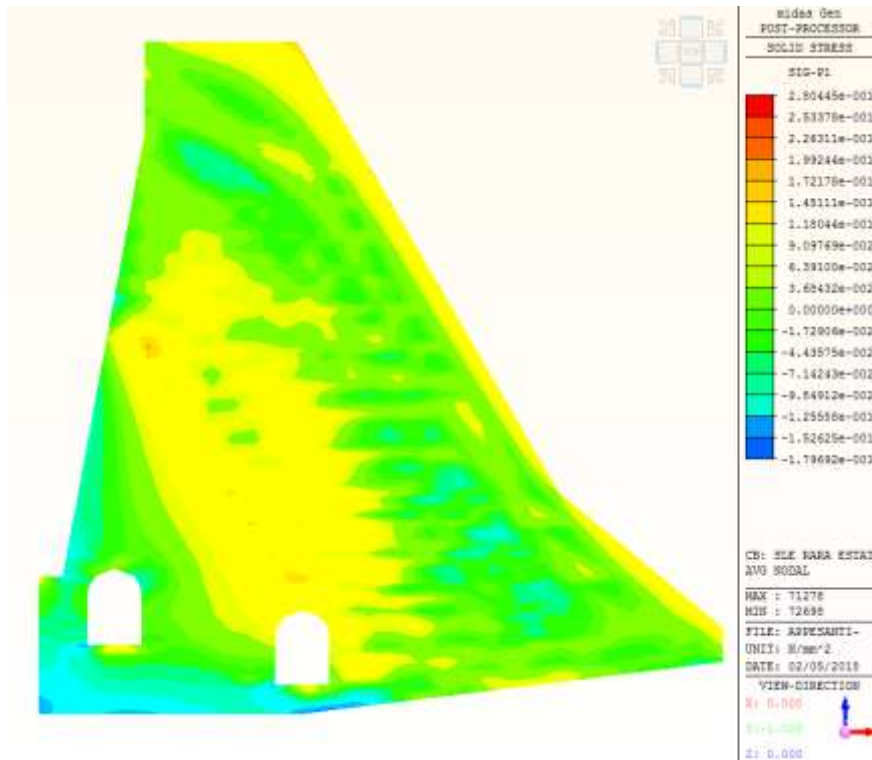
Sforzo principale di compressione (MPa)



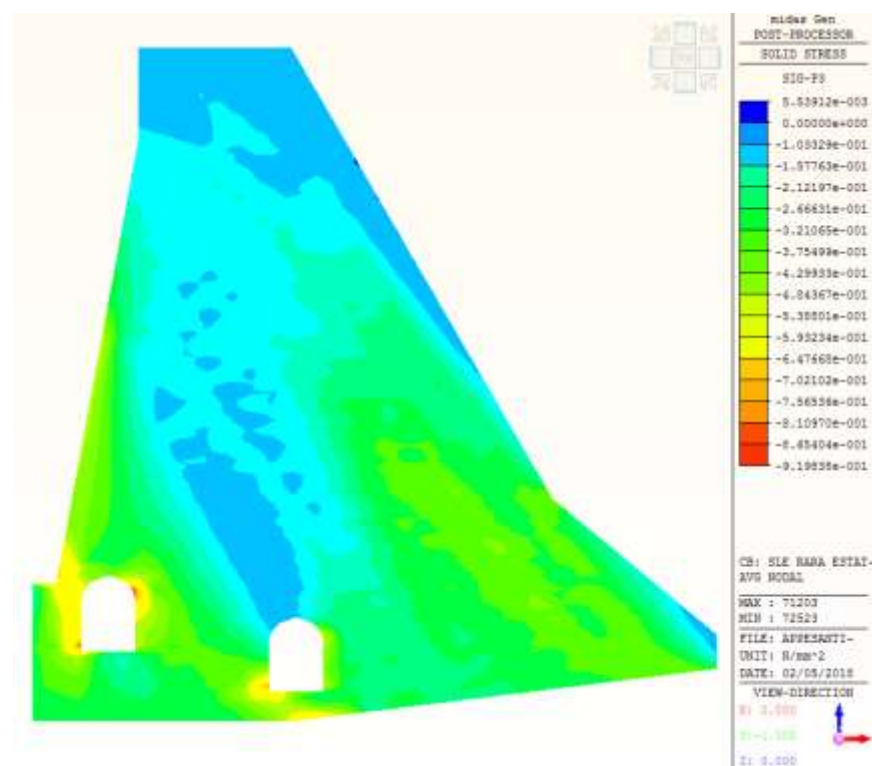
Deformazione risultante (mm)



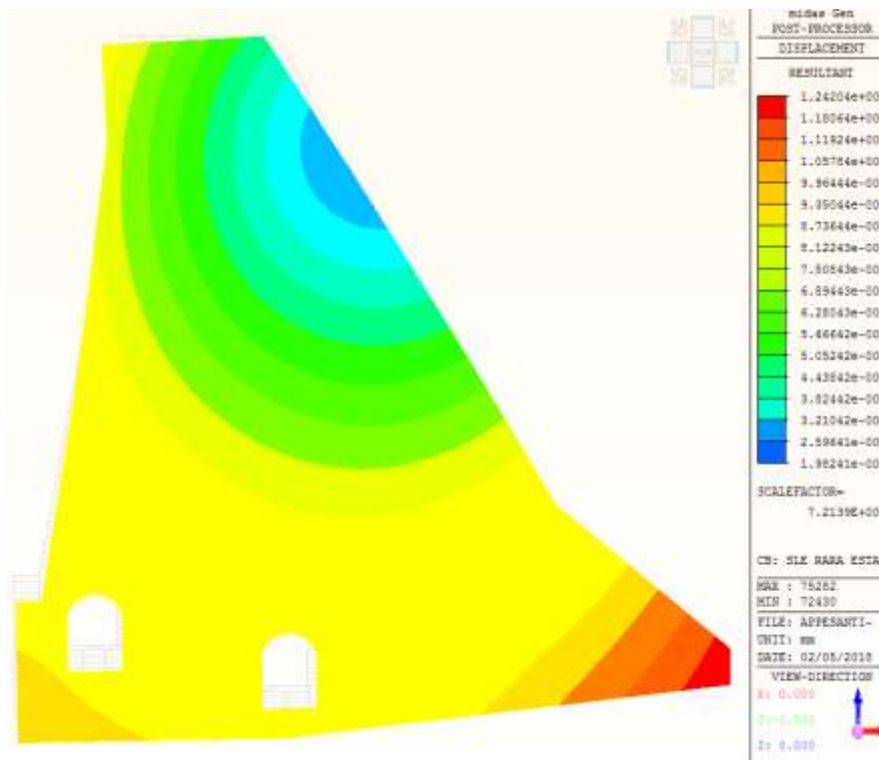
1.1.1.3 Cmb.3:  $G1+G2+G3+Q_{1,estate}$  (Rara estate)



Sforzo principale di trazione (MPa)

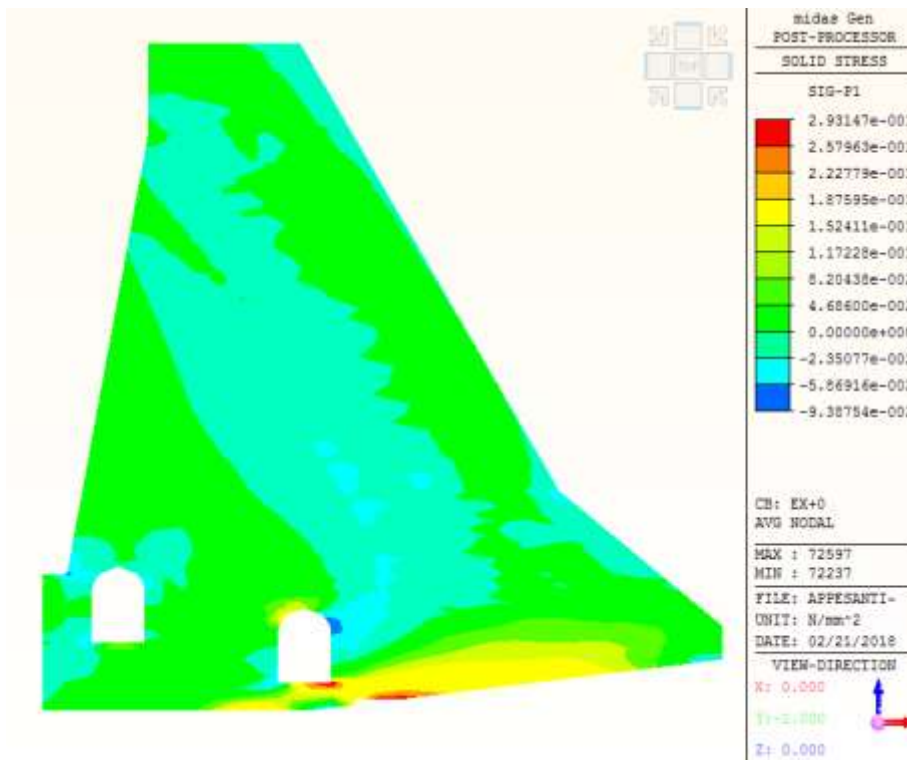


Sforzo principale di compressione (MPa)

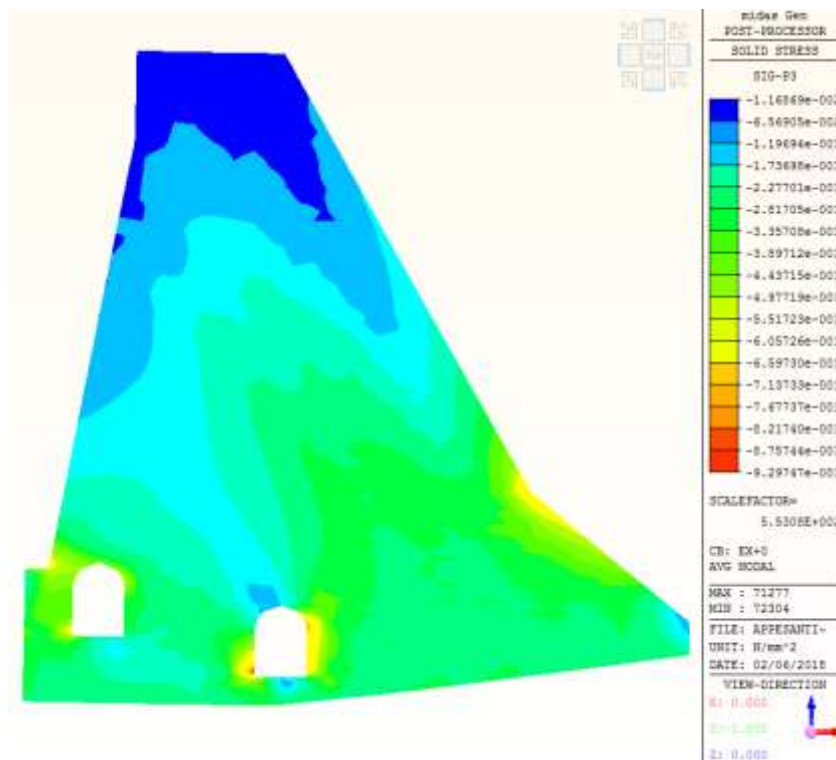


Deformazione risultante (mm)

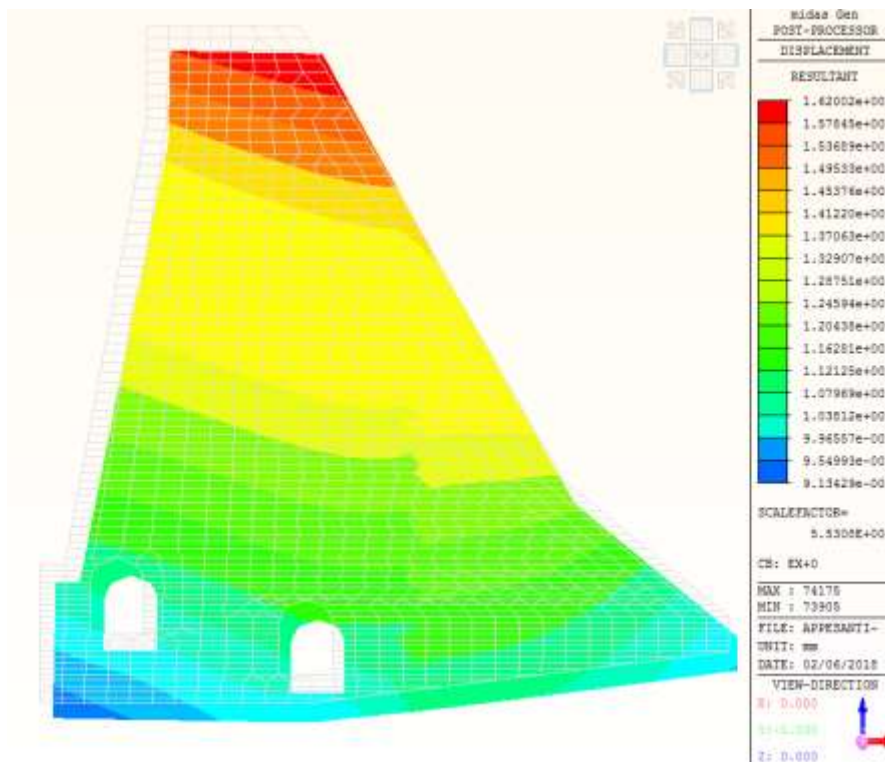
1.1.1.4 Cmb.4 (SLO):  $G1+G2+G3+E_{x,SLO} + 0,3E_{z,SLO} + I_{x,SLO}+0,5\times Q_{I,inverno}$  (Sismica SLO inverno)



Sforzo principale di trazione (MPa)

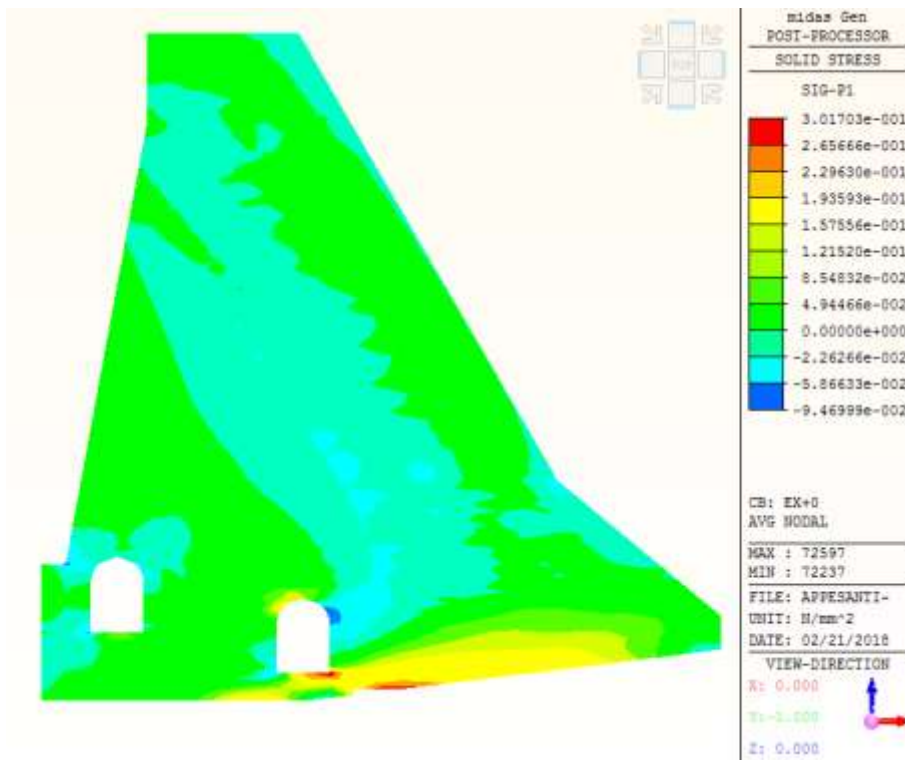


Sforzo principale di compressione (MPa)

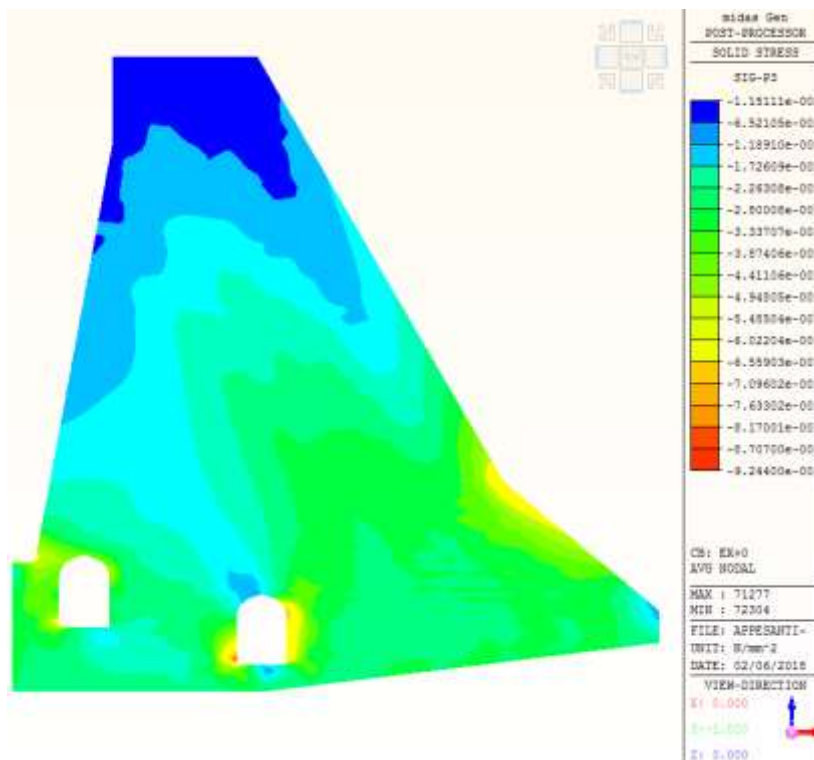


Deformazione risultante (mm)

1.1.1.5 Cmb.4(SLD):  $G1+G2+G3+Ex,SLD +0,3Ez,SLD + Ix,SLD+0,5\times Q1,inverno$  (Sismica SLD inverno)

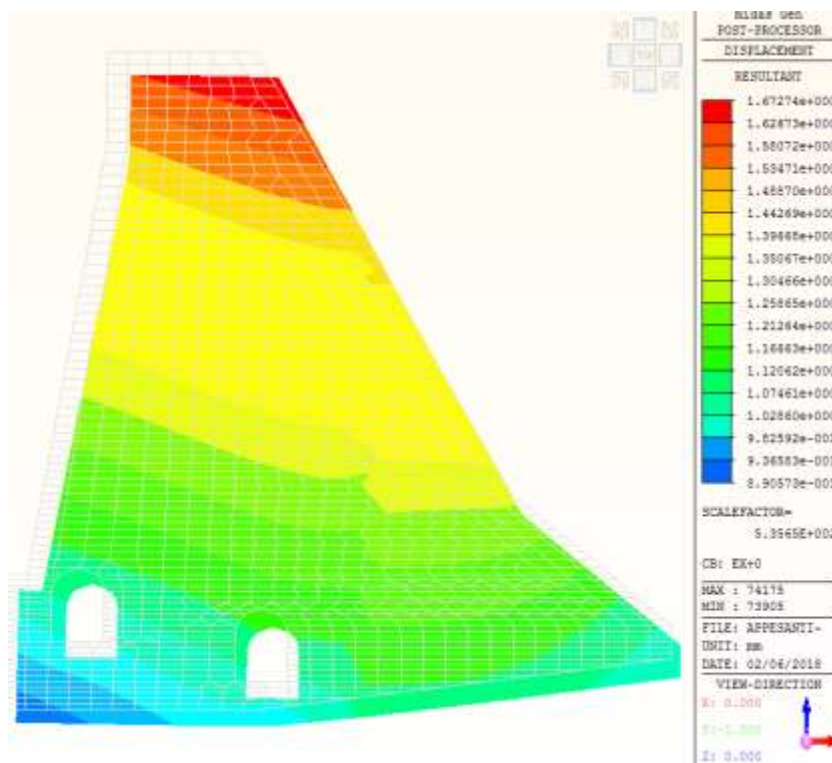


Sforzo principale di trazione (MPa)



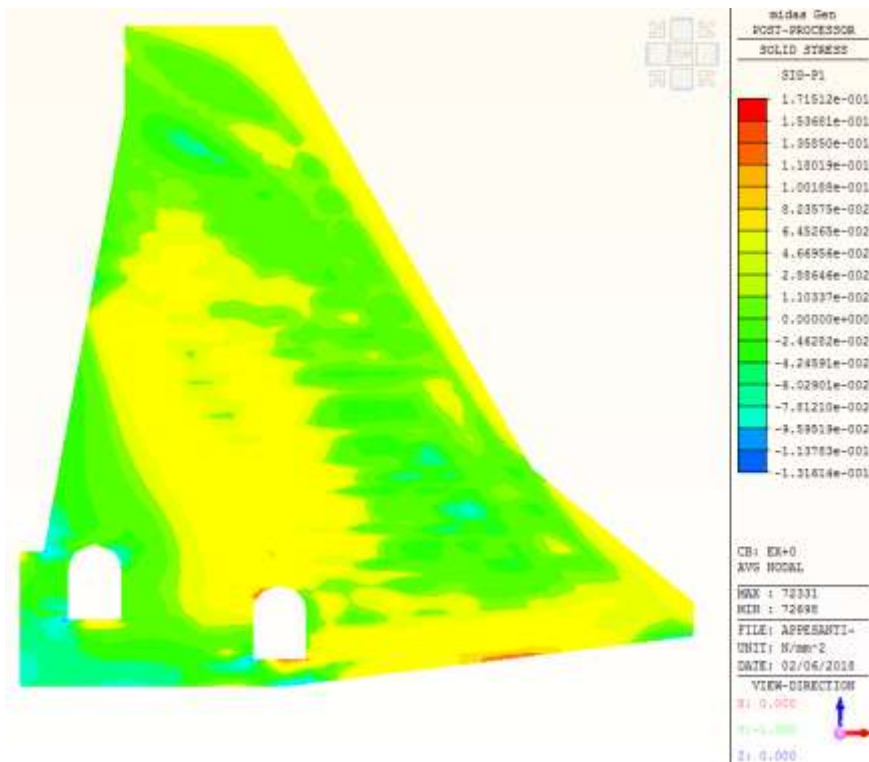
Sforzo principale di compressione (MPa)



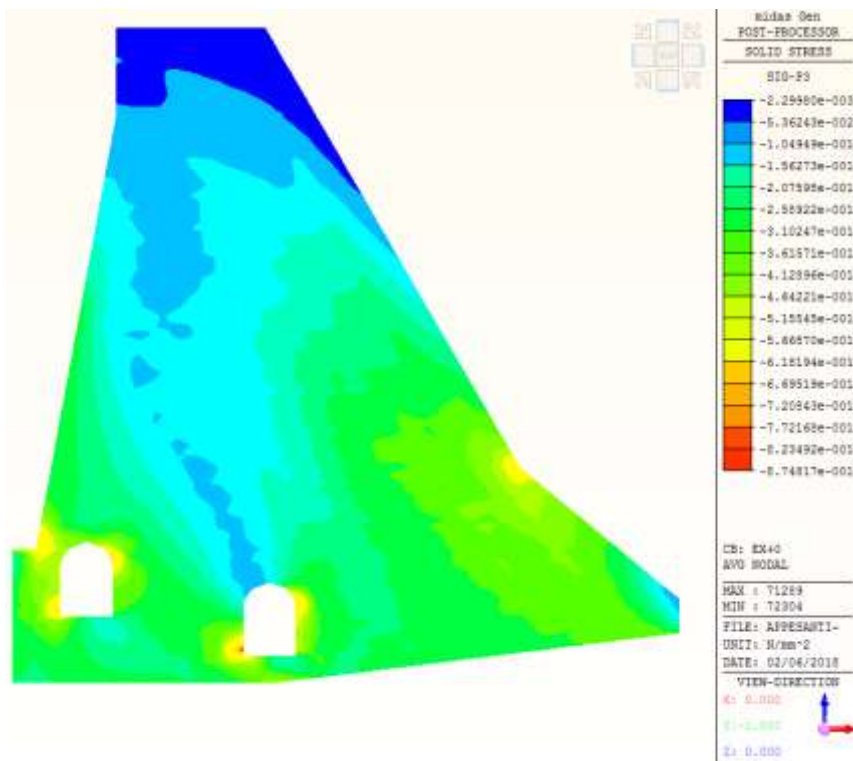


Deformazione risultante (mm)

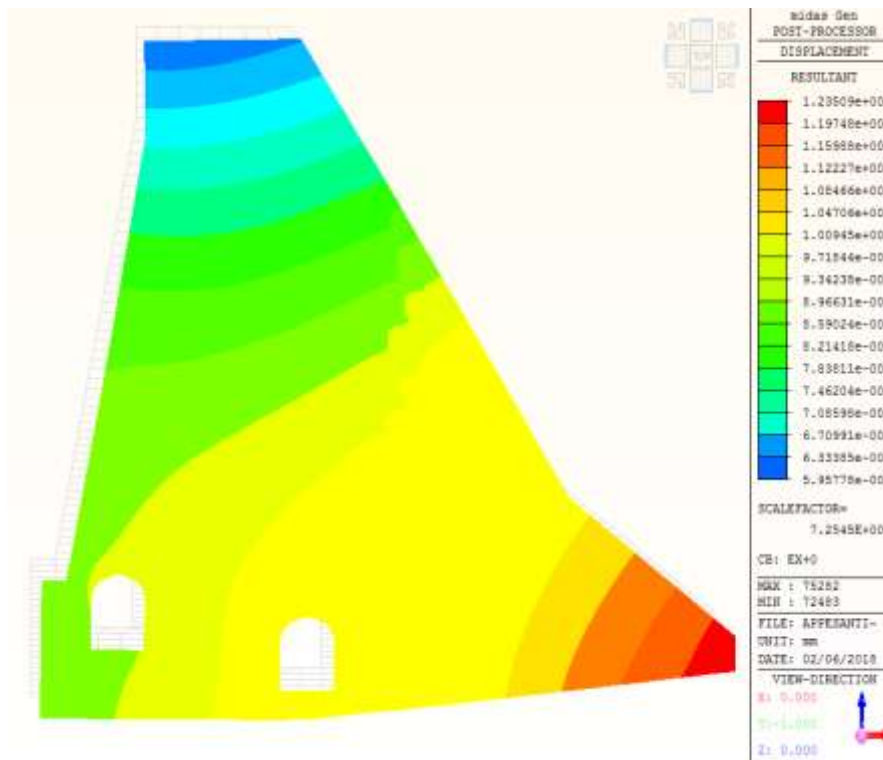
1.1.1.6 Cmb.5(SLO):  $G1+G2+G3+E_{x,SLO} + 0,3E_{z,SLO} + I_{x,SLO} + 0,5 \times Q_{1,estate}$  (Sismica SLO estate)



Sfuerzo principale di trazione (MPa)



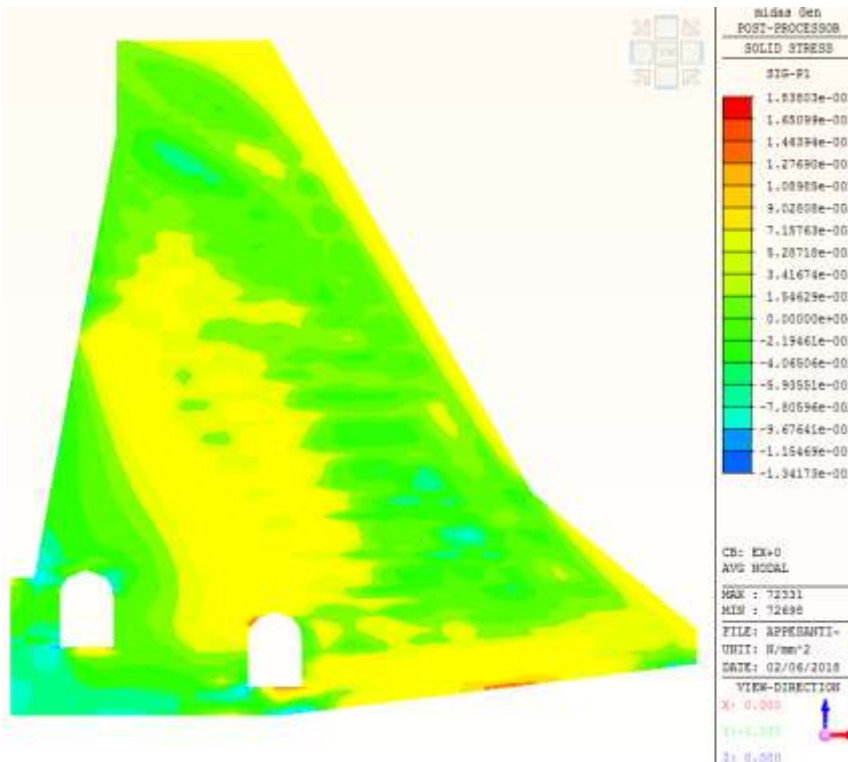
Sfuerzo principale di compressione (MPa)



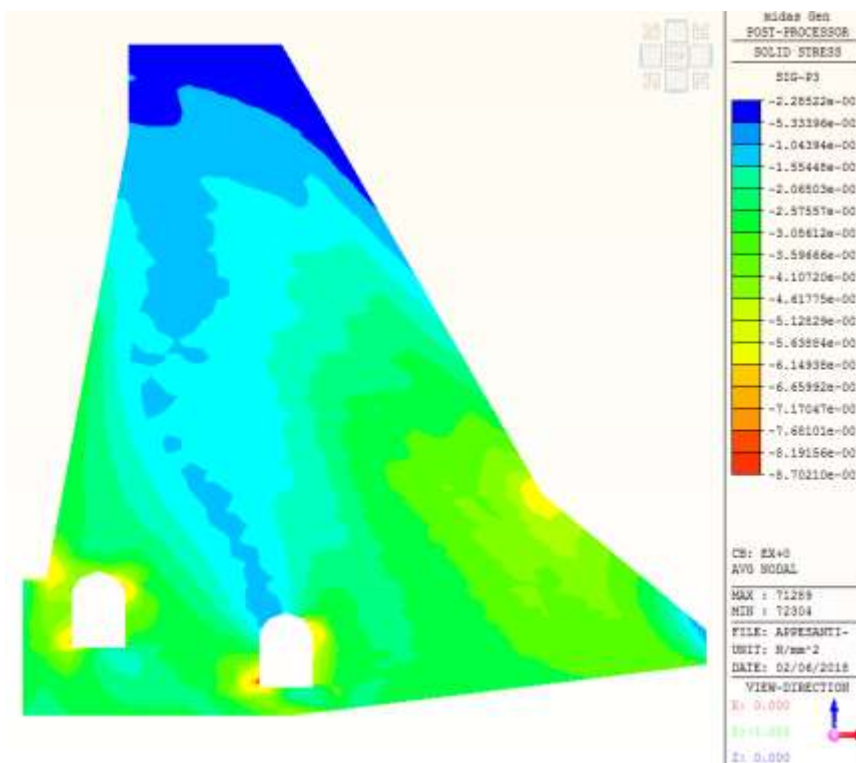
Deformazione risultante (mm)



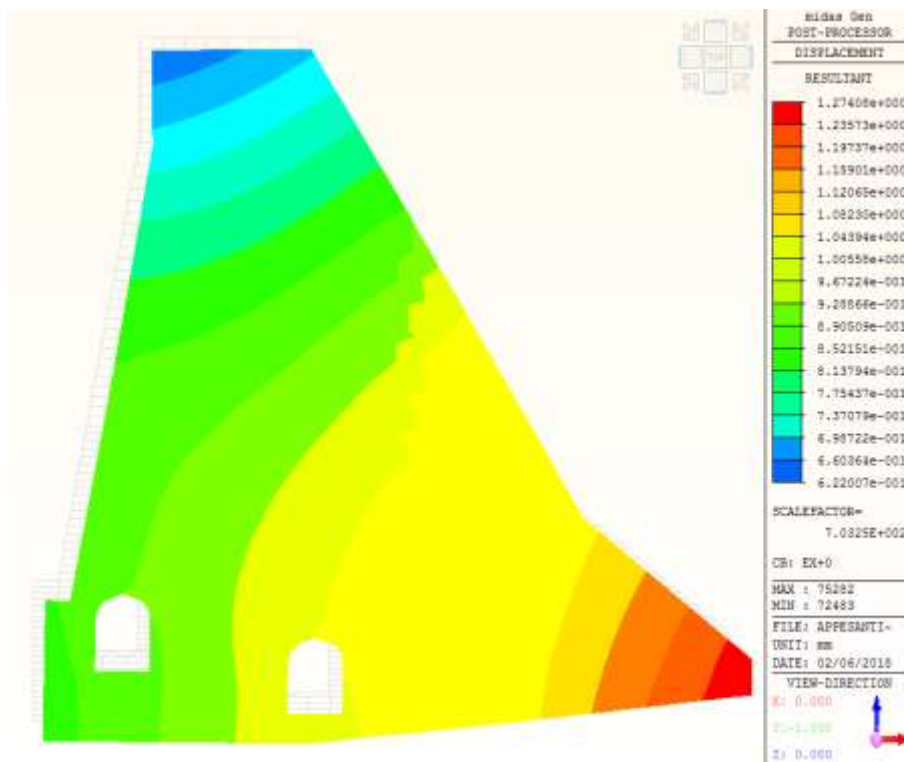
1.1.1.7 Cmb.5(SLD):  $G1+G2+G3+E_{x,SLD} + 0,3E_{z,SLD} + I_{x,SLD} + 0,5 \times Q_{1,estate}$  (Sismica SLD estate)



Sforzo principale di trazione (MPa)

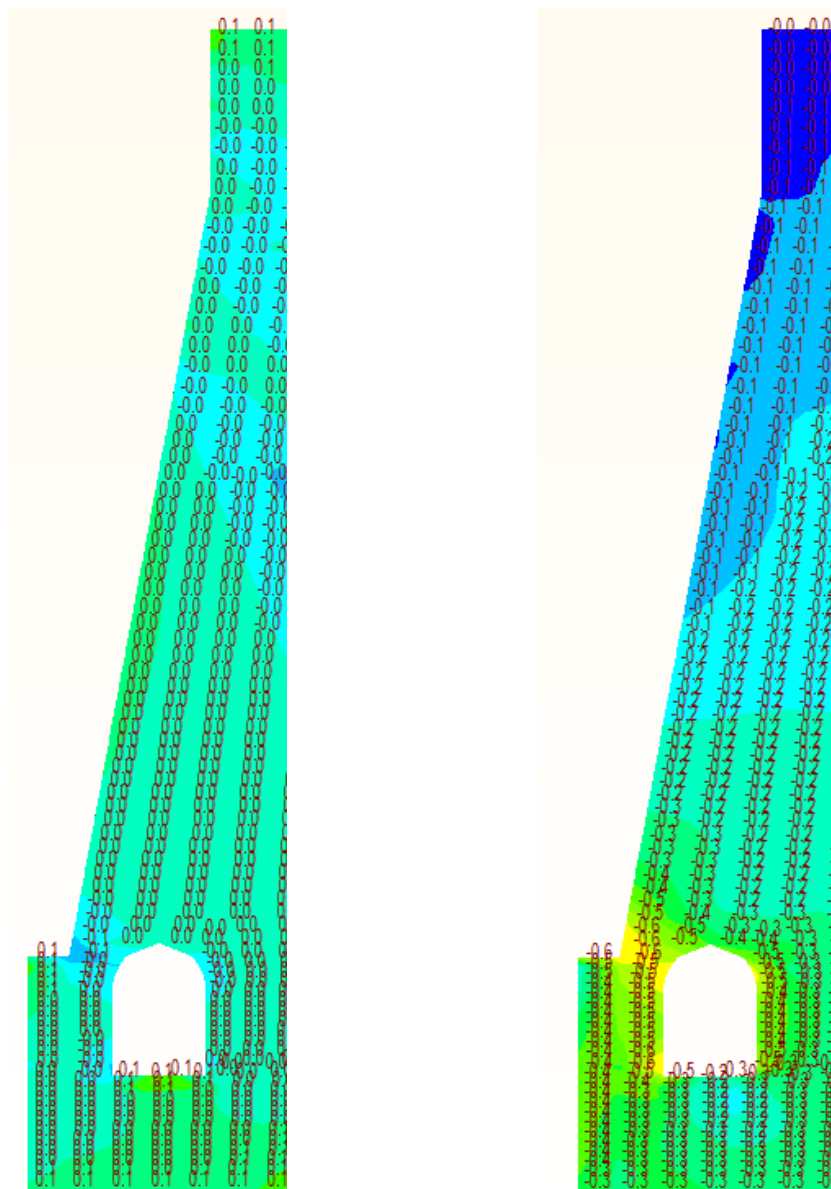


Sforzo principale di compressione (MPa)



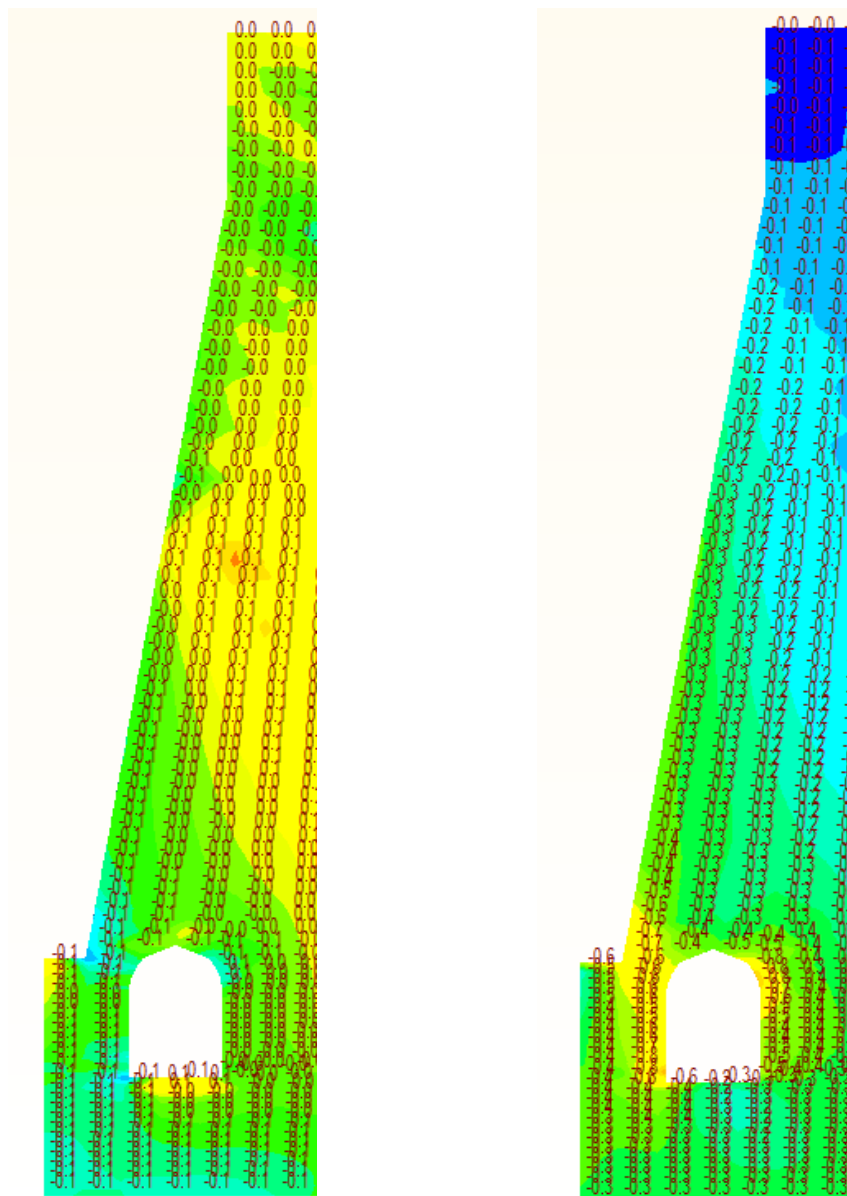
Deformazione risultante (mm)

1.1.1.8 Cmb.6:  $G1+G2+G3+0,5 \times Q_{1, inverno}$  (Quasi permanente inverno)



A sx. sforzo principale di trazione (MPa) e a dx. sforzo principale di compressione (MPa) sul paramento di monte

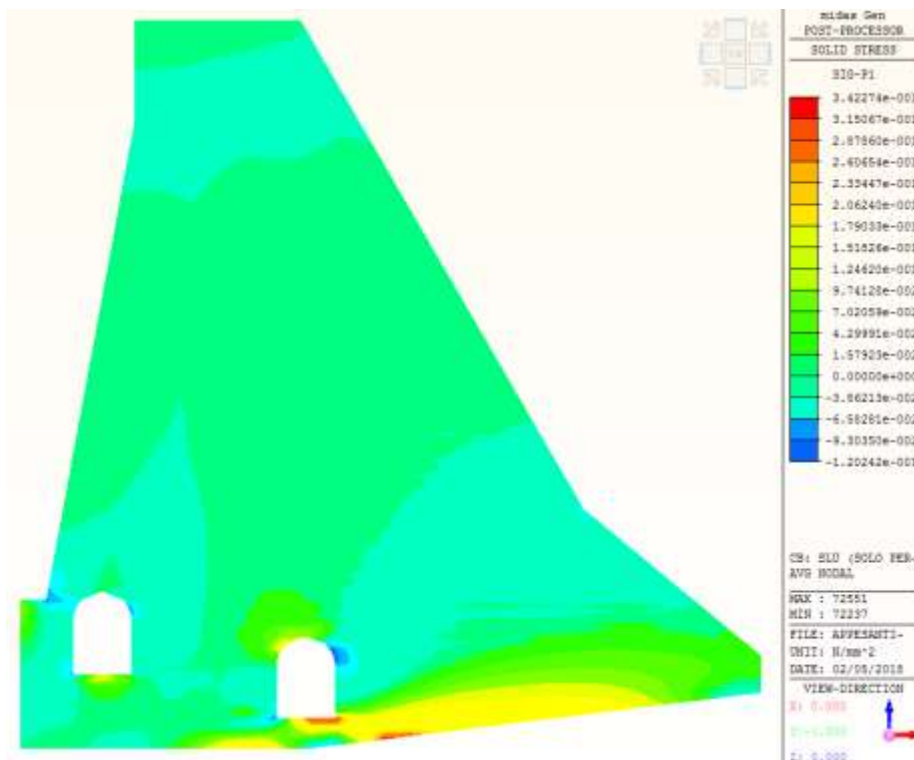
1.1.1.9 Cmb.7:  $G1+G2+G3+0,5 \times Q_{1,estate}$  (Quasi permanente estate)



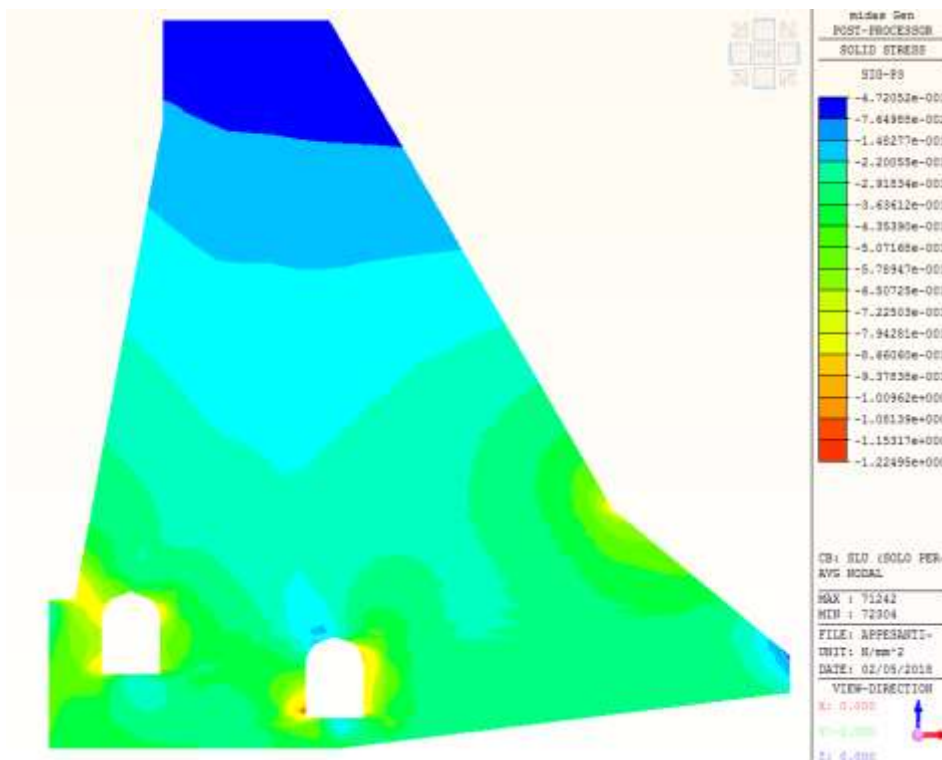
A sx. sforzo principale di trazione (MPa) e a dx. sforzo principale di compressione (MPa) sul paramento di monte

1.1.2 Combinazioni SLU

1.1.2.1 Cmb.1:  $1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3$  (Fondamentale)

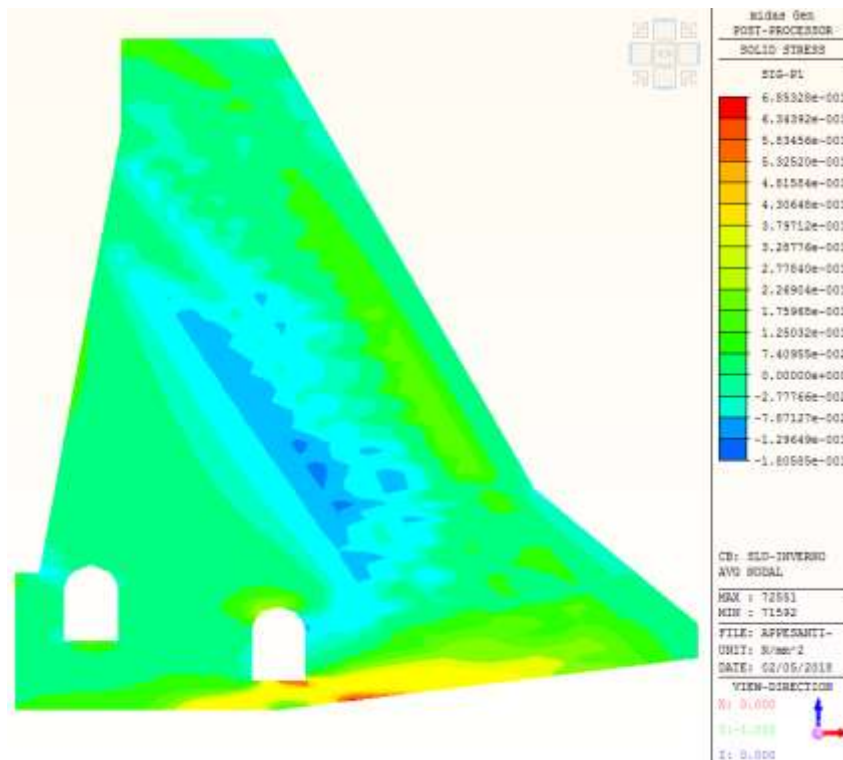


Sforzo principale di trazione (MPa)

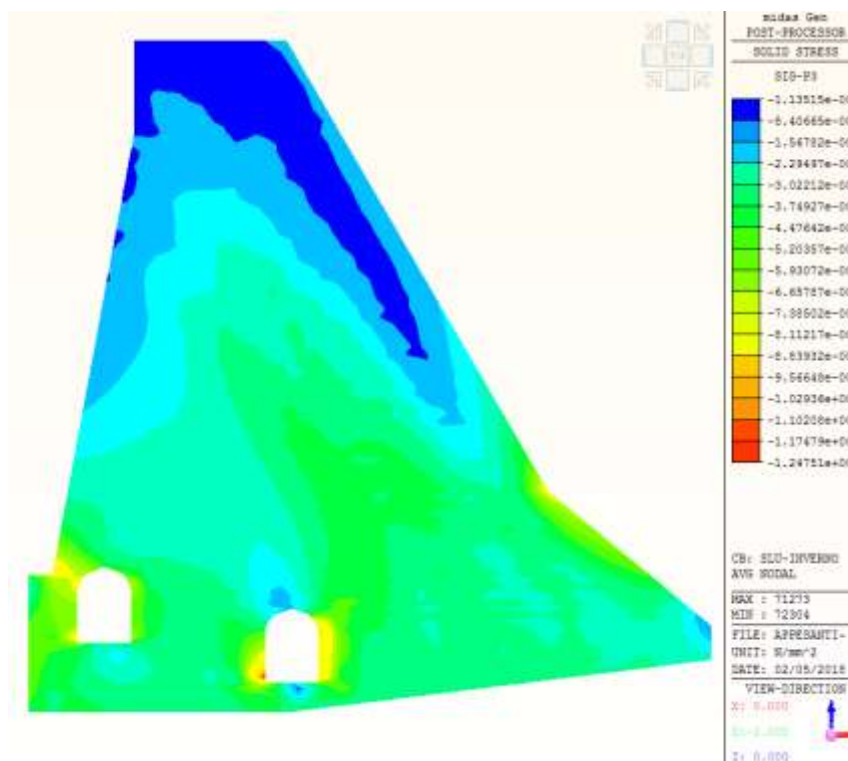


Sforzo principale di compressione (MPa)

1.1.2.2 Cmb.2:  $1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3 + 1,5 \times Q_{1, inverno}$  (Fondamentale inverno)



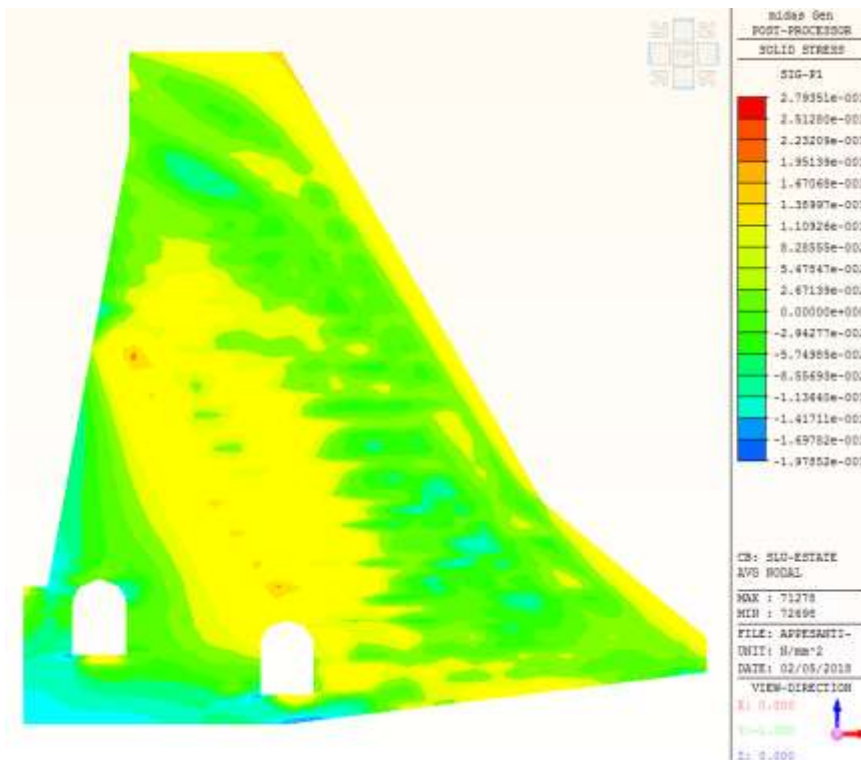
Sforzo principale di trazione (MPa)



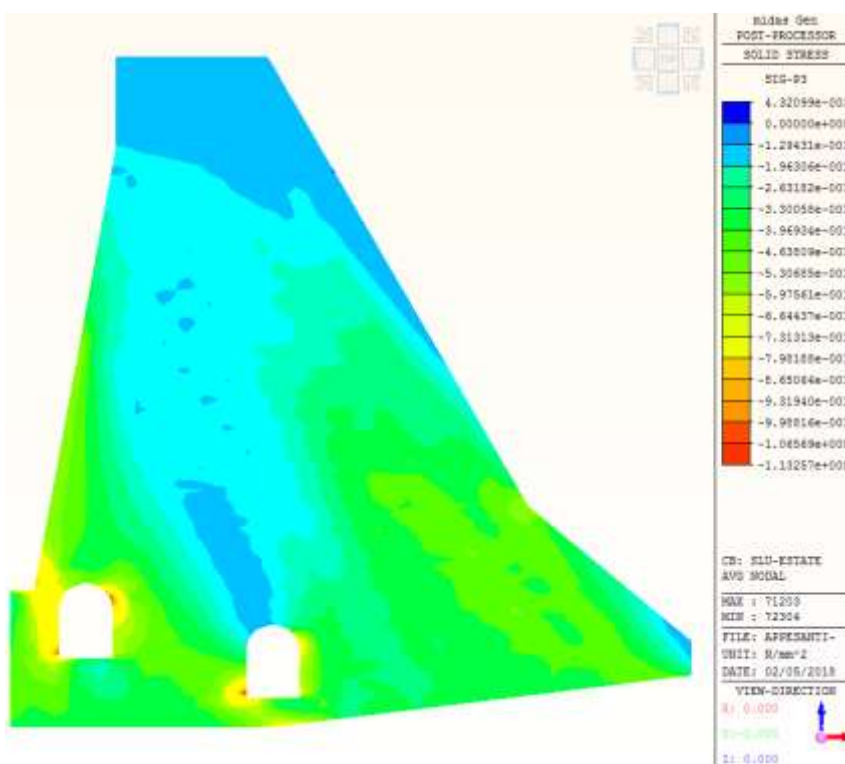
Sforzo principale di compressione (MPa)



1.1.2.3 Cmb.3:  $1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3 + 1,5 \times Q_{1,estate}$  (Fondamentale estate)

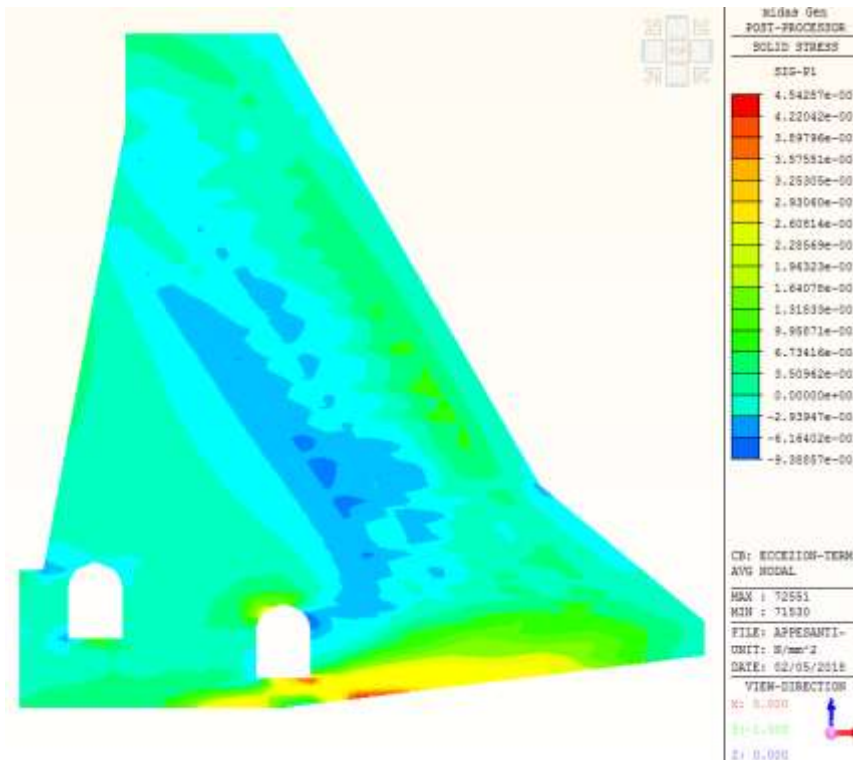


Sforzo principale di trazione (MPa)

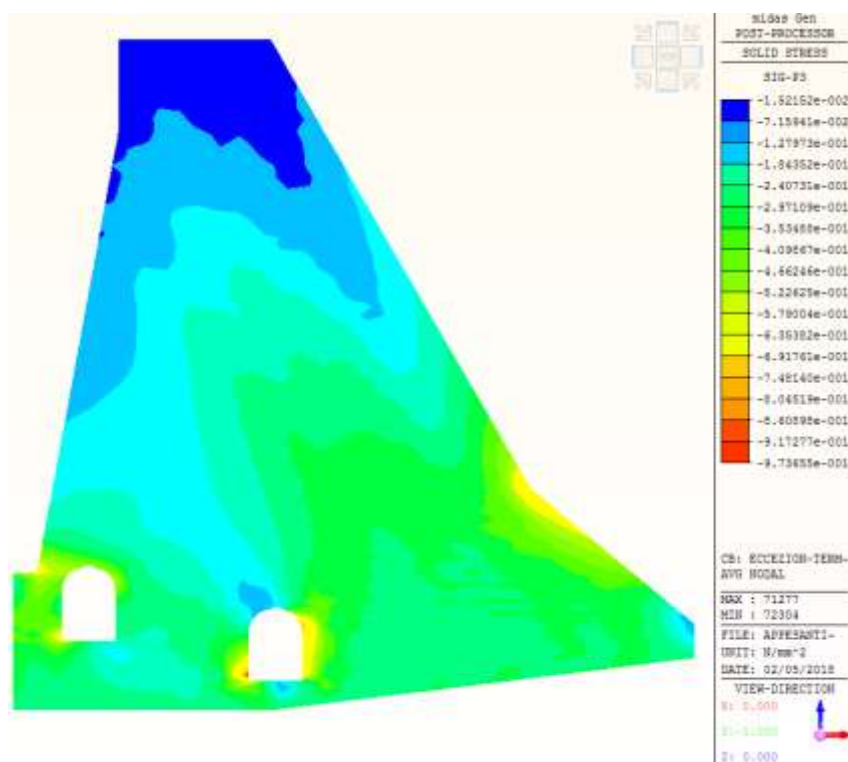


Sforzo principale di compressione (MPa)

1.1.2.4 Cmb.4:  $G1+G3+A+0,5 \times Q_{1,inverno}$  (Eccezionale inverno)



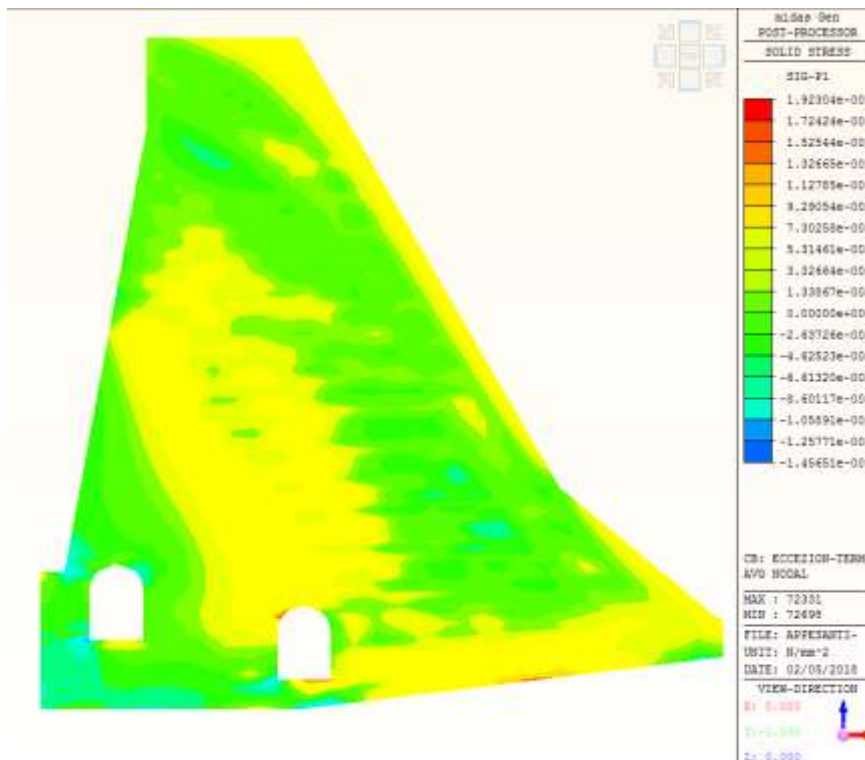
Sforzo principale di trazione (MPa)



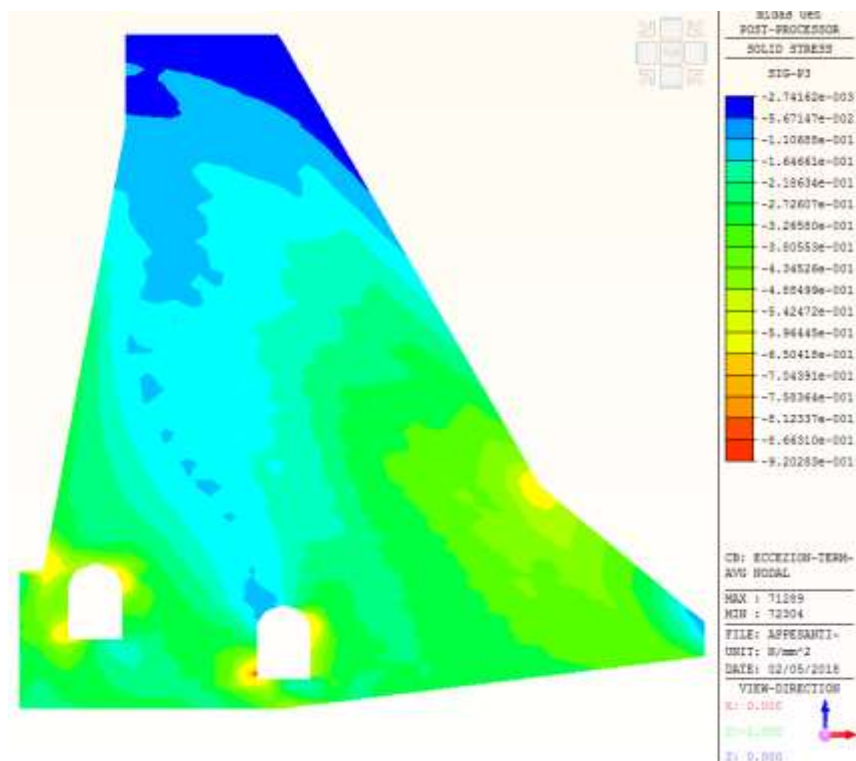
Sforzo principale di compressione (MPa)



1.1.2.5 Cmb.5:  $G1+G3+A+0,5 \times Q_{1,estate}$  (Eccezionale estate)

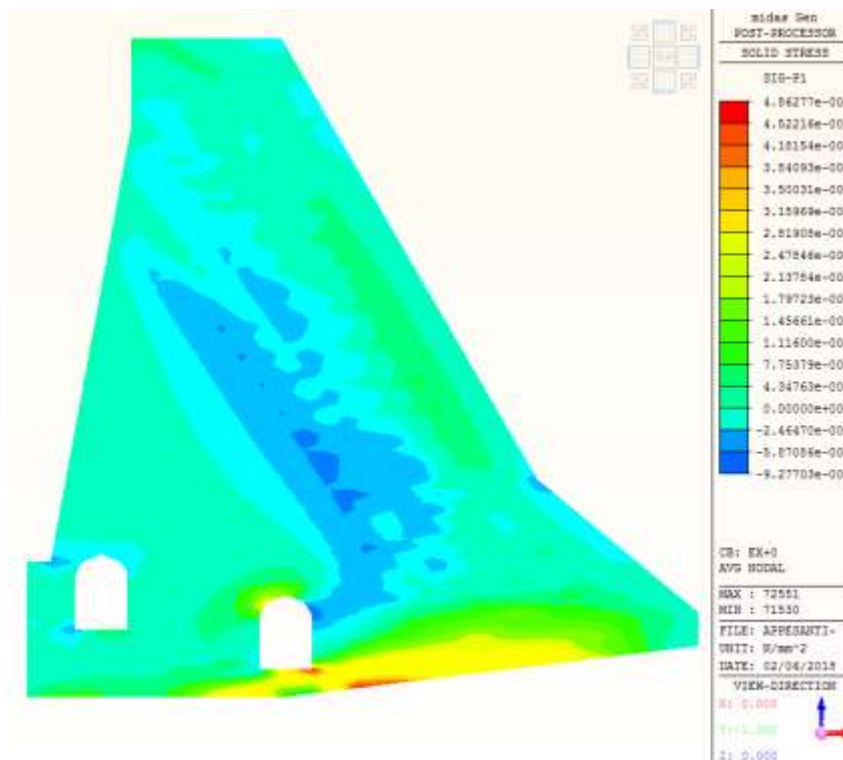


Sforzo principale di trazione (MPa)

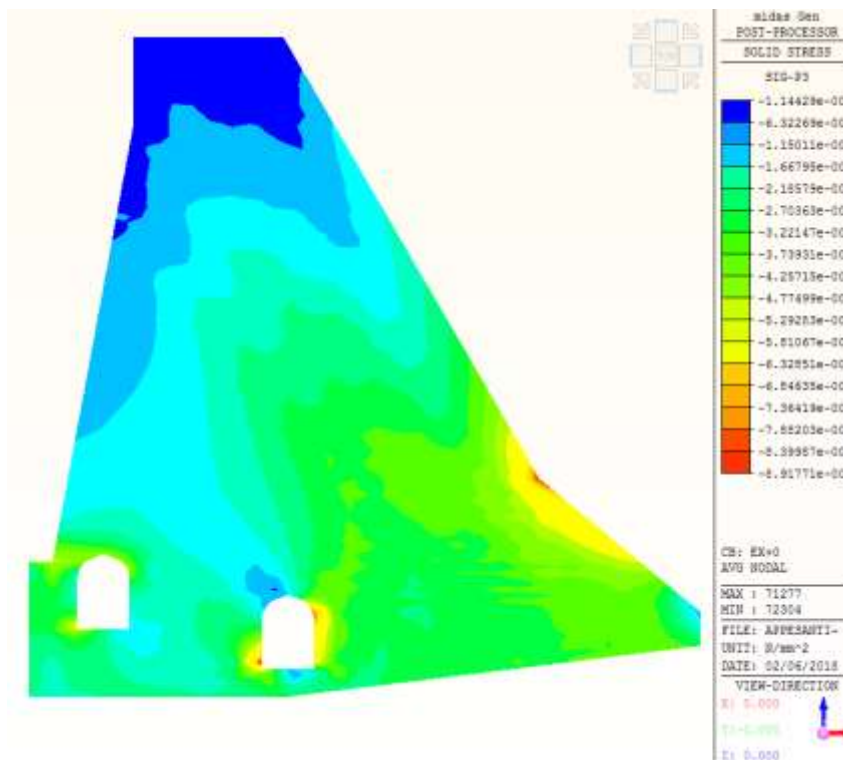


Sforzo principale di compressione (MPa)

1.1.2.6 Cmb.6 (SLV):  $G1+G3+Ex,SLV+0,3Ez,SLV + Ix,SLV + 0,5 \times Q1, inverno$  (Sismica SLV inverno)

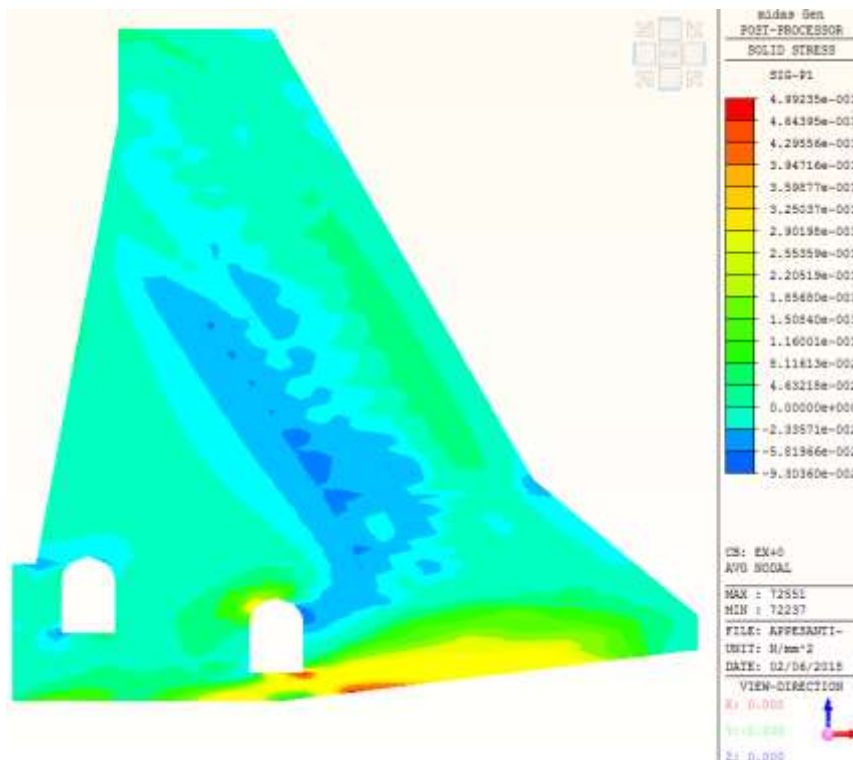


Sforzo principale di trazione (MPa)

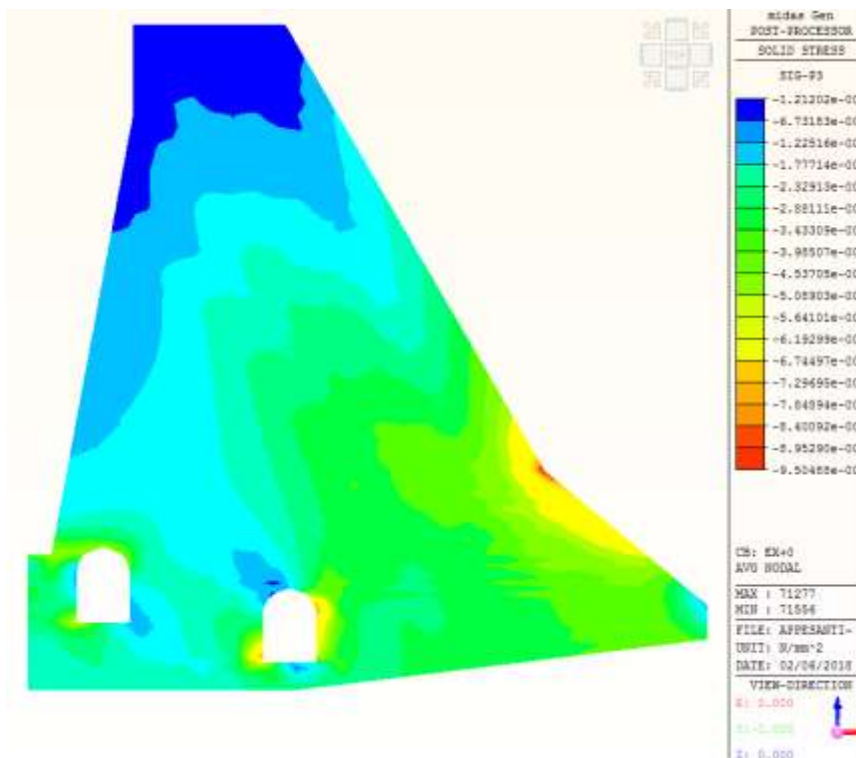


Sforzo principale di compressione (MPa)

1.1.2.7 Cmb.6 (SLC):  $G1+G3+Ex,SLC+0,3Ez,SLC + Ix,SLC +0,5 \times Q1,inverno$  (Sismica SLC inverno)

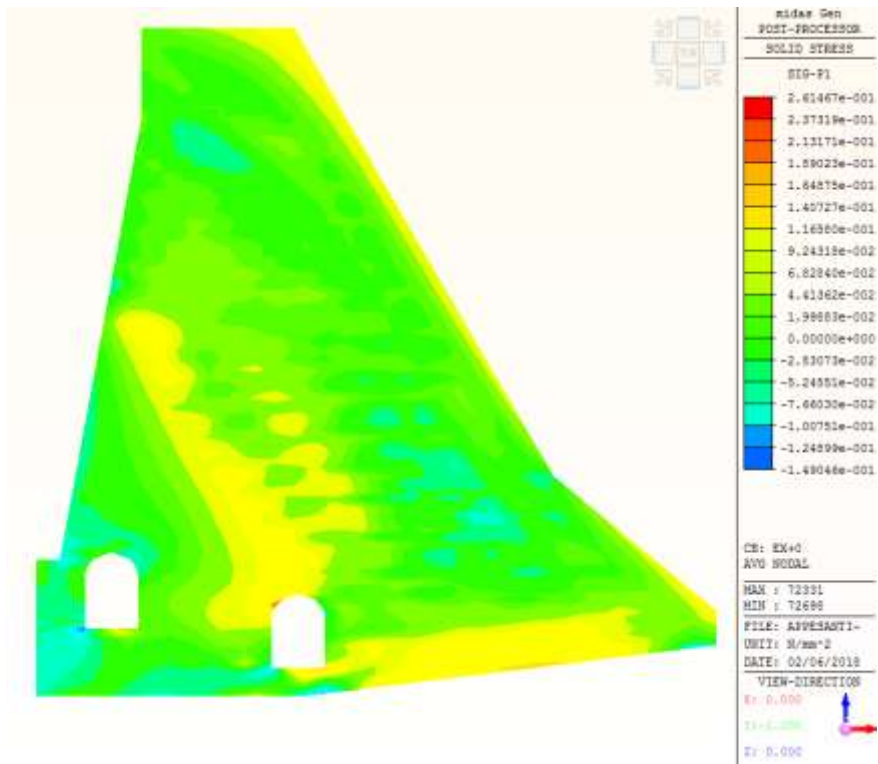


Sforzo principale di trazione (MPa)

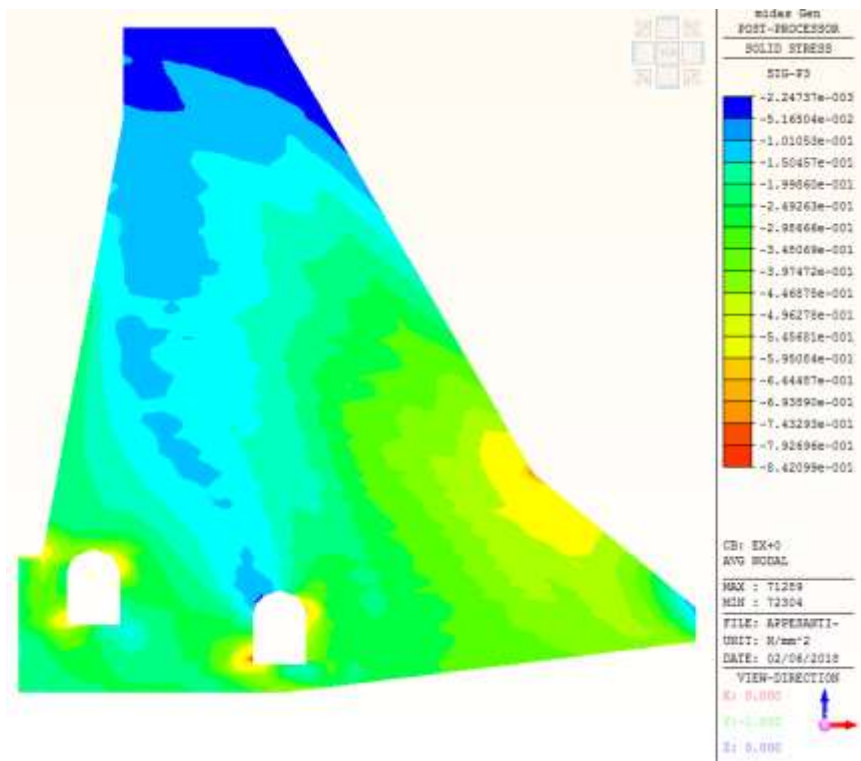


Sforzo principale di compressione (MPa)

1.1.2.8 Cmb.7 (SLV):  $G1+G3+Ex,SLV+0,3Ez,SLV + Ix,SLV + 0,5 \times Q1,estate$  (Sismica SLV estate)



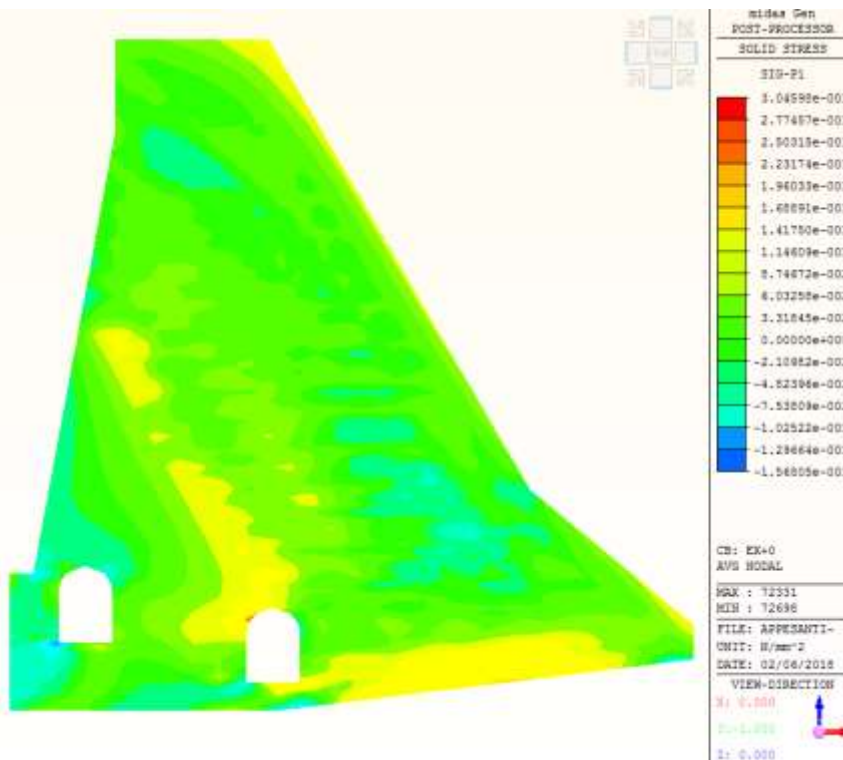
Sforzo principale di trazione (MPa)



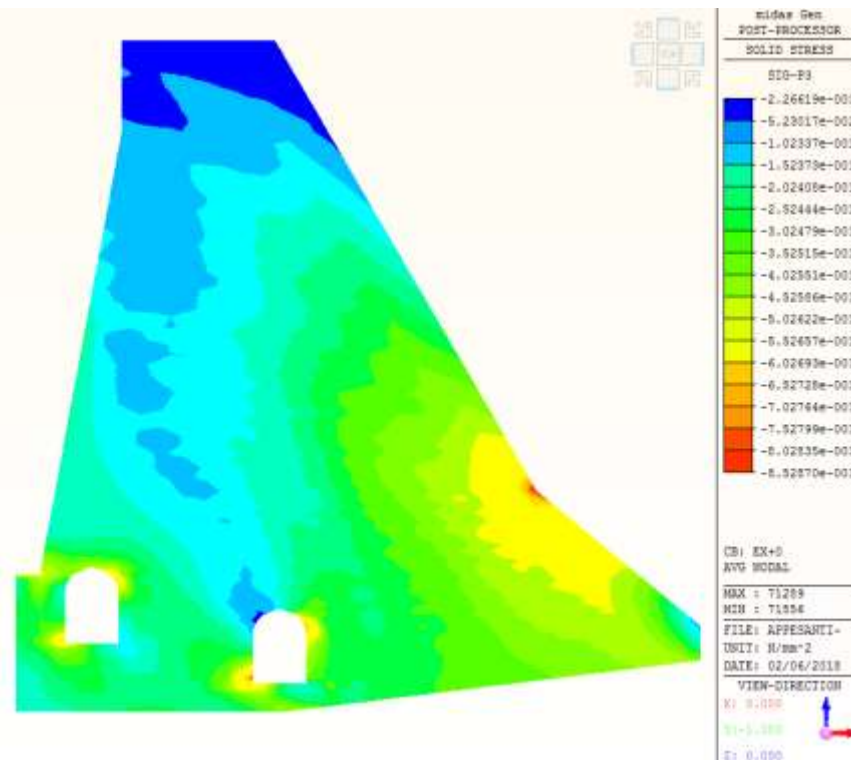
Sforzo principale di compressione (MPa)



1.1.2.9 Cmb.7 (SLC):  $G1+G3+Ex,SLC+0,3Ez,SLC + Ix,SLC + 0,5 \times Q1,estate$  (Sismica SLC estate)



Sfuerzo principale di trazione (MPa)

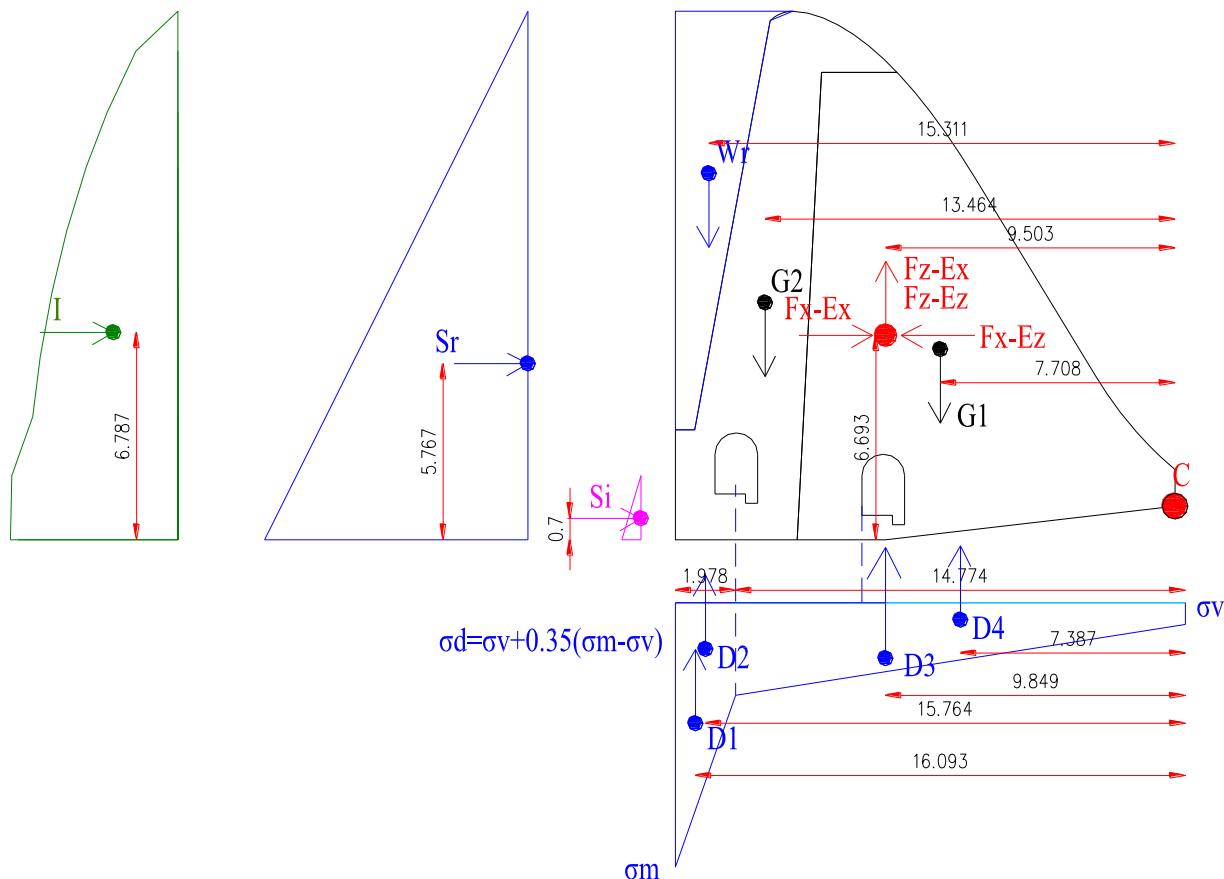


Sfuerzo principale di compressione (MPa)

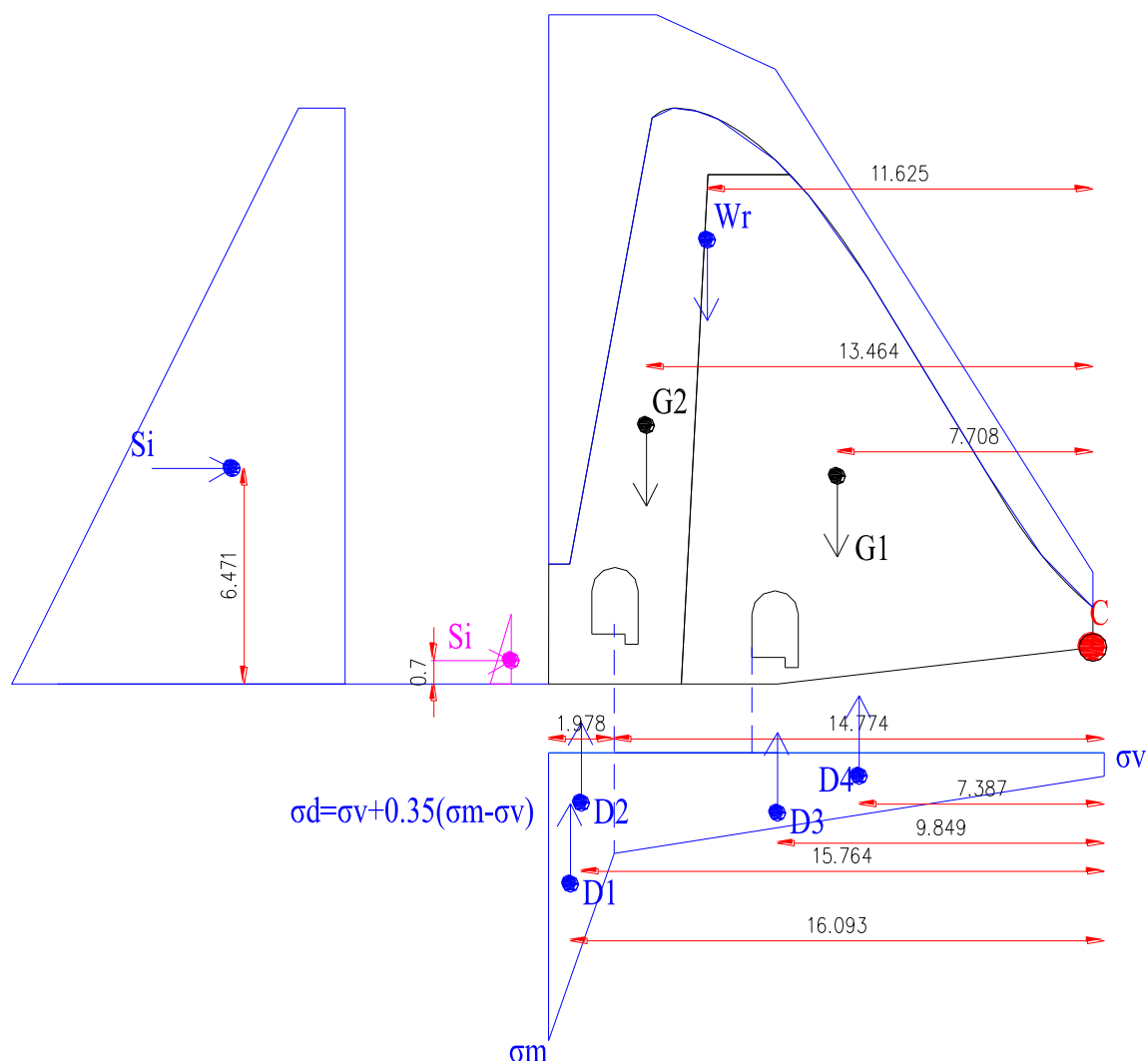
## 1.2 VERIFICHE A RIBALTAMENTO E TRASLAZIONE DEL CORPO DIGA

### 1.2.1 AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE DI BASE

Le verifiche sono condotte su una striscia di diga appesantita di larghezza 1 m:



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massima regolazione per le verifiche in corrispondenza della sezione di base



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massimo invaso (Combinazione eccezionale) per le verifiche in corrispondenza della sezione di base

Le verifiche a ribaltamento e traslazione sono state condotte a favore di sicurezza considerando l'andamento delle sottopressioni lineare tra il nuovo dreni realizzato a monte e la pressione di valle, senza quindi mettere in conto l'ulteriore contributo di riduzione delle sottopressioni dovuto alla presenza del dreni esistente nel corpo diga di valle. Infine nelle verifiche a traslazione non è stato messo in conto a favore di sicurezza il contributo positivo dovuto alla pendenza esistente (in leggera salita da monte verso valle) sul contatto tra il corpo diga di valle e la roccia di fondazione.

Di seguito si riportano i carichi messi in conto:

Peso proprio

Il peso proprio della sezione trascinabile presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{cls, esist} = 117,5 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 2787 \text{ kN/m} \text{ (peso diga esistente)}$$

$$G_2 = A_c \times \rho_{cls, nuovo} = 53,3 \text{ m}^2 \times 24,00 \text{ kN/m}^3 = 1279 \text{ kN/m} \text{ (peso appesantimento)}$$

$b_{G1} = 7,708$  m (braccio orizzontale peso diga esistente rispetto punto di rotazione)

$b_{G2} = 13,464$  m (braccio orizzontale peso appesantimento rispetto punto di rotazione)

$G_{tot} = G_1 + G_2 = 4066$  kN/m (peso totale diga)

$M_{Gtot} = (G_1 \times b_{G1}) + (G_2 \times b_{G2}) = (2787 \text{ kN/m} \times 7,708 \text{ m}) + (1279 \text{ kN/m} \times 13,464 \text{ m}) = 38702$  kNm/m  
(momento totale stabilizzante)

#### Spinta acqua max regolazione

$H_{max.reg} = 17,3$  m (livello acqua massima regolazione)

$p_{max} (H=17,3 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max.reg} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 17,3 \text{ m} = 173$  kN/m<sup>2</sup> (pressione acqua alla base)

$S_r = (p_{max} \times H_{max.reg})/2 = (173 \text{ kN/m}^2 \times 17,3 \text{ m})/2 = 1496,5$  kN /m (spinta orizzontale)

$W_r = (A_r \times \rho_w) = 26,2 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 262$  kN/m (peso acqua)

$b_{Wr} = 15,311$  m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{Sr} = 5,767$  m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{Wr} = W_r \times b_{Wr} = 262 \text{ kN/m} \times 15,311 \text{ m} = 4011$  kNm/m (momento stabilizzante)

$M_{Sr} = S_r \times h_{Sr} = 1496,5 \text{ kN/m} \times 5,767 \text{ m} = 8630$  kNm/m (momento instabilizzante)

#### Spinta acqua max invaso

$H_{max.inv} = 20,1$  m (livello acqua massimo invaso)

$p_{max} (H=20,1 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max.inv} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 20,1 \text{ m} = 201$  kN/m<sup>2</sup> (pressione acqua alla base)

$p_{min} (H=2,8 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max.inv} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 2,8 \text{ m} = 28$  kN/m<sup>2</sup> (pressione minima sommità)

$S_i = (p_{max} + p_{min}) \times 17,3 \text{ m} / 2 = (201 + 28) \text{ kN/m}^2 \times 17,3 \text{ m} / 2 = 1981$  kN /m (spinta orizzontale)

$W_i = (A_i \times \rho_w) = 63,0 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 630$  kN/m (peso acqua)

$b_{Wi} = 11,625$  m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{Si} = 6,471$  m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{Wi} = W_r \times b_{Wr} = 630 \text{ kN/m} \times 11,625 \text{ m} = 7324$  kNm/m (momento stabilizzante)

$M_{Si} = S_i \times h_{Si} = 1981 \text{ kN/m} \times 6,471 \text{ m} = 12819$  kNm/m (momento instabilizzante)

#### Spinta interrimento

$H_{max.int} = 2,1$  m (livello interrimento)

$p_{max} (H=2,1 \text{ m}) = \rho_f \times H_{max.int} = 6 \text{ kN/m}^3 \times 2,1 \text{ m} = 12,6$  kN/m<sup>2</sup> (pressione alla base)

$S_i = (p_{max} \times H_{max.int})/2 = (12,6 \text{ kN/m}^2 \times 2,1 \text{ m})/2 = 13,2$  kN /m (spinta orizzontale)

$h_{S_{wi}} = 0,7$  m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)



$$M_{Si} = S_i \times h_{S_{wi}} = 13,2 \text{ kN/m} \times 0,7 \text{ m} = 9,24 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

### Sottopressioni

Nel calcolo delle sottopressioni si considera un livello idrostatico a valle pari a 1,3 m. Tale valore corrisponde all'altezza del calcestruzzo dello scivolo nell'ipotesi che si possa generare infiltrazione all'interno della suola in calcestruzzo dello scivolo. L'acqua che tracima dalla diga viene rilasciata in alveo circa 40 m più a valle della diga, pertanto la pressione idrostatica a valle della diga dovrebbe essere a rigore pari a zero, a meno appunto della presenza di possibili infiltrazioni.

$$H_{\text{max.reg}} = 17,3 \text{ m} \quad (\text{livello acqua massima regolazione})$$

$$\sigma_m (H=17,3 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.reg}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 17,3 \text{ m} = 173 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{pressione acqua alla base a monte})$$

$$\sigma_v (h_v=1,3 \text{ m}) = \rho_w \times h_v = 10 \text{ kN/m}^3 \times 1,3 \text{ m} = 13 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{livello max regolazione})$$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 13 + 0,35 \times (173 - 13 \text{ kN/m}^2) = 69 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{pressione dreno})$$

$$D_1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,978 \text{ m}) / 2 = (173 \text{ kN/m}^2 - 69 \text{ kN/m}^2) \times (1,978 \text{ m}) / 2 = 103 \text{ kN/m}$$

$$D_2 = (\sigma_d) \times (1,978 \text{ m}) = (69 \text{ kN/m}^2) \times (1,978 \text{ m}) = 136 \text{ kN/m}$$

$$D_3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (14,774 \text{ m}) / 2 = (69 - 13 \text{ kN/m}^2) \times (14,774 \text{ m}) / 2 = 414 \text{ kN/m}$$

$$D_4 = (\sigma_v) \times (14,774 \text{ m}) = (13 \text{ kN/m}^2) \times (14,774 \text{ m}) = 192 \text{ kN/m}$$

$$D = D_1 + D_2 + D_3 + D_4 = 103 + 136 + 414 + 192 = 845 \text{ kN/m} \quad (\text{livello max. regolazione})$$

$$b_{D_1} = 16,093 \text{ m} \quad (\text{braccio orizzontale rispetto punto di rotazione})$$

$$b_{D_2} = 15,764 \text{ m} \quad (\text{braccio orizzontale rispetto punto di rotazione})$$

$$b_{D_3} = 9,85 \text{ m} \quad (\text{braccio orizzontale rispetto punto di rotazione})$$

$$b_{D_4} = 7,39 \text{ m} \quad (\text{braccio orizzontale rispetto punto di rotazione})$$

$$M_{D_1} = D_1 \times b_{D_1} = 103 \text{ kN/m} \times 16,093 \text{ m} = 1658 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

$$M_{D_2} = D_2 \times b_{D_2} = 136 \text{ kN/m} \times 15,764 \text{ m} = 2144 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

$$M_{D_3} = D_3 \times b_{D_3} = 414 \text{ kN/m} \times 9,85 \text{ m} = 4078 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

$$M_{D_4} = D_4 \times b_{D_4} = 192 \text{ kN/m} \times 7,39 \text{ m} = 1419 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

$$M_D = M_{D_1} + M_{D_2} + M_{D_3} + M_{D_4} = 1658 + 2144 + 4078 + 1419 = 9299 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante con livello massima regolazione})$$

$$H_{\text{max.inv}} = 20,1 \text{ m} \quad (\text{livello acqua massimo invaso})$$

$p_{max} (H=20,1 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max.inv} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 20,1 \text{ m} = 201 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua alla base a monte)

$\sigma_v (h_v=1,3 \text{ m}) = \rho_w \times h_v = 10 \text{ kN/m}^3 \times 1,3 \text{ m} = 13 \text{ kN/m}^2$

$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 13 + 0,35 \times (201 - 13 \text{ kN/m}^2) = 78,8 \text{ kN/m}^2$  (pressione dreno)

$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,978 \text{ m}) / 2 = (201 \text{ kN/m}^2 - 78,8 \text{ kN/m}^2) \times (1,978 \text{ m}) / 2 = 121 \text{ kN/m}$

$D2 = (\sigma_d) \times (1,978 \text{ m}) = (78,8 \text{ kN/m}^2) \times (1,978 \text{ m}) = 156 \text{ kN/m}$

$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (14,774 \text{ m}) / 2 = (78,8 - 13 \text{ kN/m}^2) \times (14,774 \text{ m}) / 2 = 486 \text{ kN/m}$

$D4 = (\sigma_v) \times (14,774 \text{ m}) = (13 \text{ kN/m}^2) \times (14,774 \text{ m}) = 192 \text{ kN/m}$

$D = D1 + D2 + D3 + D4 = 121 + 156 + 486 + 192 = 955 \text{ kN/m}$  (livello max. invaso)

$b_{D1} = 16,093 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D2} = 15,764 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D3} = 9,85 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D4} = 7,39 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 121 \text{ kN/m} \times 16,093 \text{ m} = 1947 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 156 \text{ kN/m} \times 15,764 \text{ m} = 2459 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 486 \text{ kN/m} \times 9,85 \text{ m} = 4787 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D4} = D4 \times b_{D4} = 192 \text{ kN/m} \times 7,39 \text{ m} = 1419 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} + M_{D4} = 1947 + 2459 + 4787 + 1419 = 10612 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante con livello massimo invaso)

#### Sisma $E_x, SLC, Monte-valle$

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLC (combinazione con carico sismico massimo).

Per un'azione sismica sollecitante in direzione x (Monte-Valle) nasce oltre che un'azione in direzione x (Monte-Valle), anche una componente sismica in direzione verticale (Basso-Alto) generata dall'inclinazione del piano di fondazione della diga.

$F_{x-Ex} = 720 \text{ kN/m}$  (direzione Monte-Valle)

$F_{z-Ex} = 140 \text{ kN/m}$  (direzione Basso-Alto)

$b_{Fz-Ex} = 9,503 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{Fx-Ex} = 6,693 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{Fz-Ex} = F_{z-Ex} \times b_{Fz-Ex} = 140 \text{ kN/m} \times 9,503 \text{ m} = 1330 \text{ kNm/m}$

$$M_{F_x-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{F_x-Ex} = 720 \text{ kN/m} \times 6,693 \text{ m} = 4819 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Ex} = M_{F_z-Ex} + M_{F_x-Ex} = 1330 + 4819 \text{ kNm/m} = 6149 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

#### Sisma $E_x$ , SLV, Monte-valle

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLV:

$$F_{x-Ex} = 579 \text{ kN/m} \quad (\text{direzione Monte-Valle})$$

$$F_{z-Ex} = 112 \text{ kN/m} \quad (\text{direzione Basso-Alto})$$

$$b_{F_z-Ex} = 9,503 \text{ m} \quad (\text{braccio orizzontale rispetto punto di rotazione})$$

$$h_{F_x-Ex} = 6,693 \text{ m} \quad (\text{braccio verticale rispetto punto di rotazione})$$

$$M_{F_z-Ex} = F_{z-Ex} \times b_{F_z-Ex} = 112 \text{ kN/m} \times 9,503 \text{ m} = 1064 \text{ kNm/m}$$

$$M_{F_x-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{F_x-Ex} = 579 \text{ kN/m} \times 6,693 \text{ m} = 3875 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Ex} = M_{F_z-Ex} + M_{F_x-Ex} = 1064 + 3875 \text{ kNm/m} = 4939 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

#### Sisma $E_z$ , SLC, basso-alto

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLC (combinazione con carico sismico massimo).

Per un'azione sismica sollecitante in direzione z (Basso-Alto) nasce oltre che un'azione in direzione z (Basso-Alto), anche una componente sismica in direzione orizzontale (Valle-Monte) generata dall'inclinazione del piano di fondazione della diga.

$$F_{x-Ez} = 121 \text{ kN/m} \quad (\text{direzione Valle- Monte})$$

$$F_{z-Ez} = 379 \text{ kN/m} \quad (\text{direzione Basso-Alto})$$

$$b_{F_z-Ez} = 9,503 \text{ m} \quad (\text{braccio orizzontale rispetto punto di rotazione})$$

$$h_{F_x-Ez} = 6,693 \text{ m} \quad (\text{braccio verticale rispetto punto di rotazione})$$

$$M_{F_z-Ez} = F_{z-Ez} \times b_{F_z-Ez} = 379 \text{ kN/m} \times 9,503 \text{ m} = 3602 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

$$M_{F_x-Ez} = F_{x-Ez} \times h_{F_x-Ez} = 121 \text{ kN/m} \times 6,693 \text{ m} = 810 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento stabilizzante})$$

$$M_{Ez} = M_{F_z-Ez} - M_{F_x-Ez} = 3602 - 810 \text{ kNm/m} = 2792 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

#### Sisma $E_z$ , SLV, basso-alto

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLV:

$$F_{x-Ez} = 88 \text{ kN/m} \quad (\text{direzione Valle- Monte})$$

$$F_{z-Ez} = 275 \text{ kN/m} \quad (\text{direzione Basso-Alto})$$

$$b_{F_z-Ez} = 9,503 \text{ m} \quad (\text{braccio orizzontale rispetto punto di rotazione})$$

$h_{F_x-E_z} = 6,693 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$MF_{z-E_z} = F_{z-E_z} \times b_{F_{z-E_z}} = 275 \text{ kN/m} \times 9,503 \text{ m} = 2613 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$MF_{x-E_z} = F_{x-E_z} \times h_{F_{x-E_z}} = 88 \text{ kN/m} \times 6,693 \text{ m} = 589 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$ME_z = MF_{z-E_z} - MF_{x-E_z} = 2613 - 589 \text{ kNm/m} = 2024 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

#### Azioni inerziali SLC

$I = 140 \text{ kN/m}$  (Spinta inerziale totale)

$h_I = 6,787 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$MI = I \times h_I = 140 \text{ kNm/m} \times 6,787 \text{ m} = 950 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

#### Azioni inerziali SLV

$I = 110 \text{ kN/m}$  (Spinta inerziale totale)

$h_I = 6,787 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$MI = I \times h_I = 110 \text{ kNm/m} \times 6,787 \text{ m} = 747 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

### 1.2.1.1 COMBINAZIONE FONDAMENTALE SLU ( $1 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3$ )

#### Peso proprio $\times 1$ :

$M_{G_{tot}} = 38702 \text{ kNm/m}$  (momento totale stabilizzante)

$G_{tot} = 4066 \text{ kN/m}$  (stabilizzante)

#### Spinta acqua max regolazione $\times 1,5$

$M_{W_r} = (4011 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 6016$  (momento stabilizzante)

$M_{S_r} = (8630 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 12945 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$W_r = (262 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 393$  (stabilizzante)

$S_r = (1496,5 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 2245 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

#### Spinta interrimento $\times 1,5$

$M_{S_i} = (9,24 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 14 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$S_i = (13,2 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 20 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

#### Sottopressioni $\times 1,5$

$M_D = (9299 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 13949 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$D = (845 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 1268 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

### Verifica ribaltamento

$$M_{\text{stabilizzante}} = 38702 + 6016 \text{ kNm/m} = 44718 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 12945 + 14 + 13949 \text{ kNm/m} = 26908 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 44718 \text{ kNm/m} / 26908 \text{ kNm/m} = 1,66 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### **Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (4066 + 393 - 1268 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 2393 \text{ kNm/m} \text{ (stabilizzante)}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 2245 + 20 \text{ kNm/m} = 2265 \text{ kNm/m} \text{ (instabilizzante)}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 2393 \text{ kNm/m} / 2265 \text{ kNm/m} = 1,05 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### *1.2.1.2 COMBINAZIONE ECCEZIONALE SLU (1×G1 + 1×A + 1×G3 )*

#### Peso proprio × 1

$$M_{\text{Gtot}} = 38702 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 4066 \text{ kN/m} \text{ (stabilizzante)}$$

#### Spinta acqua max invaso × 1

$$M_{\text{Wi}} = 7324 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{Si}} = 12819 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$W_i = 630 \text{ kN/m} \text{ (stabilizzante)}$$

$$S_i = 1981 \text{ kN /m} \text{ (instabilizzante)}$$

#### Spinta interrimento × 1

$$M_{\text{Si}} = 9,24 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN /m} \text{ (instabilizzante)}$$

#### Sottopressioni × 1

$$M_{\text{D}} = 10612 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$D = 955 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

### **Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 38702 + 7324 \text{ kNm/m} = 46026 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 12819 + 9 + 10612 \text{ kNm/m} = 23440 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 46026 \text{ kNm/m} / 23440 \text{ kNm/m} = 1,96 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### **Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (4066 + 630 - 955 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 2806 \text{ kNm/m} \text{ (stabilizzante)}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 1981 + 13,2 \text{ kNm/m} = 1994 \text{ kNm/m} \text{ (instabilizzante)}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 2806 \text{ kNm/m} / 1994 \text{ kNm/m} = 1,41 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

$$1.2.1.3 \text{ COMBINAZIONE SISMICA SLC } (G1 + G2 + G3 + E_{x,slc\text{-valle/monte}} + 0,3 \times E_{z,slc\text{-Basso/Alto}} + I_{x,slc})$$

### 1.2.1.3.1 Serbatoio pieno

#### Peso proprio $\times 1$

$$M_{\text{Gtot}} = 38702 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 4066 \text{ kN/m} \text{ (stabilizzante)}$$

#### Spinta acqua max regolazione $\times 1$

$$M_{\text{Wr}} = 4011 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{Sr}} = 8630 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 262 \text{ kN/m} \text{ (stabilizzante)}$$

$$S_r = 1496,5 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

#### Spinta interrimento $\times 1$

$$M_{\text{Si}} = 9,24 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

#### Sottopressioni $\times 1$

$$M_{\text{D}} = 9299 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$D = 845 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_{x,slc}$ (Monte-Valle) $\times 1$

$$M_{\text{Ex,slc, Monte-valle}} = 6149 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x\text{-Ex,slc, monte-valle}} = 720 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

$$F_{z\text{-Ex,slc, basso-alto}} = 140 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_{z,slc}$ (Basso-Alto) $\times 0,3$

$$M_{\text{Ez}} = (2792 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 838 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x\text{-Ez,slc, valle-monte}} = (121 \text{ kN/m} \times 0,3) = 36 \text{ kN/m} \text{ (stabilizzante)}$$

$$F_{z\text{-Ez,slc, basso-alto}} = (379 \text{ kN/m} \times 0,3) = 114 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

Azioni inerziali,slc × 1

$$M_I = 950 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x,slc,monte-valle} = 140 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{stabilizzante} = 38702 + 4011 \text{ kNm/m} = 42713 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 8630 + 9 + 9299 + 6149 + 838 + 950 = 25875 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 42713 \text{ kNm/m} / 25875 \text{ kNm/m} = 1,65 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{stabilizzante} = (4066 + 262 - 845 - 140 - 114 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 2422 \text{ kNm/m}$$

$$V_{instabilizzante} = 1496,5 + 13,2 + 720 - 36 + 140 \text{ kNm/m} = 2334 \text{ kNm/m}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 2422 \text{ kNm/m} / 2334 \text{ kNm/m} = 1,04 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**1.2.1.3.2 Serbatoio vuoto**Peso proprio × 1

$$M_{G_{tot}} = 38702 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 4066 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta interrimento × 1

$$M_{S_i} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ex,slc (Monte-Valle) × 1

$$M_{Ex,slc,Monte-valle} = 6149 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex,slc,monte-valle} = 720 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex,slc,basso-alto} = 140 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez,slc (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{Ez} = (2792 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 838 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez,slc,valle-monte} = (121 \text{ kN/m} \times 0,3) = 36 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez,slc,basso-alto} = (379 \text{ kN/m} \times 0,3) = 114 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{stabilizzante} = 38702 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 9 + 6149 + 838 = 6996 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 38702 \text{ kNm/m} / 6996 \text{ kNm/m} = 5,53 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### Verifica traslazione

$$V_{\text{stabilizzante}} = (4066 - 140 - 114 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 2859 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 13,2 + 720 - 36 \text{ kNm/m} = 697 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 2859 \text{ kNm/m} / 697 \text{ kNm/m} = 4,10 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

$$1.2.1.4 \text{ COMBINAZIONE SISMICA SLV } (G1 + G2 + G3 + E_{x,slv\text{-valle/monte}} + 0,3 \times E_{z,slv\text{-Basso/Alto}} + I_{x,slv})$$

#### 1.2.1.4.1 Serbatoio pieno

##### Peso proprio $\times 1$

$$M_{\text{Gtot}} = 38702 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 4066 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

##### Spinta acqua max regolazione $\times 1$

$$M_{\text{Wr}} = 4011 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{Sr}} = 8630 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 262 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_r = 1496,5 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

##### Spinta interrimento $\times 1$

$$M_{\text{Si}} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

##### Sottopressioni $\times 1$

$$M_{\text{D}} = 9299 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 845 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

##### Sisma $E_{x,slv}$ (Monte-Valle) $\times 1$

$$M_{\text{E}_{x,slv}} = 4939 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x\text{-}E_{x,slv,mon\text{-}valle}} = 579 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z\text{-}E_{x,slv,basso\text{-}alto}} = 112 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

##### Sisma $E_{z,slv}$ (Basso-Alto) $\times 0,3$

$$M_{\text{E}_{z,slv}} = (2024 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 607 \text{ (momento instabilizzante)}$$



$$F_{x-Ez,slv,valle-monte} = (88 \text{ kN/m} \times 0,3) = 26 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez,slv,basso-alto} = (275 \text{ kN/m} \times 0,3) = 83 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Azioni inerziali,slv × 1

$$M_I = 747 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x,slv,monte-valle} = 110 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Verifica ribaltamento

$$M_{stabilizzante} = 38702 + 4011 \text{ kNm/m} = 42713 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 8630 + 9 + 9299 + 4939 + 607 + 747 = 24231 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 42713 \text{ kNm/m} / 24231 \text{ kNm/m} = 1,76 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

#### Verifica traslazione

$$V_{stabilizzante} = (4066 + 262 - 845 - 112 - 83 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 2466 \text{ kNm/m}$$

$$V_{instabilizzante} = 1496,5 + 13,2 + 579 - 26 + 110 \text{ kNm/m} = 2173 \text{ kNm/m}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 2466 \text{ kNm/m} / 2173 \text{ kNm/m} = 1,13 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

#### **1.2.1.4.2 Serbatoio vuoto**

##### Peso proprio × 1

$$M_{Gtot} = 38702 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 4066 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

##### Spinta interrimento × 1

$$M_{Si} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

##### Sisma Ex,slv (Monte-Valle) × 1

$$M_{Ex,slc,Mon-te-valle} = 4939 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex,slc,mon-te-valle} = 579 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex,slc,mon-te-valle} = 112 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

##### Sisma Ez,slv (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{Ez} = (2024 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 607 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez,slc,valle-monte} = (88 \text{ kN/m} \times 0,3) = 26 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez,slc,basso-alto} = (275 \text{ kN/m} \times 0,3) = 83 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Verifica ribaltamento

Mstabilizzante = 38702 kNm/m (momento stabilizzante)

Minstabilizzante = 9 + 4939 + 607 = 5555 kNm/m (momento instabilizzante)

Mstabilizzante / Minstabilizzante = 38702 kNm/m / 5555 kNm/m = 6,97 >1 (verifica positiva)

### **Verifica traslazione**

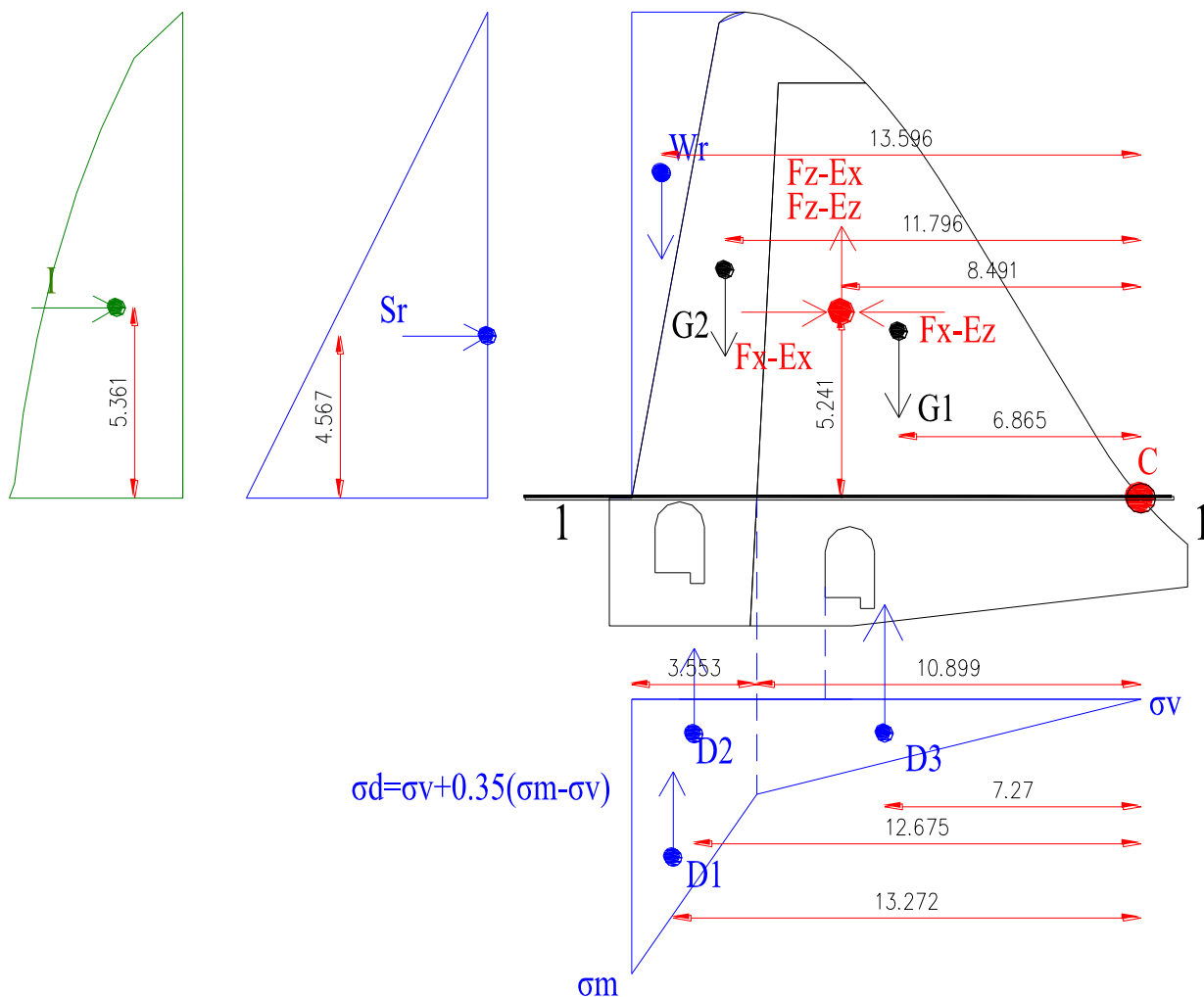
Vstabilizzante = (4066 – 112 - 83 kNm/m)×0,75 = 2903 kNm/m

Vinstabilizzante = 13,2 + 579 – 26 kNm/m = 566 kNm/m

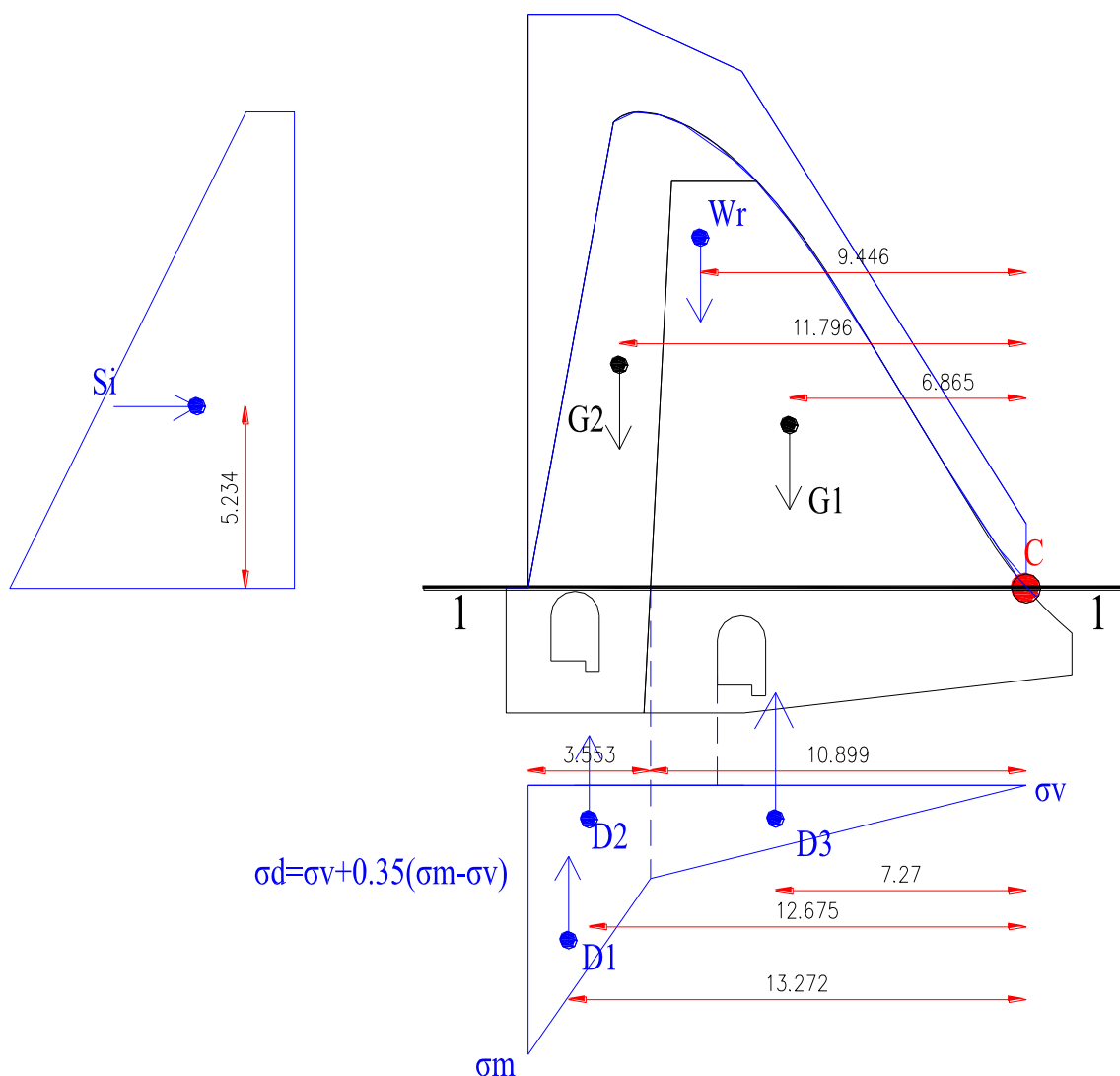
Vstabilizzante / Vinstabilizzante = 2903 kNm/m / 566 kNm/m = 5,13 >1 (verifica positiva)

1.2.1 AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 1-1

Le verifiche sono condotte su una striscia di diga appesantita di larghezza 1 m:



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massima regolazione per le verifiche in corrispondenza della sezione 1-1



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massimo invaso (Combinazione eccezionale) per le verifiche in corrispondenza della sezione 1-1

Le verifiche a ribaltamento e traslazione sono state condotte a favore di sicurezza considerando l’andamento delle sottopressioni lineare tra il nuovo drenone realizzato a monte e la pressione di valle, senza quindi mettere in conto l’ulteriore contributo di riduzione delle sottopressioni dovuto alla presenza del drenone esistente nel corpo diga di valle.

Di seguito si riportano i carichi messi in conto:

Peso proprio

Il peso proprio della sezione trascinabile presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{cls, esist} = 79,3 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 1881 \text{ kN/m} \text{ (peso diga esistente)}$$

$$G_2 = A_c \times \rho_{cls, nuovo} = 38,5 \text{ m}^2 \times 24,00 \text{ kN/m}^3 = 924 \text{ kN/m} \text{ (peso appesantimento)}$$

$$b_{G1} = 6,865 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale peso diga esistente rispetto punto di rotazione)}$$

$b_{G2} = 11,795 \text{ m}$  (braccio orizzontale peso appesantimento rispetto punto di rotazione)

$G_{\text{tot}} = G_1 + G_2 = 2805 \text{ kN/m}$  (peso totale diga)

$M_{G_{\text{tot}}} = (G_1 \times b_{G1}) + (G_2 \times b_{G2}) = (1881 \text{ kN/m} \times 6,865 \text{ m}) + (924 \text{ kN/m} \times 11,795 \text{ m}) = 23812 \text{ kNm/m}$   
(momento totale stabilizzante)

#### Spinta acqua max regolazione

$H_{\text{max.reg}} = 13,7 \text{ m}$  (livello acqua massima regolazione)

$p_{\text{max}} (H=13,7 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.reg}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 13,7 \text{ m} = 137 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua)

$S_r = (p_{\text{max}} \times H_{\text{max.reg}}) / 2 = (137 \text{ kN/m}^2 \times 13,7 \text{ m}) / 2 = 938,5 \text{ kN/m}$  (spinta orizzontale)

$W_r = (A_r \times \rho_w) = 17,5 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 175 \text{ kN/m}$  (peso acqua)

$b_{W_r} = 13,596 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{S_r} = 4,567 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{W_r} = W_r \times b_{W_r} = 175 \text{ kN/m} \times 13,596 \text{ m} = 2379 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{S_r} = S_r \times h_{S_r} = 938,5 \text{ kN/m} \times 4,567 \text{ m} = 4286 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

#### Spinta acqua max invaso

$H_{\text{max.inv}} = 16,5 \text{ m}$  (livello acqua massimo invaso)

$p_{\text{max}} (H=16,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 16,5 \text{ m} = 165 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua)

$p_{\text{min}} (H=2,8 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 2,8 \text{ m} = 28 \text{ kN/m}^2$  (pressione minima sommità)

$S_i = (p_{\text{max}} + p_{\text{min}}) \times 13,7 \text{ m} / 2 = (165 + 28) \text{ kN/m}^2 \times 13,7 \text{ m} / 2 = 1322 \text{ kN/m}$  (spinta orizzontale)

$W_r = (A_i \times \rho_w) = 52,2 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 522 \text{ kN/m}$  (peso acqua)

$b_{W_{ri}} = 9,446 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{S_i} = 5,234 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{W_i} = W_r \times b_{W_r} = 522 \text{ kN/m} \times 9,446 \text{ m} = 4931 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{S_i} = S_i \times h_{S_i} = 1322 \text{ kN/m} \times 5,234 \text{ m} = 6919 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

#### Sottopressioni

**Nel calcolo delle sottopressioni per la sezione 1-1 si considera un livello idrostatico a valle nullo (sezione in elevazione).**

$H_{\text{max.reg}} = 13,7 \text{ m}$  (livello acqua massima regolazione)

$\sigma_m (H=13,7 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.reg}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 13,7 \text{ m} = 137 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua)

$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$  (livello max regolazione)

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (137 - 0 \text{ kN/m}^2) = 48 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (3,553 \text{ m}) / 2 = (137 \text{ kN/m}^2 - 48 \text{ kN/m}^2) \times (3,553 \text{ m}) / 2 = 158 \text{ kN/m}$$

$$D2 = (\sigma_d) \times (3,553 \text{ m}) = (48 \text{ kN/m}^2) \times (3,553 \text{ m}) = 171 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (10,899 \text{ m}) / 2 = (48 - 0 \text{ kN/m}^2) \times (10,899 \text{ m}) / 2 = 262 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 = 158 + 171 + 262 = 591 \text{ kN/m (livello max. regolazione)}$$

$$b_{D1} = 13,272 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 12,675 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 7,27 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 158 \text{ kN/m} \times 13,272 \text{ m} = 2097 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 171 \text{ kN/m} \times 12,675 \text{ m} = 2168 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 262 \text{ kN/m} \times 7,27 \text{ m} = 1905 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 2097 + 2168 + 1905 = 6170 \text{ kNm/m (momento instabilizzante con livello massima regolazione)}$$

$$H_{\text{max.inv}} = 16,5 \text{ m (livello acqua massimo invaso)}$$

$$p_{\text{max}} (H=16,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 16,5 \text{ m} = 165 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua)}$$

$$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (165 - 0 \text{ kN/m}^2) = 58,0 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (3,553 \text{ m}) / 2 = (165 \text{ kN/m}^2 - 58,0 \text{ kN/m}^2) \times (3,553 \text{ m}) / 2 = 190 \text{ kN/m}$$

$$D2 = (\sigma_d) \times (3,553 \text{ m}) = (58 \text{ kN/m}^2) \times (3,553 \text{ m}) = 206 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (10,899 \text{ m}) / 2 = (58,0 - 0,0 \text{ kN/m}^2) \times (10,899 \text{ m}) / 2 = 316 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 = 190 + 206 + 316 = 712 \text{ kN/m (livello max. invaso)}$$

$$b_{D1} = 13,272 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 12,675 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 7,27 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 190 \text{ kN/m} \times 13,272 \text{ m} = 2522 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 206 \text{ kN/m} \times 12,675 \text{ m} = 2611 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 316 \text{ kN/m} \times 7,27 \text{ m} = 2297 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 2522 + 2611 + 2297 = 7430 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante con livello massimo invasivo})$$

Sisma  $E_x$ , SLC, Monte-valle

$$F_{x-Ex} = 497 \text{ kN} \quad (\text{direzione Monte-Valle})$$

$$F_{z-Ex} = 97 \text{ kN} \quad (\text{direzione Basso-Alto})$$

$$b_{Fz-Ex} = 8,491 \text{ m} \quad (\text{braccio orizzontale rispetto punto di rotazione})$$

$$h_{Fx-Ex} = 5,241 \text{ m} \quad (\text{braccio verticale rispetto punto di rotazione})$$

$$M_{Fz-Ex} = F_{z-Ex} \times b_{Fz-Ex} = 97 \text{ kN/m} \times 8,491 \text{ m} = 824 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Fx-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{Fx-Ex} = 497 \text{ kN/m} \times 5,241 \text{ m} = 2605 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Ex} = M_{Fz-Ex} + M_{Fx-Ex} = 824 + 2605 \text{ kNm/m} = 3429 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

Sisma  $E_x$ , SLV, Monte-valle

$$F_{x-Ex} = 399 \text{ kN/m} \quad (\text{direzione Monte-Valle})$$

$$F_{z-Ex} = 77 \text{ kN/m} \quad (\text{direzione Basso-Alto})$$

$$b_{Fz-Ex} = 8,491 \text{ m} \quad (\text{braccio orizzontale rispetto punto di rotazione})$$

$$h_{Fx-Ex} = 5,241 \text{ m} \quad (\text{braccio verticale rispetto punto di rotazione})$$

$$M_{Fz-Ex} = F_{z-Ex} \times b_{Fz-Ex} = 77 \text{ kN/m} \times 8,491 \text{ m} = 654 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Fx-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{Fx-Ex} = 399 \text{ kN/m} \times 5,241 \text{ m} = 2091 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Ex} = M_{Fz-Ex} + M_{Fx-Ex} = 654 + 2091 \text{ kNm/m} = 2745 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

Sisma  $E_z$ , SLC, basso-alto

$$F_{x-Ez} = 84 \text{ kN/m} \quad (\text{direzione Valle- Monte})$$

$$F_{z-Ez} = 261 \text{ kN/m} \quad (\text{direzione Basso-Alto})$$

$$b_{Fz-Ez} = 8,491 \text{ m} \quad (\text{braccio orizzontale rispetto punto di rotazione})$$

$$h_{Fx-Ez} = 5,241 \text{ m} \quad (\text{braccio verticale rispetto punto di rotazione})$$

$$M_{Fz-Ez} = F_{z-Ez} \times b_{Fz-Ez} = 261 \text{ kN/m} \times 8,491 \text{ m} = 2216 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

$$M_{Fx-Ez} = F_{x-Ez} \times h_{Fx-Ez} = 84 \text{ kN/m} \times 5,241 \text{ m} = 440 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento stabilizzante})$$

$$M_{Ez} = M_{Fz-Ez} - M_{Fx-Ez} = 2216 - 440 \text{ kNm/m} = 1776 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

Sisma  $E_z$ , SLV, basso-alto

$$F_{x-Ez} = 61 \text{ kN/m} \quad (\text{direzione Valle- Monte})$$

$$F_{z-Ez} = 190 \text{ kN/m} \quad (\text{direzione Basso-Alto})$$

$b_{Fz-Ez} = 8,491 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{Fx-Ez} = 5,241 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$MFz-Ez = Fz-Ez \times b_{Fz-Ez} = 190 \text{ kN/m} \times 8,491 \text{ m} = 1613 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$MFx-Ez = Fx-Ez \times h_{Fx-Ez} = 61 \text{ kN/m} \times 5,241 \text{ m} = 320 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$MEz = MFz-Ez - MFx-Ez = 1613 - 320 \text{ kNm/m} = 1293 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

#### Azioni inerziali SLC

$I = 98 \text{ kN/m}$  (Spinta inerziale totale)

$h_I = 5,361 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$MI = I \times h_I = 98 \text{ kNm/m} \times 5,361 \text{ m} = 525 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

#### Azioni inerziali SLV

$I = 77 \text{ kN/m}$  (Spinta inerziale totale)

$h_I = 5,361 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$MI = I \times h_I = 77 \text{ kNm/m} \times 5,361 \text{ m} = 413 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)



**1.2.1.1 COMBINAZIONE FONDAMENTALE SLU (1×G1 + 1,5×G2 + 1,5×G3 )**Peso proprio ×1 :

$$M_{G_{tot}} = 23812 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 2805 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione × 1,5

$$M_{W_r} = (2379 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 3569 \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_r} = (4286 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 6429 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = (175 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 263 \text{ (stabilizzante)}$$

$$S_r = (938,5 \text{ kN /m}) \times 1,5 = 1408 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni × 1,5

$$M_D = (6170 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 9255 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = (591 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 887 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{stabilizzante} = 23812 + 3569 \text{ kNm/m} = 27381 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 6429 + 9255 \text{ kNm/m} = 15684 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 27381 \text{ kNm/m} / 15684 \text{ kNm/m} = 1,74 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{stabilizzante} = (2805 + 263 - 887 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1636 \text{ kNm/m (stabilizzante)}$$

$$V_{instabilizzante} = 1408 \text{ kNm/m (instabilizzante)}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 1636 \text{ kNm/m} / 1408 \text{ kNm/m} = 1,16 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**1.2.1.2 COMBINAZIONE ECCEZIONALE SLU (1×G1 + 1×A + 1×G3 )**Peso proprio ×1

$$M_{G_{tot}} = 23812 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 2805 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max invaso × 1

$$M_{W_i} = 4931 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_i} = 6919 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_i = 522 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_i = 1322 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni × 1

$$M_D = 7430 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 712 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

### **Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 23812 + 4931 \text{ kNm/m} = 28743 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 6919 + 7430 \text{ kNm/m} = 14349 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 28743 \text{ kNm/m} / 14349 \text{ kNm/m} = 2,00 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### **Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (2805 + 522 - 712 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1961 \text{ kNm/m (stabilizzante)}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 1322 \text{ kNm/m (instabilizzante)}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1979 \text{ kNm/m} / 1322 \text{ kNm/m} = 1,50 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

$$1.2.1.3 \text{ COMBINAZIONE SISMICA SLC } (G1 + G2 + G3 + E_{x,slc\text{-valle/monte}} + 0.3 \times E_{z,slc\text{-Basso/Alto}} + I_{x,slc})$$

#### **1.2.1.3.1 Serbatoio pieno**

Peso proprio × 1

$$M_{\text{Gtot}} = 23812 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 2805 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione × 1

$$M_{\text{Wr}} = 2379 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{Sr}} = 4286 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 175 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_r = 938,5 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni × 1

$$M_D = 6170 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 591 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ex,slc (Monte-Valle) × 1

$$M_{Ex,slc, Monte-valle} = 3429 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex, slc, monte-valle} = 497 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex, slc, basso-alto} = 97 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$\underline{\text{Sisma Ez,slc (Basso-Alto)} \times 0,3}$$

$$M_{Ez} = (1776 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 533 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez, slc, valle-monte} = (84 \text{ kN/m} \times 0,3) = 25 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez, slc, basso-alto} = (261 \text{ kN/m} \times 0,3) = 78 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$\underline{\text{Azioni inerziali,slc} \times 1}$$

$$M_I = 525 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x,slc, monte-valle} = 98 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

### Verifica ribaltamento

$$M_{stabilizzante} = 23812 + 2379 \text{ kNm/m} = 26191 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 4286 + 6170 + 3429 + 533 + 525 = 14943 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 26191 \text{ kNm/m} / 14943 \text{ kNm/m} = 1,75 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### Verifica traslazione

$$V_{stabilizzante} = (2805 + 175 - 591 - 97 - 78) \text{ kNm/m} \times 0,75 = 1661 \text{ kNm/m}$$

$$V_{instabilizzante} = 938,5 + 497 - 25 + 98 \text{ kNm/m} = 1509 \text{ kNm/m}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 1661 \text{ kNm/m} / 1509 \text{ kNm/m} = 1,10 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

#### 1.2.1.3.2 Serbatoio vuoto

$$\underline{\text{Peso proprio} \times 1}$$

$$M_{Gtot} = 23812 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 2805 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$\underline{\text{Sisma Ex,slc (Monte-Valle)} \times 1}$$

$$M_{Ex,slc, Monte-valle} = 3429 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex, slc, monte-valle} = 497 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex, slc, basso-alto} = 97 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$\underline{\text{Sisma Ez,slc (Basso-Alto)} \times 0,3}$$

$$M_{Ez} = (1776 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 533 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez, slc, valle-monte} = (84 \text{ kN/m} \times 0,3) = 25 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez,slc,basso-alto} = (261 \text{ kN/m} \times 0,3) = 78 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

### **Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 23812 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 3429 + 533 = 3962 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 23812 \text{ kNm/m} / 3962 \text{ kNm/m} = 6,01 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### **Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (2805 - 97 - 78 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1973 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 497 - 25 \text{ kNm/m} = 472 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1973 \text{ kNm/m} / 472 \text{ kNm/m} = 4,18 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

$$1.2.1.4 \text{ COMBINAZIONE SISMICA SLV } (G1 + G2 + G3 + E_{x,slv-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,slv-Basso/Alto} + I_{x,slv})$$

#### **1.2.1.4.1 Serbatoio pieno**

##### **Peso proprio × 1**

$$M_{\text{Gtot}} = 23812 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 2805 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

##### **Spinta acqua max regolazione × 1**

$$M_{\text{Wr}} = 2379 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{Sr}} = 4286 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 175 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_r = 938,5 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

##### **Sottopressioni × 1**

$$M_{\text{D}} = 6170 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 591 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

##### **Sisma Ex,slv (Monte-Valle) × 1**

$$M_{\text{Ex,slv,Monte-valle}} = 2745 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex,slv,monte-valle} = 399 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex,slv,basso-alto} = 77 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

##### **Sisma Ez,slv (Basso-Alto) × 0,3**

$$M_{Ez,slv,Basso-alto} = (1293 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 388 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez,slv, valle-monte} = (61 \text{ kN/m} \times 0,3) = 18 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez,slv,basso-alto} = (190 \text{ kN/m} \times 0,3) = 57 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Azioni inerziali,slv × 1

$$M_I = 413 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x,slv,,monte-valle} = 77 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Verifica ribaltamento

$$M_{stabilizzante} = 23812 + 2379 \text{ kNm/m} = 26191 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 4286 + 6170 + 2745 + 388 + 413 = 14002 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 26191 \text{ kNm/m} / 14002 \text{ kNm/m} = 1,87 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

#### Verifica traslazione

$$V_{stabilizzante} = (2805 + 175 - 591 - 77 - 57 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1691 \text{ kNm/m}$$

$$V_{instabilizzante} = 938,5 + 399 - 18 + 77 \text{ kNm/m} = 1397 \text{ kNm/m}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 1691 \text{ kNm/m} / 1397 \text{ kNm/m} = 1,21 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

#### **1.2.1.4.2 Serbatoio vuoto**

##### Peso proprio × 1

$$M_{Gtot} = 23812 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 2805 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

##### Sisma Ex,slv (Monte-Valle) × 1

$$M_{Ex,slv,Monte-valle} = 2745 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex,slv,monte-valle} = 399 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex,slv,basso-alto} = 77 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

##### Sisma Ez,slv (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{Ez,slv,Basso-alto} = (1293 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 388 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez,slv, valle-monte} = (61 \text{ kN/m} \times 0,3) = 18 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez,slv,basso-alto} = (190 \text{ kN/m} \times 0,3) = 57 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Verifica ribaltamento

$$M_{stabilizzante} = 23812 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 2745 + 388 = 3133 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

Mstabilizzante / Minstabilizzante = 23812 kNm/m / 3133 kNm/m = 7,60 >1 (verifica positiva)

**Verifica traslazione**

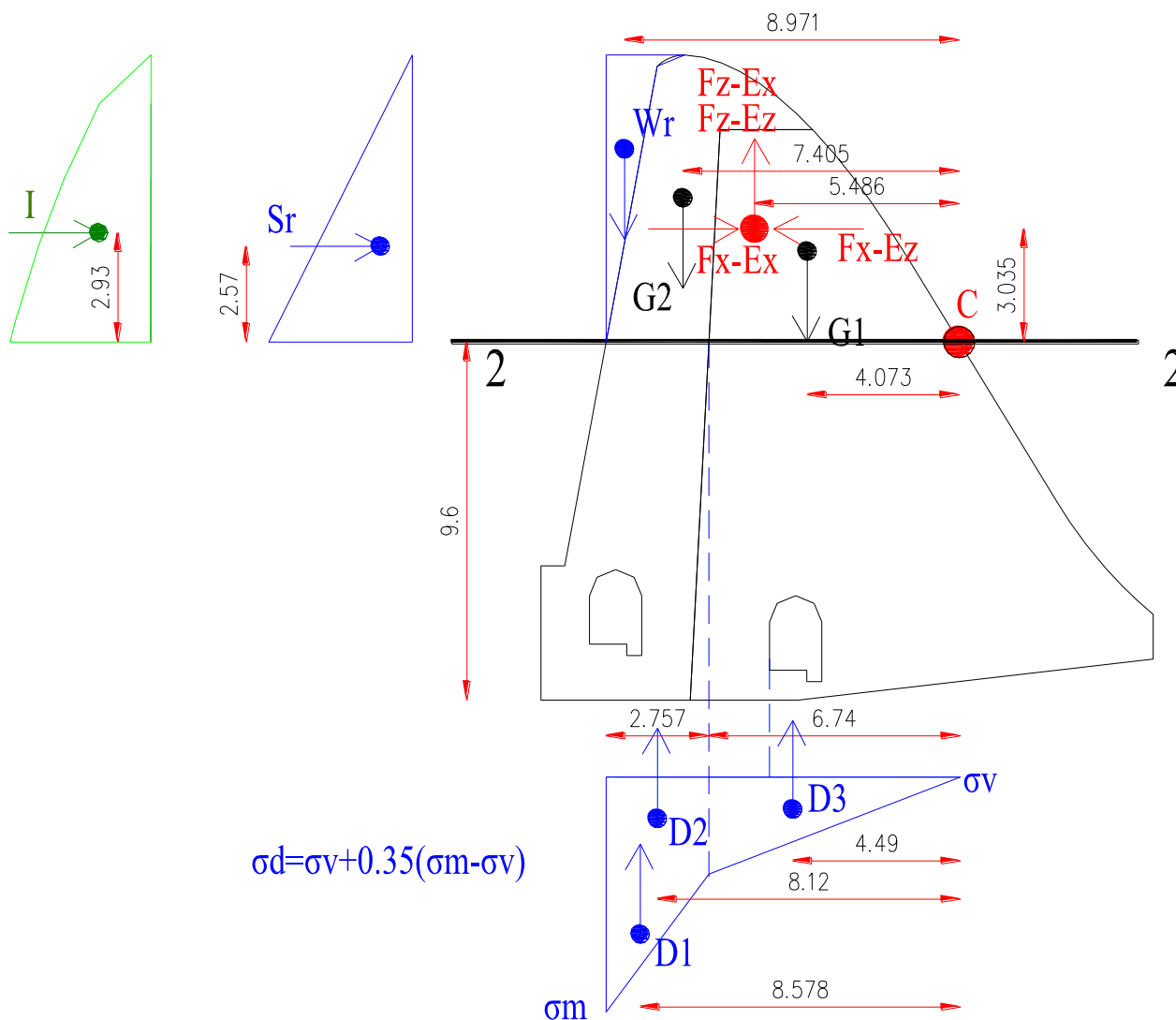
Vstabilizzante = (2805 – 77 - 57 kNm/m)×0,75 = 2003 kNm/m

Vinstabilizzante = 399 – 18 kNm/m = 381 kNm/m

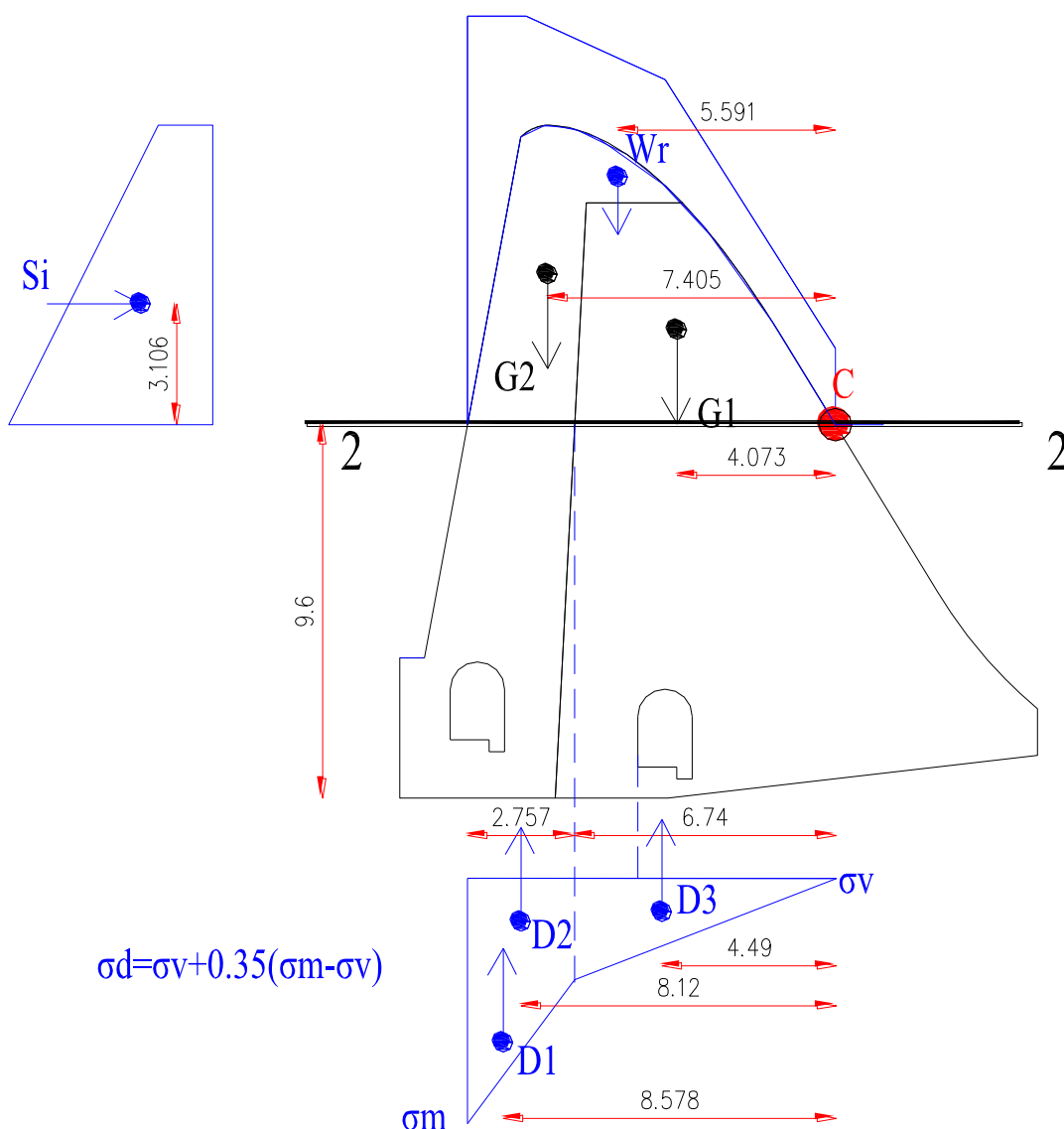
Vstabilizzante / Vinstabilizzante = 2003 kNm/m / 381 kNm/m = 5,26 >1 (verifica positiva)

1.2.2 AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 2-2

Le verifiche sono condotte su una striscia di diga appesantita di larghezza 1 m:



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massima regolazione per le verifiche in corrispondenza della sezione 2-2



*Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massimo invaso (Combinazione eccezionale) per le verifiche in corrispondenza della sezione 2-2*

Le verifiche a ribaltamento e traslazione sono state condotte a favore di sicurezza considerando l'andamento delle sottopressioni lineare tra il nuovo dreno realizzato a monte e la pressione di valle, senza quindi mettere in conto l'ulteriore contributo di riduzione delle sottopressioni dovuto alla presenza del dreno esistente nel corpo diga di valle.

Di seguito si riportano i carichi messi in conto:

Peso proprio

Il peso proprio della sezione tracimabile presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{cls, esist} = 26,9 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 638 \text{ kN/m (peso diga esistente)}$$



$$G_2 = A_c \times \rho_{\text{cls,nuovo}} = 19,54 \text{ m}^2 \times 24,00 \text{ kN/m}^3 = 469 \text{ kN/m} \text{ (peso appesantimento)}$$

$$b_{G1} = 4,073 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale peso diga esistente rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{G2} = 7,405 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale peso appesantimento rispetto punto di rotazione)}$$

$$G_{\text{tot}} = G_1 + G_2 = 1107 \text{ kN/m} \text{ (peso totale diga)}$$

$$M_{G_{\text{tot}}} = (G_1 \times b_{G1}) + (G_2 \times b_{G2}) = (638 \text{ kN/m} \times 4,073 \text{ m}) + (469 \text{ kN/m} \times 7,405 \text{ m}) = 6072 \text{ kNm/m}$$

(momento totale stabilizzante)

### Spinta acqua max regolazione

$$H_{\text{max.reg}} = 7,7 \text{ m} \text{ (livello acqua massima regolazione)}$$

$$p_{\text{max}} (H=7,7 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.reg}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 7,7 \text{ m} = 77 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua)}$$

$$S_r = (p_{\text{max}} \times H_{\text{max.reg}}) / 2 = (77 \text{ kN/m}^2 \times 7,7 \text{ m}) / 2 = 297 \text{ kN/m} \text{ (spinta orizzontale)}$$

$$W_r = (A_r \times \rho_w) = 5,59 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 55,9 \text{ kN/m} \text{ (peso acqua)}$$

$$b_{W_r} = 8,971 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{S_r} = 2,57 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{W_r} = W_r \times b_{W_r} = 55,9 \text{ kN/m} \times 8,971 \text{ m} = 502 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_r} = S_r \times h_{S_r} = 297 \text{ kN/m} \times 2,57 \text{ m} = 763 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

### Spinta acqua max invaso

$$H_{\text{max.inv}} = 10,5 \text{ m} \text{ (livello acqua massimo invaso)}$$

$$p_{\text{max}} (H=10,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 10,5 \text{ m} = 105 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua)}$$

$$p_{\text{min}} (H=2,8 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 2,8 \text{ m} = 28 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione minima sommità)}$$

$$S_i = (p_{\text{max}} + p_{\text{min}}) \times 7,7 \text{ m} / 2 = (105 + 28) \text{ kN/m}^2 \times 7,7 \text{ m} / 2 = 512 \text{ kN/m} \text{ (spinta orizzontale)}$$

$$W_r = (A_i \times \rho_w) = 28,9 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 289 \text{ kN/m} \text{ (peso acqua)}$$

$$b_{W_{ri}} = 5,591 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{S_i} = 3,106 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{W_{ri}} = W_r \times b_{W_{ri}} = 289 \text{ kN/m} \times 5,591 \text{ m} = 1616 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_i} = S_i \times h_{S_i} = 512 \text{ kN/m} \times 3,106 \text{ m} = 1590 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

### Sottopressioni

Nel calcolo delle sottopressioni per la sezione 1-1 si considera un livello idrostatico a valle nullo (sezione in elevazione).

$$H_{\text{max.reg}} = 7,7 \text{ m} \text{ (livello acqua massima regolazione)}$$

$$\sigma_m (H=7,7 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.reg}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 7,7 \text{ m} = 77 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua)}$$

$$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2 \text{ (livello max regolazione)}$$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (77 - 0 \text{ kN/m}^2) = 27 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (2,757 \text{ m}) / 2 = (77 \text{ kN/m}^2 - 27 \text{ kN/m}^2) \times (2,757 \text{ m}) / 2 = 69 \text{ kN/m}$$

$$D2 = (\sigma_d) \times (2,757 \text{ m}) = (27 \text{ kN/m}^2) \times (2,757 \text{ m}) = 75 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (10,899 \text{ m}) / 2 = (27 - 0 \text{ kN/m}^2) \times (6,74 \text{ m}) / 2 = 91 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 = 69 + 75 + 91 = 235 \text{ kN/m (livello max. regolazione)}$$

$$b_{D1} = 8,578 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 8,12 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 4,49 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 69 \text{ kN/m} \times 8,578 \text{ m} = 592 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 75 \text{ kN/m} \times 8,12 \text{ m} = 609 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 91 \text{ kN/m} \times 4,49 \text{ m} = 409 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 592 + 609 + 409 = 1610 \text{ kNm/m (momento instabilizzante con livello massima regolazione)}$$

$$H_{\text{max.inv}} = 10,5 \text{ m (livello acqua massimo invaso)}$$

$$p_{\text{max}} (H=10,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 10,5 \text{ m} = 105 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua)}$$

$$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (105 - 0 \text{ kN/m}^2) = 37,0 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (2,757 \text{ m}) / 2 = (105 \text{ kN/m}^2 - 37,0 \text{ kN/m}^2) \times (2,757 \text{ m}) / 2 = 94 \text{ kN/m}$$

$$D2 = (\sigma_d) \times (2,757 \text{ m}) = (37 \text{ kN/m}^2) \times (2,757 \text{ m}) = 102 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (6,74 \text{ m}) / 2 = (37,0 - 0,0 \text{ kN/m}^2) \times (6,74 \text{ m}) / 2 = 125 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 = 94 + 102 + 125 = 321 \text{ kN/m (livello max. invaso)}$$

$$b_{D1} = 8,578 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 8,12 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 4,49 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 94 \text{ kN/m} \times 8,578 \text{ m} = 806 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 102 \text{ kN/m} \times 8,12 \text{ m} = 828 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 125 \text{ kN/m} \times 4,49 \text{ m} = 561 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 806 + 828 + 561 = 2195 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante con livello massimo invasivo)}$$

Sisma  $E_x$ , SLC, Monte-valle

$$F_{x-Ex} = 196 \text{ kN} \text{ (direzione Monte-Valle)}$$

$$F_{z-Ex} = 38 \text{ kN} \text{ (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ex} = 5,486 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ex} = 3,035 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Fz-Ex} = F_{z-Ex} \times b_{Fz-Ex} = 38 \text{ kN/m} \times 5,486 \text{ m} = 208 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Fx-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{Fx-Ex} = 196 \text{ kN/m} \times 3,035 \text{ m} = 595 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Ex} = M_{Fz-Ex} + M_{Fx-Ex} = 208 + 595 \text{ kNm/m} = 803 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

Sisma  $E_x$ , SLV, Monte-valle

$$F_{x-Ex} = 158 \text{ kN/m} \text{ (direzione Monte-Valle)}$$

$$F_{z-Ex} = 31 \text{ kN/m} \text{ (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ex} = 5,486 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ex} = 3,035 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Fz-Ex} = F_{z-Ex} \times b_{Fz-Ex} = 31 \text{ kN/m} \times 5,486 \text{ m} = 170 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Fx-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{Fx-Ex} = 158 \text{ kN/m} \times 3,035 \text{ m} = 480 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Ex} = M_{Fz-Ex} + M_{Fx-Ex} = 170 + 480 \text{ kNm/m} = 650 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

Sisma  $E_x$ , SLC, basso-alto

$$F_{x-Ez} = 33 \text{ kN/m} \text{ (direzione Valle- Monte)}$$

$$F_{z-Ez} = 103 \text{ kN/m} \text{ (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ez} = 5,486 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ez} = 3,035 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Fz-Ez} = F_{z-Ez} \times b_{Fz-Ez} = 103 \text{ kN/m} \times 5,486 \text{ m} = 565 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$M_{Fx-Ez} = F_{x-Ez} \times h_{Fx-Ez} = 33 \text{ kN/m} \times 3,035 \text{ m} = 100 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{Ez} = M_{Fz-Ez} - M_{Fx-Ez} = 565 - 100 \text{ kNm/m} = 465 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

Sisma  $E_x$ , SLV, basso-alto

$$F_{x-Ez} = 24 \text{ kN/m} \text{ (direzione Valle- Monte)}$$

$$F_{z-Ez} = 75 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ez} = 5,486 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ez} = 3,035 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$MF_{z-Ez} = F_{z-Ez} \times b_{Fz-Ez} = 75 \text{ kN/m} \times 5,486 \text{ m} = 412 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$MF_{x-Ez} = F_{x-Ez} \times h_{Fx-Ez} = 24 \text{ kN/m} \times 3,035 \text{ m} = 73 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$ME_z = MF_{z-Ez} - MF_{x-Ez} = 412 - 73 \text{ kNm/m} = 339 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Azioni inerziali SLC

$$I = 41 \text{ kN/m (Spinta inerziale totale)}$$

$$h_I = 2,93 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$MI = I \times h_I = 41 \text{ kNm/m} \times 2,93 \text{ m} = 120 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Azioni inerziali SLV

$$I = 32 \text{ kN/m (Spinta inerziale totale)}$$

$$h_I = 2,93 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$MI = I \times h_I = 32 \text{ kNm/m} \times 2,93 \text{ m} = 94 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

**1.2.2.1 COMBINAZIONE FONDAMENTALE SLU (1×G1 + 1,5×G2 + 1,5×G3 )**Peso proprio ×1 :

$$M_{G_{tot}} = 6072 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 1107 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione × 1,5

$$M_{W_r} = (502 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 753 \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_r} = (763 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 1145 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = (55,9 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 84 \text{ (stabilizzante)}$$

$$S_r = (297 \text{ kN /m}) \times 1,5 = 446 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni × 1,5

$$M_D = (1610 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 2415 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = (235 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 353 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{stabilizzante} = 6072 + 753 \text{ kNm/m} = 6825 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 1145 + 2415 \text{ kNm/m} = 3560 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 6825 \text{ kNm/m} / 3560 \text{ kNm/m} = 1,92 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{stabilizzante} = (1107 + 84 - 353 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 629 \text{ kNm/m (stabilizzante)}$$

$$V_{instabilizzante} = 446 \text{ kNm/m (instabilizzante)}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 629 \text{ kNm/m} / 446 \text{ kNm/m} = 1,41 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**1.2.2.2 COMBINAZIONE ECCEZIONALE SLU (1×G1 + 1×A + 1×G3 )**Peso proprio ×1

$$M_{G_{tot}} = 6072 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 1107 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max invaso × 1

$$M_{W_i} = 1616 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_i} = 1590 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_i = 289 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_i = 512 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni  $\times 1$

$$M_D = 2195 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 321 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

### **Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 6072 + 1616 \text{ kNm/m} = 7688 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 1590 + 2195 \text{ kNm/m} = 3785 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 7688 \text{ kNm/m} / 3785 \text{ kNm/m} = 2,03 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### **Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (1107 + 289 - 321 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 806 \text{ kNm/m (stabilizzante)}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 512 \text{ kNm/m (instabilizzante)}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 806 \text{ kNm/m} / 512 \text{ kNm/m} = 1,57 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

$$1.2.2.3 \text{ COMBINAZIONE SISMICA SLC } (G1 + G2 + G3 + E_{x,slc-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,slc-Basso/Alto} + I_{x,slc})$$

#### **1.2.2.3.1 Serbatoio pieno**

Peso proprio  $\times 1$

$$M_{G_{\text{tot}}} = 6072 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 1107 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione  $\times 1$

$$M_{W_r} = 502 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_r} = 763 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 55,9 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_r = 297 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni  $\times 1$

$$M_D = 1610 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 235 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ex,slc (Monte-Valle)  $\times 1$

$$M_{Ex,slc, Monte-valle} = 803 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex, slc, monte-valle} = 196 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex, slc, basso-alto} = 38 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$\underline{\text{Sisma Ez,slc (Basso-Alto)} \times 0,3}$$

$$M_{Ez} = (465 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 140 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez, slc, valle-monte} = (33 \text{ kN/m} \times 0,3) = 10 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez, slc, basso-alto} = (103 \text{ kN/m} \times 0,3) = 31 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$\underline{\text{Azioni inerziali,slc} \times 1}$$

$$M_I = 120 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x,slc, monte-valle} = 41 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

### Verifica ribaltamento

$$M_{stabilizzante} = 6072 + 502 \text{ kNm/m} = 6574 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 763 + 1610 + 803 + 140 + 120 = 3436 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 6574 \text{ kNm/m} / 3436 \text{ kNm/m} = 1,91 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### Verifica traslazione

$$V_{stabilizzante} = (1107 + 55,9 - 235 - 38 - 31) \text{ kNm/m} \times 0,75 = 644 \text{ kNm/m}$$

$$V_{instabilizzante} = 297 + 196 - 10 + 41 \text{ kNm/m} = 524 \text{ kNm/m}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 644 \text{ kNm/m} / 524 \text{ kNm/m} = 1,23 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

#### 1.2.2.3.2 Serbatoio vuoto

$$\underline{\text{Peso proprio} \times 1}$$

$$M_{Gtot} = 6072 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 1107 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$\underline{\text{Sisma Ex,slc (Monte-Valle)} \times 1}$$

$$M_{Ex,slc, Monte-valle} = 803 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex, slc, monte-valle} = 196 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex, slc, basso-alto} = 38 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$\underline{\text{Sisma Ez,slc (Basso-Alto)} \times 0,3}$$

$$M_{Ez} = (465 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 140 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez, slc, valle-monte} = (33 \text{ kN/m} \times 0,3) = 10 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez,slc,basso-alto} = (103\text{kN/m} \times 0,3) = 31 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

### Verifica ribaltamento

$$M_{\text{stabilizzante}} = 6072 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 803 + 140 = 943 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 6072 \text{ kNm/m} / 943\text{kNm/m} = 6,44 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### Verifica traslazione

$$V_{\text{stabilizzante}} = (1107 - 38 - 31 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 778 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 196 - 10 \text{ kNm/m} = 186 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 778 \text{ kNm/m} / 186 \text{ kNm/m} = 4,18 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

$$1.2.2.4 \text{ COMBINAZIONE SISMICA SLV } (G1 + G2 + G3 + E_{x,slv-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,slv-Basso/Alto} + I_{x,slv})$$

#### 1.2.2.4.1 Serbatoio pieno

##### Peso proprio × 1

$$M_{\text{Gtot}} = 6072 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 1107 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

##### Spinta acqua max regolazione × 1

$$M_{\text{Wr}} = 502 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{Sr}} = 763 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 55,9 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_r = 297 \text{ kN / m (instabilizzante)}$$

##### Sottopressioni × 1

$$M_D = 1610 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 235 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

##### Sisma Ex,slv (Monte-Valle) × 1

$$M_{\text{Ex,slv,Monte-valle}} = 650 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex,slv,monte-valle} = 158 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex,slv,basso-alto} = 31 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

##### Sisma Ez,slv (Basso-Alto) × 0,3



$$M_{Ez,slv,Basso-alto} = (339 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 102 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez,slv, valle-monte} = (24 \text{ kN/m} \times 0,3) = 7 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez,slv,basso-alto} = (75 \text{ kN/m} \times 0,3) = 23 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Azioni inerziali,slv × 1

$$M_I = 94 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x,slv,monte-valle} = 32 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Verifica ribaltamento

$$M_{stabilizzante} = 6072 + 502 \text{ kNm/m} = 6574 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 763 + 1610 + 650 + 102 + 94 = 3219 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 6574 \text{ kNm/m} / 3219 \text{ kNm/m} = 2,04 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

#### Verifica traslazione

$$V_{stabilizzante} = (1107 + 55,9 - 235 - 31 - 23 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 655 \text{ kNm/m}$$

$$V_{instabilizzante} = 297 + 158 - 7 + 32 \text{ kNm/m} = 480 \text{ kNm/m}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 655 \text{ kNm/m} / 480 \text{ kNm/m} = 1,36 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

#### **1.2.2.4.2 Serbatoio vuoto**

##### Peso proprio × 1

$$M_{Gtot} = 6072 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 1107 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

##### Sisma Ex,slv (Monte-Valle) × 1

$$M_{Ex,slv, Monte-valle} = 650 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex,slv,monte-valle} = 158 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex,slv,basso-alto} = 31 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

##### Sisma Ez,slv (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{Ez,slv,Basso-alto} = (339 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 102 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez,slv, valle-monte} = (24 \text{ kN/m} \times 0,3) = 7 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez,slv,basso-alto} = (75 \text{ kN/m} \times 0,3) = 23 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Verifica ribaltamento

$$M_{stabilizzante} = 6072 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 650 + 102 = 752 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 6072 \text{ kNm/m} / 752 \text{ kNm/m} = 8,10 > 1$  (verifica positiva)

**Verifica traslazione**

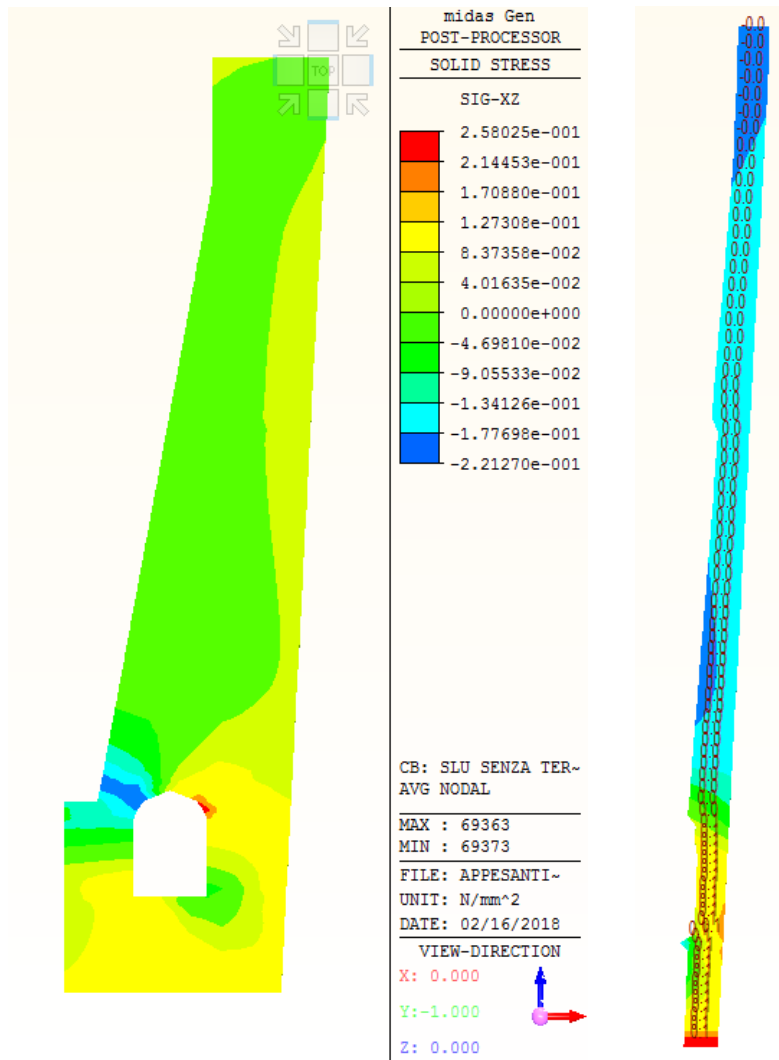
$V_{stabilizzante} = (1107 - 31 - 23 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 790 \text{ kNm/m}$

$V_{instabilizzante} = 158 - 7 \text{ kNm/m} = 151 \text{ kNm/m}$

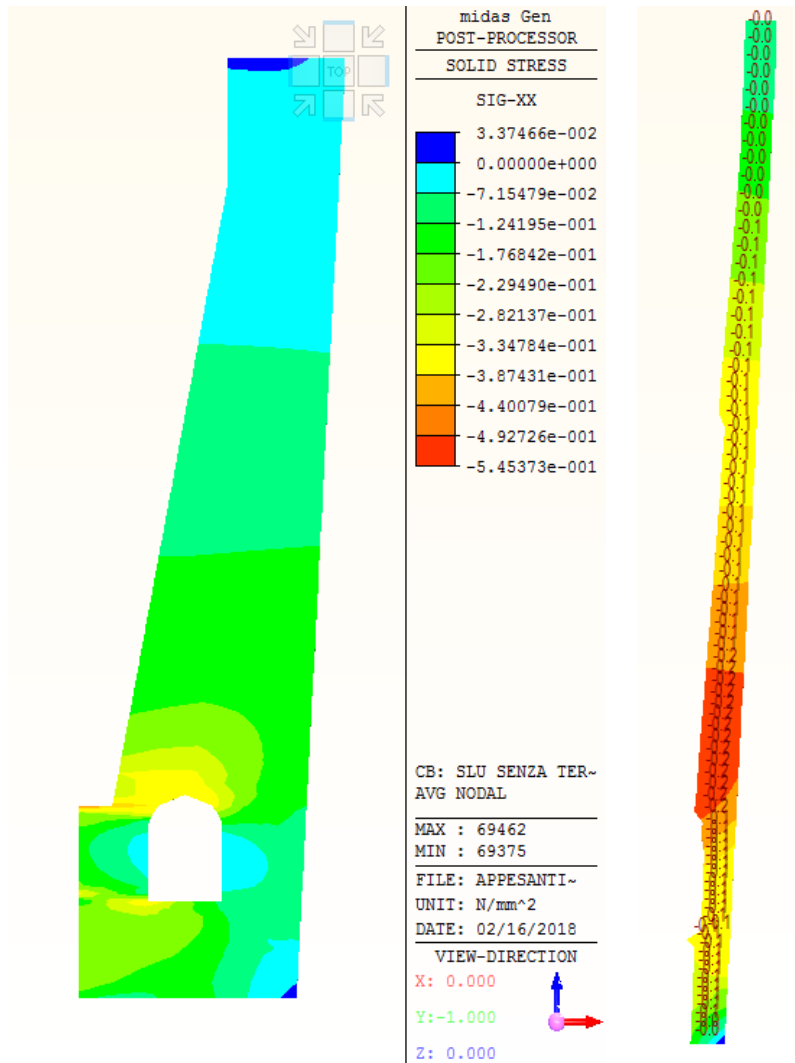
$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 790 \text{ kNm/m} / 151 \text{ kNm/m} = 5,23 > 1$  (verifica positiva)

### 1.3 VERIFICA SFORZI DI INTERFACCIA TRA CALCESTRUZZO CORPO DIGA ESISTENTE E CALCESTRUZZO DELL'APPESANTIMENTO

#### 1.3.1 Cmb.1: $1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3$ (Fondamentale)

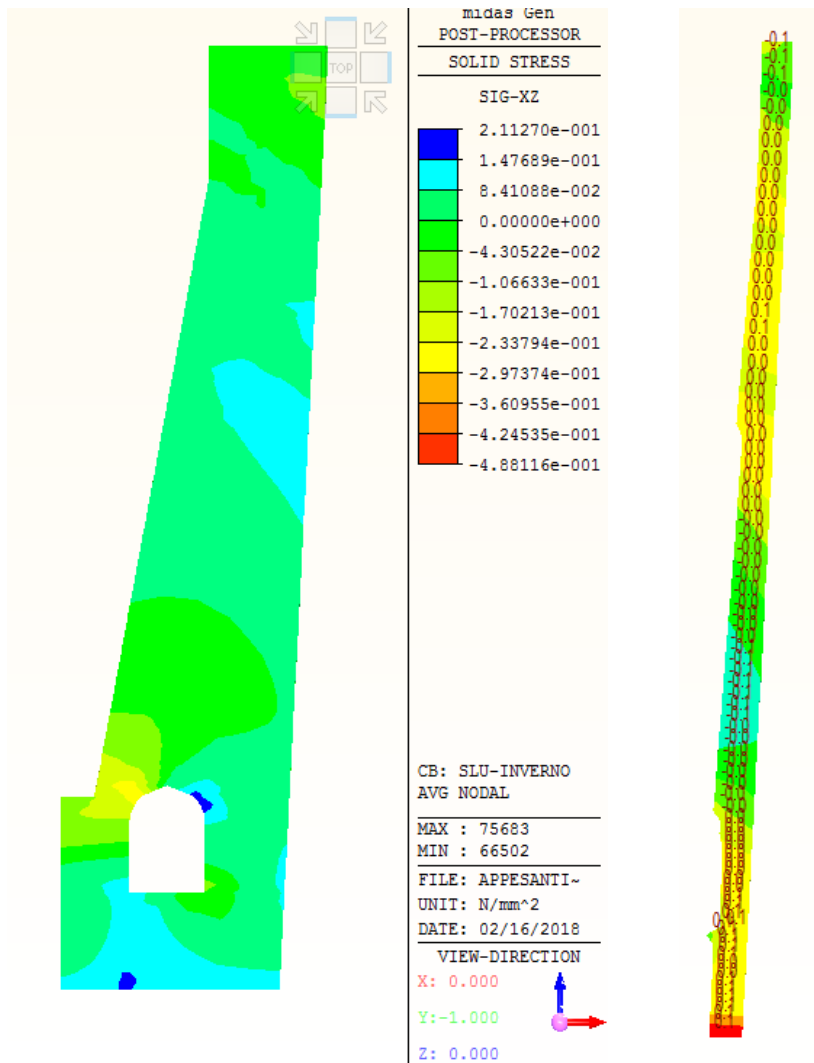


Sforzi tangenziali agenti all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

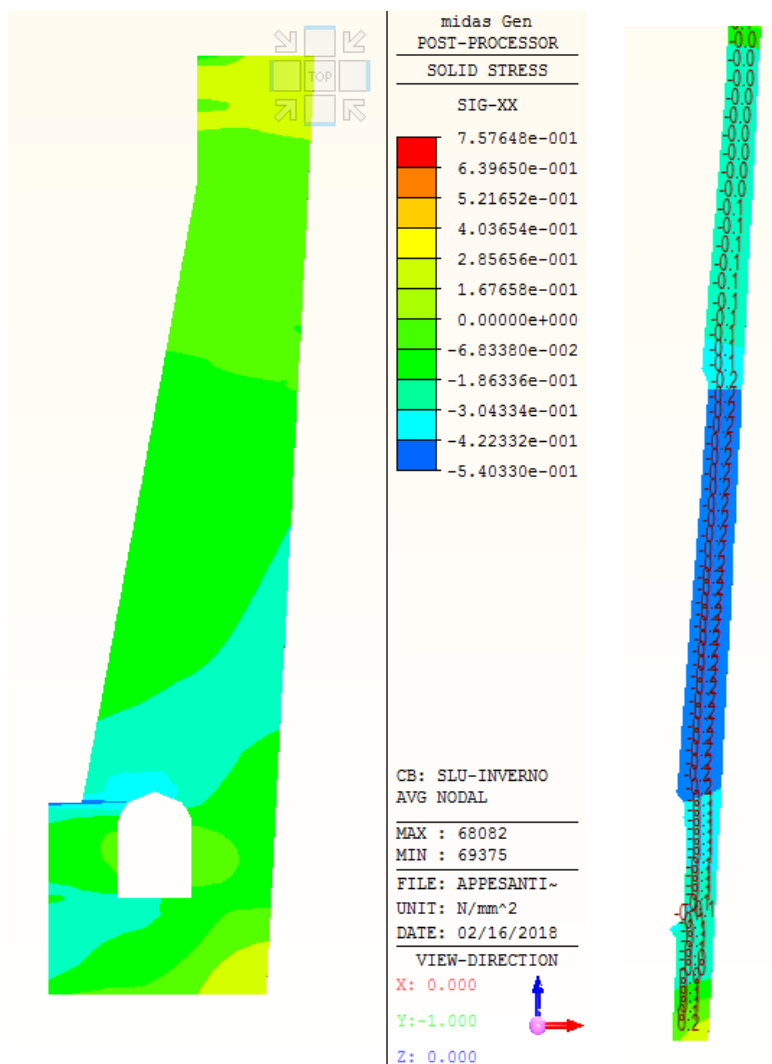


Sforzi agenti perpendicolarmente all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

1.3.2 Cmb.2:  $1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3 + 1,5 \times Q1$ , inverno (Fondamentale inverno)

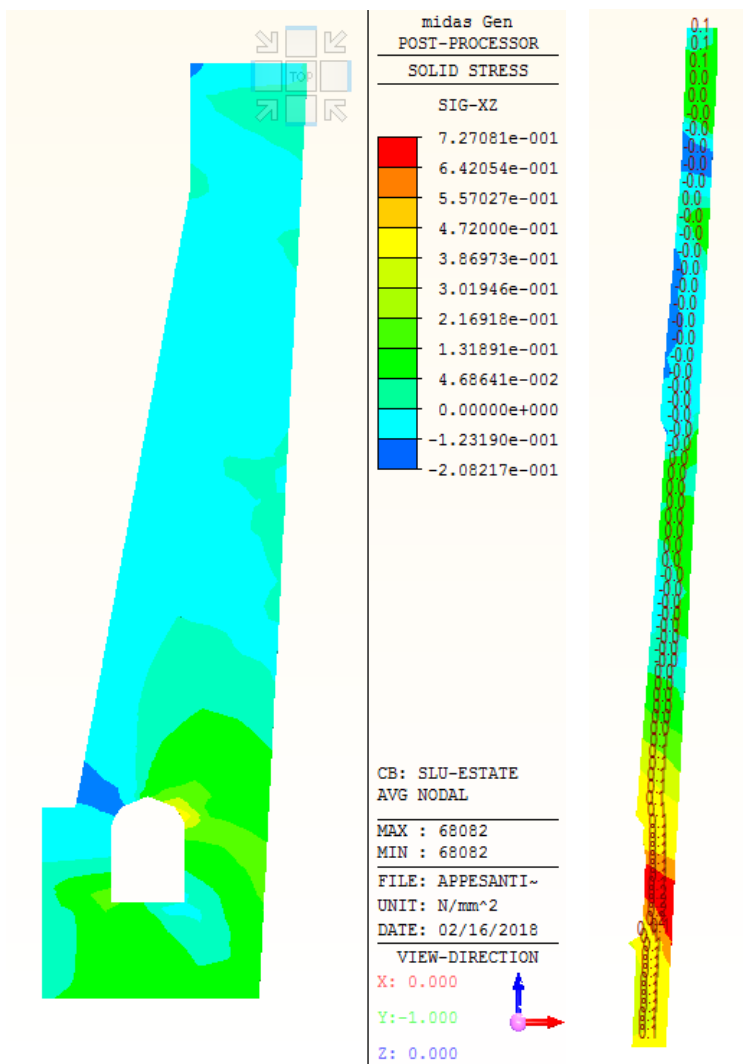


Sforzi tangenziali agenti all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

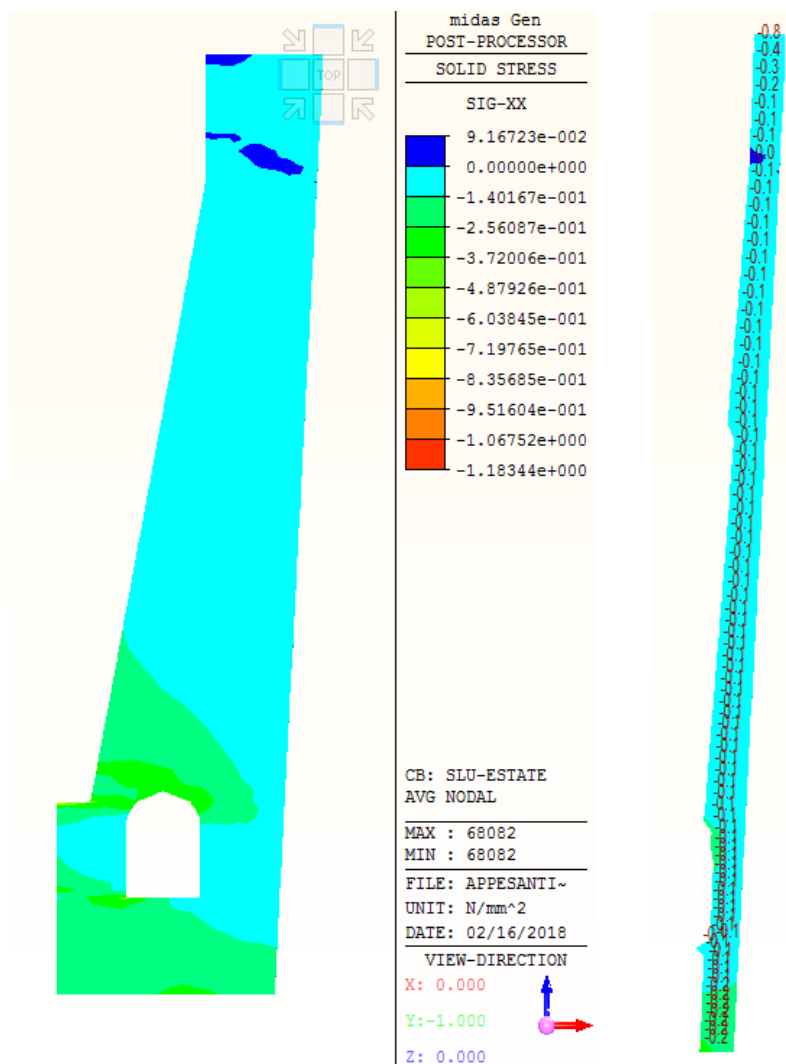


Sforzi agenti perpendicolarmente all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

1.3.3 Cmb.3: 1,3×G1+1,5×G2+1,5×G3 +1,5×Q1,estate (Fondamentale estate)



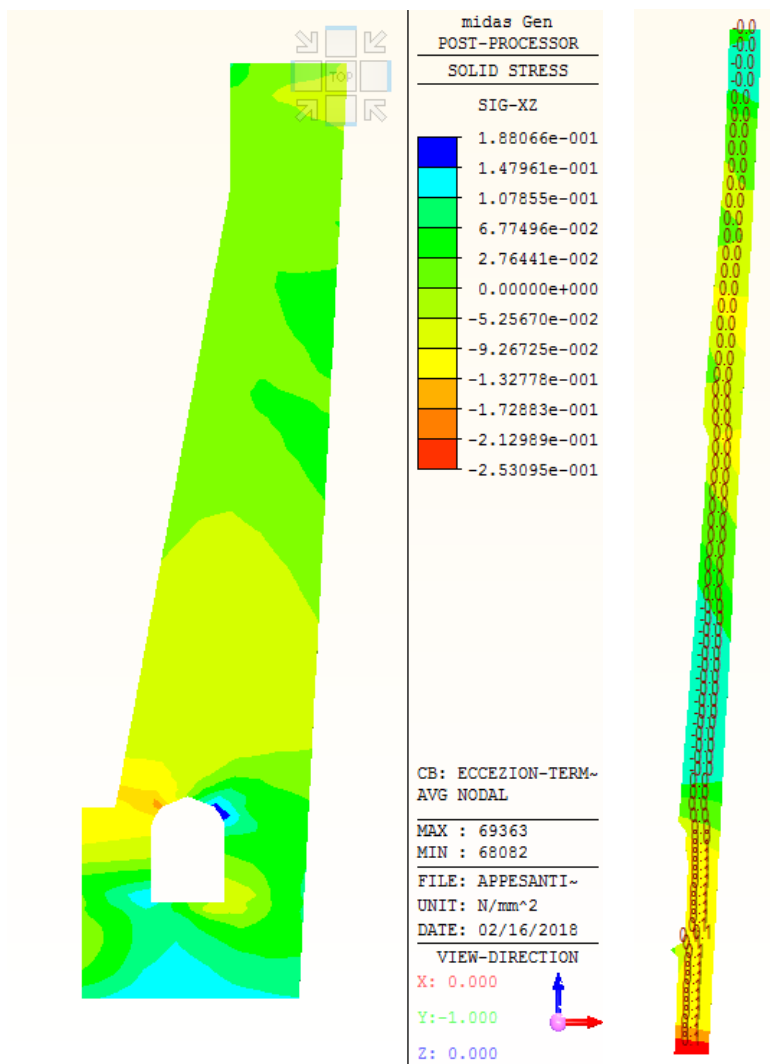
Sforzi tangenziali agenti all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)



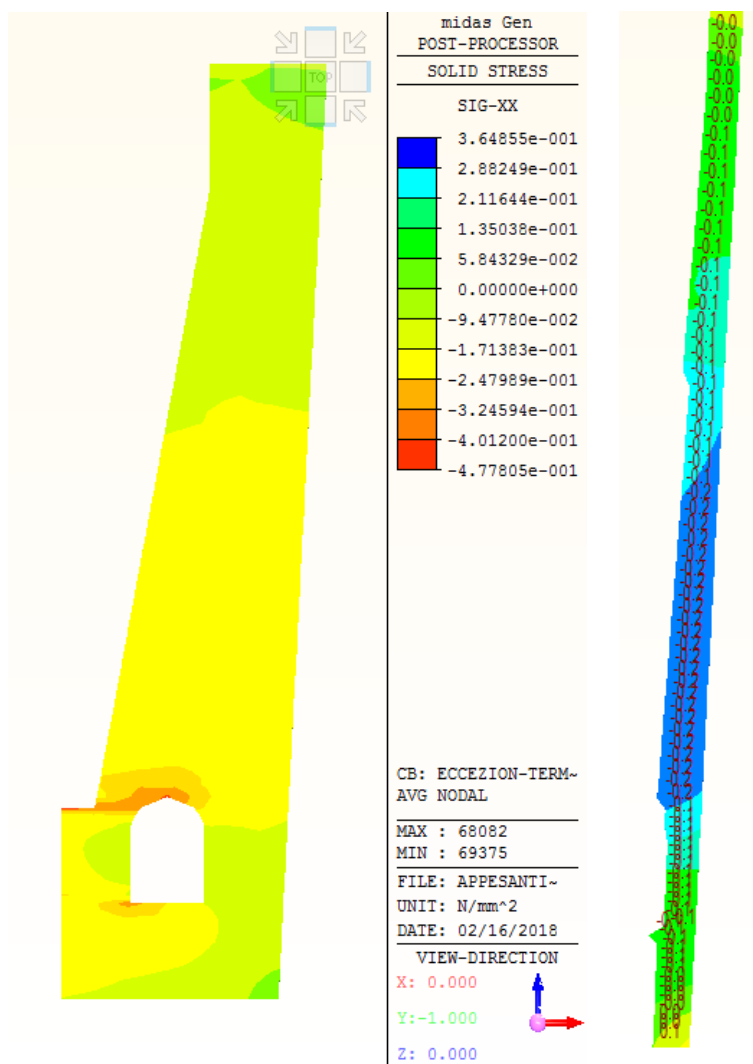
Sforzi agenti perpendicolarmente all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)



1.3.4 Cmb.4: G1+G3+A+0,5×Q1,inverno (Eccezionale inverno)

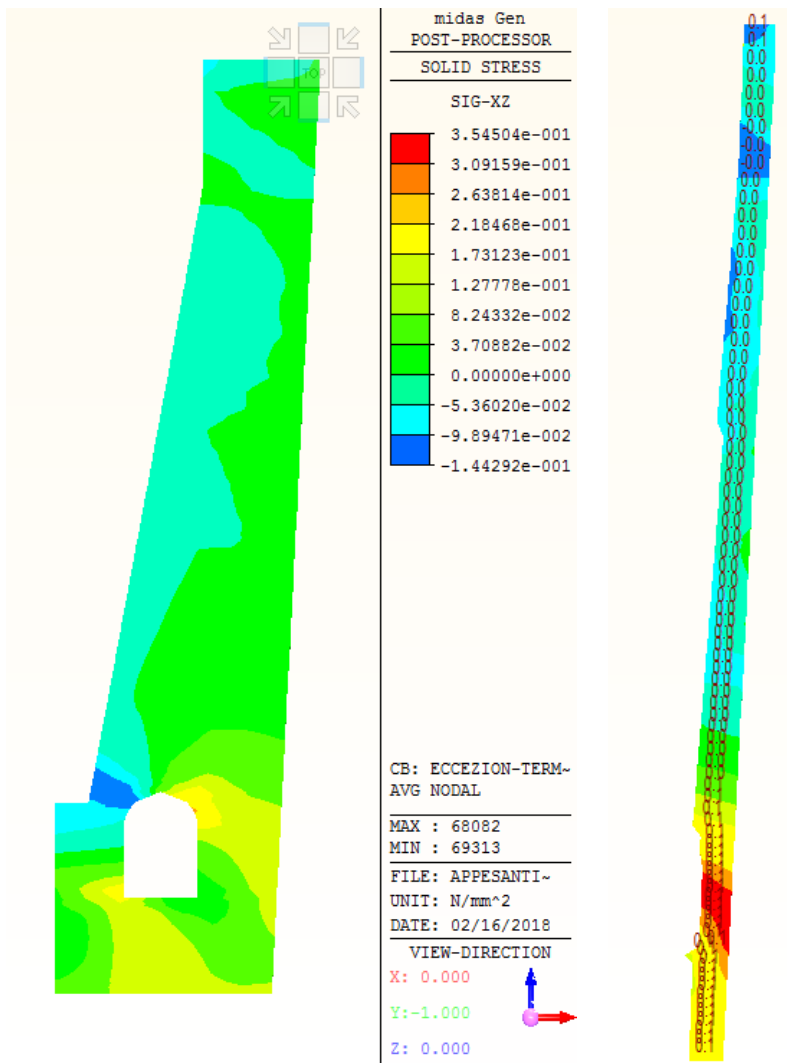


Sforzi tangenziali agenti all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

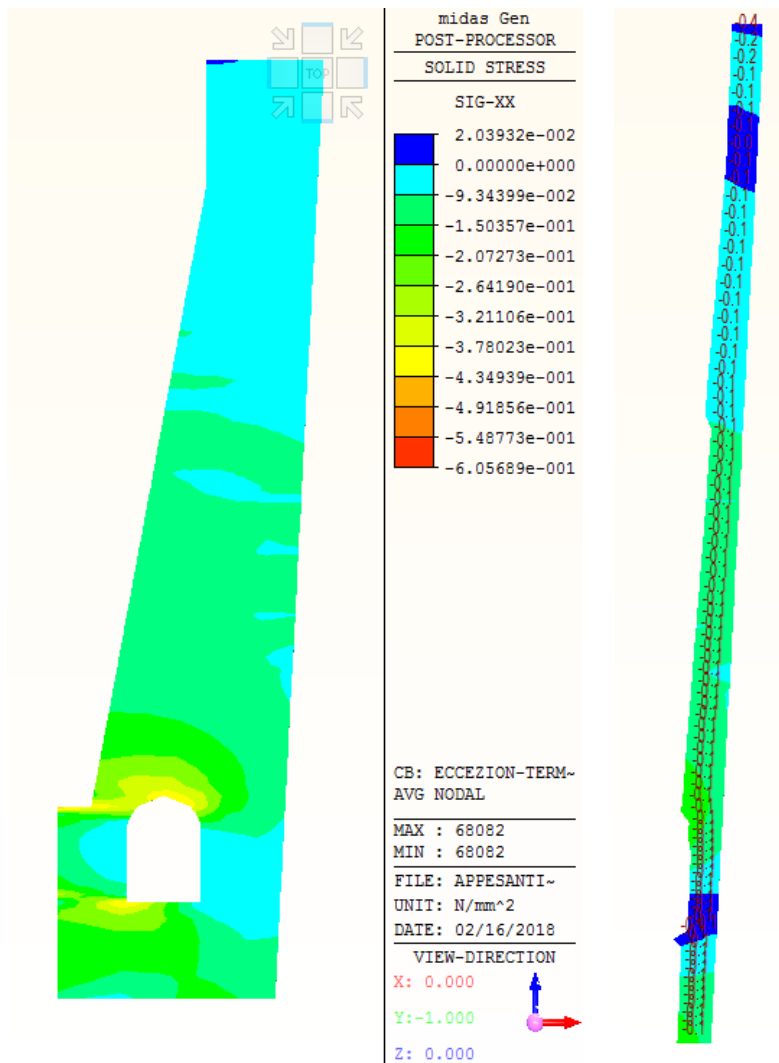


Sforzi agenti perpendicolarmente all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

1.3.5 Cmb.5: G1+G3+A+0,5×Q1,estate (Eccezionale estate)

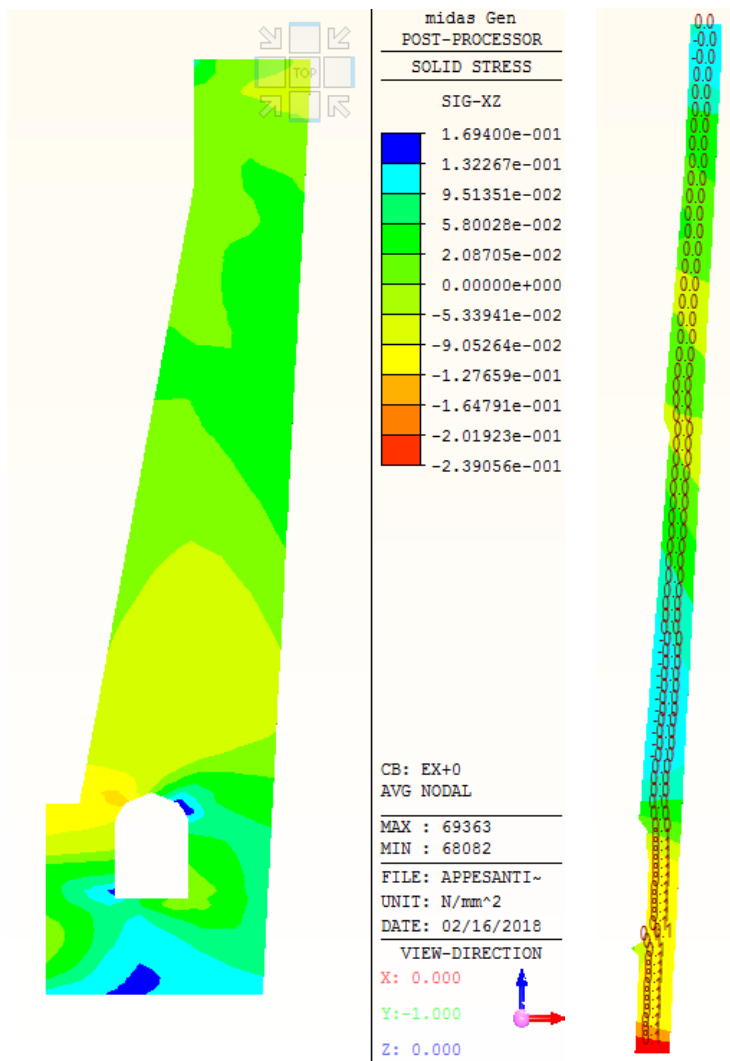


Sforzi tangenziali agenti all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

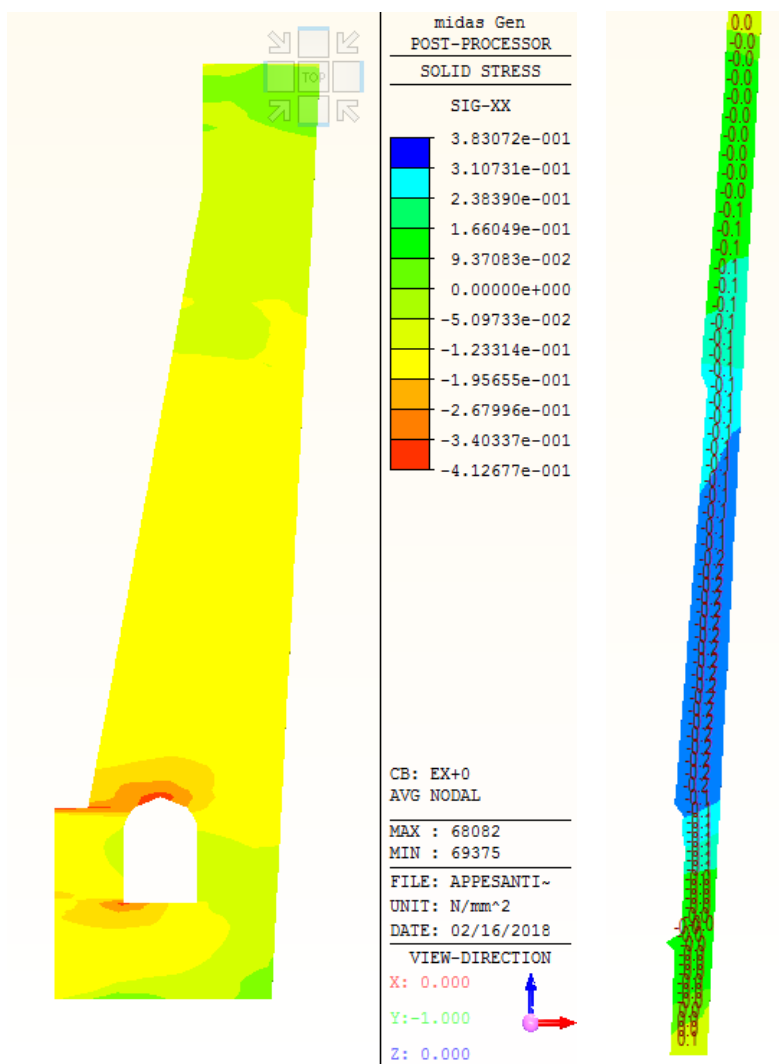


Sforzi agenti perpendicolarmente all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

1.3.6 Cmb.6 (SLV): G1+G3+Ex,SLV+0,3Ez,SLV + Ix,SLV +0,5×Q1,inverno (Sismica SLV inverno)

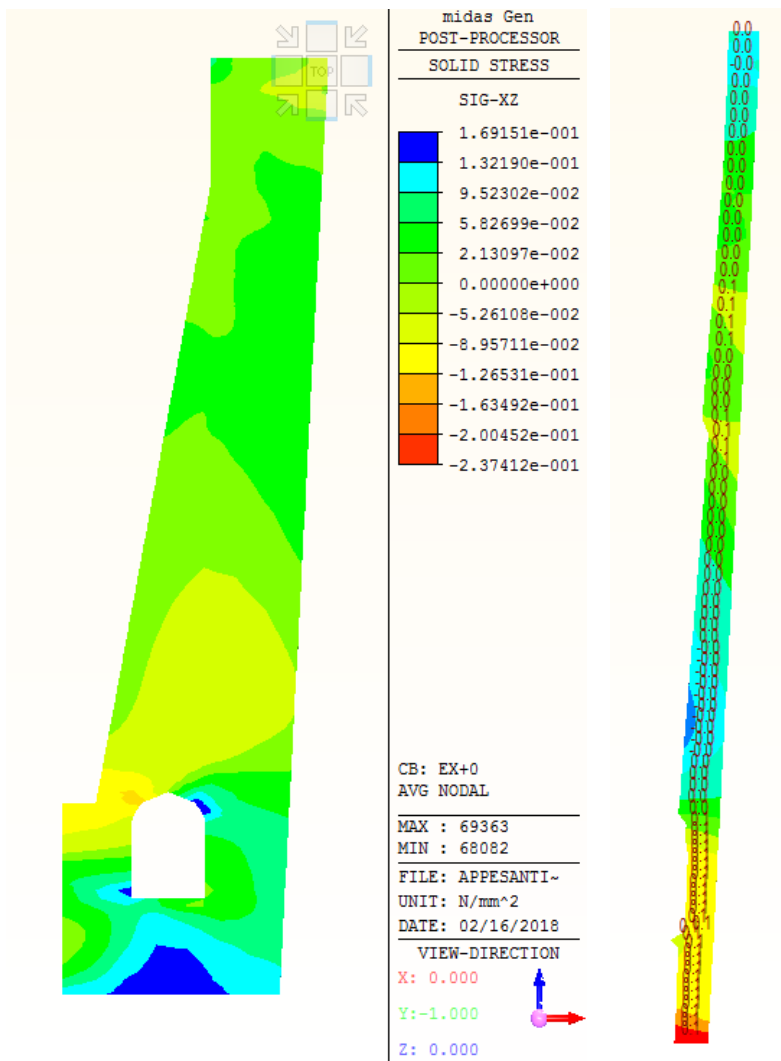


Sforzi tangenziali agenti all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

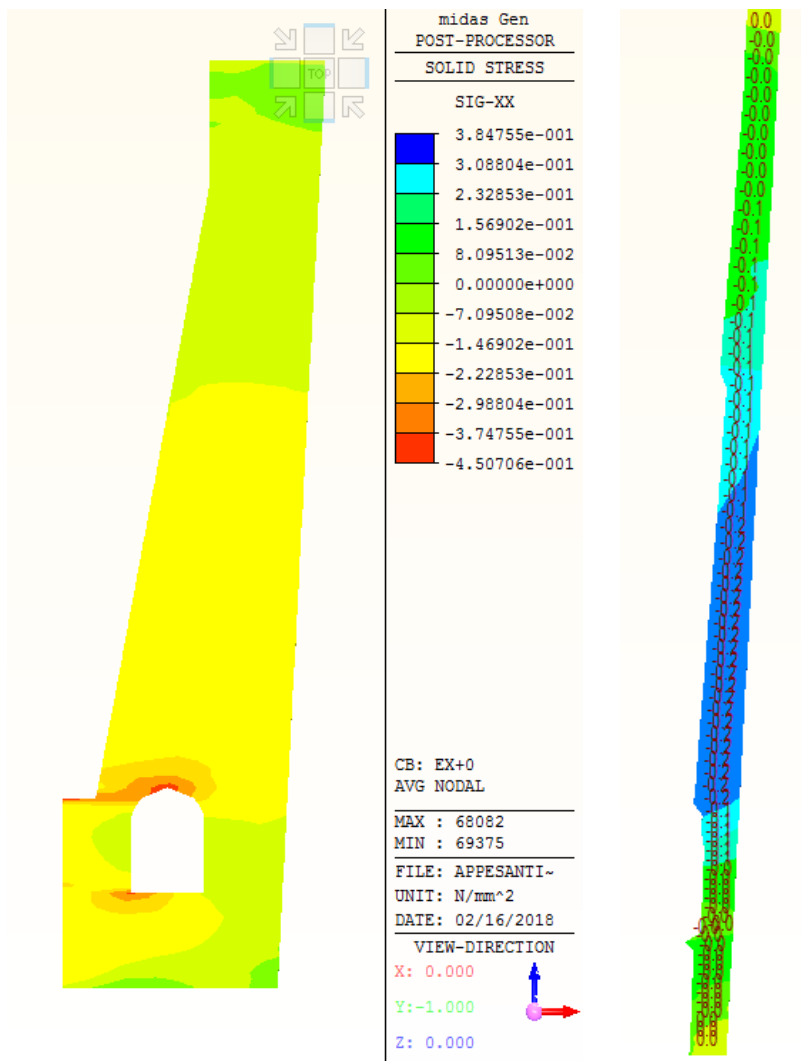


Sforzi agenti perpendicolarmente all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

1.3.7 Cmb.6 (SLC): G1+G3+Ex,SLC+0,3Ez,SLC + Ix,SLC +0,5×Q1,inverno (Sismica SLC inverno)



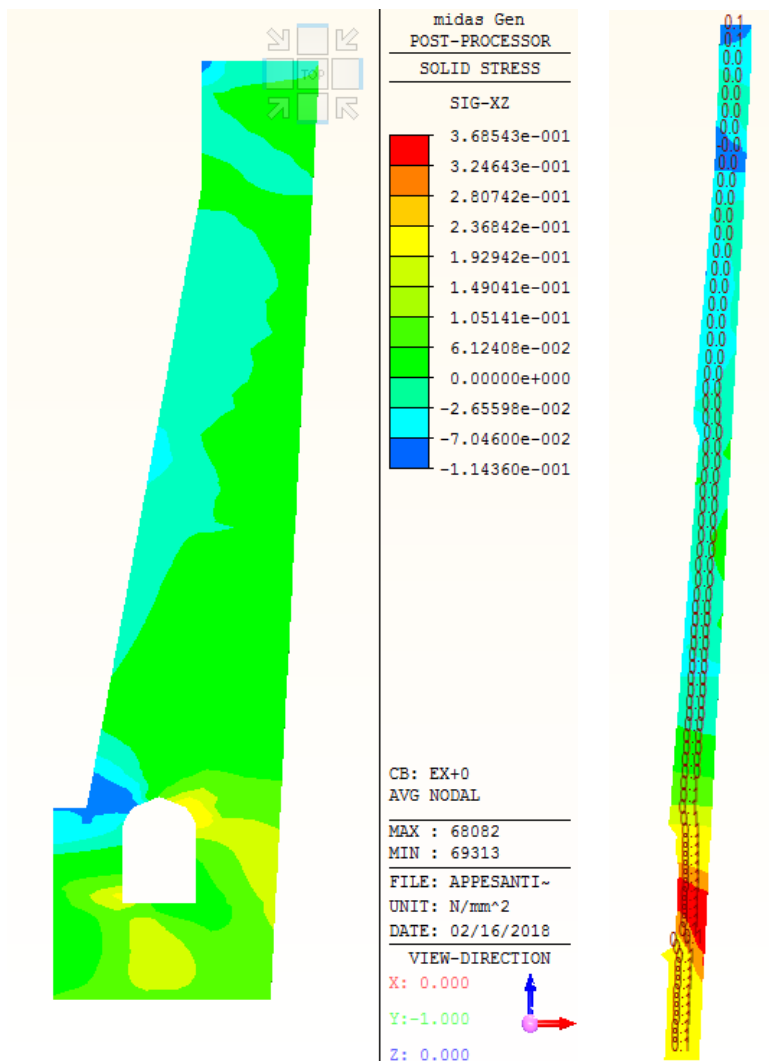
Sforzi tangenziali agenti all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)



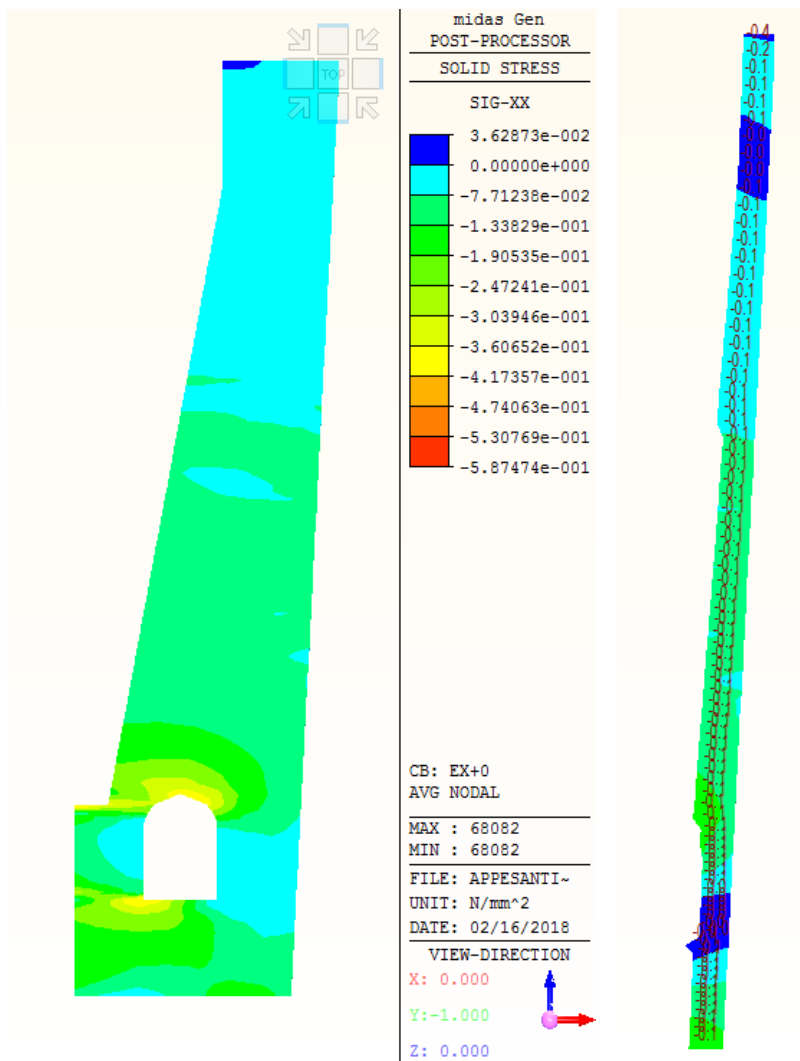
Sforzi agenti perpendicolarmente all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)



1.3.8 Cmb.7 (SLV): G1+G3+Ex,SLV+0,3Ez,SLV + Ix,SLV +0,5×Q1,estate (Sismica SLV estate)

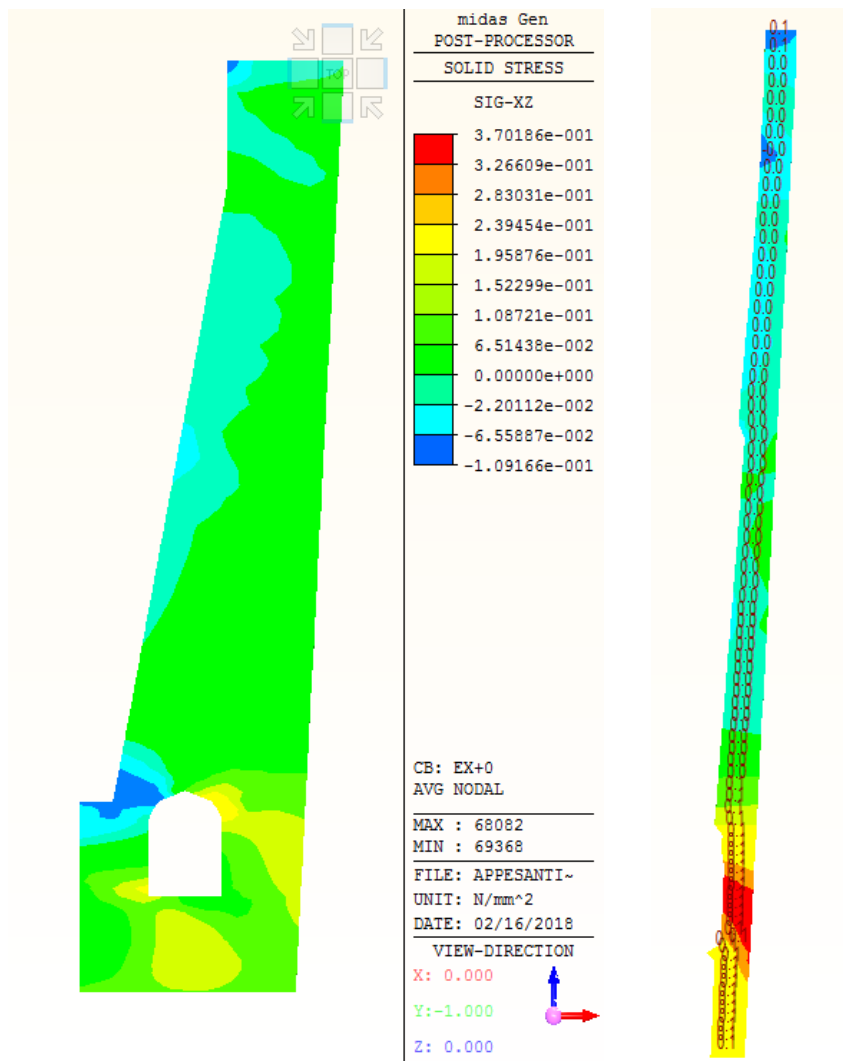


Sforzi tangenziali agenti all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

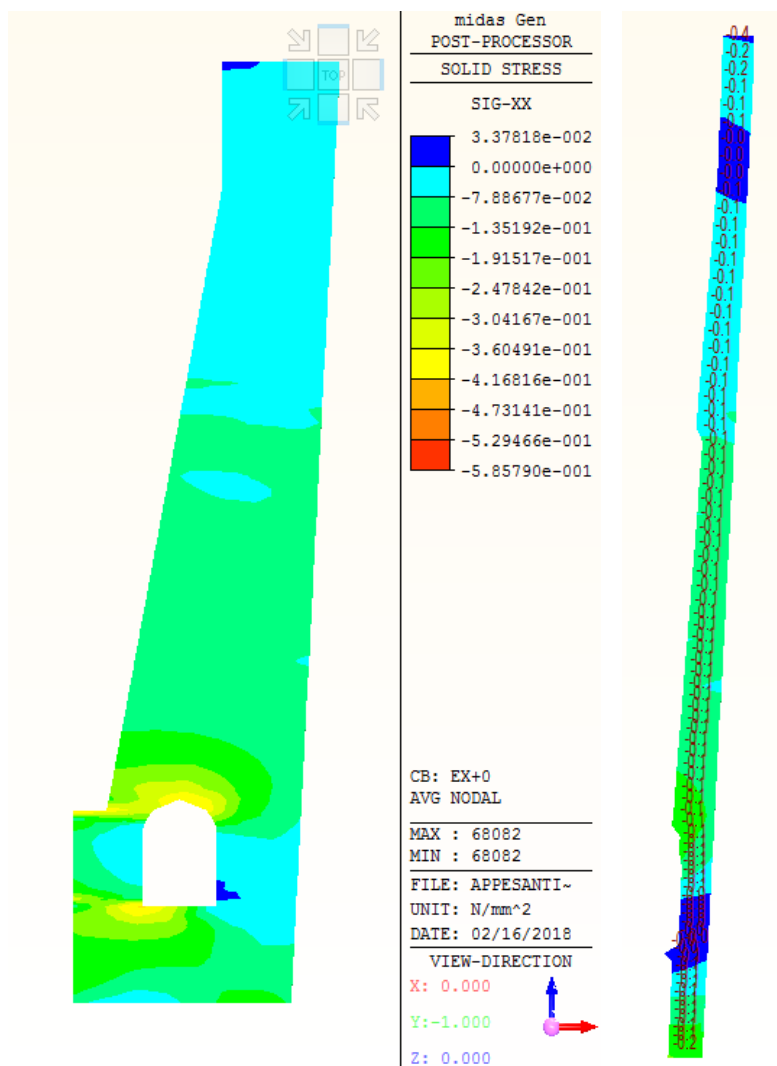


Sforzi agenti perpendicolarmente all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

1.3.9 Cmb.7 (SLC): G1+G3+Ex,SLC+0,3Ez,SLC + Ix,SLC +0,5×Q1,estate (Sismica SLC estate)



Sforzi tangenziali agenti all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

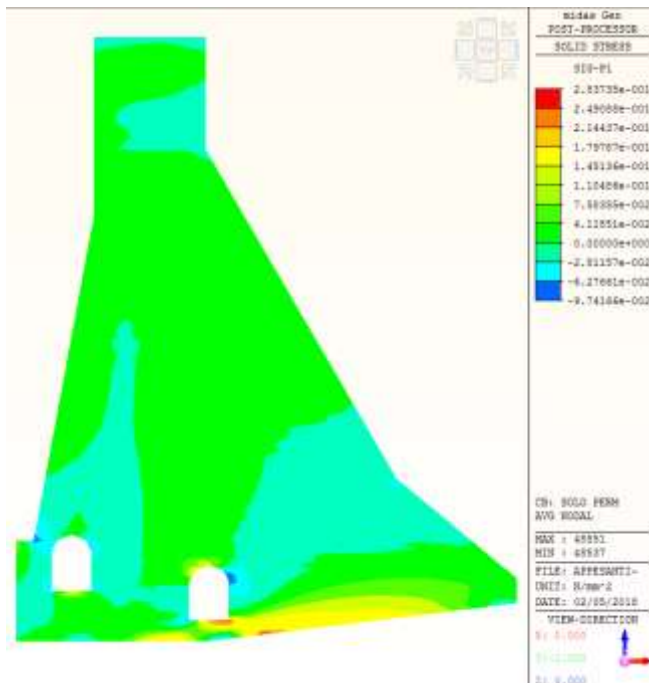


Sforzi agenti perpendicolarmente all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

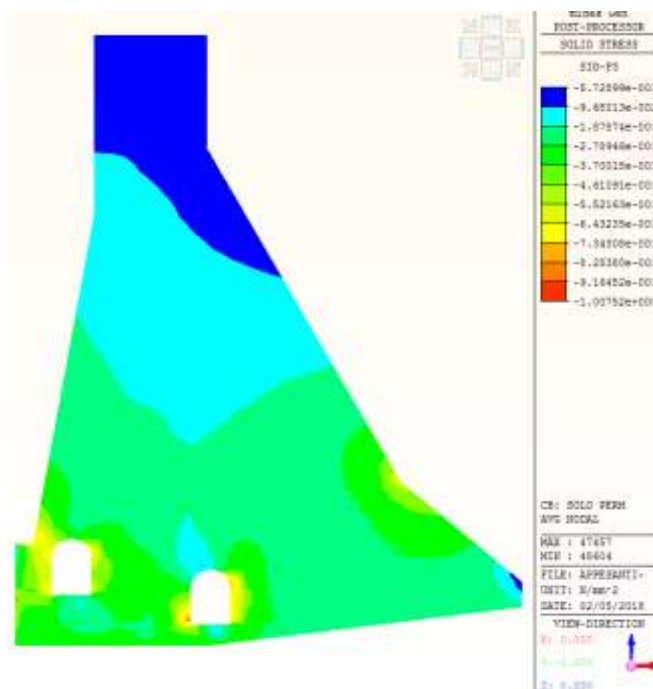
2. CONCIO B / SEZIONE EMERGENTE (DIGA APPESANTITA – D.M.26/06/2014)

2.1 Combinazioni SLE

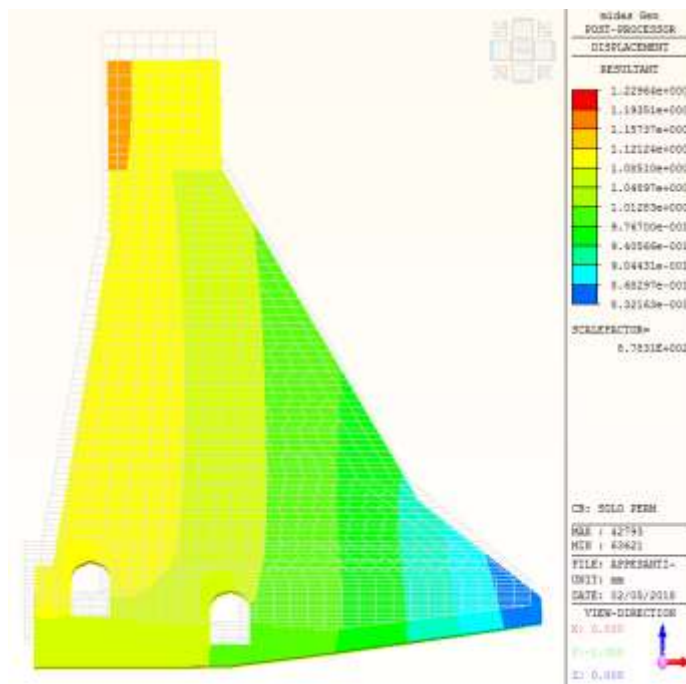
2.1.1 Cmb.1: G1+G2+G3 (Rara)



Sforzo principale di trazione (MPa)

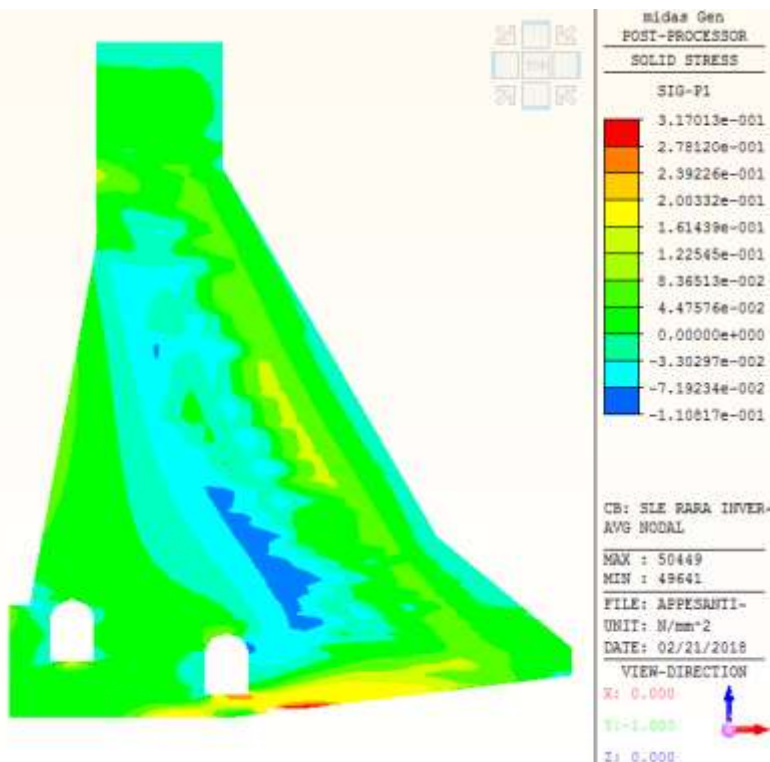


Sforzo principale di compressione (MPa)

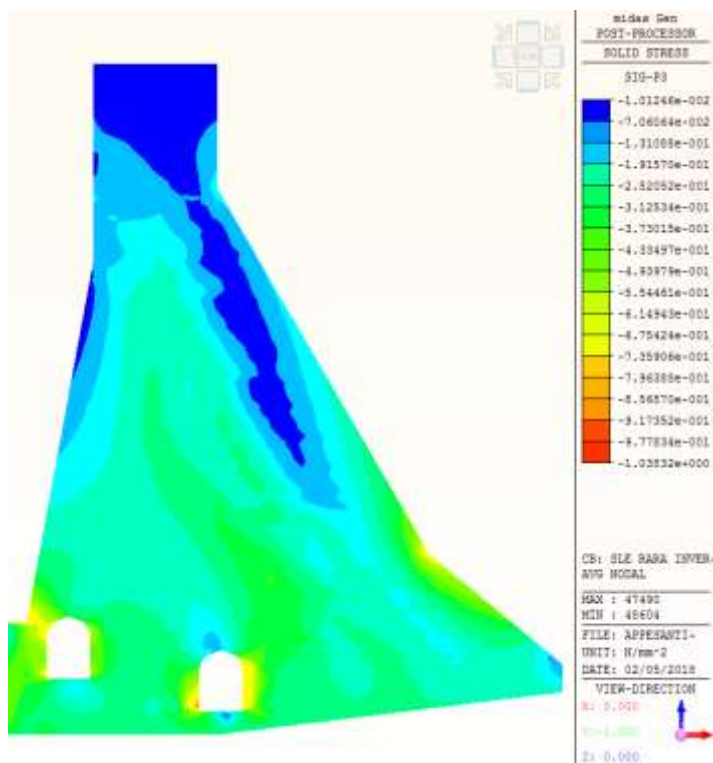


Deformazione risultante (mm)

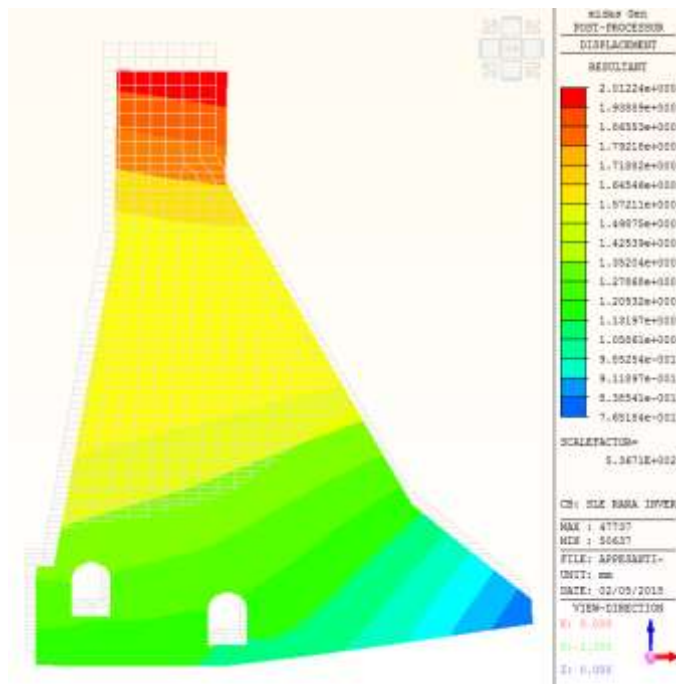
2.1.2 Cmb.2: G1+G2+G3+Q1,inverno (Rara inverno)



Sforzo principale di trazione (MPa)



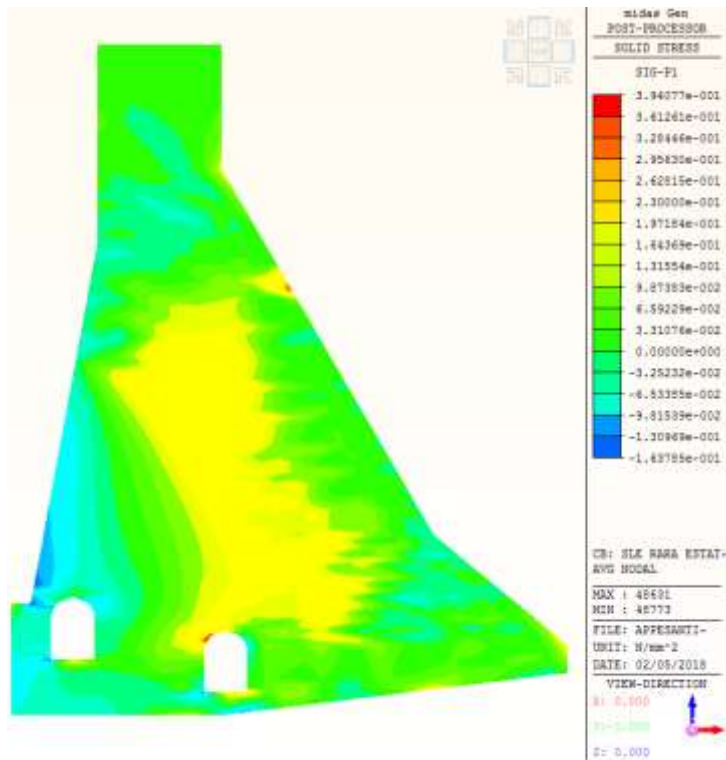
Sforzo principale di compressione (MPa)



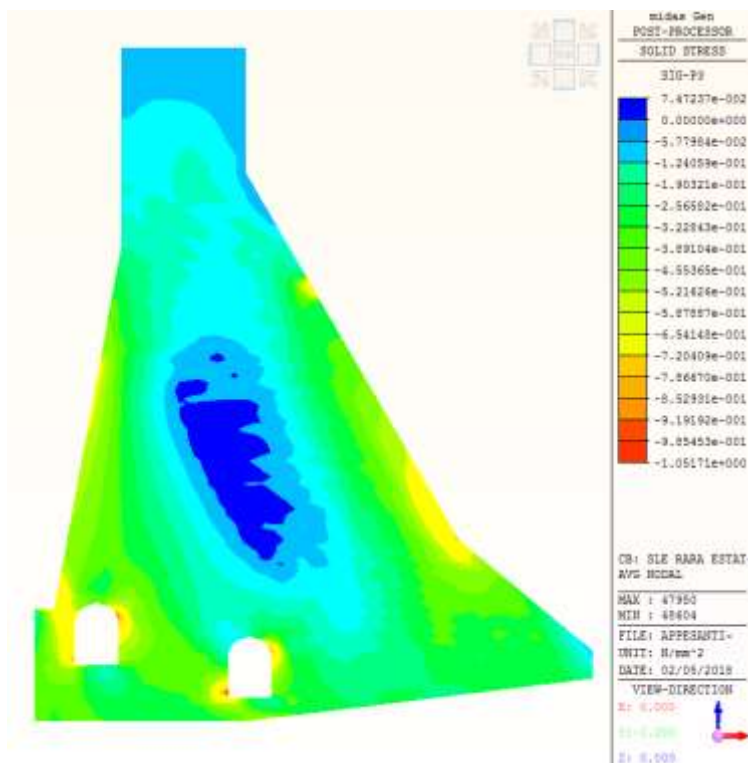
Deformazione risultante (mm)



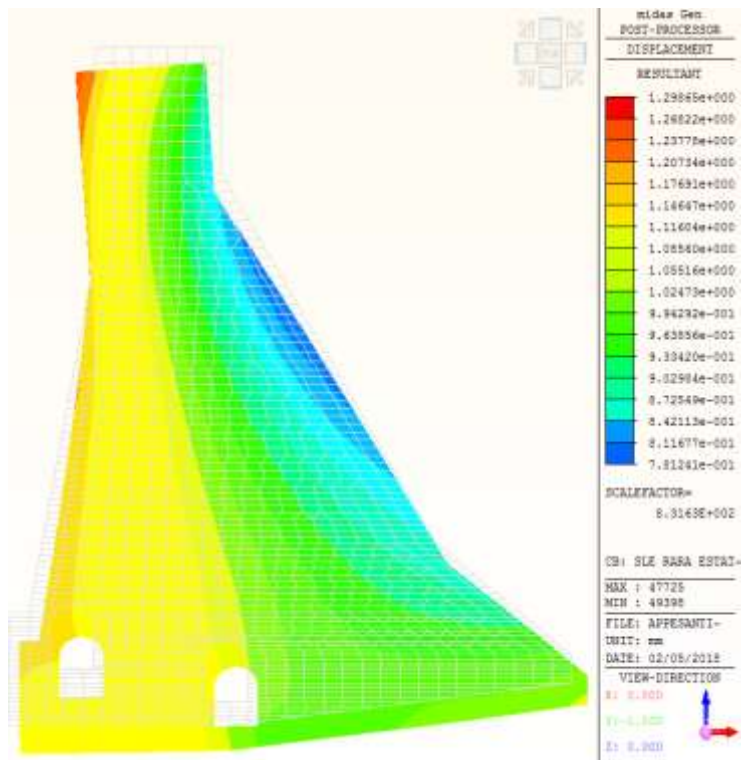
2.1.3 Cmb.3: G1+G2+G3+Q<sub>1,estate</sub> (Rara estate)



Sforzo principale di trazione (MPa)

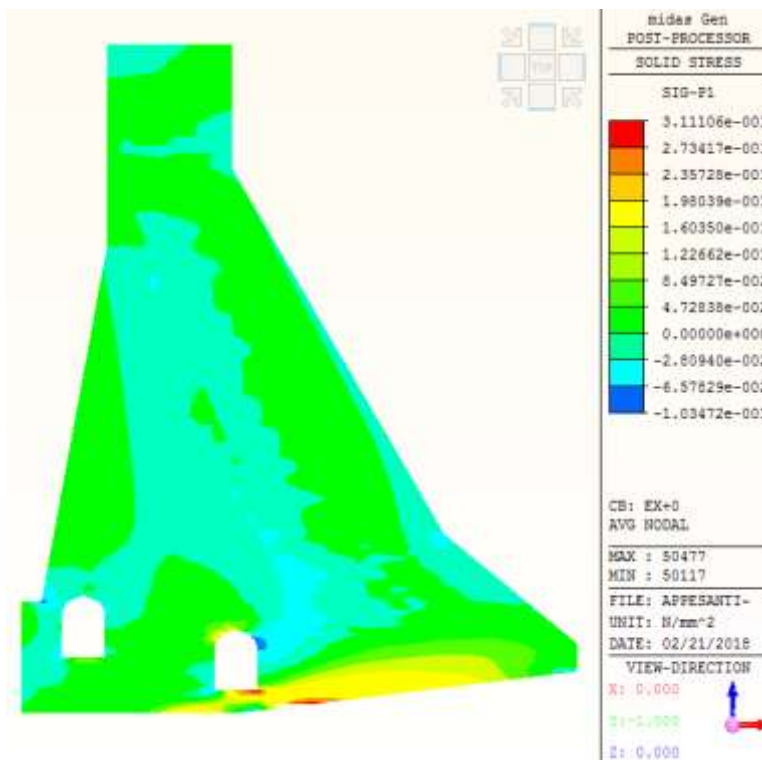


Sforzo principale di compressione (MPa)

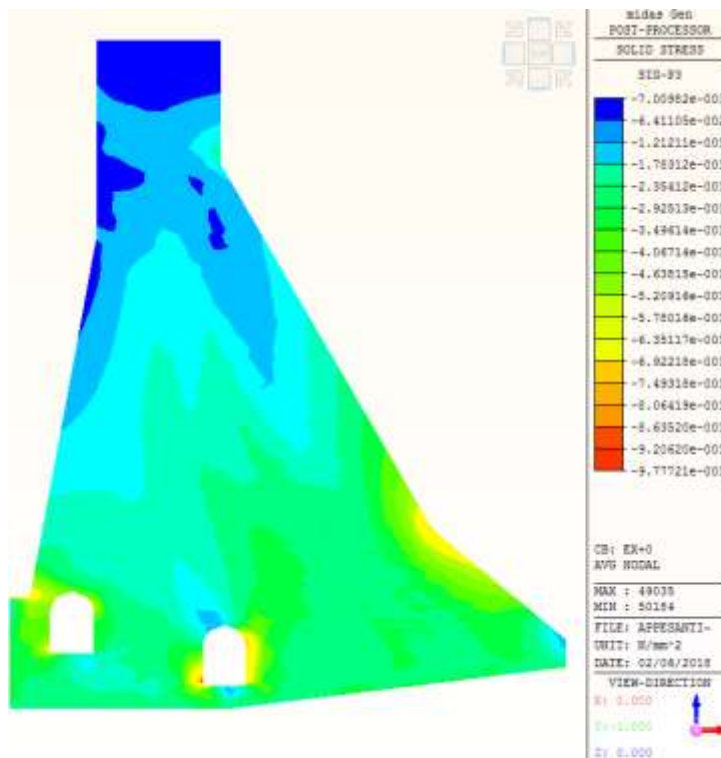


Deformazione risultante (mm)

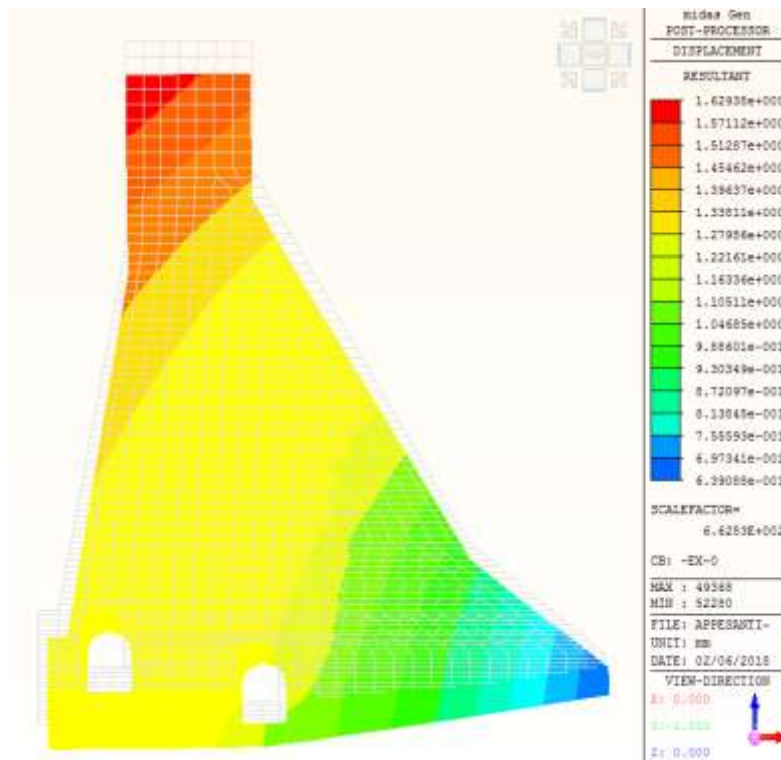
2.1.4 Cmb.4 (SLO):  $G_1+G_2+G_3+E_{x,SLO} + 0,3E_{z,SLO} + I_{x,SLO}+0,5\times Q_{1,inverno}$  (Sismica SLO inverno)



Sforzo principale di trazione (MPa)

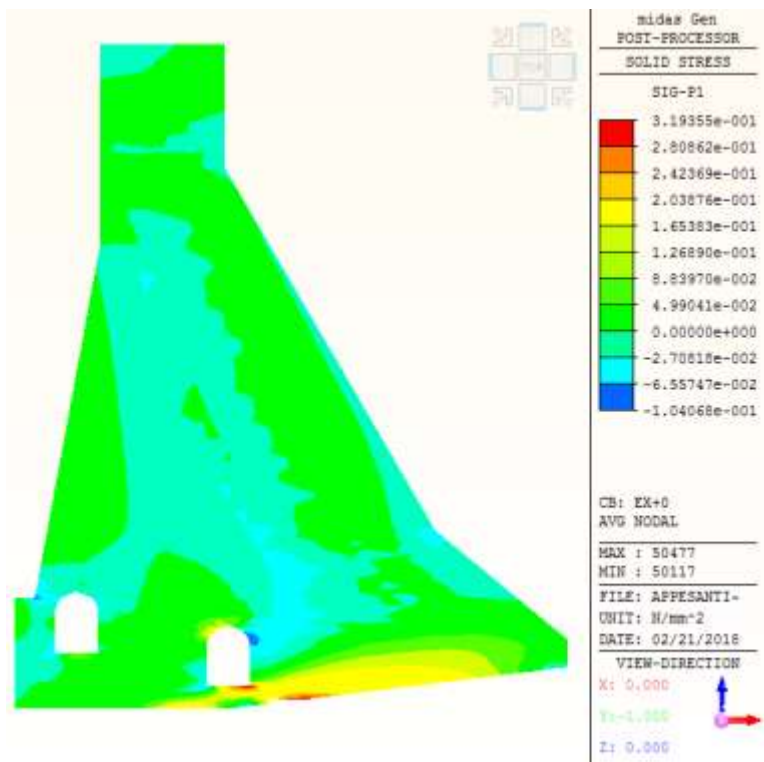


Sforzo principale di compressione (MPa)

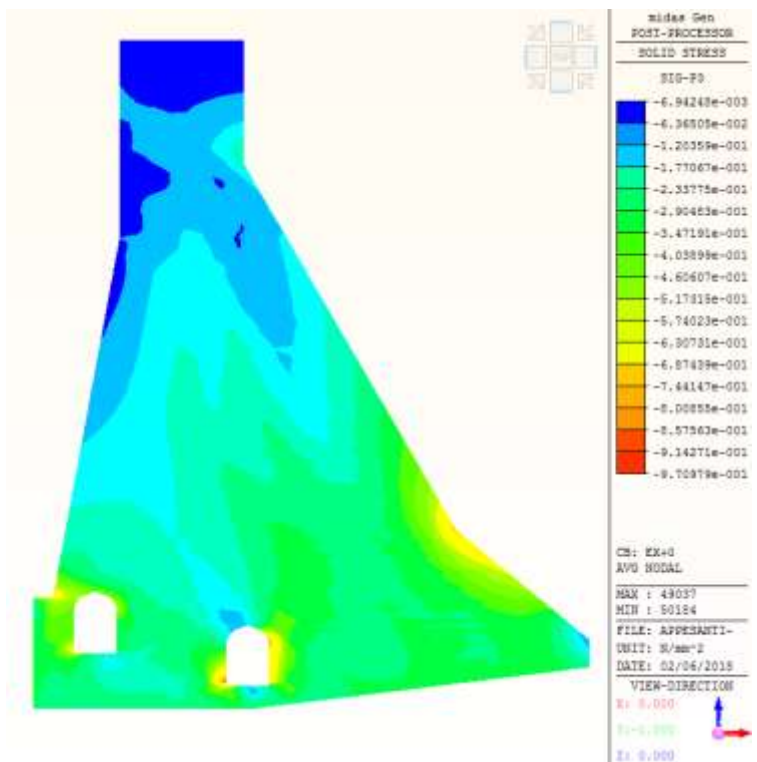


Deformazione risultante (mm)

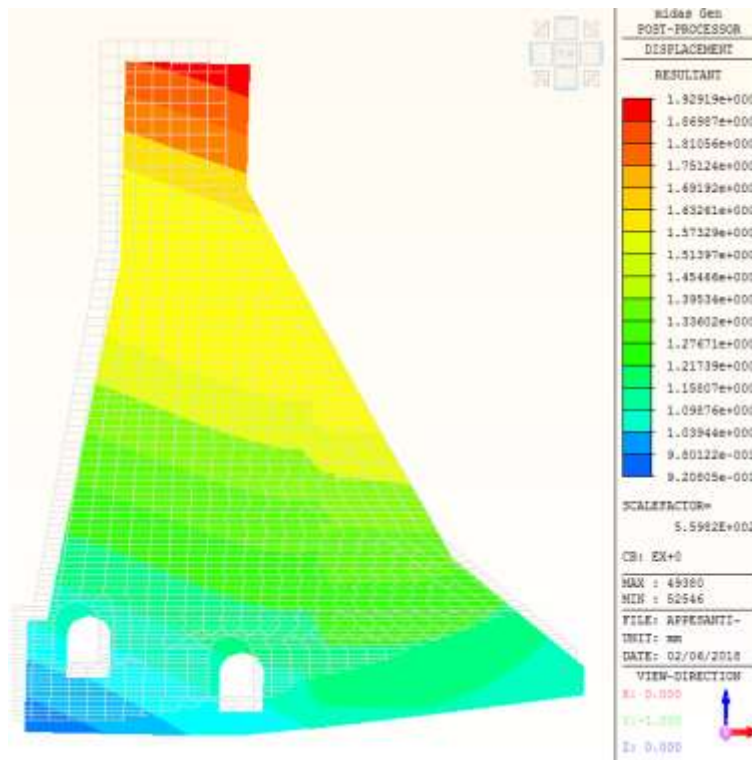
2.1.5 Cmb.4(SLD): G1+G2+G3+Ex,SLD + 0,3Ez,SLD + Ix,SLD+0,5×Q1,inverno (Sismica SLD inverno)



Sforzo principale di trazione (MPa)



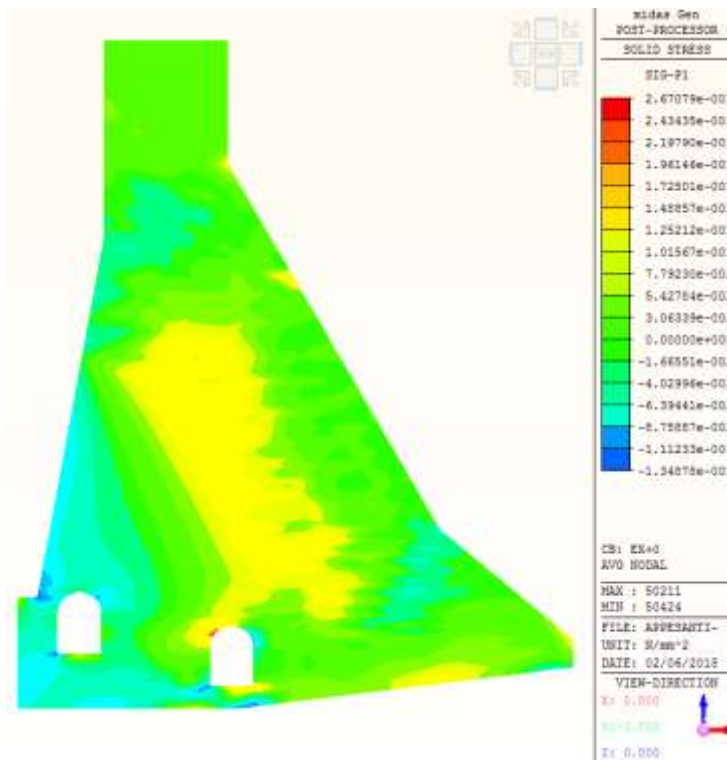
Sforzo principale di compressione (MPa)



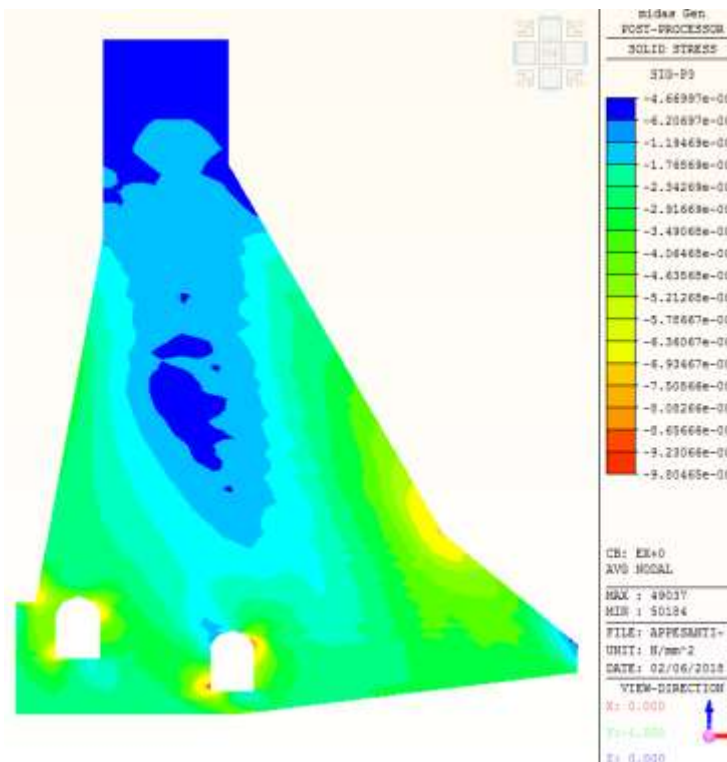
Deformazione risultante (mm)



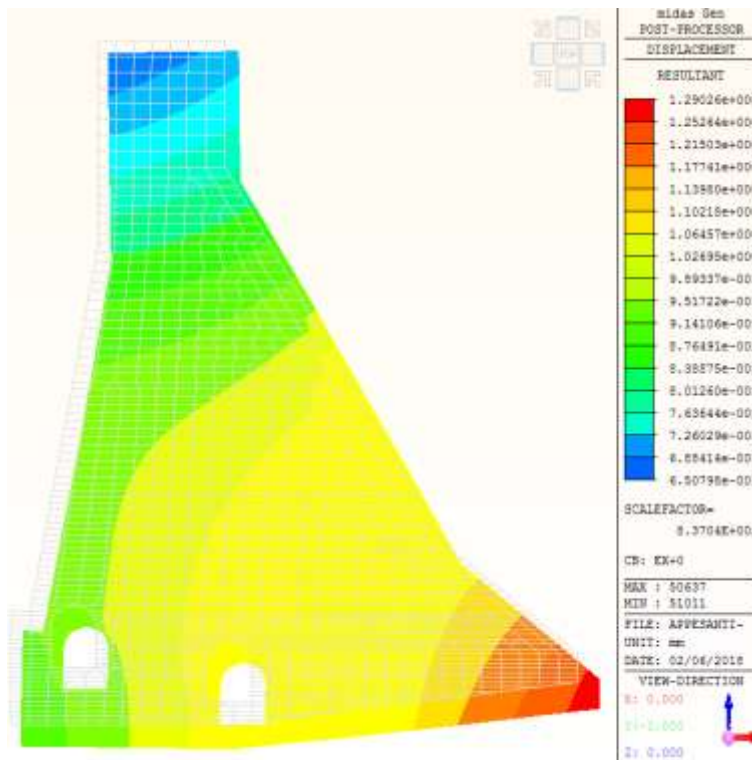
2.1.6 Cmb.5(SLO):  $G_1+G_2+G_3+Ex,SLO + 0,3Ez,SLO + Ix,SLO+0,5\times Q_1,estate$  (Sismica SLO estate)



Sforzo principale di trazione (MPa)



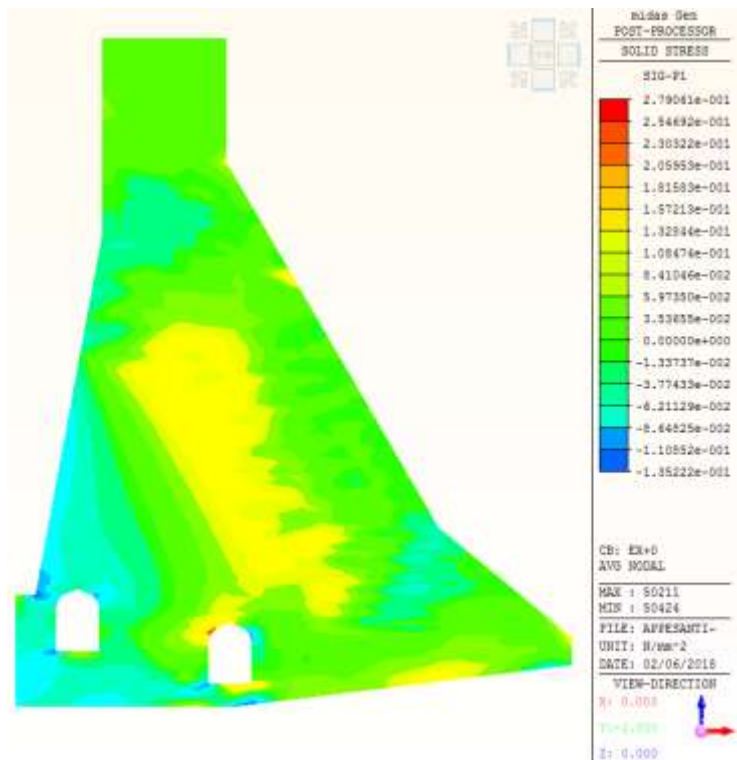
Sforzo principale di compressione (MPa)



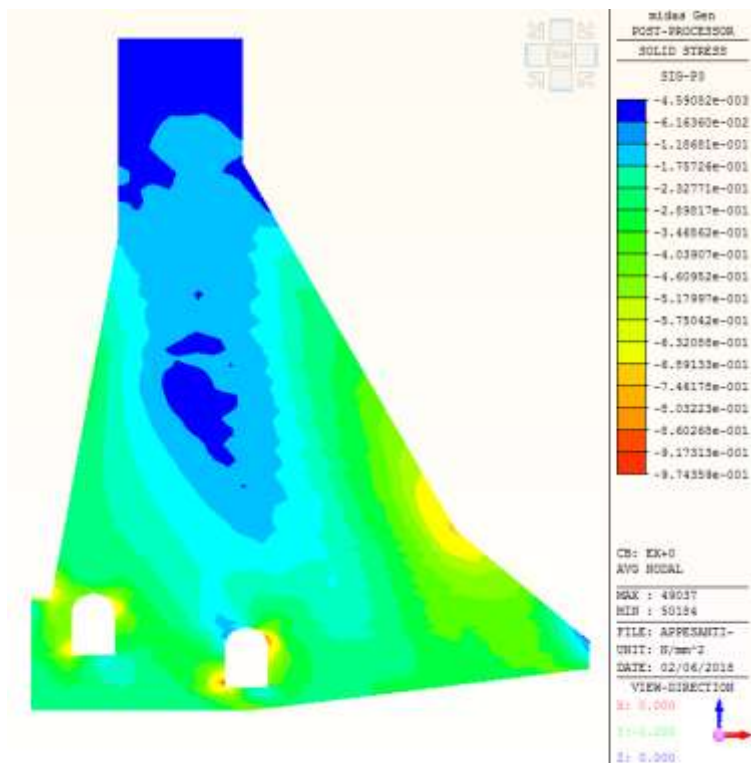
Deformazione risultante (mm)



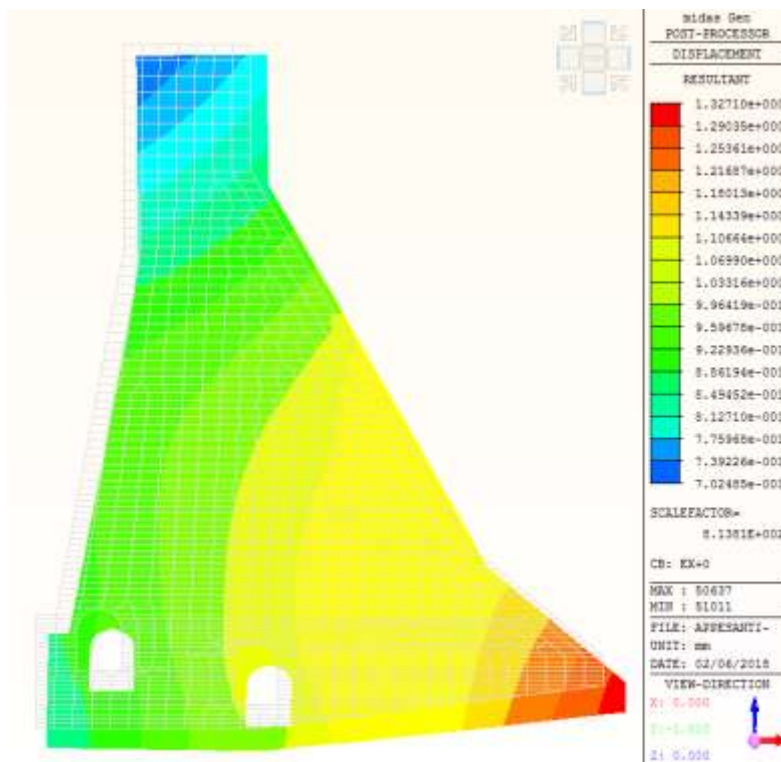
2.1.7 Cmb.5(SLD):  $G1+G2+G3+E_{x,SLD} + 0,3E_{z,SLD} + I_{x,SLD} + 0,5 \times Q_{1,estate}$  (Sismica SLD estate)



Sforzo principale di trazione (MPa)

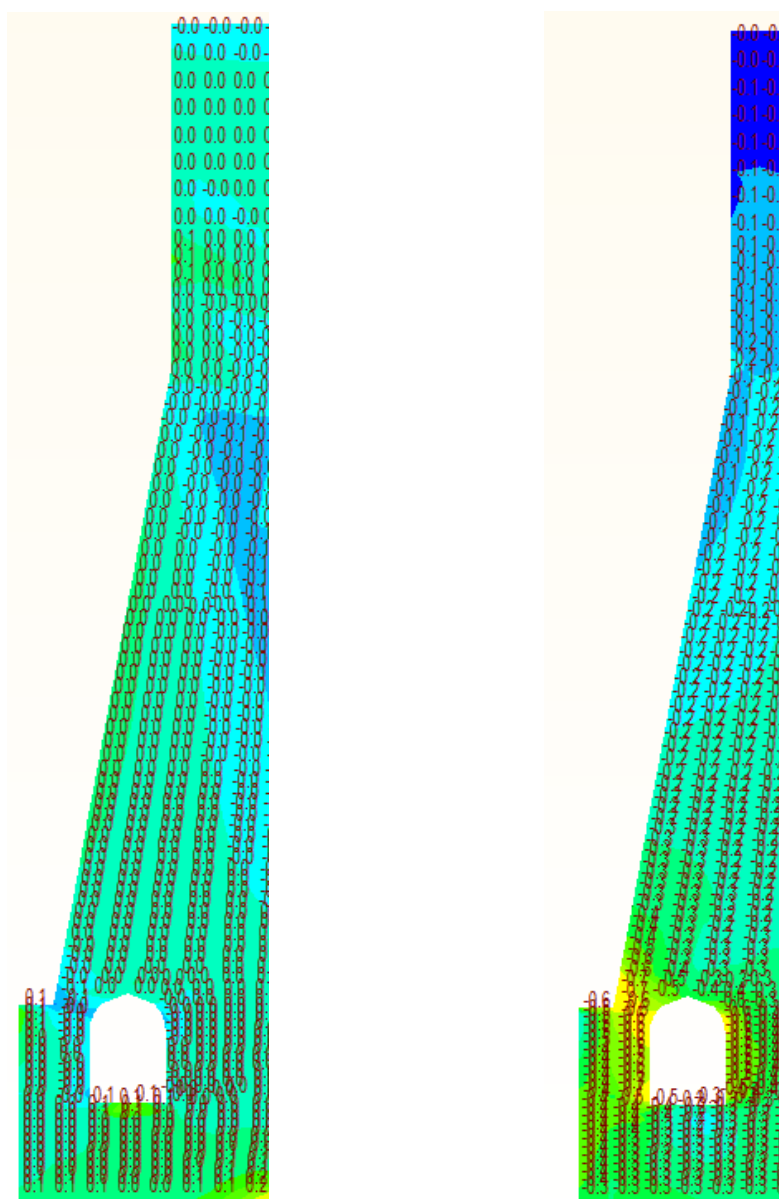


Sforzo principale di compressione (MPa)



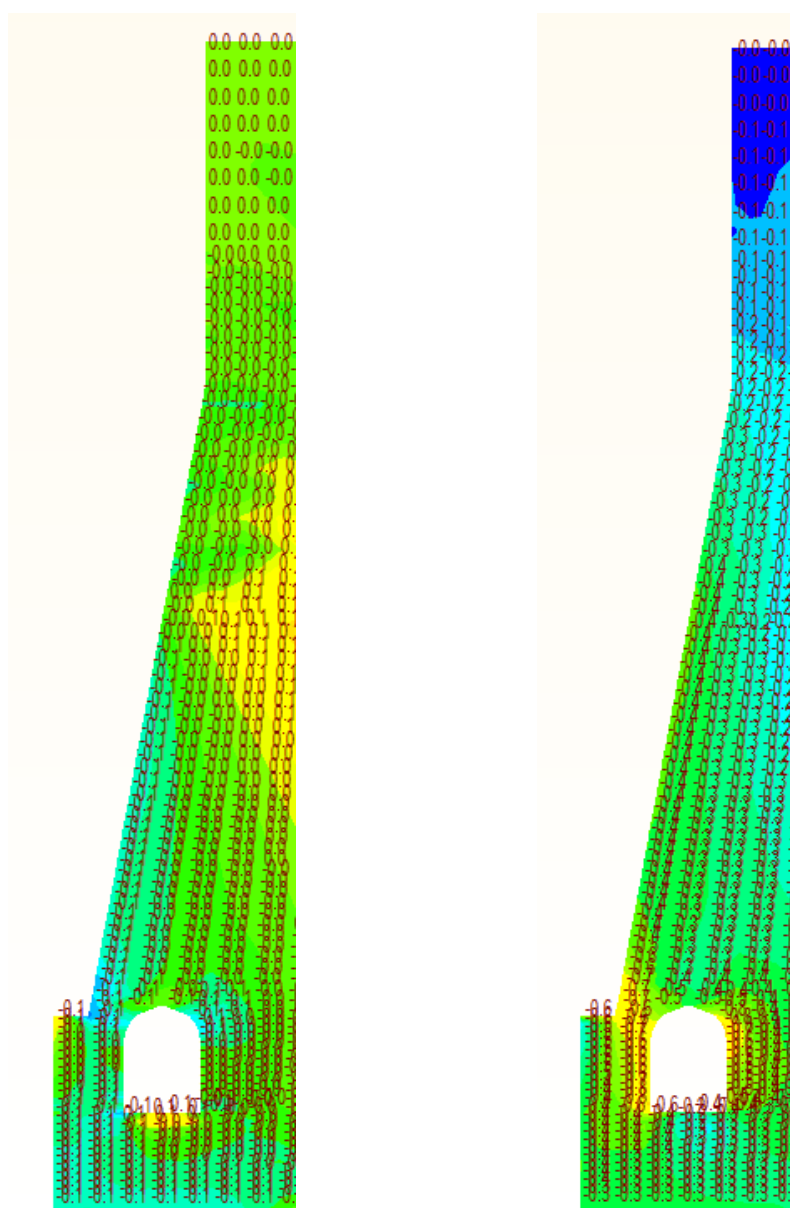
Deformazione risultante (mm)

2.1.8 Cmb.6:  $G1+G2+G3+0,5 \times Q_{1,\text{inverno}}$  (Quasi permanente inverno)



A sx. sforzo principale di trazione (MPa) e a dx. sforzo principale di compressione (MPa) sul paramento di monte

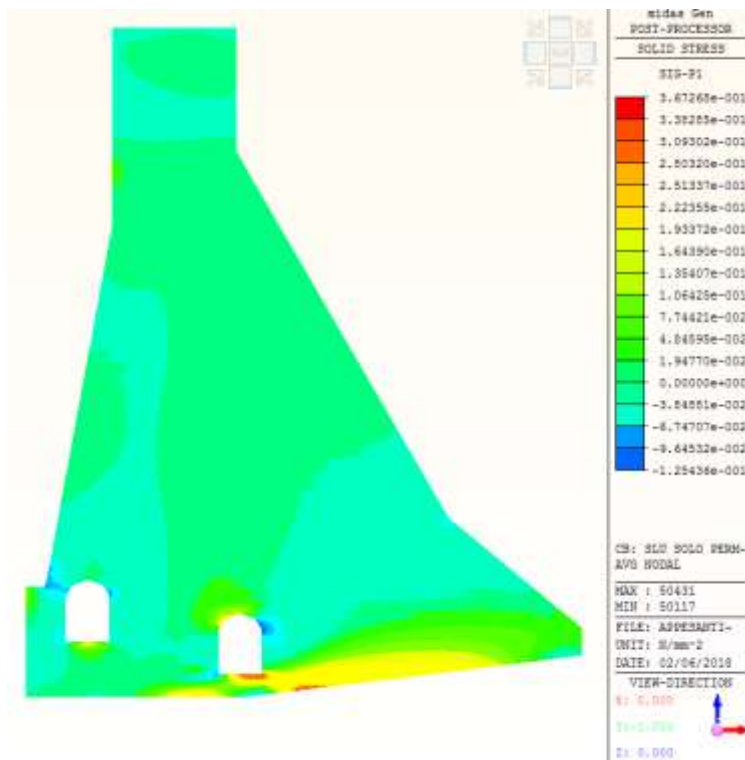
2.1.9 Cmb.7:  $G1+G2+G3+0,5 \times Q_{1,estate}$  (Quasi permanente estate)



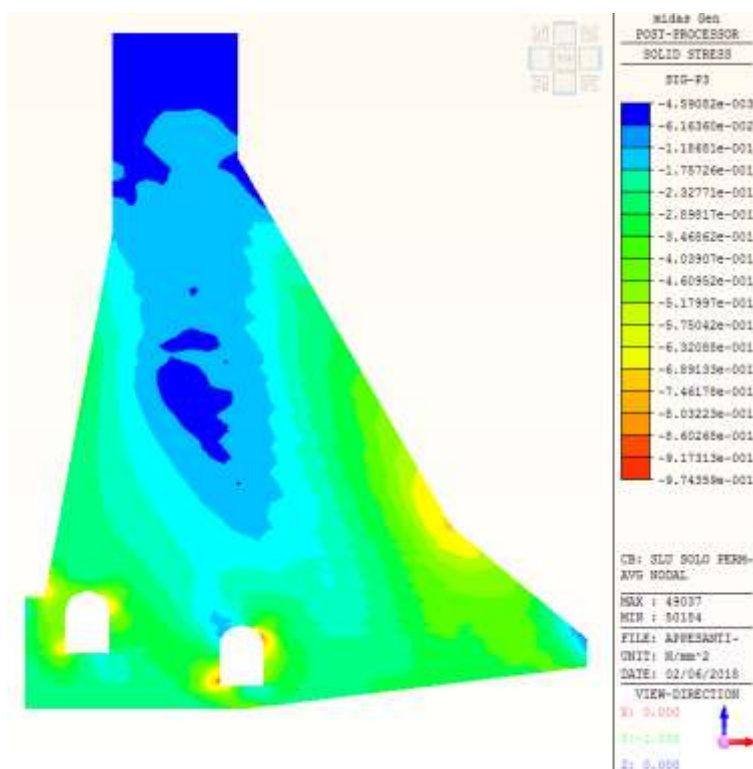
A sx. sforzo principale di trazione (MPa) e a dx. sforzo principale di compressione (MPa) sul paramento di monte

## 2.2 Combinazioni SLU

### 2.2.1 Cmb.1: $1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3$ (Fondamentale)

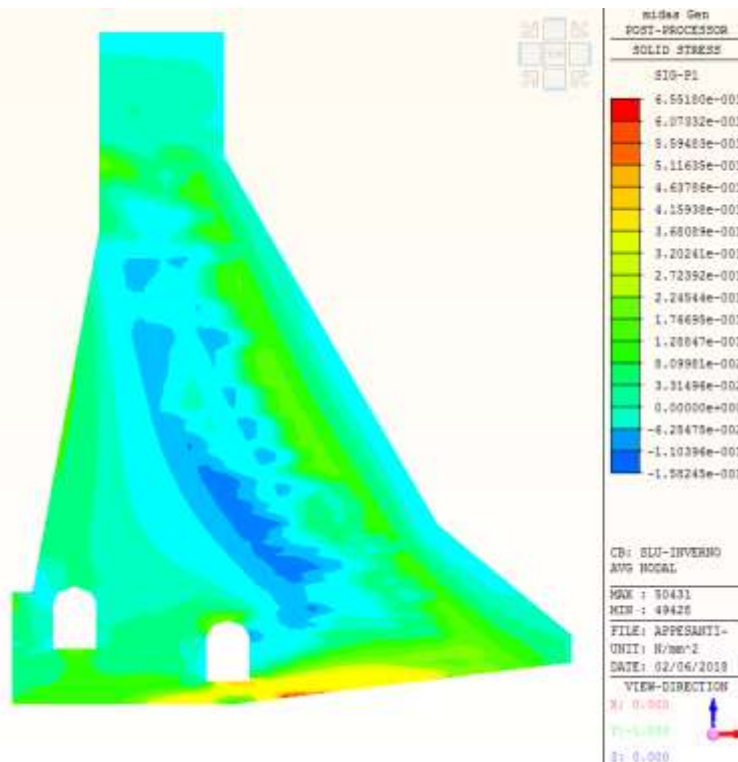


Sforzo principale di trazione (MPa)

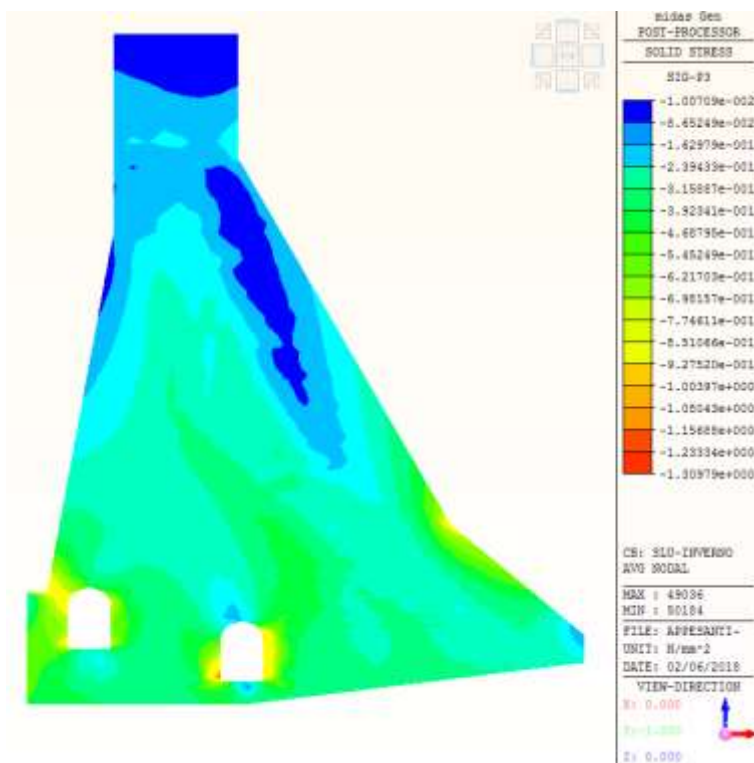


Sforzo principale di compressione (MPa)

2.2.2 Cmb.2: 1,3×G1+1,5×G2+1,5×G3 +1,5×Q1,inverno (Fondamentale inverno)



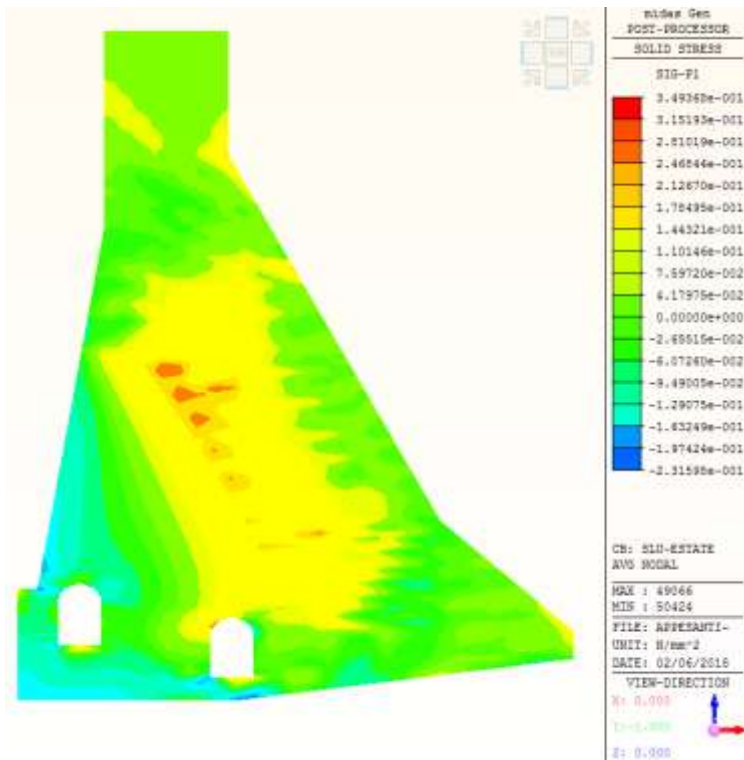
Sforzo principale di trazione (MPa)



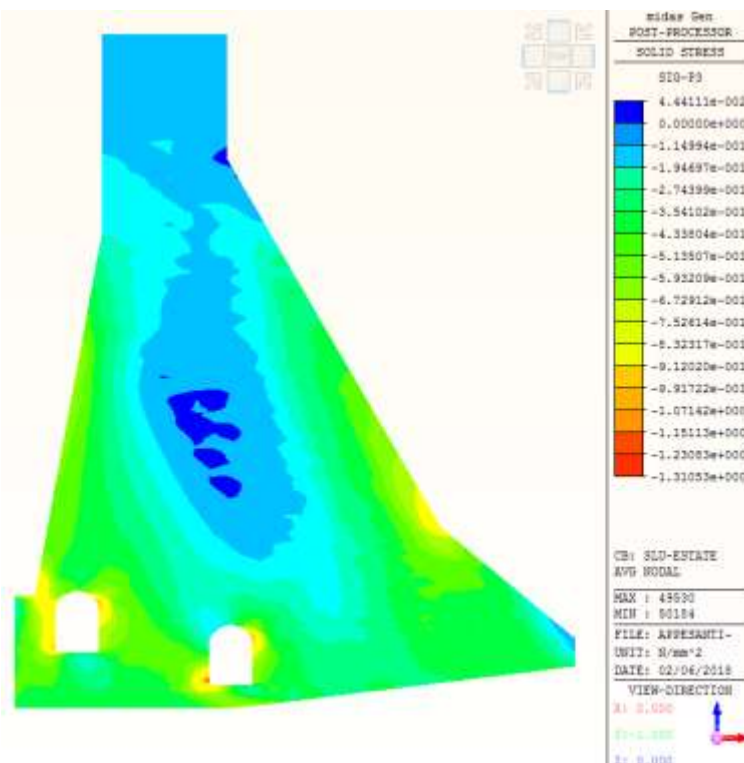
Sforzo principale di compressione (MPa)



2.2.3 Cmb.3: 1,3×G1+1,5×G2+1,5×G3 +1,5×Q1,estate (Fondamentale estate)

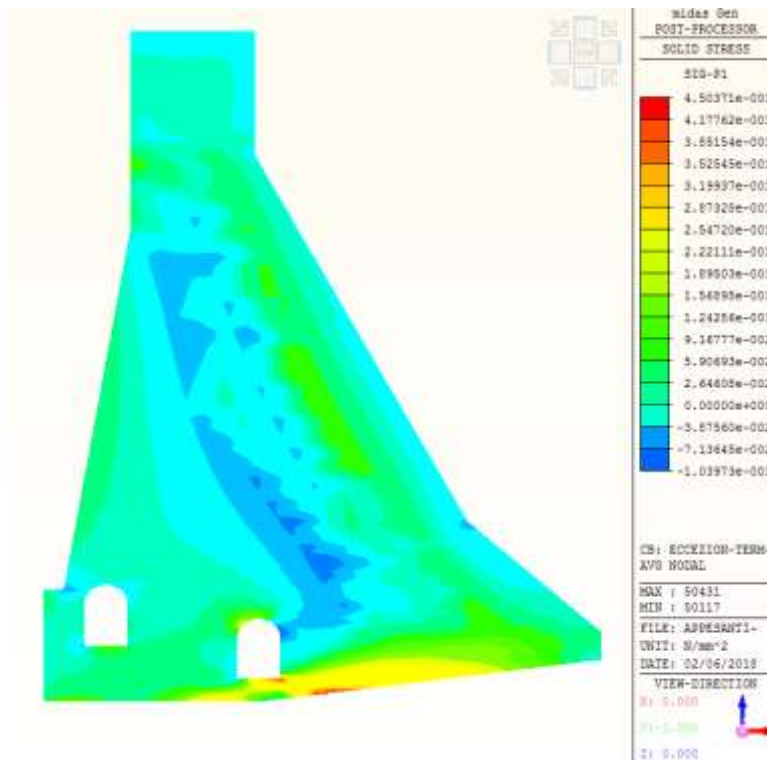


Sforzo principale di trazione (MPa)

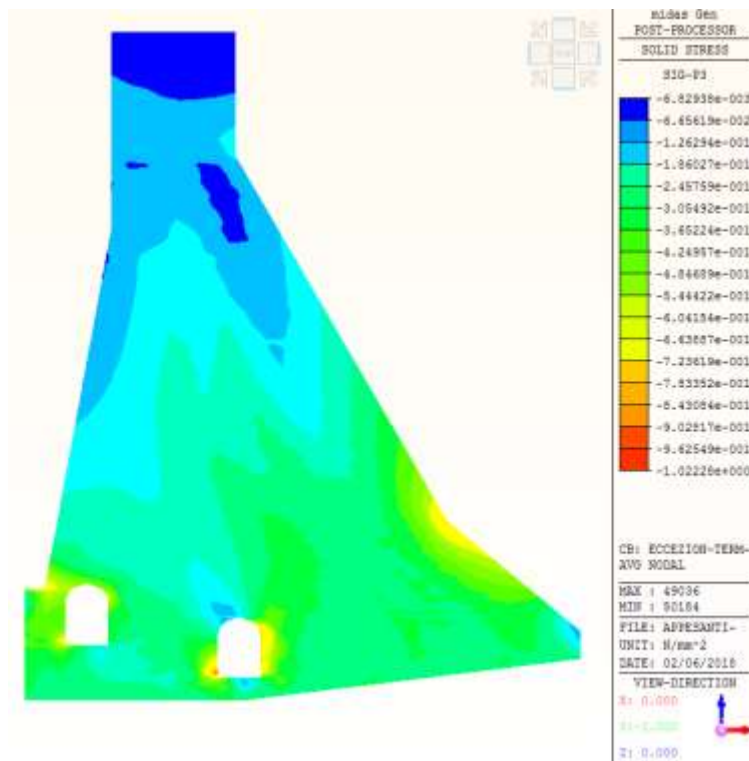


Sforzo principale di compressione (MPa)

2.2.4 Cmb.4: G1+G3+A+0,5×Q1,inverno (Eccezionale inverno)



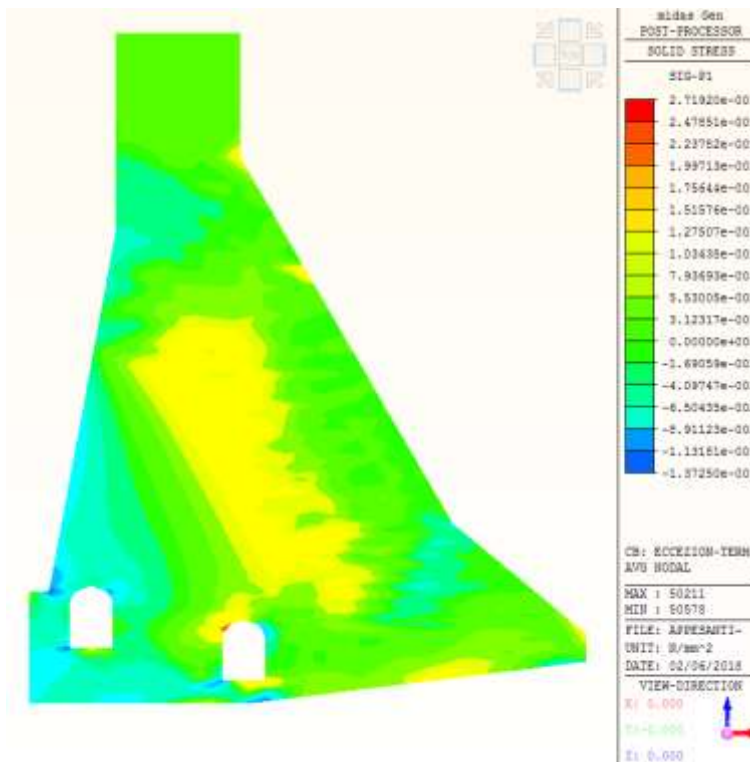
Sforzo principale di trazione (MPa)



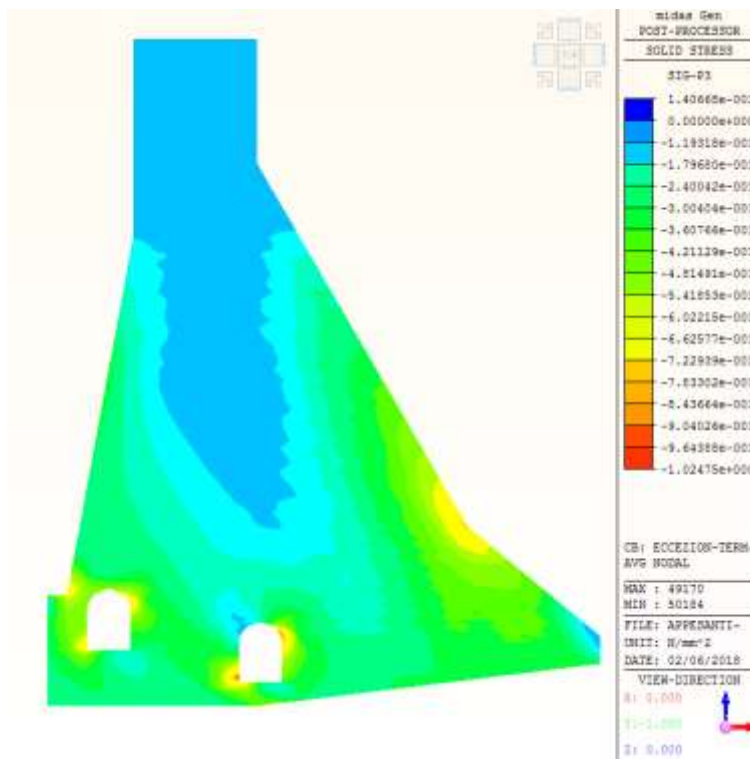
Sforzo principale di compressione (MPa)



2.2.5 Cmb.5: G1+G3+A+0,5×Q1,estate (Eccezionale estate)

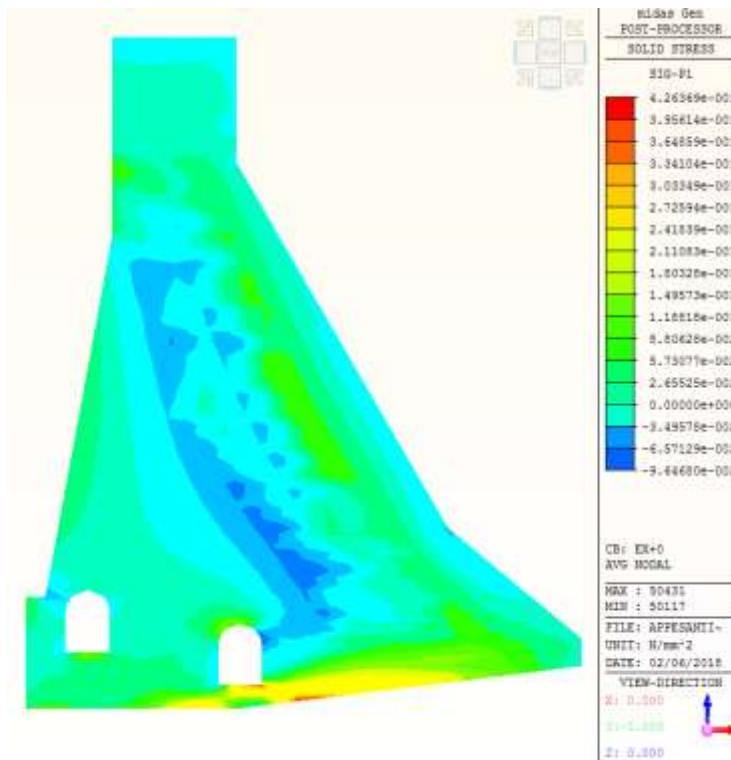


Sforzo principale di trazione (MPa)

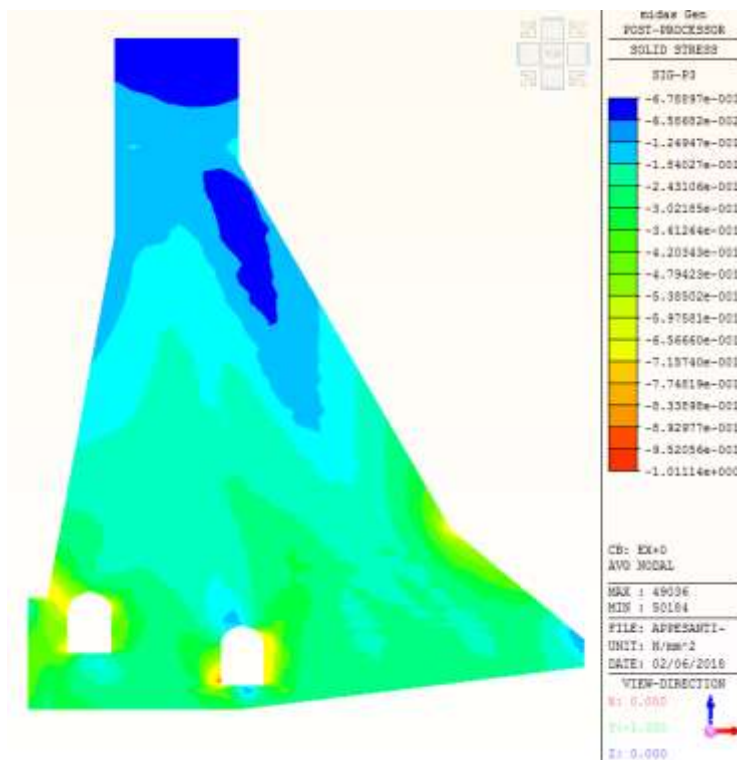


Sforzo principale di compressione (MPa)

2.2.6 Cmb.6 (SLV): G1+G3+Ex,SLV+0,3Ez,SLV + Ix,SLV +0,5×Q1,inverno (Sismica SLV inverno)

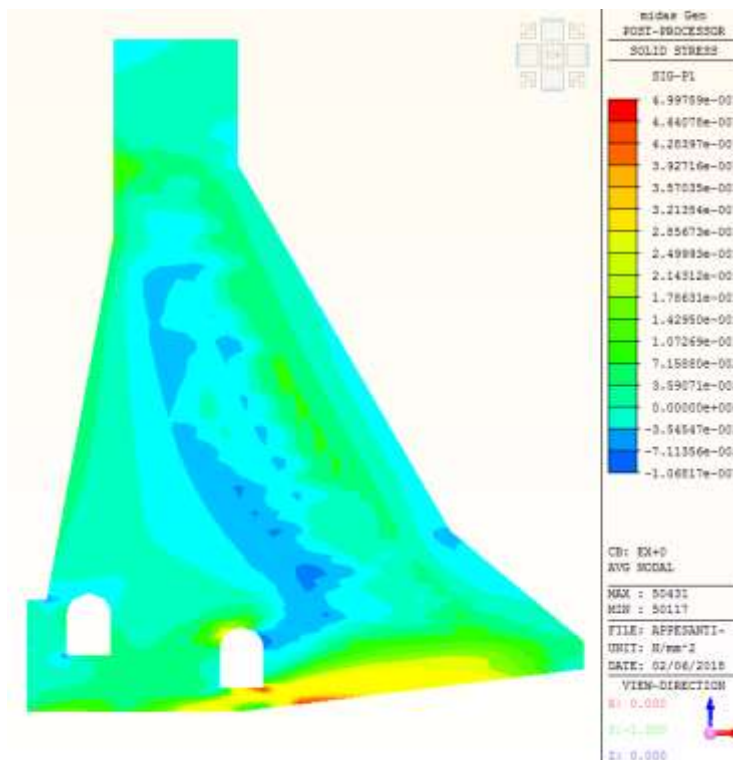


Sforzo principale di trazione (MPa)

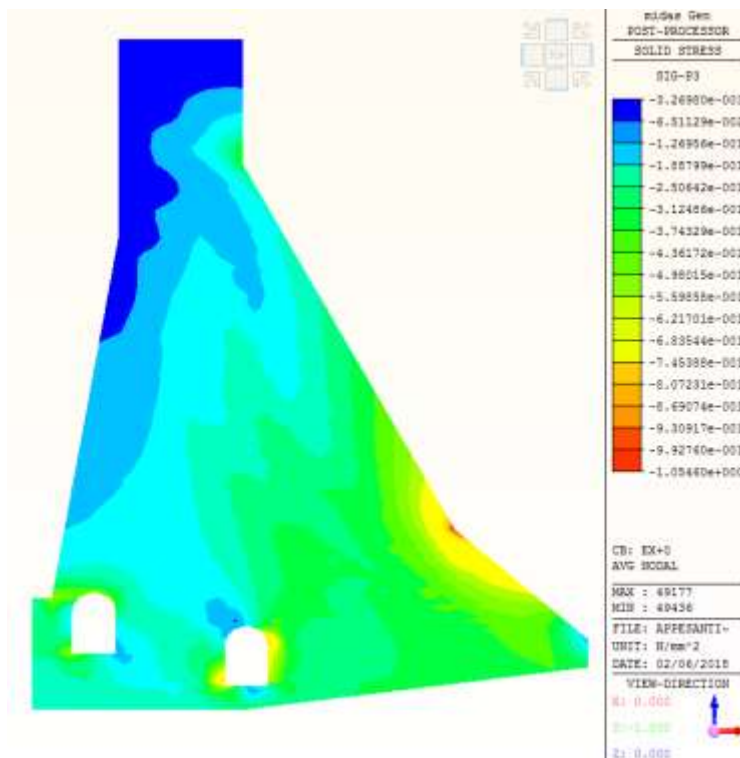


Sforzo principale di compressione (MPa)

2.2.7 Cmb.6 (SLC): G1+G3+Ex,SLC+0,3Ez,SLC + Ix,SLC +0,5×Q1,inverno (Sismica SLC inverno)

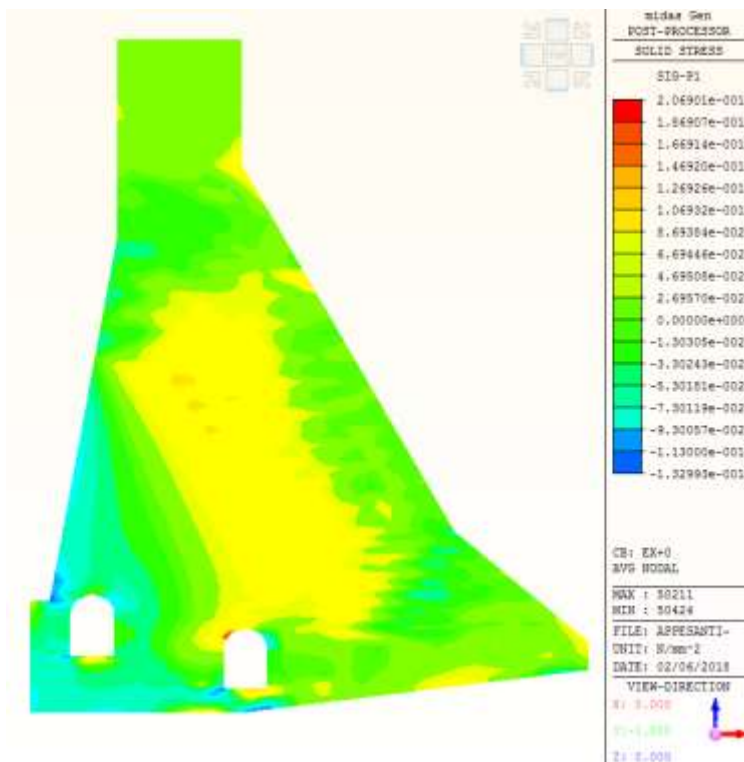


Sforzo principale di trazione (MPa)

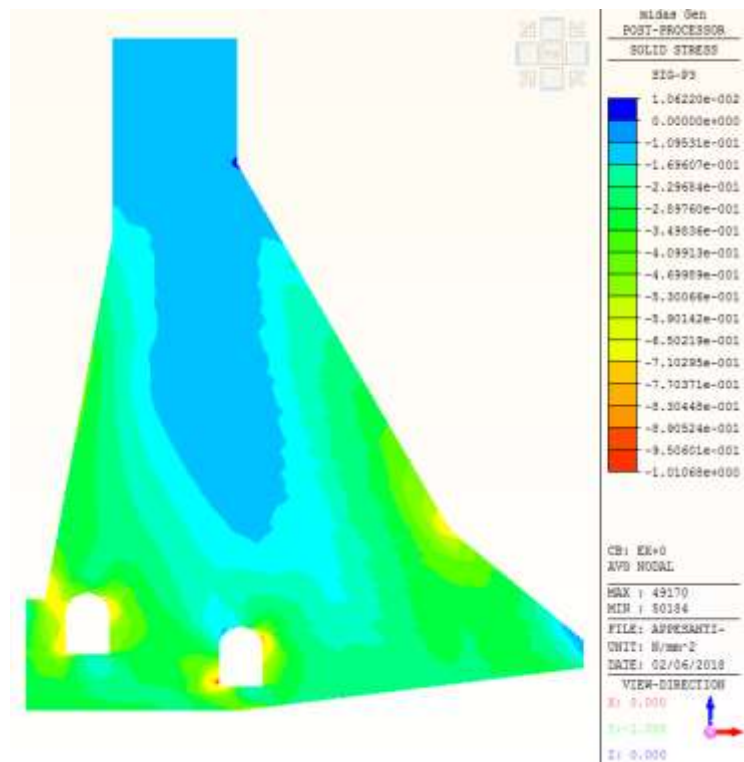


Sforzo principale di compressione (MPa)

2.2.8 Cmb.7 (SLV): G1+G3+Ex,SLV+0,3Ez,SLV + Ix,SLV +0,5×Q1,estate (Sismica SLV estate)

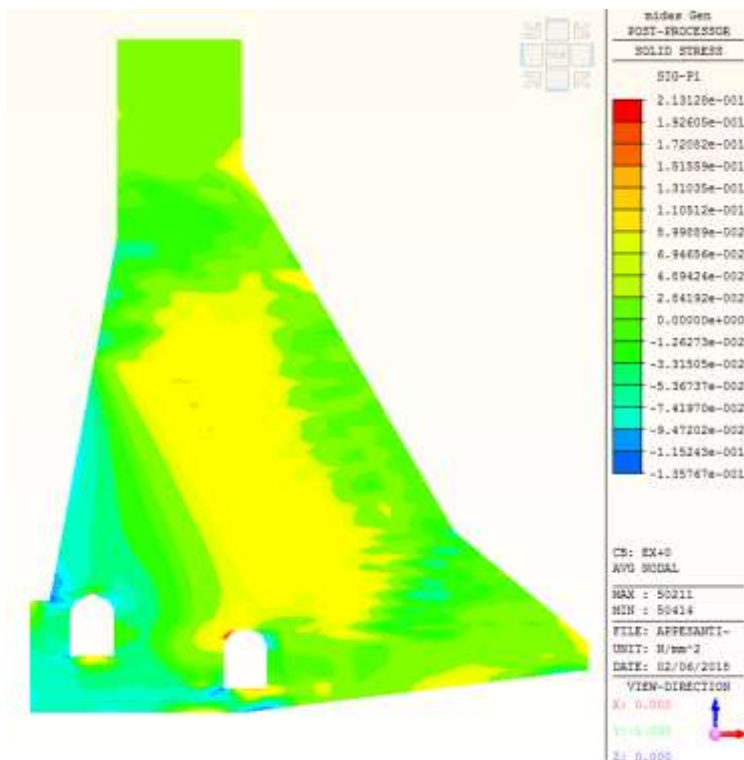


Sforzo principale di trazione (MPa)

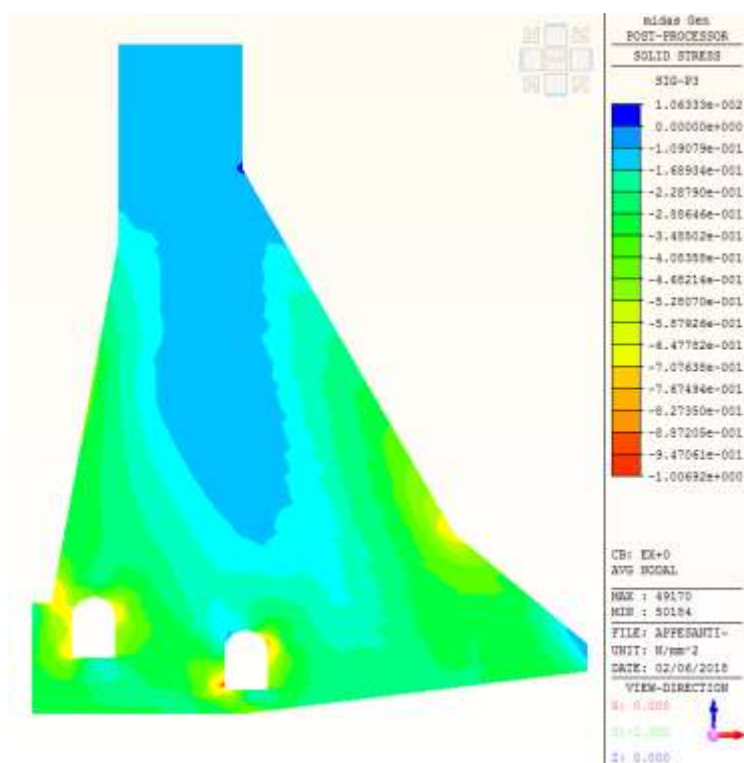


Sforzo principale di compressione (MPa)

2.2.9 Cmb.7 (SLC): G1+G3+Ex,SLC+0,3Ez,SLC + Ix,SLC +0,5×Q1,estate (Sismica SLC estate)



Sforzo principale di trazione (MPa)

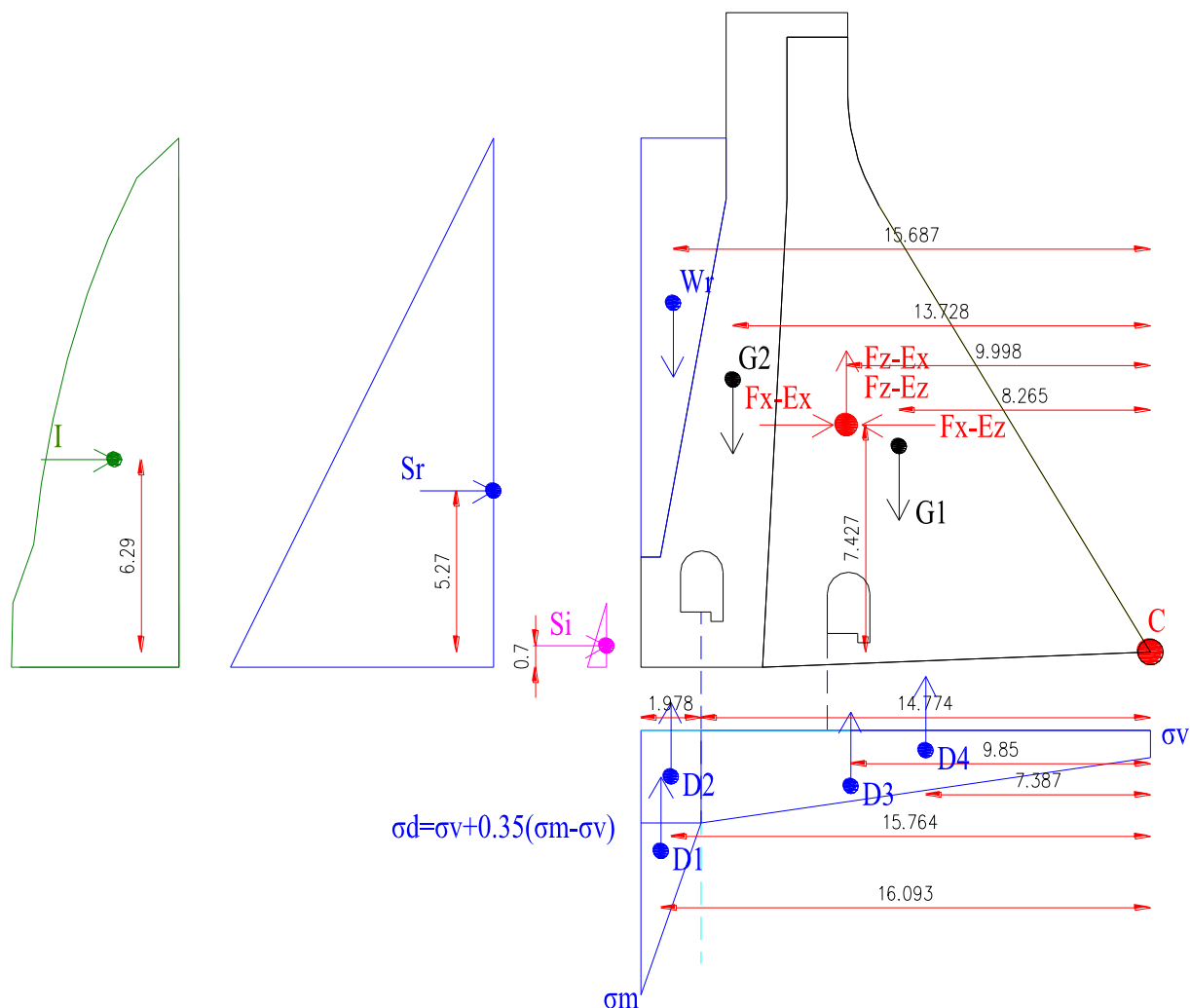


Sforzo principale di compressione (MPa)

## 2.3 VERIFICHE A RIBALTAMENTO E TRASLAZIONE DEL CORPO DIGA

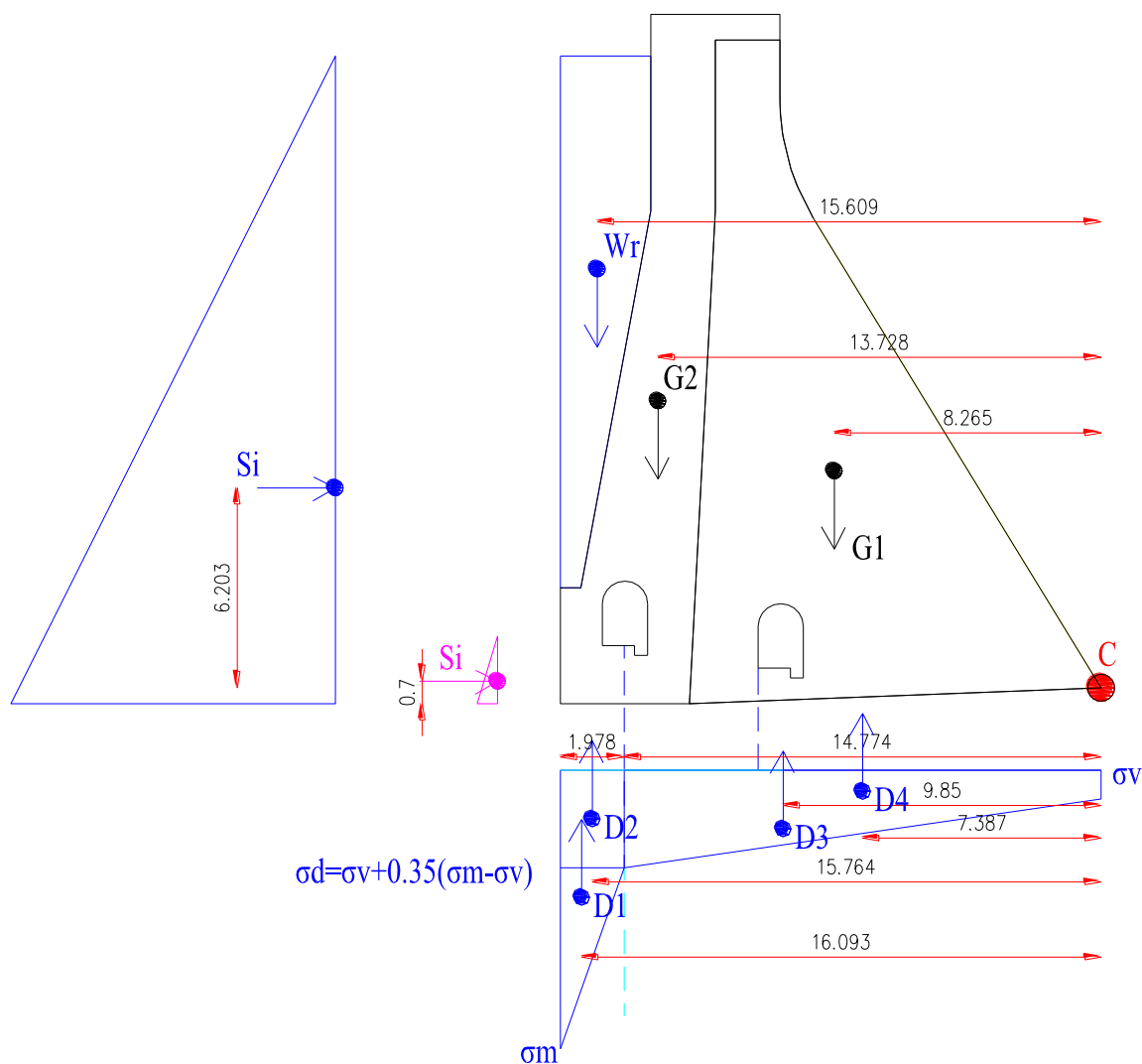
### 2.3.1 AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE DI BASE

Le verifiche sono condotte su una striscia di diga appesantita di larghezza 1 m:



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massima regolazione per le verifiche in corrispondenza della sezione di base





*Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massimo invaso (Combinazione eccezionale) per le verifiche in corrispondenza della sezione di base*

Le verifiche a ribaltamento e traslazione sono state condotte a favore di sicurezza considerando l'andamento delle sottopressioni lineare tra il nuovo dreno realizzato a monte e la pressione di valle, senza quindi mettere in conto l'ulteriore contributo di riduzione delle sottopressioni dovuto alla presenza del dreno esistente nel corpo diga di valle. Infine nelle verifiche a traslazione non è stato messo in conto a favore di sicurezza il contributo positivo dovuto alla pendenza esistente (in leggera salita da monte verso valle) sul contatto tra il corpo diga di valle e la roccia di fondazione.

Di seguito si riportano i carichi messi in conto:

Peso proprio

Il peso proprio della sezione trascinabile presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{cls, esist} = 127,7 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 3029 \text{ kN/m} \text{ (peso diga esistente)}$$

$$G_2 = A_c \times \rho_{cls, nuovo} = 58,3 \text{ m}^2 \times 24,00 \text{ kN/m}^3 = 1399 \text{ kN/m} \text{ (peso appesantimento)}$$

$b_{G1} = 8,265$  m (braccio orizzontale peso diga esistente rispetto punto di rotazione)

$b_{G2} = 13,728$  m (braccio orizzontale peso appesantimento rispetto punto di rotazione)

$G_{tot} = G_1 + G_2 = 4428$  kN/m (peso totale diga)

$M_{Gtot} = (G_1 \times b_{G1}) + (G_2 \times b_{G2}) = (3029 \text{ kN/m} \times 8,265 \text{ m}) + (1399 \text{ kN/m} \times 13,728 \text{ m}) = 44240$  kNm/m  
(momento totale stabilizzante)

### Spinta acqua max regolazione

$H_{max.reg} = 17,3$  m (livello acqua massima regolazione)

$p_{max} (H=17,3 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max.reg} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 17,3 \text{ m} = 173$  kN/m<sup>2</sup> (pressione acqua alla base)

$S_r = (p_{max} \times H_{max.reg})/2 = (173 \text{ kN/m}^2 \times 17,3 \text{ m})/2 = 1496,5$  kN /m (spinta orizzontale)

$W_r = (A_r \times \rho_w) = 25,7 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 257$  kN/m (peso acqua)

$b_{Wr} = 15,687$  m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{Sr} = 5,27$  m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{Wr} = W_r \times b_{Wr} = 257 \text{ kN/m} \times 15,687 \text{ m} = 4032$  kNm/m (momento stabilizzante)

$M_{Sr} = S_r \times h_{Sr} = 1496,5 \text{ kN/m} \times 5,27 \text{ m} = 7887$  kNm/m (momento instabilizzante)

### Spinta acqua max invaso

$H_{max.inv} = 20,1$  m (livello acqua massimo invaso)

$p_{max} (H=20,1 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max.inv} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 20,1 \text{ m} = 201$  kN/m<sup>2</sup> (pressione acqua alla base)

$S_i = (p_{max} \times H_{max.inv})/2 = (201 \text{ kN/m}^2 \times 20,1 \text{ m})/2 = 2020$  kN /m (spinta orizzontale)

$W_i = (A_i \times \rho_w) = 33,5 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 335$  kN/m (peso acqua)

$b_{Wi} = 15,609$  m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{Si} = 6,203$  m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{Wi} = W_i \times b_{Wi} = 335 \text{ kN/m} \times 15,609 \text{ m} = 5229$  kNm/m (momento stabilizzante)

$M_{Si} = S_i \times h_{Si} = 2020 \text{ kN/m} \times 6,203 \text{ m} = 12530$  kNm/m (momento instabilizzante)

### Spinta interrimento

$H_{max.int} = 2,1$  m (livello interrimento)

$p_{max} (H=2,1 \text{ m}) = \rho_f \times H_{max.int} = 6 \text{ kN/m}^3 \times 2,1 \text{ m} = 12,6$  kN/m<sup>2</sup> (pressione alla base)

$S_i = (p_{max} \times H_{max.int})/2 = (12,6 \text{ kN/m}^2 \times 2,1 \text{ m})/2 = 13,2$  kN /m (spinta orizzontale)

$h_{S_{wi}} = 0,7$  m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)



$$M_{Si} = S_i \times h_{S_{wi}} = 13,2 \text{ kN/m} \times 0,7 \text{ m} = 9,24 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

### Sottopressioni

Nel calcolo delle sottopressioni si considera un livello idrostatico a valle a favore di sicurezza pari a 1,3 m.

$$H_{\text{max.reg}} = 17,3 \text{ m} \quad (\text{livello acqua massima regolazione})$$

$$\sigma_m (H=17,3 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.reg}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 17,3 \text{ m} = 173 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{pressione acqua alla base a monte})$$

$$\sigma_v (h_v=1,3 \text{ m}) = \rho_w \times h_v = 10 \text{ kN/m}^3 \times 1,3 \text{ m} = 13 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{livello max regolazione})$$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 13 + 0,35 \times (173 - 13 \text{ kN/m}^2) = 69 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{pressione dreno})$$

$$D_1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,978 \text{ m}) / 2 = (173 \text{ kN/m}^2 - 69 \text{ kN/m}^2) \times (1,978 \text{ m}) / 2 = 103 \text{ kN/m}$$

$$D_2 = (\sigma_d) \times (1,978 \text{ m}) = (69 \text{ kN/m}^2) \times (1,978 \text{ m}) = 136 \text{ kN/m}$$

$$D_3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (14,774 \text{ m}) / 2 = (69 - 13 \text{ kN/m}^2) \times (14,774 \text{ m}) / 2 = 414 \text{ kN/m}$$

$$D_4 = (\sigma_v) \times (14,774 \text{ m}) = (13 \text{ kN/m}^2) \times (14,774 \text{ m}) = 192 \text{ kN/m}$$

$$D = D_1 + D_2 + D_3 + D_4 = 103 + 136 + 414 + 192 = 845 \text{ kN/m} \quad (\text{livello max. regolazione})$$

$$b_{D_1} = 16,093 \text{ m} \quad (\text{braccio orizzontale rispetto punto di rotazione})$$

$$b_{D_2} = 15,764 \text{ m} \quad (\text{braccio orizzontale rispetto punto di rotazione})$$

$$b_{D_3} = 9,85 \text{ m} \quad (\text{braccio orizzontale rispetto punto di rotazione})$$

$$b_{D_4} = 7,39 \text{ m} \quad (\text{braccio orizzontale rispetto punto di rotazione})$$

$$M_{D_1} = D_1 \times b_{D_1} = 103 \text{ kN/m} \times 16,093 \text{ m} = 1658 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

$$M_{D_2} = D_2 \times b_{D_2} = 136 \text{ kN/m} \times 15,764 \text{ m} = 2144 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

$$M_{D_3} = D_3 \times b_{D_3} = 414 \text{ kN/m} \times 9,85 \text{ m} = 4078 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

$$M_{D_4} = D_4 \times b_{D_4} = 192 \text{ kN/m} \times 7,39 \text{ m} = 1419 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

$$M_D = M_{D_1} + M_{D_2} + M_{D_3} + M_{D_4} = 1658 + 2144 + 4078 + 1419 = 9299 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante con livello massima regolazione})$$

$$H_{\text{max.inv}} = 20,1 \text{ m} \quad (\text{livello acqua massimo invaso})$$

$$p_{\text{max}} (H=20,1 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 20,1 \text{ m} = 201 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{pressione acqua alla base a monte})$$

$$\sigma_v (h_v=1,3 \text{ m}) = \rho_w \times h_v = 10 \text{ kN/m}^3 \times 1,3 \text{ m} = 13 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 13 + 0,35 \times (201 - 13 \text{ kN/m}^2) = 78,8 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{pressione dreno})$$

$$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,978 \text{ m}) / 2 = (201 \text{ kN/m}^2 - 78,8 \text{ kN/m}^2) \times (1,978 \text{ m}) / 2 = 121 \text{ kN/m}$$

$$D2 = (\sigma_d) \times (1,978 \text{ m}) = (78,8 \text{ kN/m}^2) \times (1,978 \text{ m}) = 156 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (14,774 \text{ m}) / 2 = (78,8 - 13 \text{ kN/m}^2) \times (14,774 \text{ m}) / 2 = 486 \text{ kN/m}$$

$$D4 = (\sigma_v) \times (14,774 \text{ m}) = (13 \text{ kN/m}^2) \times (14,774 \text{ m}) = 192 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 + D4 = 121 + 156 + 486 + 192 = 955 \text{ kN/m (livello max. invaso)}$$

$$b_{D1} = 16,093 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 15,764 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 9,85 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D4} = 7,39 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 121 \text{ kN/m} \times 16,093 \text{ m} = 1947 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 156 \text{ kN/m} \times 15,764 \text{ m} = 2459 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 486 \text{ kN/m} \times 9,85 \text{ m} = 4787 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D4} = D4 \times b_{D4} = 192 \text{ kN/m} \times 7,39 \text{ m} = 1419 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} + M_{D4} = 1947 + 2459 + 4787 + 1419 = 10612 \text{ kNm/m (momento instabilizzante con livello massimo invaso)}$$

#### Sisma $E_{x,SLC, Monte-valle}$

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLC (combinazione con carico sismico massimo).

Per un'azione sismica sollecitante in direzione x (Monte-Valle) nasce oltre che un'azione in direzione x (Monte-Valle), anche una componente sismica in direzione verticale (Basso-Alto) generata dall'inclinazione del piano di fondazione della diga.

$$F_{x-Ex} = 758 \text{ kN/m (direzione Monte-Valle)}$$

$$F_{z-Ex} = 145 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ex} = 10,0 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ex} = 7,43 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Fz-Ex} = F_{z-Ex} \times b_{Fz-Ex} = 145 \text{ kN/m} \times 10,0 \text{ m} = 1450 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Fx-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{Fx-Ex} = 758 \text{ kN/m} \times 7,43 \text{ m} = 5632 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Ex} = M_{Fz-Ex} + M_{Fx-Ex} = 1450 + 5632 \text{ kNm/m} = 7082 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_{x,SLV, Monte-valle}$

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLV:

$$F_{x-Ex} = 609 \text{ kN/m (direzione Monte-Valle)}$$

$$F_{z-Ex} = 117 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ex} = 10,0 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ex} = 7,43 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Fz-Ex} = F_{z-Ex} \times b_{Fz-Ex} = 117 \text{ kN/m} \times 10,0 \text{ m} = 1170 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Fx-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{Fx-Ex} = 609 \text{ kN/m} \times 7,43 \text{ m} = 4525 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Ex} = M_{Fz-Ex} + M_{Fx-Ex} = 1170 + 4525 \text{ kNm/m} = 5695 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_z$ , SLC, basso-alto

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLC (combinazione con carico sismico massimo).

Per un'azione sismica sollecitante in direzione z (Basso-Alto) nasce oltre che un'azione in direzione z (Basso-Alto), anche una componente sismica in direzione orizzontale (Valle-Monte) generata dall'inclinazione del piano di fondazione della diga.

$$F_{x-Ez} = 121 \text{ kN/m (direzione Valle- Monte)}$$

$$F_{z-Ez} = 396 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ez} = 10,0 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ez} = 7,43 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$MFz-Ez = Fz-Ez \times b_{Fz-Ez} = 396 \text{ kN/m} \times 10,0 \text{ m} = 3960 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$MFx-Ez = Fx-Ez \times h_{Fx-Ez} = 121 \text{ kN/m} \times 7,43 \text{ m} = 899 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$MEz = MFz-Ez - MFx-Ez = 3960 - 899 \text{ kNm/m} = 3061 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_z$ , SLV, basso-alto

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLV:

$$F_{x-Ez} = 88 \text{ kN/m (direzione Valle- Monte)}$$

$$F_{z-Ez} = 288 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ez} = 10,0 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ez} = 7,43 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$MFz-Ez = Fz-Ez \times b_{Fz-Ez} = 288 \text{ kN/m} \times 10,0 \text{ m} = 2880 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$MFx-Ez = Fx-Ez \times h_{Fx-Ez} = 88 \text{ kN/m} \times 7,43 \text{ m} = 654 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$MEz = MFz-Ez - MFx-Ez = 2880 - 654 \text{ kNm/m} = 2226 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

Azioni inerziali SLC

$I = 140 \text{ kN/m}$  (Spinta inerziale totale)

$h_I = 6,29 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$MI = I \times h_I = 140 \text{ kNm/m} \times 6,29 \text{ m} = 881 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

Azioni inerziali SLV

$I = 110 \text{ kN/m}$  (Spinta inerziale totale)

$h_I = 6,29 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$MI = I \times h_I = 110 \text{ kNm/m} \times 6,29 \text{ m} = 692 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

**2.3.1.1 COMBINAZIONE FONDAMENTALE SLU (1×G1 + 1,5×G2 + 1,5×G3 )**Peso proprio ×1 :

$$M_{G_{tot}} = 44240 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 4428 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione × 1,5

$$M_{W_r} = (4032 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 6048 \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_r} = (7887 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 11831 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = (257 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 386 \text{ (stabilizzante)}$$

$$S_r = (1497 \text{ kN /m}) \times 1,5 = 2245 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Spinta interrimento × 1,5

$$M_{S_i} = (9,24 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 14 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = (13,2 \text{ kN /m}) \times 1,5 = 20 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni × 1,5

$$M_D = (9299 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 13949 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = (845 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 1268 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{stabilizzante} = 44240 + 6048 \text{ kNm/m} = 50288 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 11831 + 14 + 13949 \text{ kNm/m} = 25794 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 50288 \text{ kNm/m} / 25794 \text{ kNm/m} = 1,95 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{stabilizzante} = (4428 + 386 - 1268 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 2659 \text{ kNm/m (stabilizzante)}$$

$$V_{instabilizzante} = 2245 + 20 \text{ kNm/m} = 2265 \text{ kNm/m (instabilizzante)}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 2659 \text{ kNm/m} / 2265 \text{ kNm/m} = 1,17 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**2.3.1.2 COMBINAZIONE ECCEZIONALE SLU (1×G1 + 1×A + 1×G3 )**Peso proprio ×1

$$M_{G_{tot}} = 44240 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 4428 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max invaso × 1

$$M_{Wi} = 5229 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{Si} = 12530 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_i = 335 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_i = 2020 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Spinta interrimento × 1

$$M_{Si} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni × 1

$$M_D = 10612 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 955 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Verifica ribaltamento

$$M_{\text{stabilizzante}} = 44240 + 5229 \text{ kNm/m} = 49469 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 12530 + 9 + 10612 \text{ kNm/m} = 23151 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 49469 \text{ kNm/m} / 23151 \text{ kNm/m} = 2,14 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

Verifica traslazione

$$V_{\text{stabilizzante}} = (4428 + 335 - 955 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 2856 \text{ kNm/m (stabilizzante)}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 2020 + 13,2 \text{ kNm/m} = 2033 \text{ kNm/m (instabilizzante)}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 2856 \text{ kNm/m} / 2033 \text{ kNm/m} = 1,40 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

$$2.3.1.3 \text{ COMBINAZIONE SISMICA SLC } (G1 + G2 + G3 + E_{x,slc\text{-valle/monte}} + 0,3 \times E_{z,slc\text{-Basso/Alto}} + I_{x,slc})$$

**2.3.1.3.1 Serbatoio pieno**Peso proprio × 1

$$M_{G_{\text{tot}}} = 44240 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 4428 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione × 1

$$M_{Wr} = 4032 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{Sr} = 7887 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$W_r = 257 \text{ kN/m}$  (stabilizzante)

$S_r = 1497 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

Spinta interrimento  $\times 1$

$M_{S_i} = 9,24 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$S_i = 13,2 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

Sottopressioni  $\times 1$

$M_D = 9299 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$D = 845 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

Sisma Ex,slc (Monte-Valle)  $\times 1$

$M_{Ex,slc, Monte-valle} = 7082 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$F_{x-Ex, slc, monte-valle} = 758 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

$F_{z-Ex, slc, basso-alto} = 145 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

Sisma Ez,slc (Basso-Alto)  $\times 0,3$

$M_{Ez} = (3061 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 918$  (momento instabilizzante)

$F_{x-Ez, slc, valle-monte} = (121 \text{ kN/m} \times 0,3) = 36 \text{ kN/m}$  (stabilizzante)

$F_{z-Ez, slc, basso-alto} = (396 \text{ kN/m} \times 0,3) = 119 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

Azioni inerziali,slc  $\times 1$

$M_I = 881 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$I_{x, slc, monte-valle} = 140 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

**Verifica ribaltamento**

$M_{stabilizzante} = 44240 + 4032 \text{ kNm/m} = 48272 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{instabilizzante} = 7887 + 9 + 9299 + 7082 + 918 + 881 = 26076 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 48272 \text{ kNm/m} / 26076 \text{ kNm/m} = 1,85 > 1$  (verifica positiva)

**Verifica traslazione**

$V_{stabilizzante} = (4428 + 257 - 845 - 145 - 119 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 2682 \text{ kNm/m}$

$V_{instabilizzante} = 1497 + 13,2 + 758 - 36 + 140 \text{ kNm/m} = 2372 \text{ kNm/m}$

$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 2682 \text{ kNm/m} / 2372 \text{ kNm/m} = 1,13 > 1$  (verifica positiva)

### 2.3.1.3.2 Serbatoio vuoto

Peso proprio  $\times 1$

$$M_{G_{tot}} = 44240 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 4428 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta interrimento  $\times 1$

$$M_{S_i} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Sisma Ex,slc (Monte-Valle)  $\times 1$

$$M_{Ex,slc,Monte-valle} = 7082 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex,slc,monte-valle} = 758 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex,slc,basso-alto} = 145 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez,slc (Basso-Alto)  $\times 0,3$

$$M_{Ez} = (3061 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 918 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez,slc,valle-monte} = (121 \text{ kN/m} \times 0,3) = 36 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez,slc,basso-alto} = (396 \text{ kN/m} \times 0,3) = 119 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{stabilizzante} = 44240 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 9 + 7082 + 918 = 8009 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 44240 \text{ kNm/m} / 8009 \text{ kNm/m} = 5,53 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{stabilizzante} = (4428 - 145 - 119 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 3123 \text{ kNm/m}$$

$$V_{instabilizzante} = 13,2 + 758 - 36 \text{ kNm/m} = 735 \text{ kNm/m}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 3123 \text{ kNm/m} / 735 \text{ kNm/m} = 4,25 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

$$2.3.1.4 \text{ COMBINAZIONE SISMICA SLV } (G1 + G2 + G3 + E_{x,slv-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,slv-Basso/Alto} + I_{x,slv})$$

**2.3.1.4.1 Serbatoio pieno**

Peso proprio  $\times 1$

$$M_{G_{tot}} = 44240 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 4428 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione  $\times 1$



$$M_{WR} = 4032 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{Sr} = 7887 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 257 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_r = 1497 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

#### Spinta interrimento $\times 1$

$$M_{Si} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

#### Sottopressioni $\times 1$

$$M_D = 9299 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 845 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Sisma Ex,slv (Monte-Valle) $\times 1$

$$M_{Ex,slv} = 5695 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{X-Ex,slv,monte-valle} = 609 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{Z-Ex,slv,basso-alto} = 117 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Sisma Ez,slv (Basso-Alto) $\times 0,3$

$$M_{Ez,slv} = (2226 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 668 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{X-Ez,slv,valle-monte} = (88 \text{ kN/m} \times 0,3) = 26 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{Z-Ez,slv,basso-alto} = (288 \text{ kN/m} \times 0,3) = 86 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Azioni inerziali,slv $\times 1$

$$M_I = 692 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x,slv,monte-valle} = 110 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Verifica ribaltamento

$$M_{\text{stabilizzante}} = 44240 + 4032 \text{ kNm/m} = 48272 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 7887 + 9 + 9299 + 5695 + 668 + 692 = 24250 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 48272 \text{ kNm/m} / 24250 \text{ kNm/m} = 1,99 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

#### Verifica traslazione

$$V_{\text{stabilizzante}} = (4428 + 257 - 845 - 117 - 86 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 2728 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 1497 + 13,2 + 609 - 26 + 110 \text{ kNm/m} = 2203 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 2728 \text{ kNm/m} / 2203 \text{ kNm/m} = 1,24 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**2.3.1.4.2 Serbatoio vuoto**Peso proprio × 1

$$M_{\text{Gtot}} = 44240 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 4428 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta interrimento × 1

$$M_{\text{Si}} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ex,slv (Monte-Valle) × 1

$$M_{\text{Ex,slv}} = 5695 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{X-Ex,slv,monte-valle}} = 609 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{\text{Z-Ex,slv,basso-alto}} = 117 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez,slv (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{\text{Ez,slv}} = (2226 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 668 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{X-Ez,slv,valle-monte}} = (88 \text{ kN/m} \times 0,3) = 26 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{\text{Z-Ez,slv,basso-alto}} = (288 \text{ kN/m} \times 0,3) = 86 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 44240 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 9 + 5695 + 668 = 6372 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 44240 \text{ kNm/m} / 6372 \text{ kNm/m} = 6,94 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

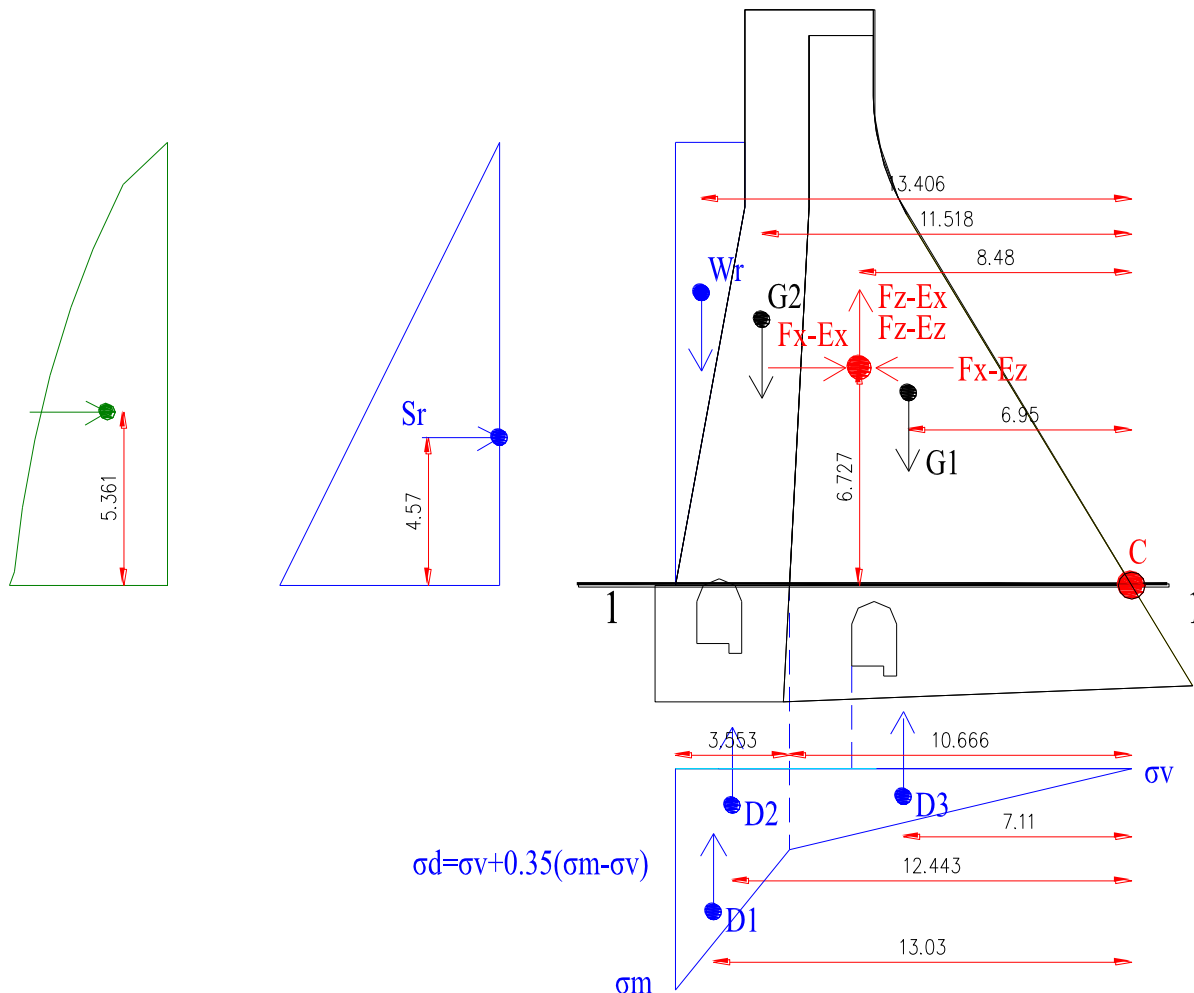
$$V_{\text{stabilizzante}} = (4428 - 117 - 86 \text{ kN/m}) \times 0,75 = 3169 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 13,2 + 609 - 26 \text{ kNm/m} = 596 \text{ kNm/m}$$

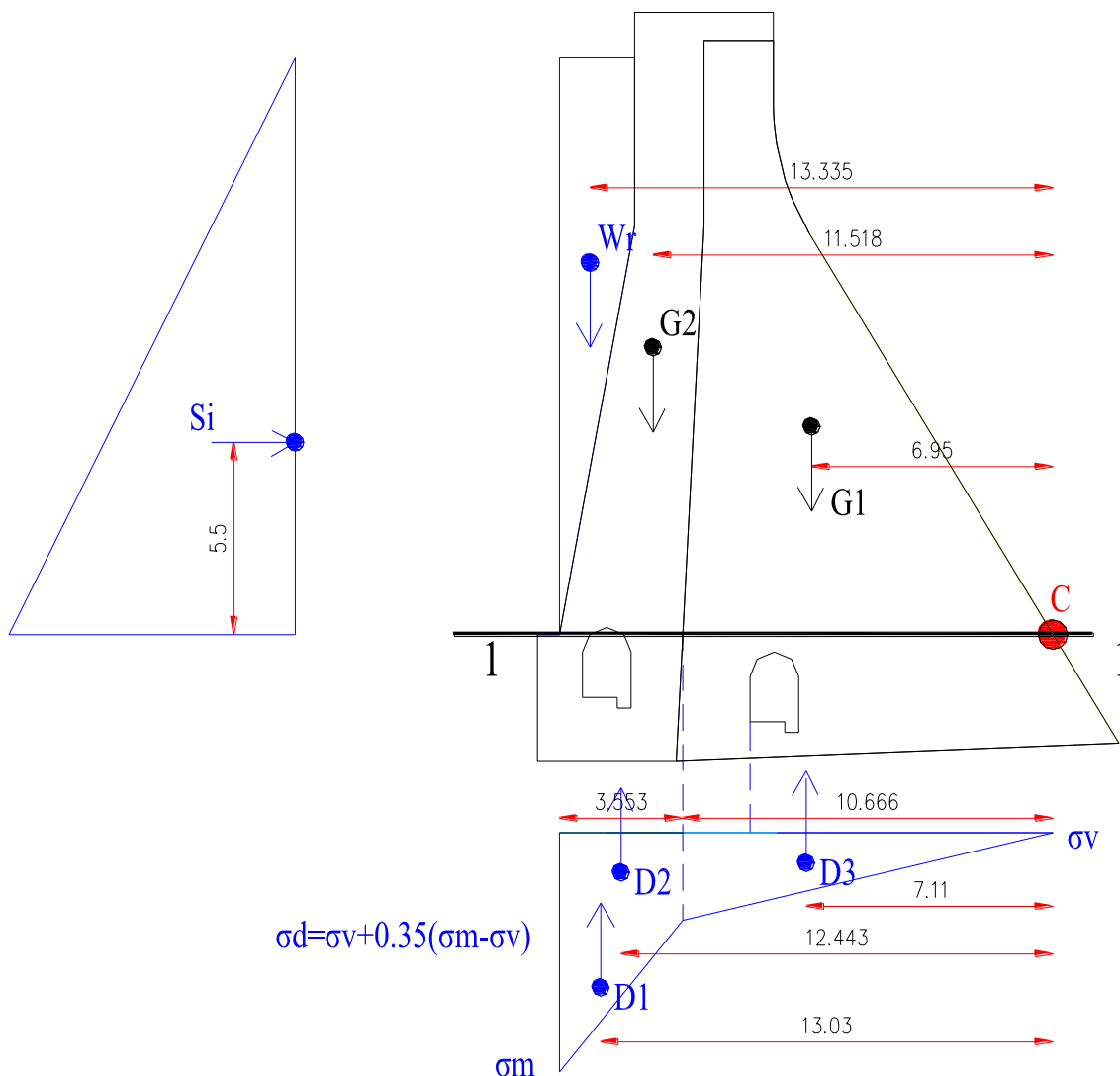
$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 3169 \text{ kNm/m} / 596 \text{ kNm/m} = 5,32 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

2.3.1 AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 1-1

Le verifiche sono condotte su una striscia di diga appesantita di larghezza 1 m:



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massima regolazione per le verifiche in corrispondenza della sezione 1-1



*Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massimo invaso (Combinazione eccezionale) per le verifiche in corrispondenza della sezione 1-1*

Le verifiche a ribaltamento e traslazione sono state condotte a favore di sicurezza considerando l'andamento delle sottopressioni lineare tra il nuovo drenone realizzato a monte e la pressione di valle, senza quindi mettere in conto l'ulteriore contributo di riduzione delle sottopressioni dovuto alla presenza del drenone esistente nel corpo diga di valle.

Di seguito si riportano i carichi messi in conto:

Peso proprio

Il peso proprio della sezione trascinabile presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{cls, esist} = 91,1 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 2161 \text{ kN/m (peso diga esistente)}$$

$$G_2 = A_c \times \rho_{cls, nuovo} = 46,2 \text{ m}^2 \times 24,00 \text{ kN/m}^3 = 1109 \text{ kN/m (peso appesantimento)}$$

$b_{G1} = 6,95$  m (braccio orizzontale peso diga esistente rispetto punto di rotazione)

$b_{G2} = 11,518$  m (braccio orizzontale peso appesantimento rispetto punto di rotazione)

$G_{tot} = G_1 + G_2 = 3270$  kN/m (peso totale diga)

$M_{Gtot} = (G_1 \times b_{G1}) + (G_2 \times b_{G2}) = (2161 \text{ kN/m} \times 6,95 \text{ m}) + (1109 \text{ kN/m} \times 11,518 \text{ m}) = 27792$  kNm/m  
(momento totale stabilizzante)

### Spinta acqua max regolazione

$H_{max.reg} = 13,7$  m (livello acqua massima regolazione)

$p_{max} (H=13,7 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max.reg} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 13,7 \text{ m} = 137$  kN/m<sup>2</sup> (pressione acqua alla base)

$S_r = (p_{max} \times H_{max.reg})/2 = (137 \text{ kN/m}^2 \times 13,7 \text{ m})/2 = 939$  kN/m (spinta orizzontale)

$W_r = (A_r \times \rho_w) = 17,0 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 170$  kN/m (peso acqua)

$b_{Wr} = 13,41$  m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{Sr} = 4,57$  m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{Wr} = W_r \times b_{Wr} = 170 \text{ kN/m} \times 13,41 \text{ m} = 2280$  kNm/m (momento stabilizzante)

$M_{Sr} = S_r \times h_{Sr} = 939 \text{ kN/m} \times 4,57 \text{ m} = 4291$  kNm/m (momento instabilizzante)

### Spinta acqua max invaso

$H_{max.inv} = 16,5$  m (livello acqua massimo invaso)

$p_{max} (H=16,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max.inv} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 16,5 \text{ m} = 165$  kN/m<sup>2</sup> (pressione acqua alla base)

$S_i = (p_{max} \times H_{max.inv})/2 = (165 \text{ kN/m}^2 \times 16,5 \text{ m})/2 = 1361$  kN/m (spinta orizzontale)

$W_i = (A_i \times \rho_w) = 23,0 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 230$  kN/m (peso acqua)

$b_{Wi} = 13,335$  m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{Si} = 5,5$  m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{Wi} = W_i \times b_{Wi} = 230 \text{ kN/m} \times 13,335 \text{ m} = 3067$  kNm/m (momento stabilizzante)

$M_{Si} = S_i \times h_{Si} = 1361 \text{ kN/m} \times 5,5 \text{ m} = 7486$  kNm/m (momento instabilizzante)

### Sottopressioni

Nel calcolo delle sottopressioni si considera un livello idrostatico a valle a favore di sicurezza pari a 1,3 m.

$H_{max.reg} = 13,7$  m (livello acqua massima regolazione)

$\sigma_m$  (H=13,7 m) =  $\rho_w \times H_{\max.\text{reg}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 13,7 \text{ m} = 137 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua alla base a monte)

$\sigma_v$  (h<sub>v</sub>=0 m) = 0 kN/m<sup>2</sup> (livello max regolazione)

$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (137 - 0 \text{ kN/m}^2) = 48 \text{ kN/m}^2$  (pressione dreno)

$D_1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (3,553 \text{ m}) / 2 = (137 \text{ kN/m}^2 - 48 \text{ kN/m}^2) \times (3,553 \text{ m}) / 2 = 158 \text{ kN/m}$

$D_2 = (\sigma_d) \times (3,553 \text{ m}) = (48 \text{ kN/m}^2) \times (3,553 \text{ m}) = 171 \text{ kN/m}$

$D_3 = (\sigma_d) \times (10,666 \text{ m}) / 2 = (48 \text{ kN/m}^2) \times (10,666 \text{ m}) / 2 = 256 \text{ kN/m}$

$D = D_1 + D_2 + D_3 = 158 + 171 + 256 = 585 \text{ kN/m}$  (livello max. regolazione)

$b_{D1} = 13,03 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D2} = 12,44 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D3} = 7,11 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$M_{D1} = D_1 \times b_{D1} = 158 \text{ kN/m} \times 13,03 \text{ m} = 2059 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D2} = D_2 \times b_{D2} = 171 \text{ kN/m} \times 12,44 \text{ m} = 2127 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D3} = D_3 \times b_{D3} = 256 \text{ kN/m} \times 7,11 \text{ m} = 1820 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 2059 + 2127 + 1820 = 6006 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante con livello massima regolazione)

$H_{\max.\text{inv}} = 16,5 \text{ m}$  (livello acqua massimo invaso)

$p_{\max}$  (H=16,5 m) =  $\rho_w \times H_{\max.\text{inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 16,5 \text{ m} = 165 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua alla base a monte)

$\sigma_v$  (h<sub>v</sub>=0 m) = 0 kN/m<sup>2</sup>

$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (165 - 0 \text{ kN/m}^2) = 58 \text{ kN/m}^2$  (pressione dreno)

$D_1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (3,553 \text{ m}) / 2 = (165 \text{ kN/m}^2 - 58 \text{ kN/m}^2) \times (3,553 \text{ m}) / 2 = 189 \text{ kN/m}$

$D_2 = (\sigma_d) \times (1,978 \text{ m}) = (58 \text{ kN/m}^2) \times (1,978 \text{ m}) = 206 \text{ kN/m}$

$D_3 = (\sigma_d) \times (10,666 \text{ m}) / 2 = (58 \text{ kN/m}^2) \times (10,666 \text{ m}) / 2 = 309 \text{ kN/m}$

$D = D_1 + D_2 + D_3 = 189 + 206 + 309 = 704 \text{ kN/m}$  (livello max. invaso)

$b_{D1} = 13,03 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D2} = 12,443 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D3} = 7,11 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 189 \text{ kN/m} \times 13,03 \text{ m} = 2463 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 206 \text{ kN/m} \times 12,443 \text{ m} = 2563 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 309 \text{ kN/m} \times 7,11 \text{ m} = 2197 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 2463 + 2563 + 2197 = 7223 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante con livello massimo invasivo)}$$

#### Sisma $E_x$ , SLC, Monte-valle

$$F_{x-Ex} = 560 \text{ kN/m} \text{ (direzione Monte-Valle)}$$

$$F_{z-Ex} = 107 \text{ kN/m} \text{ (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ex} = 8,48 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ex} = 6,73 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Fz-Ex} = F_{z-Ex} \times b_{Fz-Ex} = 107 \text{ kN/m} \times 8,48 \text{ m} = 907 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Fx-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{Fx-Ex} = 560 \text{ kN/m} \times 6,73 \text{ m} = 3769 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Ex} = M_{Fz-Ex} + M_{Fx-Ex} = 907 + 3769 \text{ kNm/m} = 4676 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_x$ , SLV, Monte-valle

$$F_{x-Ex} = 450 \text{ kN/m} \text{ (direzione Monte-Valle)}$$

$$F_{z-Ex} = 87 \text{ kN/m} \text{ (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ex} = 8,48 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ex} = 6,73 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Fz-Ex} = F_{z-Ex} \times b_{Fz-Ex} = 87 \text{ kN/m} \times 8,48 \text{ m} = 738 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Fx-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{Fx-Ex} = 450 \text{ kN/m} \times 6,73 \text{ m} = 3029 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Ex} = M_{Fz-Ex} + M_{Fx-Ex} = 738 + 3029 \text{ kNm/m} = 3767 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_z$ , SLC, basso-alto

$$F_{x-Ez} = 89 \text{ kN/m} \text{ (direzione Valle- Monte)}$$

$$F_{z-Ez} = 292 \text{ kN/m} \text{ (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ez} = 8,48 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ez} = 6,73 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Fz-Ez} = F_{z-Ez} \times b_{Fz-Ez} = 292 \text{ kN/m} \times 8,48 \text{ m} = 2476 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$M_{Fx-Ez} = F_{x-Ez} \times h_{Fx-Ez} = 89 \text{ kN/m} \times 6,73 \text{ m} = 599 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{Ez} = M_{Fz-Ez} - M_{Fx-Ez} = 2476 - 599 \text{ kNm/m} = 1877 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

Sisma  $E_z$ , SLV, basso-alto

$$F_{x-Ez} = 65 \text{ kN/m (direzione Valle- Monte)}$$

$$F_{z-Ez} = 213 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ez} = 8,48 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ez} = 6,73 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$MFz-Ez = Fz-Ez \times b_{Fz-Ez} = 213 \text{ kN/m} \times 8,48 \text{ m} = 1806 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$MFx-Ez = Fx-Ez \times h_{Fx-Ez} = 65 \text{ kN/m} \times 6,73 \text{ m} = 437 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$MEz = MFz-Ez - MFx-Ez = 1806 - 437 \text{ kNm/m} = 1369 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

Azioni inerziali SLC

$$I = 98 \text{ kN/m (Spinta inerziale totale)}$$

$$h_I = 5,361 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$MI = I \times h_I = 98 \text{ kNm/m} \times 5,361 \text{ m} = 525 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

Azioni inerziali SLV

$$I = 77 \text{ kN/m (Spinta inerziale totale)}$$

$$h_I = 5,361 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$MI = I \times h_I = 77 \text{ kNm/m} \times 5,361 \text{ m} = 413 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$



**2.3.1.1 COMBINAZIONE FONDAMENTALE SLU (1×G1 + 1,5×G2 + 1,5×G3 )**Peso proprio ×1 :

$$M_{G_{tot}} = 27792 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 3270 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione × 1,5

$$M_{W_r} = (2280 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 3420 \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_r} = (4291 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 6437 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = (170 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 255 \text{ (stabilizzante)}$$

$$S_r = (939 \text{ kN /m}) \times 1,5 = 1409 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni × 1,5

$$M_D = (6006 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 9009 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = (585 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 878 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{stabilizzante} = 27792 + 3420 \text{ kNm/m} = 31212 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 6437 + 9009 \text{ kNm/m} = 15446 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 31212 \text{ kNm/m} / 15446 \text{ kNm/m} = 2,02 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{stabilizzante} = (3270 + 255 - 878 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1985 \text{ kNm/m (stabilizzante)}$$

$$V_{instabilizzante} = 1409 \text{ kNm/m (instabilizzante)}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 1985 \text{ kNm/m} / 1409 \text{ kNm/m} = 1,41 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**2.3.1.2 COMBINAZIONE ECCEZIONALE SLU (1×G1 + 1×A + 1×G3 )**Peso proprio ×1

$$M_{G_{tot}} = 27792 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 3270 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max invaso × 1

$$M_{W_i} = 3067 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_i} = 7486 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_i = 230 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_i = 1361 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni × 1

$$M_D = 7223 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 704 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

### **Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 27792 + 3067 \text{ kNm/m} = 30859 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 7486 + 7223 \text{ kNm/m} = 14709 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 30859 \text{ kNm/m} / 14709 \text{ kNm/m} = 2,10 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### **Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (3270 + 230 - 704 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 2097 \text{ kNm/m (stabilizzante)}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 1361 \text{ kNm/m (instabilizzante)}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 2097 \text{ kNm/m} / 1361 \text{ kNm/m} = 1,54 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

$$2.3.1.3 \text{ COMBINAZIONE SISMICA SLC } (G1 + G2 + G3 + E_{x,slc-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,slc-Basso/Alto} + I_{x,slc})$$

### **2.3.1.3.1 Serbatoio pieno**

Peso proprio × 1

$$M_{G_{\text{tot}}} = 27792 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 3270 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione × 1

$$M_{W_r} = 2280 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_r} = 4291 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 170 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_r = 939 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni × 1

$$M_D = 6006 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 585 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ex,slc (Monte-Valle) × 1

$$M_{Ex,slc, Monte-valle} = 4676 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex, slc, monte-valle} = 560 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex, slc, basso-alto} = 107 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez,slc (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{Ez} = (1877 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 563 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez, slc, valle-monte} = (89 \text{ kN/m} \times 0,3) = 27 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez, slc, basso-alto} = (292 \text{ kN/m} \times 0,3) = 88 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Azioni inerziali,slc × 1

$$M_I = 525 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x, slc, monte-valle} = 77 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Verifica ribaltamento

$$M_{stabilizzante} = 27792 + 2280 \text{ kNm/m} = 30072 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 4291 + 6006 + 4676 + 563 + 525 = 16061 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 30072 \text{ kNm/m} / 16061 \text{ kNm/m} = 1,87 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

Verifica traslazione

$$V_{stabilizzante} = (3270 + 170 - 585 - 107 - 88 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1995 \text{ kNm/m}$$

$$V_{instabilizzante} = 939 + 560 - 27 + 77 \text{ kNm/m} = 1549 \text{ kNm/m}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 1995 \text{ kNm/m} / 1549 \text{ kNm/m} = 1,29 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**2.3.1.3.2 Serbatoio vuoto**Peso proprio × 1

$$M_{Gtot} = 27792 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 3270 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Sisma Ex,slc (Monte-Valle) × 1

$$M_{Ex,slc, Monte-valle} = 4676 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex, slc, monte-valle} = 560 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex, slc, basso-alto} = 107 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez,slc (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{Ez} = (1877 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 563 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez,slc, valle-monte} = (89 \text{ kN/m} \times 0,3) = 27 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez,slc,basso-alto} = (292 \text{ kN/m} \times 0,3) = 88 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

### Verifica ribaltamento

$$M_{\text{stabilizzante}} = 27792 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 4676 + 563 = 5239 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 27792 \text{ kNm/m} / 5239 \text{ kNm/m} = 5,30 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### Verifica traslazione

$$V_{\text{stabilizzante}} = (3270 - 107 - 88 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 2306 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 560 - 27 \text{ kNm/m} = 533 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 2306 \text{ kNm/m} / 533 \text{ kNm/m} = 4,33 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

$$2.3.1.4 \text{ COMBINAZIONE SISMICA SLV (G1 + G2 + G3 + } E_{x,slv\text{-valle/monte}} + 0.3 \times E_{z,slv\text{-Basso/Alto}} + I_{x,slv})$$

#### 2.3.1.4.1 Serbatoio pieno

##### Peso proprio × 1

$$M_{\text{Gtot}} = 27792 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 3270 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

##### Spinta acqua max regolazione × 1

$$M_{\text{Wr}} = 2280 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{Sr}} = 4291 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 170 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_r = 939 \text{ kN / m (instabilizzante)}$$

##### Sottopressioni × 1

$$M_{\text{D}} = 6006 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 585 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

##### Sisma Ex,slv (Monte-Valle) × 1

$$M_{\text{Ex,slv}} = 3767 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex,slv, monte-valle} = 450 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex,slv, basso-alto} = 87 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez,slv (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{Ez,slv} = (1369 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 411 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez,slv, valle-monte} = (65 \text{ kN/m} \times 0,3) = 20 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez,slv, basso-alto} = (213 \text{ kN/m} \times 0,3) = 64 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Azioni inerziali,slv × 1

$$M_I = 413 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x,slv, monte-valle} = 77 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Verifica ribaltamento

$$M_{stabilizzante} = 27792 + 2280 \text{ kNm/m} = 30072 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 4291 + 6006 + 3767 + 411 + 413 = 14888 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 30072 \text{ kNm/m} / 14888 \text{ kNm/m} = 2,02 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

Verifica traslazione

$$V_{stabilizzante} = (3270 + 170 - 585 - 87 - 64 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 2028 \text{ kNm/m}$$

$$V_{instabilizzante} = 939 + 450 - 20 + 77 \text{ kNm/m} = 1446 \text{ kNm/m}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 2028 \text{ kNm/m} / 1446 \text{ kNm/m} = 1,40 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**2.3.1.4.2 Serbatoio vuoto**Peso proprio × 1

$$M_{Gtot} = 27792 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 3270 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Sisma Ex,slv (Monte-Valle) × 1

$$M_{Ex,slv} = 3767 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex,slv, monte-valle} = 450 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex,slv, basso-alto} = 87 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez,slv (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{Ez,slv} = (1369 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 411 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez,slv, valle-monte} = (65 \text{ kN/m} \times 0,3) = 20 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez,slv, basso-alto} = (213 \text{ kN/m} \times 0,3) = 64 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Verifica ribaltamento

$$M_{stabilizzante} = 27792 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

Minstabilizzante =  $3767 + 411 = 4178$  kNm/m (momento instabilizzante)

Mstabilizzante / Minstabilizzante =  $27792$  kNm/m /  $4178$  kNm/m =  $6,65 > 1$  (verifica positiva)

### **Verifica traslazione**

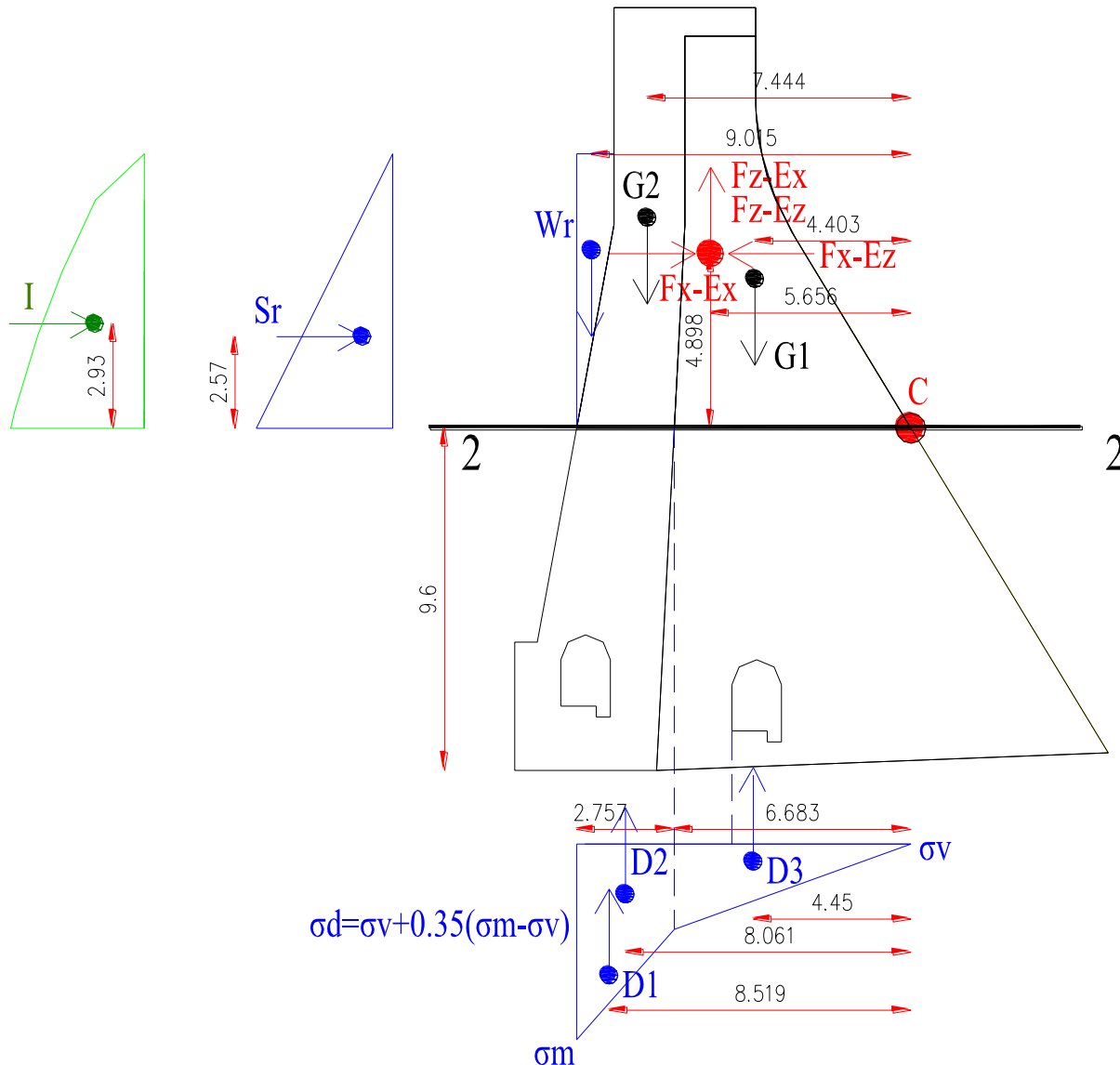
Vstabilizzante =  $(3270 - 87 - 64$  kNm/m) $\times 0,75 = 2340$  kNm/m

Vinstabilizzante =  $450 - 20$  kNm/m =  $430$  kNm/m

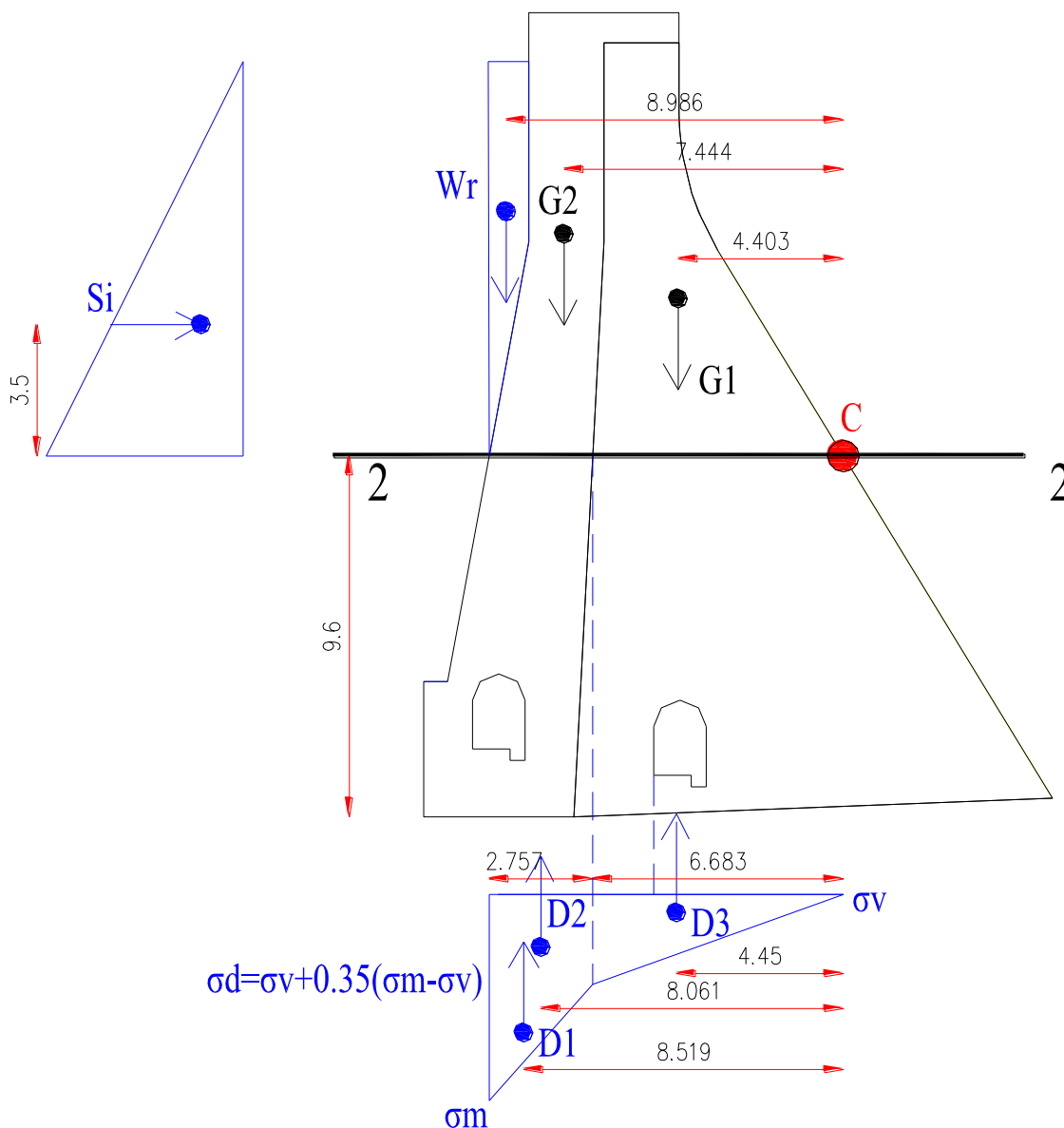
Vstabilizzante / Vinstabilizzante =  $2340$  kNm/m /  $430$  kNm/m =  $5,44 > 1$  (verifica positiva)

2.3.2 AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 2-2

Le verifiche sono condotte su una striscia di diga appesantita di larghezza 1 m:



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massima regolazione per le verifiche in corrispondenza della sezione 2-2



*Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massimo invaso (Combinazione eccezionale) per le verifiche in corrispondenza della sezione 2-2*

Le verifiche a ribaltamento e traslazione sono state condotte a favore di sicurezza considerando l’andamento delle sottopressioni lineare tra il nuovo dreno realizzato a monte e la pressione di valle, senza quindi mettere in conto l’ulteriore contributo di riduzione delle sottopressioni dovuto alla presenza del dreno esistente nel corpo diga di valle.

Di seguito si riportano i carichi messi in conto:

Peso proprio

Il peso proprio della sezione tracimabile presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{cls,esist} = 39,0 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 925 \text{ kN/m (peso diga esistente)}$$



$$G_2 = A_c \times \rho_{\text{cls,nuovo}} = 27,4 \text{ m}^2 \times 24,00 \text{ kN/m}^3 = 658 \text{ kN/m} \text{ (peso appesantimento)}$$

$$b_{G1} = 4,403 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale peso diga esistente rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{G2} = 7,444 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale peso appesantimento rispetto punto di rotazione)}$$

$$G_{\text{tot}} = G_1 + G_2 = 1583 \text{ kN/m} \text{ (peso totale diga)}$$

$$M_{G_{\text{tot}}} = (G_1 \times b_{G1}) + (G_2 \times b_{G2}) = (925 \text{ kN/m} \times 4,403 \text{ m}) + (658 \text{ kN/m} \times 7,444 \text{ m}) = 8971 \text{ kNm/m}$$

(momento totale stabilizzante)

### Spinta acqua max regolazione

$$H_{\text{max.reg}} = 7,7 \text{ m} \text{ (livello acqua massima regolazione)}$$

$$p_{\text{max}} (H=7,7 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.reg}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 7,7 \text{ m} = 77 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua alla base)}$$

$$S_r = (p_{\text{max}} \times H_{\text{max.reg}}) / 2 = (77 \text{ kN/m}^2 \times 7,7 \text{ m}) / 2 = 297 \text{ kN/m} \text{ (spinta orizzontale)}$$

$$W_r = (A_r \times \rho_w) = 5,1 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 51 \text{ kN/m} \text{ (peso acqua)}$$

$$b_{W_r} = 9,015 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{S_r} = 2,57 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{W_r} = W_r \times b_{W_r} = 51 \text{ kN/m} \times 9,015 \text{ m} = 460 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_r} = S_r \times h_{S_r} = 297 \text{ kN/m} \times 2,57 \text{ m} = 763 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

### Spinta acqua max invaso

$$H_{\text{max.inv}} = 10,5 \text{ m} \text{ (livello acqua massimo invaso)}$$

$$p_{\text{max}} (H=10,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 10,5 \text{ m} = 105 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua alla base)}$$

$$S_i = (p_{\text{max}} \times H_{\text{max.inv}}) / 2 = (105 \text{ kN/m}^2 \times 10,5 \text{ m}) / 2 = 551 \text{ kN/m} \text{ (spinta orizzontale)}$$

$$W_i = (A_i \times \rho_w) = 8,2 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 82,0 \text{ kN/m} \text{ (peso acqua)}$$

$$b_{W_i} = 8,986 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{S_i} = 3,5 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{W_i} = W_i \times b_{W_i} = 82,0 \text{ kN/m} \times 8,986 \text{ m} = 737 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_i} = S_i \times h_{S_i} = 551 \text{ kN/m} \times 3,5 \text{ m} = 1929 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

### Sottopressioni

$$H_{\text{max.reg}} = 7,7 \text{ m} \text{ (livello acqua massima regolazione)}$$

$$\sigma_m (H=7,7 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.reg}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 7,7 \text{ m} = 77 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua alla base a monte)}$$

$$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2 \text{ (livello max regolazione)}$$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (77 - 0 \text{ kN/m}^2) = 27 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (2,757 \text{ m}) / 2 = (77 \text{ kN/m}^2 - 27 \text{ kN/m}^2) \times (2,757 \text{ m}) / 2 = 69 \text{ kN/m}$$

$$D2 = (\sigma_d) \times (2,757 \text{ m}) = (27 \text{ kN/m}^2) \times (2,757 \text{ m}) = 75 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d) \times (6,683 \text{ m}) / 2 = (27 \text{ kN/m}^2) \times (6,683 \text{ m}) / 2 = 90 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 = 69 + 75 + 90 = 234 \text{ kN/m (livello max. regolazione)}$$

$$b_{D1} = 8,52 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 8,06 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 4,45 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 69 \text{ kN/m} \times 8,52 \text{ m} = 588 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 75 \text{ kN/m} \times 8,06 \text{ m} = 605 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 90 \text{ kN/m} \times 4,45 \text{ m} = 401 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 588 + 605 + 401 = 1594 \text{ kNm/m (momento instabilizzante con livello massima regolazione)}$$

$$H_{\text{max.inv}} = 10,5 \text{ m (livello acqua massimo invaso)}$$

$$p_{\text{max}} (H=10,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 10,5 \text{ m} = 105 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua alla base a monte)}$$

$$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (105 - 0 \text{ kN/m}^2) = 37 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (2,757 \text{ m}) / 2 = (105 \text{ kN/m}^2 - 37 \text{ kN/m}^2) \times (2,757 \text{ m}) / 2 = 94 \text{ kN/m}$$

$$D2 = (\sigma_d) \times (2,757 \text{ m}) = (37 \text{ kN/m}^2) \times (2,757 \text{ m}) = 102 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d) \times (6,683 \text{ m}) / 2 = (37 \text{ kN/m}^2) \times (6,683 \text{ m}) / 2 = 124 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 = 94 + 102 + 124 = 320 \text{ kN/m (livello max. invaso)}$$

$$b_{D1} = 8,519 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 8,061 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 4,45 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 94 \text{ kN/m} \times 8,519 \text{ m} = 801 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 102 \text{ kN/m} \times 8,061 \text{ m} = 822 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 124 \text{ kN/m} \times 4,45 \text{ m} = 552 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 801 + 822 + 552 = 2175 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante con livello massimo invasivo)}$$

Sisma  $E_x$ , SLC, Monte-valle

$$F_{x-Ex} = 271 \text{ kN/m} \text{ (direzione Monte-Valle)}$$

$$F_{z-Ex} = 52 \text{ kN/m} \text{ (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ex} = 5,656 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ex} = 4,898 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Fz-Ex} = F_{z-Ex} \times b_{Fz-Ex} = 52 \text{ kN/m} \times 5,656 \text{ m} = 294 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Fx-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{Fx-Ex} = 271 \text{ kN/m} \times 4,898 \text{ m} = 1327 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Ex} = M_{Fz-Ex} + M_{Fx-Ex} = 294 + 1327 \text{ kNm/m} = 1621 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

Sisma  $E_x$ , SLV, Monte-valle

$$F_{x-Ex} = 216 \text{ kN/m} \text{ (direzione Monte-Valle)}$$

$$F_{z-Ex} = 42 \text{ kN/m} \text{ (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ex} = 5,656 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ex} = 4,898 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Fz-Ex} = F_{z-Ex} \times b_{Fz-Ex} = 42 \text{ kN/m} \times 5,656 \text{ m} = 238 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Fx-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{Fx-Ex} = 216 \text{ kN/m} \times 4,898 \text{ m} = 1058 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Ex} = M_{Fz-Ex} + M_{Fx-Ex} = 238 + 1058 \text{ kNm/m} = 1296 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

Sisma  $E_z$ , SLC, basso-alto

$$F_{x-Ez} = 43 \text{ kN/m} \text{ (direzione Valle- Monte)}$$

$$F_{z-Ez} = 142 \text{ kN/m} \text{ (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ez} = 5,656 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ez} = 4,898 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Fz-Ez} = F_{z-Ez} \times b_{Fz-Ez} = 142 \text{ kN/m} \times 5,656 \text{ m} = 803 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$M_{Fx-Ez} = F_{x-Ez} \times h_{Fx-Ez} = 43 \text{ kN/m} \times 4,898 \text{ m} = 211 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{Ez} = M_{Fz-Ez} - M_{Fx-Ez} = 803 - 211 \text{ kNm/m} = 592 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

Sisma  $E_z$ , SLV, basso-alto

$$F_{x-Ez} = 32 \text{ kN/m} \text{ (direzione Valle- Monte)}$$

$$F_{z-Ez} = 103 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ez} = 5,656 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ez} = 4,898 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$MF_{z-Ez} = F_{z-Ez} \times b_{Fz-Ez} = 103 \text{ kN/m} \times 5,656 \text{ m} = 583 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$MF_{x-Ez} = F_{x-Ez} \times h_{Fx-Ez} = 32 \text{ kN/m} \times 4,898 \text{ m} = 157 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$ME_z = MF_{z-Ez} - MF_{x-Ez} = 583 - 157 \text{ kNm/m} = 426 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Azioni inerziali SLC

$$I = 41 \text{ kN/m (Spinta inerziale totale)}$$

$$h_I = 2,93 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$MI = I \times h_I = 41 \text{ kNm/m} \times 2,93 \text{ m} = 120 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Azioni inerziali SLV

$$I = 32 \text{ kN/m (Spinta inerziale totale)}$$

$$h_I = 2,93 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$MI = I \times h_I = 32 \text{ kNm/m} \times 2,93 \text{ m} = 94 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

**2.3.2.1 COMBINAZIONE FONDAMENTALE SLU (1×G1 + 1,5×G2 + 1,5×G3 )**Peso proprio ×1 :

$$M_{G_{tot}} = 8971 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 1583 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione × 1,5

$$M_{W_r} = (460 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 690 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_r} = (763 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 1145 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = (51 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 77 \text{ (stabilizzante)}$$

$$S_r = (297 \text{ kN /m}) \times 1,5 = 446 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni × 1,5

$$M_D = (1594 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 2391 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = (234 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 351 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{stabilizzante} = 8971 + 690 \text{ kNm/m} = 9661 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 1145 + 2391 \text{ kNm/m} = 3536 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 9661 \text{ kNm/m} / 3536 \text{ kNm/m} = 2,73 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{stabilizzante} = (1583 + 77 - 351 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 982 \text{ kNm/m (stabilizzante)}$$

$$V_{instabilizzante} = 446 \text{ kNm/m (instabilizzante)}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 982 \text{ kNm/m} / 446 \text{ kNm/m} = 2,20 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**2.3.2.2 COMBINAZIONE ECCEZIONALE SLU (1×G1 + 1×A + 1×G3 )**Peso proprio ×1

$$M_{G_{tot}} = 8971 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 1583 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max invaso × 1

$$M_{W_i} = 737 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_i} = 1929 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_i = 82 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_i = 551 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni  $\times 1$

$$M_D = 2175 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 320 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

### **Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 8971 + 737 \text{ kNm/m} = 9708 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 1929 + 2175 \text{ kNm/m} = 4104 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 9708 \text{ kNm/m} / 4104 \text{ kNm/m} = 2,36 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### **Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (1583 + 82 - 320 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1009 \text{ kNm/m (stabilizzante)}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 551 \text{ kNm/m (instabilizzante)}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1009 \text{ kNm/m} / 551 \text{ kNm/m} = 1,83 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

$$2.3.2.3 \text{ COMBINAZIONE SISMICA SLC } (G1 + G2 + G3 + E_{x,slc\text{-valle/monte}} + 0.3 \times E_{z,slc\text{-Basso/Alto}} + I_{x,slc})$$

#### **2.3.2.3.1 Serbatoio pieno**

Peso proprio  $\times 1$

$$M_{\text{Gtot}} = 8971 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 1583 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione  $\times 1$

$$M_{\text{Wr}} = 460 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{Sr}} = 763 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 51 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_r = 297 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni  $\times 1$

$$M_D = 1594 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 234 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ex,slc (Monte-Valle) × 1

$$M_{Ex,slc, Monte-valle} = 1621 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex, slc, monte-valle} = 271 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex, slc, basso-alto} = 52 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez,slc (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{Ez} = (592 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 178 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez, slc, valle-monte} = (43 \text{ kN/m} \times 0,3) = 13 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez, slc, basso-alto} = (142 \text{ kN/m} \times 0,3) = 43 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Azioni inerziali,slc × 1

$$M_I = 120 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x, slc, monte-valle} = 41 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Verifica ribaltamento

$$M_{stabilizzante} = 8971 + 460 \text{ kNm/m} = 9431 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 763 + 1594 + 1621 + 178 + 120 = 4276 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 9431 \text{ kNm/m} / 4276 \text{ kNm/m} = 2,21 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

Verifica traslazione

$$V_{stabilizzante} = (1583 + 51 - 234 - 52 - 43 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 979 \text{ kNm/m}$$

$$V_{instabilizzante} = 297 + 271 - 13 + 41 \text{ kNm/m} = 596 \text{ kNm/m}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 979 \text{ kNm/m} / 596 \text{ kNm/m} = 1,64 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**2.3.2.3.2 Serbatoio vuoto**Peso proprio × 1

$$M_{Gtot} = 8971 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 1583 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Sisma Ex,slc (Monte-Valle) × 1

$$M_{Ex,slc, Monte-valle} = 1621 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex, slc, monte-valle} = 271 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex, slc, basso-alto} = 52 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez,slc (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{Ez} = (592 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 178 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez,slc,valle-monte} = (43 \text{ kN/m} \times 0,3) = 13 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez,slc,basso-alto} = (142 \text{ kN/m} \times 0,3) = 43 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

### Verifica ribaltamento

$$M_{\text{stabilizzante}} = 8971 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 1621 + 178 = 1799 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 8971 \text{ kNm/m} / 1799 \text{ kNm/m} = 5,00 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### Verifica traslazione

$$V_{\text{stabilizzante}} = (1583 - 52 - 43 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1116 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 271 - 13 \text{ kNm/m} = 258 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1116 \text{ kNm/m} / 258 \text{ kNm/m} = 4,33 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

$$2.3.2.4 \text{ COMBINAZIONE SISMICA SLV (G1 + G2 + G3 + } E_{x,slv\text{-valle/monte}} + 0.3 \times E_{z,slv\text{-Basso/Alto}} + I_{x,slv})$$

#### 2.3.2.4.1 Serbatoio pieno

##### Peso proprio × 1

$$M_{\text{Gtot}} = 8971 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 1583 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

##### Spinta acqua max regolazione × 1

$$M_{\text{Wr}} = 460 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{Sr}} = 763 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 51 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_r = 297 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

##### Sottopressioni × 1

$$M_{\text{D}} = 1594 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 234 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

##### Sisma Ex,slv (Monte-Valle) × 1

$$M_{\text{Ex,slv}} = 1296 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex,slv,monte-valle} = 216 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex,slv,basso-alto} = 42 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$



Sisma Ez,slv (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{Ez,slv} = (426 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 128 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez,slv, valle-monte} = (32 \text{ kN/m} \times 0,3) = 10 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez,slv, basso-alto} = (103 \text{ kN/m} \times 0,3) = 31 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Azioni inerziali,slv × 1

$$M_I = 94 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x,slv, monte-valle} = 32 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Verifica ribaltamento

$$M_{stabilizzante} = 8971 + 460 \text{ kNm/m} = 9431 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 763 + 1594 + 1296 + 128 + 94 = 3875 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 9431 \text{ kNm/m} / 3875 \text{ kNm/m} = 2,43 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

Verifica traslazione

$$V_{stabilizzante} = (1583 + 51 - 234 - 42 - 31 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 995 \text{ kNm/m}$$

$$V_{instabilizzante} = 297 + 216 - 10 + 32 \text{ kNm/m} = 535 \text{ kNm/m}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 995 \text{ kNm/m} / 535 \text{ kNm/m} = 1,86 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**2.3.2.4.2 Serbatoio vuoto**Peso proprio × 1

$$M_{Gtot} = 8971 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 1583 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Sisma Ex,slv (Monte-Valle) × 1

$$M_{Ex,slv} = 1296 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex,slv, monte-valle} = 216 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex,slv, basso-alto} = 42 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez,slv (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{Ez,slv} = (426 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 128 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez,slv, valle-monte} = (32 \text{ kN/m} \times 0,3) = 10 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez,slv, basso-alto} = (103 \text{ kN/m} \times 0,3) = 31 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Verifica ribaltamento

$$M_{stabilizzante} = 8971 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

Minstabilizzante =  $1296 + 128 = 1424$  kNm/m (momento instabilizzante)

Mstabilizzante / Minstabilizzante =  $8971$  kNm/m /  $1424$  kNm/m =  $6,30 > 1$  (verifica positiva)

### **Verifica traslazione**

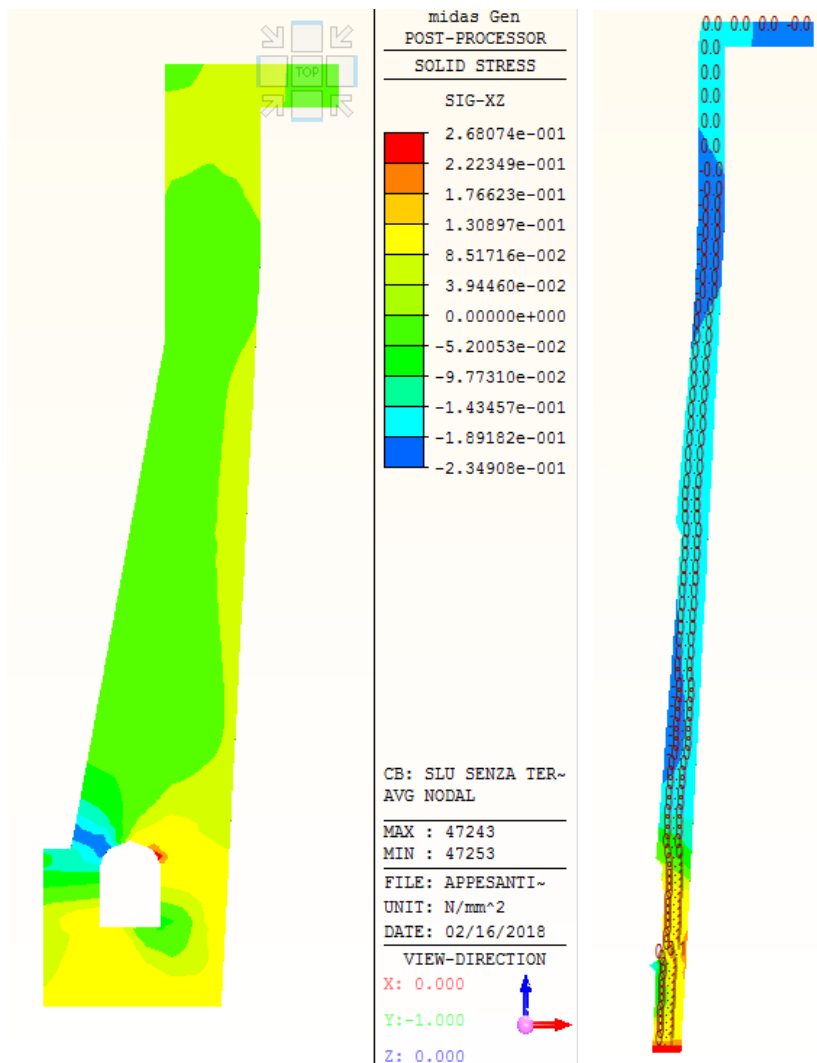
Vstabilizzante =  $(1583 - 42 - 31$  kNm/m) $\times 0,75 = 1133$  kNm/m

Vinstabilizzante =  $216 - 10$  kNm/m =  $206$  kNm/m

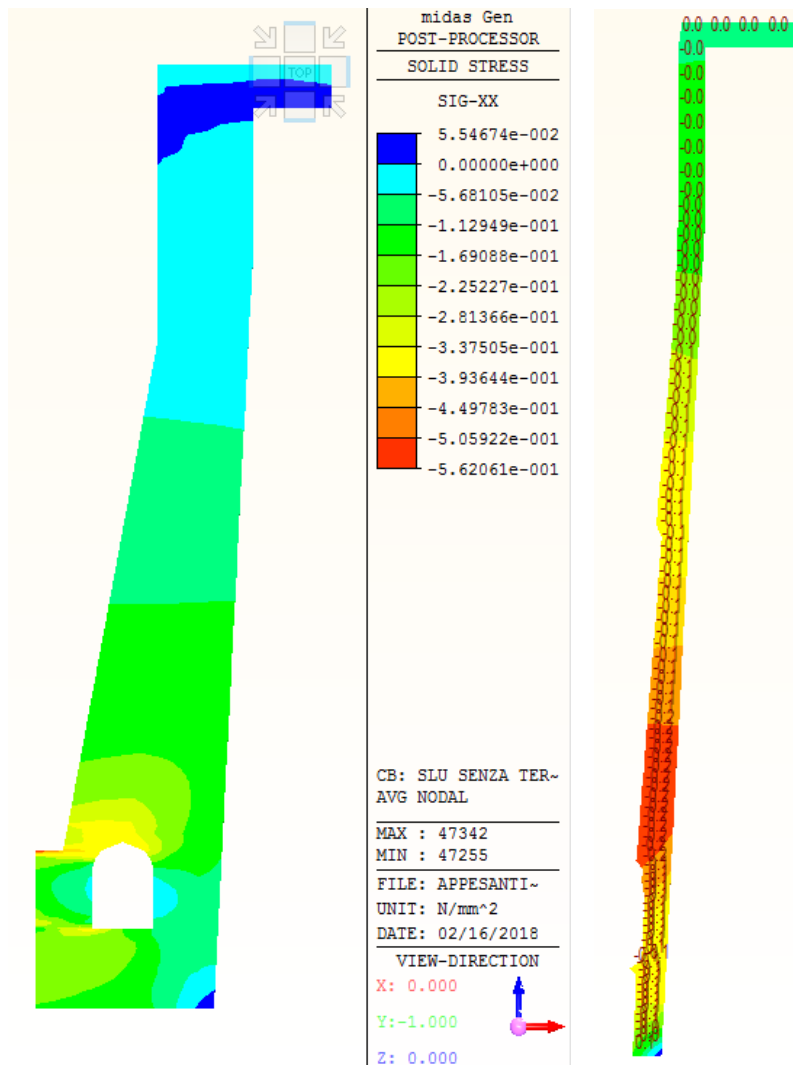
Vstabilizzante / Vinstabilizzante =  $1133$  kNm/m /  $206$  kNm/m =  $5,50 > 1$  (verifica positiva)

## 2.4 VERIFICA SFORZI DI INTERFACCIA TRA CALCESTRUZZO CORPO DIGA ESISTENTE E CALCESTRUZZO DELL'APPESANTIMENTO

### 2.4.1 Cmb.1: $1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3$ (Fondamentale)

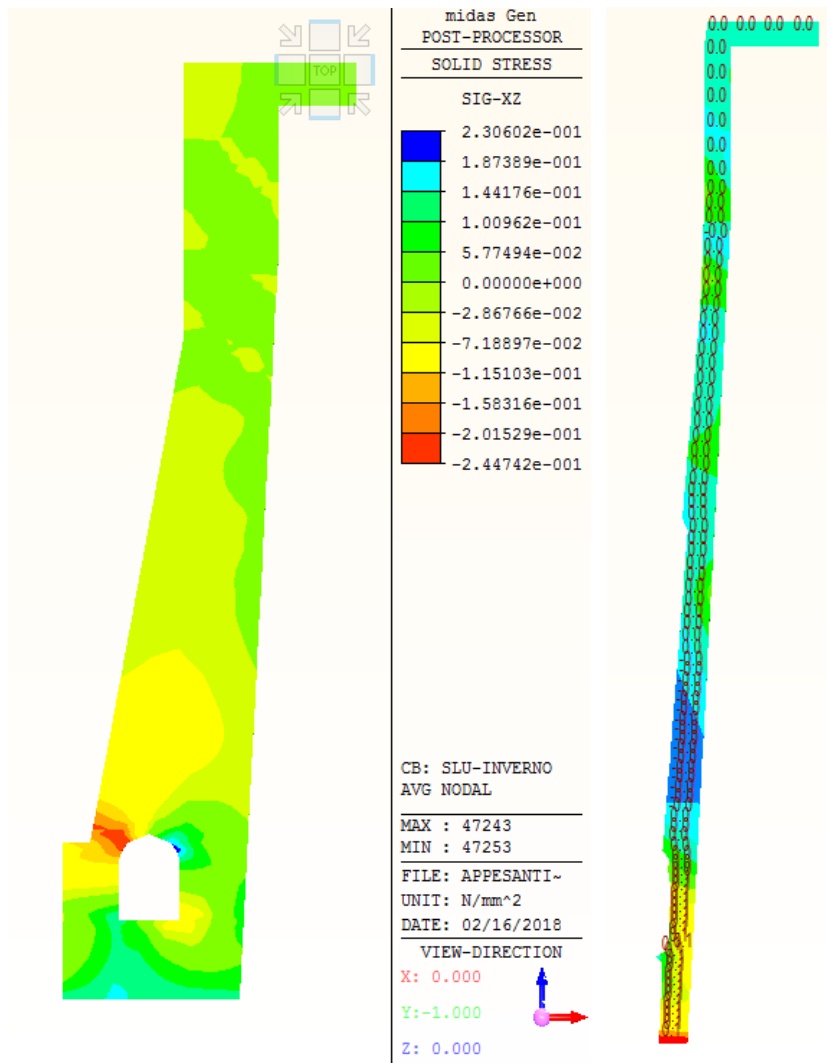


Sforzi tangenziali agenti all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

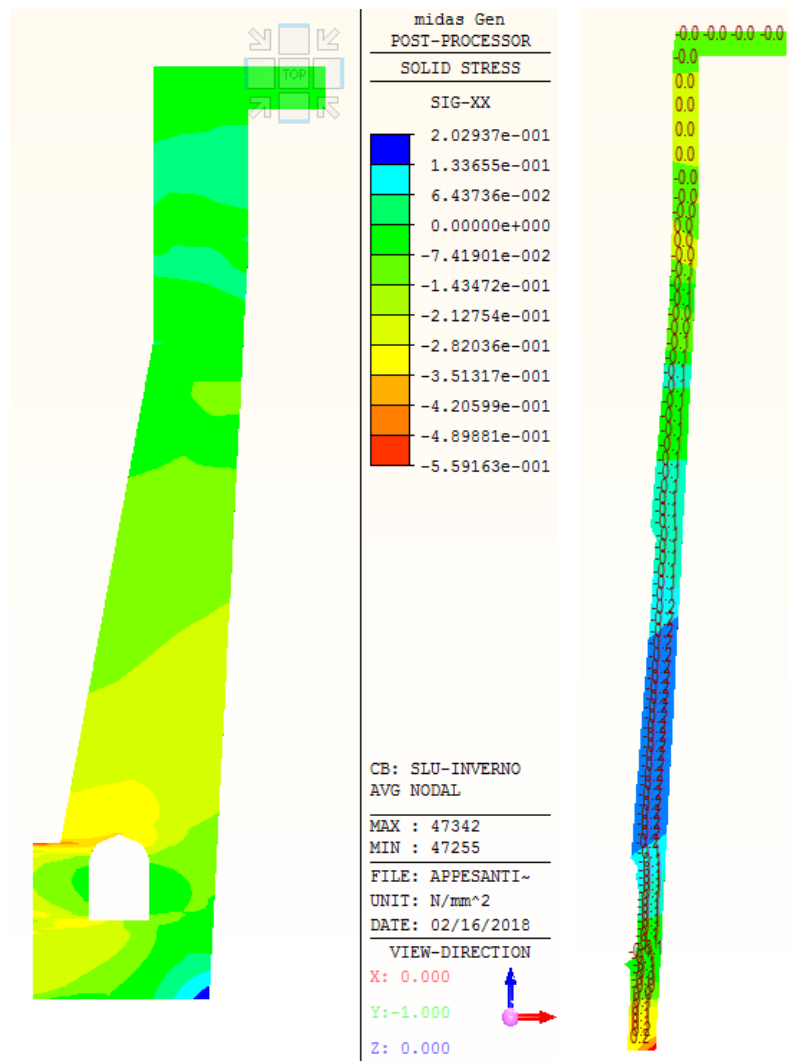


Sforzi agenti perpendicolarmente all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

2.4.2 Cmb.2:  $1,3 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3 + 1,5 \times Q1$ , inverno (Fondamentale inverno)

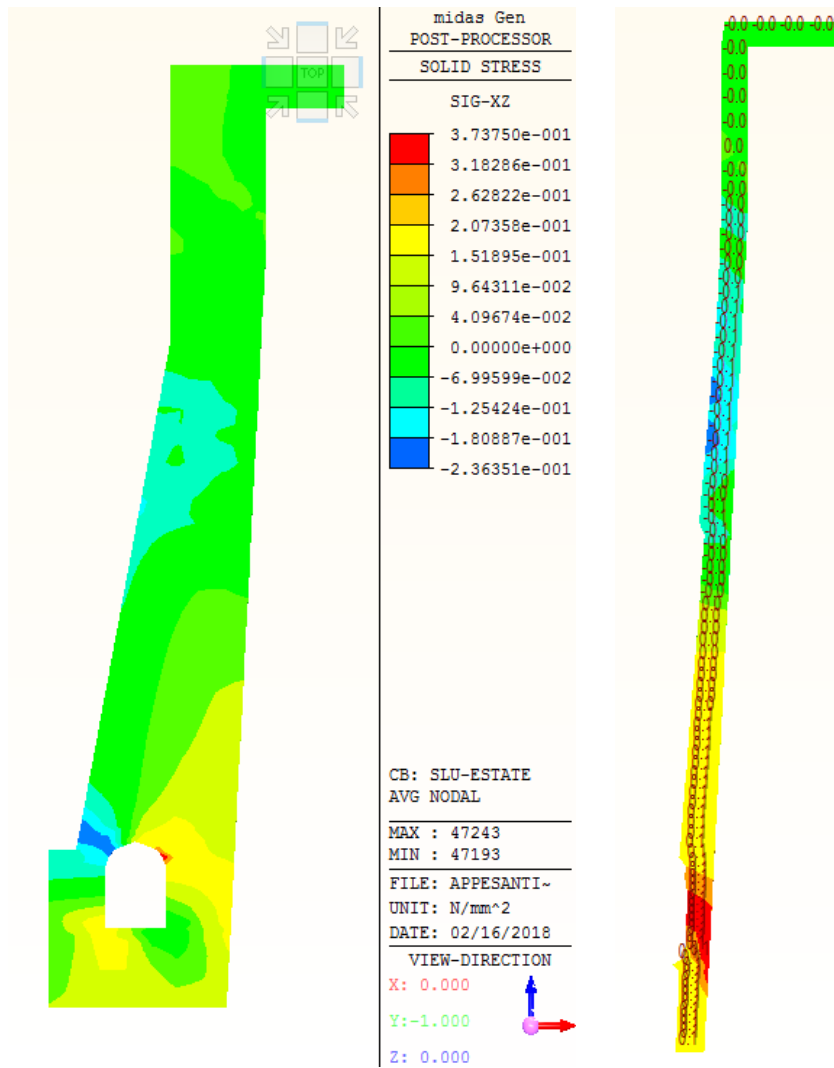


Sforzi tangenziali agenti all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

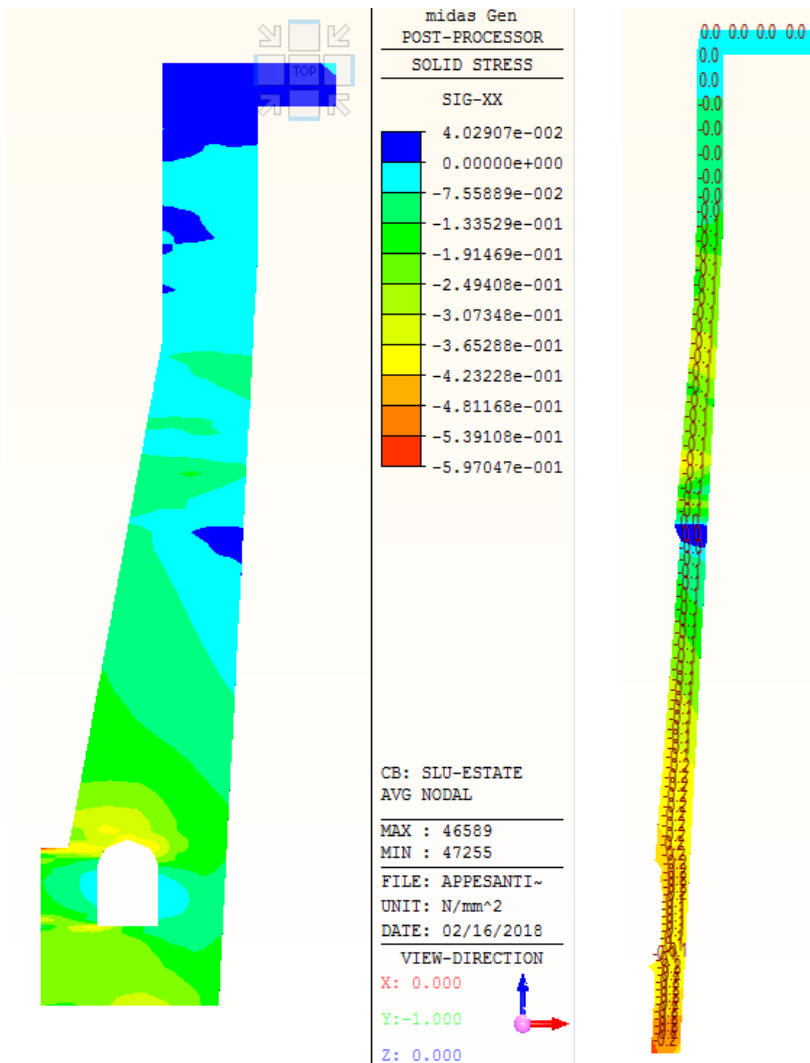


Sforzi agenti perpendicolarmente all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

2.4.3 Cmb.3: 1,3×G1+1,5×G2+1,5×G3 +1,5×Q1,estate (Fondamentale estate)



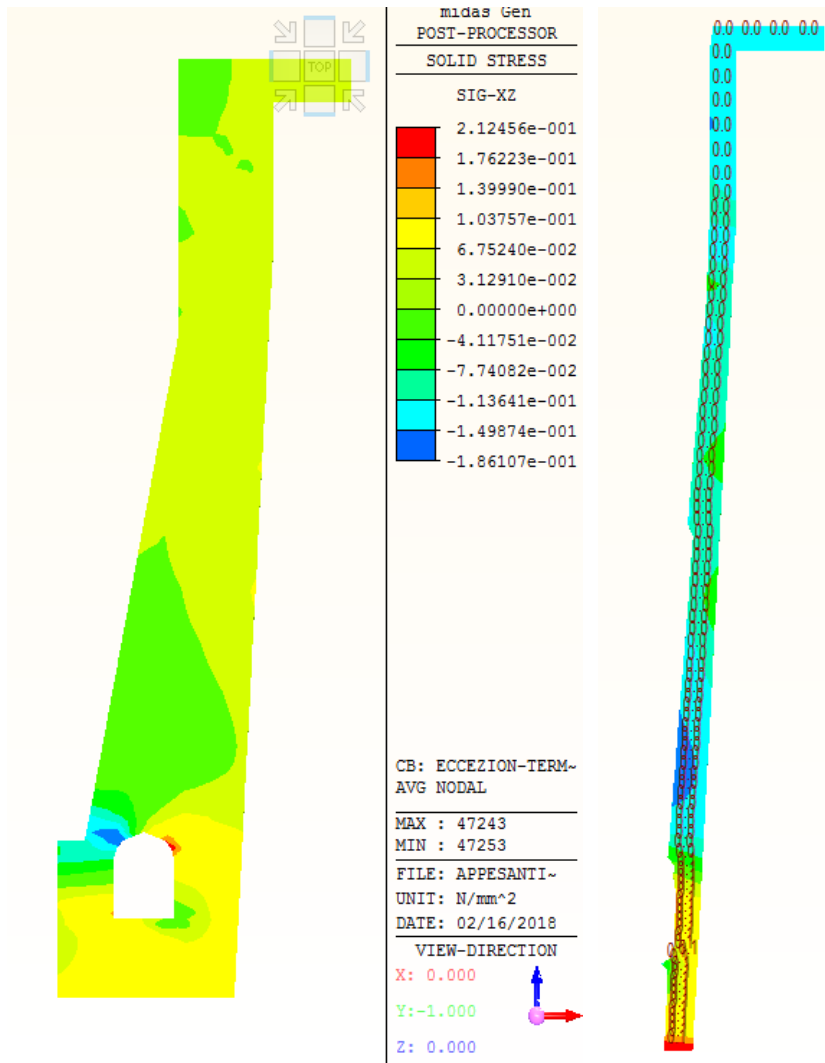
Sforzi tangenziali agenti all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)



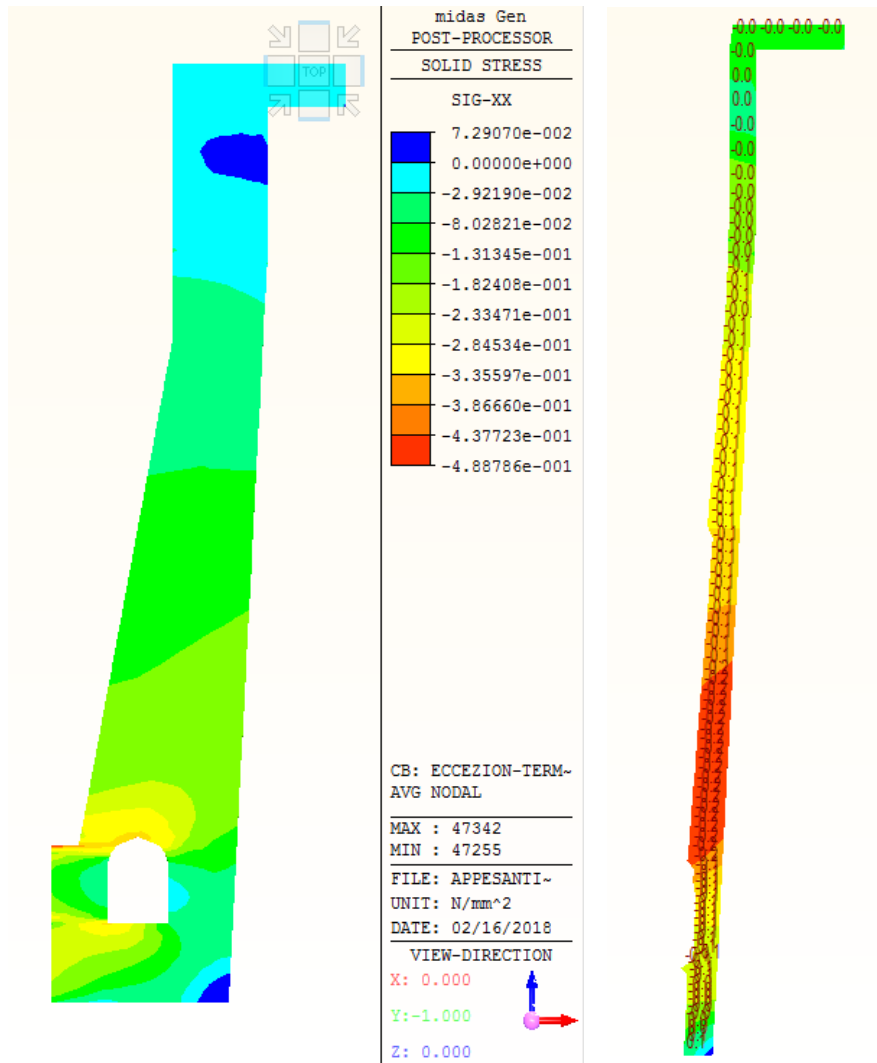
Sforzi agenti perpendicolarmente all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)



2.4.4 Cmb.4: G1+G3+A+0,5×Q1,inverno (Eccezionale inverno)

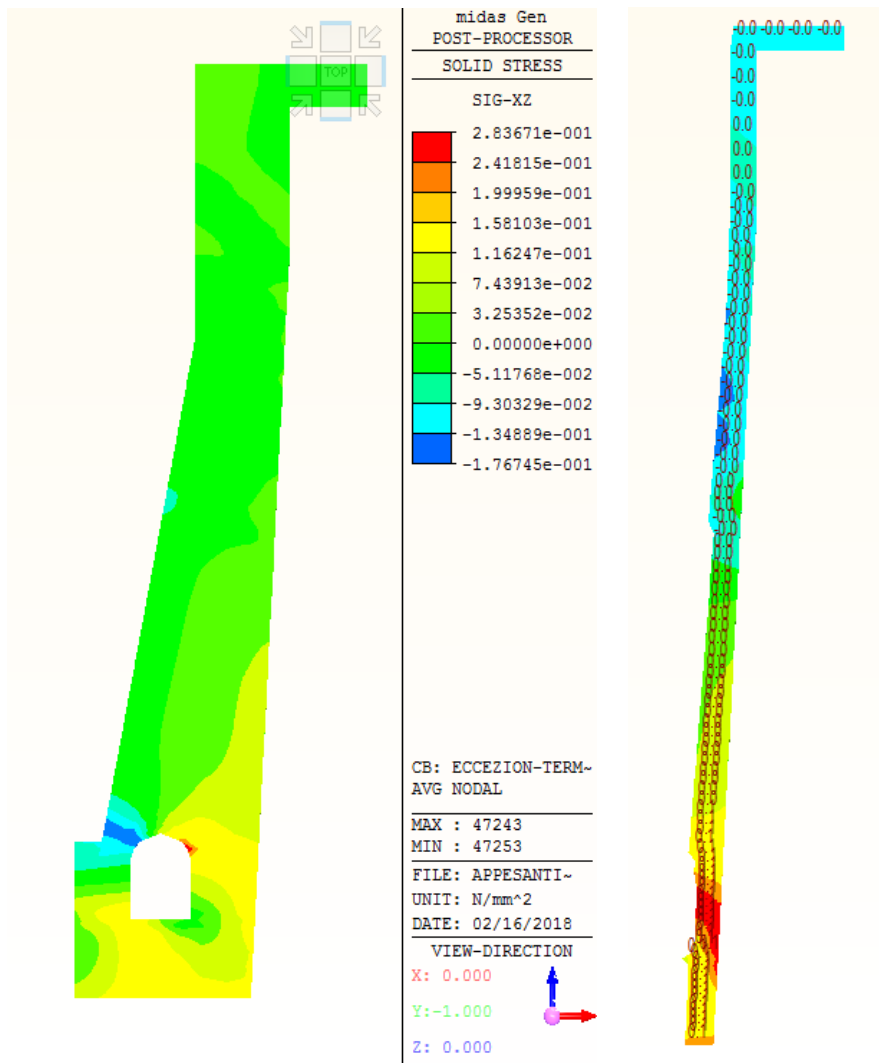


Sforzi tangenziali agenti all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

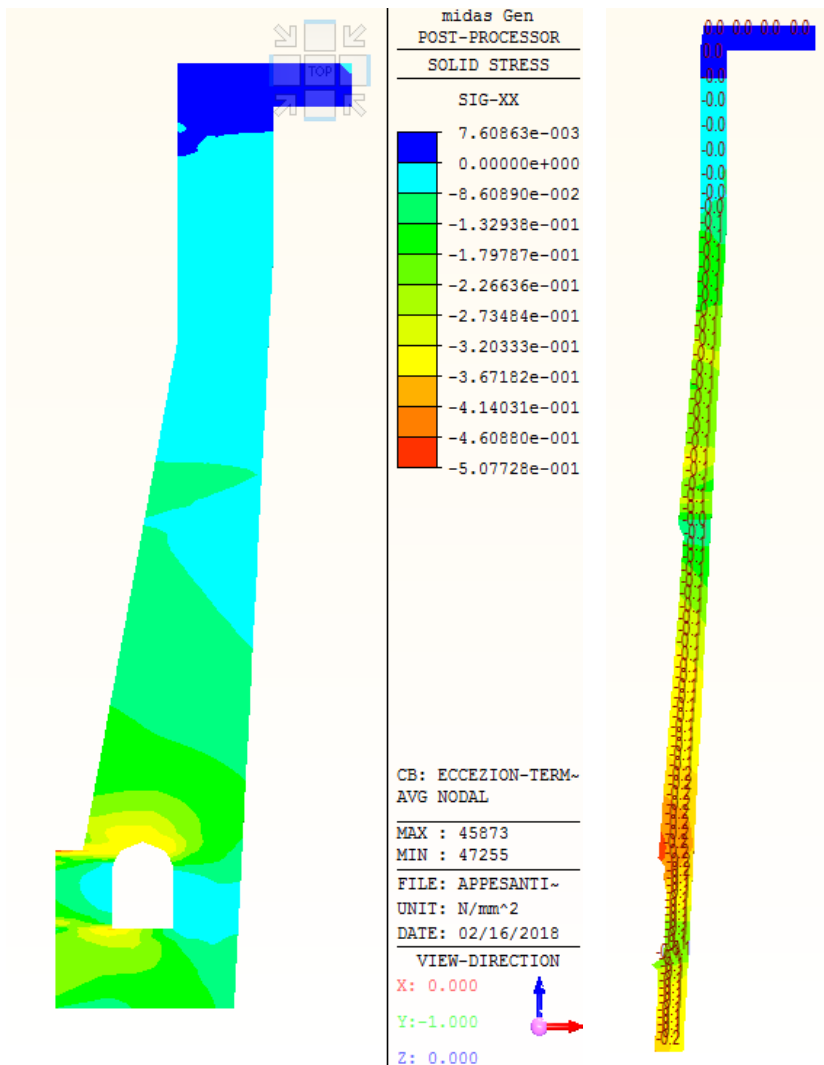


Sforzi agenti perpendicolarmente all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

2.4.5 Cmb.5: G1+G3+A+0,5×Q1,estate (Eccezionale estate)

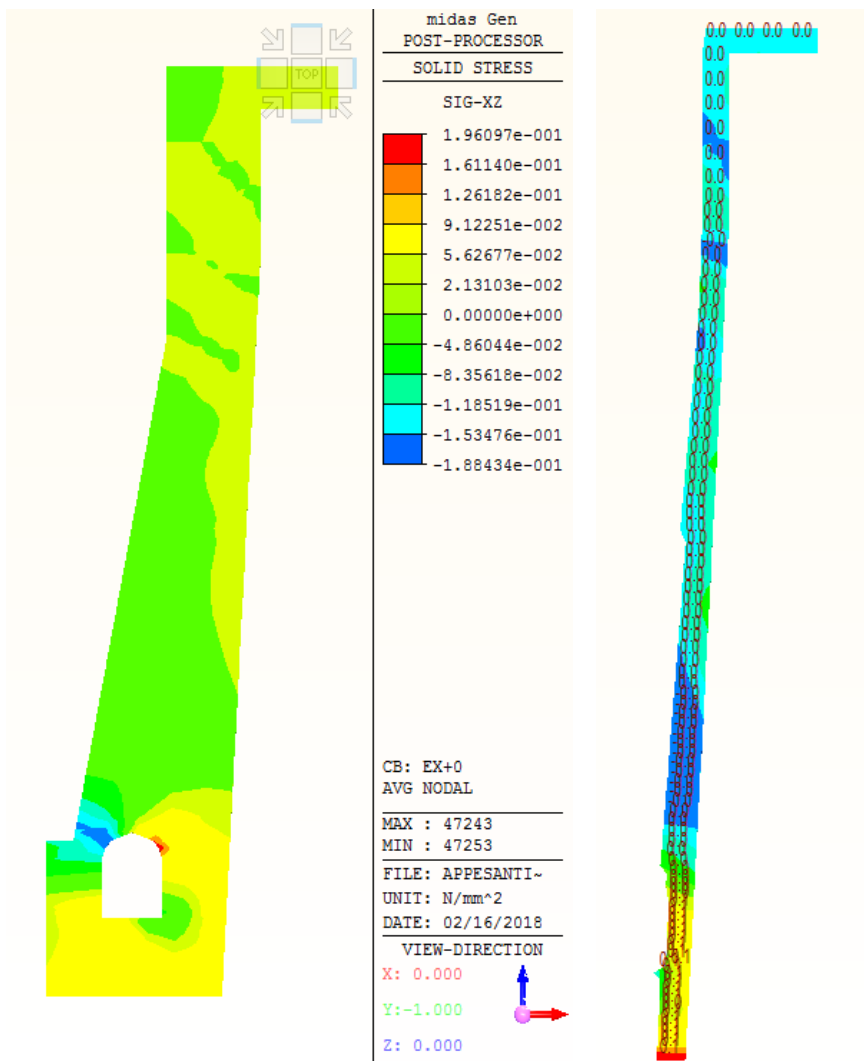


Sforzi tangenziali agenti all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

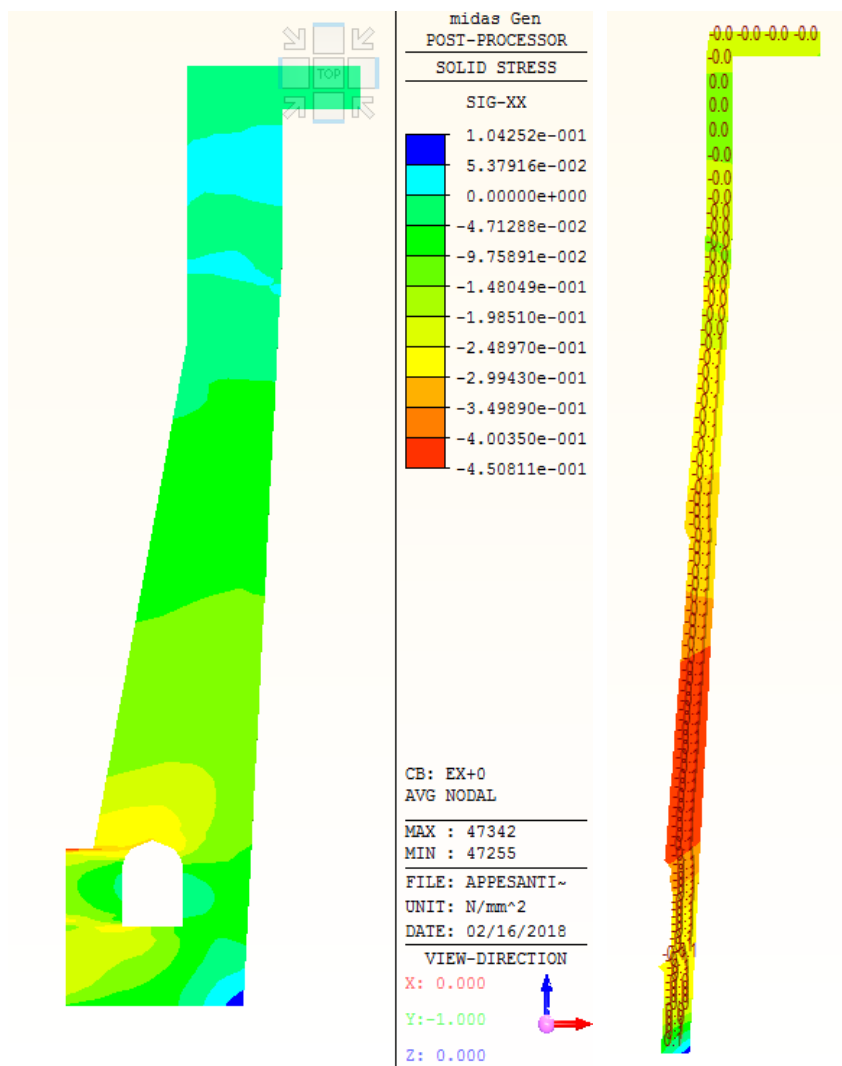


Sforzi agenti perpendicolarmente all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

2.4.6 Cmb.6 (SLV): G1+G3+Ex,SLV+0,3Ez,SLV + Ix,SLV +0,5×Q1,inverno (Sismica SLV inverno)

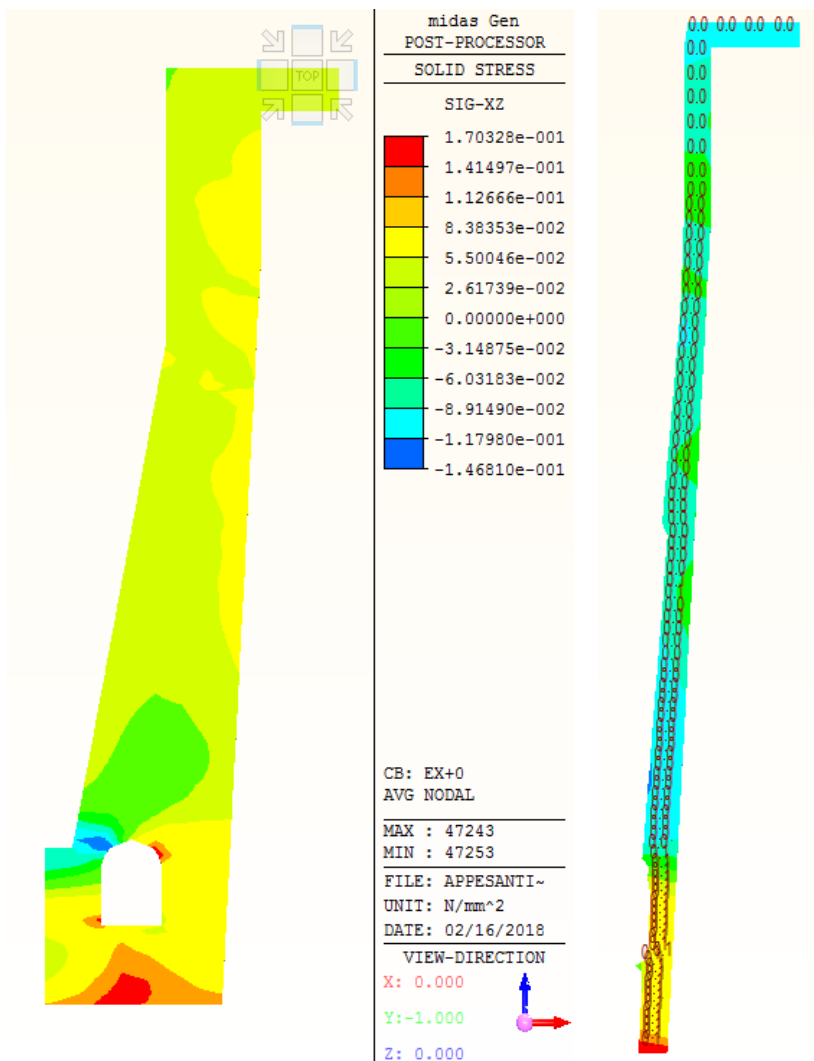


Sforzi tangenziali agenti all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

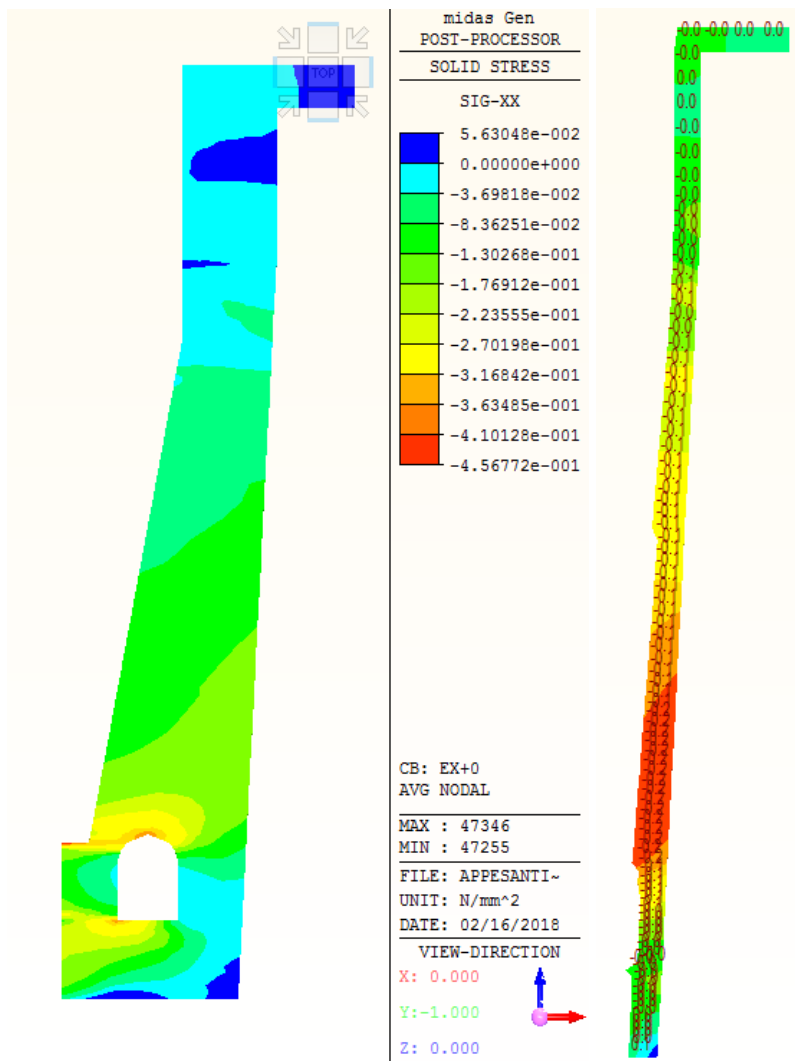


Sforzi agenti perpendicolarmente all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

**2.4.7 Cmb.6 (SLC): G1+G3+Ex,SLC+0,3Ez,SLC + Ix,SLC +0,5×Q1,inverno (Sismica SLC inverno)**



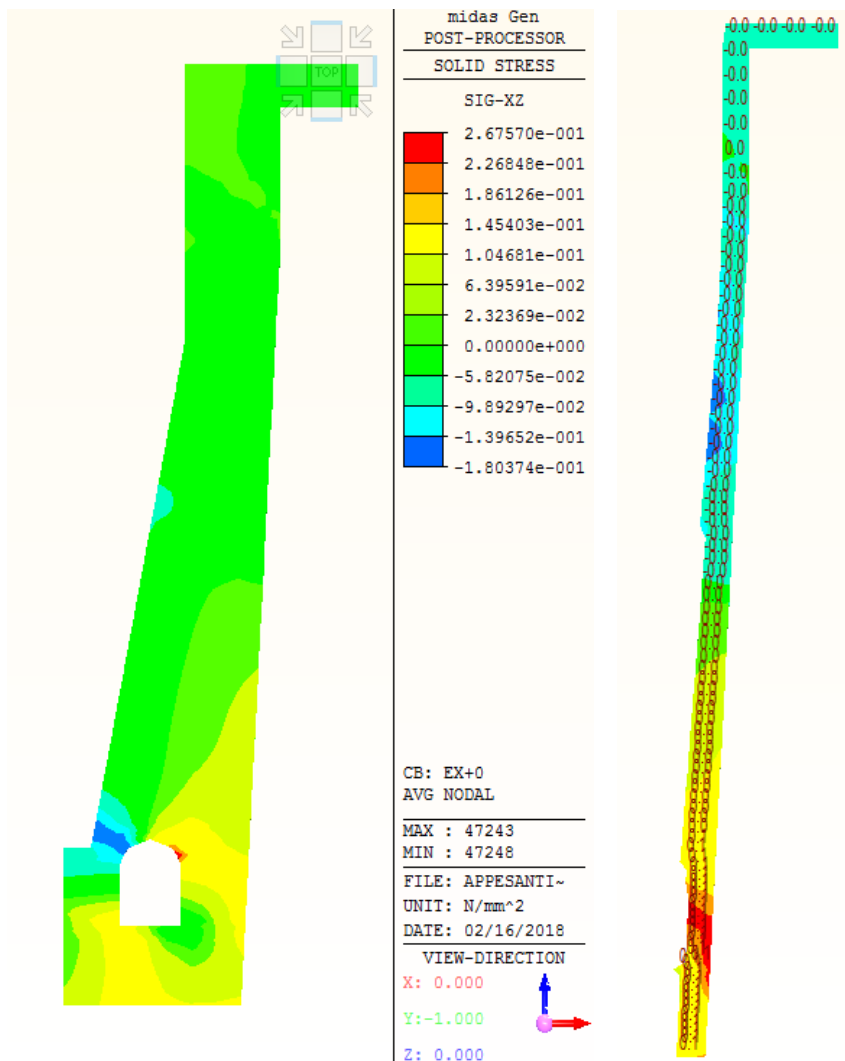
*Sforzi tangenziali agenti all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)*



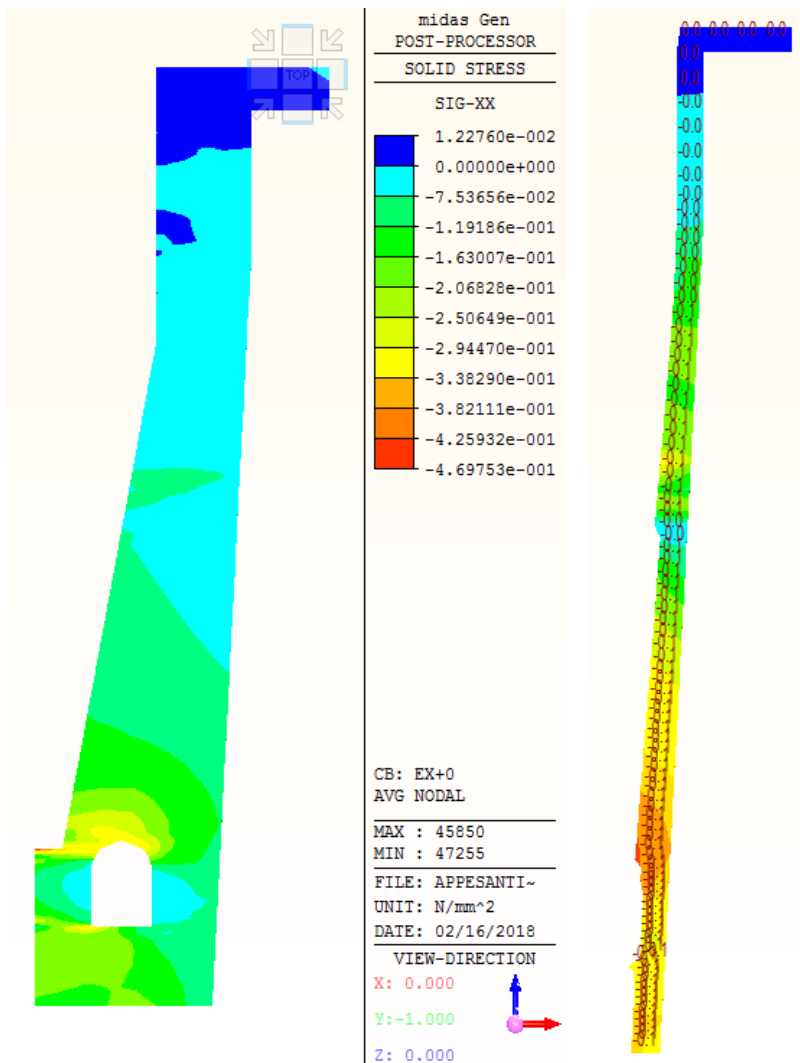
Sforzi agenti perpendicolarmente all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)



2.4.8 Cmb.7 (SLV): G1+G3+Ex,SLV+0,3Ez,SLV + Ix,SLV +0,5×Q1,estate (Sismica SLV estate)

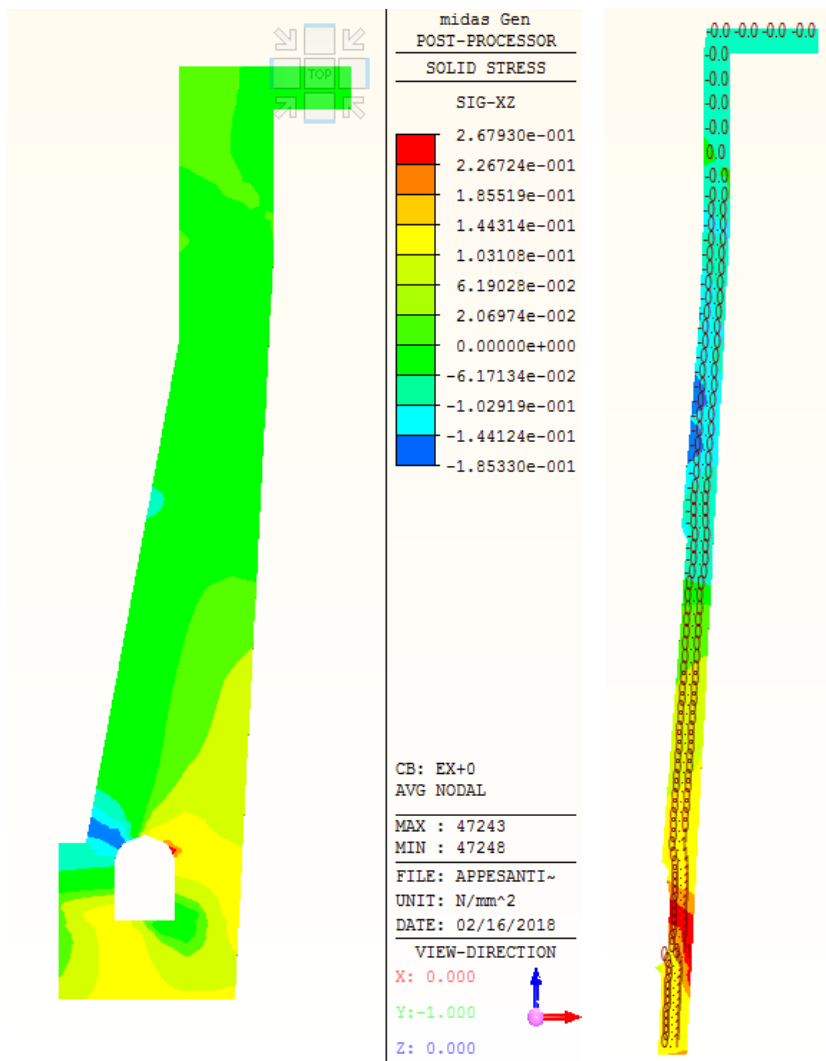


Sforzi tangenziali agenti all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

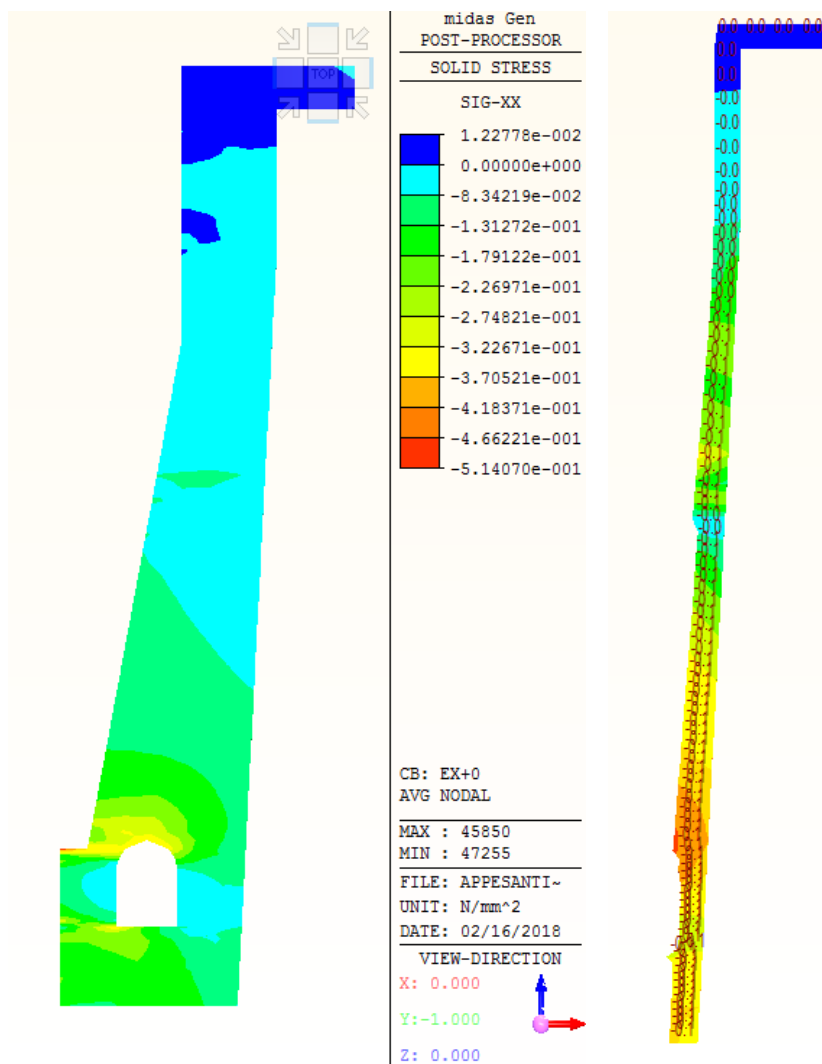


Sforzi agenti perpendicolarmente all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

2.4.9 Cmb.7 (SLC): G1+G3+Ex,SLC+0,3Ez,SLC + Ix,SLC +0,5×Q1,estate (Sismica SLC estate)



Sforzi tangenziali agenti all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)



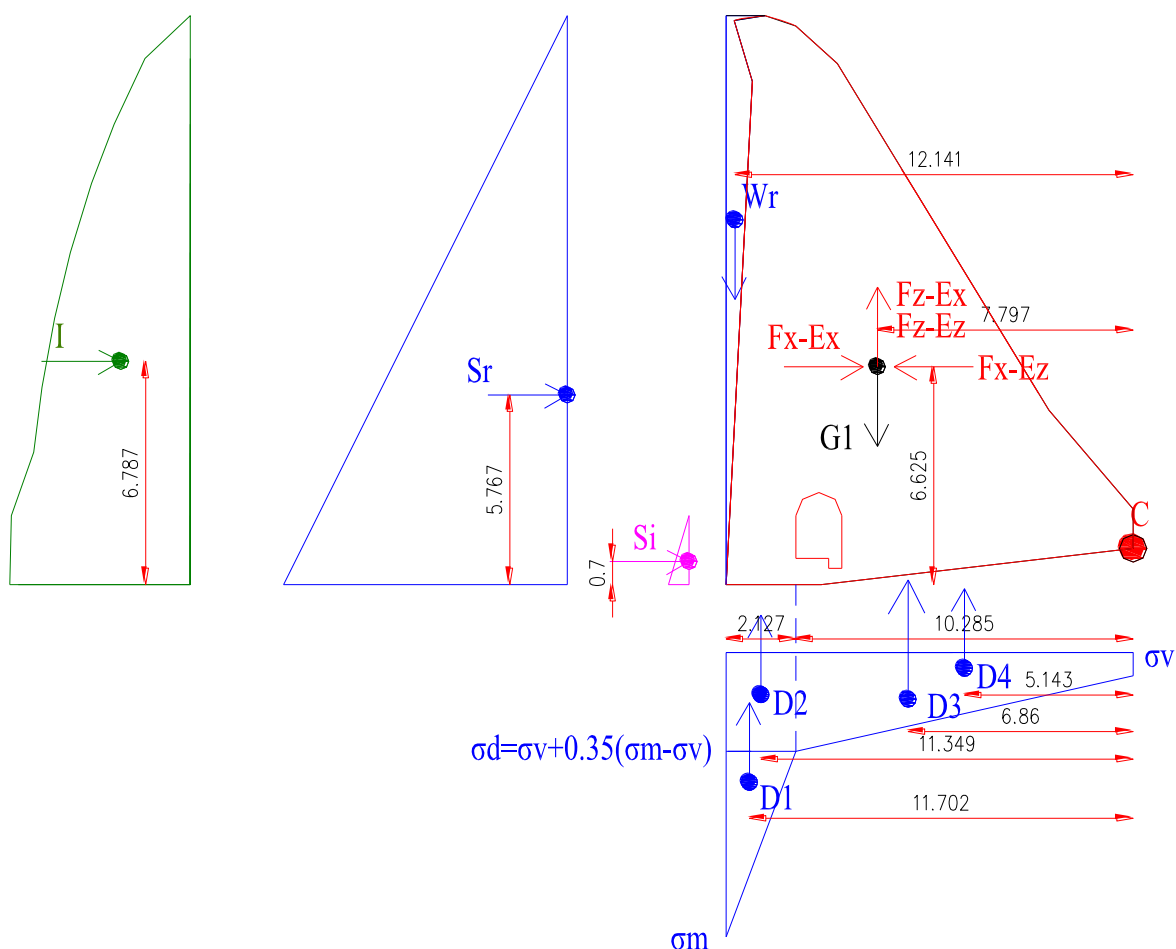
Sforzi agenti perpendicolarmente all'interfaccia tra getto di appesantimento e calcestruzzo esistente (MPa)

**3. CONCIO A / SEZIONE TRACIMABILE (DIGA ESISTENTE – D.M.26/06/2014)**

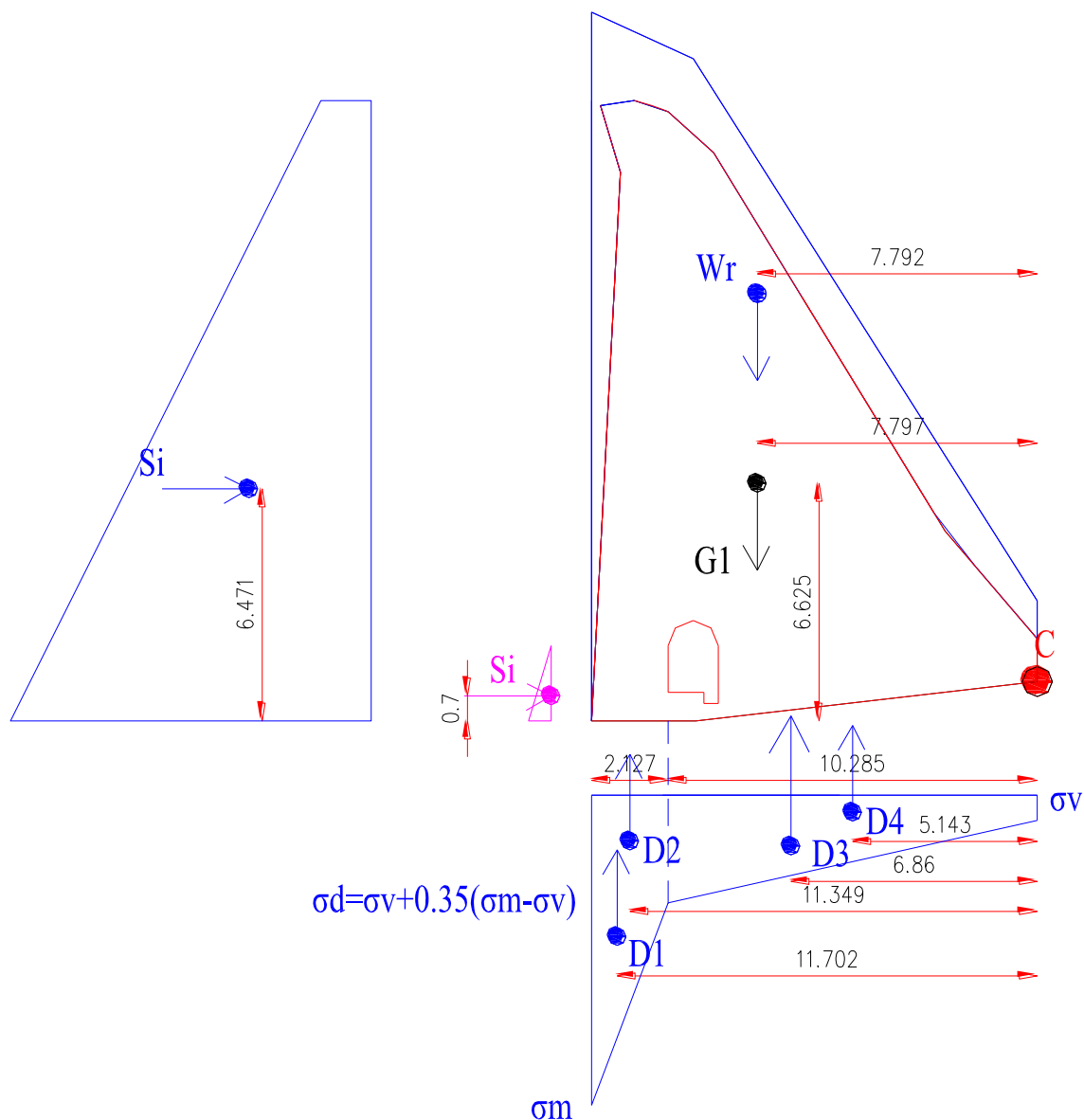
**3.1 VERIFICHE A RIBALTAMENTO E TRASLAZIONE DEL CORPO DIGA**

**3.1.1 AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE DI BASE**

Le verifiche sono condotte su una striscia di diga appesantita di larghezza 1 m:



*Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massima regolazione per le verifiche in corrispondenza della sezione di base*



*Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massimo invaso (Combinazione eccezionale) per le verifiche in corrispondenza della sezione di base*

Di seguito si riportano i carichi messi in conto:

Peso proprio

Il peso proprio della sezione trascinabile presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{cls, esist} = 123 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 2917 \text{ kN/m} \text{ (peso diga esistente)}$$

$$b_{G1} = 7,797 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale peso diga esistente rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Gtot} = G_1 \times b_{G1} = 2917 \text{ kN/m} \times 7,797 \text{ m} = 22744 \text{ kNm/m} \text{ (momento totale stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione

$H_{\max.\text{reg}} = 17,3 \text{ m}$  (livello acqua massima regolazione)

$p_{\max} (H=17,3 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\max.\text{reg}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 17,3 \text{ m} = 173 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua alla base)

$S_r = (p_{\max} \times H_{\max.\text{reg}})/2 = (173 \text{ kN/m}^2 \times 17,3 \text{ m})/2 = 1496,5 \text{ kN/m}$  (spinta orizzontale)

$W_r = (A_r \times \rho_w) = 7,2 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 72 \text{ kN/m}$  (peso acqua)

$b_{W_r} = 12,141 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{S_r} = 5,767 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{W_r} = W_r \times b_{W_r} = 72 \text{ kN/m} \times 12,141 \text{ m} = 974 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{S_r} = S_r \times h_{S_r} = 1496,5 \text{ kN/m} \times 5,767 \text{ m} = 8630 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

### Spinta acqua max invaso

$H_{\max.\text{inv}} = 20,1 \text{ m}$  (livello acqua massimo invaso)

$p_{\max} (H=20,1 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\max.\text{inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 20,1 \text{ m} = 201 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua alla base)

$p_{\min} (H=2,8 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\max.\text{inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 2,8 \text{ m} = 28 \text{ kN/m}^2$  (pressione minima sommità)

$S_i = (p_{\max} + p_{\min}) \times 17,3 \text{ m} / 2 = (201 + 28) \text{ kN/m}^2 \times 17,3 \text{ m} / 2 = 1981 \text{ kN/m}$  (spinta orizzontale)

$W_i = (A_i \times \rho_w) = 30 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 300 \text{ kN/m}$  (peso acqua)

$b_{W_i} = 7,792 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{S_i} = 6,471 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{W_i} = W_r \times b_{W_r} = 300 \text{ kN/m} \times 7,792 \text{ m} = 2337 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{S_i} = S_i \times h_{S_i} = 1981 \text{ kN/m} \times 6,471 \text{ m} = 12819 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

### Spinta interrimento

$H_{\max.\text{int}} = 2,1 \text{ m}$  (livello interrimento)

$p_{\max} (H=2,1 \text{ m}) = \rho_f \times H_{\max.\text{int}} = 6 \text{ kN/m}^3 \times 2,1 \text{ m} = 12,6 \text{ kN/m}^2$  (pressione alla base)

$S_i = (p_{\max} \times H_{\max.\text{int}})/2 = (12,6 \text{ kN/m}^2 \times 2,1 \text{ m})/2 = 13,2 \text{ kN/m}$  (spinta orizzontale)

$h_{S_{wi}} = 0,7 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{S_i} = S_i \times h_{S_{wi}} = 13,2 \text{ kN/m} \times 0,7 \text{ m} = 9,24 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

### Sottopressioni

Nel calcolo delle sottopressioni si considera un livello idrostatico a valle pari a 1,3 m. Tale valore corrisponde all'altezza del calcestruzzo dello scivolo nell'ipotesi che si possa generare infiltrazione all'interno della suola in calcestruzzo dello scivolo. L'acqua che tracima dalla diga viene rilasciata in alveo circa 40 m più a valle della diga, pertanto la pressione idrostatica a valle della diga dovrebbe essere a rigore pari a zero, a meno appunto della presenza di possibili infiltrazioni.

$H_{\max.\text{reg}} = 17,3 \text{ m}$  (livello acqua massima regolazione)

$\sigma_m (H=17,3 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\max.\text{reg}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 17,3 \text{ m} = 173 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua alla base a monte)

$\sigma_v (h_v=1,3 \text{ m}) = \rho_w \times h_v = 10 \text{ kN/m}^3 \times 1,3 \text{ m} = 13 \text{ kN/m}^2$  (livello max regolazione)

$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 13 + 0,35 \times (173 - 13 \text{ kN/m}^2) = 69 \text{ kN/m}^2$  (pressione dreno)

$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (2,127 \text{ m}) / 2 = (173 \text{ kN/m}^2 - 69 \text{ kN/m}^2) \times (2,127 \text{ m}) / 2 = 111 \text{ kN/m}$

$D2 = (\sigma_d) \times (2,127 \text{ m}) = (69 \text{ kN/m}^2) \times (2,127 \text{ m}) = 147 \text{ kN/m}$

$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (10,285 \text{ m}) / 2 = (69 - 13 \text{ kN/m}^2) \times (10,285 \text{ m}) / 2 = 288 \text{ kN/m}$

$D4 = (\sigma_v) \times (10,285 \text{ m}) = (13 \text{ kN/m}^2) \times (10,285 \text{ m}) = 134 \text{ kN/m}$

$D = D1 + D2 + D3 + D4 = 111 + 147 + 288 + 134 = 680 \text{ kN/m}$  (livello max. regolazione)

$b_{D1} = 11,702 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D2} = 11,349 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D3} = 6,86 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D4} = 5,143 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 111 \text{ kN/m} \times 11,702 \text{ m} = 1299 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 147 \text{ kN/m} \times 11,349 \text{ m} = 1668 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 288 \text{ kN/m} \times 6,86 \text{ m} = 1976 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D4} = D4 \times b_{D4} = 134 \text{ kN/m} \times 5,143 \text{ m} = 689 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} + M_{D4} = 1299 + 1668 + 1976 + 689 = 5632 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante con livello massima regolazione)

$H_{\max.\text{inv}} = 20,1 \text{ m}$  (livello acqua massimo invaso)

$p_{\max} (H=20,1 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\max.\text{inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 20,1 \text{ m} = 201 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua alla base a monte)

$\sigma_v (h_v=1,3 \text{ m}) = \rho_w \times h_v = 10 \text{ kN/m}^3 \times 1,3 \text{ m} = 13 \text{ kN/m}^2$

$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 13 + 0,35 \times (201 - 13 \text{ kN/m}^2) = 78,8 \text{ kN/m}^2$  (pressione dreno)

$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (2,127 \text{ m}) / 2 = (201 \text{ kN/m}^2 - 78,8 \text{ kN/m}^2) \times (2,127 \text{ m}) / 2 = 130 \text{ kN/m}$

$D2 = (\sigma_d) \times (2,127 \text{ m}) = (78,8 \text{ kN/m}^2) \times (2,127 \text{ m}) = 168 \text{ kN/m}$

$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (10,285 \text{ m}) / 2 = (78,8 - 13 \text{ kN/m}^2) \times (10,285 \text{ m}) / 2 = 338 \text{ kN/m}$



$$D4 = (\sigma_v) \times (10,285 \text{ m}) = (13 \text{ kN/m}^2) \times (10,285 \text{ m}) = 134 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 + D4 = 130 + 168 + 338 + 134 = 770 \text{ kN/m (livello max. invaso)}$$

$$b_{D1} = 11,702 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 11,349 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 6,86 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D4} = 5,143 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 130 \text{ kN/m} \times 11,702 \text{ m} = 1521 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 168 \text{ kN/m} \times 11,349 \text{ m} = 1907 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 338 \text{ kN/m} \times 6,86 \text{ m} = 2318 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D4} = D4 \times b_{D4} = 134 \text{ kN/m} \times 5,143 \text{ m} = 689 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} + M_{D4} = 1521 + 1907 + 2318 + 689 = 6436 \text{ kNm/m (momento instabilizzante con livello massimo invaso)}$$

#### Sisma $E_{x,SLC, Monte-valle}$

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLC (combinazione con carico sismico massimo).

Per un'azione sismica sollecitante in direzione x (Monte-Valle) nasce oltre che un'azione in direzione x (Monte-Valle), anche una componente sismica in direzione verticale (Basso-Alto) generata dall'inclinazione del piano di fondazione della diga.

$$F_{x-Ex} = 485 \text{ kN/m (direzione Monte-Valle)}$$

$$F_{z-Ex} = 139 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ex} = 7,797 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ex} = 6,625 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Fz-Ex} = F_{z-Ex} \times b_{Fz-Ex} = 139 \text{ kN/m} \times 7,797 \text{ m} = 1084 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Fx-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{Fx-Ex} = 485 \text{ kN/m} \times 6,625 \text{ m} = 3213 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Ex} = M_{Fz-Ex} + M_{Fx-Ex} = 1084 + 3213 \text{ kNm/m} = 4297 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_{x,SLV, Monte-valle}$

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLV:

$$F_{x-Ex} = 390 \text{ kN/m (direzione Monte-Valle)}$$

$$F_{z-Ex} = 112 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ex} = 7,797 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{F_x-E_x} = 6,625 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{F_z-E_x} = F_{z-E_x} \times b_{F_z-E_x} = 112 \text{ kN/m} \times 7,797 \text{ m} = 873 \text{ kNm/m}$$

$$M_{F_x-E_x} = F_{x-E_x} \times h_{F_x-E_x} = 390 \text{ kN/m} \times 6,625 \text{ m} = 2584 \text{ kNm/m}$$

$$M_{E_x} = M_{F_z-E_x} + M_{F_x-E_x} = 873 + 2574 \text{ kNm/m} = 3447 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_z$ , SLC.basso-alto

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLC (combinazione con carico sismico massimo).

Per un'azione sismica sollecitante in direzione z (Basso-Alto) nasce oltre che un'azione in direzione z (Basso-Alto), anche una componente sismica in direzione orizzontale (Valle-Monte) generata dall'inclinazione del piano di fondazione della diga.

$$F_{x-E_z} = 107 \text{ kN/m (direzione Valle- Monte)}$$

$$F_{z-E_z} = 275 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{F_z-E_z} = 7,797 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{F_x-E_z} = 6,625 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{F_z-E_z} = F_{z-E_z} \times b_{F_z-E_z} = 275 \text{ kN/m} \times 7,797 \text{ m} = 2144 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{F_x-E_z} = F_{x-E_z} \times h_{F_x-E_z} = 107 \text{ kN/m} \times 6,625 \text{ m} = 709 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{E_z} = M_{F_z-E_z} - M_{F_x-E_z} = 2144 - 709 \text{ kNm/m} = 1435 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_z$ , SLV.basso-alto

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLV:

$$F_{x-E_z} = 78 \text{ kN/m (direzione Valle- Monte)}$$

$$F_{z-E_z} = 199 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{F_z-E_z} = 7,797 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{F_x-E_z} = 6,625 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{F_z-E_z} = F_{z-E_z} \times b_{F_z-E_z} = 199 \text{ kN/m} \times 7,797 \text{ m} = 1552 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{F_x-E_z} = F_{x-E_z} \times h_{F_x-E_z} = 78 \text{ kN/m} \times 6,625 \text{ m} = 517 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{E_z} = M_{F_z-E_z} - M_{F_x-E_z} = 1552 - 517 \text{ kNm/m} = 1035 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Azioni inerziali SLC

$$I = 140 \text{ kN/m (Spinta inerziale totale)}$$

$$h_I = 6,787 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_I = I \times h_I = 140 \text{ kNm/m} \times 6,787 \text{ m} = 950 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

#### Azioni inerziali SLV

$$I = 110 \text{ kN/m} \text{ (Spinta inerziale totale)}$$

$$h_I = 6,787 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_I = I \times h_I = 110 \text{ kNm/m} \times 6,787 \text{ m} = 747 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

#### 3.1.1.1 COMBINAZIONE FONDAMENTALE SLU ( $1 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3$ )

##### Peso proprio $\times 1$ :

$$M_{G_{tot}} = 22744 \text{ kNm/m} \text{ (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 2917 \text{ kN/m} \text{ (stabilizzante)}$$

##### Spinta acqua max regolazione $\times 1,5$

$$M_{W_r} = (974 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 1461 \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_r} = (8630 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 12945 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = (72 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 108 \text{ (stabilizzante)}$$

$$S_r = (1496,5 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 2245 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

##### Spinta interrimento $\times 1,5$

$$M_{S_i} = (9,24 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 14 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = (13,2 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 20 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

##### Sottopressioni $\times 1,5$

$$M_D = (5632 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 8448 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$D = (680 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 1020 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

#### Verifica ribaltamento

$$M_{\text{stabilizzante}} = 22744 + 1461 \text{ kNm/m} = 24205 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 12945 + 14 + 8448 \text{ kNm/m} = 21407 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 24205 \text{ kNm/m} / 21407 \text{ kNm/m} = 1,13 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

#### Verifica traslazione

$$V_{\text{stabilizzante}} = (2917 + 108 - 1020 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1504 \text{ kNm/m} \text{ (stabilizzante)}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 2245 + 20 \text{ kNm/m} = 2265 \text{ kNm/m} \text{ (instabilizzante)}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1504 \text{ kNm/m} / 2265 \text{ kNm/m} = 0,66 < 1 \text{ (verifica negativa)}$$

**3.1.1.2 COMBINAZIONE ECCEZIONALE SLU ( $1 \times G1 + 1 \times A + 1 \times G3$ )**Peso proprio  $\times 1$ 

$$M_{G_{tot}} = 22744 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 2917 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max invaso  $\times 1$ 

$$M_{W_i} = 2337 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_i} = 12819 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_i = 300 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_i = 1981 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Spinta interrimento  $\times 1$ 

$$M_{S_i} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni  $\times 1$ 

$$M_D = 6436 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 770 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 22744 + 2337 \text{ kNm/m} = 25081 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 12819 + 9 + 6436 \text{ kNm/m} = 19264 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 25081 \text{ kNm/m} / 19264 \text{ kNm/m} = 1,30 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (2917 + 300 - 770 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1835 \text{ kNm/m (stabilizzante)}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 1981 + 13,2 \text{ kNm/m} = 1994 \text{ kNm/m (instabilizzante)}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1835 \text{ kNm/m} / 1994 \text{ kNm/m} = 0,92 > 1 \text{ (verifica negativa)}$$

**3.1.1.3 COMBINAZIONE SISMICA SLC ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slc-valle/monte} + 0,3 \times E_{z,slc-Basso/Alto} + I_{x,slc}$ )****3.1.1.3.1 Serbatoio pieno**Peso proprio  $\times 1$

$$M_{Gtot} = 22744 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 2917 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione × 1

$$M_{Wr} = 974 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{Sr} = 8630 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 72 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_r = 1496,5 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Spinta interrimento × 1

$$M_{Si} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni × 1

$$M_D = 5632 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 680 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ex,slc (Monte-Valle) × 1

$$M_{Ex,slc, Monte-valle} = 4297 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{X-Ex, slc, monte-valle} = 485 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{Z-Ex, slc, basso-alto} = 139 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez,slc (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{Ez} = (1435 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 431 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{X-Ez, slc, valle-monte} = (107 \text{ kN/m} \times 0,3) = 32 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{Z-Ez, slc, basso-alto} = (275 \text{ kN/m} \times 0,3) = 83 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Azioni inerziali,slc × 1

$$M_I = 950 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x, slc, monte-valle} = 140 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{stabilizzante} = 22744 + 974 \text{ kNm/m} = 23718 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 8630 + 9 + 5632 + 4297 + 431 + 950 = 19949 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 23718 \text{ kNm/m} / 19949 \text{ kNm/m} = 1,19 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (2917 + 72 - 680 - 139 - 83 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1565 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 1496,5 + 13,2 + 485 - 32 + 140 \text{ kNm/m} = 2103 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1565 \text{ kNm/m} / 2103 \text{ kNm/m} = 0,74 < 1 \text{ (verifica negativa)}$$

### 3.1.1.3.2 Serbatoio vuoto

#### Peso proprio × 1

$$M_{\text{Gtot}} = 22744 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 2917 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

#### Spinta interrimento × 1

$$M_{\text{Si}} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Sisma Ex,slc (Monte-Valle) × 1

$$M_{\text{Ex,slc,Monte-valle}} = 4297 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{X-Ex,slc,monte-valle}} = 485 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{\text{Z-Ex,slc,basso-alto}} = 139 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Sisma Ez,slc (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{\text{Ez}} = (1435 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 431 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{X-Ez,slc,valle-monte}} = (107 \text{ kN/m} \times 0,3) = 32 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{\text{Z-Ez,slc,basso-alto}} = (275 \text{ kN/m} \times 0,3) = 83 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Verifica ribaltamento

$$M_{\text{stabilizzante}} = 22744 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 9 + 4297 + 431 = 4737 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 22744 \text{ kNm/m} / 4737 \text{ kNm/m} = 4,80 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

#### Verifica traslazione

$$V_{\text{stabilizzante}} = (2917 - 139 - 83 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 2021 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 13,2 + 485 - 32 \text{ kNm/m} = 466 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 2021 \text{ kNm/m} / 466 \text{ kNm/m} = 4,33 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

$$3.1.1.4 \text{ COMBINAZIONE SISMICA SLV (G1 + G2 + G3 + } E_{x,slv\text{-valle/monte}} + 0,3 \times E_{z,slv\text{-Basso/Alto}} + I_{x,slv})$$

**3.1.1.4.1 Serbatoio pieno**Peso proprio × 1

$$M_{G_{tot}} = 22744 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 2917 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione × 1

$$M_{W_r} = 974 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_r} = 8630 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 72 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_r = 1496,5 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Spinta interrimento × 1

$$M_{S_i} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni × 1

$$M_D = 5632 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 680 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ex,slv (Monte-Valle) × 1

$$M_{E_{x,slv}} = 3447 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex,slv,monte-valle} = 390 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex,slv,basso-alto} = 112 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez,slv (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{E_{z,slv}} = (1035 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 311 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez,slv,valle-monte} = (78 \text{ kN/m} \times 0,3) = 23 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez,slv,basso-alto} = (199 \text{ kN/m} \times 0,3) = 60 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Azioni inerziali,slv × 1

$$M_I = 747 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x,slv,monte-valle} = 110 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{stabilizzante} = 22744 + 974 \text{ kNm/m} = 23718 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 8630 + 9 + 5632 + 3447 + 311 + 747 = 18776 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 23718 \text{ kNm/m} / 18776 \text{ kNm/m} = 1,26 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### Verifica traslazione

$$V_{\text{stabilizzante}} = (2917 + 72 - 680 - 112 - 60 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1603 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 1496,5 + 13,2 + 390 - 23 + 110 \text{ kNm/m} = 1987 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1603 \text{ kNm/m} / 1987 \text{ kNm/m} = 0,81 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### 3.1.1.4.2 Serbatoio vuoto

#### Peso proprio $\times 1$

$$M_{\text{Gtot}} = 22744 \text{ kNm/m} \text{ (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 2917 \text{ kN/m} \text{ (stabilizzante)}$$

#### Spinta interrimento $\times 1$

$$M_{\text{Si}} = 9,24 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

#### Sisma Ex,slv (Monte-Valle) $\times 1$

$$M_{\text{Ex,slv}} = 3447 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{X-Ex,slv,monte-valle}} = 390 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

$$F_{\text{Z-Ex,slv,basso-alto}} = 112 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

#### Sisma Ez,slv (Basso-Alto) $\times 0,3$

$$M_{\text{Ez,slv}} = (1035 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 311 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{X-Ez,slv,valle-monte}} = (78 \text{ kN/m} \times 0,3) = 23 \text{ kN/m} \text{ (stabilizzante)}$$

$$F_{\text{Z-Ez,slv,basso-alto}} = (199 \text{ kN/m} \times 0,3) = 60 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

### Verifica ribaltamento

$$M_{\text{stabilizzante}} = 22744 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 9 + 3447 + 311 = 3767 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 22744 \text{ kNm/m} / 3767 \text{ kNm/m} = 6,04 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### Verifica traslazione

$$V_{\text{stabilizzante}} = (2917 - 112 - 60 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 2058 \text{ kNm/m}$$

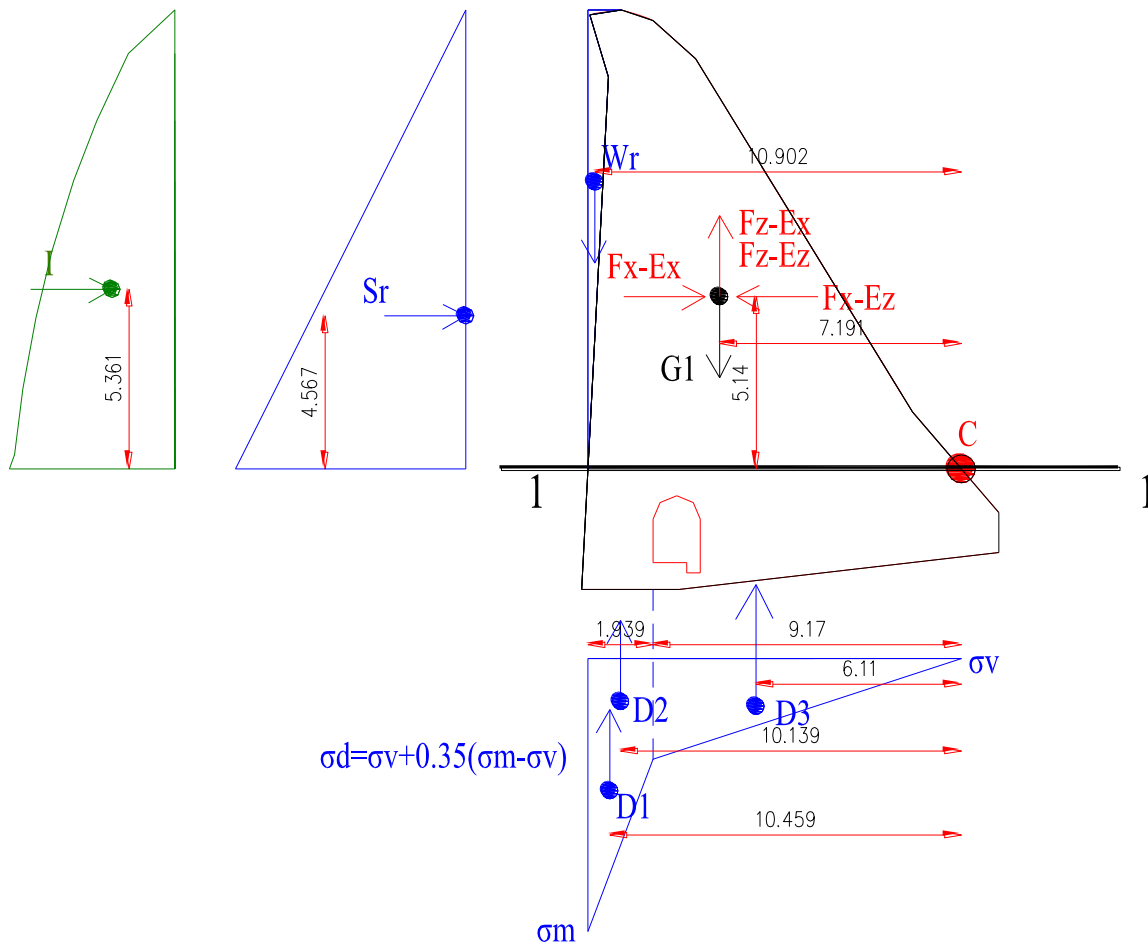
$$V_{\text{instabilizzante}} = 13,2 + 390 - 23 \text{ kNm/m} = 380 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 2058 \text{ kNm/m} / 380 \text{ kNm/m} = 5,41 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

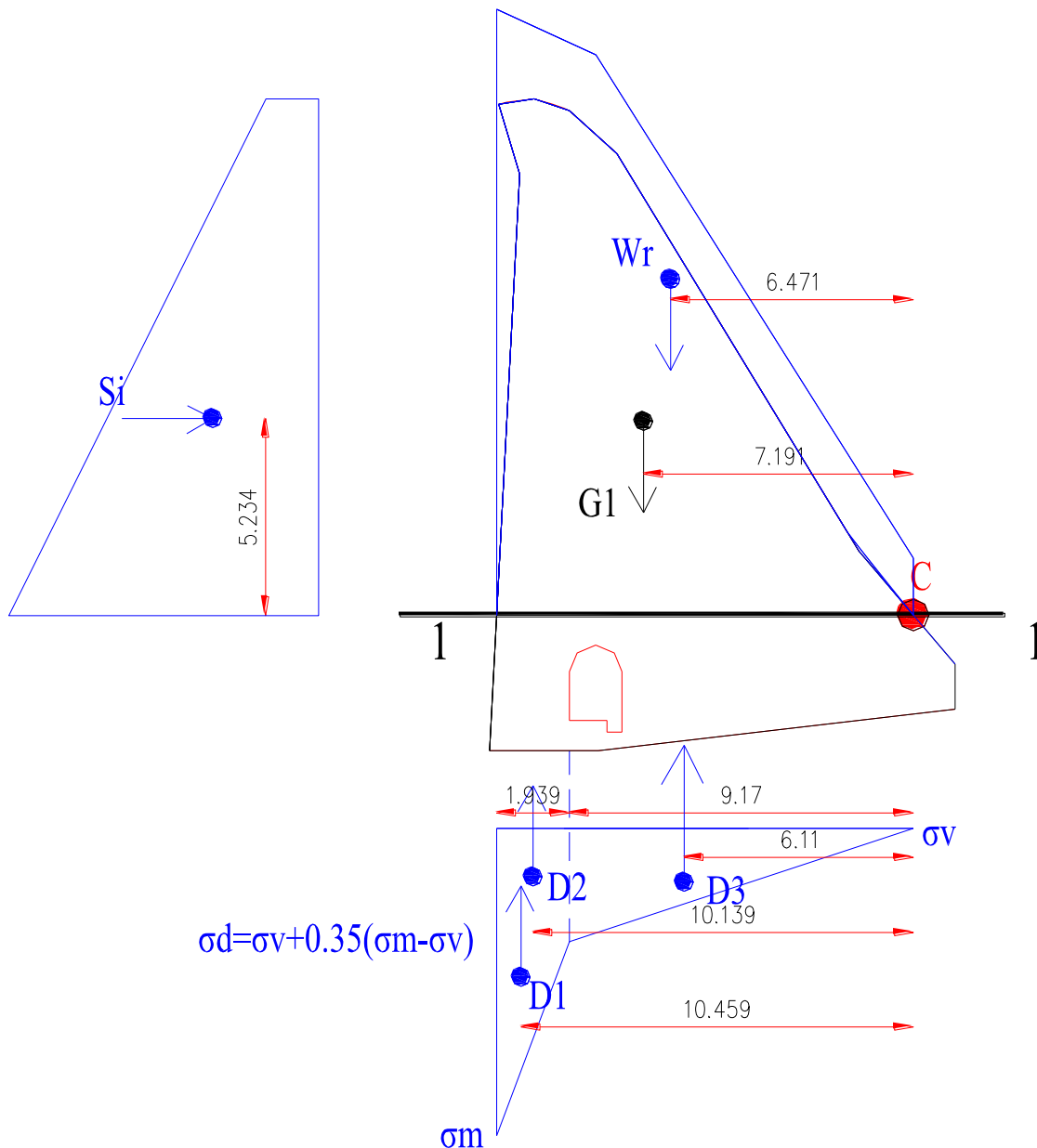


### 3.1.2 AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 1-1

Le verifiche sono condotte su una striscia di diga appesantita di larghezza 1 m:



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massima regolazione per le verifiche in corrispondenza della sezione 1-1



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massimo invaso (Combinazione eccezionale) per le verifiche in corrispondenza della sezione 1-1

Di seguito si riportano i carichi messi in conto:

Peso proprio

Il peso proprio della sezione trascinabile presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{cls,esist} = 84,5 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 2004 \text{ kN/m (peso diga esistente)}$$

$$b_{G1} = 7,191 \text{ m (braccio orizzontale peso diga esistente rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Gtot} = G_1 \times b_{G1} = 2004 \text{ kN/m} \times 7,191 \text{ m} = 14410 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione

$H_{\max.\text{reg}} = 13,7 \text{ m}$  (livello acqua massima regolazione)

$p_{\max} (H=13,7 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\max.\text{reg}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 13,7 \text{ m} = 137 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua)

$S_r = (p_{\max} \times H_{\max.\text{reg}})/2 = (137 \text{ kN/m}^2 \times 13,7 \text{ m})/2 = 938,5 \text{ kN/m}$  (spinta orizzontale)

$W_r = (A_r \times \rho_w) = 4,3 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 43 \text{ kN/m}$  (peso acqua)

$b_{w_r} = 10,902 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{s_r} = 4,567 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{w_r} = W_r \times b_{w_r} = 43 \text{ kN/m} \times 10,902 \text{ m} = 469 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{s_r} = S_r \times h_{s_r} = 938,5 \text{ kN/m} \times 4,567 \text{ m} = 4286 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

### Spinta acqua max invaso

$H_{\max.\text{inv}} = 16,5 \text{ m}$  (livello acqua massimo invaso)

$p_{\max} (H=16,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\max.\text{inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 16,5 \text{ m} = 165 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua)

$p_{\min} (H=2,8 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\max.\text{inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 2,8 \text{ m} = 28 \text{ kN/m}^2$  (pressione minima sommità)

$S_i = (p_{\max} + p_{\min}) \times 13,7 \text{ m} / 2 = (165 + 28) \text{ kN/m}^2 \times 13,7 \text{ m} / 2 = 1322 \text{ kN/m}$  (spinta orizzontale)

$W_r = (A_i \times \rho_w) = 25,6 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 256 \text{ kN/m}$  (peso acqua)

$b_{w_i} = 6,471 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{s_i} = 5,234 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{w_i} = W_r \times b_{w_r} = 256 \text{ kN/m} \times 6,471 \text{ m} = 1656 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{s_i} = S_i \times h_{s_i} = 1322 \text{ kN/m} \times 5,234 \text{ m} = 6919 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

### Sottopressioni

Nel calcolo delle sottopressioni per la sezione 1-1 si considera un livello idrostatico a valle nullo (sezione in elevazione).

$H_{\max.\text{reg}} = 13,7 \text{ m}$  (livello acqua massima regolazione)

$\sigma_m (H=13,7 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\max.\text{reg}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 13,7 \text{ m} = 137 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua)

$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$  (livello max regolazione)

$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (137 - 0 \text{ kN/m}^2) = 48 \text{ kN/m}^2$  (pressione dreno)

$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,939 \text{ m}) / 2 = (137 \text{ kN/m}^2 - 48 \text{ kN/m}^2) \times (1,939 \text{ m}) / 2 = 86 \text{ kN/m}$

$D2 = (\sigma_d) \times (1,939 \text{ m}) = (48 \text{ kN/m}^2) \times (1,939 \text{ m}) = 93 \text{ kN/m}$

$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (9,17 \text{ m}) / 2 = (48 - 0 \text{ kN/m}^2) \times (9,17 \text{ m}) / 2 = 220 \text{ kN/m}$

$D = D1 + D2 + D3 = 86 + 93 + 220 = 399 \text{ kN/m}$  (livello max. regolazione)

$$b_{D1} = 10,459 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 10,139 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 6,11 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 86 \text{ kN/m} \times 10,459 \text{ m} = 899 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 93 \text{ kN/m} \times 10,139 \text{ m} = 943 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 220 \text{ kN/m} \times 6,11 \text{ m} = 1344 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 899 + 943 + 1344 = 3186 \text{ kNm/m (momento instabilizzante con livello massima regolazione)}$$

$$H_{\text{max.inv}} = 16,5 \text{ m (livello acqua massimo invaso)}$$

$$p_{\text{max}} (H=16,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 16,5 \text{ m} = 165 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua)}$$

$$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (165 - 0 \text{ kN/m}^2) = 58,0 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,939 \text{ m}) / 2 = (165 \text{ kN/m}^2 - 58,0 \text{ kN/m}^2) \times (1,939 \text{ m}) / 2 = 104 \text{ kN/m}$$

$$D2 = (\sigma_d) \times (1,939 \text{ m}) = (58 \text{ kN/m}^2) \times (1,939 \text{ m}) = 112 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (9,17 \text{ m}) / 2 = (58,0 - 0,0 \text{ kN/m}^2) \times (9,17 \text{ m}) / 2 = 266 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 = 104 + 112 + 266 = 482 \text{ kN/m (livello max. invaso)}$$

$$b_{D1} = 10,459 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 10,139 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 6,11 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 104 \text{ kN/m} \times 10,459 \text{ m} = 1088 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 112 \text{ kN/m} \times 10,139 \text{ m} = 1136 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 266 \text{ kN/m} \times 6,11 \text{ m} = 1625 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 1088 + 1136 + 1625 = 3849 \text{ kNm/m (momento instabilizzante con livello massimo invaso)}$$

### Sisma $E_x$ , SLC, Monte-valle

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLC (combinazione con carico sismico massimo).

$$F_{x-Ex} = 333 \text{ kN/m (direzione Monte-Valle)}$$

$$F_{z-Ex} = 96 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ex} = 7,191 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ex} = 5,14 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Fz-Ex} = F_{z-Ex} \times b_{Fz-Ex} = 96 \text{ kN/m} \times 7,191 \text{ m} = 690 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Fx-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{Fx-Ex} = 333 \text{ kN/m} \times 5,14 \text{ m} = 1712 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Ex} = M_{Fz-Ex} + M_{Fx-Ex} = 690 + 1712 \text{ kNm/m} = 2402 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_x$ , SLV, Monte-valle

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLV:

$$F_{x-Ex} = 268 \text{ kN/m (direzione Monte-Valle)}$$

$$F_{z-Ex} = 77 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ex} = 7,191 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ex} = 5,14 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Fz-Ex} = F_{z-Ex} \times b_{Fz-Ex} = 77 \text{ kN/m} \times 7,191 \text{ m} = 554 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Fx-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{Fx-Ex} = 268 \text{ kN/m} \times 5,14 \text{ m} = 1378 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Ex} = M_{Fz-Ex} + M_{Fx-Ex} = 554 + 1378 \text{ kNm/m} = 1932 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_z$ , SLC, basso-alto

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLC (combinazione con carico sismico massimo).

$$F_{x-Ez} = 74 \text{ kN/m (direzione Valle- Monte)}$$

$$F_{z-Ez} = 189 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ez} = 7,191 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ez} = 5,14 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$MFz-Ez = Fz-Ez \times b_{Fz-Ez} = 189 \text{ kN/m} \times 7,191 \text{ m} = 1359 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$MFx-Ez = Fx-Ez \times h_{Fx-Ez} = 74 \text{ kN/m} \times 5,14 \text{ m} = 380 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$MEz = MFz-Ez - MFx-Ez = 1359 - 380 \text{ kNm/m} = 979 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_z$ , SLV, basso-alto

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLV:

$$F_{x-Ez} = 54 \text{ kN/m (direzione Valle- Monte)}$$

$$F_{z-Ez} = 137 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ex} = 7,191 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ex} = 5,14 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$MF_{z-Ez} = F_{z-Ez} \times b_{Fz-Ex} = 137 \text{ kN/m} \times 7,191 \text{ m} = 985 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$MF_{x-Ez} = F_{x-Ez} \times h_{Fx-Ex} = 54 \text{ kN/m} \times 5,14 \text{ m} = 278 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$ME_z = MF_{z-Ez} - MF_{x-Ez} = 985 - 278 \text{ kNm/m} = 707 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Azioni inerziali SLC

$$I = 98 \text{ kN/m (Spinta inerziale totale)}$$

$$h_I = 5,361 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$MI = I \times h_I = 98 \text{ kNm/m} \times 5,361 \text{ m} = 525 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Azioni inerziali SLV

$$I = 77 \text{ kN/m (Spinta inerziale totale)}$$

$$h_I = 5,361 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$MI = I \times h_I = 77 \text{ kNm/m} \times 5,361 \text{ m} = 413 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

### 3.1.2.1 COMBINAZIONE FONDAMENTALE SLU ( $1 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3$ )

#### Peso proprio $\times 1$ :

$$M_{Gtot} = 14410 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 2004 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

#### Spinta acqua max regolazione $\times 1,5$

$$M_{Wr} = (469 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 704 \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{Sr} = (4286 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 6429 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = (43 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 65 \text{ (stabilizzante)}$$

$$S_r = (938,5 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 1408 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Sottopressioni $\times 1,5$

$$M_D = (3186 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 4779 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = (399 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 599 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Verifica ribaltamento

$$M_{stabilizzante} = 14410 + 704 \text{ kNm/m} = 15114 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$M_{\text{instabilizzante}} = 6429 + 4779 \text{ kNm/m} = 11208 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 15114 \text{ kNm/m} / 11208 \text{ kNm/m} = 1,35 > 1$  (verifica positiva)

### Verifica traslazione

$V_{\text{stabilizzante}} = (2004 + 65 - 599 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1103 \text{ kNm/m}$  (stabilizzante)

$V_{\text{instabilizzante}} = 1408 \text{ kNm/m}$  (instabilizzante)

$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1103 \text{ kNm/m} / 1408 \text{ kNm/m} = 0,78 > 1$  (verifica negativa)

### 3.1.2.2 COMBINAZIONE ECCEZIONALE SLU ( $1 \times G1 + 1 \times A + 1 \times G3$ )

#### Peso proprio $\times 1$

$M_{\text{Gtot}} = 14410 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$G_{\text{tot}} = 2004 \text{ kN/m}$  (stabilizzante)

#### Spinta acqua max invaso $\times 1$

$M_{\text{Wi}} = 1656 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{\text{Si}} = 6919 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$W_i = 256 \text{ kN/m}$  (stabilizzante)

$S_i = 1322 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

#### Sottopressioni $\times 1$

$M_{\text{D}} = 3849 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$D = 482 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

### Verifica ribaltamento

$M_{\text{stabilizzante}} = 14410 + 1656 \text{ kNm/m} = 16066 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{\text{instabilizzante}} = 6919 + 3849 \text{ kNm/m} = 10768 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 16066 \text{ kNm/m} / 10768 \text{ kNm/m} = 1,49 > 1$  (verifica positiva)

### Verifica traslazione

$V_{\text{stabilizzante}} = (2004 + 256 - 482 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1334 \text{ kNm/m}$  (stabilizzante)

$V_{\text{instabilizzante}} = 1322 \text{ kNm/m}$  (instabilizzante)

$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1334 \text{ kNm/m} / 1322 \text{ kNm/m} = 1,01 > 1$  (verifica positiva)

3.1.2.3 **COMBINAZIONE SISMICA SLC** ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slc-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,slc-Basso/Alto} + I_{x,slc}$ )

### 3.1.2.3.1 Serbatoio pieno

Peso proprio  $\times 1$

$M_{Gtot} = 14410$  kNm/m (momento stabilizzante)

$G_{tot} = 2004$  kN/m (stabilizzante)

Spinta acqua max regolazione  $\times 1$

$M_{Wr} = 469$  kNm/m (momento stabilizzante)

$M_{Sr} = 4286$  kNm/m (momento instabilizzante)

$Wr = 43$  kN/m (stabilizzante)

$Sr = 938,5$  kN /m (instabilizzante)

Sottopressioni  $\times 1$

$M_D = 3186$  kNm/m (momento instabilizzante)

$D = 399$  kN/m (instabilizzante)

Sisma  $E_{x,slc}$  (Monte-Valle)  $\times 1$

$M_{E_{x,slc, Monte-valle}} = 2402$  kNm/m (momento instabilizzante)

$F_{x-E_{x,slc, monte-valle}} = 333$  kN/m (instabilizzante)

$F_{z-E_{x,slc, basso-alto}} = 96$  kN/m (instabilizzante)

Sisma  $E_{z,slc}$  (Basso-Alto)  $\times 0,3$

$M_{Ez} = (979$  kNm/m)  $\times 0,3 = 294$  (momento instabilizzante)

$F_{x-Ez,slc, valle-monte} = (74$  kN/m  $\times 0,3) = 22$  kN/m (stabilizzante)

$F_{z-Ez,slc, basso-alto} = (189$  kN/m  $\times 0,3) = 57$  kN/m (instabilizzante)

Azioni inerziali,slc  $\times 1$

$M_I = 413$  kNm/m (momento instabilizzante)

$I_{x,slc, monte-valle} = 77$  kN/m (instabilizzante)

### Verifica ribaltamento

$M_{stabilizzante} = 14410 + 469$  kNm/m = 14879 kNm/m (momento stabilizzante)

$M_{instabilizzante} = 4286 + 3186 + 2402 + 294 + 413 = 10581$  kNm/m (momento instabilizzante)

$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 14879$  kNm/m / 10581 kNm/m = 1,41 > 1 (verifica positiva)



**Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (2004 + 43 - 399 - 96 - 57) \text{ kNm/m} \times 0,75 = 1121 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 938,5 + 333 - 22 + 77 \text{ kNm/m} = 1327 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1121 \text{ kNm/m} / 1327 \text{ kNm/m} = 0,84 < 1 \text{ (verifica negativa)}$$

**3.1.2.3.2 Serbatoio vuoto****Peso proprio × 1**

$$M_{\text{Gtot}} = 14410 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 2004 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

**Sisma Ex,slc (Monte-Valle) × 1**

$$M_{\text{Ex,slc,Monte-valle}} = 2402 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{X-Ex,slc,monte-valle}} = 333 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{\text{Z-Ex,slc,basso-alto}} = 96 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Sisma Ez,slc (Basso-Alto) × 0,3**

$$M_{\text{Ez}} = (979 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 294 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{X-Ez,slc, valle-monte}} = (74 \text{ kN/m} \times 0,3) = 22 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{\text{Z-Ez,slc,basso-alto}} = (189 \text{ kN/m} \times 0,3) = 57 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 14410 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 2402 + 294 = 2696 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 14410 \text{ kNm/m} / 2696 \text{ kNm/m} = 5,34 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (2004 - 96 - 57 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1388 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 333 - 22 \text{ kNm/m} = 311 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1388 \text{ kNm/m} / 311 \text{ kNm/m} = 4,46 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

$$3.1.2.4 \text{ COMBINAZIONE SISMICA SLV (G1 + G2 + G3 + } E_{x,slv\text{-valle/monte}} + 0,3 \times E_{z,slv\text{-Basso/Alto}} + I_{x,slv})$$

**3.1.2.4.1 Serbatoio pieno****Peso proprio × 1**

$$M_{G_{tot}} = 14410 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 2004 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione × 1

$$M_{W_r} = 469 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_r} = 4286 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 43 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_r = 938,5 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni × 1

$$M_D = 3186 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 399 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ex,slv (Monte-Valle) × 1

$$M_{Ex,slv,Monte-valle} = 1932 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{X-Ex,slv,monte-valle} = 268 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{Z-Ex,slv,basso-alto} = 77 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez,slv (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{Ez,slv,Basso-alto} = (707 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 212 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{X-Ez,slv,valle-monte} = (54 \text{ kN/m} \times 0,3) = 16 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{Z-Ez,slv,basso-alto} = (137 \text{ kN/m} \times 0,3) = 41 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Azioni inerziali,slv × 1

$$M_I = 413 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x,slv,monte-valle} = 77 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{stabilizzante} = 14410 + 469 \text{ kNm/m} = 14879 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 4286 + 3186 + 1932 + 212 + 413 = 10029 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 14879 \text{ kNm/m} / 10029 \text{ kNm/m} = 1,48 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{stabilizzante} = (2004 + 43 - 399 - 77 - 41 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1148 \text{ kNm/m}$$

$$V_{instabilizzante} = 938,5 + 268 - 16 + 77 \text{ kNm/m} = 1268 \text{ kNm/m}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 1148 \text{ kNm/m} / 1268 \text{ kNm/m} = 0,91 < 1 \text{ (verifica negativi)}$$

**3.1.2.4.2 Serbatoio vuoto**

Peso proprio  $\times 1$

$$M_{\text{Gtot}} = 14410 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 2004 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Sisma Ex,slv (Monte-Valle)  $\times 1$

$$M_{\text{Ex,slv,Monte-valle}} = 1932 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{x-Ex,slv,mon-te-valle}} = 268 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{\text{z-Ex,slv,basso-alto}} = 77 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez,slv (Basso-Alto)  $\times 0,3$

$$M_{\text{Ez,slv,Basso-alto}} = (707 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 212 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{x-Ez,slv, valle-monte}} = (54 \text{ kN/m} \times 0,3) = 16 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{\text{z-Ez,slv,basso-alto}} = (137 \text{ kN/m} \times 0,3) = 41 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 14410 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 1932 + 212 = 2144 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 14410 \text{ kNm/m} / 2144 \text{ kNm/m} = 6,72 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

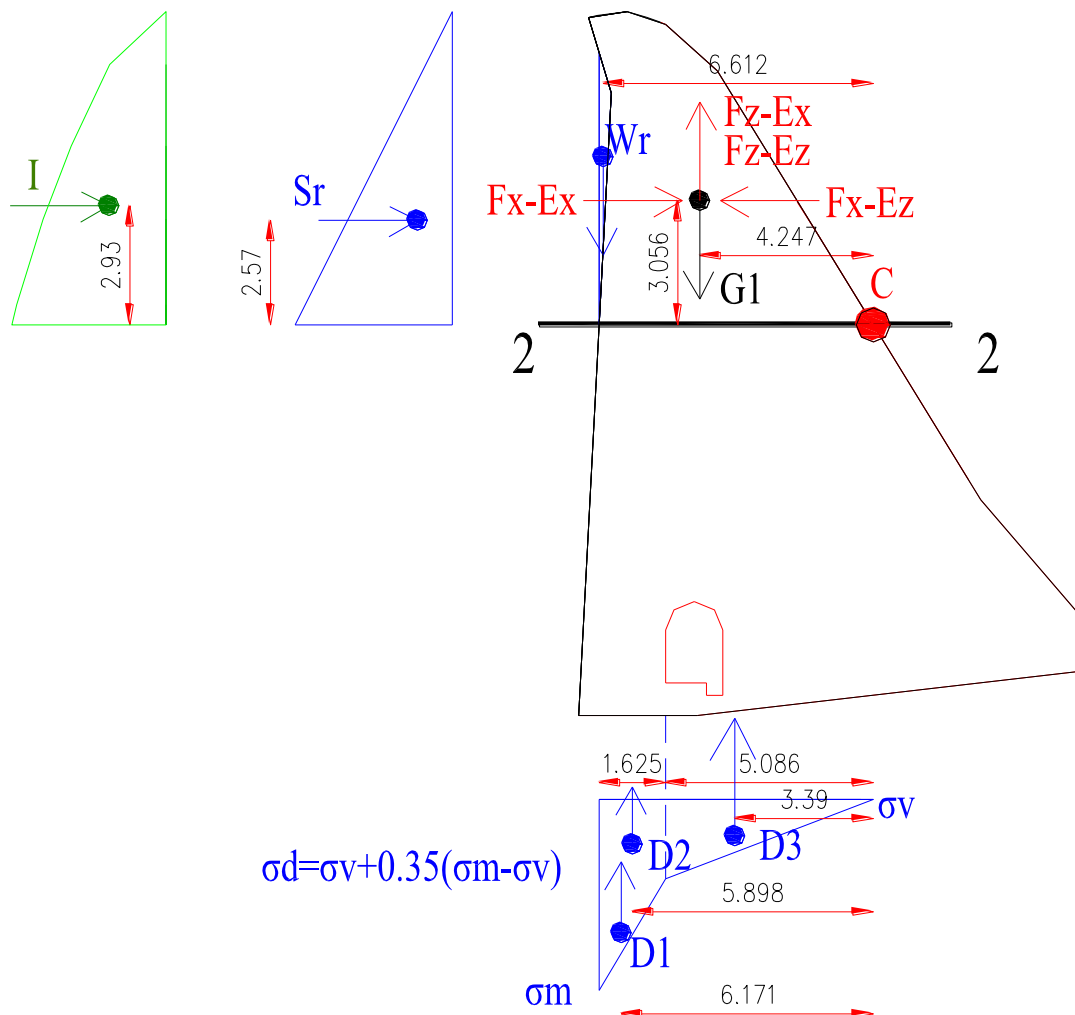
$$V_{\text{stabilizzante}} = (2004 - 77 - 41 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1415 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 268 - 16 \text{ kNm/m} = 252 \text{ kNm/m}$$

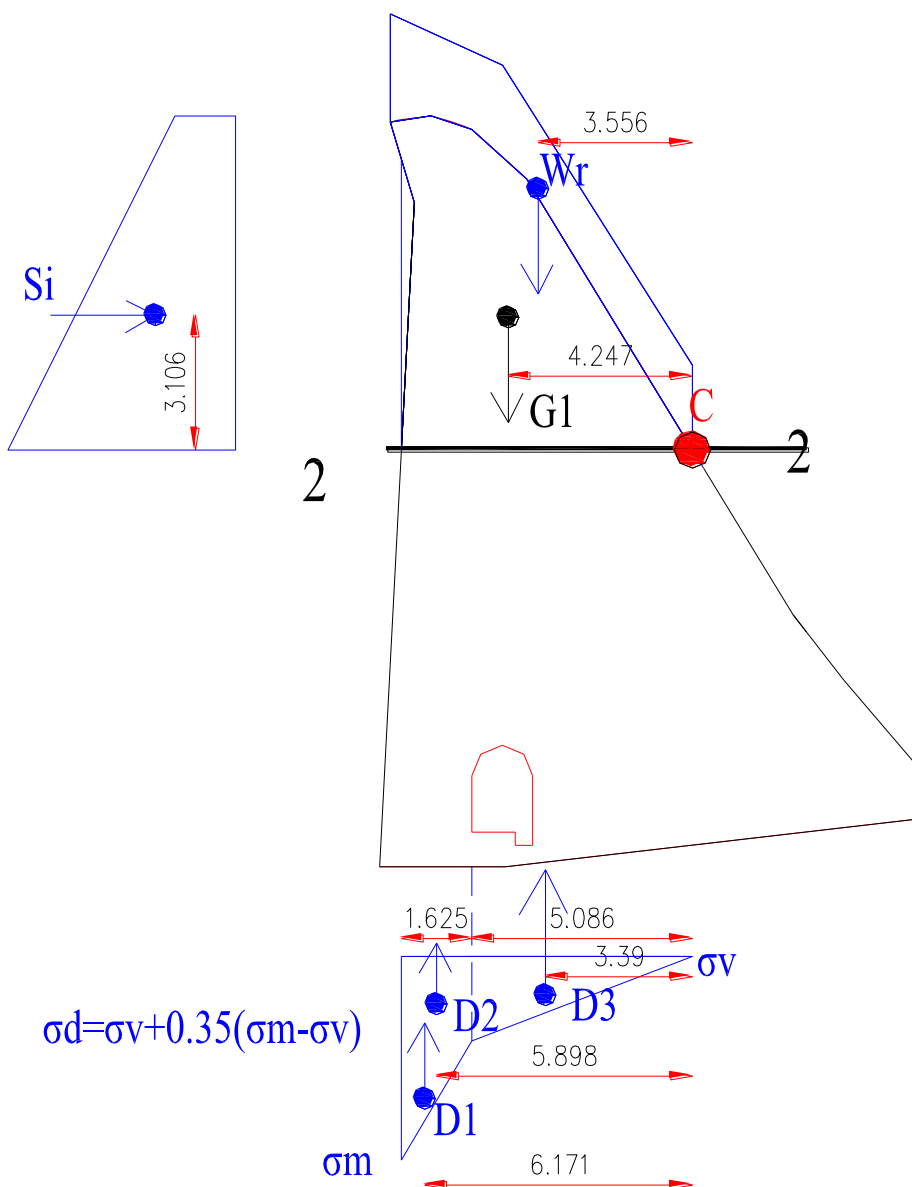
$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1415 \text{ kNm/m} / 252 \text{ kNm/m} = 5,62 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

3.1.3 AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 2-2

Le verifiche sono condotte su una striscia di diga appesantita di larghezza 1 m:



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massima regolazione per le verifiche in corrispondenza della sezione 2-2



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massimo invaso (Combinazione eccezionale) per le verifiche in corrispondenza della sezione 2-2

Di seguito si riportano i carichi messi in conto:

Peso proprio

Il peso proprio della sezione trascinabile presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{cls, esist} = 32 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 759 \text{ kN/m} \text{ (peso diga esistente)}$$

$$b_{G1} = 4,247 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale peso diga esistente rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Gtot} = G_1 \times b_{G1} = 759 \text{ kN/m} \times 4,247 \text{ m} = 3223 \text{ kNm/m} \text{ (momento totale stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione

$$H_{max.reg} = 7,7 \text{ m} \text{ (livello acqua massima regolazione)}$$

$$p_{\max} (H=7,7 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\max.\text{reg}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 7,7 \text{ m} = 77 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua)}$$

$$S_r = (p_{\max} \times H_{\max.\text{reg}}) / 2 = (77 \text{ kN/m}^2 \times 7,7 \text{ m}) / 2 = 297 \text{ kN /m (spinta orizzontale)}$$

$$W_r = (A_r \times \rho_w) = 1,0 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 10 \text{ kN/m (peso acqua)}$$

$$b_{w_r} = 6,612 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{s_r} = 2,57 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{w_r} = W_r \times b_{w_r} = 10 \text{ kN/m} \times 6,612 \text{ m} = 66 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{s_r} = S_r \times h_{s_r} = 297 \text{ kN/m} \times 2,57 \text{ m} = 763 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

### Spinta acqua max invaso

$$H_{\max.\text{inv}} = 10,5 \text{ m (livello acqua massimo invaso)}$$

$$p_{\max} (H=10,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\max.\text{inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 10,5 \text{ m} = 105 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua)}$$

$$p_{\min} (H=2,8 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\max.\text{inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 2,8 \text{ m} = 28 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione minima sommità)}$$

$$S_i = (p_{\max} + p_{\min}) \times 7,7 \text{ m} / 2 = (105 + 28) \text{ kN/m}^2 \times 7,7 \text{ m} / 2 = 512 \text{ kN /m (spinta orizzontale)}$$

$$W_r = (A_i \times \rho_w) = 14,3 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 143 \text{ kN/m (peso acqua)}$$

$$b_{w_i} = 3,556 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{s_i} = 3,106 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{w_i} = W_r \times b_{w_r} = 143 \text{ kN/m} \times 3,556 \text{ m} = 509 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{s_i} = S_i \times h_{s_i} = 512 \text{ kN/m} \times 3,106 \text{ m} = 1590 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

### Sottopressioni

Nel calcolo delle sottopressioni per la sezione 2-2 si considera un livello idrostatico a valle nullo (sezione in elevazione).

$$H_{\max.\text{reg}} = 7,7 \text{ m (livello acqua massima regolazione)}$$

$$\sigma_m (H=7,7 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\max.\text{reg}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 7,7 \text{ m} = 77 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua)}$$

$$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2 \text{ (livello max regolazione)}$$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (77 - 0 \text{ kN/m}^2) = 27 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,625 \text{ m}) / 2 = (77 \text{ kN/m}^2 - 27 \text{ kN/m}^2) \times (1,625 \text{ m}) / 2 = 41 \text{ kN/m}$$

$$D2 = (\sigma_d) \times (1,625 \text{ m}) = (27 \text{ kN/m}^2) \times (1,625 \text{ m}) = 44 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (5,086 \text{ m}) / 2 = (27 - 0 \text{ kN/m}^2) \times (5,086 \text{ m}) / 2 = 69 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 = 41 + 44 + 69 = 154 \text{ kN/m (livello max. regolazione)}$$

$$b_{D1} = 6,171 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 5,898 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 3,39 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 41 \text{ kN/m} \times 6,171 \text{ m} = 253 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 44 \text{ kN/m} \times 5,898 \text{ m} = 260 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 69 \text{ kN/m} \times 3,39 \text{ m} = 234 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 253 + 260 + 234 = 747 \text{ kNm/m (momento instabilizzante con livello massima regolazione)}$$

$$H_{\text{max.inv}} = 10,5 \text{ m (livello acqua massimo invaso)}$$

$$p_{\text{max}} (H=10,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 10,5 \text{ m} = 105 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua)}$$

$$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (105 - 0 \text{ kN/m}^2) = 37,0 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,625 \text{ m}) / 2 = (105 \text{ kN/m}^2 - 37,0 \text{ kN/m}^2) \times (1,625 \text{ m}) / 2 = 55 \text{ kN/m}$$

$$D2 = (\sigma_d) \times (1,625 \text{ m}) = (37 \text{ kN/m}^2) \times (1,625 \text{ m}) = 60 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (5,086 \text{ m}) / 2 = (37,0 - 0,0 \text{ kN/m}^2) \times (5,086 \text{ m}) / 2 = 94 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 = 55 + 60 + 94 = 209 \text{ kN/m (livello max. invaso)}$$

$$b_{D1} = 6,171 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 5,898 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 3,39 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 55 \text{ kN/m} \times 6,171 \text{ m} = 339 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 60 \text{ kN/m} \times 5,898 \text{ m} = 354 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 94 \text{ kN/m} \times 3,39 \text{ m} = 319 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 339 + 354 + 319 = 1012 \text{ kNm/m (momento instabilizzante con livello massimo invaso)}$$

### Sisma $E_{x,SLC, Monte-valle}$

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLC (combinazione con carico sismico massimo).

$$F_{x-Ex} = 126 \text{ kN/m (direzione Monte-Valle)}$$

$$F_{z-Ex} = 36 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ex} = 4,247 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ex} = 3,056 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Fz-Ex} = F_{z-Ex} \times b_{Fz-Ex} = 36 \text{ kN/m} \times 4,247 \text{ m} = 153 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Fx-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{Fx-Ex} = 126 \text{ kN/m} \times 3,056 \text{ m} = 385 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Ex} = M_{Fz-Ex} + M_{Fx-Ex} = 153 + 385 \text{ kNm/m} = 538 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_x$ , SLV, Monte-valle

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLV:

$$F_{x-Ex} = 101 \text{ kN/m (direzione Monte-Valle)}$$

$$F_{z-Ex} = 29 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ex} = 4,247 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ex} = 3,056 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Fz-Ex} = F_{z-Ex} \times b_{Fz-Ex} = 29 \text{ kN/m} \times 4,247 \text{ m} = 123 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Fx-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{Fx-Ex} = 101 \text{ kN/m} \times 3,056 \text{ m} = 309 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Ex} = M_{Fz-Ex} + M_{Fx-Ex} = 123 + 309 \text{ kNm/m} = 432 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_z$ , SLC, basso-alto

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLC (combinazione con carico sismico massimo).

$$F_{x-Ez} = 28 \text{ kN/m (direzione Valle- Monte)}$$

$$F_{z-Ez} = 72 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ex} = 4,247 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ex} = 3,056 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$MFz-Ez = Fz-Ez \times bFz-Ez = 72 \text{ kN/m} \times 4,247 \text{ m} = 306 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$MFx-Ez = Fx-Ez \times hFx-Ez = 28 \text{ kN/m} \times 3,056 \text{ m} = 86 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$MEz = MFz-Ez - MFx-Ez = 306 - 86 \text{ kNm/m} = 220 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_z$ , SLV, basso-alto

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLV:

$$F_{x-Ez} = 20 \text{ kN/m (direzione Valle- Monte)}$$

$$F_{z-Ez} = 52 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ex} = 4,247 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$



$h_{F_x-E_x} = 3,056 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$MF_{z-E_z} = F_{z-E_z} \times b_{F_{z-E_z}} = 52 \text{ kN/m} \times 4,247 \text{ m} = 221 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$MF_{x-E_x} = F_{x-E_x} \times h_{F_{x-E_x}} = 20 \text{ kN/m} \times 3,056 \text{ m} = 61 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$ME_z = MF_{z-E_z} - MF_{x-E_x} = 221 - 61 \text{ kNm/m} = 160 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

#### Azioni inerziali SLC

$I = 41 \text{ kN/m}$  (Spinta inerziale totale)

$h_I = 2,93 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$MI = I \times h_I = 41 \text{ kNm/m} \times 2,93 \text{ m} = 120 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

#### Azioni inerziali SLV

$I = 32 \text{ kN/m}$  (Spinta inerziale totale)

$h_I = 2,93 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$MI = I \times h_I = 32 \text{ kNm/m} \times 2,93 \text{ m} = 94 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

**3.1.3.1 COMBINAZIONE FONDAMENTALE SLU (1×G1 + 1,5×G2 + 1,5×G3 )**Peso proprio ×1 :

$$M_{G_{tot}} = 3223 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 759 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione × 1,5

$$M_{W_r} = (66 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 99 \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_r} = (763 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 1145 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = (10 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 15 \text{ (stabilizzante)}$$

$$S_r = (297 \text{ kN /m}) \times 1,5 = 446 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni × 1,5

$$M_D = (747 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 1121 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = (154 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 231 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{stabilizzante} = 3223 + 99 \text{ kNm/m} = 3322 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 1145 + 1121 \text{ kNm/m} = 2266 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 3322 \text{ kNm/m} / 2266 \text{ kNm/m} = 1,47 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{stabilizzante} = (759 + 15 - 231 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 407 \text{ kNm/m (stabilizzante)}$$

$$V_{instabilizzante} = 446 \text{ kNm/m (instabilizzante)}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 407 \text{ kNm/m} / 446 \text{ kNm/m} = 0,91 < 1 \text{ (verifica negativa)}$$

**3.1.3.2 COMBINAZIONE ECCEZIONALE SLU (1×G1 + 1×A + 1×G3 )**Peso proprio ×1

$$M_{G_{tot}} = 3223 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 759 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max invaso × 1

$$M_{W_i} = 509 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_i} = 1590 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$W_i = 143 \text{ kN/m}$  (stabilizzante)

$S_i = 512 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

Sottopressioni  $\times 1$

$M_D = 1012 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$D = 209 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

### Verifica ribaltamento

$M_{\text{stabilizzante}} = 3223 + 509 \text{ kNm/m} = 3732 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{\text{instabilizzante}} = 1590 + 1012 \text{ kNm/m} = 2602 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 3732 \text{ kNm/m} / 2602 \text{ kNm/m} = 1,43 > 1$  (verifica positiva)

### Verifica traslazione

$V_{\text{stabilizzante}} = (759 + 143 - 209 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 520 \text{ kNm/m}$  (stabilizzante)

$V_{\text{instabilizzante}} = 512 \text{ kNm/m}$  (instabilizzante)

$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 520 \text{ kNm/m} / 512 \text{ kNm/m} = 1,02 > 1$  (verifica positiva)

3.1.3.3 *COMBINAZIONE SISMICA SLC* ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slc\text{-valle/monte}} + 0,3 \times E_{z,slc\text{-Basso/Alto}} + I_{x,slc}$ )

#### 3.1.3.3.1 Serbatoio pieno

Peso proprio  $\times 1$

$M_{G_{\text{tot}}} = 3223 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$G_{\text{tot}} = 759 \text{ kN/m}$  (stabilizzante)

Spinta acqua max regolazione  $\times 1$

$M_{W_r} = 66 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{S_r} = 763 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$W_r = 10 \text{ kN/m}$  (stabilizzante)

$S_r = 297 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

Sottopressioni  $\times 1$

$M_D = 747 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$D = 154 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

Sisma  $E_{x,slc}$  (Monte-Valle)  $\times 1$

$$M_{Ex,slc, Monte-valle} = 538 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex, slc, monte-valle} = 126 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex, slc, basso-alto} = 36 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$\underline{\text{Sisma Ez,slc (Basso-Alto)} \times 0,3}$$

$$M_{Ez} = (220 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 66 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez, slc, valle-monte} = (28 \text{ kN/m} \times 0,3) = 8 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez, slc, basso-alto} = (72 \text{ kN/m} \times 0,3) = 22 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$\underline{\text{Azioni inerziali,slc} \times 1}$$

$$M_I = 120 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x,slc, monte-valle} = 41 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

### Verifica ribaltamento

$$M_{stabilizzante} = 3223 + 66 \text{ kNm/m} = 3289 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 763 + 747 + 538 + 66 + 120 = 2234 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 3289 \text{ kNm/m} / 2234 \text{ kNm/m} = 1,47 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### Verifica traslazione

$$V_{stabilizzante} = (759 + 10 - 154 - 36 - 22) \text{ kNm/m} \times 0,75 = 418 \text{ kNm/m}$$

$$V_{instabilizzante} = 297 + 126 - 8 + 41 \text{ kNm/m} = 456 \text{ kNm/m}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 418 \text{ kNm/m} / 456 \text{ kNm/m} = 0,92 < 1 \text{ (verifica negativa)}$$

### 3.1.3.3.2 Serbatoio vuoto

$$\underline{\text{Peso proprio} \times 1}$$

$$M_{Gtot} = 3223 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 759 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$\underline{\text{Sisma Ex,slc (Monte-Valle)} \times 1}$$

$$M_{Ex,slc, Monte-valle} = 538 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex, slc, monte-valle} = 126 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex, slc, basso-alto} = 36 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$\underline{\text{Sisma Ez,slc (Basso-Alto)} \times 0,3}$$

$$M_{Ez} = (220 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 66 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez, slc, valle-monte} = (28 \text{ kN/m} \times 0,3) = 8 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez,slc,basso-alto} = (72\text{kN/m} \times 0,3) = 22 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

### Verifica ribaltamento

$$M_{\text{stabilizzante}} = 3223 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 538 + 66 = 604 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 3223\text{kNm/m} / 604 \text{ kNm/m} = 5,34 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### Verifica traslazione

$$V_{\text{stabilizzante}} = (759 - 36 - 22 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 526 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 126 - 8 \text{ kNm/m} = 118 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 526 \text{ kNm/m} / 118 \text{ kNm/m} = 4,46 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

$$3.1.3.4 \text{ COMBINAZIONE SISMICA SLV } (G1 + G2 + G3 + E_{x,slv-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,slv-Basso/Alto} + I_{x,slv})$$

#### 3.1.3.4.1 Serbatoio pieno

##### Peso proprio $\times 1$

$$M_{\text{Gtot}} = 3223 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 759 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

##### Spinta acqua max regolazione $\times 1$

$$M_{\text{Wr}} = 66 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{Sr}} = 763 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 10 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_r = 297 \text{ kN / m (instabilizzante)}$$

##### Sottopressioni $\times 1$

$$M_{\text{D}} = 747 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 154 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

##### Sisma $E_{x,slv}$ (Monte-Valle) $\times 1$

$$M_{\text{Ex,slv,Monte-valle}} = 432 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex,slv,monte-valle} = 101 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex,slv,basso-alto} = 29 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

##### Sisma $E_{z,slv}$ (Basso-Alto) $\times 0,3$

$$M_{Ez,slv,Basso-alto} = (160 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 48 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez,slv, valle-monte} = (20 \text{ kN/m} \times 0,3) = 6 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez,slv,basso-alto} = (52 \text{ kN/m} \times 0,3) = 16 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Azioni inerziali,slv × 1

$$M_I = 94 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x,slv,monte-valle} = 32 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Verifica ribaltamento

$$M_{stabilizzante} = 3223 + 66 \text{ kNm/m} = 3289 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 763 + 747 + 432 + 48 + 94 = 2084 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 3289 \text{ kNm/m} / 2084 \text{ kNm/m} = 1,58 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

#### Verifica traslazione

$$V_{stabilizzante} = (759 + 10 - 154 - 29 - 16 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 428 \text{ kNm/m}$$

$$V_{instabilizzante} = 297 + 101 - 6 + 32 \text{ kNm/m} = 424 \text{ kNm/m}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 428 \text{ kNm/m} / 424 \text{ kNm/m} = 1,01 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### 3.1.3.4.2 Serbatoio vuoto

#### Peso proprio × 1

$$M_{Gtot} = 3223 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 759 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

#### Sisma Ex,slv (Monte-Valle) × 1

$$M_{Ex,slv,Monte-valle} = 432 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex,slv,monte-valle} = 101 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex,slv,basso-alto} = 29 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Sisma Ez,slv (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{Ez,slv,Basso-alto} = (160 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 48 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez,slv, valle-monte} = (20 \text{ kN/m} \times 0,3) = 6 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez,slv,basso-alto} = (52 \text{ kN/m} \times 0,3) = 16 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Verifica ribaltamento

$$M_{stabilizzante} = 3223 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 432 + 48 = 480 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 3223 \text{ kNm/m} / 480 \text{ kNm/m} = 6,71 > 1$  (verifica positiva)

**Verifica traslazione**

$V_{stabilizzante} = (759 - 29 - 16 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 536 \text{ kNm/m}$

$V_{instabilizzante} = 101 - 6 \text{ kNm/m} = 95 \text{ kNm/m}$

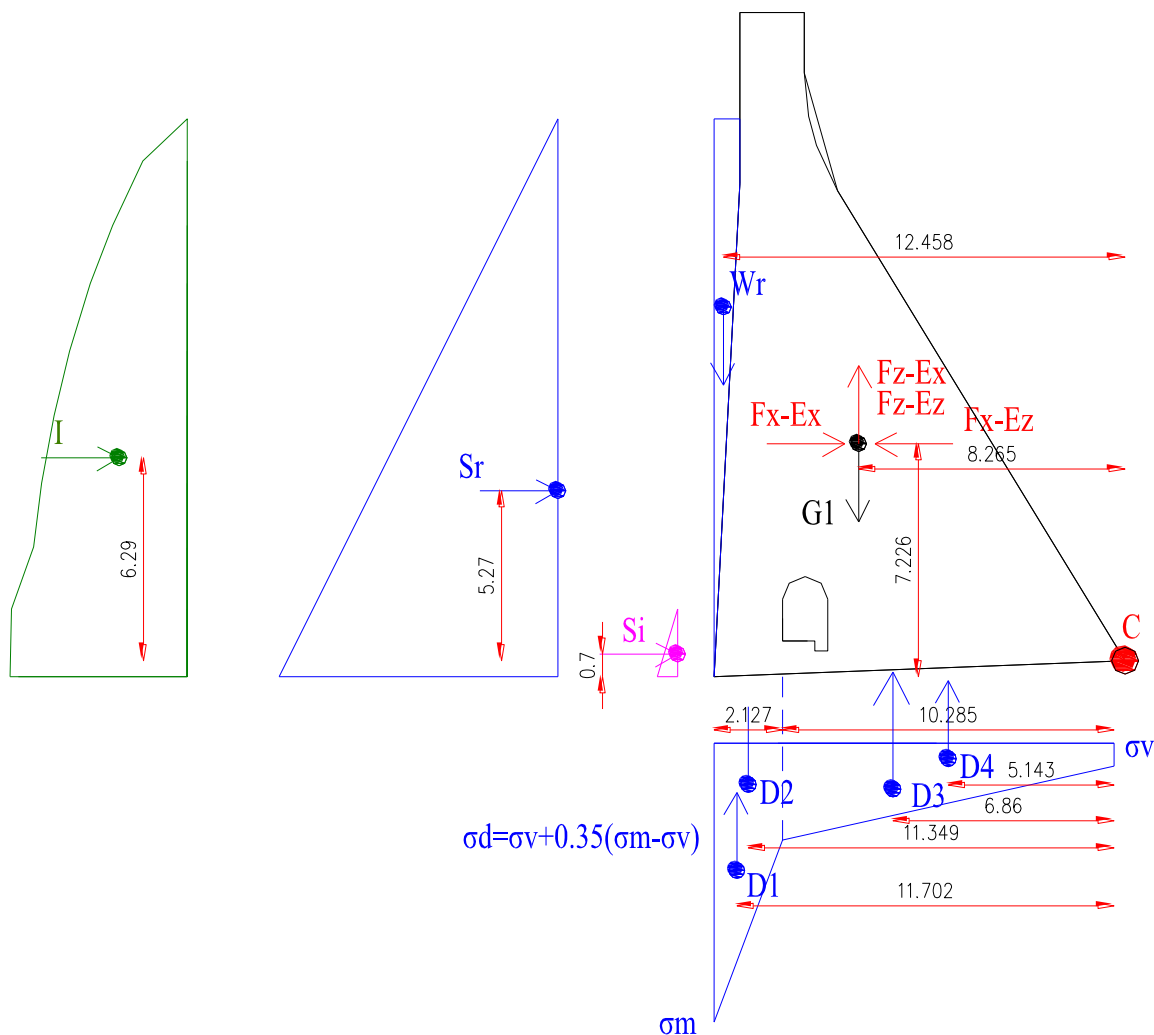
$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 536 \text{ kNm/m} / 95 \text{ kNm/m} = 5,64 > 1$  (verifica positiva)

**4. CONCIO B / SEZIONE EMERGENTE (DIGA ESISTENTE – D.M.26/06/2014)**

**4.1 VERIFICHE A RIBALTAMENTO E TRASLAZIONE DEL CORPO DIGA**

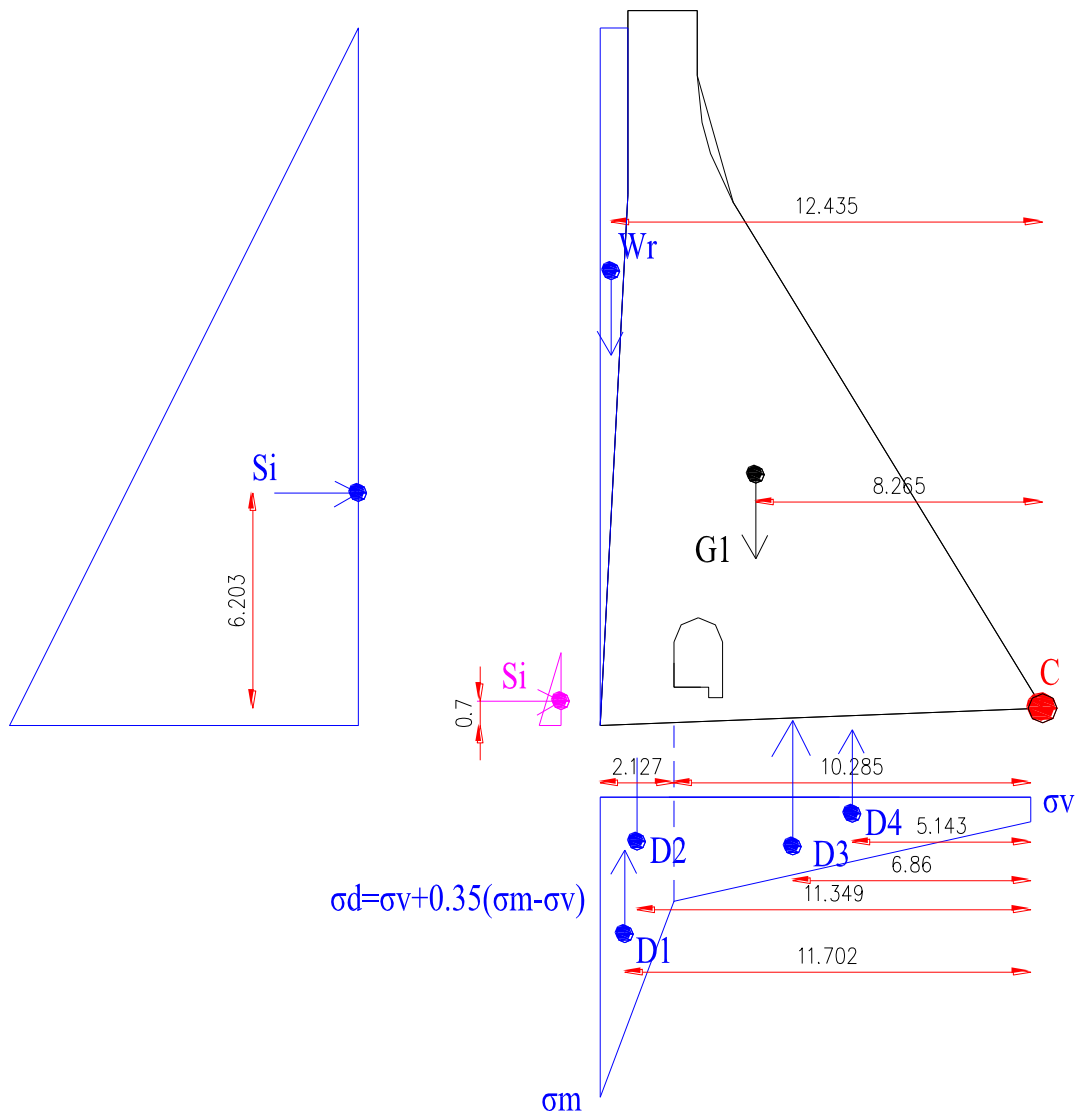
**4.1.1 AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE DI BASE**

Le verifiche sono condotte su una striscia di diga appesantita di larghezza 1 m:



*Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massima regolazione per le verifiche in corrispondenza della sezione di base*





Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massimo invaso (Combinazione eccezionale) per le verifiche in corrispondenza della sezione di base

Di seguito si riportano i carichi messi in conto:

Peso proprio

Il peso proprio della sezione trascinabile presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{cls, esist} = 130,5 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 3095 \text{ kN/m} \text{ (peso diga esistente)}$$

$$b_{G1} = 8,265 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale peso diga esistente rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Gtot} = G_1 \times b_{G1} = 3095 \text{ kN/m} \times 8,265 \text{ m} = 25580 \text{ kNm/m} \text{ (momento totale stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione

$$H_{max.reg} = 17,3 \text{ m} \text{ (livello acqua massima regolazione)}$$

$$p_{max} (H=17,3 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max.reg} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 17,3 \text{ m} = 173 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua alla base)}$$

$$S_r = (p_{\max} \times H_{\max.\text{reg}})/2 = (173 \text{ kN/m}^2 \times 17,3 \text{ m})/2 = 1496,5 \text{ kN/m} \text{ (spinta orizzontale)}$$

$$W_r = (A_r \times \rho_w) = 7,7 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 77 \text{ kN/m} \text{ (peso acqua)}$$

$$b_{w_r} = 12,458 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{s_r} = 5,767 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{w_r} = W_r \times b_{w_r} = 77 \text{ kN/m} \times 12,458 \text{ m} = 959 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{s_r} = S_r \times h_{s_r} = 1496,5 \text{ kN/m} \times 5,767 \text{ m} = 8630 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

### Spinta acqua max invaso

$$H_{\max.\text{inv}} = 20,1 \text{ m} \text{ (livello acqua massimo invaso)}$$

$$p_{\max} (H=20,1 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\max.\text{inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 20,1 \text{ m} = 201 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua alla base)}$$

$$p_{\min} (H=2,8 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\max.\text{inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 2,8 \text{ m} = 28 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione minima sommità)}$$

$$S_i = (p_{\max} + p_{\min}) \times 17,3 \text{ m} / 2 = (201 + 28) \text{ kN/m}^2 \times 17,3 \text{ m} / 2 = 1981 \text{ kN/m} \text{ (spinta orizzontale)}$$

$$W_i = (A_i \times \rho_w) = 9,9 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 99 \text{ kN/m} \text{ (peso acqua)}$$

$$b_{w_i} = 12,435 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{s_i} = 6,471 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{w_i} = W_i \times b_{w_i} = 99 \text{ kN/m} \times 12,435 \text{ m} = 1231 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{s_i} = S_i \times h_{s_i} = 1981 \text{ kN/m} \times 6,471 \text{ m} = 12819 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

### Spinta interrimento

$$H_{\max.\text{int}} = 2,1 \text{ m} \text{ (livello interrimento)}$$

$$p_{\max} (H=2,1 \text{ m}) = \rho_f \times H_{\max.\text{int}} = 6 \text{ kN/m}^3 \times 2,1 \text{ m} = 12,6 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione alla base)}$$

$$S_i = (p_{\max} \times H_{\max.\text{int}})/2 = (12,6 \text{ kN/m}^2 \times 2,1 \text{ m})/2 = 13,2 \text{ kN/m} \text{ (spinta orizzontale)}$$

$$h_{s_{w_i}} = 0,7 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{s_i} = S_i \times h_{s_{w_i}} = 13,2 \text{ kN/m} \times 0,7 \text{ m} = 9,24 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

### Sottopressioni

Nel calcolo delle sottopressioni si considera un livello idrostatico a valle pari a 1,3 m. Tale valore corrisponde all'altezza del calcestruzzo dello scivolo nell'ipotesi che si possa generare infiltrazione all'interno della suola in calcestruzzo dello scivolo. L'acqua che tracima dalla diga viene rilasciata in alveo circa 40 m più a valle della diga, pertanto la pressione idrostatica a valle della diga dovrebbe essere a rigore pari a zero, a meno appunto della presenza di possibili infiltrazioni.

$$H_{\max.\text{reg}} = 17,3 \text{ m} \text{ (livello acqua massima regolazione)}$$

$\sigma_m$  (H=17,3 m) =  $\rho_w \times H_{\max.\text{reg}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 17,3 \text{ m} = 173 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua alla base a monte)

$\sigma_v$  (hv=1,3 m) =  $\rho_w \times h_v = 10 \text{ kN/m}^3 \times 1,3 \text{ m} = 13 \text{ kN/m}^2$  (livello max regolazione)

$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 13 + 0,35 \times (173 - 13 \text{ kN/m}^2) = 69 \text{ kN/m}^2$  (pressione dreno)

$D_1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (2,127 \text{ m}) / 2 = (173 \text{ kN/m}^2 - 69 \text{ kN/m}^2) \times (2,127 \text{ m}) / 2 = 111 \text{ kN/m}$

$D_2 = (\sigma_d) \times (2,127 \text{ m}) = (69 \text{ kN/m}^2) \times (2,127 \text{ m}) = 147 \text{ kN/m}$

$D_3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (10,285 \text{ m}) / 2 = (69 - 13 \text{ kN/m}^2) \times (10,285 \text{ m}) / 2 = 288 \text{ kN/m}$

$D_4 = (\sigma_v) \times (10,285 \text{ m}) = (13 \text{ kN/m}^2) \times (10,285 \text{ m}) = 134 \text{ kN/m}$

$D = D_1 + D_2 + D_3 + D_4 = 111 + 147 + 288 + 134 = 680 \text{ kN/m}$  (livello max. regolazione)

$b_{D1} = 11,702 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D2} = 11,349 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D3} = 6,86 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D4} = 5,143 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$M_{D1} = D_1 \times b_{D1} = 111 \text{ kN/m} \times 11,702 \text{ m} = 1299 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D2} = D_2 \times b_{D2} = 147 \text{ kN/m} \times 11,349 \text{ m} = 1668 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D3} = D_3 \times b_{D3} = 288 \text{ kN/m} \times 6,86 \text{ m} = 1976 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D4} = D_4 \times b_{D4} = 134 \text{ kN/m} \times 5,143 \text{ m} = 689 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} + M_{D4} = 1299 + 1668 + 1976 + 689 = 5632 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante con livello massima regolazione)

$H_{\max.\text{inv}} = 20,1 \text{ m}$  (livello acqua massimo invaso)

$p_{\max}$  (H=20,1 m) =  $\rho_w \times H_{\max.\text{inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 20,1 \text{ m} = 201 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua alla base a monte)

$\sigma_v$  (hv=1,3 m) =  $\rho_w \times h_v = 10 \text{ kN/m}^3 \times 1,3 \text{ m} = 13 \text{ kN/m}^2$

$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 13 + 0,35 \times (201 - 13 \text{ kN/m}^2) = 78,8 \text{ kN/m}^2$  (pressione dreno)

$D_1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (2,127 \text{ m}) / 2 = (201 \text{ kN/m}^2 - 78,8 \text{ kN/m}^2) \times (2,127 \text{ m}) / 2 = 130 \text{ kN/m}$

$D_2 = (\sigma_d) \times (2,127 \text{ m}) = (78,8 \text{ kN/m}^2) \times (2,127 \text{ m}) = 168 \text{ kN/m}$

$D_3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (10,285 \text{ m}) / 2 = (78,8 - 13 \text{ kN/m}^2) \times (10,285 \text{ m}) / 2 = 338 \text{ kN/m}$

$D_4 = (\sigma_v) \times (10,285 \text{ m}) = (13 \text{ kN/m}^2) \times (10,285 \text{ m}) = 134 \text{ kN/m}$

$$D = D1 + D2 + D3 + D4 = 130 + 168 + 338 + 134 = 770 \text{ kN/m (livello max. invaso)}$$

$$b_{D1} = 11,702 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 11,349 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 6,86 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D4} = 5,143 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 130 \text{ kN/m} \times 11,702 \text{ m} = 1521 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 168 \text{ kN/m} \times 11,349 \text{ m} = 1907 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 338 \text{ kN/m} \times 6,86 \text{ m} = 2318 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D4} = D4 \times b_{D4} = 134 \text{ kN/m} \times 5,143 \text{ m} = 689 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} + M_{D4} = 1521 + 1907 + 2318 + 689 = 6436 \text{ kNm/m (momento instabilizzante con livello massimo invaso)}$$

#### Sisma $E_{x,SLC, Monte-valle}$

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLC (combinazione con carico sismico massimo).

Per un'azione sismica sollecitante in direzione x (Monte-Valle) nasce oltre che un'azione in direzione x (Monte-Valle), anche una componente sismica in direzione verticale (Basso-Alto) generata dall'inclinazione del piano di fondazione della diga.

$$F_{x-Ex} = 515 \text{ kN/m (direzione Monte-Valle)}$$

$$F_{z-Ex} = 173 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ex} = 8,265 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ex} = 7,226 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Fz-Ex} = F_{z-Ex} \times b_{Fz-Ex} = 173 \text{ kN/m} \times 8,265 \text{ m} = 1430 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Fx-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{Fx-Ex} = 515 \text{ kN/m} \times 7,226 \text{ m} = 3721 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Ex} = M_{Fz-Ex} + M_{Fx-Ex} = 1430 + 3721 \text{ kNm/m} = 5151 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_{x,SLV, Monte-valle}$

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLV:

$$F_{x-Ex} = 414 \text{ kN/m (direzione Monte-Valle)}$$

$$F_{z-Ex} = 139 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ex} = 8,265 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{F_x-E_x} = 7,226 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{F_z-E_x} = F_{z-E_x} \times b_{F_z-E_x} = 414 \text{ kN/m} \times 8,265 \text{ m} = 3422 \text{ kNm/m}$$

$$M_{F_x-E_x} = F_{x-E_x} \times h_{F_x-E_x} = 139 \text{ kN/m} \times 7,226 \text{ m} = 1004 \text{ kNm/m}$$

$$M_{E_x} = M_{F_z-E_x} + M_{F_x-E_x} = 3422 + 1004 \text{ kNm/m} = 4426 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_z$ , SLC.basso-alto

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLC (combinazione con carico sismico massimo).

Per un'azione sismica sollecitante in direzione z (Basso-Alto) nasce oltre che un'azione in direzione z (Basso-Alto), anche una componente sismica in direzione orizzontale (Valle-Monte) generata dall'inclinazione del piano di fondazione della diga.

$$F_{x-E_z} = 121 \text{ kN/m (direzione Valle- Monte)}$$

$$F_{z-E_z} = 300 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{F_z-E_x} = 8,265 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{F_x-E_x} = 7,226 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{F_z-E_z} = F_{z-E_z} \times b_{F_z-E_z} = 300 \text{ kN/m} \times 8,265 \text{ m} = 2480 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{F_x-E_z} = F_{x-E_z} \times h_{F_x-E_z} = 121 \text{ kN/m} \times 7,226 \text{ m} = 874 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{E_z} = M_{F_z-E_z} - M_{F_x-E_z} = 2480 - 874 \text{ kNm/m} = 1606 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_z$ , SLV.basso-alto

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLV:

$$F_{x-E_z} = 88 \text{ kN/m (direzione Valle- Monte)}$$

$$F_{z-E_z} = 218 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{F_z-E_x} = 8,265 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{F_x-E_x} = 7,226 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{F_z-E_z} = F_{z-E_z} \times b_{F_z-E_z} = 218 \text{ kN/m} \times 8,265 \text{ m} = 1802 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{F_x-E_z} = F_{x-E_z} \times h_{F_x-E_z} = 88 \text{ kN/m} \times 7,226 \text{ m} = 636 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{E_z} = M_{F_z-E_z} - M_{F_x-E_z} = 1802 - 636 \text{ kNm/m} = 1166 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Azioni inerziali SLC

$$I = 140 \text{ kN/m (Spinta inerziale totale)}$$

$$h_I = 6,29 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$MI = I \times hI = 140 \text{ kNm/m} \times 6,29 \text{ m} = 881 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

#### Azioni inerziali SLV

$$I = 110 \text{ kN/m} \text{ (Spinta inerziale totale)}$$

$$h_I = 6,29 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$MI = I \times hI = 110 \text{ kNm/m} \times 6,29 \text{ m} = 692 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

#### 4.1.1.1 COMBINAZIONE FONDAMENTALE SLU ( $1 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3$ )

##### Peso proprio $\times 1$ :

$$M_{Gtot} = 25580 \text{ kNm/m} \text{ (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 3095 \text{ kN/m} \text{ (stabilizzante)}$$

##### Spinta acqua max regolazione $\times 1,5$

$$M_{Wr} = (959 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 1438 \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{Sr} = (8630 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 12945 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = (77 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 115 \text{ (stabilizzante)}$$

$$S_r = (1496,5 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 2245 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

##### Spinta interrimento $\times 1,5$

$$M_{Si} = (9,24 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 14 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = (13,2 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 20 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

##### Sottopressioni $\times 1,5$

$$M_D = (5632 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 8448 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$D = (680 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 1020 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

#### Verifica ribaltamento

$$M_{stabilizzante} = 25580 + 1438 \text{ kNm/m} = 27018 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 12945 + 14 + 8448 \text{ kNm/m} = 21407 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 27018 \text{ kNm/m} / 21407 \text{ kNm/m} = 1,26 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

#### Verifica traslazione

$$V_{stabilizzante} = (3095 + 115 - 1020 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1470 \text{ kNm/m} \text{ (stabilizzante)}$$

$$V_{instabilizzante} = 2245 + 20 \text{ kNm/m} = 2265 \text{ kNm/m} \text{ (instabilizzante)}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 1470 \text{ kNm/m} / 2265 \text{ kNm/m} = 0,65 < 1 \text{ (verifica negativa)}$$

**4.1.1.2 COMBINAZIONE ECCEZIONALE SLU ( $1 \times G1 + 1 \times A + 1 \times G3$ )**Peso proprio  $\times 1$ 

$$M_{Gtot} = 25580 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 3095 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max invaso  $\times 1$ 

$$M_{Wi} = 1231 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{Si} = 12819 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_i = 99 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_i = 1981 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Spinta interrimento  $\times 1$ 

$$M_{Si} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni  $\times 1$ 

$$M_D = 6436 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 770 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Verifica ribaltamento

$$M_{stabilizzante} = 25580 + 1231 \text{ kNm/m} = 26811 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 12819 + 9 + 6436 \text{ kNm/m} = 19264 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 26811 \text{ kNm/m} / 19264 \text{ kNm/m} = 1,39 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

Verifica traslazione

$$V_{stabilizzante} = (3095 + 99 - 770 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1818 \text{ kNm/m (stabilizzante)}$$

$$V_{instabilizzante} = 1981 + 13,2 \text{ kNm/m} = 1994 \text{ kNm/m (instabilizzante)}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 1818 \text{ kNm/m} / 1994 \text{ kNm/m} = 0,91 > 1 \text{ (verifica negativa)}$$

**4.1.1.3 COMBINAZIONE SISMICA SLC ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slc-valle/monte} + 0,3 \times E_{z,slc-Basso/Alto} + I_{x,slc}$ )****4.1.1.3.1 Serbatoio pieno**Peso proprio  $\times 1$

$$M_{Gtot} = 25580 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 3095 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione × 1

$$M_{Wr} = 959 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{Sr} = 8630 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 77 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_r = 1496,5 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Spinta interrimento × 1

$$M_{Si} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni × 1

$$M_D = 5632 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 680 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ex,slc (Monte-Valle) × 1

$$M_{Ex,slc, Monte-valle} = 5151 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex, slc, monte-valle} = 515 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex, slc, basso-alto} = 173 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez,slc (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{Ez} = (1606 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 482 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez, slc, valle-monte} = (121 \text{ kN/m} \times 0,3) = 36 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez, slc, basso-alto} = (300 \text{ kN/m} \times 0,3) = 90 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Azioni inerziali,slc × 1

$$M_I = 881 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x, slc, monte-valle} = 140 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{stabilizzante} = 25580 + 959 \text{ kNm/m} = 26539 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 8630 + 9 + 5632 + 5151 + 482 + 881 = 20785 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 26539 \text{ kNm/m} / 20785 \text{ kNm/m} = 1,28 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**



$$V_{\text{stabilizzante}} = (3095 + 77 - 680 - 173 - 90 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1672 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 1496,5 + 13,2 + 515 - 36 + 140 \text{ kNm/m} = 2129 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1672 \text{ kNm/m} / 2129 \text{ kNm/m} = 0,79 < 1 \text{ (verifica negativa)}$$

#### 4.1.1.3.2 Serbatoio vuoto

##### Peso proprio $\times 1$

$$M_{\text{Gtot}} = 25580 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 3095 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

##### Spinta interrimento $\times 1$

$$M_{\text{Si}} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

##### Sisma Ex,slc (Monte-Valle) $\times 1$

$$M_{\text{Ex,slc,Monte-valle}} = 5151 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{X-Ex,slc,monte-valle}} = 515 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{\text{Z-Ex,slc,basso-alto}} = 173 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

##### Sisma Ez,slc (Basso-Alto) $\times 0,3$

$$M_{\text{Ez}} = (1606 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 482 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{X-Ez,slc,valle-monte}} = (121 \text{ kN/m} \times 0,3) = 36 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{\text{Z-Ez,slc,basso-alto}} = (300 \text{ kN/m} \times 0,3) = 90 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

##### Verifica ribaltamento

$$M_{\text{stabilizzante}} = 25580 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 9 + 5151 + 482 = 5642 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 25580 \text{ kNm/m} / 5642 \text{ kNm/m} = 4,53 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

##### Verifica traslazione

$$V_{\text{stabilizzante}} = (3095 - 173 - 90 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 2124 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 13,2 + 515 - 36 \text{ kNm/m} = 492 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 2124 \text{ kNm/m} / 492 \text{ kNm/m} = 4,32 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

$$4.1.1.4 \text{ COMBINAZIONE SISMICA SLV (G1 + G2 + G3 + } E_{x,slv\text{-valle/monte}} + 0,3 \times E_{z,slv\text{-Basso/Alto}} + I_{x,slv})$$

**4.1.1.4.1 Serbatoio pieno**Peso proprio × 1

$$M_{G_{tot}} = 25580 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 3095 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione × 1

$$M_{W_r} = 959 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_r} = 8630 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 77 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_r = 1496,5 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Spinta interrimento × 1

$$M_{S_i} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni × 1

$$M_D = 5632 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 680 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ex,slv (Monte-Valle) × 1

$$M_{E_{x,slv}} = 4426 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex,slv,monte-valle} = 414 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex,slv,basso-alto} = 139 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez,slv (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{E_{z,slv}} = (1166 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 350 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez,slv,valle-monte} = (88 \text{ kN/m} \times 0,3) = 26 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez,slv,basso-alto} = (218 \text{ kN/m} \times 0,3) = 66 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Azioni inerziali,slv × 1

$$M_I = 692 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x,slv,monte-valle} = 110 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{stabilizzante} = 25580 + 959 \text{ kNm/m} = 26539 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 8630 + 9 + 5632 + 4426 + 350 + 692 = 19739 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 26539 \text{ kNm/m} / 19739 \text{ kNm/m} = 1,34 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### Verifica traslazione

$$V_{\text{stabilizzante}} = (3095 + 77 - 680 - 139 - 66 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1715 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 1496,5 + 13,2 + 414 - 26 + 110 \text{ kNm/m} = 2008 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1715 \text{ kNm/m} / 2008 \text{ kNm/m} = 0,85 < 1 \text{ (verifica negativa)}$$

### 4.1.1.4.2 Serbatoio vuoto

#### Peso proprio $\times 1$

$$M_{\text{Gtot}} = 25580 \text{ kNm/m} \text{ (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 3095 \text{ kN/m} \text{ (stabilizzante)}$$

#### Spinta interrimento $\times 1$

$$M_{\text{Si}} = 9,24 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

#### Sisma Ex,slv (Monte-Valle) $\times 1$

$$M_{\text{Ex,slv}} = 4426 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{X-Ex,slv,monte-valle}} = 414 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

$$F_{\text{Z-Ex,slv,basso-alto}} = 139 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

#### Sisma Ez,slv (Basso-Alto) $\times 0,3$

$$M_{\text{Ez,slv}} = (1166 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 350 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{X-Ez,slv,valle-monte}} = (88 \text{ kN/m} \times 0,3) = 26 \text{ kN/m} \text{ (stabilizzante)}$$

$$F_{\text{Z-Ez,slv,basso-alto}} = (218 \text{ kN/m} \times 0,3) = 66 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

### Verifica ribaltamento

$$M_{\text{stabilizzante}} = 25580 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 9 + 4426 + 350 = 4785 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 25580 \text{ kNm/m} / 4785 \text{ kNm/m} = 5,35 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### Verifica traslazione

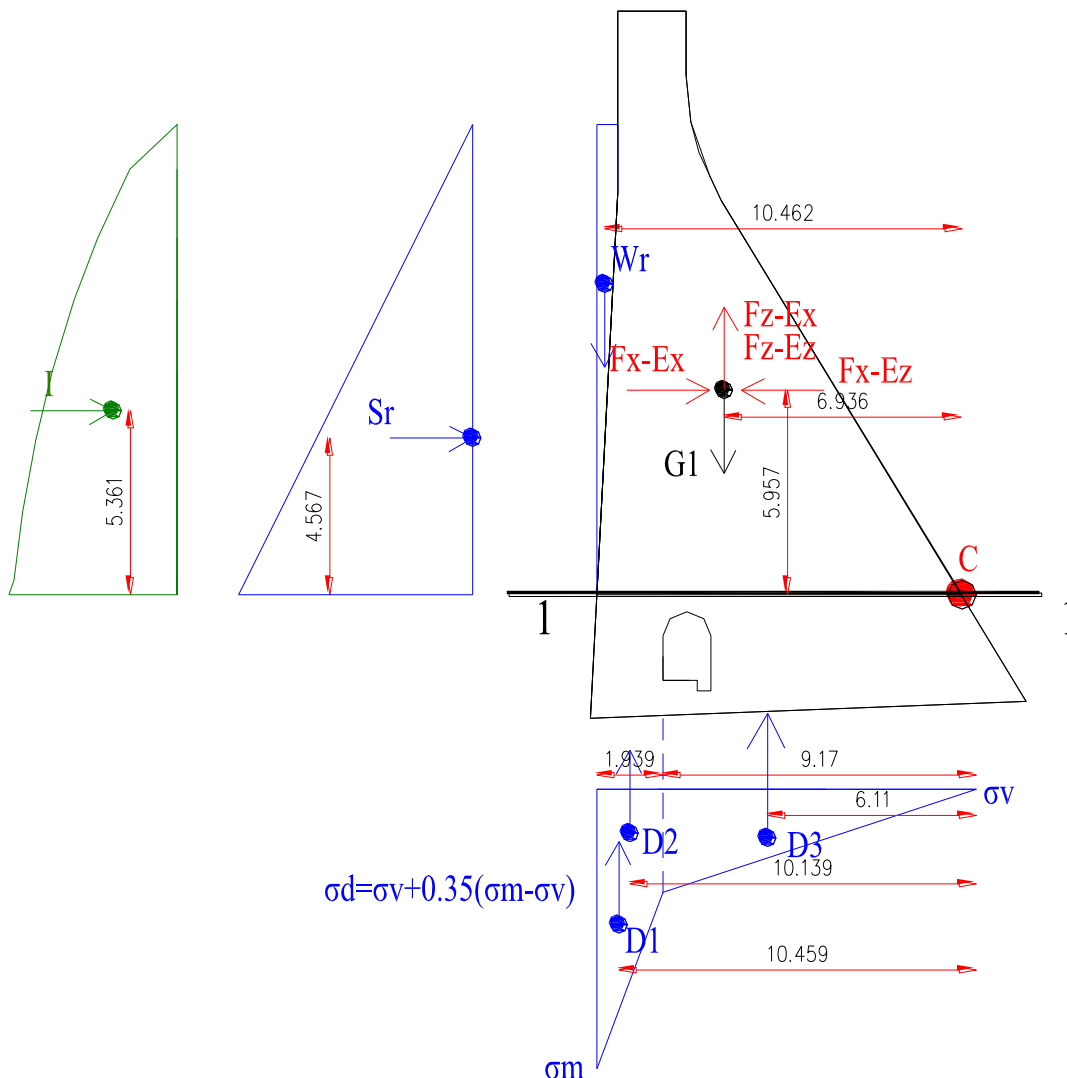
$$V_{\text{stabilizzante}} = (3095 - 139 - 66 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 2168 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 13,2 + 414 - 26 \text{ kNm/m} = 401 \text{ kNm/m}$$

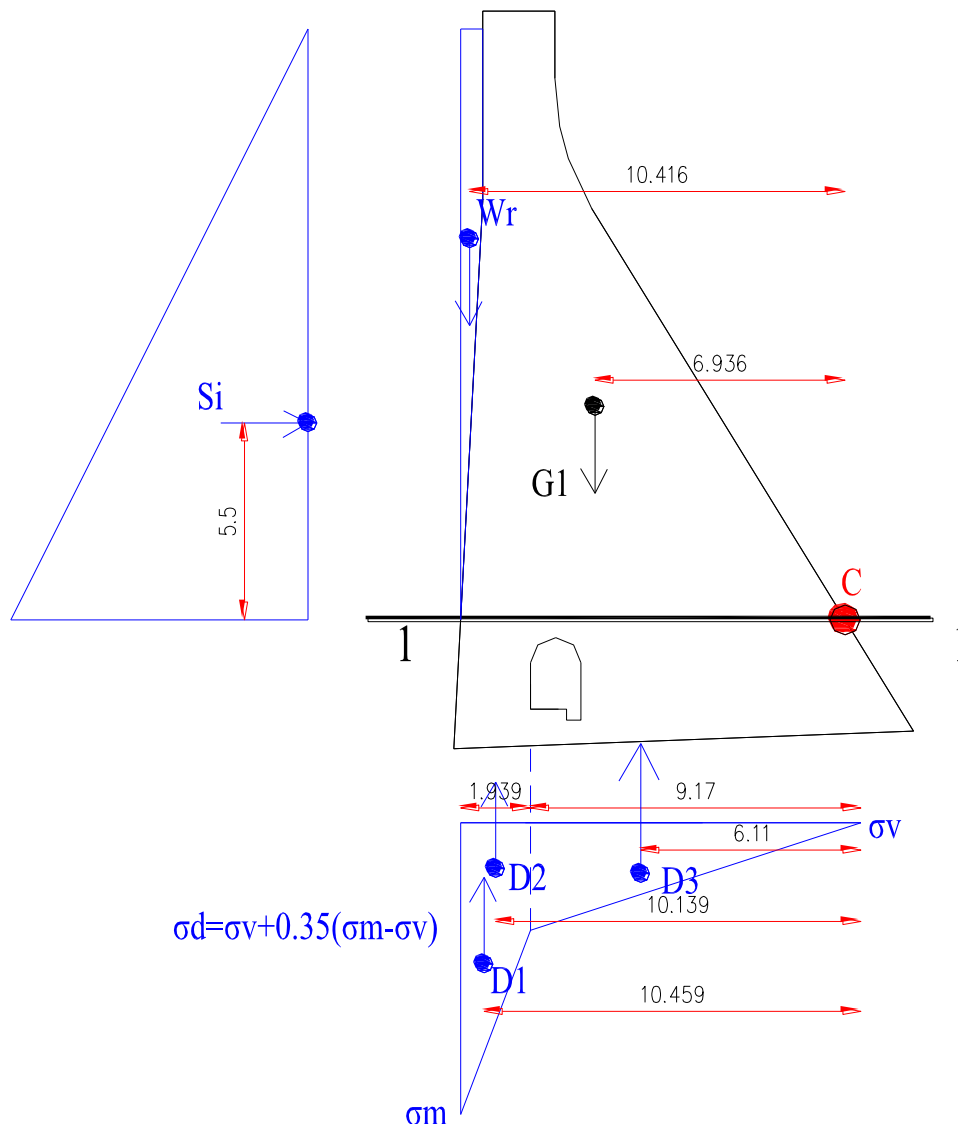
$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 2168 \text{ kNm/m} / 401 \text{ kNm/m} = 5,41 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

4.1.2 AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 1-1

Le verifiche sono condotte su una striscia di diga appesantita di larghezza 1 m:



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massima regolazione per le verifiche in corrispondenza della sezione 1-1



*Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massimo invaso (Combinazione eccezionale) per le verifiche in corrispondenza della sezione 1-1*

Di seguito si riportano i carichi messi in conto:

Peso proprio

Il peso proprio della sezione trascinabile presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{cls, esist} = 91,3 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 2166 \text{ kN/m} \text{ (peso diga esistente)}$$

$$b_{G1} = 6,936 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale peso diga esistente rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Gtot} = G_1 \times b_{G1} = 2166 \text{ kN/m} \times 6,936 \text{ m} = 15023 \text{ kNm/m} \text{ (momento totale stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione

$$H_{max.reg} = 13,7 \text{ m} \text{ (livello acqua massima regolazione)}$$

$$p_{\max} (H=13,7 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\max.\text{reg}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 13,7 \text{ m} = 137 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua)}$$

$$S_r = (p_{\max} \times H_{\max.\text{reg}}) / 2 = (137 \text{ kN/m}^2 \times 13,7 \text{ m}) / 2 = 938,5 \text{ kN/m} \text{ (spinta orizzontale)}$$

$$W_r = (A_r \times \rho_w) = 4,8 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 48 \text{ kN/m} \text{ (peso acqua)}$$

$$b_{w_r} = 10,462 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{s_r} = 4,567 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{w_r} = W_r \times b_{w_r} = 48 \text{ kN/m} \times 10,462 \text{ m} = 502 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{s_r} = S_r \times h_{s_r} = 938,5 \text{ kN/m} \times 4,567 \text{ m} = 4286 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

### Spinta acqua max invaso

$$H_{\max.\text{inv}} = 16,5 \text{ m} \text{ (livello acqua massimo invaso)}$$

$$p_{\max} (H=16,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\max.\text{inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 16,5 \text{ m} = 165 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua)}$$

$$p_{\min} (H=2,8 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\max.\text{inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 2,8 \text{ m} = 28 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione minima sommità)}$$

$$S_i = (p_{\max} + p_{\min}) \times 13,7 \text{ m} / 2 = (165 + 28) \text{ kN/m}^2 \times 13,7 \text{ m} / 2 = 1322 \text{ kN/m} \text{ (spinta orizzontale)}$$

$$W_r = (A_i \times \rho_w) = 6,5 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 65 \text{ kN/m} \text{ (peso acqua)}$$

$$b_{w_{ri}} = 10,416 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{s_i} = 5,234 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{w_i} = W_r \times b_{w_r} = 65 \text{ kN/m} \times 10,416 \text{ m} = 677 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{s_i} = S_i \times h_{s_i} = 1322 \text{ kN/m} \times 5,234 \text{ m} = 6919 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

### Sottopressioni

Nel calcolo delle sottopressioni per la sezione 1-1 si considera un livello idrostatico a valle nullo (sezione in elevazione).

$$H_{\max.\text{reg}} = 13,7 \text{ m} \text{ (livello acqua massima regolazione)}$$

$$\sigma_m (H=13,7 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\max.\text{reg}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 13,7 \text{ m} = 137 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua)}$$

$$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2 \text{ (livello max regolazione)}$$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (137 - 0 \text{ kN/m}^2) = 48 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,939 \text{ m}) / 2 = (137 \text{ kN/m}^2 - 48 \text{ kN/m}^2) \times (1,939 \text{ m}) / 2 = 86 \text{ kN/m}$$

$$D2 = (\sigma_d) \times (1,939 \text{ m}) = (48 \text{ kN/m}^2) \times (1,939 \text{ m}) = 93 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (9,17 \text{ m}) / 2 = (48 - 0 \text{ kN/m}^2) \times (9,17 \text{ m}) / 2 = 220 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 = 86 + 93 + 220 = 399 \text{ kN/m} \text{ (livello max. regolazione)}$$

$$b_{D1} = 10,459 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$b_{D2} = 10,139 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D3} = 6,11 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 86 \text{ kN/m} \times 10,459 \text{ m} = 899 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 93 \text{ kN/m} \times 10,139 \text{ m} = 943 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 220 \text{ kN/m} \times 6,11 \text{ m} = 1344 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 899 + 943 + 1344 = 3186 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante con livello massima regolazione)

$H_{\text{max.inv}} = 16,5 \text{ m}$  (livello acqua massimo invaso)

$p_{\text{max}} (H=16,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 16,5 \text{ m} = 165 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua)

$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$

$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (165 - 0 \text{ kN/m}^2) = 58,0 \text{ kN/m}^2$  (pressione dreno)

$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,939 \text{ m}) / 2 = (165 \text{ kN/m}^2 - 58,0 \text{ kN/m}^2) \times (1,939 \text{ m}) / 2 = 104 \text{ kN/m}$

$D2 = (\sigma_d) \times (1,939 \text{ m}) = (58 \text{ kN/m}^2) \times (1,939 \text{ m}) = 112 \text{ kN/m}$

$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (9,17 \text{ m}) / 2 = (58,0 - 0,0 \text{ kN/m}^2) \times (9,17 \text{ m}) / 2 = 266 \text{ kN/m}$

$D = D1 + D2 + D3 = 104 + 112 + 266 = 482 \text{ kN/m}$  (livello max. invaso)

$b_{D1} = 10,459 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D2} = 10,139 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D3} = 6,11 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 104 \text{ kN/m} \times 10,459 \text{ m} = 1088 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 112 \text{ kN/m} \times 10,139 \text{ m} = 1136 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 266 \text{ kN/m} \times 6,11 \text{ m} = 1625 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 1088 + 1136 + 1625 = 3849 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante con livello massimo invaso)

### Sisma $E_x$ , SLC, Monte-valle

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLC (combinazione con carico sismico massimo).

$F_{x-Ex} = 361 \text{ kN/m}$  (direzione Monte-Valle)

$$F_{z-Ex} = 121 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ex} = 6,936 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ex} = 5,957 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Fz-Ex} = F_{z-Ex} \times b_{Fz-Ex} = 121 \text{ kN/m} \times 6,936 \text{ m} = 839 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Fx-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{Fx-Ex} = 361 \text{ kN/m} \times 5,957 \text{ m} = 2150 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Ex} = M_{Fz-Ex} + M_{Fx-Ex} = 839 + 2150 \text{ kNm/m} = 2989 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_x$ , SLV, Monte-valle

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLV:

$$F_{x-Ex} = 290 \text{ kN/m (direzione Monte-Valle)}$$

$$F_{z-Ex} = 97 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ex} = 6,936 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ex} = 5,957 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Fz-Ex} = F_{z-Ex} \times b_{Fz-Ex} = 97 \text{ kN/m} \times 6,936 \text{ m} = 673 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Fx-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{Fx-Ex} = 290 \text{ kN/m} \times 5,957 \text{ m} = 1728 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Ex} = M_{Fz-Ex} + M_{Fx-Ex} = 673 + 1728 \text{ kNm/m} = 2401 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_z$ , SLC, basso-alto

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLC (combinazione con carico sismico massimo).

$$F_{x-Ez} = 85 \text{ kN/m (direzione Valle- Monte)}$$

$$F_{z-Ez} = 210 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ex} = 6,936 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ex} = 5,957 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$MFz-Ez = Fz-Ez \times bFz-Ez = 210 \text{ kN/m} \times 6,936 \text{ m} = 1457 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$MFx-Ez = Fx-Ez \times hFx-Ez = 85 \text{ kN/m} \times 5,957 \text{ m} = 506 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$MEz = MFz-Ez - MFx-Ez = 1457 - 506 \text{ kNm/m} = 951 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_z$ , SLV, basso-alto

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLV:

$$F_{x-Ez} = 62 \text{ kN/m (direzione Valle- Monte)}$$

$$F_{z-Ez} = 153 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$



$b_{Fz-Ez} = 6,936 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{Fx-Ez} = 5,957 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$MFz-Ez = Fz-Ez \times b_{Fz-Ez} = 153 \text{ kN/m} \times 6,936 \text{ m} = 1061 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$MFx-Ez = Fx-Ez \times h_{Fx-Ez} = 62 \text{ kN/m} \times 5,957 \text{ m} = 369 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$MEz = MFz-Ez - MFx-Ez = 1061 - 369 \text{ kNm/m} = 692 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

#### Azioni inerziali SLC

$I = 98 \text{ kN/m}$  (Spinta inerziale totale)

$h_I = 5,361 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$MI = I \times h_I = 98 \text{ kNm/m} \times 5,361 \text{ m} = 525 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

#### Azioni inerziali SLV

$I = 77 \text{ kN/m}$  (Spinta inerziale totale)

$h_I = 5,361 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$MI = I \times h_I = 77 \text{ kNm/m} \times 5,361 \text{ m} = 413 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

#### 4.1.2.1 COMBINAZIONE FONDAMENTALE SLU ( $1 \times G1 + 1,5 \times G2 + 1,5 \times G3$ )

##### Peso proprio $\times 1$ :

$M_{Gtot} = 15023 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$G_{tot} = 2166 \text{ kN/m}$  (stabilizzante)

##### Spinta acqua max regolazione $\times 1,5$

$M_{Wr} = (502 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 753$  (momento stabilizzante)

$M_{Sr} = (4286 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 6429 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$Wr = (48 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 72$  (stabilizzante)

$Sr = (938,5 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 1408 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

##### Sottopressioni $\times 1,5$

$M_D = (3186 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 4779 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$D = (399 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 599 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

#### Verifica ribaltamento

$M_{stabilizzante} = 15023 + 753 \text{ kNm/m} = 15776 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{instabilizzante} = 6429 + 4779 \text{ kNm/m} = 11208 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 15776 \text{ kNm/m} / 11208 \text{ kNm/m} = 1,41 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (2166 + 72 - 599 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1229 \text{ kNm/m (stabilizzante)}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 1408 \text{ kNm/m (instabilizzante)}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1229 \text{ kNm/m} / 1408 \text{ kNm/m} = 0,87 > 1 \text{ (verifica negativa)}$$

**4.1.2.2 COMBINAZIONE ECCEZIONALE SLU ( $1 \times G1 + 1 \times A + 1 \times G3$ )****Peso proprio  $\times 1$** 

$$M_{\text{Gtot}} = 15023 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 2166 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

**Spinta acqua max invaso  $\times 1$** 

$$M_{\text{Wi}} = 677 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{Si}} = 6919 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_i = 65 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_i = 1322 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Sottopressioni  $\times 1$** 

$$M_{\text{D}} = 3849 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 482 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 15023 + 677 \text{ kNm/m} = 15700 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 6919 + 3849 \text{ kNm/m} = 10768 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 15700 \text{ kNm/m} / 10768 \text{ kNm/m} = 1,46 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (2166 + 65 - 482 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1312 \text{ kNm/m (stabilizzante)}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 1322 \text{ kNm/m (instabilizzante)}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1312 \text{ kNm/m} / 1322 \text{ kNm/m} = 0,99 < 1 \text{ (verifica negativa)}$$

**4.1.2.3 COMBINAZIONE SISMICA SLC ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slc-valle/monte} + 0,3 \times E_{z,slc-Basso/Alto} + I_{x,slc}$ )**

**4.1.2.3.1 Serbatoio pieno**Peso proprio × 1

$$M_{G_{tot}} = 15023 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 2166 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione × 1

$$M_{W_r} = 502 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_r} = 4286 \text{ kNm/m kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 48 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_r = 938,5 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni × 1

$$M_D = 3186 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 399 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ex,slc (Monte-Valle) × 1

$$M_{Ex,slc, Monte-valle} = 2989 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{X-Ex, slc, monte-valle} = 361 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{Z-Ex, slc, basso-alto} = 121 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez,slc (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{Ez} = (951 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 285 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{X-Ez, slc, valle-monte} = (85 \text{ kN/m} \times 0,3) = 26 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{Z-Ez, slc, basso-alto} = (210 \text{ kN/m} \times 0,3) = 63 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Azioni inerziali,slc × 1

$$M_I = 525 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x,slc, monte-valle} = 98 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{stabilizzante} = 15023 + 502 \text{ kNm/m} = 15525 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 4286 + 3186 + 2989 + 285 + 525 = 11271 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 15525 \text{ kNm/m} / 11271 \text{ kNm/m} = 1,38 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{stabilizzante} = (2166 + 48 - 399 - 121 - 63) \text{ kNm/m} \times 0,75 = 1223 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 938,5 + 361 - 26 + 98 \text{ kNm/m} = 1372 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1223 \text{ kNm/m} / 1372 \text{ kNm/m} = 0,89 < 1 \text{ (verifica negativa)}$$

#### 4.1.2.3.2 Serbatoio vuoto

Peso proprio  $\times 1$

$$M_{\text{Gtot}} = 15023 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 2166 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Sisma Ex,slc (Monte-Valle)  $\times 1$

$$M_{\text{Ex,slc,Monte-valle}} = 2989 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{x-Ex,slc,monte-valle}} = 361 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{\text{z-Ex,slc,basso-alto}} = 121 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez,slc (Basso-Alto)  $\times 0,3$

$$M_{\text{Ez}} = (951 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 285 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{x-Ez,slc,valle-monte}} = (85 \text{ kN/m} \times 0,3) = 26 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{\text{z-Ez,slc,basso-alto}} = (210 \text{ kN/m} \times 0,3) = 63 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Verifica ribaltamento

$$M_{\text{stabilizzante}} = 15023 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 2989 + 285 = 3274 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 15023 \text{ kNm/m} / 3274 \text{ kNm/m} = 4,59 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

#### Verifica traslazione

$$V_{\text{stabilizzante}} = (2166 - 121 - 63 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1487 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 361 - 26 \text{ kNm/m} = 335 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1487 \text{ kNm/m} / 335 \text{ kNm/m} = 4,43 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

$$4.1.2.4 \text{ COMBINAZIONE SISMICA SLV (G1 + G2 + G3 + } E_{x,slv\text{-valle/monte}} + 0,3 \times E_{z,slv\text{-Basso/Alto}} + I_{x,slv})$$

#### 4.1.2.4.1 Serbatoio pieno

Peso proprio  $\times 1$

$$M_{\text{Gtot}} = 15023 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 2166 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione × 1

$$M_{Wr} = 502 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{Sr} = 4286 \text{ kNm/m kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 48 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_r = 938,5 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni × 1

$$M_D = 3186 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 399 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ex,slv (Monte-Valle) × 1

$$M_{Ex,slv, Monte-valle} = 2401 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex, slv, monte-valle} = 290 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex, slv, basso-alto} = 97 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez,slv (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{Ez,slv, Basso-alto} = (692 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 208 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez, slv, valle-monte} = (62 \text{ kN/m} \times 0,3) = 19 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez, slv, basso-alto} = (153 \text{ kN/m} \times 0,3) = 46 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Azioni inerziali,slv × 1

$$M_I = 413 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x,slv, monte-valle} = 77 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Verifica ribaltamento

$$M_{stabilizzante} = 15023 + 502 \text{ kNm/m} = 15525 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 4286 + 3186 + 2401 + 208 + 413 = 10494 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 15525 \text{ kNm/m} / 10494 \text{ kNm/m} = 1,48 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

Verifica traslazione

$$V_{stabilizzante} = (2166 + 48 - 399 - 97 - 46 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1254 \text{ kNm/m}$$

$$V_{instabilizzante} = 938,5 + 290 - 19 + 77 \text{ kNm/m} = 1287 \text{ kNm/m}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 1254 \text{ kNm/m} / 1287 \text{ kNm/m} = 0,97 < 1 \text{ (verifica negativa)}$$

**4.1.2.4.2 Serbatoio vuoto**Peso proprio × 1

$$M_{\text{Gtot}} = 15023 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 2166 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$\underline{\text{Sisma Ex,slv (Monte-Valle)} \times 1}$$

$$M_{\text{Ex,slv,Monte-valle}} = 2401 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{x-Ex,slv,mon-te-valle}} = 290 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{\text{z-Ex,slv,basso-alto}} = 97 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$\underline{\text{Sisma Ez,slv (Basso-Alto)} \times 0,3}$$

$$M_{\text{Ez,slv,Basso-alto}} = (692 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 208 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{x-Ez,slv, valle-monte}} = (62 \text{ kN/m} \times 0,3) = 19 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{\text{z-Ez,slv,basso-alto}} = (153 \text{ kN/m} \times 0,3) = 46 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

### Verifica ribaltamento

$$M_{\text{stabilizzante}} = 15023 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 2401 + 208 = 2609 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 15023 \text{ kNm/m} / 2609 \text{ kNm/m} = 5,76 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### Verifica traslazione

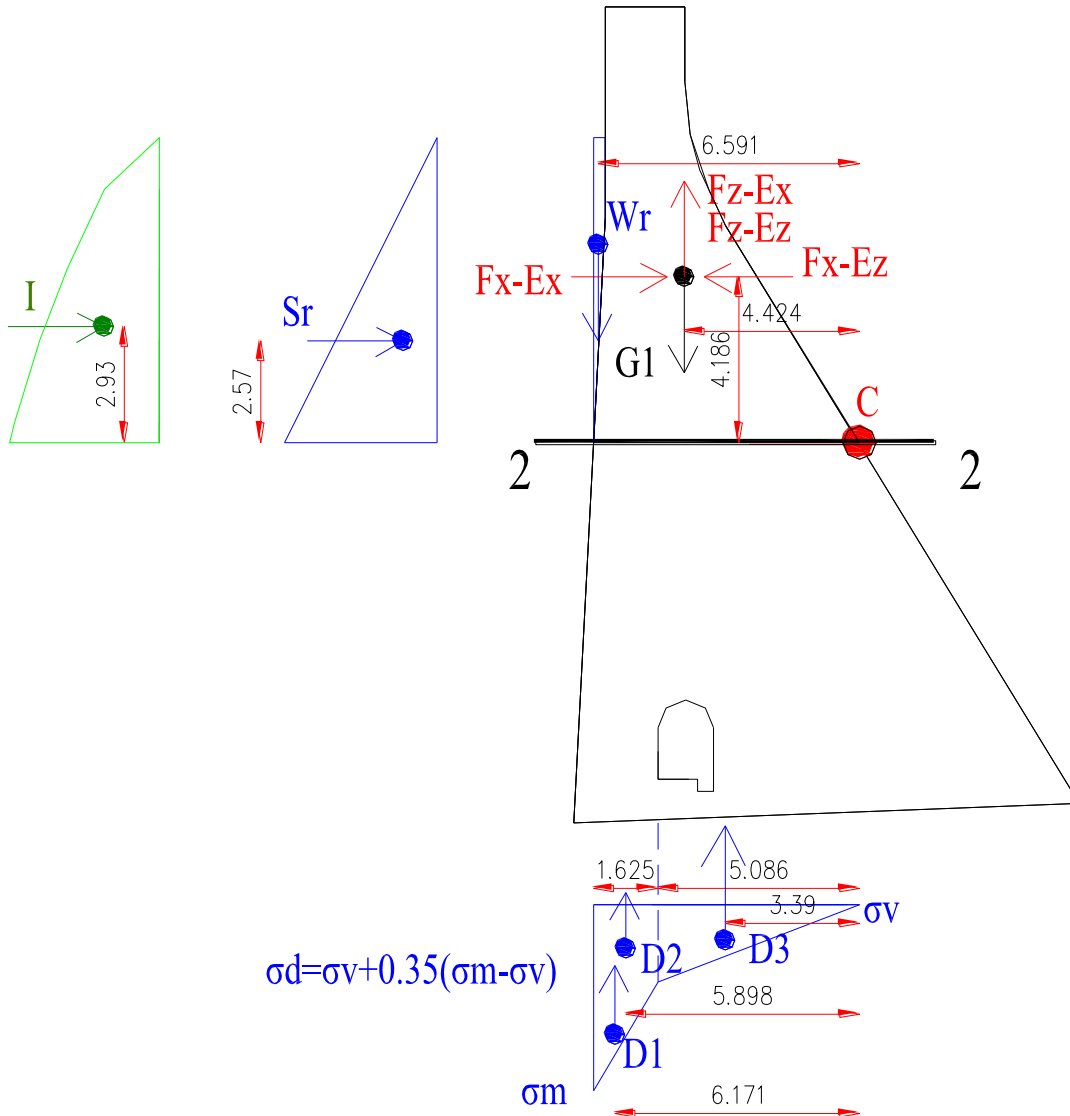
$$V_{\text{stabilizzante}} = (2166 - 97 - 46 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1517 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 290 - 19 \text{ kNm/m} = 271 \text{ kNm/m}$$

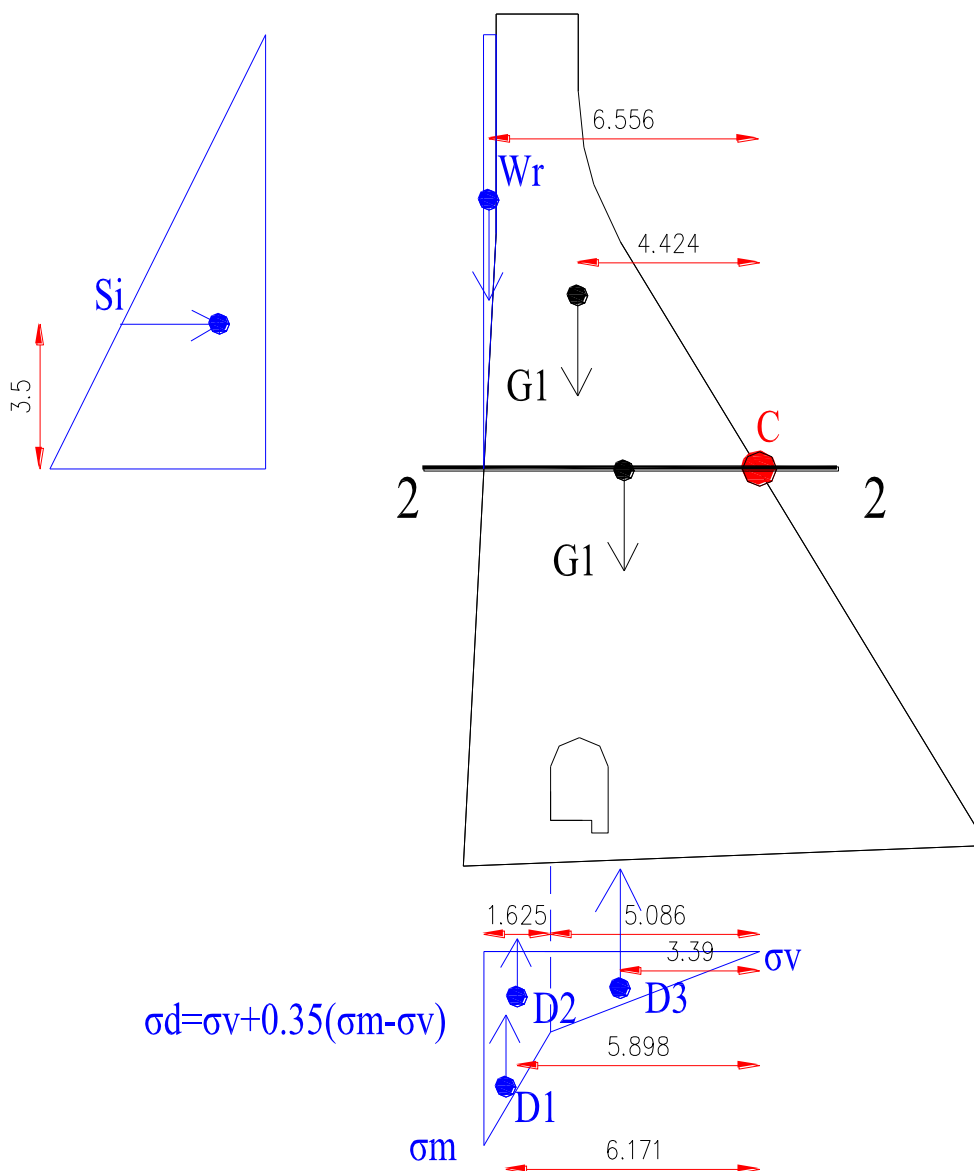
$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1517 \text{ kNm/m} / 271 \text{ kNm/m} = 5,60 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### 4.1.3 AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 2-2

Le verifiche sono condotte su una striscia di diga appesantita di larghezza 1 m:



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massima regolazione per le verifiche in corrispondenza della sezione 2-2



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massimo invaso (Combinazione eccezionale) per le verifiche in corrispondenza della sezione 2-2

Di seguito si riportano i carichi messi in conto:

Peso proprio

Il peso proprio della sezione trascinabile presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{cls, esist} = 39,1 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 927 \text{ kN/m} \text{ (peso diga esistente)}$$

$$b_{G1} = 4,424 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale peso diga esistente rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Gtot} = G_1 \times b_{G1} = 927 \text{ kN/m} \times 4,424 \text{ m} = 4101 \text{ kNm/m} \text{ (momento totale stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione



$H_{\max.\text{reg}} = 7,7 \text{ m}$  (livello acqua massima regolazione)

$p_{\max} (H=7,7 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\max.\text{reg}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 7,7 \text{ m} = 77 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua)

$S_r = (p_{\max} \times H_{\max.\text{reg}}) / 2 = (77 \text{ kN/m}^2 \times 7,7 \text{ m}) / 2 = 297 \text{ kN/m}$  (spinta orizzontale)

$W_r = (A_r \times \rho_w) = 1,4 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 14 \text{ kN/m}$  (peso acqua)

$b_{w_r} = 6,591 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{s_r} = 2,57 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{w_r} = W_r \times b_{w_r} = 14 \text{ kN/m} \times 6,591 \text{ m} = 92 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{s_r} = S_r \times h_{s_r} = 297 \text{ kN/m} \times 2,57 \text{ m} = 763 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

### Spinta acqua max invaso

$H_{\max.\text{inv}} = 10,5 \text{ m}$  (livello acqua massimo invaso)

$p_{\max} (H=10,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\max.\text{inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 10,5 \text{ m} = 105 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua)

$p_{\min} (H=2,8 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\max.\text{inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 2,8 \text{ m} = 28 \text{ kN/m}^2$  (pressione minima sommità)

$S_i = (p_{\max} + p_{\min}) \times 7,7 \text{ m} / 2 = (105 + 28) \text{ kN/m}^2 \times 7,7 \text{ m} / 2 = 512 \text{ kN/m}$  (spinta orizzontale)

$W_r = (A_i \times \rho_w) = 2,3 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 23 \text{ kN/m}$  (peso acqua)

$b_{w_i} = 6,556 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{s_i} = 3,106 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{w_i} = W_r \times b_{w_r} = 23 \text{ kN/m} \times 6,556 \text{ m} = 151 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{s_i} = S_i \times h_{s_i} = 512 \text{ kN/m} \times 3,106 \text{ m} = 1590 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

### Sottopressioni

Nel calcolo delle sottopressioni per la sezione 2-2 si considera un livello idrostatico a valle nullo (sezione in elevazione).

$H_{\max.\text{reg}} = 7,7 \text{ m}$  (livello acqua massima regolazione)

$\sigma_m (H=7,7 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\max.\text{reg}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 7,7 \text{ m} = 77 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua)

$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$  (livello max regolazione)

$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (77 - 0 \text{ kN/m}^2) = 27 \text{ kN/m}^2$  (pressione dreno)

$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,625 \text{ m}) / 2 = (77 \text{ kN/m}^2 - 27 \text{ kN/m}^2) \times (1,625 \text{ m}) / 2 = 41 \text{ kN/m}$

$D2 = (\sigma_d) \times (1,625 \text{ m}) = (27 \text{ kN/m}^2) \times (1,625 \text{ m}) = 44 \text{ kN/m}$

$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (5,086 \text{ m}) / 2 = (27 - 0 \text{ kN/m}^2) \times (5,086 \text{ m}) / 2 = 69 \text{ kN/m}$

$D = D1 + D2 + D3 = 41 + 44 + 69 = 154 \text{ kN/m}$  (livello max. regolazione)

$b_{D1} = 6,171 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D2} = 5,898 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D3} = 3,39 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 41 \text{ kN/m} \times 6,171 \text{ m} = 253 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 44 \text{ kN/m} \times 5,898 \text{ m} = 260 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 69 \text{ kN/m} \times 3,39 \text{ m} = 234 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 253 + 260 + 234 = 747 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante con livello massima regolazione)

$H_{\text{max.inv}} = 10,5 \text{ m}$  (livello acqua massimo invaso)

$p_{\text{max}} (H=10,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 10,5 \text{ m} = 105 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua)

$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$

$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (105 - 0 \text{ kN/m}^2) = 37,0 \text{ kN/m}^2$  (pressione dreno)

$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,625 \text{ m}) / 2 = (105 \text{ kN/m}^2 - 37,0 \text{ kN/m}^2) \times (1,625 \text{ m}) / 2 = 55 \text{ kN/m}$

$D2 = (\sigma_d) \times (1,625 \text{ m}) = (37 \text{ kN/m}^2) \times (1,625 \text{ m}) = 60 \text{ kN/m}$

$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (5,086 \text{ m}) / 2 = (37,0 - 0,0 \text{ kN/m}^2) \times (5,086 \text{ m}) / 2 = 94 \text{ kN/m}$

$D = D1 + D2 + D3 = 55 + 60 + 94 = 209 \text{ kN/m}$  (livello max. invaso)

$b_{D1} = 6,171 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D2} = 5,898 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D3} = 3,39 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 55 \text{ kN/m} \times 6,171 \text{ m} = 339 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 60 \text{ kN/m} \times 5,898 \text{ m} = 354 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 94 \text{ kN/m} \times 3,39 \text{ m} = 319 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 339 + 354 + 319 = 1012 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante con livello massimo invaso)

#### Sisma $E_x$ , SLC, Monte-valle

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLC (combinazione con carico sismico massimo).

$F_{x-Ex} = 155 \text{ kN/m}$  (direzione Monte-Valle)

$$F_{z-Ex} = 52 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ex} = 4,424 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ex} = 4,186 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Fz-Ex} = F_{z-Ex} \times b_{Fz-Ex} = 52 \text{ kN/m} \times 4,424 \text{ m} = 230 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Fx-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{Fx-Ex} = 155 \text{ kN/m} \times 4,186 \text{ m} = 649 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Ex} = M_{Fz-Ex} + M_{Fx-Ex} = 230 + 649 \text{ kNm/m} = 879 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_x$ , SLV, Monte-valle

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLV:

$$F_{x-Ex} = 124 \text{ kN/m (direzione Monte-Valle)}$$

$$F_{z-Ex} = 42 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ex} = 4,424 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ex} = 4,186 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{Fz-Ex} = F_{z-Ex} \times b_{Fz-Ex} = 42 \text{ kN/m} \times 4,424 \text{ m} = 186 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Fx-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{Fx-Ex} = 124 \text{ kN/m} \times 4,186 \text{ m} = 519 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Ex} = M_{Fz-Ex} + M_{Fx-Ex} = 186 + 519 \text{ kNm/m} = 705 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_z$ , SLC, basso-alto

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLC (combinazione con carico sismico massimo).

$$F_{x-Ez} = 36 \text{ kN/m (direzione Valle- Monte)}$$

$$F_{z-Ez} = 90 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{Fz-Ex} = 4,424 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{Fx-Ex} = 4,186 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$MFz-Ez = Fz-Ez \times bFz-Ez = 90 \text{ kN/m} \times 4,424 \text{ m} = 398 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$MFx-Ez = Fx-Ez \times hFx-Ez = 36 \text{ kN/m} \times 4,186 \text{ m} = 151 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$MEz = MFz-Ez - MFx-Ez = 398 - 151 \text{ kNm/m} = 247 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_z$ , SLV, basso-alto

Da modello FEM si sono ricavate le seguenti ragioni alla base in condizioni con SLV:

$$F_{x-Ez} = 26 \text{ kN/m (direzione Valle- Monte)}$$

$$F_{z-Ez} = 65 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$b_{Fz-Ez} = 4,424$  m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{Fx-Ez} = 4,186$  m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$MFz-Ez = Fz-Ez \times b_{Fz-Ez} = 65 \text{ kN/m} \times 4,424 \text{ m} = 288 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$MFx-Ez = Fx-Ez \times h_{Fx-Ez} = 26 \text{ kN/m} \times 4,186 \text{ m} = 109 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$MEz = MFz-Ez - MFx-Ez = 288 - 109 \text{ kNm/m} = 179 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

#### Azioni inerziali SLC

$I = 41$  kN/m (Spinta inerziale totale)

$h_I = 2,93$  m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$MI = I \times h_I = 41 \text{ kNm/m} \times 2,93 \text{ m} = 120 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

#### Azioni inerziali SLV

$I = 32$  kN/m (Spinta inerziale totale)

$h_I = 2,93$  m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$MI = I \times h_I = 32 \text{ kNm/m} \times 2,93 \text{ m} = 94 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

**4.1.3.1 COMBINAZIONE FONDAMENTALE SLU (1×G1 + 1,5×G2 + 1,5×G3 )**Peso proprio ×1 :

$$M_{G_{tot}} = 4101 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 927 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max regolazione × 1,5

$$M_{W_r} = (92 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 138 \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_r} = (763 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 1145 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = (14 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 21 \text{ (stabilizzante)}$$

$$S_r = (297 \text{ kN /m}) \times 1,5 = 446 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni × 1,5

$$M_D = (747 \text{ kNm/m}) \times 1,5 = 1121 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = (154 \text{ kN/m}) \times 1,5 = 231 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{stabilizzante} = 4101 + 138 \text{ kNm/m} = 4239 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 1145 + 1121 \text{ kNm/m} = 2266 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 4239 \text{ kNm/m} / 2266 \text{ kNm/m} = 1,87 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{stabilizzante} = (927 + 21 - 231 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 537 \text{ kNm/m (stabilizzante)}$$

$$V_{instabilizzante} = 446 \text{ kNm/m (instabilizzante)}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 537 \text{ kNm/m} / 446 \text{ kNm/m} = 1,20 < 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**4.1.3.2 COMBINAZIONE ECCEZIONALE SLU (1×G1 + 1×A + 1×G3 )**Peso proprio ×1

$$M_{G_{tot}} = 4101 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 927 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max invaso × 1

$$M_{W_i} = 151 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_i} = 1590 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$W_i = 23 \text{ kN/m}$  (stabilizzante)

$S_i = 512 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

Sottopressioni  $\times 1$

$M_D = 1012 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$D = 209 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

### **Verifica ribaltamento**

$M_{\text{stabilizzante}} = 4101 + 151 \text{ kNm/m} = 4252 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{\text{instabilizzante}} = 1590 + 1012 \text{ kNm/m} = 2602 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 4252 \text{ kNm/m} / 2602 \text{ kNm/m} = 1,63 > 1$  (verifica positiva)

### **Verifica traslazione**

$V_{\text{stabilizzante}} = (927 + 23 - 209 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 555 \text{ kNm/m}$  (stabilizzante)

$V_{\text{instabilizzante}} = 512 \text{ kNm/m}$  (instabilizzante)

$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 555 \text{ kNm/m} / 512 \text{ kNm/m} = 1,08 > 1$  (verifica positiva)

4.1.3.3 *COMBINAZIONE SISMICA SLC* ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,slc\text{-valle/monte}} + 0,3 \times E_{z,slc\text{-Basso/Alto}} + I_{x,slc}$ )

#### **4.1.3.3.1 Serbatoio pieno**

Peso proprio  $\times 1$

$M_{\text{Gtot}} = 4101 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$G_{\text{tot}} = 927 \text{ kN/m}$  (stabilizzante)

Spinta acqua max regolazione  $\times 1$

$M_{\text{Wr}} = 92 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{\text{Sr}} = 763 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$W_r = 14 \text{ kN/m}$  (stabilizzante)

$S_r = 297 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

Sottopressioni  $\times 1$

$M_D = 747 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$D = 154 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

Sisma  $E_{x,slc}$  (Monte-Valle)  $\times 1$

$$M_{Ex,slc, Monte-valle} = 879 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex, slc, monte-valle} = 155 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex, slc, basso-alto} = 52 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$\underline{\text{Sisma Ez,slc (Basso-Alto)} \times 0,3}$$

$$M_{Ez} = (247 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 74 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez, slc, valle-monte} = (36 \text{ kN/m} \times 0,3) = 11 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez, slc, basso-alto} = (90 \text{ kN/m} \times 0,3) = 27 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$\underline{\text{Azioni inerziali,slc} \times 1}$$

$$M_I = 120 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x,slc, monte-valle} = 41 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

### Verifica ribaltamento

$$M_{stabilizzante} = 4101 + 92 \text{ kNm/m} = 4193 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 763 + 747 + 879 + 74 + 120 = 2583 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 4193 \text{ kNm/m} / 2583 \text{ kNm/m} = 1,62 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### Verifica traslazione

$$V_{stabilizzante} = (927 + 14 - 154 - 52 - 27) \text{ kNm/m} \times 0,75 = 531 \text{ kNm/m}$$

$$V_{instabilizzante} = 297 + 155 - 11 + 41 \text{ kNm/m} = 482 \text{ kNm/m}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 531 \text{ kNm/m} / 482 \text{ kNm/m} = 1,10 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

#### 4.1.3.3.2 Serbatoio vuoto

$$\underline{\text{Peso proprio} \times 1}$$

$$M_{Gtot} = 4101 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 927 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$\underline{\text{Sisma Ex,slc (Monte-Valle)} \times 1}$$

$$M_{Ex,slc, Monte-valle} = 879 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex, slc, monte-valle} = 155 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex, slc, basso-alto} = 52 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$\underline{\text{Sisma Ez,slc (Basso-Alto)} \times 0,3}$$

$$M_{Ez} = (247 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 74 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez, slc, valle-monte} = (36 \text{ kN/m} \times 0,3) = 11 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez,slc,basso-alto} = (90\text{kN/m} \times 0,3) = 27 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

### **Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 4101 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 879 + 74 = 953 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 4101 \text{ kNm/m} / 953 \text{ kNm/m} = 4,30 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### **Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (927 - 52 - 27 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 636 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 155 - 11 \text{ kNm/m} = 144 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 636 \text{ kNm/m} / 144 \text{ kNm/m} = 4,41 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

$$4.1.3.4 \text{ COMBINAZIONE SISMICA SLV } (G1 + G2 + G3 + E_{x,slv-valle/monte} + 0.3 \times E_{z,slv-Basso/Alto} + I_{x,slv})$$

#### **4.1.3.4.1 Serbatoio pieno**

##### **Peso proprio × 1**

$$M_{\text{Gtot}} = 4101 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 927 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

##### **Spinta acqua max regolazione × 1**

$$M_{\text{Wr}} = 92 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{Sr}} = 763 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 14 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_r = 297 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

##### **Sottopressioni × 1**

$$M_{\text{D}} = 747 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 154 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

##### **Sisma Ex,slv (Monte-Valle) × 1**

$$M_{\text{Ex,slv,Monte-valle}} = 705 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex,slv,monte-valle} = 124 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex,slv,basso-alto} = 42 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

##### **Sisma Ez,slv (Basso-Alto) × 0,3**



$$M_{Ez,slv,Basso-alto} = (179 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 54 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez,slv, valle-monte} = (26 \text{ kN/m} \times 0,3) = 8 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez,slv,basso-alto} = (65 \text{ kN/m} \times 0,3) = 20 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Azioni inerziali,slv × 1

$$M_I = 94 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x,slv,,monte-valle} = 32 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Verifica ribaltamento

$$M_{stabilizzante} = 4101 + 92 \text{ kNm/m} = 4193 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 763 + 747 + 705 + 54 + 94 = 2363 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 4193 \text{ kNm/m} / 2363 \text{ kNm/m} = 1,77 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

#### Verifica traslazione

$$V_{stabilizzante} = (927 + 14 - 154 - 42 - 20 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 544 \text{ kNm/m}$$

$$V_{instabilizzante} = 297 + 124 - 8 + 32 \text{ kNm/m} = 445 \text{ kNm/m}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 544 \text{ kNm/m} / 445 \text{ kNm/m} = 1,22 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

#### **4.1.3.4.2 Serbatoio vuoto**

##### Peso proprio × 1

$$M_{Gtot} = 4101 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 927 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

##### Sisma Ex,slv (Monte-Valle) × 1

$$M_{Ex,slv,Monte-valle} = 705 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex,slv,monte-valle} = 124 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ex,slv,basso-alto} = 42 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

##### Sisma Ez,slv (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{Ez,slv,Basso-alto} = (179 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 54 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ez,slv, valle-monte} = (26 \text{ kN/m} \times 0,3) = 8 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez,slv,basso-alto} = (65 \text{ kN/m} \times 0,3) = 20 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Verifica ribaltamento

$$M_{stabilizzante} = 4101 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 705 + 54 = 759 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

Mstabilizzante / Minstabilizzante = 4101 kNm/m / 759 kNm/m = 5,10 >1 (verifica positiva)

**Verifica traslazione**

Vstabilizzante = (927 – 42 - 20 kNm/m)×0,75 = 649 kNm/m

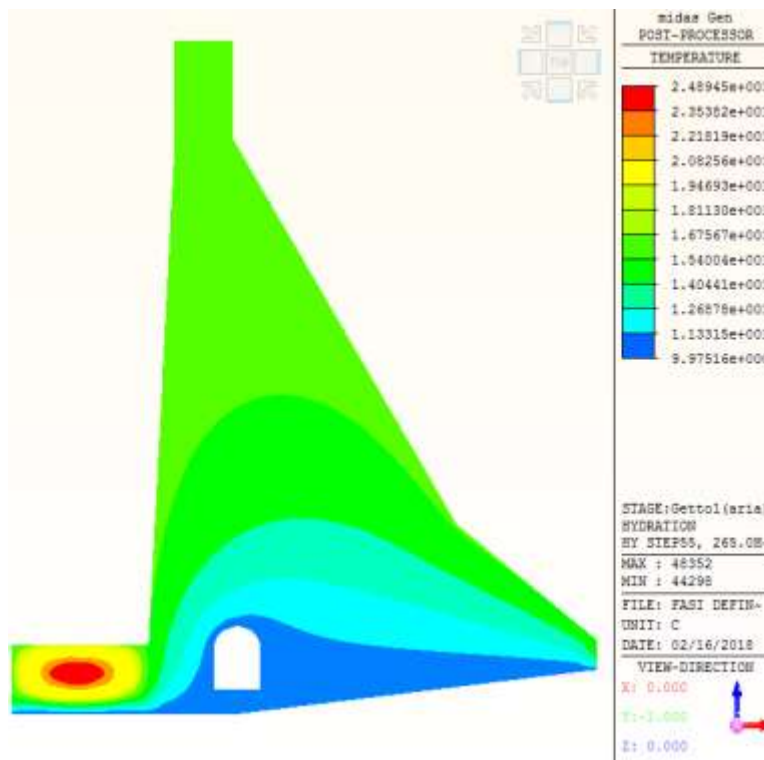
Vinstabilizzante = 124 – 8 kNm/m = 116 kNm/m

Vstabilizzante / Vinstabilizzante = 649 kNm/m / 116 kNm/m = 5,59 >1 (verifica positiva)

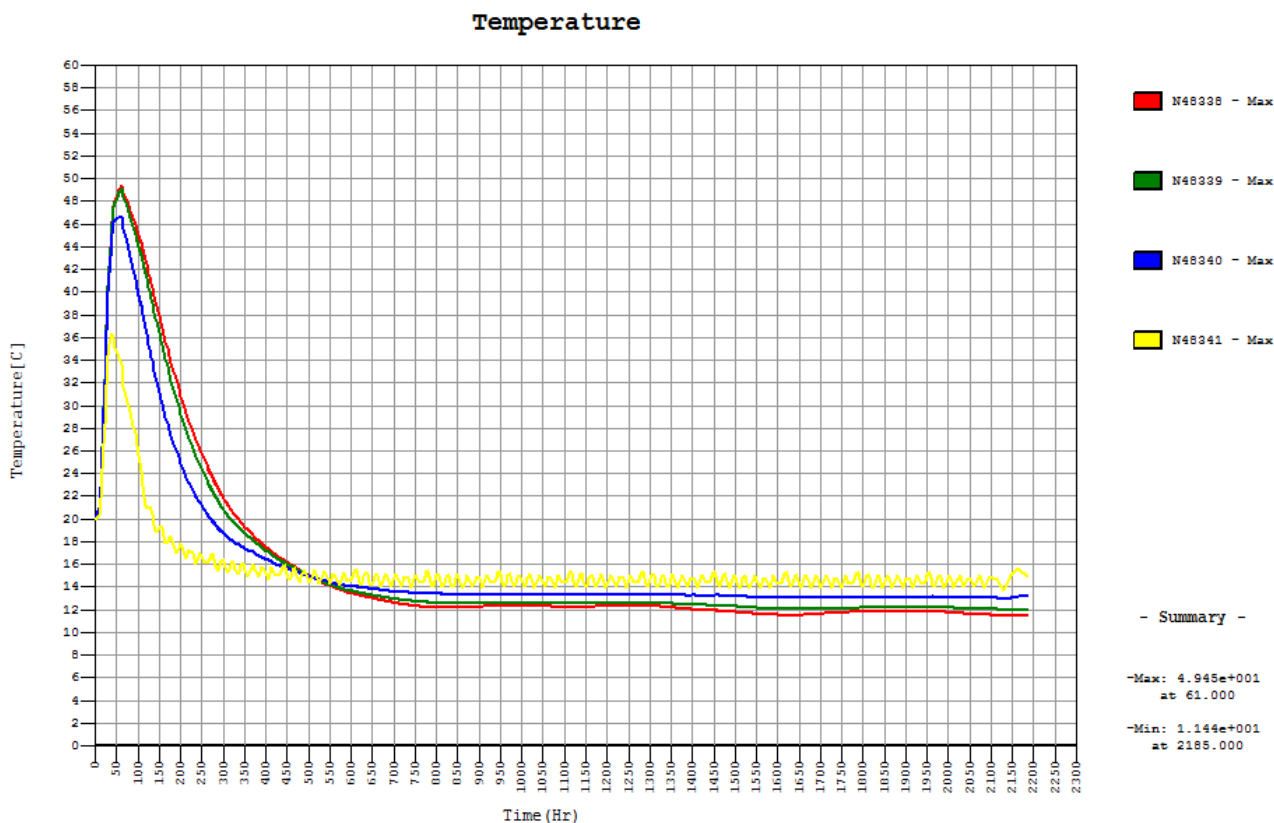
### 5. VERIFICA DELLE FASI COSTRUTTIVE

Di seguito sono riportati i risultati della modellazione delle fasi costruttive di una sezione rappresentativa della diga.

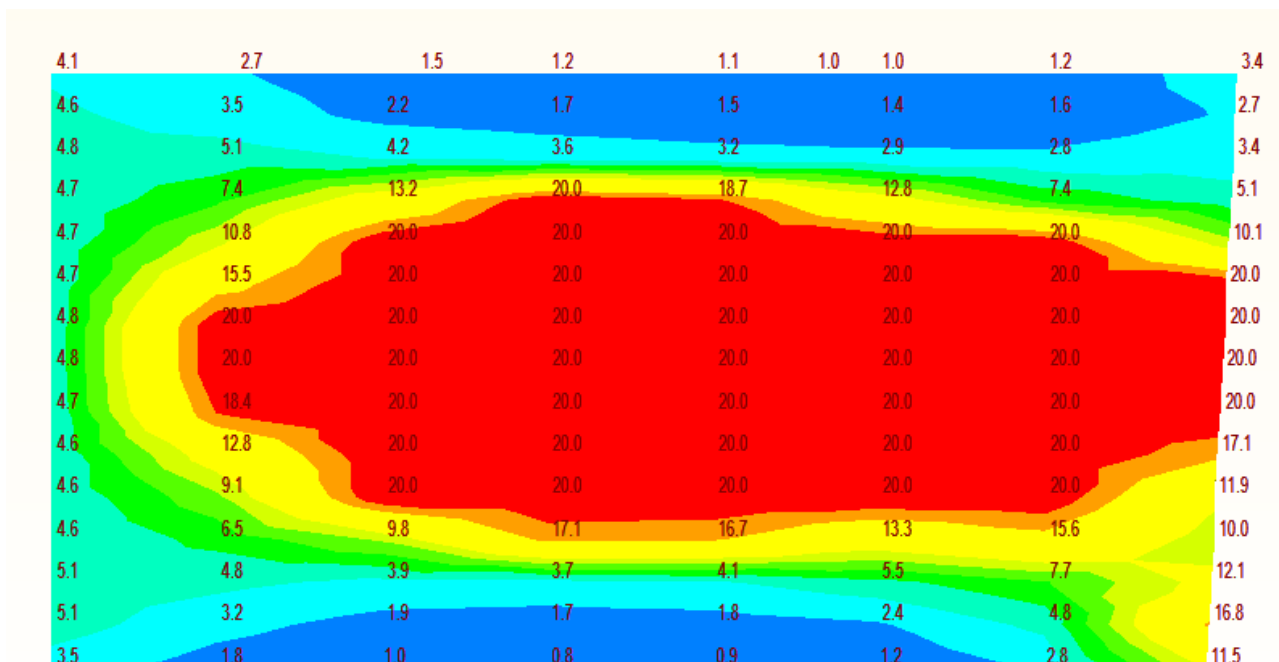
#### 5.1 FASE 1 – GETTO 1



Temperatura corpo diga (°C) -T = 265 hr (istante dopo 11 giorni dal getto)

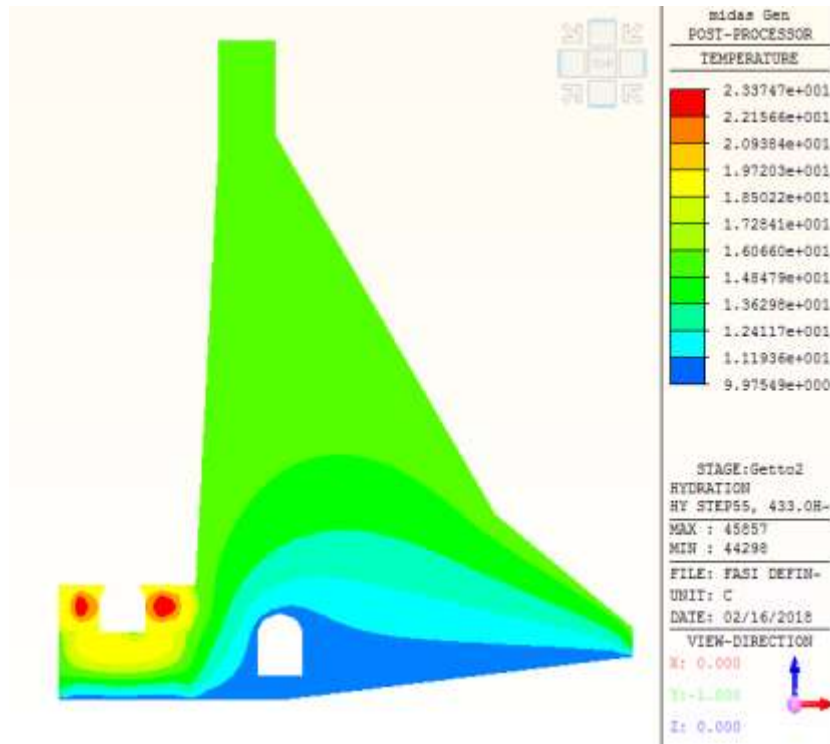


Andamento della temperatura rispettivamente del cuore del getto (rosso) e sul bordo lato monte (giallo) – Distanza cuore-bordo pari a 2m ( $\Delta T_{max/m} = 19\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

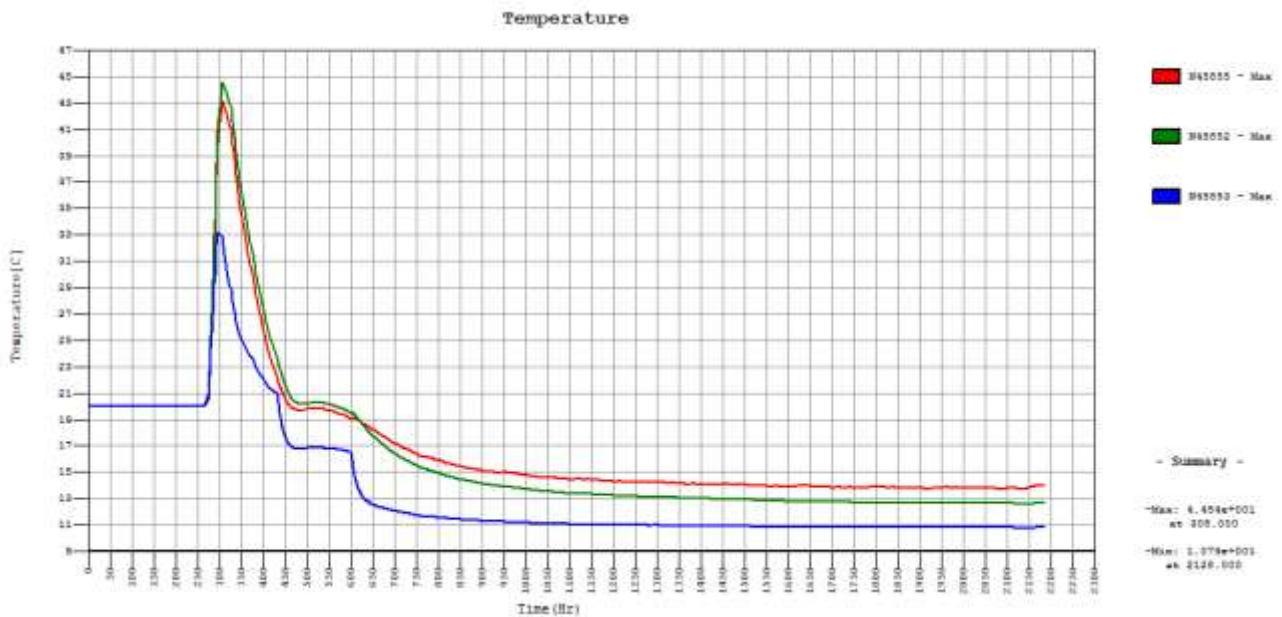


Coefficienti di verifica con riferimento alla tensione principale di trazione (>1 verifica positiva) nell'istante più sfavorevole

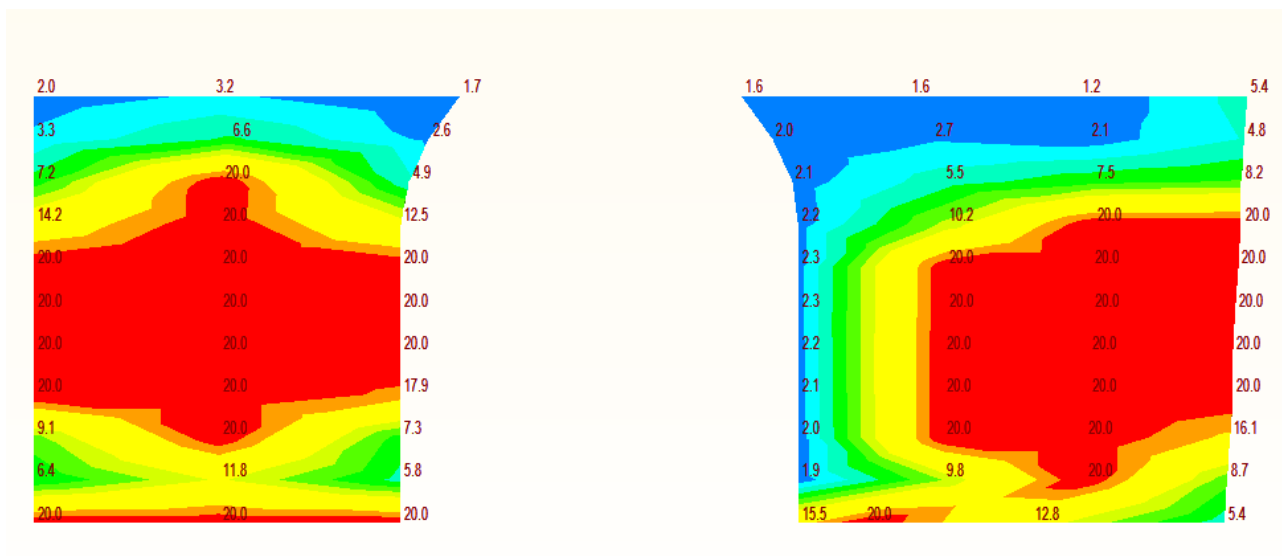
5.2 FASE 2 – GETTO 6



Temperatura corpo diga (°C) -T = 433 hr (istante dopo 7 giorni dal getto6)

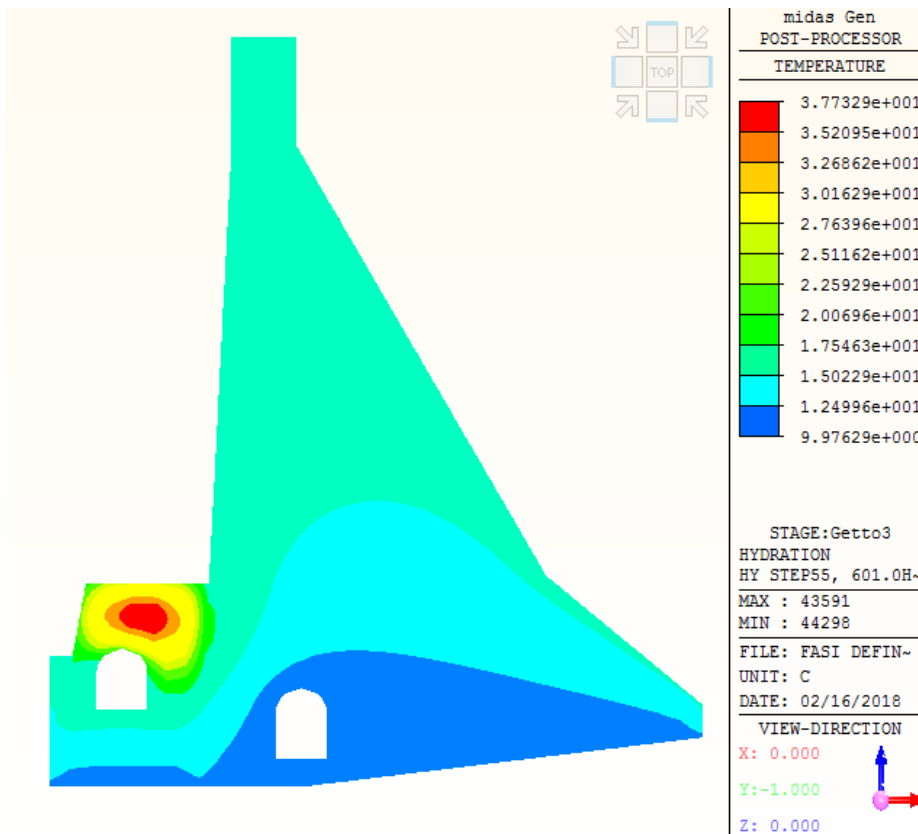


Andamento della temperatura rispettivamente del cuore del getto(rosso) e sul bordo verticale del cunicolo (blu) – Distanza cuore bordo 0,77 m ( $\Delta T_{max}/m = 19\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

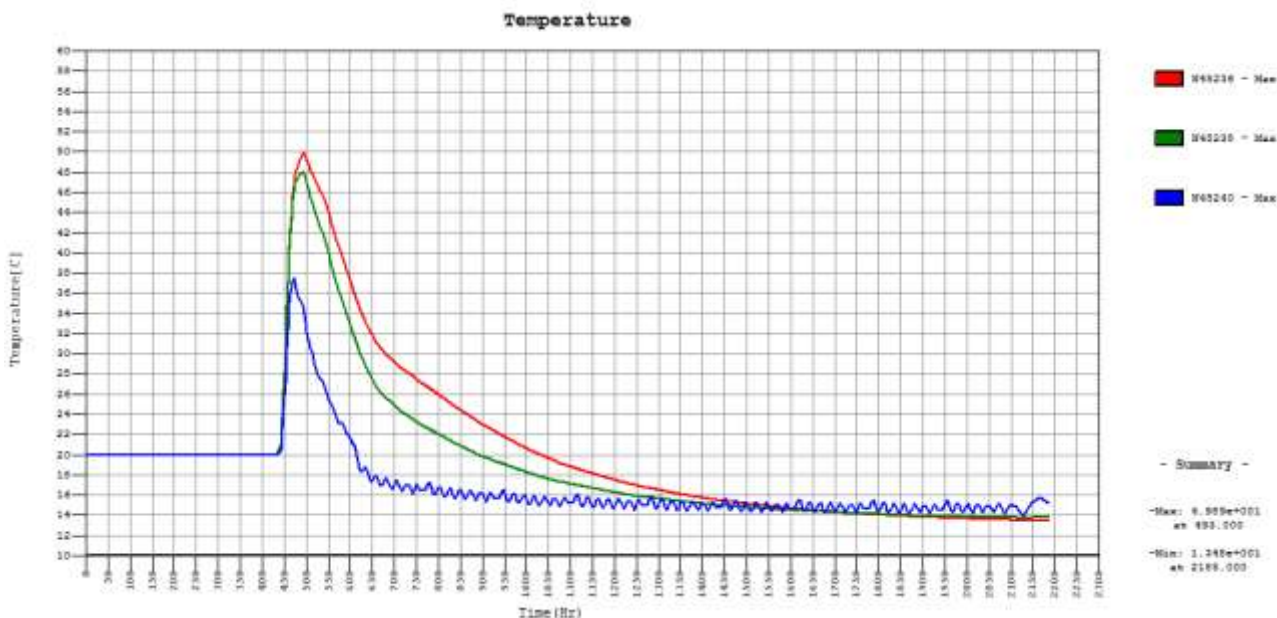


*Coefficienti di verifica con riferimento alla tensione principale di trazione (>1 verifica positiva) nell'istante più sfavorevole*

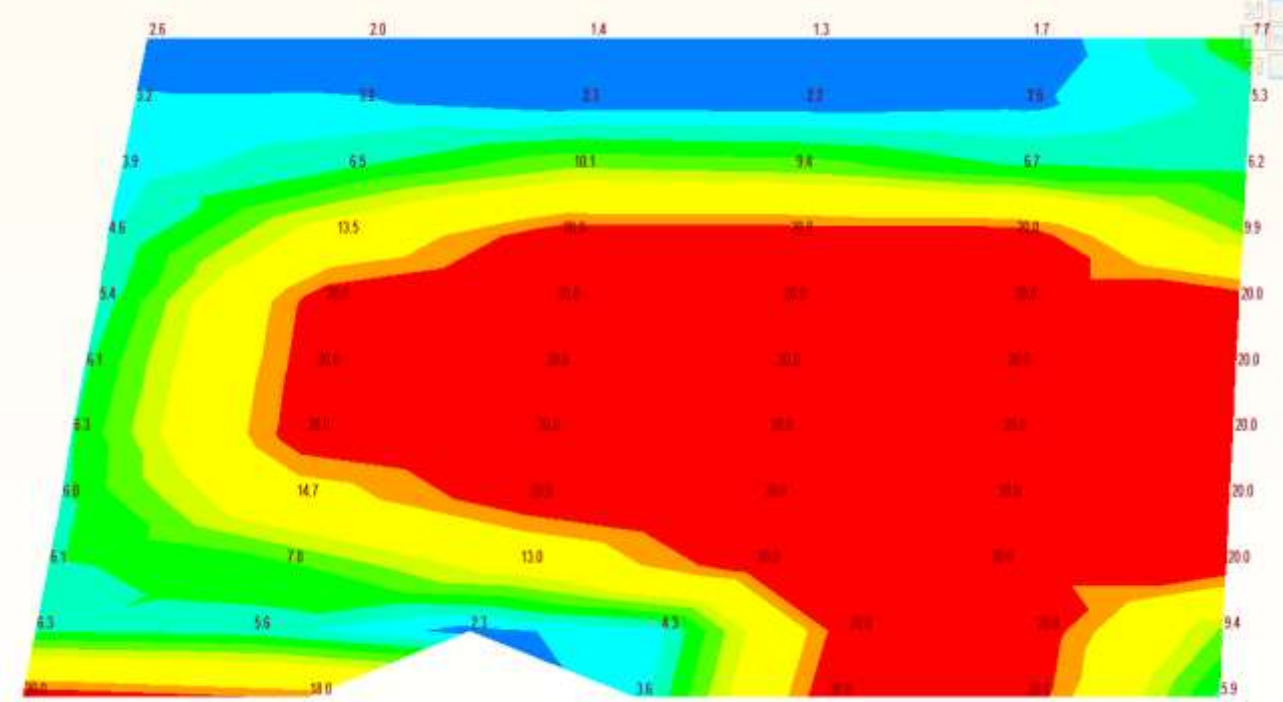
5.3 FASE 3 – GETTO 12



Temperatura corpo diga (°C) -T = 601 hr (istante dopo 7 giorni dal getto12)



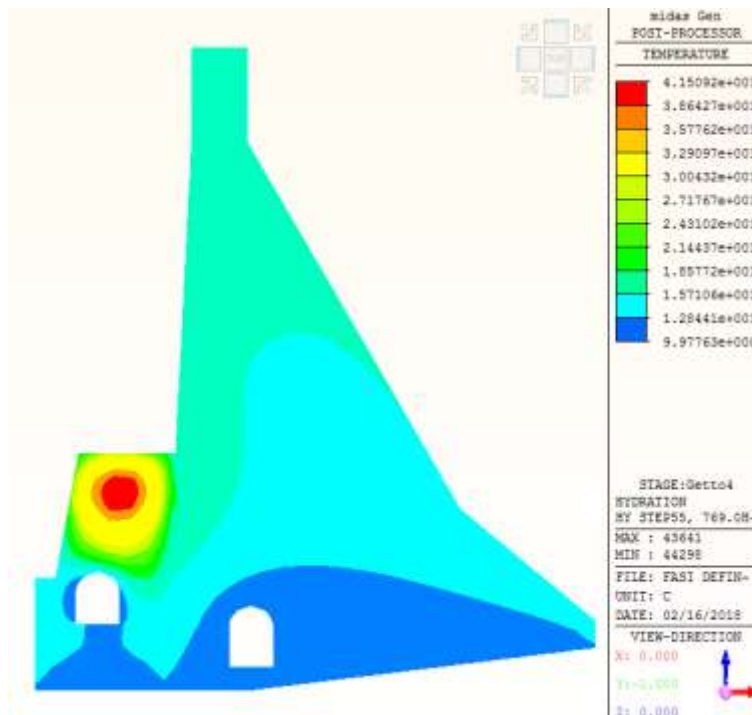
Andamento della temperatura rispettivamente del cuore del getto(rosso), sul bordo verticale lato monte (blu) – Distanza cuore-bordo 1,75 m ( $\Delta T_{max/m} = 14 \text{ }^\circ\text{C}$ )



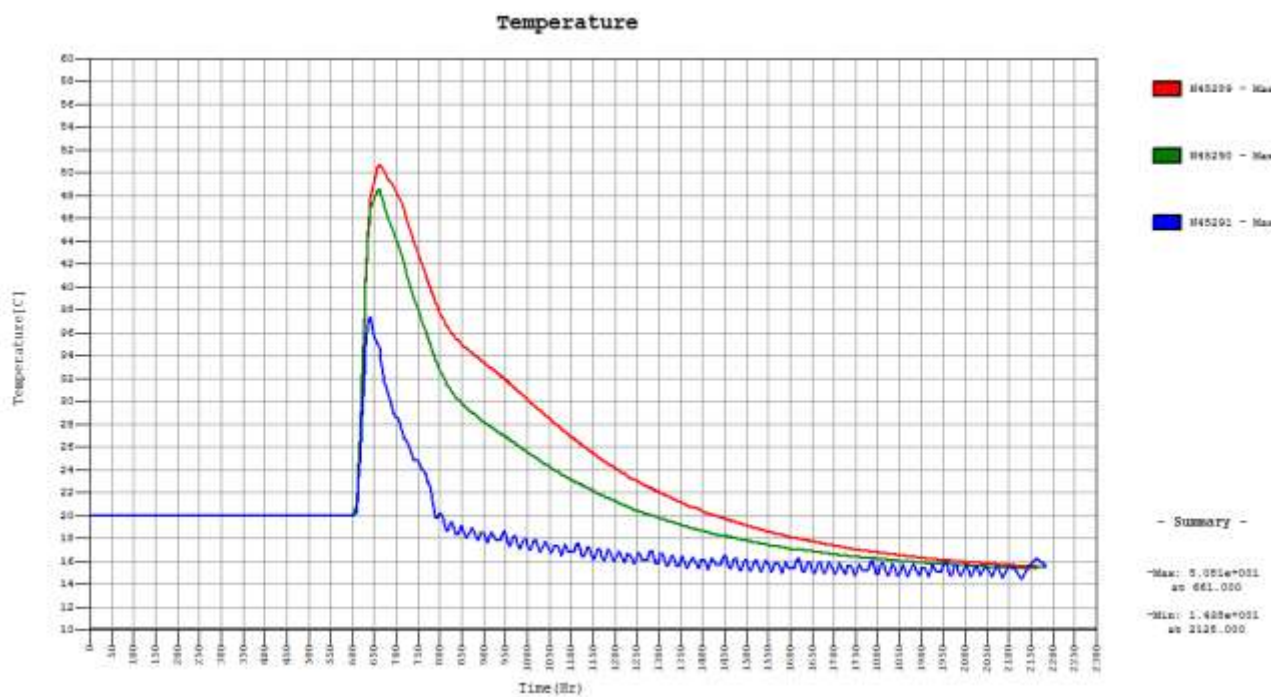
Coefficienti di verifica con riferimento alla tensione principale di trazione (>1 verifica positiva)  
nell'istante più sfavorevole



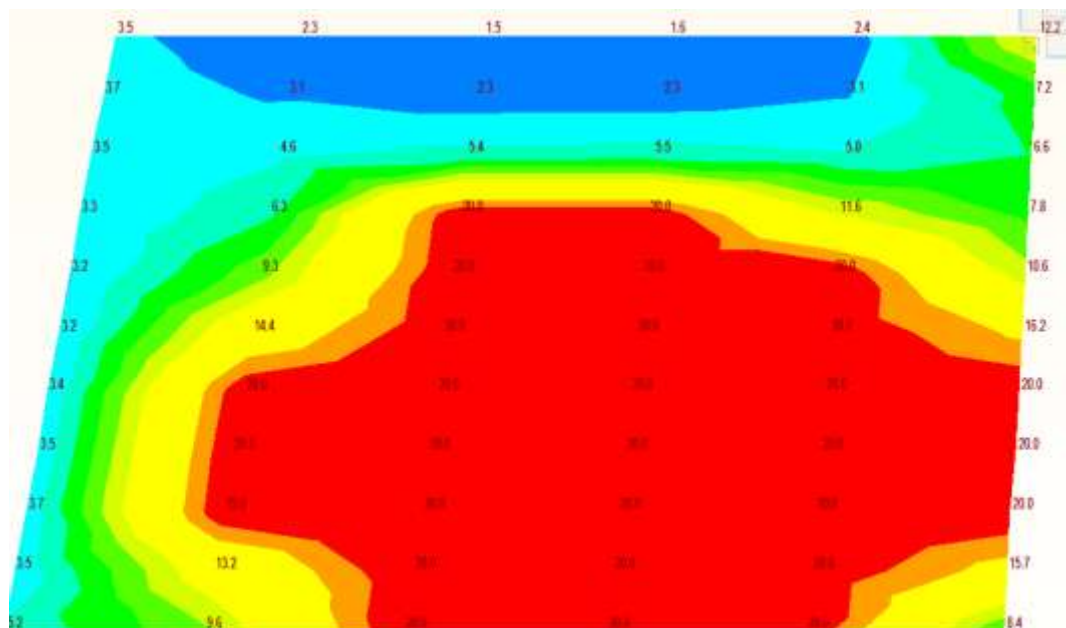
5.4 FASE 4 – GETTO 18



Temperatura corpo diga (°C) -T = 769 hr (istante dopo 7 giorni dal getto18)

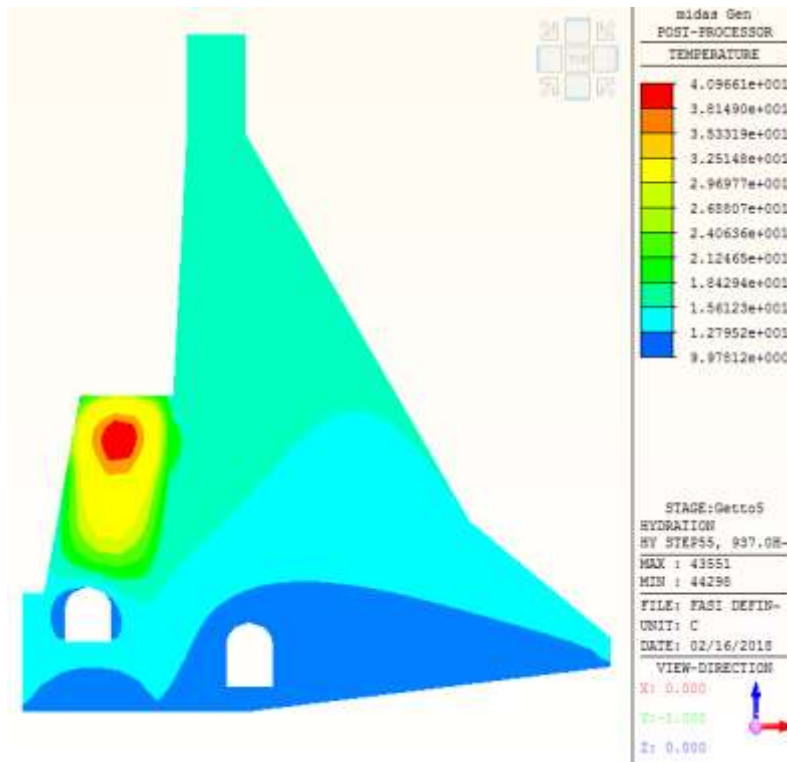


Andamento della temperatura rispettivamente del cuore del getto(rosso) e sul bordo verticale lato monte (blu) – Distanza tra cuore e bordo pari a 1,60 m ( $\Delta T_{max}/m = 16,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

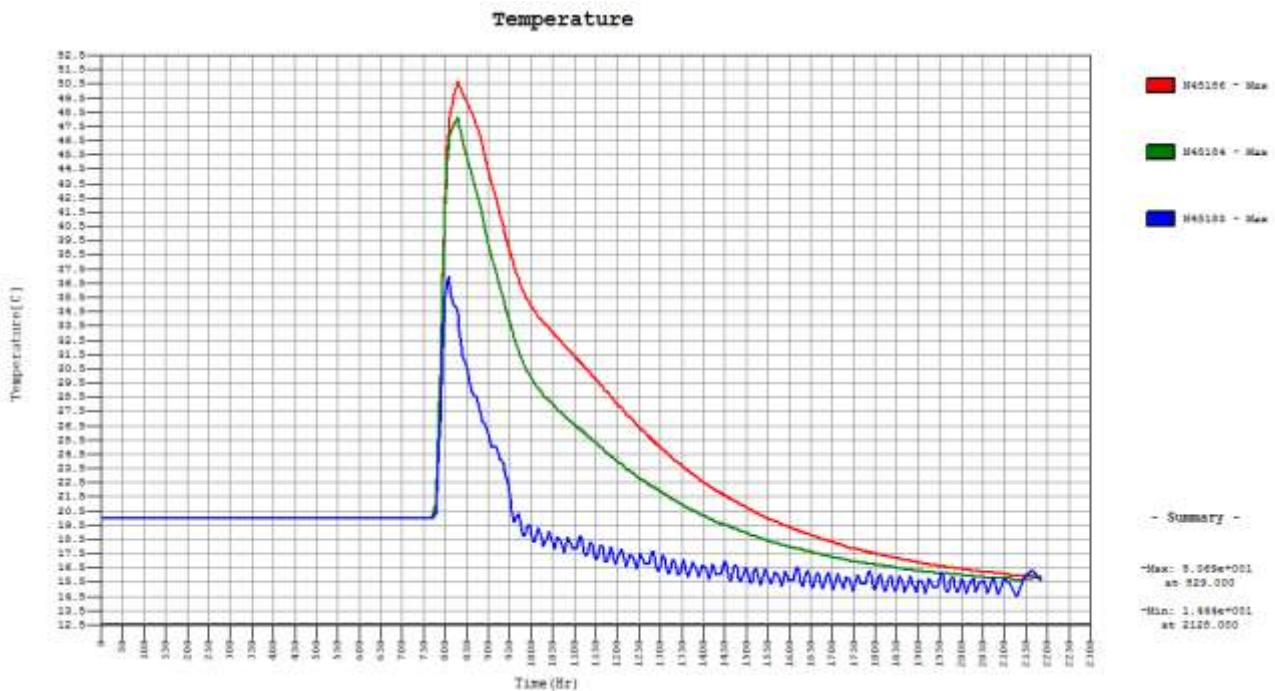


*Coefficienti di verifica con riferimento alla tensione principale di trazione (>1 verifica positiva)  
nell'istante più sfavorevole*

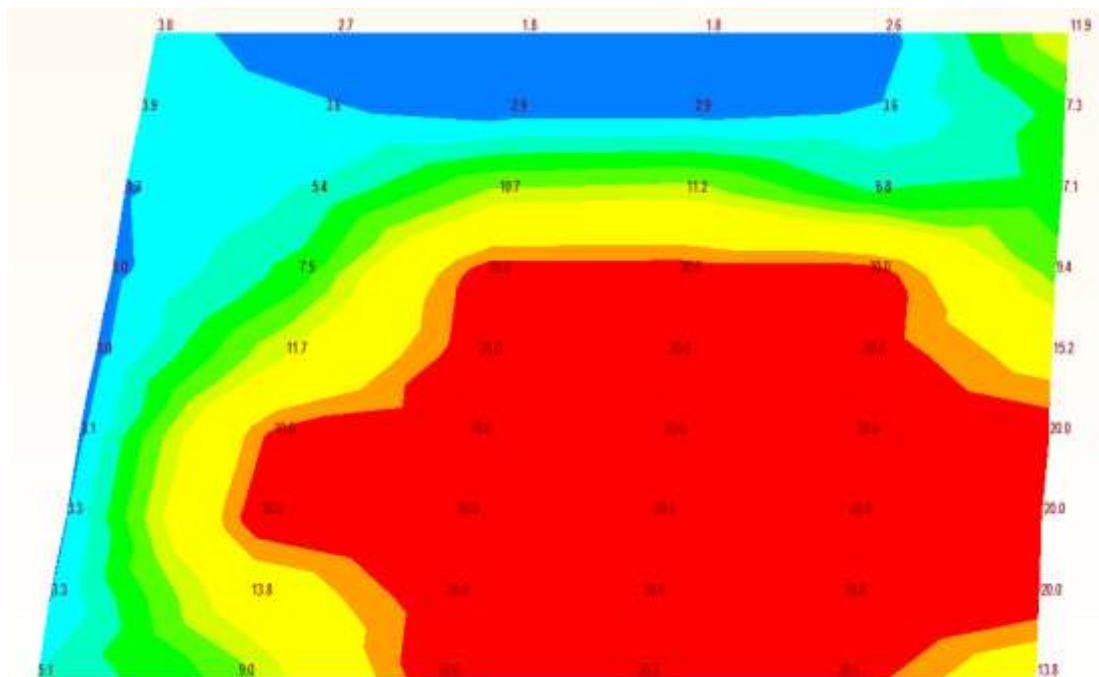
5.5 FASE 5 – GETTO 24



Temperatura corpo diga (°C) -T = 937 hr (istante dopo 7 giorni dal getto24)

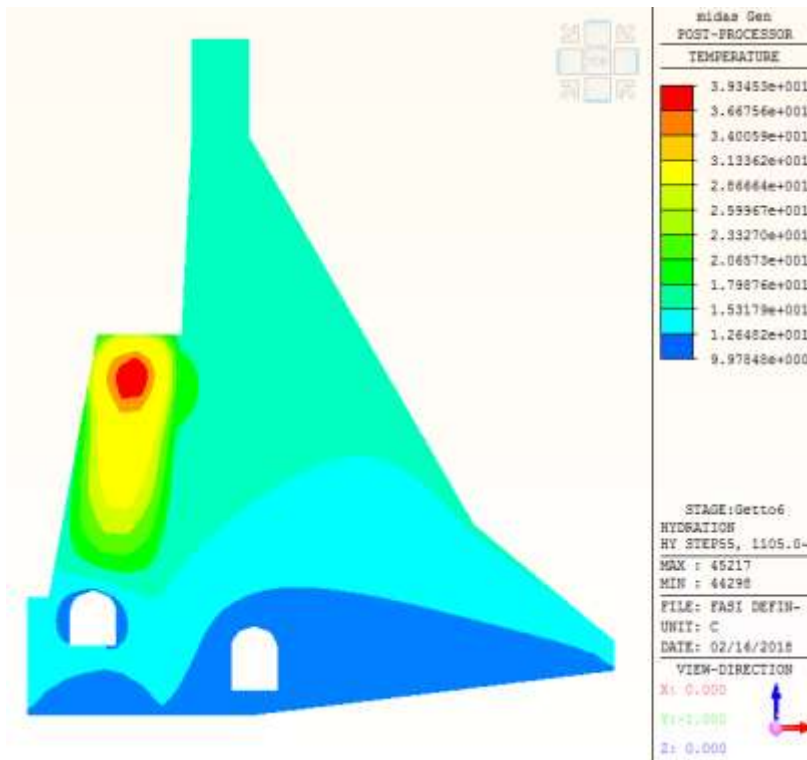


Andamento della temperatura rispettivamente del cuore del getto(rosso) e sul bordo verticale lato monte (blu) – Distanza tra cuore e bordo pari a 1,50 m ( $\Delta T_{max}/m = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

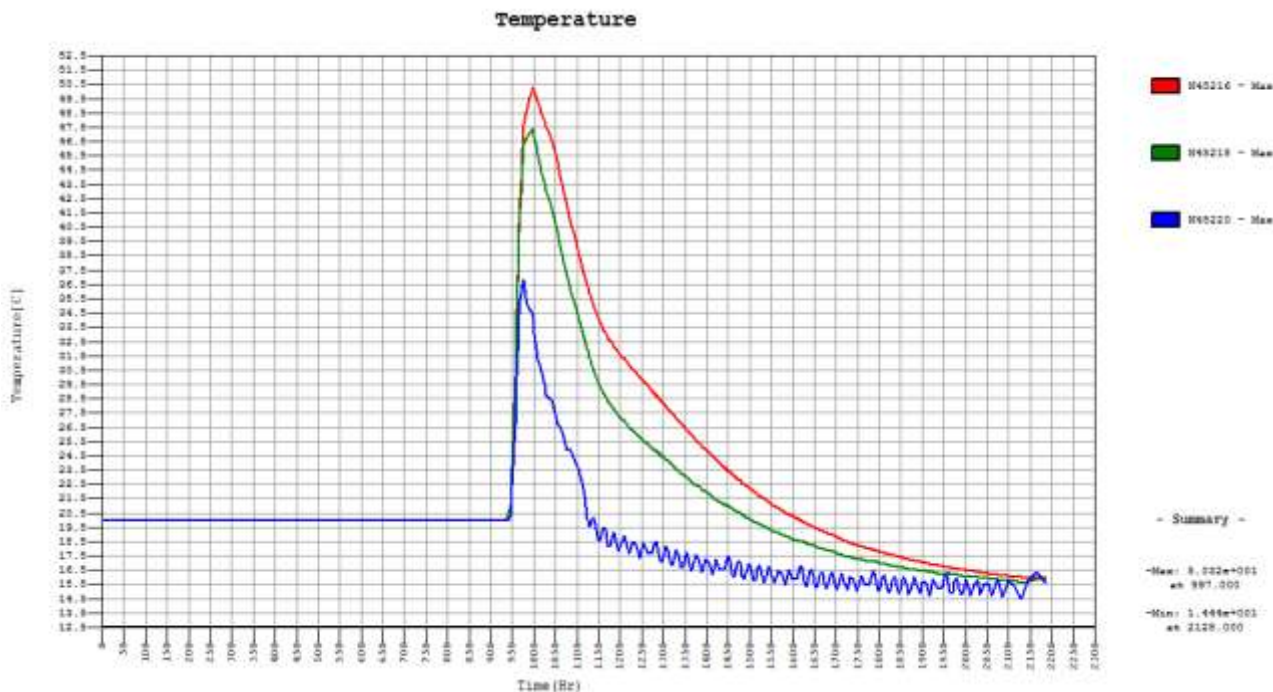


*Coefficienti di verifica con riferimento alla tensione principale di trazione (>1 verifica positiva)  
nell'istante più sfavorevole*

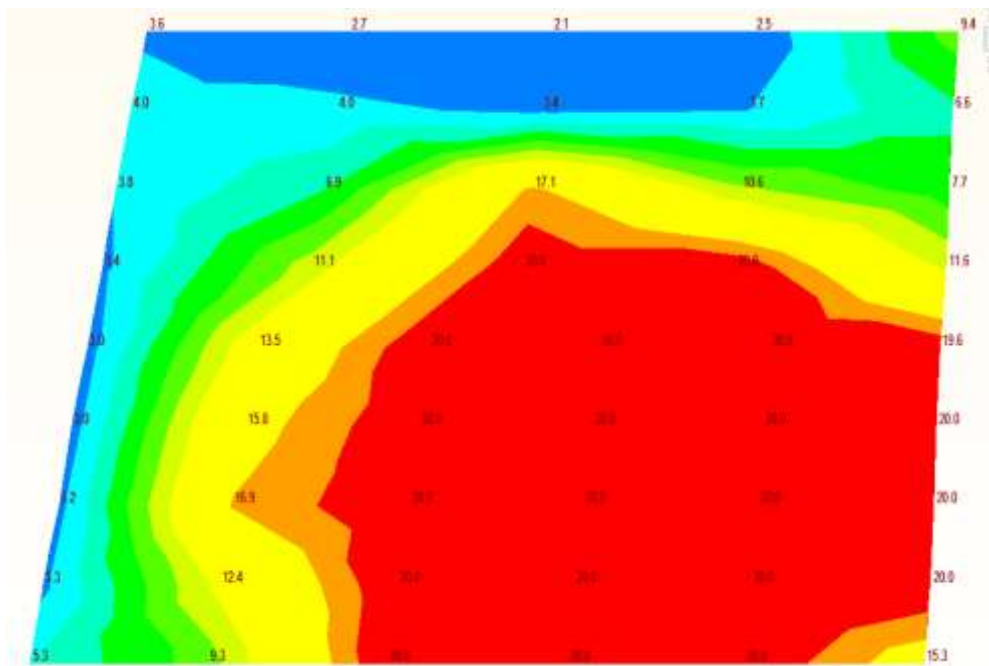
5.6 FASE 6 – GETTO 30



Temperatura corpo diga (°C) -T = 1105 hr (istante dopo 7 giorni dal getto30)



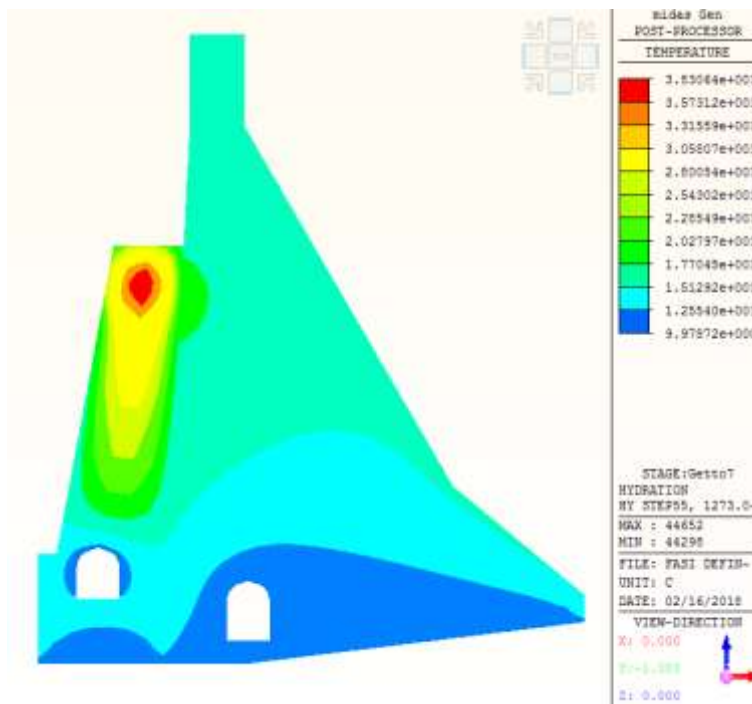
Andamento della temperatura rispettivamente del cuore del getto(rosso) e sul bordo verticale lato monte (blu) – Distanza tra cuore e bordo pari a 1,35 m ( $\Delta T_{max}/m = 18,0^{\circ}C$ )



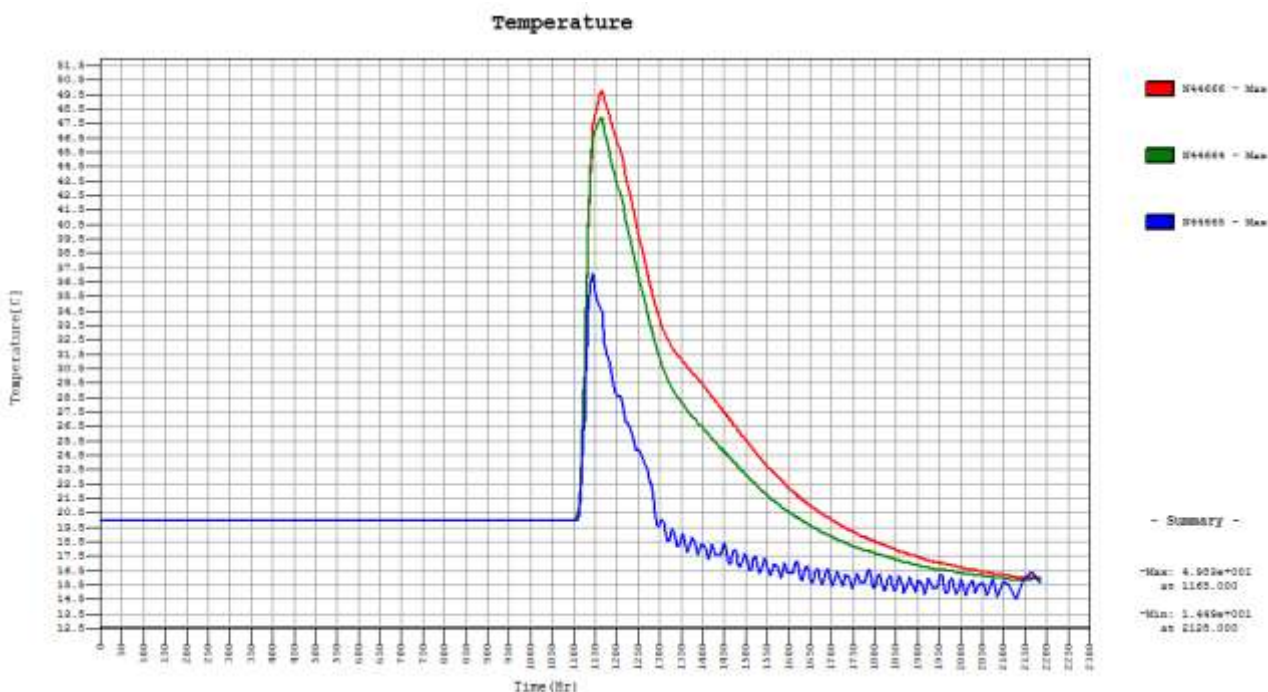
*Coefficienti di verifica con riferimento alla tensione principale di trazione (>1 verifica positiva)  
nell'istante più sfavorevole*



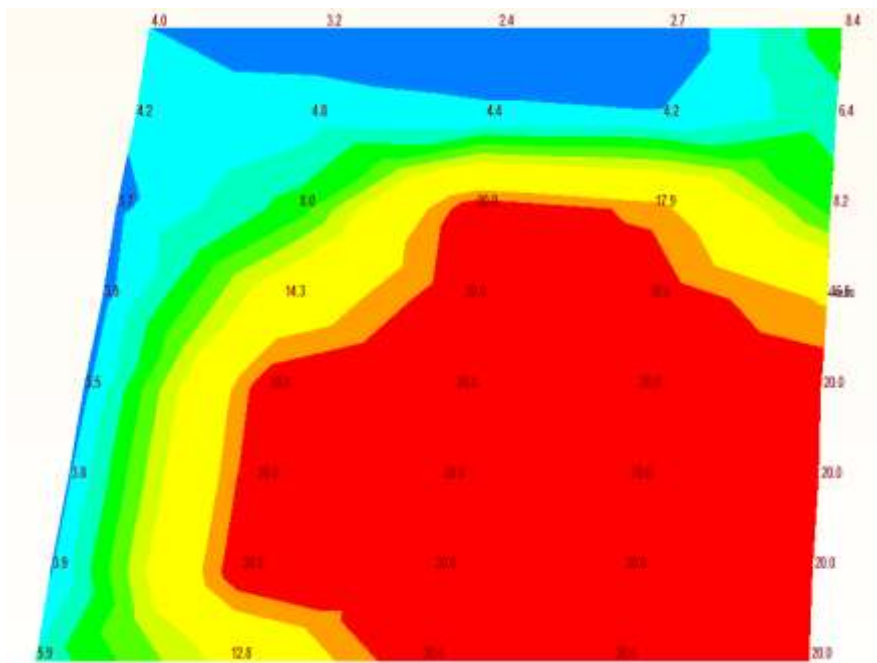
5.7 FASE 7 – GETTO 36



Temperatura corpo diga (°C) -T = 1273 hr (istante dopo 7 giorni dal getto36)



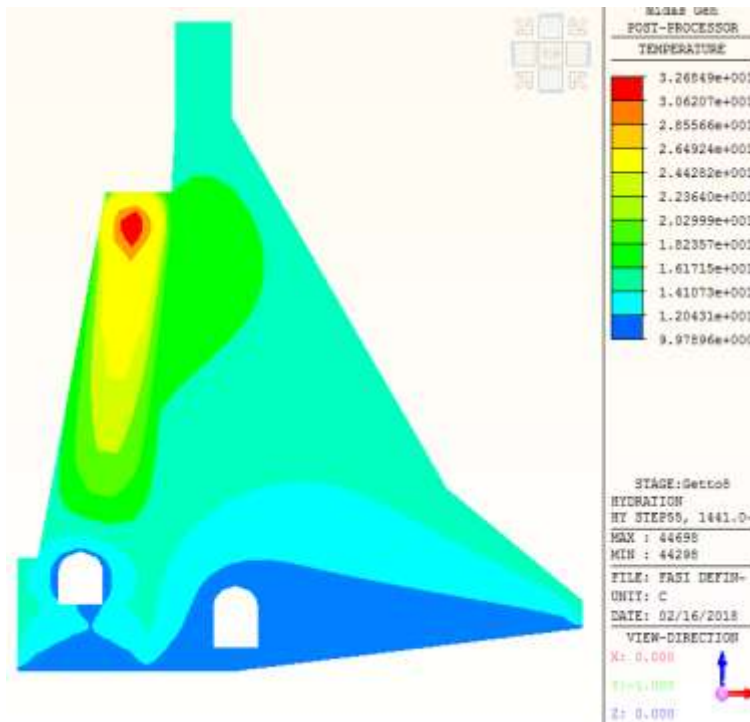
Andamento della temperatura rispettivamente del cuore del getto(rosso) e sul bordo verticale lato monte (blu) – Distanza tra cuore e bordo pari a 1,20 m ( $\Delta T_{max}/m = 18,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )



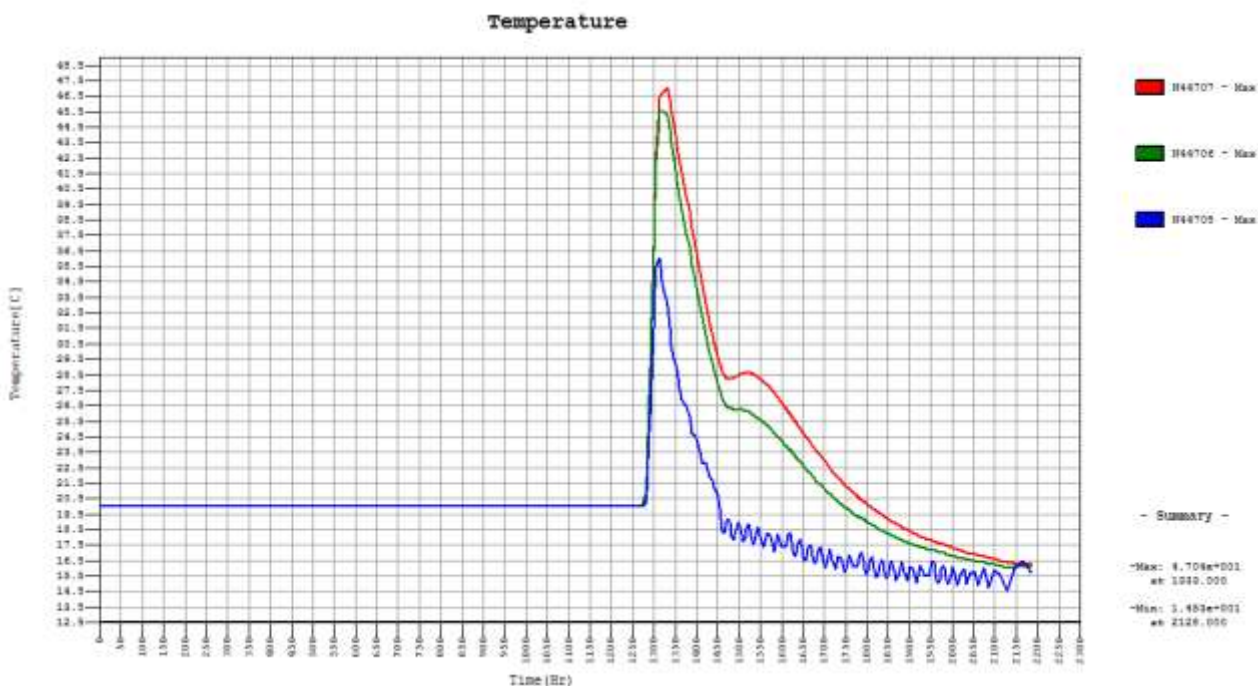
*Coefficienti di verifica con riferimento alla tensione principale di trazione (>1 verifica positiva)  
nell'istante più sfavorevole*



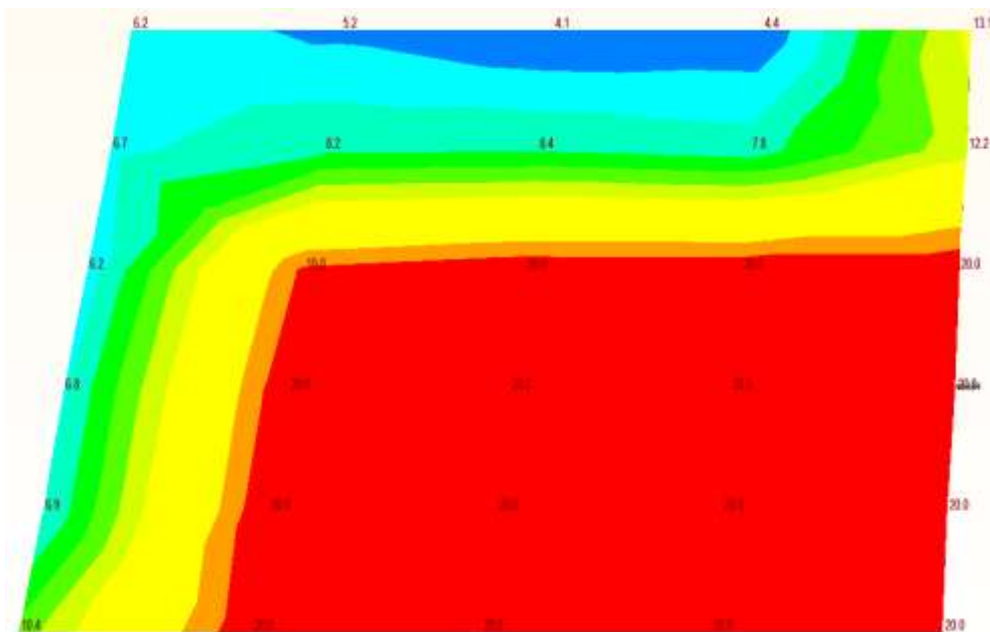
5.8 FASE 8 – GETTO 42



Temperatura corpo diga (°C) - T = 1441 hr (istante dopo 7 giorni dal getto42)

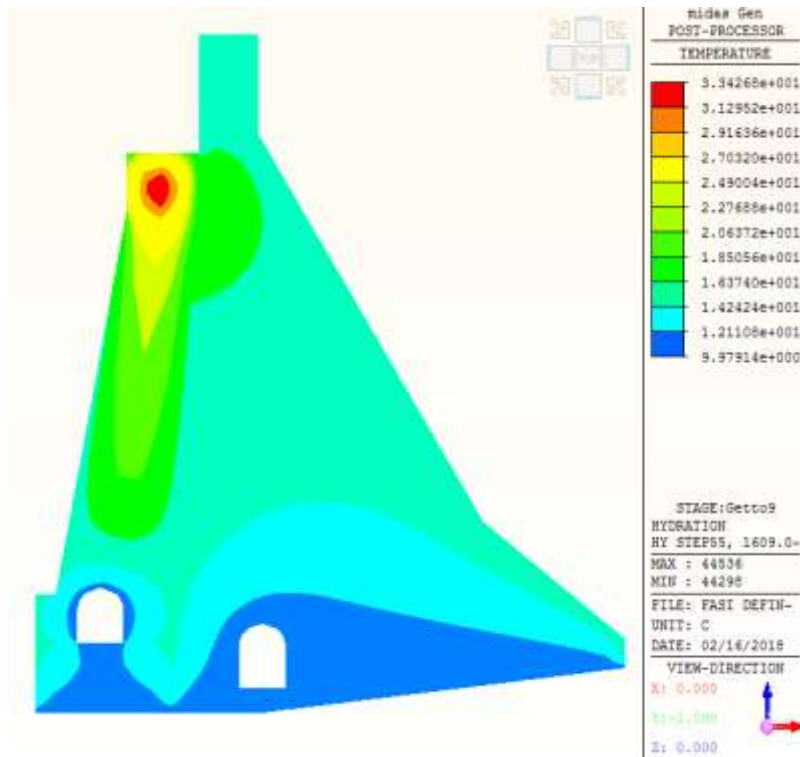


Andamento della temperatura rispettivamente del cuore del getto(rosso) e sul bordo verticale lato monte (blu) – Distanza tra cuore e bordo pari a 1,10 m ( $\Delta T_{max/m} = 18,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

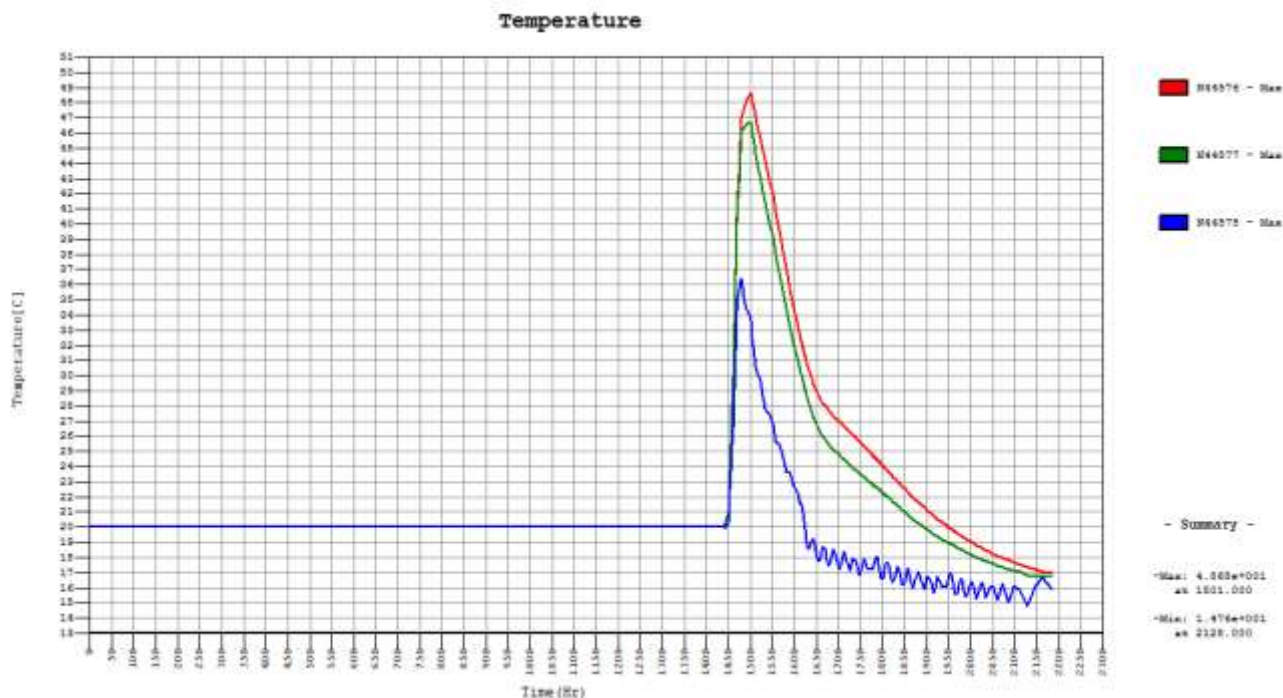


*Coefficienti di verifica con riferimento alla tensione principale di trazione ( $>1$  verifica positiva) nell'istante più sfavorevole*

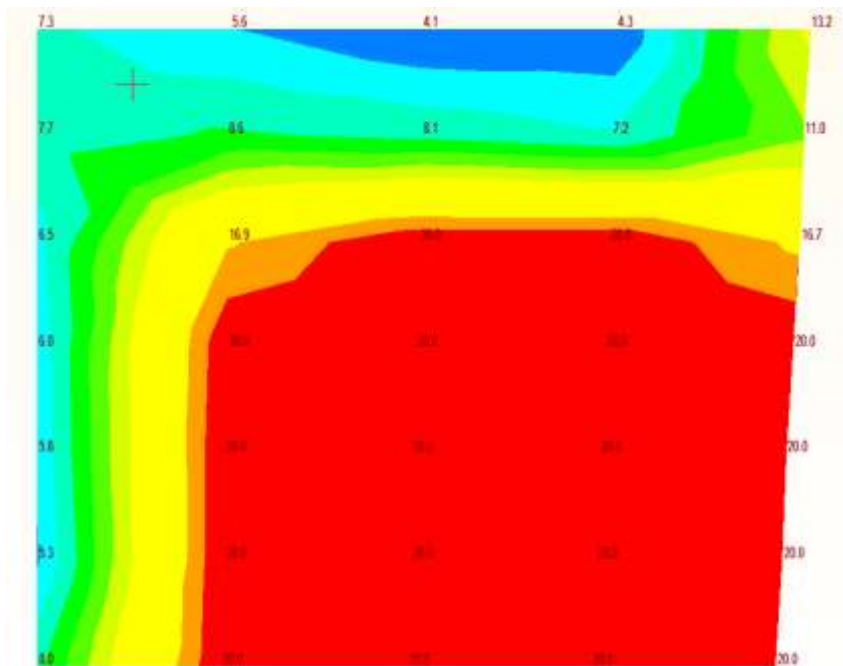
5.9 FASE 9 – GETTO 48



Temperatura corpo diga (°C) -T = 1609 hr (istante dopo 7 giorni dal getto48)

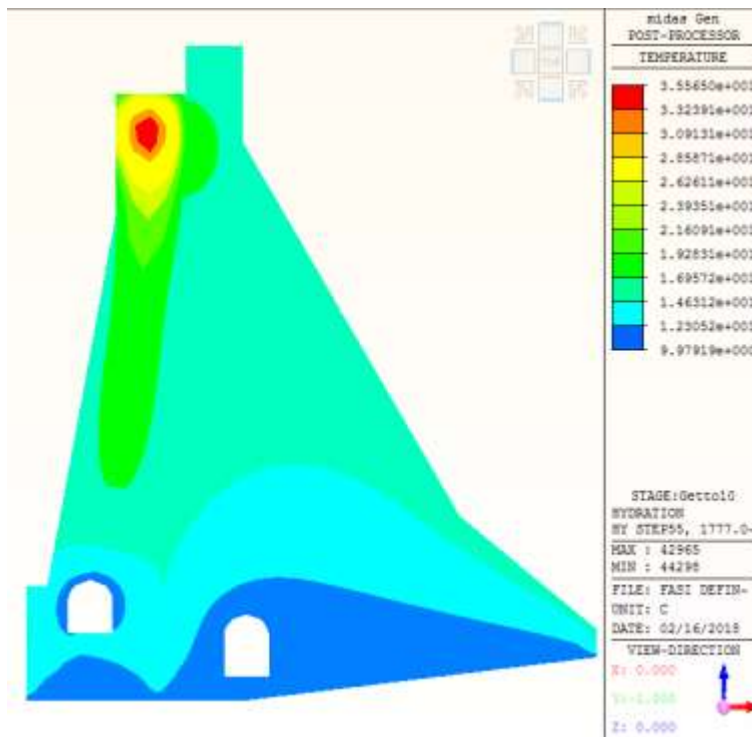


Andamento della temperatura rispettivamente del cuore del getto(rosso) e sul bordo verticale lato monte (blu) – Distanza tra cuore e bordo pari a 1,00 m ( $\Delta T_{max}/m = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

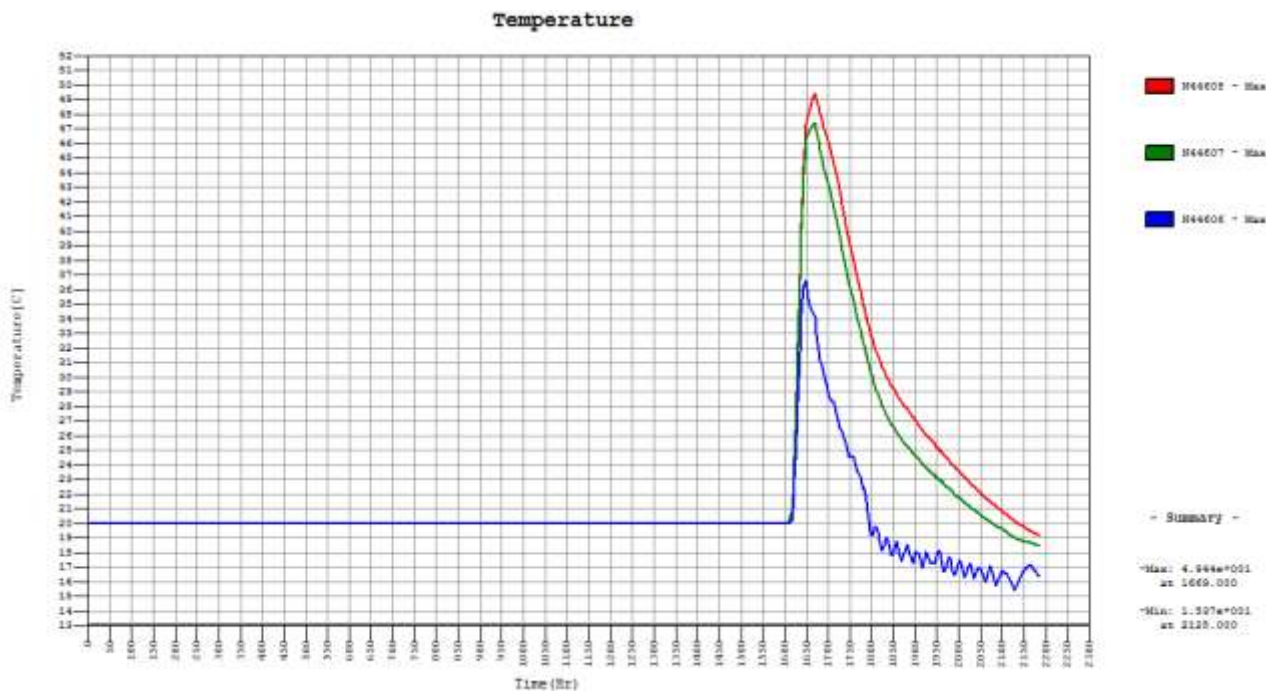


*Coefficienti di verifica con riferimento alla tensione principale di trazione (>1 verifica positiva)  
nell'istante più sfavorevole*

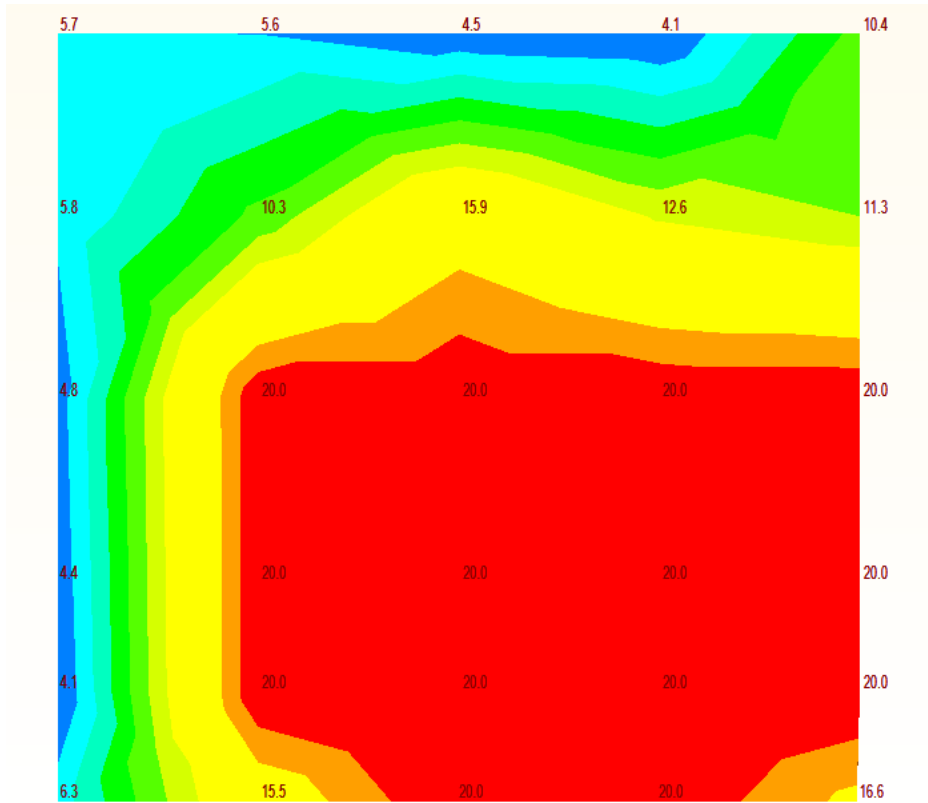
5.10 FASE 10 – GETTO 56



Temperatura corpo diga (°C) -T = 1777 hr (istante dopo 7 giorni dal getto56)



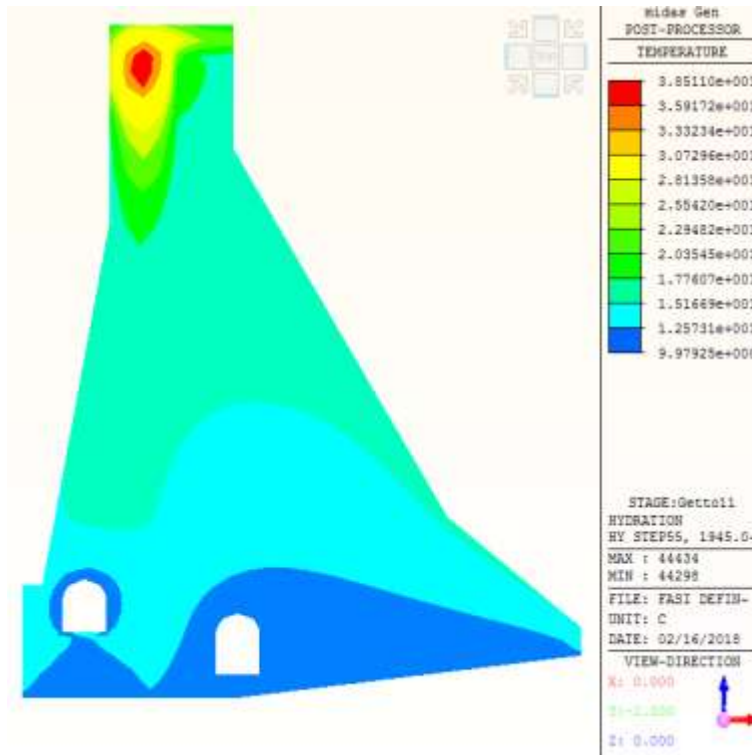
Andamento della temperatura rispettivamente del cuore del getto(rosso) e sul bordo verticale lato monte (blu) – Distanza tra cuore e bordo pari a 1,00 m ( $\Delta T_{max}/m = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )



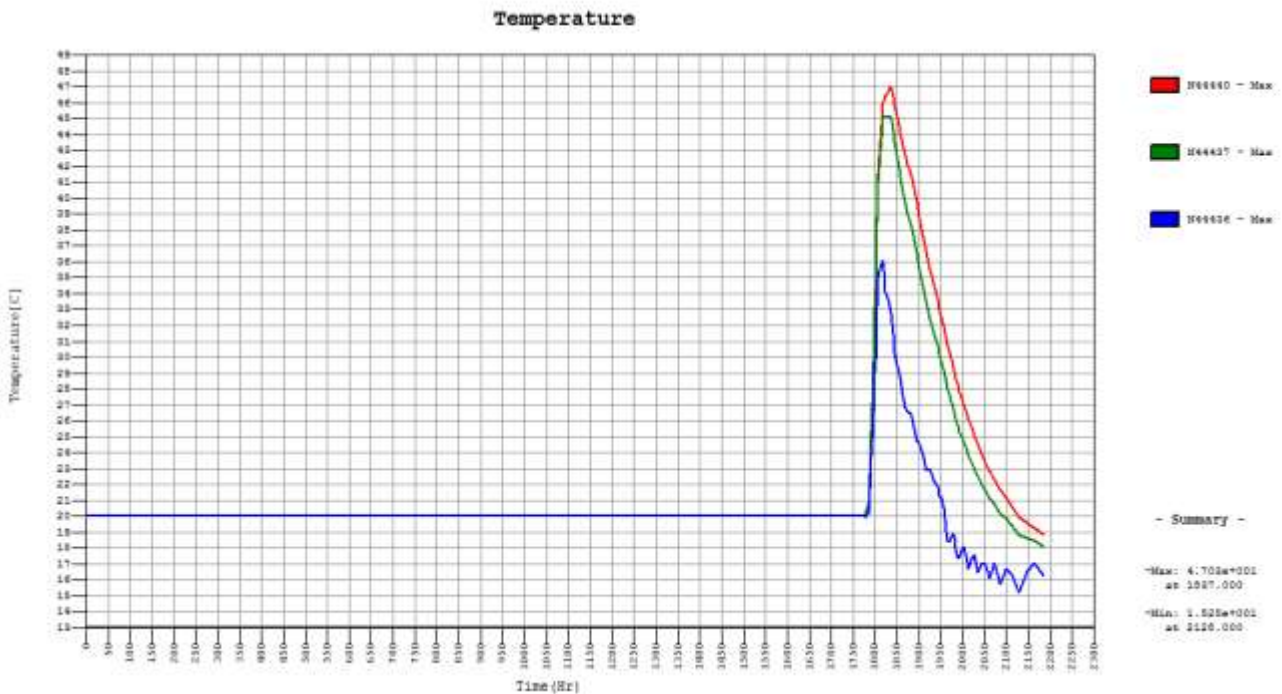
*Coefficienti di verifica con riferimento alla tensione principale di trazione (>1 verifica positiva)  
nell'istante più sfavorevole*



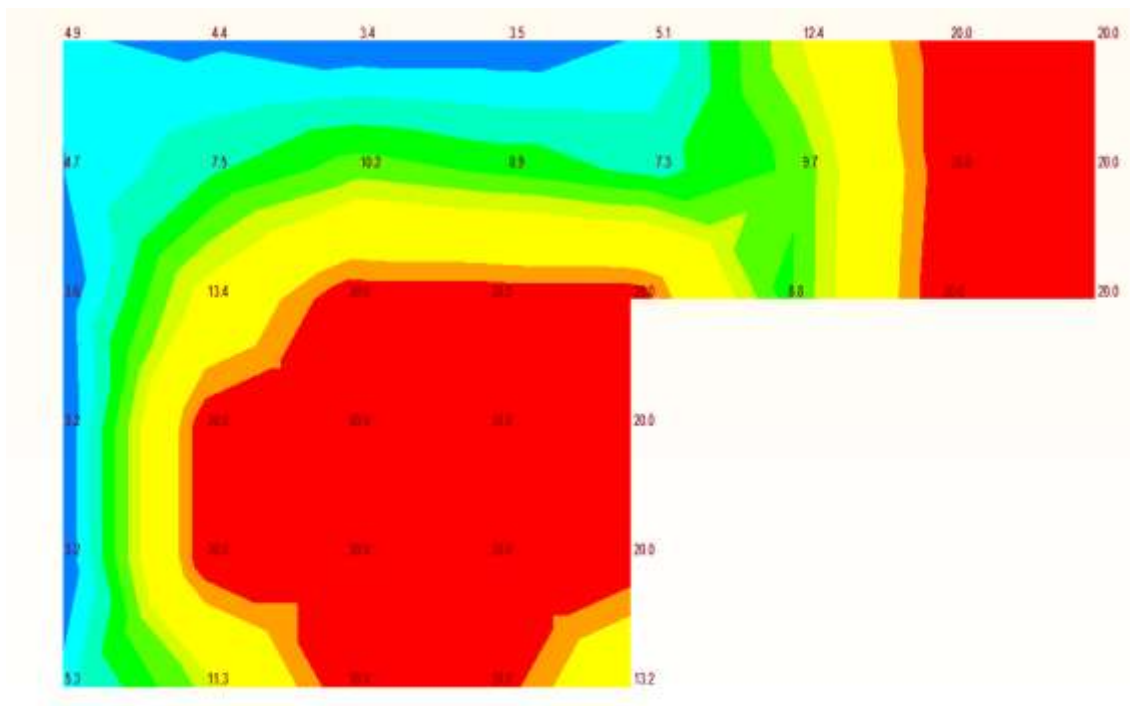
5.11 FASE 11 – GETTO 61



Temperatura corpo diga (°C) -T = 1945 hr (istante dopo 7 giorni dal getto61)



Andamento della temperatura rispettivamente del cuore del getto(rosso) e sul bordo verticale lato monte (blu) – Distanza tra cuore e bordo pari a 1,00 m ( $\Delta T_{max}/m = 19\text{ }^{\circ}\text{C}$ )



*Coefficienti di verifica con riferimento alla tensione principale di trazione (>1 verifica positiva)  
nell'istante più sfavorevole*

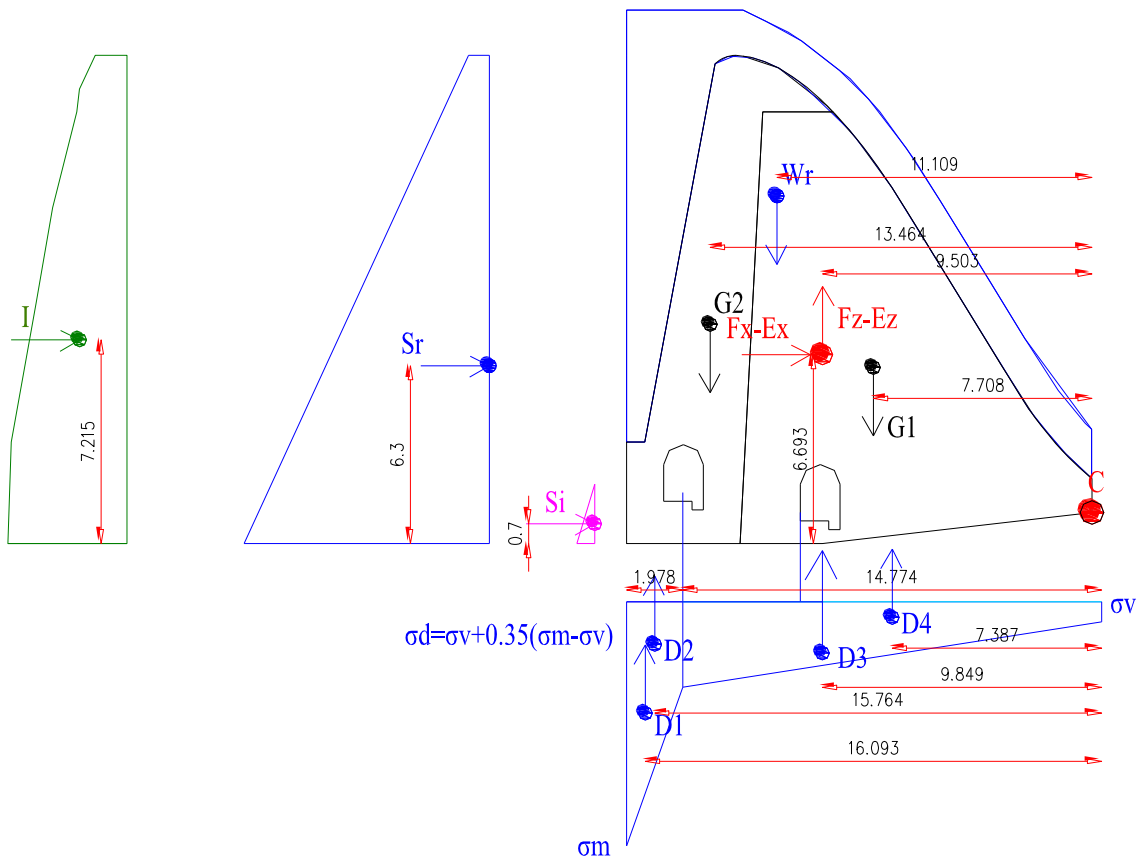


**6. CONCIO A / SEZIONE TRACIMABILE (DIGA APPESANTITA – D.M.24/03/1982)**

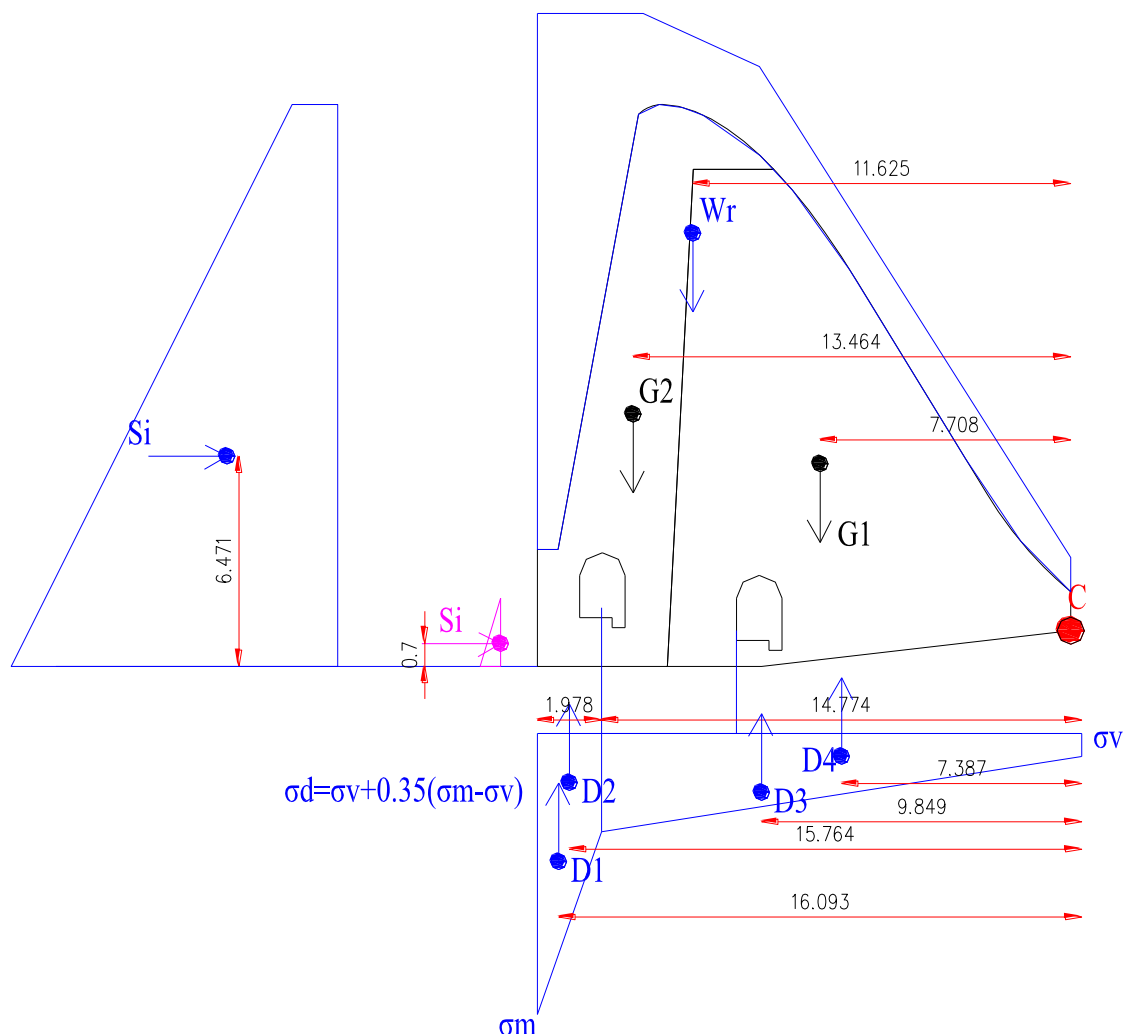
**6.1 VERIFICHE A RIBALTAMENTO E TRASLAZIONE DEL CORPO DIGA**

**6.1.1 AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE DI BASE**

Le verifiche sono condotte su una striscia di diga appesantita di larghezza 1 m:



*Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua in condizione sismica (+627,6 m) per le verifiche in corrispondenza della sezione di base*



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massimo invaso (+628,62 m) per la combinazione statica in corrispondenza della sezione di base

Le verifiche a ribaltamento e traslazione sono state condotte a favore di sicurezza considerando l'andamento delle sottopressioni lineare tra il nuovo drenone realizzato a monte e la pressione di valle, senza quindi mettere in conto l'ulteriore contributo di riduzione delle sottopressioni dovuto alla presenza del drenone esistente nel corpo diga di valle. Infine nelle verifiche a traslazione non è stato messo in conto a favore di sicurezza il contributo positivo dovuto alla pendenza esistente (in leggera salita da monte verso valle) sul contatto tra il corpo diga di valle e la roccia di fondazione.

Di seguito si riportano i carichi messi in conto:

Peso proprio

Il peso proprio della sezione trascinabile presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{cls,esist} = 117,5 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 2787 \text{ kN/m} \text{ (peso diga esistente)}$$

$$G_2 = A_c \times \rho_{cls,nuovo} = 53,3 \text{ m}^2 \times 24,00 \text{ kN/m}^3 = 1279 \text{ kN/m} \text{ (peso appesantimento)}$$

$b_{G1} = 7,708$  m (braccio orizzontale peso diga esistente rispetto punto di rotazione)

$b_{G2} = 13,464$  m (braccio orizzontale peso appesantimento rispetto punto di rotazione)

$G_{tot} = G_1 + G_2 = 4066$  kN/m (peso totale diga)

$M_{Gtot} = (G_1 \times b_{G1}) + (G_2 \times b_{G2}) = (2787 \text{ kN/m} \times 7,708 \text{ m}) + (1279 \text{ kN/m} \times 13,464 \text{ m}) = 38702$  kNm/m  
(momento totale stabilizzante)

### Spinta acqua cmb. sismica

$H_{max} = 18,9$  m

$p_{max} (H=18,9 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max.reg} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 18,9 \text{ m} = 189$  kN/m<sup>2</sup> (pressione acqua alla base)

$p_{min} (H=1,6 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max.inv} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 1,6 \text{ m} = 16$  kN/m<sup>2</sup> (pressione minima sommità)

$S_i = (p_{max} + p_{min}) \times 17,3 \text{ m} / 2 = (189 + 16) \text{ kN/m}^2 \times 17,3 \text{ m} / 2 = 1773$  kN /m (spinta orizzontale)

$W_r = (A_r \times \rho_w) = 57,0 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 570$  kN/m (peso acqua)

$b_{Wr} = 11,109$  m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{Sr} = 6,3$  m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{Wr} = W_r \times b_{Wr} = 570 \text{ kN/m} \times 11,109 \text{ m} = 6332$  kNm/m (momento stabilizzante)

$M_{Sr} = S_r \times h_{Sr} = 1773 \text{ kN/m} \times 6,3 \text{ m} = 11170$  kNm/m (momento instabilizzante)

### Spinta acqua max invaso

$H_{max.inv} = 20,1$  m (livello acqua massimo invaso)

$p_{max} (H=20,1 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max.inv} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 20,1 \text{ m} = 201$  kN/m<sup>2</sup> (pressione acqua alla base)

$p_{min} (H=2,8 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max.inv} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 2,8 \text{ m} = 28$  kN/m<sup>2</sup> (pressione minima sommità)

$S_i = (p_{max} + p_{min}) \times 17,3 \text{ m} / 2 = (201 + 28) \text{ kN/m}^2 \times 17,3 \text{ m} / 2 = 1981$  kN /m (spinta orizzontale)

$W_i = (A_i \times \rho_w) = 63,0 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 630$  kN/m (peso acqua)

$b_{Wi} = 11,625$  m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{Si} = 6,471$  m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{Wi} = W_i \times b_{Wi} = 630 \text{ kN/m} \times 11,625 \text{ m} = 7324$  kNm/m (momento stabilizzante)

$M_{Si} = S_i \times h_{Si} = 1981 \text{ kN/m} \times 6,471 \text{ m} = 12819$  kNm/m (momento instabilizzante)

### Spinta interrimento

$H_{max.int} = 2,1$  m (livello interrimento)

$p_{max} (H=2,1 \text{ m}) = \rho_f \times H_{max.int} = 6 \text{ kN/m}^3 \times 2,1 \text{ m} = 12,6$  kN/m<sup>2</sup> (pressione alla base)

$S_i = (p_{max} \times H_{max.int}) / 2 = (12,6 \text{ kN/m}^2 \times 2,1 \text{ m}) / 2 = 13,2$  kN /m (spinta orizzontale)

$h_{S_{wi}} = 0,7 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{Si} = S_i \times h_{S_{wi}} = 13,2 \text{ kN/m} \times 0,7 \text{ m} = 9,24 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

### Sottopressioni

Nel calcolo delle sottopressioni si considera un livello idrostatico a valle pari a 1,3 m. Tale valore corrisponde all'altezza del calcestruzzo dello scivolo nell'ipotesi che si possa generare infiltrazione all'interno della suola in calcestruzzo dello scivolo. L'acqua che tracima dalla diga viene rilasciata in alveo circa 40 m più a valle della diga, pertanto la pressione idrostatica a valle della diga dovrebbe essere a rigore pari a zero, a meno appunto della presenza di possibili infiltrazioni.

$H_{max} = 18,9 \text{ m}$  (livello acqua massima cmb sismica)

$\sigma_m (H=18,9 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max} \cdot g = 10 \text{ kN/m}^3 \times 18,9 \text{ m} = 189 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua alla base a monte)

$\sigma_v (h_v=1,3 \text{ m}) = \rho_w \times h_v = 10 \text{ kN/m}^3 \times 1,3 \text{ m} = 13 \text{ kN/m}^2$

$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 13 + 0,35 \times (189 - 13 \text{ kN/m}^2) = 75 \text{ kN/m}^2$  (pressione dreno)

$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,978 \text{ m}) / 2 = (189 \text{ kN/m}^2 - 75 \text{ kN/m}^2) \times (1,978 \text{ m}) / 2 = 113 \text{ kN/m}$

$D2 = (\sigma_d) \times (1,978 \text{ m}) = (75 \text{ kN/m}^2) \times (1,978 \text{ m}) = 148 \text{ kN/m}$

$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (14,774 \text{ m}) / 2 = (75 - 13 \text{ kN/m}^2) \times (14,774 \text{ m}) / 2 = 458 \text{ kN/m}$

$D4 = (\sigma_v) \times (14,774 \text{ m}) = (13 \text{ kN/m}^2) \times (14,774 \text{ m}) = 192 \text{ kN/m}$

$D = D1 + D2 + D3 + D4 = 113 + 148 + 458 + 192 = 911 \text{ kN/m}$  (livello max. regolazione)

$b_{D1} = 16,093 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D2} = 15,764 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D3} = 9,85 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D4} = 7,39 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 113 \text{ kN/m} \times 16,093 \text{ m} = 1819 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 148 \text{ kN/m} \times 15,764 \text{ m} = 2333 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 458 \text{ kN/m} \times 9,85 \text{ m} = 4511 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D4} = D4 \times b_{D4} = 192 \text{ kN/m} \times 7,39 \text{ m} = 1419 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} + M_{D4} = 1819 + 2333 + 4511 + 1419 = 10082 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante con livello massima regolazione)

$H_{max.inv} = 20,1 \text{ m}$  (livello acqua massimo invaso)

$p_{\max} (H=20,1 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\max} \cdot \text{inv} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 20,1 \text{ m} = 201 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua alla base a monte)

$\sigma_v (h_v=1,3 \text{ m}) = \rho_w \times h_v = 10 \text{ kN/m}^3 \times 1,3 \text{ m} = 13 \text{ kN/m}^2$

$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 13 + 0,35 \times (201 - 13 \text{ kN/m}^2) = 78,8 \text{ kN/m}^2$  (pressione dreno)

$D_1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,978 \text{ m}) / 2 = (201 \text{ kN/m}^2 - 78,8 \text{ kN/m}^2) \times (1,978 \text{ m}) / 2 = 121 \text{ kN/m}$

$D_2 = (\sigma_d) \times (1,978 \text{ m}) = (78,8 \text{ kN/m}^2) \times (1,978 \text{ m}) = 156 \text{ kN/m}$

$D_3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (14,774 \text{ m}) / 2 = (78,8 - 13 \text{ kN/m}^2) \times (14,774 \text{ m}) / 2 = 486 \text{ kN/m}$

$D_4 = (\sigma_v) \times (14,774 \text{ m}) = (13 \text{ kN/m}^2) \times (14,774 \text{ m}) = 192 \text{ kN/m}$

$D = D_1 + D_2 + D_3 + D_4 = 121 + 156 + 486 + 192 = 955 \text{ kN/m}$  (livello max. invaso)

$b_{D1} = 16,093 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D2} = 15,764 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D3} = 9,85 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D4} = 7,39 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$M_{D1} = D_1 \times b_{D1} = 121 \text{ kN/m} \times 16,093 \text{ m} = 1947 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D2} = D_2 \times b_{D2} = 156 \text{ kN/m} \times 15,764 \text{ m} = 2459 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D3} = D_3 \times b_{D3} = 486 \text{ kN/m} \times 9,85 \text{ m} = 4787 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D4} = D_4 \times b_{D4} = 192 \text{ kN/m} \times 7,39 \text{ m} = 1419 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} + M_{D4} = 1947 + 2459 + 4787 + 1419 = 10612 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante con livello massimo invaso)

#### Sisma $E_x$ , Monte-valle

$F_{x-E_x} = 0,03 \times 4066 \text{ kN/m} = 122 \text{ kN/m}$  (direzione Monte-Valle)

$h_{F_x-E_x} = 6,693 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{F_x-E_x} = F_{x-E_x} \times h_{F_x-E_x} = 122 \text{ kN/m} \times 6,693 \text{ m} = 817 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

#### Sisma $E_z$ , basso-alto

$F_{z-E_z} = 0,015 \times 4066 \text{ kN/m} = 61 \text{ kN/m}$  (direzione Basso-Alto)

$b_{F_z-E_z} = 9,503 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$M_{F_z-E_z} = F_{z-E_z} \times b_{F_z-E_z} = 61 \text{ kN/m} \times 9,503 \text{ m} = 580 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

#### Azioni inerziali acqua invasata

$I = 54 \text{ kN/m}$  (Spinta inerziale totale)

$h_I = 7,215$  m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_I = I \times h_I = 54 \text{ kNm/m} \times 7,215 \text{ m} = 390 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

#### 6.1.1.1 COMBINAZIONE STATICA ( $1 \times G1 + 1 \times G2 + 1 \times G3$ )

Peso proprio  $\times 1$  :

$M_{G_{tot}} = 38702 \text{ kNm/m}$  (momento totale stabilizzante)

$G_{tot} = 4066 \text{ kN/m}$  (stabilizzante)

Spinta acqua max invaso  $\times 1$

$M_{W_i} = 7324 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{S_i} = 12819 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$W_i = 630 \text{ kN/m}$  (stabilizzante)

$S_i = 1981 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

Spinta interrimento  $\times 1$

$M_{S_i} = 9,24 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$S_i = 13,2 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

Sottopressioni  $\times 1$

$M_D = 10612 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$D = 955 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

#### Verifica ribaltamento

$M_{\text{stabilizzante}} = 38702 + 7324 \text{ kNm/m} = 46026 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{\text{instabilizzante}} = 12819 + 10 + 10612 \text{ kNm/m} = 23441 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 46026 \text{ kNm/m} / 23441 \text{ kNm/m} = 1,96 > 1$  (verifica positiva)

#### Verifica traslazione

$V_{\text{stabilizzante}} = (4066 + 630 - 955 \text{ kN/m}) \times 0,75 = 2806 \text{ kNm/m}$  (stabilizzante)

$V_{\text{instabilizzante}} = 1981 + 13 \text{ kNm/m} = 1994 \text{ kNm/m}$  (instabilizzante)

$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 2806 \text{ kNm/m} / 1994 \text{ kNm/m} = 1,41 > 1$  (verifica positiva)

6.1.1.2 COMBINAZIONE SISMICA ( $G1 + G2 + G3 + E_{x, valle/monte} + 0.3 \times E_{z, Basso/Alto} + I_x$ )**6.1.1.2.1 Serbatoio pieno**Peso proprio  $\times 1$ 

$$M_{G_{tot}} = 38702 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 4066 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua (condizione sismica)  $\times 1$ 

$$M_{W_r} = 6332 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_r} = 11170 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 570 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_r = 1773 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Spinta interrimento  $\times 1$ 

$$M_{S_i} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni  $\times 1$ 

$$M_D = 10082 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 911 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ex (Monte-Valle)  $\times 1$ 

$$M_{E_{x, Monte-valle}} = 817 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex, monte-valle} = 122 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez (Basso-Alto)  $\times 0,3$ 

$$M_{E_z} = (580 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 174 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez, basso-alto} = (61 \text{ kN/m} \times 0,3) = 18 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Azioni inerziali  $\times 1$ 

$$M_I = 390 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x, monte-valle} = 54 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{stabilizzante} = 38702 + 6332 \text{ kNm/m} = 45034 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 11170 + 9 + 10082 + 817 + 174 + 390 = 22642 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 45034 \text{ kNm/m} / 22642 \text{ kNm/m} = 1,99 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (4066 + 570 - 911 - 18 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 2780 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 1773 + 13,2 + 122 + 54 \text{ kNm/m} = 1962 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 2780 \text{ kNm/m} / 1962 \text{ kNm/m} = 1,42 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**6.1.1.2.2 Serbatoio vuoto****Peso proprio  $\times 1$** 

$$M_{\text{Gtot}} = 38702 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 4066 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

**Spinta interrimento  $\times 1$** 

$$M_{\text{Si}} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Sisma Ex (Monte-Valle)  $\times 1$** 

$$M_{\text{Ex, Monte-valle}} = 817 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{X-Ex, monte-valle}} = 122 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Sisma Ez (Basso-Alto)  $\times 0,3$** 

$$M_{\text{Ez}} = (580 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 174 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{Z-Ez, basso-alto}} = (61 \text{ kN/m} \times 0,3) = 18 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 38702 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 9 + 817 + 174 = 1000 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 38702 \text{ kNm/m} / 1000 \text{ kNm/m} = 38,7 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (4066 - 18 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 3036 \text{ kNm/m}$$

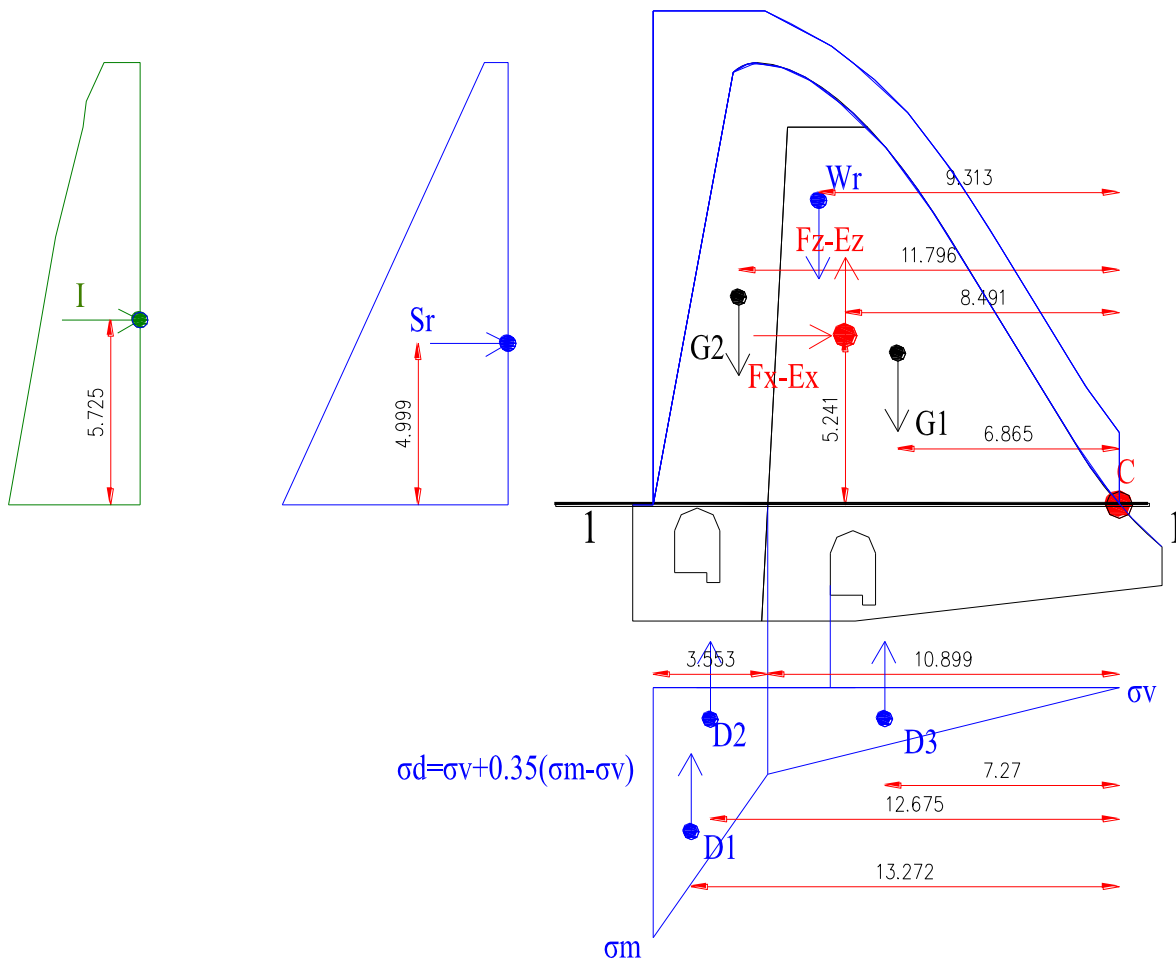
$$V_{\text{instabilizzante}} = 13,2 + 122 \text{ kNm/m} = 135 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 3036 \text{ kNm/m} / 135 \text{ kNm/m} = 22,5 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

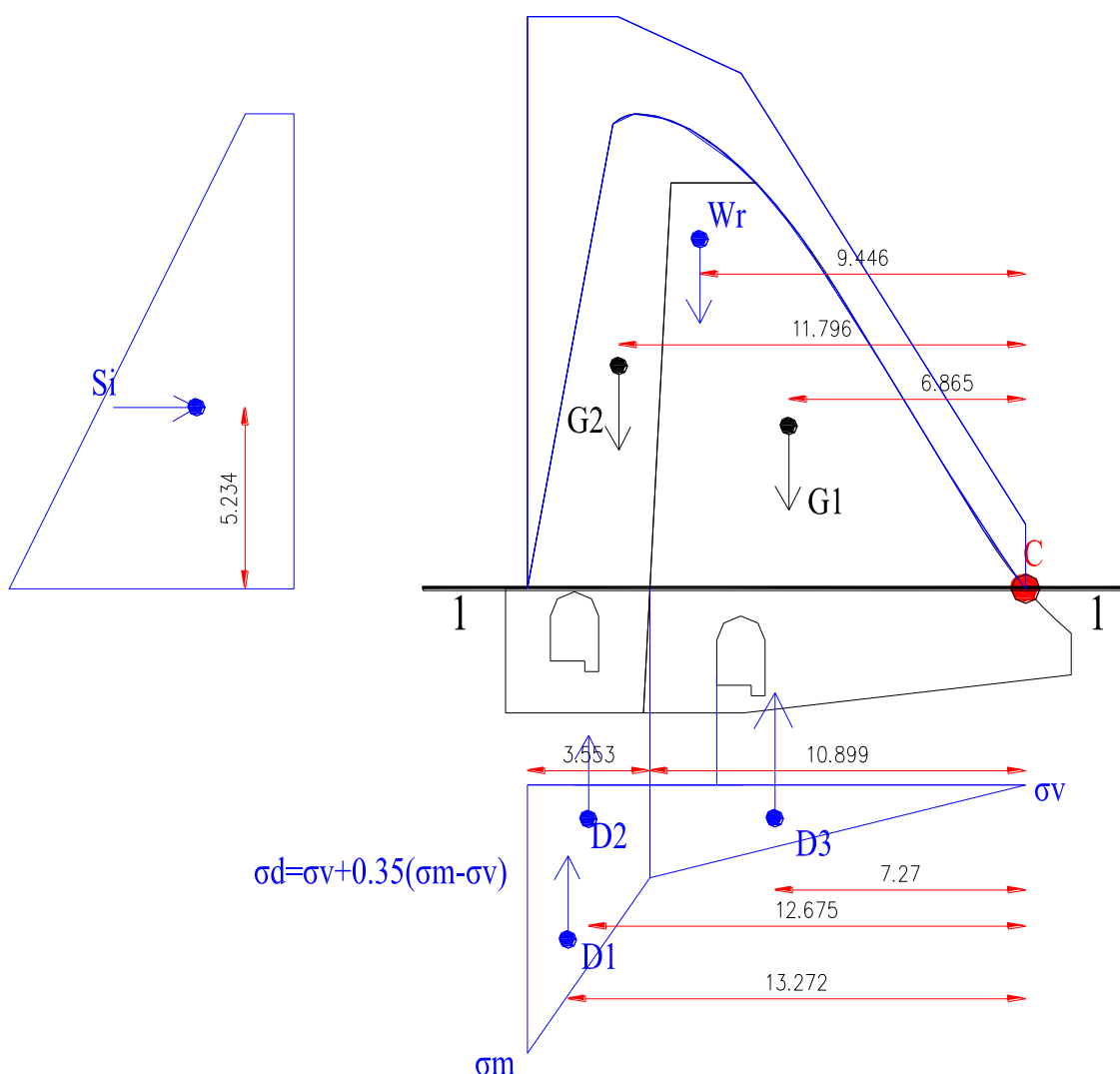


6.1.2 AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 1-1

Le verifiche sono condotte su una striscia di diga appesantita di larghezza 1 m:



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua in condizione sismica (+627,6 m) per le verifiche in corrispondenza della sezione 1-1



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massimo invaso (+628,62 m) per la combinazione statica in corrispondenza della sezione 1-1

Le verifiche a ribaltamento e traslazione sono state condotte a favore di sicurezza considerando l'andamento delle sottopressioni lineare tra il nuovo dreno realizzato a monte e la pressione di valle, senza quindi mettere in conto l'ulteriore contributo di riduzione delle sottopressioni dovuto alla presenza del dreno esistente nel corpo diga di valle.

Di seguito si riportano i carichi messi in conto:

Peso proprio

Il peso proprio della sezione trascinabile presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{cls, esist} = 79,3 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 1881 \text{ kN/m} \text{ (peso diga esistente)}$$

$$G_2 = A_c \times \rho_{cls, nuovo} = 38,5 \text{ m}^2 \times 24,00 \text{ kN/m}^3 = 924 \text{ kN/m} \text{ (peso appesantimento)}$$

$$b_{G1} = 6,865 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale peso diga esistente rispetto punto di rotazione)}$$

$b_{G2} = 11,795$  m (braccio orizzontale peso appesantimento rispetto punto di rotazione)

$G_{tot} = G_1 + G_2 = 2805$  kN/m (peso totale diga)

$M_{Gtot} = (G_1 \times b_{G1}) + (G_2 \times b_{G2}) = (1881 \text{ kN/m} \times 6,865 \text{ m}) + (924 \text{ kN/m} \times 11,795 \text{ m}) = 23812$  kNm/m  
(momento totale stabilizzante)

#### Spinta acqua cmb. sismica

$H_{max} = 15,3$  m

$p_{max} (H=15,3 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 15,3 \text{ m} = 153$  kN/m<sup>2</sup> (pressione acqua alla base)

$p_{min} (H=1,6 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max.inv} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 1,6 \text{ m} = 16$  kN/m<sup>2</sup> (pressione minima sommità)

$S_i = (p_{max} + p_{min}) \times 13,7 \text{ m} / 2 = (153 + 16) \text{ kN/m}^2 \times 13,7 \text{ m} / 2 = 1158$  kN /m (spinta orizzontale)

$W_r = (A_r \times \rho_w) = 44,6 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 446$  kN/m (peso acqua)

$b_{Wr} = 9,313$  m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{Sr} = 5,0$  m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{Wr} = W_r \times b_{Wr} = 446 \text{ kN/m} \times 9,313 \text{ m} = 4154$  kNm/m (momento stabilizzante)

$M_{Sr} = S_r \times h_{Sr} = 1158 \text{ kN/m} \times 5 \text{ m} = 5790$  kNm/m (momento instabilizzante)

#### Spinta acqua max invaso

$H_{max.inv} = 16,5$  m (livello acqua massimo invaso)

$p_{max} (H=16,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max.inv} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 16,5 \text{ m} = 165$  kN/m<sup>2</sup> (pressione acqua)

$p_{min} (H=2,8 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max.inv} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 2,8 \text{ m} = 28$  kN/m<sup>2</sup> (pressione minima sommità)

$S_i = (p_{max} + p_{min}) \times 13,7 \text{ m} / 2 = (165 + 28) \text{ kN/m}^2 \times 13,7 \text{ m} / 2 = 1322$  kN /m (spinta orizzontale)

$W_r = (A_i \times \rho_w) = 52,2 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 522$  kN/m (peso acqua)

$b_{Wri} = 9,446$  m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{Si} = 5,234$  m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{Wi} = W_r \times b_{Wr} = 522 \text{ kN/m} \times 9,446 \text{ m} = 4931$  kNm/m (momento stabilizzante)

$M_{Si} = S_i \times h_{Si} = 1322 \text{ kN/m} \times 5,234 \text{ m} = 6919$  kNm/m (momento instabilizzante)

#### Sottopressioni

$H_{max} = 15,3$  m (livello acqua massima cmb sismica)

$\sigma_m (H=15,3 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max.reg} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 15,3 \text{ m} = 153$  kN/m<sup>2</sup> (pressione acqua alla base a monte)

$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0$  kN/m<sup>2</sup>

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (153 - 0 \text{ kN/m}^2) = 54 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D_1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (3,553 \text{ m}) / 2 = (153 \text{ kN/m}^2 - 54 \text{ kN/m}^2) \times (3,553 \text{ m}) / 2 = 176 \text{ kN/m}$$

$$D_2 = (\sigma_d) \times (3,553 \text{ m}) = (54 \text{ kN/m}^2) \times (3,553 \text{ m}) = 192 \text{ kN/m}$$

$$D_3 = (\sigma_d) \times (10,899 \text{ m}) / 2 = (54 \text{ kN/m}^2) \times (10,899 \text{ m}) / 2 = 294 \text{ kN/m}$$

$$D = D_1 + D_2 + D_3 = 176 + 192 + 294 = 662 \text{ kN/m (livello max. regolazione)}$$

$$b_{D1} = 13,272 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 12,675 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 7,27 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D_1 \times b_{D1} = 176 \text{ kN/m} \times 13,272 \text{ m} = 2336 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D_2 \times b_{D2} = 192 \text{ kN/m} \times 12,675 \text{ m} = 2434 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D_3 \times b_{D3} = 294 \text{ kN/m} \times 7,27 \text{ m} = 2137 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 2336 + 2434 + 2137 = 6907 \text{ kNm/m (momento instabilizzante con livello sismico)}$$

$$H_{\text{max.inv}} = 16,5 \text{ m (livello acqua massimo invaso)}$$

$$p_{\text{max}} (H=16,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 16,5 \text{ m} = 165 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua)}$$

$$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (165 - 0 \text{ kN/m}^2) = 58,0 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D_1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (3,553 \text{ m}) / 2 = (165 \text{ kN/m}^2 - 58,0 \text{ kN/m}^2) \times (3,553 \text{ m}) / 2 = 190 \text{ kN/m}$$

$$D_2 = (\sigma_d) \times (3,553 \text{ m}) = (58 \text{ kN/m}^2) \times (3,553 \text{ m}) = 206 \text{ kN/m}$$

$$D_3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (10,899 \text{ m}) / 2 = (58,0 - 0,0 \text{ kN/m}^2) \times (10,899 \text{ m}) / 2 = 316 \text{ kN/m}$$

$$D = D_1 + D_2 + D_3 = 190 + 206 + 316 = 712 \text{ kN/m (livello max. invaso)}$$

$$b_{D1} = 13,272 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 12,675 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 7,27 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D_1 \times b_{D1} = 190 \text{ kN/m} \times 13,272 \text{ m} = 2522 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D_2 \times b_{D2} = 206 \text{ kN/m} \times 12,675 \text{ m} = 2611 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D_3 \times b_{D3} = 316 \text{ kN/m} \times 7,27 \text{ m} = 2297 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 2522 + 2611 + 2297 = 7430 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante con livello massimo invasivo})$$

Sisma  $E_x$ , Monte-valle

$$F_{x-Ex} = 0,03 \times 2805 \text{ kN/m} = 84 \text{ kN/m} \quad (\text{direzione Monte-Valle})$$

$$h_{F_x-Ex} = 5,241 \text{ m} \quad (\text{braccio verticale rispetto punto di rotazione})$$

$$M_{F_x-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{F_x-Ex} = 84 \text{ kN/m} \times 5,241 \text{ m} = 440 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

Sisma  $E_z$ , basso-alto

$$F_{z-Ez} = 0,015 \times 2805 \text{ kN/m} = 42 \text{ kN/m} \quad (\text{direzione Basso-Alto})$$

$$b_{F_z-Ez} = 8,491 \text{ m} \quad (\text{braccio orizzontale rispetto punto di rotazione})$$

$$M_{F_z-Ez} = F_{z-Ez} \times b_{F_z-Ez} = 42 \text{ kN/m} \times 8,491 \text{ m} = 357 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

Azioni inerziali acqua invasata

$$I = 39 \text{ kN/m} \quad (\text{Spinta inerziale totale})$$

$$h_I = 5,725 \text{ m} \quad (\text{braccio verticale rispetto punto di rotazione})$$

$$M_I = I \times h_I = 39 \text{ kNm/m} \times 5,725 \text{ m} = 223 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

**6.1.2.1 COMBINAZIONE STATICA ( $1 \times G1 + 1 \times G2 + 1 \times G3$ )**

Peso proprio  $\times 1$  :

$$M_{G_{tot}} = 23812 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento totale stabilizzante})$$

$$G_{tot} = 2805 \text{ kN/m} \quad (\text{stabilizzante})$$

Spinta acqua max invasivo  $\times 1$

$$M_{W_i} = 4931 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento stabilizzante})$$

$$M_{S_i} = 6919 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

$$W_i = 522 \text{ kN/m} \quad (\text{stabilizzante})$$

$$S_i = 1322 \text{ kN/m} \quad (\text{instabilizzante})$$

Sottopressioni  $\times 1$

$$M_D = 7430 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

$$D = 712 \text{ kN/m} \quad (\text{instabilizzante})$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 23812 + 4931 \text{ kNm/m} = 28743 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento stabilizzante})$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 6919 + 7430 \text{ kNm/m} = 14349 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 28743 \text{ kNm/m} / 14349 \text{ kNm/m} = 2,00 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### Verifica traslazione

$$V_{\text{stabilizzante}} = (2805 + 522 - 712 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1961 \text{ kNm/m} \text{ (stabilizzante)}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 1322 \text{ kNm/m} \text{ (instabilizzante)}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1961 \text{ kNm/m} / 1322 \text{ kNm/m} = 1,48 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

## 6.1.2.2 COMBINAZIONE SISMICA ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,\text{valle/monte}} + 0,3 \times E_{z,\text{Basso/Alto}} + I_x$ )

### 6.1.2.2.1 Serbatoio pieno

#### Peso proprio $\times 1$

$$M_{\text{Gtot}} = 23812 \text{ kNm/m} \text{ (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 2805 \text{ kN/m} \text{ (stabilizzante)}$$

#### Spinta acqua (condizione sismica) $\times 1$

$$M_{\text{Wr}} = 4154 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{Sr}} = 5790 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 446 \text{ kN/m} \text{ (stabilizzante)}$$

$$S_r = 1158 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

#### Sottopressioni $\times 1$

$$M_{\text{D}} = 6907 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$D = 662 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

#### Sisma Ex (Monte-Valle) $\times 1$

$$M_{\text{Ex, Monte-valle}} = 440 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{x-Ex, monte-valle}} = 84 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

#### Sisma Ez (Basso-Alto) $\times 0,3$

$$M_{\text{Ez}} = (357 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 107 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{z-Ez, basso-alto}} = (42 \text{ kN/m} \times 0,3) = 13 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

#### Azioni inerziali $\times 1$

$$M_{\text{I}} = 223 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$I_{\text{x, monte-valle}} = 39 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 23812 + 4154 \text{ kNm/m} = 27966 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 5790 + 6907 + 440 + 107 + 223 = 13467 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 27966 \text{ kNm/m} / 13467 \text{ kNm/m} = 2,07 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (2805 + 446 - 662 - 13 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1932 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 1158 + 84 + 39 \text{ kNm/m} = 1281 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1932 \text{ kNm/m} / 1281 \text{ kNm/m} = 1,51 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**6.1.2.2.2 Serbatoio vuoto****Peso proprio  $\times 1$** 

$$M_{\text{Gtot}} = 23812 \text{ kNm/m} \text{ (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 2805 \text{ kN/m} \text{ (stabilizzante)}$$

**Sisma Ex (Monte-Valle)  $\times 1$** 

$$M_{\text{Ex, Monte-valle}} = 440 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{X-Ex, monte-valle}} = 84 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

**Sisma Ez (Basso-Alto)  $\times 0,3$** 

$$M_{\text{Ez}} = (357 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 107 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{Z-Ez, basso-alto}} = (42 \text{ kN/m} \times 0,3) = 13 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 23812 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 440 + 107 = 547 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 23812 \text{ kNm/m} / 547 \text{ kNm/m} = 43,5 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

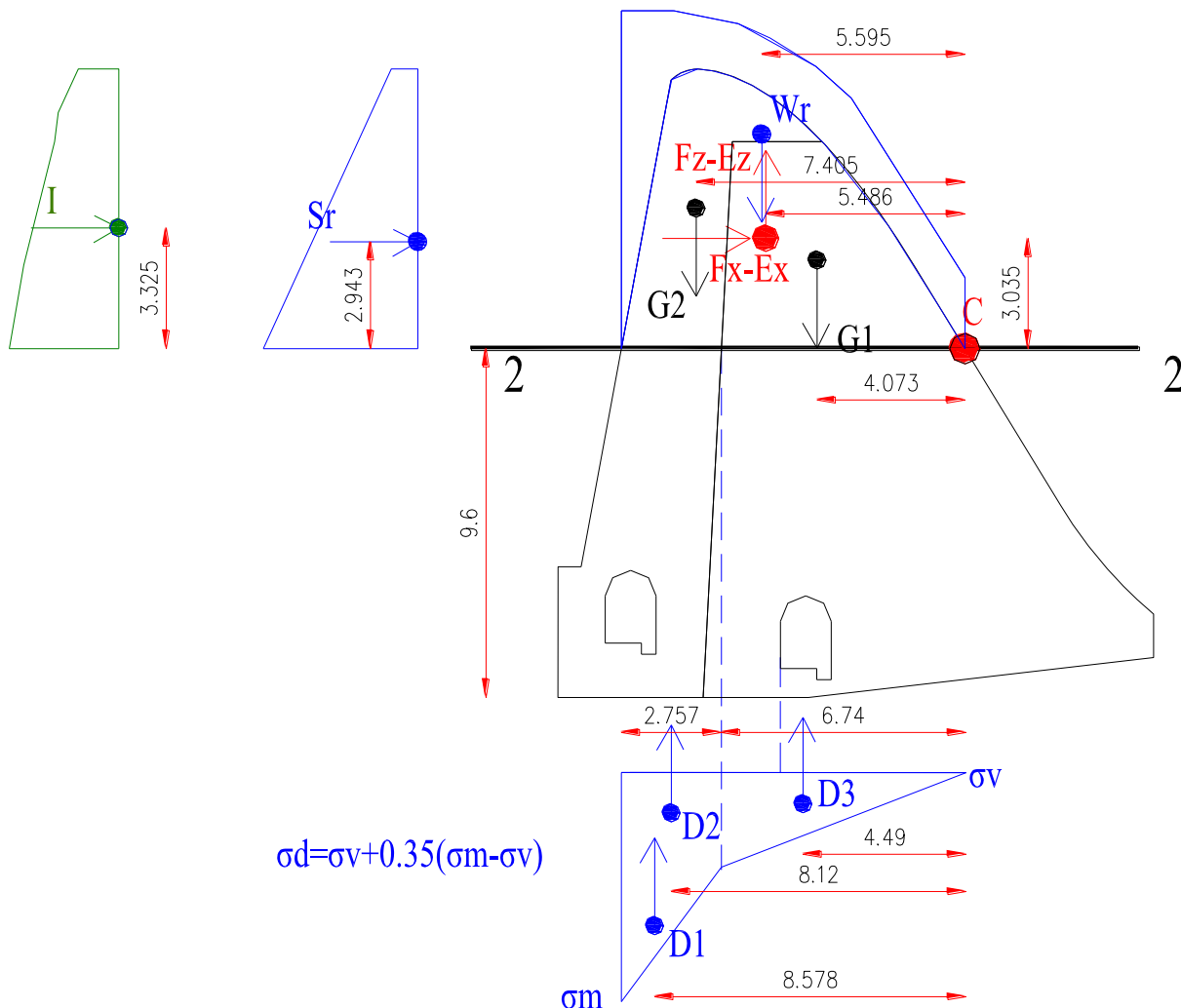
$$V_{\text{stabilizzante}} = (2805 - 13 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 2094 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 84 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 2094 \text{ kNm/m} / 84 \text{ kNm/m} = 25,0 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

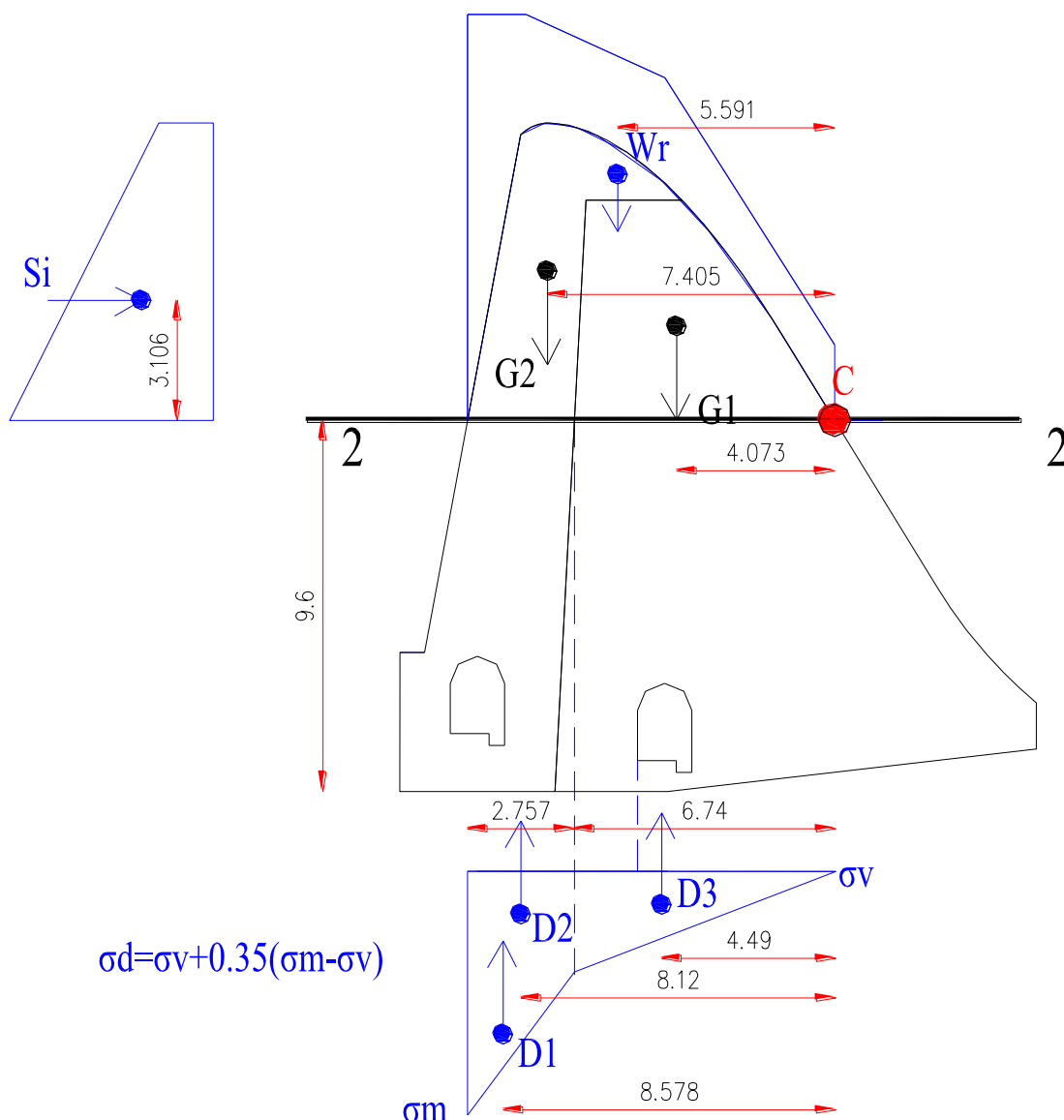
6.1.3 AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 2-2

Le verifiche sono condotte su una striscia di diga appesantita di larghezza 1 m:



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua in condizione sismica (+627,6 m) per le verifiche in corrispondenza della sezione 2-2





$$\sigma_d = \sigma_v + 0.35(\sigma_m - \sigma_v)$$

Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massimo invaso (+628,62 m) per la combinazione statica in corrispondenza della sezione 2-2

Le verifiche a ribaltamento e traslazione sono state condotte a favore di sicurezza considerando l'andamento delle sottopressioni lineare tra il nuovo drenone realizzato a monte e la pressione di valle, senza quindi mettere in conto l'ulteriore contributo di riduzione delle sottopressioni dovuto alla presenza del drenone esistente nel corpo diga di valle.

Di seguito si riportano i carichi messi in conto:

Peso proprio

Il peso proprio della sezione tracimabile presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{cls, esist} = 26,9 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 638 \text{ kN/m (peso diga esistente)}$$

$$G_2 = A_c \times \rho_{cls, nuovo} = 19,54 \text{ m}^2 \times 24,00 \text{ kN/m}^3 = 469 \text{ kN/m (peso appesantimento)}$$

$b_{G1} = 4,073$  m (braccio orizzontale peso diga esistente rispetto punto di rotazione)

$b_{G2} = 7,405$  m (braccio orizzontale peso appesantimento rispetto punto di rotazione)

$G_{tot} = G_1 + G_2 = 1107$  kN/m (peso totale diga)

$M_{G_{tot}} = (G_1 \times b_{G1}) + (G_2 \times b_{G2}) = (638 \text{ kN/m} \times 4,073 \text{ m}) + (469 \text{ kN/m} \times 7,405 \text{ m}) = 6072$  kNm/m  
(momento totale stabilizzante)

### Spinta acqua cmb. sismica

$H_{max} = 9,3$  m

$p_{max} (H=9,3 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 9,3 \text{ m} = 93$  kN/m<sup>2</sup> (pressione acqua alla base)

$p_{min} (H=1,6 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max.inv} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 1,6 \text{ m} = 16$  kN/m<sup>2</sup> (pressione minima sommità)

$S_i = (p_{max} + p_{min}) \times 7,7 \text{ m} / 2 = (93 + 16) \text{ kN/m}^2 \times 7,7 \text{ m} / 2 = 420$  kN/m (spinta orizzontale)

$W_r = (A_r \times \rho_w) = 22,0 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 220$  kN/m (peso acqua)

$b_{Wr} = 5,595$  m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{Sr} = 2,943$  m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{Wr} = W_r \times b_{Wr} = 220 \text{ kN/m} \times 5,595 \text{ m} = 1231$  kNm/m (momento stabilizzante)

$M_{Sr} = S_r \times h_{Sr} = 420 \text{ kN/m} \times 2,943 \text{ m} = 1236$  kNm/m (momento instabilizzante)

### Spinta acqua max invaso

$H_{max.inv} = 10,5$  m (livello acqua massimo invaso)

$p_{max} (H=10,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max.inv} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 10,5 \text{ m} = 105$  kN/m<sup>2</sup> (pressione acqua)

$p_{min} (H=2,8 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max.inv} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 2,8 \text{ m} = 28$  kN/m<sup>2</sup> (pressione minima sommità)

$S_i = (p_{max} + p_{min}) \times 7,7 \text{ m} / 2 = (105 + 28) \text{ kN/m}^2 \times 7,7 \text{ m} / 2 = 512$  kN/m (spinta orizzontale)

$W_r = (A_i \times \rho_w) = 28,9 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 289$  kN/m (peso acqua)

$b_{Wri} = 5,591$  m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{Si} = 3,106$  m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{Wi} = W_r \times b_{Wr} = 289 \text{ kN/m} \times 5,591 \text{ m} = 1616$  kNm/m (momento stabilizzante)

$M_{Si} = S_i \times h_{Si} = 512 \text{ kN/m} \times 3,106 \text{ m} = 1590$  kNm/m (momento instabilizzante)

### Sottopressioni

$H_{max} = 9,3$  m (livello acqua massima cmb sismica)

$\sigma_m (H=9,3 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max.reg} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 9,3 \text{ m} = 93$  kN/m<sup>2</sup> (pressione acqua alla base a monte)

$$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (93 - 0 \text{ kN/m}^2) = 33 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (2,757 \text{ m}) / 2 = (93 \text{ kN/m}^2 - 33 \text{ kN/m}^2) \times (2,757 \text{ m}) / 2 = 83 \text{ kN/m}$$

$$D2 = (\sigma_d) \times (2,757 \text{ m}) = (33 \text{ kN/m}^2) \times (2,757 \text{ m}) = 91 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d) \times (6,74 \text{ m}) / 2 = (33 \text{ kN/m}^2) \times (6,74 \text{ m}) / 2 = 111 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 = 83 + 91 + 111 = 285 \text{ kN/m}$$

$$b_{D1} = 8,578 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 8,12 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 4,49 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 83 \text{ kN/m} \times 8,578 \text{ m} = 712 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 91 \text{ kN/m} \times 8,12 \text{ m} = 739 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 111 \text{ kN/m} \times 4,49 \text{ m} = 498 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 712 + 739 + 498 = 1949 \text{ kNm/m (momento instabilizzante con livello sismico)}$$

$$H_{\text{max.inv}} = 10,5 \text{ m (livello acqua massimo invaso)}$$

$$p_{\text{max}} (H=10,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 10,5 \text{ m} = 105 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua)}$$

$$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (105 - 0 \text{ kN/m}^2) = 37,0 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (2,757 \text{ m}) / 2 = (105 \text{ kN/m}^2 - 37,0 \text{ kN/m}^2) \times (2,757 \text{ m}) / 2 = 94 \text{ kN/m}$$

$$D2 = (\sigma_d) \times (2,757 \text{ m}) = (37 \text{ kN/m}^2) \times (2,757 \text{ m}) = 102 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (6,74 \text{ m}) / 2 = (37,0 - 0,0 \text{ kN/m}^2) \times (6,74 \text{ m}) / 2 = 125 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 = 94 + 102 + 125 = 321 \text{ kN/m (livello max. invaso)}$$

$$b_{D1} = 8,578 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 8,12 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 4,49 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 94 \text{ kN/m} \times 8,578 \text{ m} = 806 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 102 \text{ kN/m} \times 8,12 \text{ m} = 828 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 125 \text{ kN/m} \times 4,49 \text{ m} = 561 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 806 + 828 + 561 = 2195 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante con livello massimo invasivo)

Sisma  $E_x$ , Monte-valle

$F_{x-Ex} = 0,03 \times 1107 \text{ kN/m} = 33 \text{ kN/m}$  (direzione Monte-Valle)

$h_{F_x-Ex} = 3,035 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{F_x-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{F_x-Ex} = 33 \text{ kN/m} \times 3,035 \text{ m} = 100 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

Sisma  $E_z$ , basso-alto

$F_{z-Ez} = 0,015 \times 1107 \text{ kN/m} = 17 \text{ kN/m}$  (direzione Basso-Alto)

$b_{F_z-Ez} = 5,486 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$M_{F_z-Ez} = F_{z-Ez} \times b_{F_z-Ez} = 17 \text{ kN/m} \times 5,486 \text{ m} = 93 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

Azioni inerziali acqua invasata

$I = 17 \text{ kN/m}$  (Spinta inerziale totale)

$h_I = 3,325 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_I = I \times h_I = 17 \text{ kNm/m} \times 3,325 \text{ m} = 57 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

**6.1.3.1 COMBINAZIONE STATICA ( $1 \times G1 + 1 \times G2 + 1 \times G3$ )**

Peso proprio  $\times 1$  :

$M_{G_{tot}} = 6072 \text{ kNm/m}$  (momento totale stabilizzante)

$G_{tot} = 1107 \text{ kN/m}$  (stabilizzante)

Spinta acqua max invasivo  $\times 1$

$M_{W_i} = 1616 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{S_i} = 1590 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$W_i = 289 \text{ kN/m}$  (stabilizzante)

$S_i = 512 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

Sottopressioni  $\times 1$

$M_D = 2195 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$D = 321 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

**Verifica ribaltamento**

$M_{stabilizzante} = 6072 + 1616 \text{ kNm/m} = 7688 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

Minstabilizzante = 1590 + 2195 kNm/m = 3785 kNm/m (momento instabilizzante)

Mstabilizzante / Minstabilizzante = 7688 kNm/m / 3785 kNm/m = 2,03 >1 (verifica positiva)

### Verifica traslazione

Vstabilizzante = (1107 +289 -321 kNm/m)×0,75 = 806 kNm/m (stabilizzante)

Vinstabilizzante = 512kNm/m (instabilizzante)

Vstabilizzante / Vinstabilizzante = 806 kNm/m / 512 kNm/m = 1,57 >1 (verifica positiva)

6.1.3.2 COMBINAZIONE SISMICA ( $G1 + G2 + G3 + E_{x, valle/monte} + 0.3 \times E_{z, Basso/Alto} + I_x$ )

#### 6.1.3.2.1 Serbatoio pieno

##### Peso proprio × 1

$M_{Gtot} = 6072$  kNm/m (momento totale stabilizzante)

$G_{tot} = 1107$  kN/m (stabilizzante)

##### Spinta acqua (condizione sismica) × 1

$M_{Wr} = 1231$  kNm/m (momento stabilizzante)

$M_{Sr} = 1236$  kNm/m (momento instabilizzante)

$Wr = 220$  kN/m (stabilizzante)

$Sr = 420$  kN /m (instabilizzante)

##### Sottopressioni × 1

$M_D = 1949$  kNm/m (momento instabilizzante)

$D = 285$  kN/m (instabilizzante)

##### Sisma Ex (Monte-Valle) × 1

$M_{Ex, Monte-valle} = 100$  kNm/m (momento instabilizzante)

$F_{x-Ex, monte-valle} = 33$  kN/m (instabilizzante)

##### Sisma Ez (Basso-Alto) × 0,3

$M_{Ez} = (93$  kNm/m) × 0,3= 28 (momento instabilizzante)

$F_{z-Ez, basso-alto} = (17$  kN/m×0,3) = 5 kN/m (instabilizzante)

##### Azioni inerziali × 1

$M_I = 57$  kNm/m (momento instabilizzante)

$I_{x, monte-valle} = 17$  kN/m (instabilizzante)

**Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 6072 + 1231 \text{ kNm/m} = 7303 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 1236 + 1949 + 100 + 28 + 57 = 3370 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 7303 \text{ kNm/m} / 3370 \text{ kNm/m} = 2,17 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (1107 + 220 - 285 - 5 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 778 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 420 + 33 + 17 \text{ kNm/m} = 470 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 778 \text{ kNm/m} / 470 \text{ kNm/m} = 1,66 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**6.1.3.2.2 Serbatoio vuoto****Peso proprio  $\times 1$** 

$$M_{\text{Gtot}} = 6072 \text{ kNm/m} \text{ (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 1107 \text{ kN/m} \text{ (stabilizzante)}$$

**Sisma Ex (Monte-Valle)  $\times 1$** 

$$M_{\text{Ex, Monte-valle}} = 100 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{X-Ex, monte-valle}} = 33 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

**Sisma Ez (Basso-Alto)  $\times 0,3$** 

$$M_{\text{Ez}} = (93 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 28 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{Z-Ez, basso-alto}} = (17 \text{ kN/m} \times 0,3) = 5 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 6072 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 100 + 28 = 128 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 6072 \text{ kNm/m} / 128 \text{ kNm/m} = 47,4 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (1107 - 5 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 826 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 33 \text{ kNm/m}$$

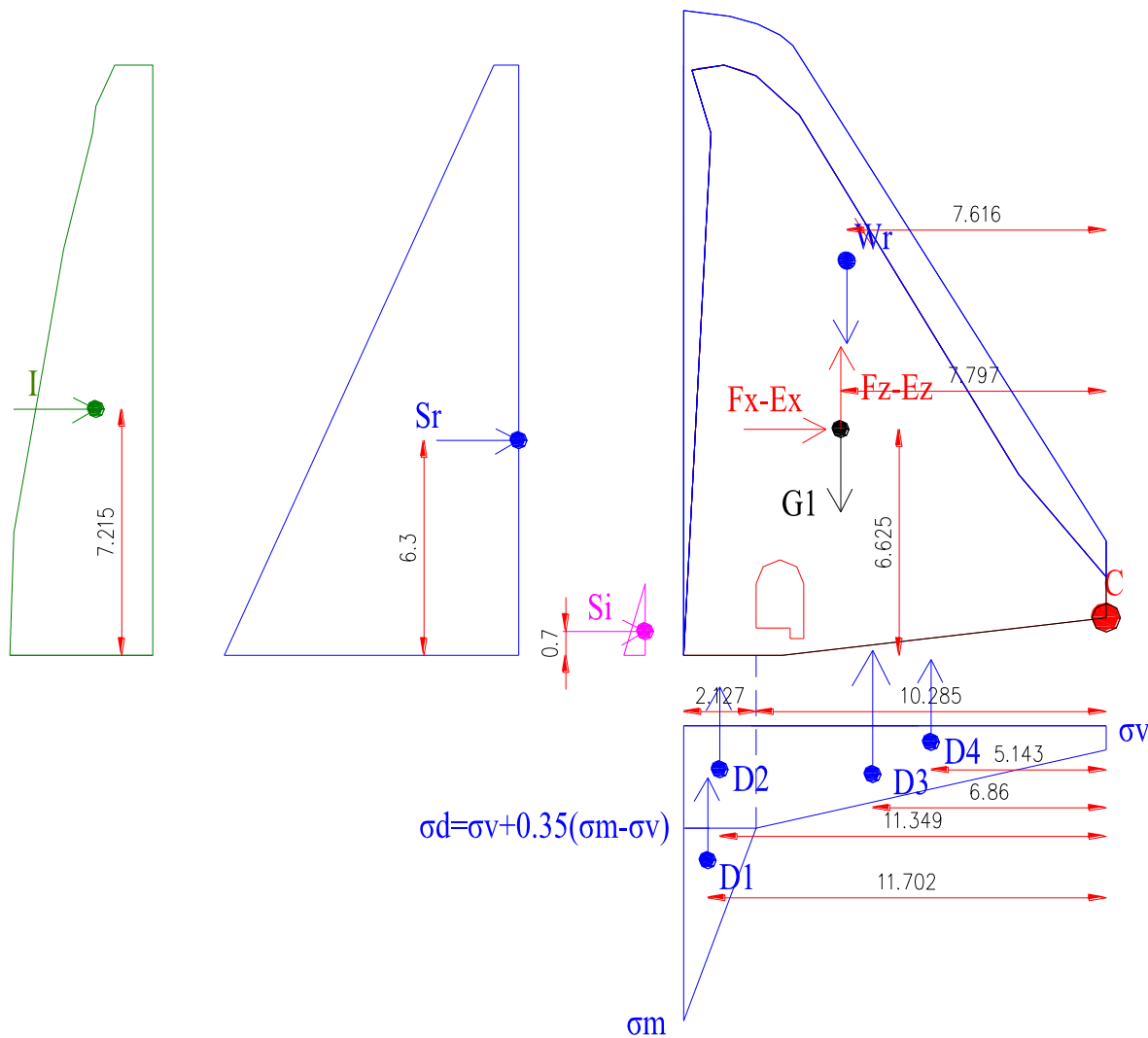
$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 826 \text{ kNm/m} / 33 \text{ kNm/m} = 25,0 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**7. CONCIO A / SEZIONE TRACIMABILE (DIGA ESISTENTE – D.M.24/03/1982)**

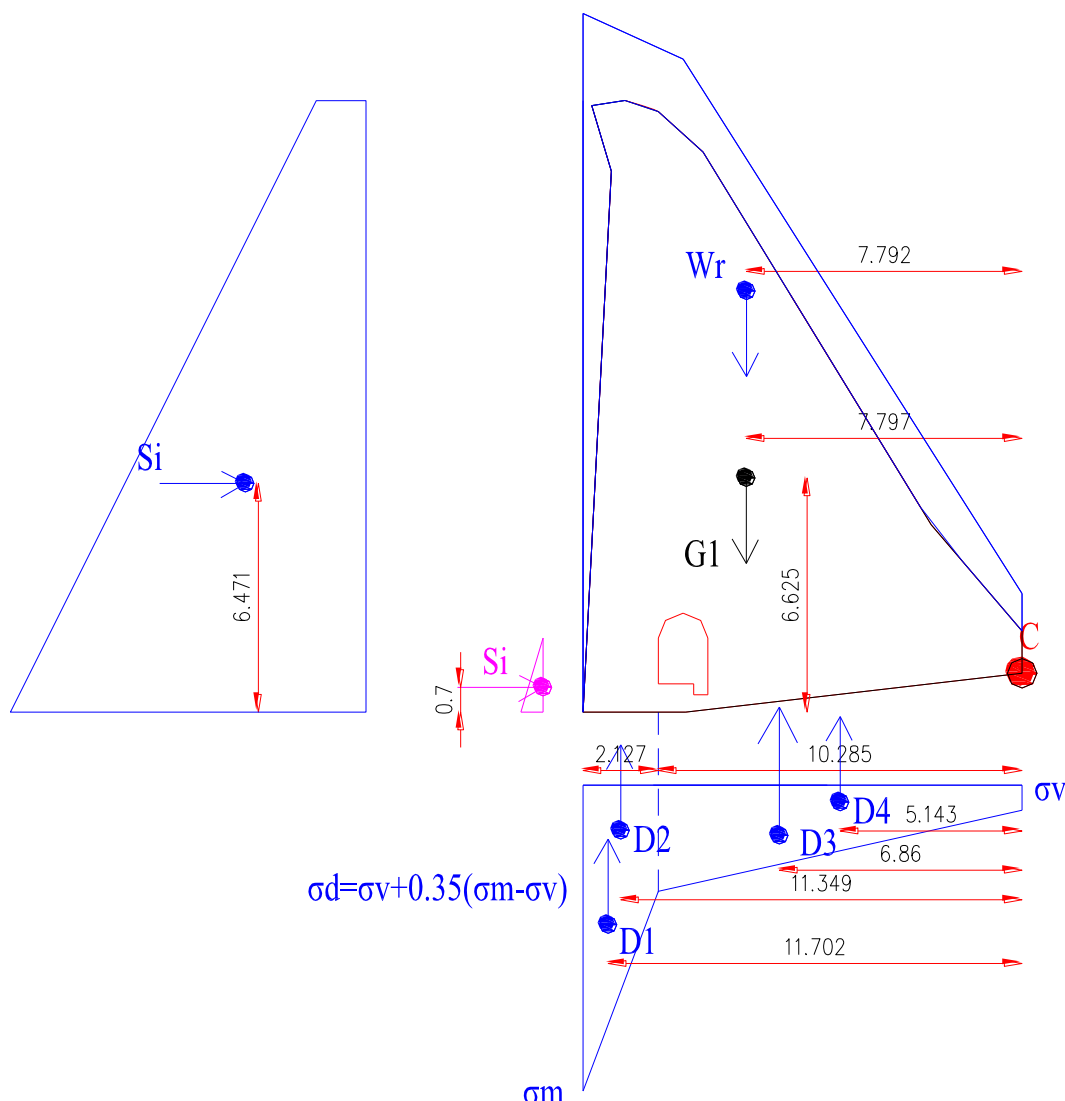
**7.1 VERIFICHE A RIBALTAMENTO E TRASLAZIONE DEL CORPO DIGA**

**7.1.1 AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE DI BASE**

Le verifiche sono condotte su una striscia di diga appesantita di larghezza 1 m:



*Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua in condizione sismica (+627,6 m) per le verifiche in corrispondenza della sezione di base*



*Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massimo invaso (+628,62 m) per la combinazione statica in corrispondenza della sezione di base*

Le verifiche a ribaltamento e traslazione sono state condotte a favore di sicurezza considerando l'andamento delle sottopressioni lineare tra il nuovo dreno realizzato a monte e la pressione di valle, senza quindi mettere in conto l'ulteriore contributo di riduzione delle sottopressioni dovuto alla presenza del dreno esistente nel corpo diga di valle. Infine nelle verifiche a traslazione non è stato messo in conto a favore di sicurezza il contributo positivo dovuto alla pendenza esistente (in leggera salita da monte verso valle) sul contatto tra il corpo diga di valle e la roccia di fondazione.

Di seguito si riportano i carichi messi in conto:

Peso proprio

Il peso proprio della sezione tracimabile presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{cls,esist} = 123 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 2917 \text{ kN/m} \text{ (peso diga esistente)}$$



$b_{G1} = 7,797 \text{ m}$  (braccio orizzontale peso diga esistente rispetto punto di rotazione)

$M_{Gtot} = G_1 \times b_{G1} = 2917 \text{ kN/m} \times 7,797 \text{ m} = 22744 \text{ kNm/m}$  (momento totale stabilizzante)

#### Spinta acqua cmb. sismica

$H_{max} = 18,9 \text{ m}$

$p_{max} (H=18,9 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max} \cdot reg = 10 \text{ kN/m}^3 \times 18,9 \text{ m} = 189 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua alla base)

$p_{min} (H=1,6 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max} \cdot inv = 10 \text{ kN/m}^3 \times 1,6 \text{ m} = 16 \text{ kN/m}^2$  (pressione minima sommità)

$S_i = (p_{max} + p_{min}) \times 17,3 \text{ m} / 2 = (189 + 16) \text{ kN/m}^2 \times 17,3 \text{ m} / 2 = 1773 \text{ kN/m}$  (spinta orizzontale)

$W_r = (A_r \times \rho_w) = 29,1 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 291 \text{ kN/m}$  (peso acqua)

$b_{Wr} = 7,616 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{Sr} = 6,3 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{Wr} = W_r \times b_{Wr} = 291 \text{ kN/m} \times 7,616 \text{ m} = 2216 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{Sr} = S_r \times h_{Sr} = 1773 \text{ kN/m} \times 6,3 \text{ m} = 11170 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

#### Spinta acqua max invaso

$H_{max} \cdot inv = 20,1 \text{ m}$  (livello acqua massimo invaso)

$p_{max} (H=20,1 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max} \cdot inv = 10 \text{ kN/m}^3 \times 20,1 \text{ m} = 201 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua alla base)

$p_{min} (H=2,8 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max} \cdot inv = 10 \text{ kN/m}^3 \times 2,8 \text{ m} = 28 \text{ kN/m}^2$  (pressione minima sommità)

$S_i = (p_{max} + p_{min}) \times 17,3 \text{ m} / 2 = (201 + 28) \text{ kN/m}^2 \times 17,3 \text{ m} / 2 = 1981 \text{ kN/m}$  (spinta orizzontale)

$W_i = (A_i \times \rho_w) = 30,4 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 304 \text{ kN/m}$  (peso acqua)

$b_{Wi} = 7,792 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{Si} = 6,471 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{Wi} = W_i \times b_{Wi} = 304 \text{ kN/m} \times 7,792 \text{ m} = 2369 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{Si} = S_i \times h_{Si} = 1981 \text{ kN/m} \times 6,471 \text{ m} = 12819 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

#### Spinta interrimento

$H_{max} \cdot int = 2,1 \text{ m}$  (livello interrimento)

$p_{max} (H=2,1 \text{ m}) = \rho_f \times H_{max} \cdot int = 6 \text{ kN/m}^3 \times 2,1 \text{ m} = 12,6 \text{ kN/m}^2$  (pressione alla base)

$S_i = (p_{max} \times H_{max} \cdot int) / 2 = (12,6 \text{ kN/m}^2 \times 2,1 \text{ m}) / 2 = 13,2 \text{ kN/m}$  (spinta orizzontale)

$h_{Swi} = 0,7 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{Si} = S_i \times h_{Swi} = 13,2 \text{ kN/m} \times 0,7 \text{ m} = 9,24 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

#### Sottopressioni

Nel calcolo delle sottopressioni si considera un livello idrostatico a valle pari a 1,3 m. Tale valore corrisponde all'altezza del calcestruzzo dello scivolo nell'ipotesi che si possa generare infiltrazione all'interno della suola in calcestruzzo dello scivolo. L'acqua che tracima dalla diga viene rilasciata in alveo circa 40 m più a valle della diga, pertanto la pressione idrostatica a valle della diga dovrebbe essere a rigore pari a zero, a meno appunto della presenza di possibili infiltrazioni.

$H_{max} = 18,9 \text{ m}$  (livello acqua massima cmb sismica)

$\sigma_m (H=18,9 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max} \cdot g = 10 \text{ kN/m}^3 \times 18,9 \text{ m} = 189 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua alla base a monte)

$\sigma_v (h_v=1,3 \text{ m}) = \rho_w \times h_v = 10 \text{ kN/m}^3 \times 1,3 \text{ m} = 13 \text{ kN/m}^2$  (livello max regolazione)

$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 13 + 0,35 \times (189 - 13 \text{ kN/m}^2) = 75 \text{ kN/m}^2$  (pressione dreno)

$D_1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,978 \text{ m}) / 2 = (189 \text{ kN/m}^2 - 75 \text{ kN/m}^2) \times (1,978 \text{ m}) / 2 = 113 \text{ kN/m}$

$D_2 = (\sigma_d) \times (1,978 \text{ m}) = (75 \text{ kN/m}^2) \times (1,978 \text{ m}) = 148 \text{ kN/m}$

$D_3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (14,774 \text{ m}) / 2 = (75 - 13 \text{ kN/m}^2) \times (14,774 \text{ m}) / 2 = 458 \text{ kN/m}$

$D_4 = (\sigma_v) \times (14,774 \text{ m}) = (13 \text{ kN/m}^2) \times (14,774 \text{ m}) = 192 \text{ kN/m}$

$D = D_1 + D_2 + D_3 + D_4 = 113 + 148 + 458 + 192 = 911 \text{ kN/m}$  (livello max. regolazione)

$b_{D1} = 16,093 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D2} = 15,764 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D3} = 9,85 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D4} = 7,39 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$M_{D1} = D_1 \times b_{D1} = 113 \text{ kN/m} \times 16,093 \text{ m} = 1819 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D2} = D_2 \times b_{D2} = 148 \text{ kN/m} \times 15,764 \text{ m} = 2333 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D3} = D_3 \times b_{D3} = 458 \text{ kN/m} \times 9,85 \text{ m} = 4511 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D4} = D_4 \times b_{D4} = 192 \text{ kN/m} \times 7,39 \text{ m} = 1419 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} + M_{D4} = 1819 + 2333 + 4511 + 1419 = 10082 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante con livello massima regolazione)

$H_{max.inv} = 20,1 \text{ m}$  (livello acqua massimo invaso)

$p_{max} (H=20,1 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max.inv} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 20,1 \text{ m} = 201 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua alla base a monte)

$\sigma_v (h_v=1,3 \text{ m}) = \rho_w \times h_v = 10 \text{ kN/m}^3 \times 1,3 \text{ m} = 13 \text{ kN/m}^2$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 13 + 0,35 \times (201 - 13 \text{ kN/m}^2) = 78,8 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,978 \text{ m}) / 2 = (201 \text{ kN/m}^2 - 78,8 \text{ kN/m}^2) \times (1,978 \text{ m}) / 2 = 121 \text{ kN/m}$$

$$D2 = (\sigma_d) \times (1,978 \text{ m}) = (78,8 \text{ kN/m}^2) \times (1,978 \text{ m}) = 156 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (14,774 \text{ m}) / 2 = (78,8 - 13 \text{ kN/m}^2) \times (14,774 \text{ m}) / 2 = 486 \text{ kN/m}$$

$$D4 = (\sigma_v) \times (14,774 \text{ m}) = (13 \text{ kN/m}^2) \times (14,774 \text{ m}) = 192 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 + D4 = 121 + 156 + 486 + 192 = 955 \text{ kN/m (livello max. invaso)}$$

$$b_{D1} = 16,093 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 15,764 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 9,85 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D4} = 7,39 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 121 \text{ kN/m} \times 16,093 \text{ m} = 1947 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 156 \text{ kN/m} \times 15,764 \text{ m} = 2459 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 486 \text{ kN/m} \times 9,85 \text{ m} = 4787 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D4} = D4 \times b_{D4} = 192 \text{ kN/m} \times 7,39 \text{ m} = 1419 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} + M_{D4} = 1947 + 2459 + 4787 + 1419 = 10612 \text{ kNm/m (momento instabilizzante con livello massimo invaso)}$$

#### Sisma $E_x$ , Monte-valle

$$F_{x-Ex} = 0,03 \times 2917 \text{ kN/m} = 88 \text{ kN/m (direzione Monte-Valle)}$$

$$h_{F_x-Ex} = 6,625 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{F_x-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{F_x-Ex} = 88 \text{ kN/m} \times 6,625 \text{ m} = 583 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_z$ , basso-alto

$$F_{z-Ez} = 0,015 \times 2917 \text{ kN/m} = 44 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{F_z-Ez} = 7,797 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{F_z-Ez} = F_{z-Ez} \times b_{F_z-Ez} = 44 \text{ kN/m} \times 7,797 \text{ m} = 343 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Azioni inerziali acqua invasata

$$I = 54 \text{ kN/m (Spinta inerziale totale)}$$

$$h_I = 7,215 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_I = I \times h_I = 54 \text{ kNm/m} \times 7,215 \text{ m} = 390 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

**7.1.1.1 COMBINAZIONE STATICA ( $1 \times G1 + 1 \times G2 + 1 \times G3$ )**Peso proprio  $\times 1$  :

$$M_{G_{tot}} = 22744 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 2917 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max invaso  $\times 1$ 

$$M_{W_i} = 2369 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_i} = 12819 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_i = 304 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_i = 1981 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Spinta interrimento  $\times 1$ 

$$M_{S_i} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni  $\times 1$ 

$$M_D = 10612 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 955 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{stabilizzante} = 22744 + 2369 \text{ kNm/m} = 25113 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 12819 + 10 + 10612 \text{ kNm/m} = 23441 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 25113 \text{ kNm/m} / 23441 \text{ kNm/m} = 1,10 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{stabilizzante} = (2917 + 304 - 955 \text{ kN/m}) \times 0,75 = 1700 \text{ kNm/m (stabilizzante)}$$

$$V_{instabilizzante} = 1981 + 13 \text{ kNm/m} = 1994 \text{ kNm/m (instabilizzante)}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 1700 \text{ kNm/m} / 1994 \text{ kNm/m} = 0,85 < 1 \text{ (verifica negativa)}$$

**7.1.1.2 COMBINAZIONE SISMICA ( $G1 + G2 + G3 + E_{x, valle/monte} + 0.3 \times E_{z, Basso/Alto} + I_x$ )****7.1.1.2.1 Serbatoio pieno**Peso proprio  $\times 1$ 

$$M_{G_{tot}} = 22744 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 2917 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua (condizione sismica) × 1

$$M_{Wr} = 2216 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{Sr} = 11170 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 291 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_r = 1773 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Spinta interrimento × 1

$$M_{Si} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni × 1

$$M_D = 10082 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 911 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ex (Monte-Valle) × 1

$$M_{Ex, \text{Monte-valle}} = 583 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex, \text{monte-valle}} = 88 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{Ez} = (343 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 103 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez, \text{basso-alto}} = (44 \text{ kN/m} \times 0,3) = 13 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Azioni inerziali × 1

$$M_I = 390 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x, \text{monte-valle}} = 54 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 22744 + 2216 \text{ kNm/m} = 24960 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 11170 + 9 + 10082 + 583 + 103 + 390 = 22337 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 24960 \text{ kNm/m} / 22337 \text{ kNm/m} = 1,12 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (2917 + 291 - 911 - 13 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1713 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 1773 + 13,2 + 88 + 54 \text{ kNm/m} = 19282 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1713 \text{ kNm/m} / 1928 \text{ kNm/m} = 0,89 < 1 \text{ (verifica negativa)}$$

**7.1.1.2.2 Serbatoio vuoto**Peso proprio × 1

$$M_{\text{Gtot}} = 22744 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 2917 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta interrimento × 1

$$M_{\text{Si}} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ex (Monte-Valle) × 1

$$M_{\text{Ex, Monte-valle}} = 583 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{x-Ex, monte-valle}} = 88 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{\text{Ez}} = (343 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 103 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{z-Ez, basso-alto}} = (44 \text{ kN/m} \times 0,3) = 13 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 22744 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 9 + 583 + 103 = 695 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 22744 \text{ kNm/m} / 695 \text{ kNm/m} = 32,7 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

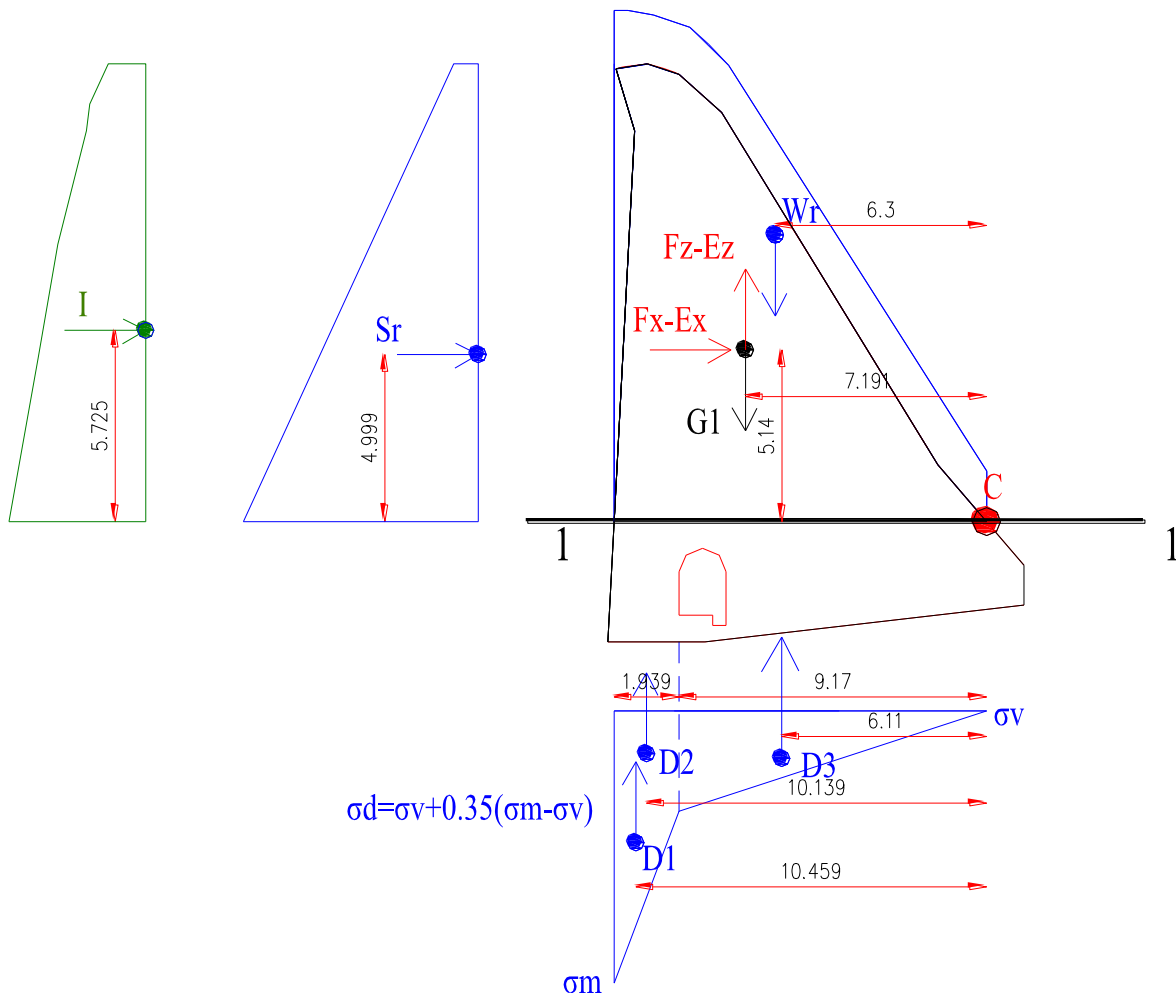
$$V_{\text{stabilizzante}} = (2917 - 13 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 2178 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 13,2 + 88 \text{ kNm/m} = 101 \text{ kNm/m}$$

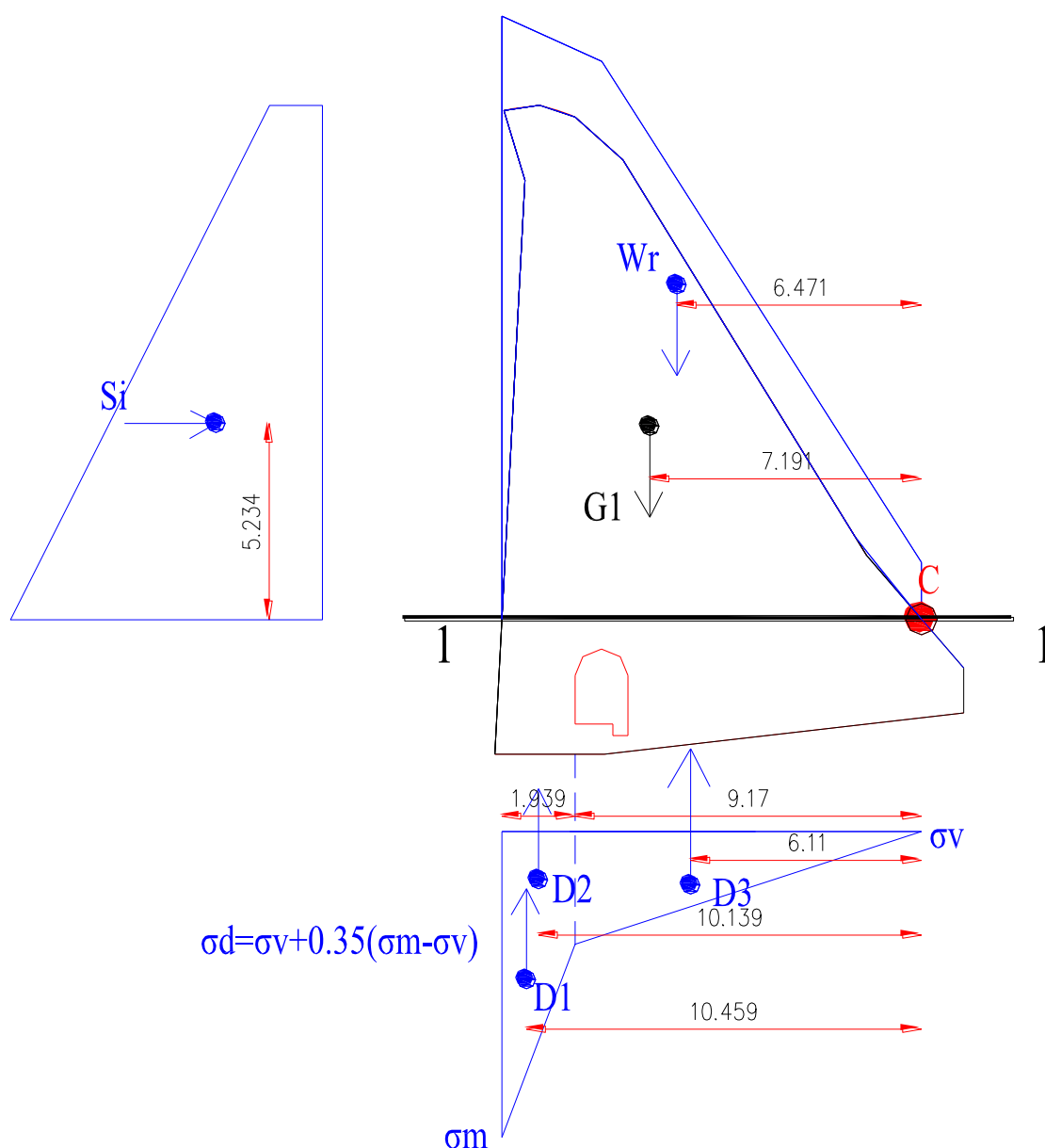
$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 2178 \text{ kNm/m} / 101 \text{ kNm/m} = 21,6 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**7.1.1 AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 1-1**

Le verifiche sono condotte su una striscia di diga appesantita di larghezza 1 m:



*Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua in condizione sismica (+627,6 m) per le verifiche in corrispondenza della sezione 1-1*



*Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massimo invaso (+628,62 m) per la combinazione statica in corrispondenza della sezione 1-1*

Le verifiche a ribaltamento e traslazione sono state condotte a favore di sicurezza considerando l'andamento delle sottopressioni lineare tra il nuovo dreno realizzato a monte e la pressione di valle, senza quindi mettere in conto l'ulteriore contributo di riduzione delle sottopressioni dovuto alla presenza del dreno esistente nel corpo diga di valle.

Di seguito si riportano i carichi messi in conto:

Peso proprio

Il peso proprio della sezione tracimabile presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{cls,esist} = 84,5 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 2004 \text{ kN/m (peso diga esistente)}$$



$b_{G1} = 7,191 \text{ m}$  (braccio orizzontale peso diga esistente rispetto punto di rotazione)

$M_{Gtot} = G_1 \times b_{G1} = 2004 \text{ kN/m} \times 7,191 \text{ m} = 14410 \text{ kNm/m}$  (momento totale stabilizzante)

### Spinta acqua cmb. sismica

$H_{max} = 15,3 \text{ m}$

$p_{max} (H=15,3 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 15,3 \text{ m} = 153 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua alla base)

$p_{min} (H=1,6 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max} \cdot inv = 10 \text{ kN/m}^3 \times 1,6 \text{ m} = 16 \text{ kN/m}^2$  (pressione minima sommità)

$S_i = (p_{max} + p_{min}) \times 13,7 \text{ m} / 2 = (153 + 16) \text{ kN/m}^2 \times 13,7 \text{ m} / 2 = 1158 \text{ kN/m}$  (spinta orizzontale)

$W_r = (A_r \times \rho_w) = 24,4 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 244 \text{ kN/m}$  (peso acqua)

$b_{Wr} = 6,3 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{Sr} = 5,0 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{Wr} = W_r \times b_{Wr} = 244 \text{ kN/m} \times 6,3 \text{ m} = 1537 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{Sr} = S_r \times h_{Sr} = 1158 \text{ kN/m} \times 5 \text{ m} = 5790 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

### Spinta acqua max invaso

$H_{max} \cdot inv = 16,5 \text{ m}$  (livello acqua massimo invaso)

$p_{max} (H=16,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max} \cdot inv = 10 \text{ kN/m}^3 \times 16,5 \text{ m} = 165 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua)

$p_{min} (H=2,8 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max} \cdot inv = 10 \text{ kN/m}^3 \times 2,8 \text{ m} = 28 \text{ kN/m}^2$  (pressione minima sommità)

$S_i = (p_{max} + p_{min}) \times 13,7 \text{ m} / 2 = (165 + 28) \text{ kN/m}^2 \times 13,7 \text{ m} / 2 = 1322 \text{ kN/m}$  (spinta orizzontale)

$W_r = (A_i \times \rho_w) = 25,6 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 256 \text{ kN/m}$  (peso acqua)

$b_{Wri} = 6,471 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{Si} = 5,234 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{Wi} = W_r \times b_{Wr} = 256 \text{ kN/m} \times 6,471 \text{ m} = 1656 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{Si} = S_i \times h_{Si} = 1322 \text{ kN/m} \times 5,234 \text{ m} = 6919 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

### Sottopressioni

Nel calcolo delle sottopressioni per la sezione 1-1 si considera un livello idrostatico a valle nullo (sezione in elevazione).

$H_{max} = 15,3 \text{ m}$  (livello acqua massima cmb sismica)

$\sigma_m (H=15,3 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max} \cdot reg = 10 \text{ kN/m}^3 \times 15,3 \text{ m} = 153 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua alla base a monte)

$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (153 - 0 \text{ kN/m}^2) = 54 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D_1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,939 \text{ m}) / 2 = (153 \text{ kN/m}^2 - 54 \text{ kN/m}^2) \times (1,939 \text{ m}) / 2 = 96 \text{ kN/m}$$

$$D_2 = (\sigma_d) \times (1,939 \text{ m}) = (54 \text{ kN/m}^2) \times (1,939 \text{ m}) = 105 \text{ kN/m}$$

$$D_3 = (\sigma_d) \times (9,17 \text{ m}) / 2 = (54 \text{ kN/m}^2) \times (9,17 \text{ m}) / 2 = 248 \text{ kN/m}$$

$$D = D_1 + D_2 + D_3 = 96 + 105 + 248 = 449 \text{ kN/m (livello max. regolazione)}$$

$$b_{D1} = 10,459 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 10,139 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 6,11 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D_1 \times b_{D1} = 96 \text{ kN/m} \times 10,459 \text{ m} = 1004 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D_2 \times b_{D2} = 105 \text{ kN/m} \times 10,139 \text{ m} = 1065 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D_3 \times b_{D3} = 248 \text{ kN/m} \times 6,11 \text{ m} = 1515 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 1004 + 1065 + 1515 = 3584 \text{ kNm/m (momento instabilizzante con livello sismico)}$$

$$H_{\text{max.inv}} = 16,5 \text{ m (livello acqua massimo invaso)}$$

$$p_{\text{max}} (H=16,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 16,5 \text{ m} = 165 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua)}$$

$$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (165 - 0 \text{ kN/m}^2) = 58,0 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D_1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,939 \text{ m}) / 2 = (165 \text{ kN/m}^2 - 58,0 \text{ kN/m}^2) \times (1,939 \text{ m}) / 2 = 104 \text{ kN/m}$$

$$D_2 = (\sigma_d) \times (1,939 \text{ m}) = (58 \text{ kN/m}^2) \times (1,939 \text{ m}) = 112 \text{ kN/m}$$

$$D_3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (9,17 \text{ m}) / 2 = (58,0 - 0,0 \text{ kN/m}^2) \times (9,17 \text{ m}) / 2 = 266 \text{ kN/m}$$

$$D = D_1 + D_2 + D_3 = 104 + 112 + 266 = 482 \text{ kN/m (livello max. invaso)}$$

$$b_{D1} = 10,459 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 10,139 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 6,11 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D_1 \times b_{D1} = 104 \text{ kN/m} \times 10,459 \text{ m} = 1088 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D_2 \times b_{D2} = 112 \text{ kN/m} \times 10,139 \text{ m} = 1136 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D_3 \times b_{D3} = 266 \text{ kN/m} \times 6,11 \text{ m} = 1625 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 1088 + 1136 + 1625 = 3849 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante con livello massimo invasivo})$$

Sisma  $E_x$ , Monte-valle

$$F_{x-Ex} = 0,03 \times 2004 \text{ kN/m} = 60 \text{ kN/m} \quad (\text{direzione Monte-Valle})$$

$$h_{F_x-Ex} = 5,14 \text{ m} \quad (\text{braccio verticale rispetto punto di rotazione})$$

$$M_{F_x-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{F_x-Ex} = 60 \text{ kN/m} \times 5,14 \text{ m} = 308 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

Sisma  $E_z$ , basso-alto

$$F_{z-Ez} = 0,015 \times 2004 \text{ kN/m} = 30 \text{ kN/m} \quad (\text{direzione Basso-Alto})$$

$$b_{F_z-Ez} = 7,191 \text{ m} \quad (\text{braccio orizzontale rispetto punto di rotazione})$$

$$M_{F_z-Ez} = F_{z-Ez} \times b_{F_z-Ez} = 30 \text{ kN/m} \times 7,191 \text{ m} = 216 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

Azioni inerziali acqua invasata

$$I = 39 \text{ kN/m} \quad (\text{Spinta inerziale totale})$$

$$h_I = 5,725 \text{ m} \quad (\text{braccio verticale rispetto punto di rotazione})$$

$$M_I = I \times h_I = 39 \text{ kNm/m} \times 5,725 \text{ m} = 223 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

**7.1.1.1 COMBINAZIONE STATICA ( $1 \times G1 + 1 \times G2 + 1 \times G3$ )**

Peso proprio  $\times 1$  :

$$M_{G_{tot}} = 14410 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento totale stabilizzante})$$

$$G_{tot} = 2004 \text{ kN/m} \quad (\text{stabilizzante})$$

Spinta acqua max invasivo  $\times 1$

$$M_{W_i} = 1656 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento stabilizzante})$$

$$M_{S_i} = 6919 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

$$W_i = 256 \text{ kN/m} \quad (\text{stabilizzante})$$

$$S_i = 1322 \text{ kN/m} \quad (\text{instabilizzante})$$

Sottopressioni  $\times 1$

$$M_D = 3849 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento instabilizzante})$$

$$D = 482 \text{ kN/m} \quad (\text{instabilizzante})$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 14410 + 1656 \text{ kNm/m} = 16066 \text{ kNm/m} \quad (\text{momento stabilizzante})$$

Minstabilizzante = 6919 + 3849 kNm/m = 10768 kNm/m (momento instabilizzante)

Mstabilizzante / Minstabilizzante = 16066 kNm/m / 10768 kNm/m = 1,49 > 1 (verifica positiva)

### Verifica traslazione

Vstabilizzante = (2004 + 256 - 482 kNm/m) × 0,75 = 1333 kNm/m (stabilizzante)

Vinstabilizzante = 1322 kNm/m (instabilizzante)

Vstabilizzante / Vinstabilizzante = 1333 kNm/m / 1322 kNm/m = 1,01 > 1 (verifica positiva)

7.1.1.2 COMBINAZIONE SISMICA ( $G1 + G2 + G3 + E_{x, valle/monte} + 0.3 \times E_{z, Basso/Alto} + I_x$ )

#### 7.1.1.2.1 Serbatoio pieno

##### Peso proprio × 1

$M_{Gtot} = 14410$  kNm/m (momento totale stabilizzante)

$G_{tot} = 2004$  kN/m (stabilizzante)

##### Spinta acqua (condizione sismica) × 1

$M_{Wr} = 1537$  kNm/m (momento stabilizzante)

$M_{Sr} = 5790$  kNm/m (momento instabilizzante)

$Wr = 244$  kN/m (stabilizzante)

$Sr = 1158$  kN / m (instabilizzante)

##### Sottopressioni × 1

$M_D = 3584$  kNm/m (momento instabilizzante)

$D = 449$  kN/m (instabilizzante)

##### Sisma Ex (Monte-Valle) × 1

$M_{Ex, Monte-valle} = 308$  kNm/m (momento instabilizzante)

$F_{x-Ex, monte-valle} = 60$  kN/m (instabilizzante)

##### Sisma Ez (Basso-Alto) × 0,3

$M_{Ez} = (216$  kNm/m) × 0,3 = 65 (momento instabilizzante)

$F_{z-Ez, basso-alto} = (30$  kN/m × 0,3) = 9 kN/m (instabilizzante)

##### Azioni inerziali × 1

$M_I = 223$  kNm/m (momento instabilizzante)

$I_{x, monte-valle} = 39$  kN/m (instabilizzante)

**Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 14410 + 1537 \text{ kNm/m} = 15947 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 5790 + 3584 + 308 + 65 + 223 = 9970 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 15947 \text{ kNm/m} / 9970 \text{ kNm/m} = 1,60 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (2004 + 244 - 449 - 9 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1343 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 1158 + 60 + 39 \text{ kNm/m} = 1257 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1343 \text{ kNm/m} / 1257 \text{ kNm/m} = 1,07 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**7.1.1.2.2 Serbatoio vuoto****Peso proprio  $\times 1$** 

$$M_{\text{Gtot}} = 14410 \text{ kNm/m} \text{ (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 2004 \text{ kN/m} \text{ (stabilizzante)}$$

**Sisma Ex (Monte-Valle)  $\times 1$** 

$$M_{\text{Ex, Monte-valle}} = 308 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{X-Ex, monte-valle}} = 60 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

**Sisma Ez (Basso-Alto)  $\times 0,3$** 

$$M_{\text{Ez}} = (216 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 65 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{Z-Ez, basso-alto}} = (30 \text{ kN/m} \times 0,3) = 9 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 14410 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 308 + 65 = 373 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 14410 \text{ kNm/m} / 373 \text{ kNm/m} = 38,6 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

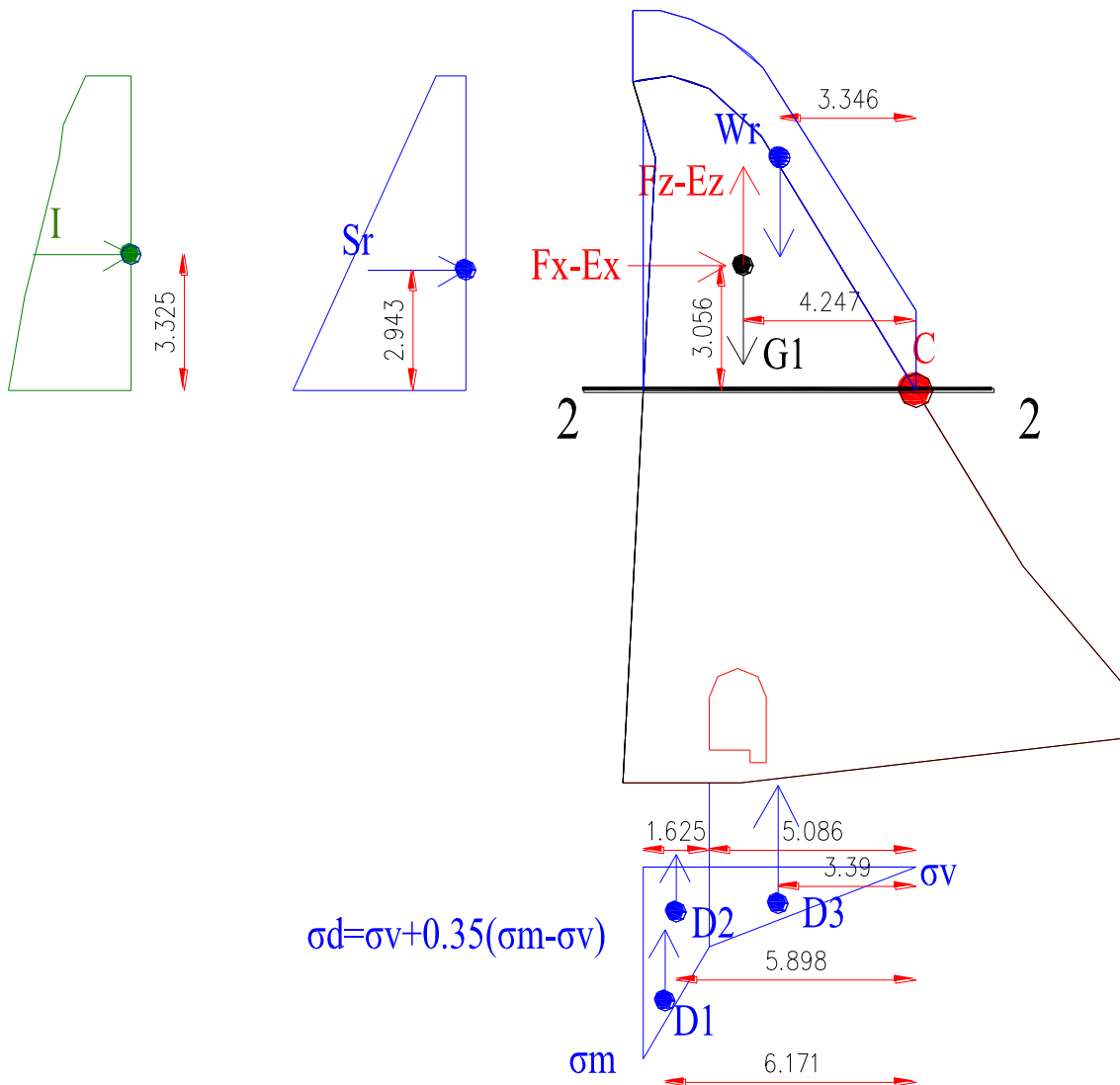
$$V_{\text{stabilizzante}} = (2004 - 9 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1496 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 60 \text{ kNm/m}$$

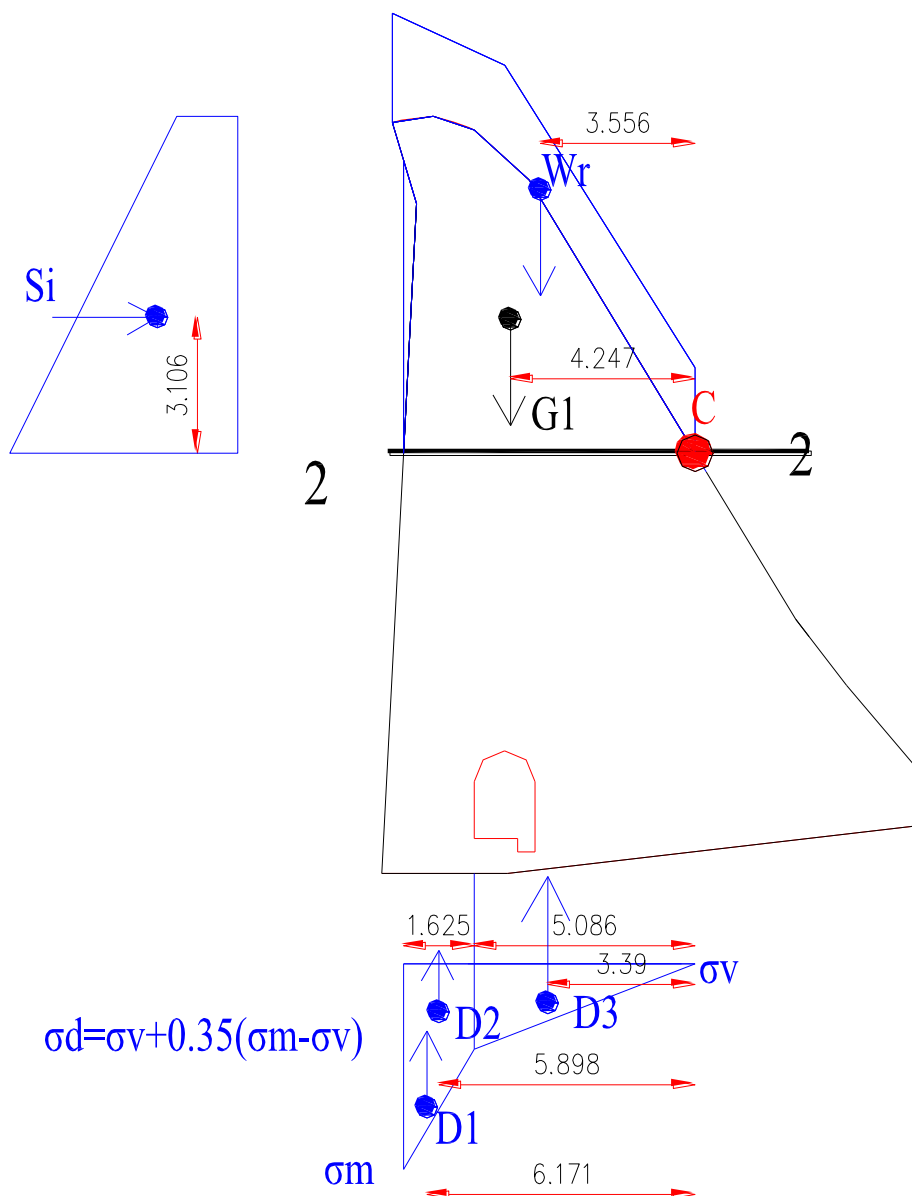
$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1496 \text{ kNm/m} / 60 \text{ kNm/m} = 24,9 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

7.1.2 AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 2-2

Le verifiche sono condotte su una striscia di diga appesantita di larghezza 1 m:



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua in condizione sismica (+627,6 m) per le verifiche in corrispondenza della sezione 2-2



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massimo invaso (+628,62 m) per la combinazione statica in corrispondenza della sezione 2-2

Le verifiche a ribaltamento e traslazione sono state condotte a favore di sicurezza considerando l’andamento delle sottopressioni lineare tra il nuovo drenone realizzato a monte e la pressione di valle, senza quindi mettere in conto l’ulteriore contributo di riduzione delle sottopressioni dovuto alla presenza del drenone esistente nel corpo diga di valle.

Di seguito si riportano i carichi messi in conto:

Peso proprio

Il peso proprio della sezione tracimabile presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{cls,esist} = 32 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 759 \text{ kN/m (peso diga esistente)}$$

$b_{G1} = 4,247 \text{ m}$  (braccio orizzontale peso diga esistente rispetto punto di rotazione)

$M_{Gtot} = G_1 \times b_{G1} = 759 \text{ kN/m} \times 4,247 \text{ m} = 3223 \text{ kNm/m}$  (momento totale stabilizzante)

### Spinta acqua cmb. sismica

$H_{max} = 9,3 \text{ m}$

$p_{max} (H=9,3 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 9,3 \text{ m} = 93 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua alla base)

$p_{min} (H=1,6 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max} \cdot inv = 10 \text{ kN/m}^3 \times 1,6 \text{ m} = 16 \text{ kN/m}^2$  (pressione minima sommità)

$S_i = (p_{max} + p_{min}) \times 7,7 \text{ m} / 2 = (93 + 16) \text{ kN/m}^2 \times 7,7 \text{ m} / 2 = 420 \text{ kN/m}$  (spinta orizzontale)

$W_r = (A_r \times \rho_w) = 13,0 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 130 \text{ kN/m}$  (peso acqua)

$b_{Wr} = 3,346 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{Sr} = 2,943 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{Wr} = W_r \times b_{Wr} = 130 \text{ kN/m} \times 3,346 \text{ m} = 435 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{Sr} = S_r \times h_{Sr} = 420 \text{ kN/m} \times 2,943 \text{ m} = 1236 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

### Spinta acqua max invaso

$H_{max} \cdot inv = 10,5 \text{ m}$  (livello acqua massimo invaso)

$p_{max} (H=10,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max} \cdot inv = 10 \text{ kN/m}^3 \times 10,5 \text{ m} = 105 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua)

$p_{min} (H=2,8 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max} \cdot inv = 10 \text{ kN/m}^3 \times 2,8 \text{ m} = 28 \text{ kN/m}^2$  (pressione minima sommità)

$S_i = (p_{max} + p_{min}) \times 7,7 \text{ m} / 2 = (105 + 28) \text{ kN/m}^2 \times 7,7 \text{ m} / 2 = 512 \text{ kN/m}$  (spinta orizzontale)

$W_r = (A_i \times \rho_w) = 14,0 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 140 \text{ kN/m}$  (peso acqua)

$b_{Wri} = 3,556 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{Si} = 3,106 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{Wi} = W_r \times b_{Wr} = 140 \text{ kN/m} \times 3,556 \text{ m} = 511 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{Si} = S_i \times h_{Si} = 512 \text{ kN/m} \times 3,106 \text{ m} = 1590 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

### Sottopressioni

$H_{max} = 9,3 \text{ m}$  (livello acqua massima cmb sismica)

$\sigma_m (H=9,3 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max} \cdot reg = 10 \text{ kN/m}^3 \times 9,3 \text{ m} = 93 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua alla base a monte)

$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$

$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (93 - 0 \text{ kN/m}^2) = 33 \text{ kN/m}^2$  (pressione dreno)

$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,625 \text{ m}) / 2 = (93 \text{ kN/m}^2 - 33 \text{ kN/m}^2) \times (1,625 \text{ m}) / 2 = 49 \text{ kN/m}$



$$D2 = (\sigma_d) \times (2,757 \text{ m}) = (33 \text{ kN/m}^2) \times (1,625 \text{ m}) = 54 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d) \times (5,086 \text{ m}) / 2 = (33 \text{ kN/m}^2) \times (5,086 \text{ m}) / 2 = 84 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 = 49 + 54 + 84 = 187 \text{ kN/m}$$

$$b_{D1} = 6,171 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 5,898 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 3,39 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 49 \text{ kN/m} \times 6,171 \text{ m} = 302 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 54 \text{ kN/m} \times 5,898 \text{ m} = 318 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 84 \text{ kN/m} \times 3,39 \text{ m} = 285 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 302 + 318 + 285 = 905 \text{ kNm/m (momento instabilizzante con livello sismico)}$$

$$H_{\text{max.inv}} = 10,5 \text{ m (livello acqua massimo invaso)}$$

$$p_{\text{max}} (H=10,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 10,5 \text{ m} = 105 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua)}$$

$$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (105 - 0 \text{ kN/m}^2) = 37,0 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,625 \text{ m}) / 2 = (105 \text{ kN/m}^2 - 37,0 \text{ kN/m}^2) \times (1,625 \text{ m}) / 2 = 55 \text{ kN/m}$$

$$D2 = (\sigma_d) \times (1,625 \text{ m}) = (37 \text{ kN/m}^2) \times (1,625 \text{ m}) = 60 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (5,086 \text{ m}) / 2 = (37,0 - 0,0 \text{ kN/m}^2) \times (5,086 \text{ m}) / 2 = 94 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 = 55 + 60 + 94 = 209 \text{ kN/m (livello max. invaso)}$$

$$b_{D1} = 6,171 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 5,898 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 3,39 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 55 \text{ kN/m} \times 6,171 \text{ m} = 339 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 60 \text{ kN/m} \times 5,898 \text{ m} = 354 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 94 \text{ kN/m} \times 3,39 \text{ m} = 319 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 339 + 354 + 319 = 1012 \text{ kNm/m (momento instabilizzante con livello massimo invaso)}$$

Sisma E<sub>x</sub>, Monte-valle

$$F_{x-Ex} = 0,03 \times 759 \text{ kN/m} = 23 \text{ kN/m (direzione Monte-Valle)}$$

$$h_{F_{x-Ex}} = 3,056 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{F_{x-Ex}} = F_{x-Ex} \times h_{F_{x-Ex}} = 23 \text{ kN/m} \times 3,056 \text{ m} = 70 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_z$ , basso-alto

$$F_{z-Ez} = 0,015 \times 759 \text{ kN/m} = 11 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{F_{z-Ez}} = 4,247 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{F_{z-Ez}} = F_{z-Ez} \times b_{F_{z-Ez}} = 11 \text{ kN/m} \times 4,247 \text{ m} = 47 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Azioni inerziali acqua invasata

$$I = 17 \text{ kN/m (Spinta inerziale totale)}$$

$$h_I = 3,325 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_I = I \times h_I = 17 \text{ kNm/m} \times 3,325 \text{ m} = 57 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### 7.1.2.1 COMBINAZIONE STATICA ( $1 \times G1 + 1 \times G2 + 1 \times G3$ )

##### Peso proprio $\times 1$ :

$$M_{G_{tot}} = 3223 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 759 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

##### Spinta acqua max invaso $\times 1$

$$M_{W_i} = 511 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_i} = 1590 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_i = 140 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_i = 512 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

##### Sottopressioni $\times 1$

$$M_D = 1012 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 209 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

#### Verifica ribaltamento

$$M_{stabilizzante} = 3223 + 511 \text{ kNm/m} = 3734 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 1590 + 1012 \text{ kNm/m} = 2602 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 3734 \text{ kNm/m} / 2602 \text{ kNm/m} = 1,49 > 1 \text{ (verifica positiva)}^3$$

#### Verifica traslazione

$$V_{\text{stabilizzante}} = (759 + 140 - 209 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 517 \text{ kNm/m} \text{ (stabilizzante)}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 512 \text{ kNm/m} \text{ (instabilizzante)}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 517 \text{ kNm/m} / 512 \text{ kNm/m} = 1,01 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### 7.1.2.2 COMBINAZIONE SISMICA ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,\text{valle/monte}} + 0,3 \times E_{z,\text{Basso/Alto}} + I_x$ )

#### 7.1.2.2.1 Serbatoio pieno

##### Peso proprio $\times 1$

$$M_{\text{Gtot}} = 3223 \text{ kNm/m} \text{ (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 759 \text{ kN/m} \text{ (stabilizzante)}$$

##### Spinta acqua (condizione sismica) $\times 1$

$$M_{\text{Wr}} = 435 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{Sr}} = 1236 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 130 \text{ kN/m} \text{ (stabilizzante)}$$

$$S_r = 420 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

##### Sottopressioni $\times 1$

$$M_{\text{D}} = 905 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$D = 187 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

##### Sisma Ex (Monte-Valle) $\times 1$

$$M_{\text{Ex, Monte-valle}} = 70 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{x-Ex, monte-valle}} = 23 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

##### Sisma Ez (Basso-Alto) $\times 0,3$

$$M_{\text{Ez}} = (47 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 14 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{z-Ez, basso-alto}} = (11 \text{ kN/m} \times 0,3) = 3 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

##### Azioni inerziali $\times 1$

$$M_{\text{I}} = 57 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$I_{\text{x, monte-valle}} = 17 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

#### **Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 3223 + 435 \text{ kNm/m} = 3658 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 1236 + 905 + 70 + 14 + 57 = 2282 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

Mstabilizzante / Minstabilizzante = 3658 kNm/m / 2282 kNm/m = 1,60 > 1 (verifica positiva)

### Verifica traslazione

Vstabilizzante = (759 + 130 – 187 – 3 kNm/m) × 0,75 = 524 kNm/m

Vinstabilizzante = 420 + 23 + 17 kNm/m = 460 kNm/m

Vstabilizzante / Vinstabilizzante = 524 kNm/m / 460 kNm/m = 1,14 > 1 (verifica positiva)

### 7.1.2.2.2 Serbatoio vuoto

#### Peso proprio × 1

M<sub>Gtot</sub> = 3223 kNm/m (momento totale stabilizzante)

G<sub>tot</sub> = 759 kN/m (stabilizzante)

#### Sisma Ex (Monte-Valle) × 1

M<sub>Ex, Monte-valle</sub> = 70 kNm/m (momento instabilizzante)

F<sub>x-Ex, monte-valle</sub> = 23 kN/m (instabilizzante)

#### Sisma Ez (Basso-Alto) × 0,3

M<sub>Ez</sub> = (47 kNm/m) × 0,3 = 14 (momento instabilizzante)

F<sub>z-Ez, basso-alto</sub> = (11 kN/m × 0,3) = 3 kN/m (instabilizzante)

### Verifica ribaltamento

Mstabilizzante = 3223 kNm/m (momento stabilizzante)

Minstabilizzante = 70 + 14 = 84 kNm/m (momento instabilizzante)

Mstabilizzante / Minstabilizzante = 3223 kNm/m / 84 kNm/m = 38,4 > 1 (verifica positiva)

### Verifica traslazione

Vstabilizzante = (759 – 3 kNm/m) × 0,75 = 567 kNm/m

Vinstabilizzante = 23 kNm/m

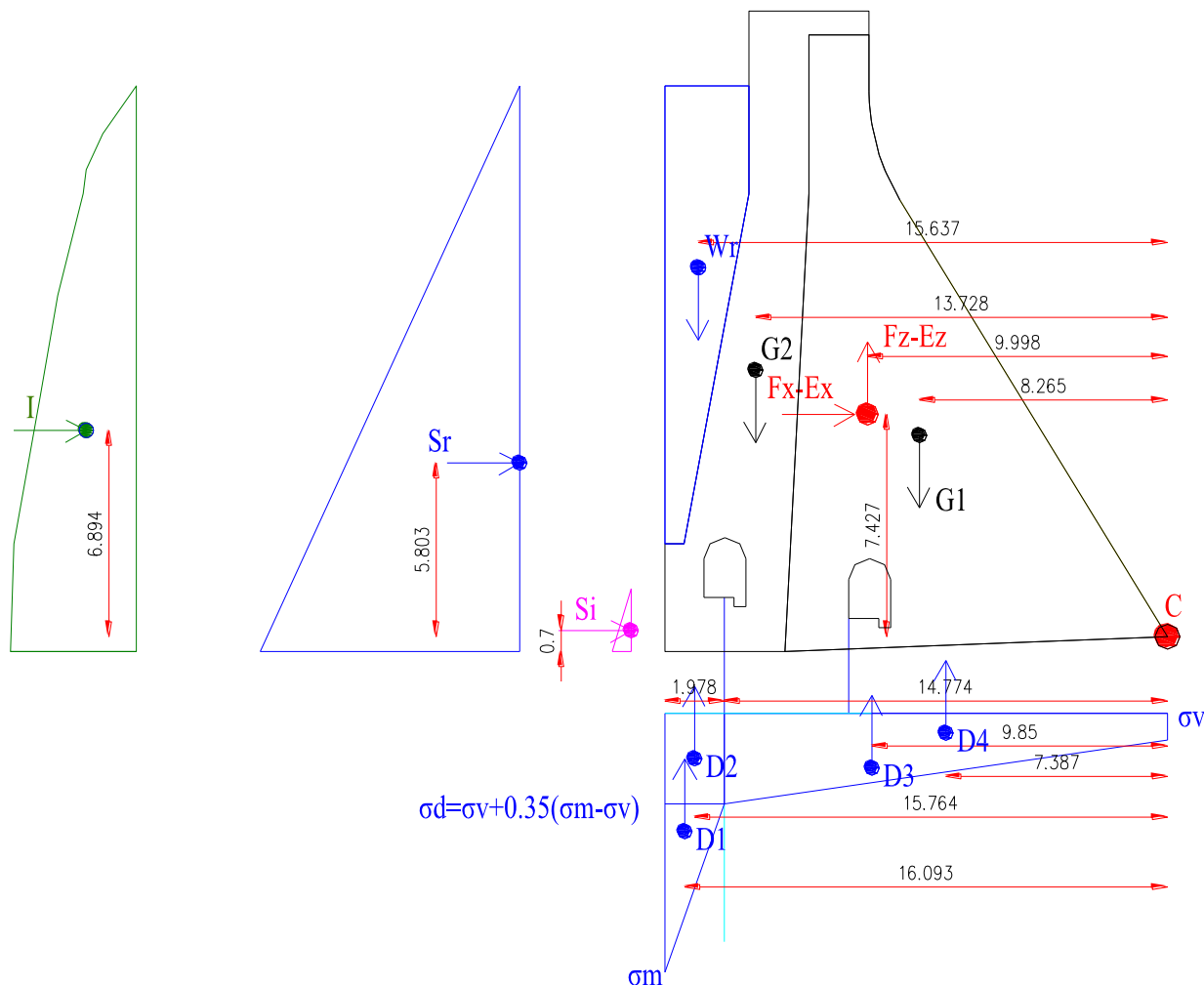
Vstabilizzante / Vinstabilizzante = 567 kNm/m / 23 kNm/m = 24,7 > 1 (verifica positiva)

**8. CONCIO B / SEZIONE EMERGENTE (DIGA APPESANTITA – D.M.24/03/1982)**

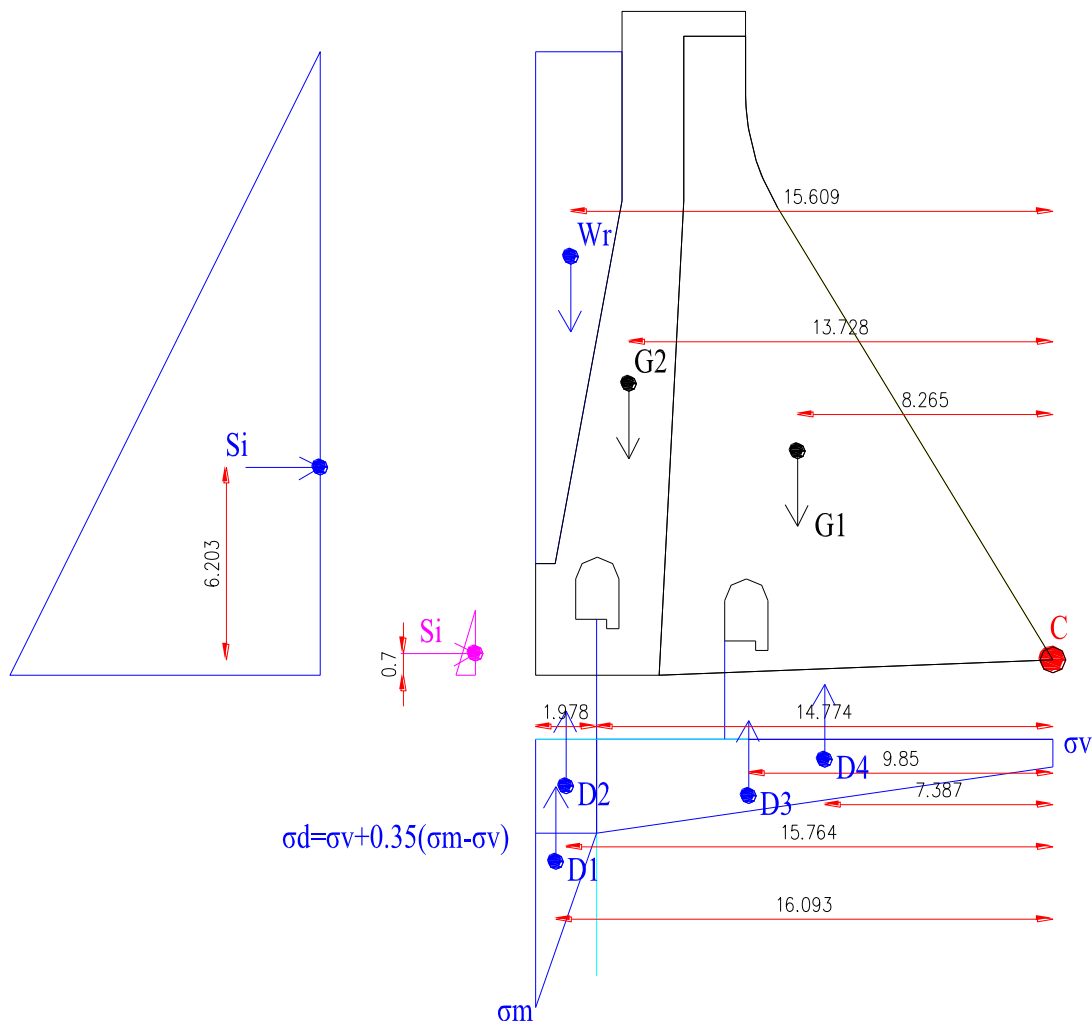
**8.1 VERIFICHE A RIBALTAMENTO E TRASLAZIONE DEL CORPO DIGA**

**8.1.1 AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE DI BASE**

Le verifiche sono condotte su una striscia di diga appesantita di larghezza 1 m:



*Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua in condizione sismica (+627,6 m) per le verifiche in corrispondenza della sezione di base*



*Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massimo invaso (+628,62 m) per la combinazione statica in corrispondenza della sezione di base*

Le verifiche a ribaltamento e traslazione sono state condotte a favore di sicurezza considerando l’andamento delle sottopressioni lineare tra il nuovo drenone realizzato a monte e la pressione di valle, senza quindi mettere in conto l’ulteriore contributo di riduzione delle sottopressioni dovuto alla presenza del drenone esistente nel corpo diga di valle. Infine nelle verifiche a traslazione non è stato messo in conto a favore di sicurezza il contributo positivo dovuto alla pendenza esistente (in leggera salita da monte verso valle) sul contatto tra il corpo diga di valle e la roccia di fondazione.

Di seguito si riportano i carichi messi in conto:

Peso proprio

Il peso proprio della sezione trascinabile presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{cls,esist} = 127,7 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 3029 \text{ kN/m} \text{ (peso diga esistente)}$$

$$G_2 = A_c \times \rho_{cls,nuovo} = 58,3 \text{ m}^2 \times 24,00 \text{ kN/m}^3 = 1399 \text{ kN/m} \text{ (peso appesantimento)}$$

$b_{G1} = 8,265$  m (braccio orizzontale peso diga esistente rispetto punto di rotazione)

$b_{G2} = 13,728$  m (braccio orizzontale peso appesantimento rispetto punto di rotazione)

$G_{tot} = G_1 + G_2 = 4428$  kN/m (peso totale diga)

$M_{Gtot} = (G_1 \times b_{G1}) + (G_2 \times b_{G2}) = (3029 \text{ kN/m} \times 8,265 \text{ m}) + (1399 \text{ kN/m} \times 13,728 \text{ m}) = 44240$  kNm/m  
(momento totale stabilizzante)

### Spinta acqua cmb. sismica

$H_{max} = 18,9$  m

$p_{max} (H=18,9 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max} \cdot g = 10 \text{ kN/m}^3 \times 18,9 \text{ m} = 189$  kN/m<sup>2</sup> (pressione acqua alla base)

$S_i = (p_{max}) \times 18,9 \text{ m} / 2 = 189 \text{ kN/m}^2 \times 18,9 \text{ m} / 2 = 1786$  kN /m (spinta orizzontale)

$W_r = (A_r \times \rho_w) = 30,1 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 301$  kN/m (peso acqua)

$b_{Wr} = 15,637$  m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{Sr} = 5,803$  m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{Wr} = W_r \times b_{Wr} = 301 \text{ kN/m} \times 15,637 \text{ m} = 4707$  kNm/m (momento stabilizzante)

$M_{Sr} = S_r \times h_{Sr} = 1786 \text{ kN/m} \times 5,803 \text{ m} = 10364$  kNm/m (momento instabilizzante)

### Spinta acqua max invaso

$H_{max.inv} = 20,1$  m (livello acqua massimo invaso)

$p_{max} (H=20,1 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max.inv} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 20,1 \text{ m} = 201$  kN/m<sup>2</sup> (pressione acqua alla base)

$S_i = p_{max} \times 20,1 \text{ m} / 2 = (201) \text{ kN/m}^2 \times 20,1 \text{ m} / 2 = 2020$  kN /m (spinta orizzontale)

$W_i = (A_i \times \rho_w) = 33,5 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 335$  kN/m (peso acqua)

$b_{Wi} = 15,609$  m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{Si} = 6,203$  m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{Wi} = W_i \times b_{Wi} = 335 \text{ kN/m} \times 15,609 \text{ m} = 5229$  kNm/m (momento stabilizzante)

$M_{Si} = S_i \times h_{Si} = 2020 \text{ kN/m} \times 6,203 \text{ m} = 12530$  kNm/m (momento instabilizzante)

### Spinta interrimento

$H_{max.int} = 2,1$  m (livello interrimento)

$p_{max} (H=2,1 \text{ m}) = \rho_f \times H_{max.int} = 6 \text{ kN/m}^3 \times 2,1 \text{ m} = 12,6$  kN/m<sup>2</sup> (pressione alla base)

$S_i = (p_{max} \times H_{max.int}) / 2 = (12,6 \text{ kN/m}^2 \times 2,1 \text{ m}) / 2 = 13,2$  kN /m (spinta orizzontale)

$h_{S_{wi}} = 0,7$  m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{Si} = S_i \times h_{S_{wi}} = 13,2 \text{ kN/m} \times 0,7 \text{ m} = 9,24$  kNm/m (momento instabilizzante)

Sottopressioni

Nel calcolo delle sottopressioni si considera un livello idrostatico a valle pari a 1,3 m. Tale valore corrisponde all'altezza del calcestruzzo dello scivolo nell'ipotesi che si possa generare infiltrazione all'interno della suola in calcestruzzo dello scivolo. L'acqua che tracima dalla diga viene rilasciata in alveo circa 40 m più a valle della diga, pertanto la pressione idrostatica a valle della diga dovrebbe essere a rigore pari a zero, a meno appunto della presenza di possibili infiltrazioni.

$H_{max} = 18,9 \text{ m}$  (livello acqua massima cmb sismica)

$\sigma_m (H=18,9 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 18,9 \text{ m} = 189 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua alla base a monte)

$\sigma_v (h_v=1,3 \text{ m}) = \rho_w \times h_v = 10 \text{ kN/m}^3 \times 1,3 \text{ m} = 13 \text{ kN/m}^2$

$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 13 + 0,35 \times (189 - 13 \text{ kN/m}^2) = 75 \text{ kN/m}^2$  (pressione dreno)

$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,978 \text{ m}) / 2 = (189 \text{ kN/m}^2 - 75 \text{ kN/m}^2) \times (1,978 \text{ m}) / 2 = 113 \text{ kN/m}$

$D2 = (\sigma_d) \times (1,978 \text{ m}) = (75 \text{ kN/m}^2) \times (1,978 \text{ m}) = 148 \text{ kN/m}$

$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (14,774 \text{ m}) / 2 = (75 - 13 \text{ kN/m}^2) \times (14,774 \text{ m}) / 2 = 458 \text{ kN/m}$

$D4 = (\sigma_v) \times (14,774 \text{ m}) = (13 \text{ kN/m}^2) \times (14,774 \text{ m}) = 192 \text{ kN/m}$

$D = D1 + D2 + D3 + D4 = 113 + 148 + 458 + 192 = 911 \text{ kN/m}$  (livello max. regolazione)

$b_{D1} = 16,093 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D2} = 15,764 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D3} = 9,85 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D4} = 7,39 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 113 \text{ kN/m} \times 16,093 \text{ m} = 1819 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 148 \text{ kN/m} \times 15,764 \text{ m} = 2333 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 458 \text{ kN/m} \times 9,85 \text{ m} = 4511 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D4} = D4 \times b_{D4} = 192 \text{ kN/m} \times 7,39 \text{ m} = 1419 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} + M_{D4} = 1819 + 2333 + 4511 + 1419 = 10082 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante con livello massima regolazione)

$H_{max.inv} = 20,1 \text{ m}$  (livello acqua massimo invaso)

$p_{max} (H=20,1 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max.inv} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 20,1 \text{ m} = 201 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua alla base a monte)



$$\sigma_v (h_v=1,3 \text{ m}) = \rho_w \times h_v = 10 \text{ kN/m}^3 \times 1,3 \text{ m} = 13 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 13 + 0,35 \times (201 - 13 \text{ kN/m}^2) = 78,8 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,978 \text{ m}) / 2 = (201 \text{ kN/m}^2 - 78,8 \text{ kN/m}^2) \times (1,978 \text{ m}) / 2 = 121 \text{ kN/m}$$

$$D2 = (\sigma_d) \times (1,978 \text{ m}) = (78,8 \text{ kN/m}^2) \times (1,978 \text{ m}) = 156 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (14,774 \text{ m}) / 2 = (78,8 - 13 \text{ kN/m}^2) \times (14,774 \text{ m}) / 2 = 486 \text{ kN/m}$$

$$D4 = (\sigma_v) \times (14,774 \text{ m}) = (13 \text{ kN/m}^2) \times (14,774 \text{ m}) = 192 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 + D4 = 121 + 156 + 486 + 192 = 955 \text{ kN/m (livello max. invaso)}$$

$$b_{D1} = 16,093 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 15,764 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 9,85 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D4} = 7,39 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 121 \text{ kN/m} \times 16,093 \text{ m} = 1947 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 156 \text{ kN/m} \times 15,764 \text{ m} = 2459 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 486 \text{ kN/m} \times 9,85 \text{ m} = 4787 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D4} = D4 \times b_{D4} = 192 \text{ kN/m} \times 7,39 \text{ m} = 1419 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} + M_{D4} = 1947 + 2459 + 4787 + 1419 = 10612 \text{ kNm/m (momento instabilizzante con livello massimo invaso)}$$

#### Sisma $E_x$ , Monte-valle

$$F_{x-Ex} = 0,03 \times 4428 \text{ kN/m} = 133 \text{ kN/m (direzione Monte-Valle)}$$

$$h_{F_x-Ex} = 7,427 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{F_x-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{F_x-Ex} = 133 \text{ kN/m} \times 7,427 \text{ m} = 988 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_z$ , basso-alto

$$F_{z-Ez} = 0,015 \times 4428 \text{ kN/m} = 66 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{F_z-Ez} = 10 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{F_z-Ez} = F_{z-Ez} \times b_{F_z-Ez} = 66 \text{ kN/m} \times 10 \text{ m} = 660 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Azioni inerziali acqua invasata

$$I = 54 \text{ kN/m (Spinta inerziale totale)}$$

$$h_I = 6,894 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_I = I \times h_I = 54 \text{ kNm/m} \times 6,894 \text{ m} = 372 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

**8.1.1.1 COMBINAZIONE STATICA ( $1 \times G1 + 1 \times G2 + 1 \times G3$ )**Peso proprio  $\times 1$  :

$$M_{G_{tot}} = 44240 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 4428 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max invaso  $\times 1$ 

$$M_{W_i} = 5229 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_i} = 12530 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_i = 335 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_i = 2020 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Spinta interrimento  $\times 1$ 

$$M_{S_i} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni  $\times 1$ 

$$M_D = 10612 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 955 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{stabilizzante} = 44240 + 5229 \text{ kNm/m} = 49469 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 12530 + 10 + 10612 \text{ kNm/m} = 23152 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 49469 \text{ kNm/m} / 23152 \text{ kNm/m} = 2,14 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{stabilizzante} = (4428 + 335 - 955 \text{ kN/m}) \times 0,75 = 2856 \text{ kNm/m (stabilizzante)}$$

$$V_{instabilizzante} = 2020 + 13 \text{ kNm/m} = 2033 \text{ kNm/m (instabilizzante)}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 2856 \text{ kNm/m} / 2033 \text{ kNm/m} = 1,40 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**8.1.1.2 COMBINAZIONE SISMICA ( $G1 + G2 + G3 + E_{x, valle/monte} + 0.3 \times E_{z, Basso/Alto} + I_x$ )****8.1.1.2.1 Serbatoio pieno**Peso proprio  $\times 1$ 

$$M_{G_{tot}} = 44240 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 4428 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua (condizione sismica)  $\times 1$

$$M_{WR} = 4707 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{SR} = 10364 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_R = 301 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_R = 1786 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Spinta interrimento  $\times 1$

$$M_{Si} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni  $\times 1$

$$M_D = 10082 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 911 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ex (Monte-Valle)  $\times 1$

$$M_{Ex, \text{Monte-valle}} = 988 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{X-Ex, \text{monte-valle}} = 133 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez (Basso-Alto)  $\times 0,3$

$$M_{Ez} = (660 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 198 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{Z-Ez, \text{basso-alto}} = (66 \text{ kN/m} \times 0,3) = 20 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Azioni inerziali  $\times 1$

$$M_I = 372 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x, \text{monte-valle}} = 54 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

### **Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 44240 + 4707 \text{ kNm/m} = 48947 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 10364 + 9 + 10082 + 988 + 198 + 372 = 22013 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 48947 \text{ kNm/m} / 22013 \text{ kNm/m} = 2,22 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

### **Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (4428 + 301 - 911 - 20 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 2849 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 1786 + 13,2 + 133 + 54 \text{ kNm/m} = 1986 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 2849 \text{ kNm/m} / 1986 \text{ kNm/m} = 1,43 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**8.1.1.2.2 Serbatoio vuoto**Peso proprio × 1

$$M_{\text{Gtot}} = 44240 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 4428 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta interrimento × 1

$$M_{\text{Si}} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ex (Monte-Valle) × 1

$$M_{\text{Ex, Monte-valle}} = 988 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{x-Ex, monte-valle}} = 133 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{\text{Ez}} = (660 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 198 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{z-Ez, basso-alto}} = (66 \text{ kN/m} \times 0,3) = 20 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 44240 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 9 + 988 + 198 = 1195 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 44240 \text{ kNm/m} / 1195 \text{ kNm/m} = 37,0 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

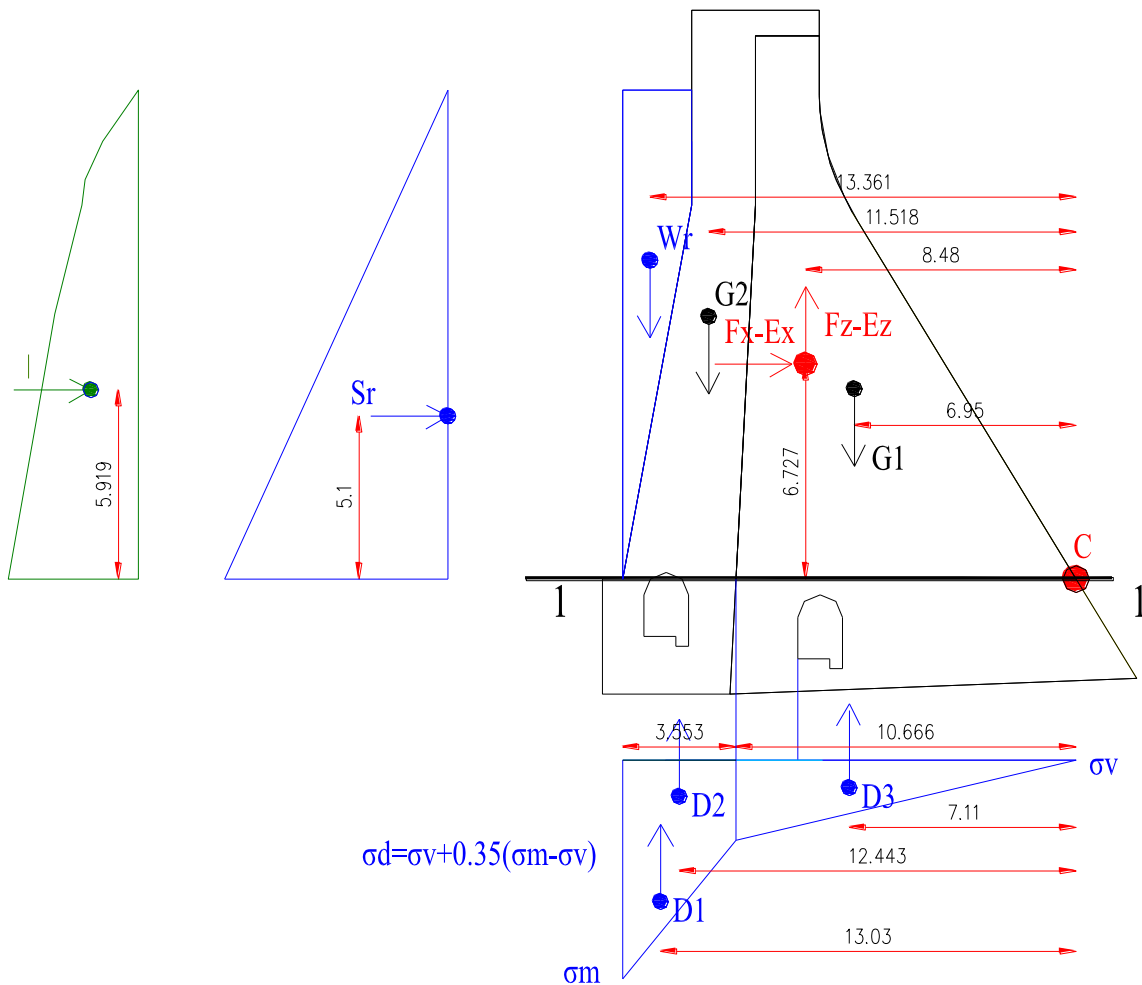
$$V_{\text{stabilizzante}} = (4428 - 20 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 3306 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 13,2 + 133 \text{ kNm/m} = 146 \text{ kNm/m}$$

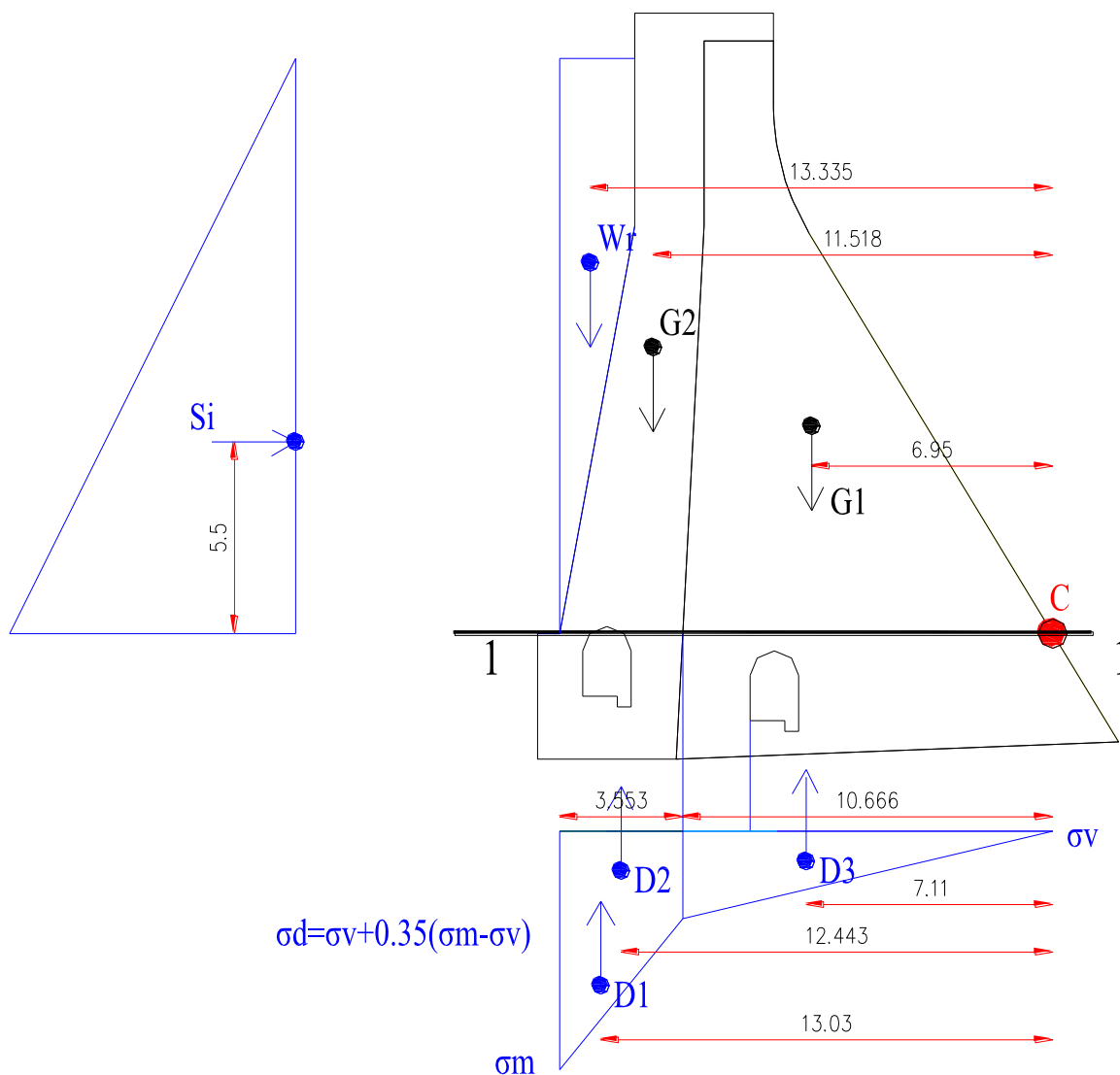
$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 3306 \text{ kNm/m} / 146 \text{ kNm/m} = 22,6 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

8.1.2 AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 1-1

Le verifiche sono condotte su una striscia di diga appesantita di larghezza 1 m:



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua in condizione sismica (+627,6 m) per le verifiche in corrispondenza della sezione 1-1



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massimo invaso (+628,62 m) per la combinazione statica in corrispondenza della sezione 1-1

Le verifiche a ribaltamento e traslazione sono state condotte a favore di sicurezza considerando l'andamento delle sottopressioni lineare tra il nuovo drenone realizzato a monte e la pressione di valle, senza quindi mettere in conto l'ulteriore contributo di riduzione delle sottopressioni dovuto alla presenza del drenone esistente nel corpo diga di valle.

Di seguito si riportano i carichi messi in conto:

Peso proprio

Il peso proprio della sezione trascinabile presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{cls, esist} = 91,1 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 2161 \text{ kN/m} \text{ (peso diga esistente)}$$

$$G_2 = A_c \times \rho_{cls, nuovo} = 46,2 \text{ m}^2 \times 24,00 \text{ kN/m}^3 = 1109 \text{ kN/m} \text{ (peso appesantimento)}$$

$b_{G1} = 6,95 \text{ m}$  (braccio orizzontale peso diga esistente rispetto punto di rotazione)

$b_{G2} = 11,518 \text{ m}$  (braccio orizzontale peso appesantimento rispetto punto di rotazione)

$G_{\text{tot}} = G_1 + G_2 = 3270 \text{ kN/m}$  (peso totale diga)

$M_{G_{\text{tot}}} = (G_1 \times b_{G1}) + (G_2 \times b_{G2}) = (2161 \text{ kN/m} \times 6,95 \text{ m}) + (1109 \text{ kN/m} \times 11,518 \text{ m}) = 27792 \text{ kNm/m}$   
(momento totale stabilizzante)

### Spinta acqua cmb. sismica

$H_{\text{max}} = 15,3 \text{ m}$

$p_{\text{max}} (H=15,3 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 15,3 \text{ m} = 153 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua alla base)

$S_i = (p_{\text{max}}) \times 15,3 \text{ m} / 2 = (153) \text{ kN/m}^2 \times 15,3 \text{ m} / 2 = 1170 \text{ kN/m}$  (spinta orizzontale)

$W_r = (A_r \times \rho_w) = 20,4 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 204 \text{ kN/m}$  (peso acqua)

$b_{W_r} = 13,361 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{S_r} = 5,1 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{W_r} = W_r \times b_{W_r} = 204 \text{ kN/m} \times 13,361 \text{ m} = 2726 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{S_r} = S_r \times h_{S_r} = 1170 \text{ kN/m} \times 5,1 \text{ m} = 5967 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

### Spinta acqua max invaso

$H_{\text{max.inv}} = 16,5 \text{ m}$  (livello acqua massimo invaso)

$p_{\text{max}} (H=16,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 16,5 \text{ m} = 165 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua)

$S_i = (p_{\text{max}}) \times 16,5 \text{ m} / 2 = (165) \text{ kN/m}^2 \times 16,5 \text{ m} / 2 = 1361 \text{ kN/m}$  (spinta orizzontale)

$W_r = (A_i \times \rho_w) = 23 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 230 \text{ kN/m}$  (peso acqua)

$b_{W_{ri}} = 13,335 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$h_{S_i} = 5,5 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{W_i} = W_r \times b_{W_r} = 230 \text{ kN/m} \times 13,335 \text{ m} = 3067 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{S_i} = S_i \times h_{S_i} = 1361 \text{ kN/m} \times 5,5 \text{ m} = 7486 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

### Sottopressioni

$H_{\text{max}} = 15,3 \text{ m}$  (livello acqua massima cmb sismica)

$\sigma_m (H=15,3 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.reg}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 15,3 \text{ m} = 153 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua alla base a monte)

$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$

$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (153 - 0 \text{ kN/m}^2) = 54 \text{ kN/m}^2$  (pressione dreno)

$$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (3,553 \text{ m}) / 2 = (153 \text{ kN/m}^2 - 54 \text{ kN/m}^2) \times (3,553 \text{ m}) / 2 = 176 \text{ kN/m}$$

$$D2 = (\sigma_d) \times (3,553 \text{ m}) = (54 \text{ kN/m}^2) \times (3,553 \text{ m}) = 192 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d) \times (10,666 \text{ m}) / 2 = (54 \text{ kN/m}^2) \times (10,666 \text{ m}) / 2 = 288 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 = 176 + 192 + 288 = 656 \text{ kN/m (livello max. regolazione)}$$

$$b_{D1} = 13,03 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 12,443 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 7,11 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 176 \text{ kN/m} \times 13,03 \text{ m} = 2293 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 192 \text{ kN/m} \times 12,443 \text{ m} = 2389 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 288 \text{ kN/m} \times 7,11 \text{ m} = 2048 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 2293 + 2389 + 2048 = 6730 \text{ kNm/m (momento instabilizzante con livello sismico)}$$

$$H_{\text{max.inv}} = 16,5 \text{ m (livello acqua massimo invaso)}$$

$$p_{\text{max}} (H=16,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 16,5 \text{ m} = 165 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua)}$$

$$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (165 - 0 \text{ kN/m}^2) = 58,0 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (3,553 \text{ m}) / 2 = (165 \text{ kN/m}^2 - 58,0 \text{ kN/m}^2) \times (3,553 \text{ m}) / 2 = 190 \text{ kN/m}$$

$$D2 = (\sigma_d) \times (3,553 \text{ m}) = (58 \text{ kN/m}^2) \times (3,553 \text{ m}) = 206 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (10,666 \text{ m}) / 2 = (58,0 - 0,0 \text{ kN/m}^2) \times (10,666 \text{ m}) / 2 = 309 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 = 190 + 206 + 309 = 705 \text{ kN/m (livello max. invaso)}$$

$$b_{D1} = 13,03 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 12,443 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 7,11 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 190 \text{ kN/m} \times 13,03 \text{ m} = 2476 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 206 \text{ kN/m} \times 12,443 \text{ m} = 2563 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 316 \text{ kN/m} \times 7,11 \text{ m} = 2247 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 2476 + 2563 + 2247 = 7286 \text{ kNm/m (momento instabilizzante con livello massimo invaso)}$$



Sisma  $E_x$ , Monte-valle

$$F_{x-Ex} = 0,03 \times 3270 \text{ kN/m} = 98 \text{ kN/m (direzione Monte-Valle)}$$

$$h_{F_x-Ex} = 6,727 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{F_x-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{F_x-Ex} = 98 \text{ kN/m} \times 6,727 \text{ m} = 659 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

Sisma  $E_z$ , basso-alto

$$F_{z-Ez} = 0,015 \times 3270 \text{ kN/m} = 49 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{F_z-Ez} = 8,48 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{F_z-Ez} = F_{z-Ez} \times b_{F_z-Ez} = 49 \text{ kN/m} \times 8,48 \text{ m} = 416 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

Azioni inerziali acqua invasata

$$I = 39 \text{ kN/m (Spinta inerziale totale)}$$

$$h_I = 6,894 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_I = I \times h_I = 39 \text{ kNm/m} \times 6,894 \text{ m} = 269 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

8.1.2.1 COMBINAZIONE STATICA ( $1 \times G1 + 1 \times G2 + 1 \times G3$ )Peso proprio  $\times 1$  :

$$M_{G_{tot}} = 27792 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 3270 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max invaso  $\times 1$ 

$$M_{W_i} = 3067 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_i} = 7486 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_i = 230 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_i = 1361 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni  $\times 1$ 

$$M_D = 7286 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 705 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Verifica ribaltamento

$$M_{stabilizzante} = 27792 + 3067 \text{ kNm/m} = 30859 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 7486 + 7286 \text{ kNm/m} = 14772 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 30859 \text{ kNm/m} / 14772 \text{ kNm/m} = 2,09 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (3270 + 230 - 705 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 2096 \text{ kNm/m} \text{ (stabilizzante)}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 1361 \text{ kNm/m} \text{ (instabilizzante)}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 2096 \text{ kNm/m} / 1361 \text{ kNm/m} = 1,54 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

8.1.2.2 **COMBINAZIONE SISMICA** ( $G1 + G2 + G3 + E_{x,\text{valle/monte}} + 0,3 \times E_{z,\text{Basso/Alto}} + I_x$ )**8.1.2.2.1 Serbatoio pieno****Peso proprio × 1**

$$M_{\text{Gtot}} = 27792 \text{ kNm/m} \text{ (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 3270 \text{ kN/m} \text{ (stabilizzante)}$$

**Spinta acqua (condizione sismica) × 1**

$$M_{\text{Wr}} = 2726 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{Sr}} = 5967 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 204 \text{ kN/m} \text{ (stabilizzante)}$$

$$S_r = 1170 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

**Sottopressioni × 1**

$$M_{\text{D}} = 6730 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$D = 656 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

**Sisma Ex (Monte-Valle) × 1**

$$M_{\text{Ex, Monte-valle}} = 659 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{x-Ex, monte-valle}} = 98 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

**Sisma Ez (Basso-Alto) × 0,3**

$$M_{\text{Ez}} = (416 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 125 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{z-Ez, basso-alto}} = (49 \text{ kN/m} \times 0,3) = 15 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

**Azioni inerziali × 1**

$$M_{\text{I}} = 269 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$I_{\text{x, monte-valle}} = 39 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 27792 + 2726 \text{ kNm/m} = 30518 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

Minstabilizzante = 5967 + 6730 + 659 + 125 + 269 = 13750 kNm/m (momento instabilizzante)

Mstabilizzante / Minstabilizzante = 30518 kNm/m / 13750 kNm/m = 2,22 > 1 (verifica positiva)

#### Verifica traslazione

Vstabilizzante = (3270 + 204 – 656 – 15 kNm/m) × 0,75 = 2102 kNm/m

Vinstabilizzante = 1170 + 98 + 39 kNm/m = 1307 kNm/m

Vstabilizzante / Vinstabilizzante = 2102 kNm/m / 1307 kNm/m = 1,61 > 1 (verifica positiva)

#### 8.1.2.2.2 Serbatoio vuoto

##### Peso proprio × 1

M<sub>Gtot</sub> = 27792 kNm/m (momento totale stabilizzante)

G<sub>tot</sub> = 3270 kN/m (stabilizzante)

##### Sisma Ex (Monte-Valle) × 1

M<sub>Ex, Monte-valle</sub> = 659 kNm/m (momento instabilizzante)

F<sub>x-Ex, monte-valle</sub> = 98 kN/m (instabilizzante)

##### Sisma Ez (Basso-Alto) × 0,3

M<sub>Ez</sub> = (416 kNm/m) × 0,3 = 125 (momento instabilizzante)

F<sub>z-Ez, basso-alto</sub> = (49 kN/m × 0,3) = 15 kN/m (instabilizzante)

#### Verifica ribaltamento

Mstabilizzante = 27792 kNm/m (momento stabilizzante)

Minstabilizzante = 659 + 125 = 784 kNm/m (momento instabilizzante)

Mstabilizzante / Minstabilizzante = 27792 kNm/m / 784 kNm/m = 35,4 > 1 (verifica positiva)

#### Verifica traslazione

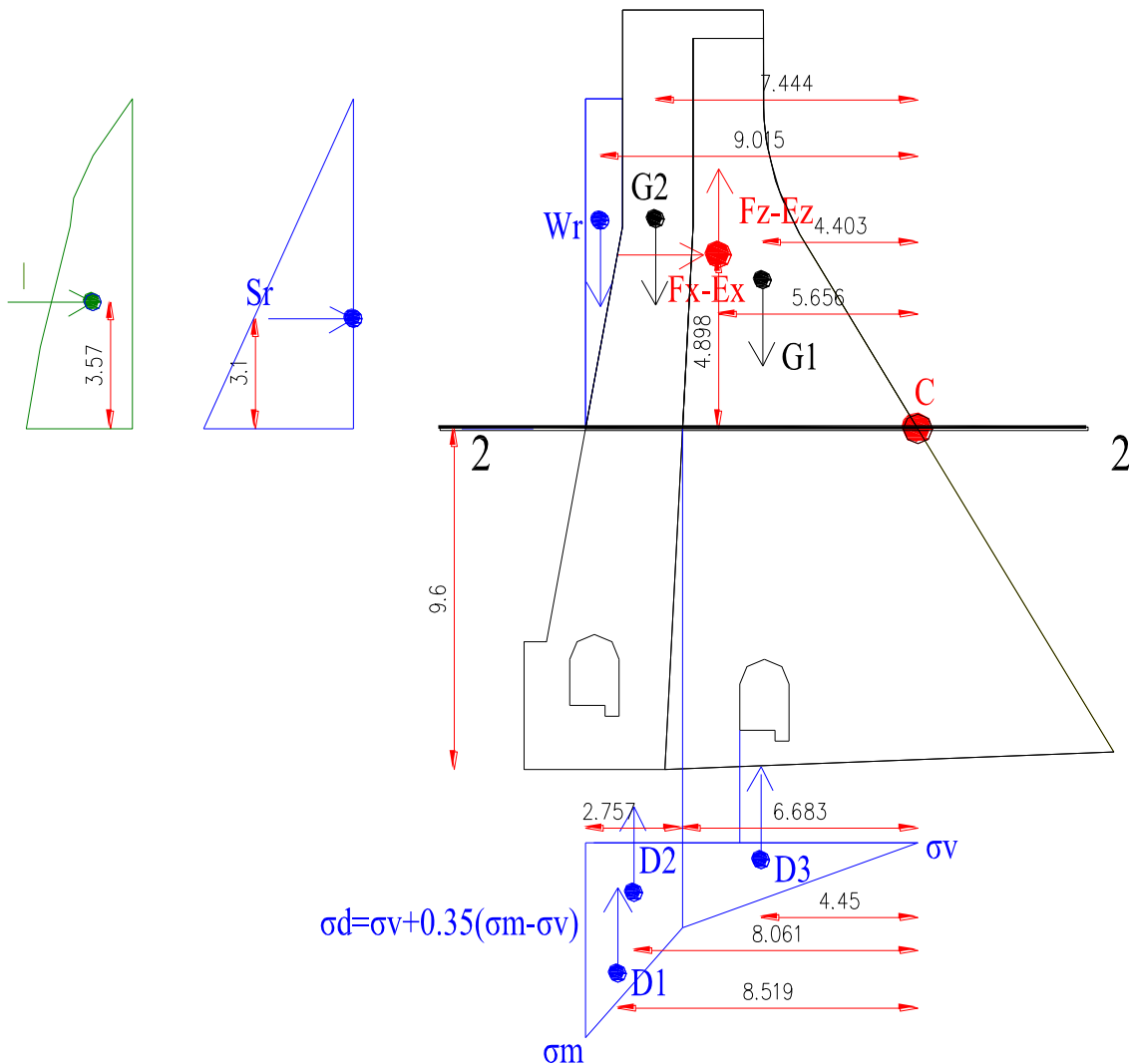
Vstabilizzante = (3270 – 15 kNm/m) × 0,75 = 2441 kNm/m

Vinstabilizzante = 98 kNm/m

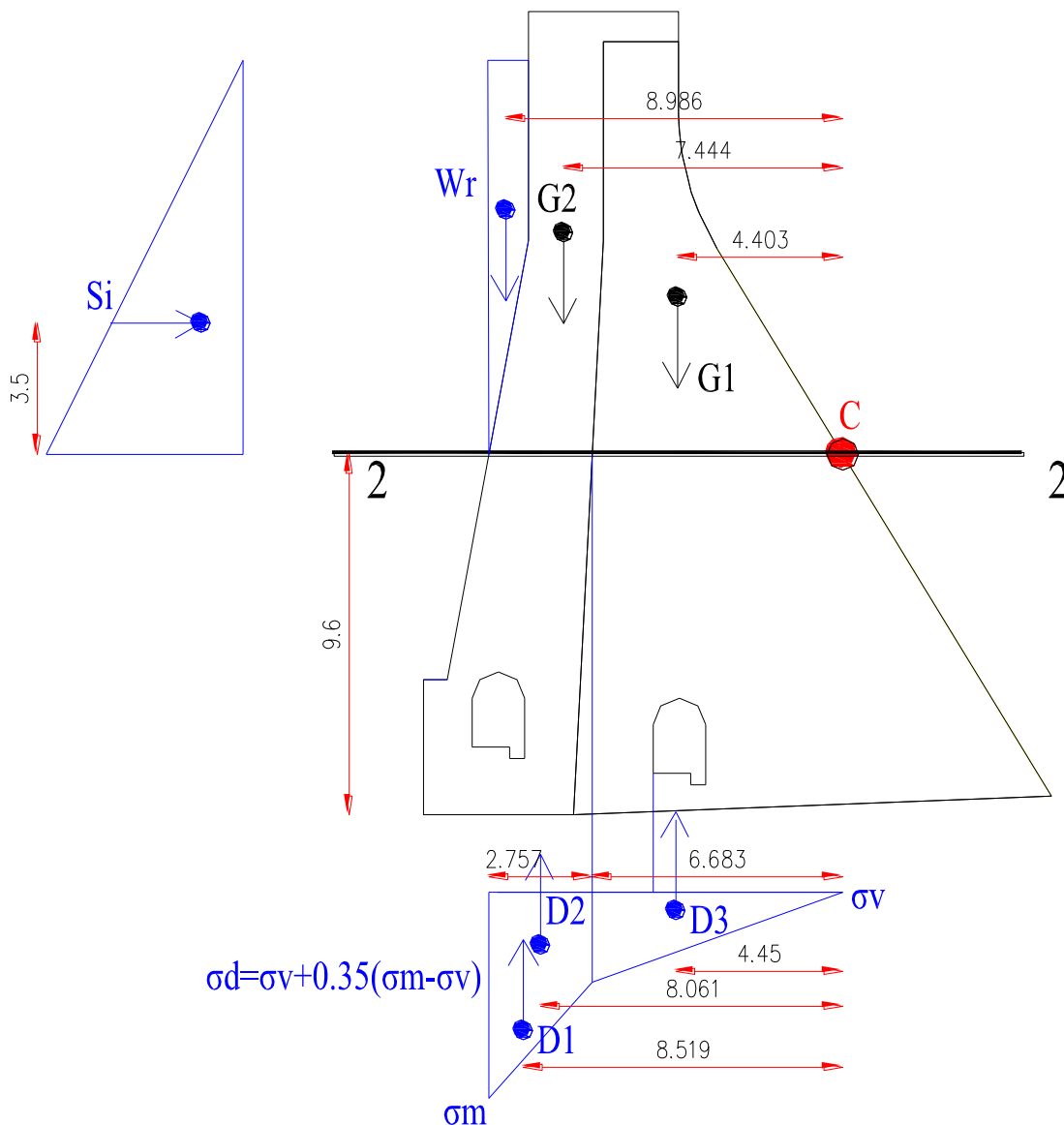
Vstabilizzante / Vinstabilizzante = 2441 kNm/m / 98 kNm/m = 25,0 > 1 (verifica positiva)

### 8.1.3 AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 2-2

Le verifiche sono condotte su una striscia di diga appesantita di larghezza 1 m:



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua in condizione sismica (+627,6 m) per le verifiche in corrispondenza della sezione 2-2



*Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massimo invaso (+628,62 m) per la combinazione statica in corrispondenza della sezione 2-2*

Le verifiche a ribaltamento e traslazione sono state condotte a favore di sicurezza considerando l'andamento delle sottopressioni lineare tra il nuovo dreno realizzato a monte e la pressione di valle, senza quindi mettere in conto l'ulteriore contributo di riduzione delle sottopressioni dovuto alla presenza del dreno esistente nel corpo diga di valle.

Di seguito si riportano i carichi messi in conto:

Peso proprio

Il peso proprio della sezione trascinabile presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{cls, esist} = 39,0 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 925 \text{ kN/m} \text{ (peso diga esistente)}$$

$$G_2 = A_c \times \rho_{\text{cls,nuovo}} = 27,4 \text{ m}^2 \times 24,00 \text{ kN/m}^3 = 658 \text{ kN/m} \text{ (peso appesantimento)}$$

$$b_{G1} = 4,403 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale peso diga esistente rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{G2} = 7,444 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale peso appesantimento rispetto punto di rotazione)}$$

$$G_{\text{tot}} = G_1 + G_2 = 1583 \text{ kN/m} \text{ (peso totale diga)}$$

$$M_{G_{\text{tot}}} = (G_1 \times b_{G1}) + (G_2 \times b_{G2}) = (925 \text{ kN/m} \times 4,403 \text{ m}) + (658 \text{ kN/m} \times 7,444 \text{ m}) = 8971 \text{ kNm/m}$$

(momento totale stabilizzante)

### Spinta acqua cmb. sismica

$$H_{\text{max}} = 9,3 \text{ m}$$

$$p_{\text{max}} (H=9,3 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 9,3 \text{ m} = 93 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua alla base)}$$

$$S_i = (p_{\text{max}}) \times 9,3 \text{ m} / 2 = (93) \text{ kN/m}^2 \times 9,3 \text{ m} / 2 = 432 \text{ kN/m} \text{ (spinta orizzontale)}$$

$$W_r = (A_r \times \rho_w) = 6,8 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 68 \text{ kN/m} \text{ (peso acqua)}$$

$$b_{W_r} = 9,015 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{S_r} = 3,10 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{W_r} = W_r \times b_{W_r} = 68 \text{ kN/m} \times 9,015 \text{ m} = 613 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_r} = S_r \times h_{S_r} = 432 \text{ kN/m} \times 3,10 \text{ m} = 1339 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

### Spinta acqua max invaso

$$H_{\text{max.inv}} = 10,5 \text{ m} \text{ (livello acqua massimo invaso)}$$

$$p_{\text{max}} (H=10,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 10,5 \text{ m} = 105 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua)}$$

$$S_i = (p_{\text{max}}) \times 10,5 \text{ m} / 2 = (105) \text{ kN/m}^2 \times 10,5 \text{ m} / 2 = 551 \text{ kN/m} \text{ (spinta orizzontale)}$$

$$W_r = (A_i \times \rho_w) = 8,2 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 82 \text{ kN/m} \text{ (peso acqua)}$$

$$b_{W_{ri}} = 8,986 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{S_i} = 3,50 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{W_i} = W_r \times b_{W_r} = 82 \text{ kN/m} \times 8,986 \text{ m} = 737 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_i} = S_i \times h_{S_i} = 551 \text{ kN/m} \times 3,50 \text{ m} = 1929 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

### Sottopressioni

$$H_{\text{max}} = 9,3 \text{ m} \text{ (livello acqua massima cmb sismica)}$$

$$\sigma_m (H=9,3 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.reg}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 9,3 \text{ m} = 93 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua alla base a monte)}$$

$$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (93 - 0 \text{ kN/m}^2) = 33 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (2,757 \text{ m}) / 2 = (93 \text{ kN/m}^2 - 33 \text{ kN/m}^2) \times (2,757 \text{ m}) / 2 = 83 \text{ kN/m}$$

$$D2 = (\sigma_d) \times (2,757 \text{ m}) = (33 \text{ kN/m}^2) \times (2,757 \text{ m}) = 91 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d) \times (6,683 \text{ m}) / 2 = (33 \text{ kN/m}^2) \times (6,683 \text{ m}) / 2 = 111 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 = 83 + 91 + 111 = 285 \text{ kN/m}$$

$$b_{D1} = 8,519 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 8,061 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 4,45 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 83 \text{ kN/m} \times 8,519 \text{ m} = 707 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 91 \text{ kN/m} \times 8,061 \text{ m} = 734 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 111 \text{ kN/m} \times 4,45 \text{ m} = 494 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 707 + 734 + 494 = 1935 \text{ kNm/m (momento instabilizzante con livello sismico)}$$

$$H_{\text{max.inv}} = 10,5 \text{ m (livello acqua massimo invaso)}$$

$$p_{\text{max}} (H=10,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 10,5 \text{ m} = 105 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua)}$$

$$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (105 - 0 \text{ kN/m}^2) = 37,0 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (2,757 \text{ m}) / 2 = (105 \text{ kN/m}^2 - 37,0 \text{ kN/m}^2) \times (2,757 \text{ m}) / 2 = 94 \text{ kN/m}$$

$$D2 = (\sigma_d) \times (2,757 \text{ m}) = (37 \text{ kN/m}^2) \times (2,757 \text{ m}) = 102 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (6,74 \text{ m}) / 2 = (37,0 - 0,0 \text{ kN/m}^2) \times (6,683 \text{ m}) / 2 = 125 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 = 94 + 102 + 125 = 321 \text{ kN/m (livello max. invaso)}$$

$$b_{D1} = 8,519 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 8,061 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 4,45 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 94 \text{ kN/m} \times 8,519 \text{ m} = 801 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 102 \text{ kN/m} \times 8,061 \text{ m} = 822 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 125 \text{ kN/m} \times 4,45 \text{ m} = 556 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 801 + 822 + 556 = 2179 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante con livello massimo invasivo)

Sisma  $E_x$ , Monte-valle

$F_{x-Ex} = 0,03 \times 1583 \text{ kN/m} = 48 \text{ kN/m}$  (direzione Monte-Valle)

$h_{F_x-Ex} = 4,898 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{F_x-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{F_x-Ex} = 48 \text{ kN/m} \times 4,898 \text{ m} = 235 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

Sisma  $E_z$ , basso-alto

$F_{z-Ez} = 0,015 \times 1583 \text{ kN/m} = 24 \text{ kN/m}$  (direzione Basso-Alto)

$b_{F_z-Ez} = 5,656 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$M_{F_z-Ez} = F_{z-Ez} \times b_{F_z-Ez} = 24 \text{ kN/m} \times 5,656 \text{ m} = 136 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

Azioni inerziali acqua invasata

$I = 17 \text{ kN/m}$  (Spinta inerziale totale)

$h_I = 3,57 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_I = I \times h_I = 17 \text{ kNm/m} \times 3,57 \text{ m} = 61 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

**8.1.3.1 COMBINAZIONE STATICA ( $1 \times G1 + 1 \times G2 + 1 \times G3$ )**

Peso proprio  $\times 1$  :

$M_{G_{tot}} = 8971 \text{ kNm/m}$  (momento totale stabilizzante)

$G_{tot} = 1583 \text{ kN/m}$  (stabilizzante)

Spinta acqua max invasivo  $\times 1$

$M_{W_i} = 737 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{S_i} = 1929 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$W_i = 82 \text{ kN/m}$  (stabilizzante)

$S_i = 551 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

Sottopressioni  $\times 1$

$M_D = 2179 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$D = 321 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

**Verifica ribaltamento**

$M_{stabilizzante} = 8971 + 737 \text{ kNm/m} = 9708 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)



Minstabilizzante = 1929 + 2179 kNm/m = 4108 kNm/m (momento instabilizzante)

Mstabilizzante / Minstabilizzante = 9708 kNm/m / 4108 kNm/m = 2,36 >1 (verifica positiva)

### Verifica traslazione

Vstabilizzante = (1583 +82 -321 kNm/m)×0,75 = 1008 kNm/m (stabilizzante)

Vinstabilizzante = 551 kNm/m (instabilizzante)

Vstabilizzante / Vinstabilizzante = 1008 kNm/m / 551 kNm/m = 1,83 >1 (verifica positiva)

8.1.3.2 COMBINAZIONE SISMICA ( $G1 + G2 + G3 + E_{x, valle/monte} + 0.3 \times E_{z, Basso/Alto} + I_x$ )

#### 8.1.3.2.1 Serbatoio pieno

##### Peso proprio × 1

$M_{Gtot} = 8971$  kNm/m (momento totale stabilizzante)

$G_{tot} = 1583$  kN/m (stabilizzante)

##### Spinta acqua (condizione sismica) × 1

$M_{Wr} = 613$  kNm/m (momento stabilizzante)

$M_{Sr} = 1339$  kNm/m (momento instabilizzante)

$Wr = 68$  kN/m (stabilizzante)

$Sr = 432$  kN / m (instabilizzante)

##### Sottopressioni × 1

$M_D = 1935$  kNm/m (momento instabilizzante)

$D = 285$  kN/m (instabilizzante)

##### Sisma Ex (Monte-Valle) × 1

$M_{Ex, Monte-valle} = 235$  kNm/m (momento instabilizzante)

$F_{x-Ex, monte-valle} = 48$  kN/m (instabilizzante)

##### Sisma Ez (Basso-Alto) × 0,3

$M_{Ez} = (136$  kNm/m) × 0,3 = 41 (momento instabilizzante)

$F_{z-Ez, basso-alto} = (24$  kN/m × 0,3) = 7 kN/m (instabilizzante)

##### Azioni inerziali × 1

$M_I = 61$  kNm/m (momento instabilizzante)

$I_{x, monte-valle} = 17$  kN/m (instabilizzante)

**Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 8971 + 613 \text{ kNm/m} = 9584 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 1339 + 1935 + 235 + 41 + 61 = 3611 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 9584 \text{ kNm/m} / 3611 \text{ kNm/m} = 2,65 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (1583 + 68 - 285 - 7 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1019 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 432 + 48 + 17 \text{ kNm/m} = 497 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1019 \text{ kNm/m} / 497 \text{ kNm/m} = 2,05 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**8.1.3.2.2 Serbatoio vuoto****Peso proprio  $\times 1$** 

$$M_{\text{Gtot}} = 8971 \text{ kNm/m} \text{ (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 1583 \text{ kN/m} \text{ (stabilizzante)}$$

**Sisma Ex (Monte-Valle)  $\times 1$** 

$$M_{\text{Ex, Monte-valle}} = 235 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{X-Ex, monte-valle}} = 48 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

**Sisma Ez (Basso-Alto)  $\times 0,3$** 

$$M_{\text{Ez}} = (136 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 41 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{Z-Ez, basso-alto}} = (24 \text{ kN/m} \times 0,3) = 7 \text{ kN/m} \text{ (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 8971 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 235 + 41 = 275 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 8971 \text{ kNm/m} / 275 \text{ kNm/m} = 32,6 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (1583 - 7 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1182 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 48 \text{ kNm/m}$$

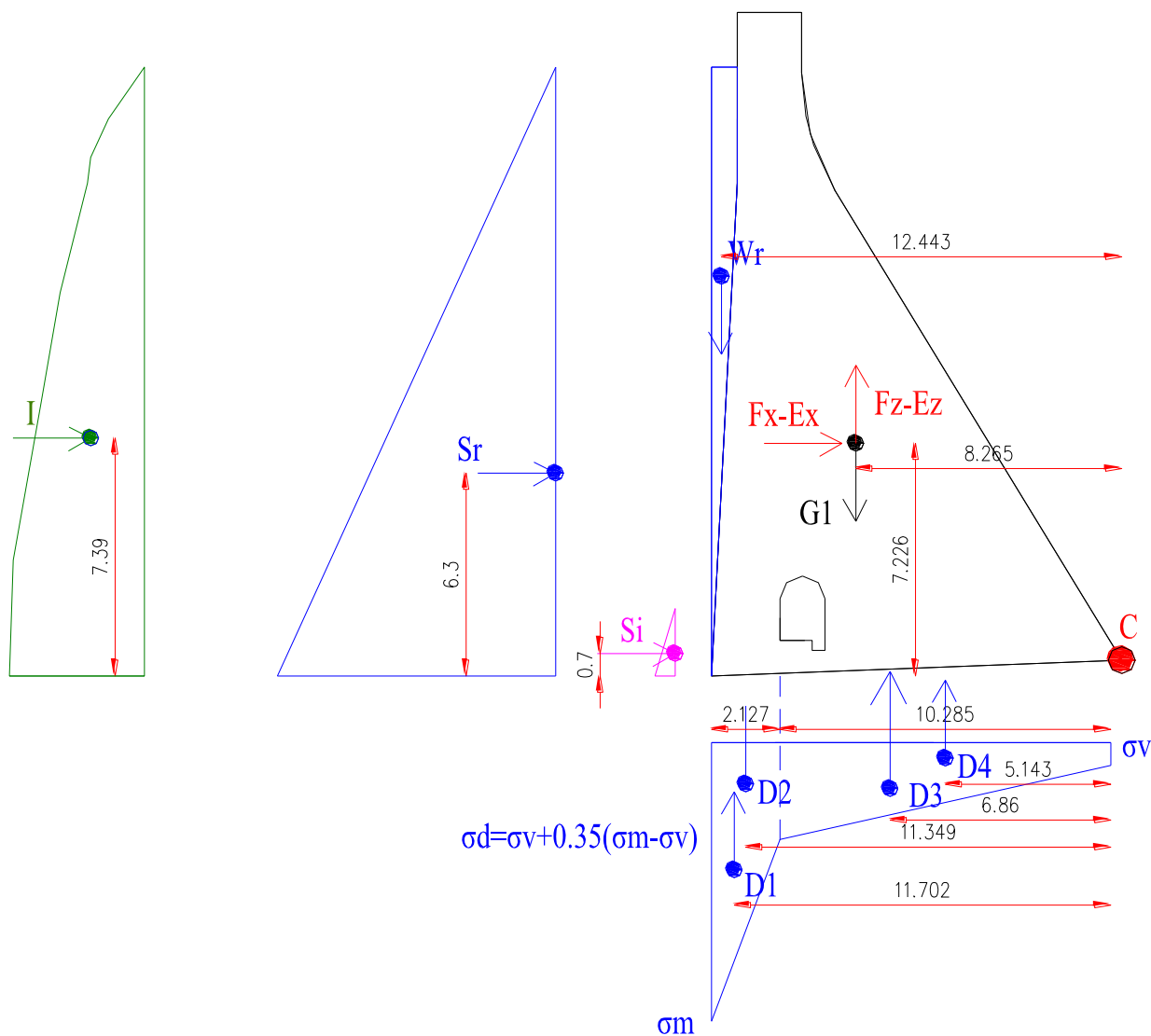
$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1182 \text{ kNm/m} / 48 \text{ kNm/m} = 24,6 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

9. CONCIO B / SEZIONE EMERGENTE (DIGA ESISTENTE – D.M.24/03/1982)

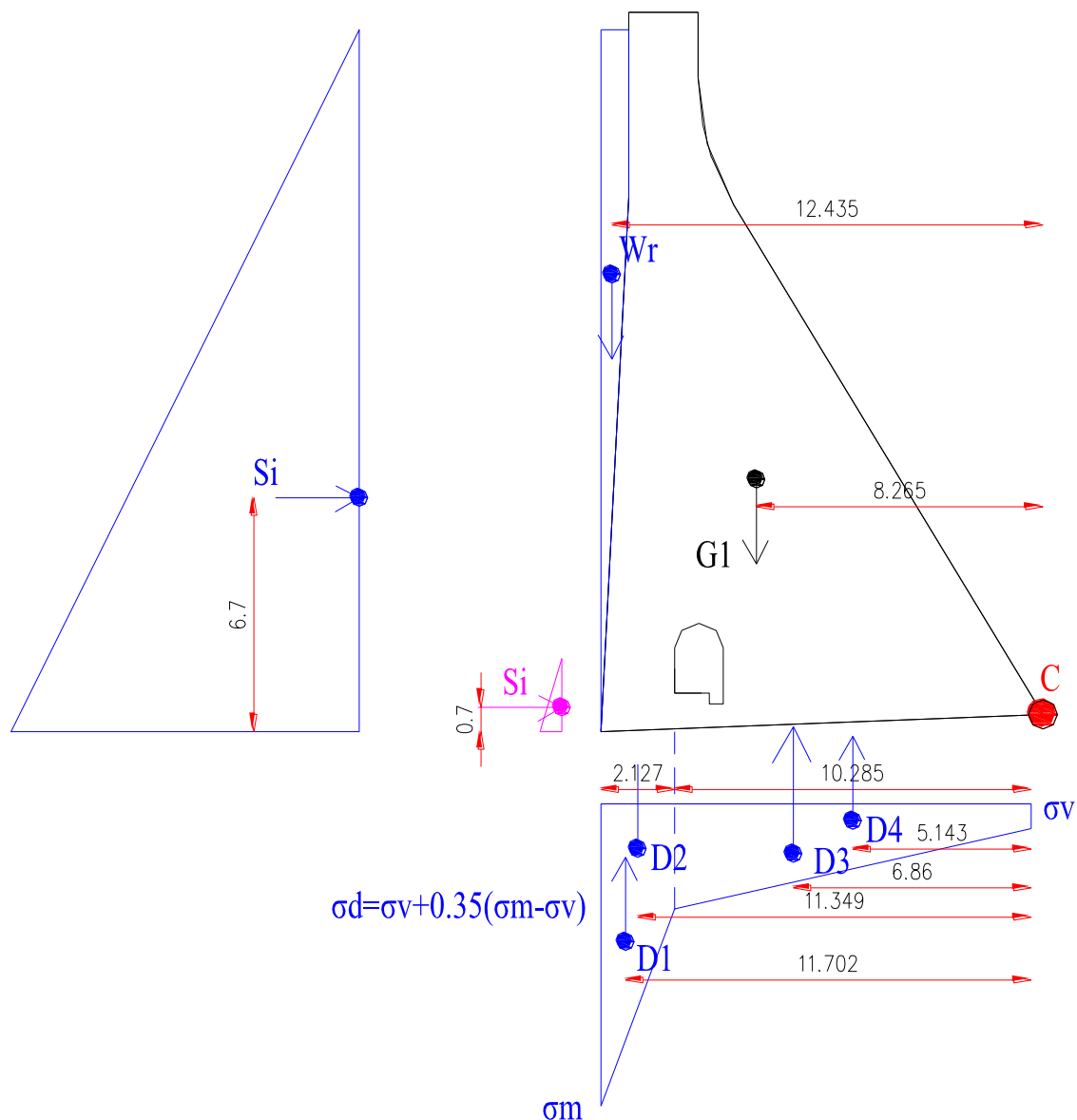
9.1 VERIFICHE A RIBALTAMENTO E TRASLAZIONE DEL CORPO DIGA

9.1.1 AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE DI BASE

Le verifiche sono condotte su una striscia di diga appesantita di larghezza 1 m:



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua in condizione sismica (+627,6 m) per le verifiche in corrispondenza della sezione di base



*Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massimo invaso (+628,62 m) per la combinazione statica in corrispondenza della sezione di base*

Le verifiche a ribaltamento e traslazione sono state condotte a favore di sicurezza considerando l'andamento delle sottopressioni lineare tra il nuovo dreni realizzato a monte e la pressione di valle, senza quindi mettere in conto l'ulteriore contributo di riduzione delle sottopressioni dovuto alla presenza del dreni esistente nel corpo diga di valle. Infine nelle verifiche a traslazione non è stato messo in conto a favore di sicurezza il contributo positivo dovuto alla pendenza esistente (in leggera salita da monte verso valle) sul contatto tra il corpo diga di valle e la roccia di fondazione.

Di seguito si riportano i carichi messi in conto:

Peso proprio

Il peso proprio della sezione trascinabile presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{\text{cls, esist}} = 130,5 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 3095 \text{ kN/m} \text{ (peso diga esistente)}$$

$$b_{G1} = 8,265 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale peso diga esistente rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{G_{\text{tot}}} = G_1 \times b_{G1} = 3095 \text{ kN/m} \times 8,265 \text{ m} = 25580 \text{ kNm/m} \text{ (momento totale stabilizzante)}$$

### Spinta acqua cmb. sismica

$$H_{\text{max}} = 18,9 \text{ m}$$

$$p_{\text{max}} (H=18,9 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max}} \cdot \text{reg} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 18,9 \text{ m} = 189 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua alla base)}$$

$$S_i = (p_{\text{max}}) \times 18,9 \text{ m} / 2 = 189 \text{ kN/m}^2 \times 18,9 \text{ m} / 2 = 1786 \text{ kN/m} \text{ (spinta orizzontale)}$$

$$W_r = (A_r \times \rho_w) = 9 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 90 \text{ kN/m} \text{ (peso acqua)}$$

$$b_{W_r} = 12,443 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{S_r} = 6,3 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{W_r} = W_r \times b_{W_r} = 90 \text{ kN/m} \times 12,443 \text{ m} = 1120 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_r} = S_r \times h_{S_r} = 1786 \text{ kN/m} \times 6,3 \text{ m} = 11252 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

### Spinta acqua max invaso

$$H_{\text{max.inv}} = 20,1 \text{ m} \text{ (livello acqua massimo invaso)}$$

$$p_{\text{max}} (H=20,1 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 20,1 \text{ m} = 201 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua alla base)}$$

$$S_i = p_{\text{max}} \times 20,1 \text{ m} / 2 = (201) \text{ kN/m}^2 \times 20,1 \text{ m} / 2 = 2020 \text{ kN/m} \text{ (spinta orizzontale)}$$

$$W_i = (A_i \times \rho_w) = 10 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 100 \text{ kN/m} \text{ (peso acqua)}$$

$$b_{W_i} = 12,435 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{S_i} = 6,7 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{W_i} = W_r \times b_{W_r} = 100 \text{ kN/m} \times 12,435 \text{ m} = 1244 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_i} = S_i \times h_{S_i} = 2020 \text{ kN/m} \times 6,7 \text{ m} = 13534 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

### Spinta interrimento

$$H_{\text{max.int}} = 2,1 \text{ m} \text{ (livello interrimento)}$$

$$p_{\text{max}} (H=2,1 \text{ m}) = \rho_f \times H_{\text{max.int}} = 6 \text{ kN/m}^3 \times 2,1 \text{ m} = 12,6 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione alla base)}$$

$$S_i = (p_{\text{max}} \times H_{\text{max.int}}) / 2 = (12,6 \text{ kN/m}^2 \times 2,1 \text{ m}) / 2 = 13,2 \text{ kN/m} \text{ (spinta orizzontale)}$$

$$h_{S_{wi}} = 0,7 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{S_i} = S_i \times h_{S_{wi}} = 13,2 \text{ kN/m} \times 0,7 \text{ m} = 9,24 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

### Sottopressioni

Nel calcolo delle sottopressioni si considera un livello idrostatico a valle pari a 1,3 m. Tale valore corrisponde all'altezza del calcestruzzo dello scivolo nell'ipotesi che si possa generare infiltrazione all'interno della suola in calcestruzzo dello scivolo. L'acqua che tracima dalla diga viene rilasciata in alveo circa 40 m più a valle della diga, pertanto la pressione idrostatica a valle della diga dovrebbe essere a rigore pari a zero, a meno appunto della presenza di possibili infiltrazioni.

$H_{max} = 18,9 \text{ m}$  (livello acqua massima cmb sismica)

$\sigma_m (H=18,9 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 18,9 \text{ m} = 189 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua alla base a monte)

$\sigma_v (h_v=1,3 \text{ m}) = \rho_w \times h_v = 10 \text{ kN/m}^3 \times 1,3 \text{ m} = 13 \text{ kN/m}^2$

$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 13 + 0,35 \times (189 - 13 \text{ kN/m}^2) = 75 \text{ kN/m}^2$  (pressione dreno)

$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (2,127 \text{ m}) / 2 = (189 \text{ kN/m}^2 - 75 \text{ kN/m}^2) \times (2,127 \text{ m}) / 2 = 121 \text{ kN/m}$

$D2 = (\sigma_d) \times (2,127 \text{ m}) = (75 \text{ kN/m}^2) \times (2,127 \text{ m}) = 160 \text{ kN/m}$

$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (10,285 \text{ m}) / 2 = (75 - 13 \text{ kN/m}^2) \times (10,285 \text{ m}) / 2 = 319 \text{ kN/m}$

$D4 = (\sigma_v) \times (10,285 \text{ m}) = (13 \text{ kN/m}^2) \times (10,285 \text{ m}) = 134 \text{ kN/m}$

$D = D1 + D2 + D3 + D4 = 121 + 160 + 319 + 134 = 734 \text{ kN/m}$  (livello max. regolazione)

$b_{D1} = 11,702 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D2} = 11,349 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D3} = 6,86 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$b_{D4} = 5,143 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 121 \text{ kN/m} \times 11,702 \text{ m} = 1416 \text{ Nm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 160 \text{ kN/m} \times 11,349 \text{ m} = 1816 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 319 \text{ kN/m} \times 6,86 \text{ m} = 2188 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{D4} = D4 \times b_{D4} = 134 \text{ kN/m} \times 5,143 \text{ m} = 689 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} + M_{D4} = 1416 + 1816 + 2188 + 689 = 6109 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante con livello massima regolazione)

$H_{max.inv} = 20,1 \text{ m}$  (livello acqua massimo invaso)

$p_{max} (H=20,1 \text{ m}) = \rho_w \times H_{max.inv} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 20,1 \text{ m} = 201 \text{ kN/m}^2$  (pressione acqua alla base a monte)

$\sigma_v (h_v=1,3 \text{ m}) = \rho_w \times h_v = 10 \text{ kN/m}^3 \times 1,3 \text{ m} = 13 \text{ kN/m}^2$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 13 + 0,35 \times (201 - 13 \text{ kN/m}^2) = 78,8 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (2,127 \text{ m}) / 2 = (201 \text{ kN/m}^2 - 78,8 \text{ kN/m}^2) \times (2,127 \text{ m}) / 2 = 130 \text{ kN/m}$$

$$D2 = (\sigma_d) \times (2,127 \text{ m}) = (78,8 \text{ kN/m}^2) \times (2,127 \text{ m}) = 168 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (10,285 \text{ m}) / 2 = (78,8 - 13 \text{ kN/m}^2) \times (10,285 \text{ m}) / 2 = 338 \text{ kN/m}$$

$$D4 = (\sigma_v) \times (10,285 \text{ m}) = (13 \text{ kN/m}^2) \times (10,285 \text{ m}) = 134 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 + D4 = 130 + 168 + 338 + 134 = 770 \text{ kN/m (livello max. invaso)}$$

$$b_{D1} = 11,702 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 11,349 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 6,86 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D4} = 5,143 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 130 \text{ kN/m} \times 11,702 \text{ m} = 1521 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 168 \text{ kN/m} \times 11,349 \text{ m} = 1907 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 338 \text{ kN/m} \times 6,86 \text{ m} = 2319 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D4} = D4 \times b_{D4} = 134 \text{ kN/m} \times 5,143 \text{ m} = 689 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} + M_{D4} = 1521 + 1907 + 2319 + 689 = 6436 \text{ kNm/m (momento instabilizzante con livello massimo invaso)}$$

#### Sisma $E_x$ , Monte-valle

$$F_{x-Ex} = 0,03 \times 3095 \text{ kN/m} = 93 \text{ kN/m (direzione Monte-Valle)}$$

$$h_{F_x-Ex} = 7,226 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{F_x-Ex} = F_{x-Ex} \times h_{F_x-Ex} = 93 \text{ kN/m} \times 7,226 \text{ m} = 672 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Sisma $E_z$ , basso-alto

$$F_{z-Ez} = 0,015 \times 3095 \text{ kN/m} = 47 \text{ kN/m (direzione Basso-Alto)}$$

$$b_{F_z-Ez} = 8,265 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{F_z-Ez} = F_{z-Ez} \times b_{F_z-Ez} = 47 \text{ kN/m} \times 8,265 \text{ m} = 388 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

#### Azioni inerziali acqua invasata

$$I = 54 \text{ kN/m (Spinta inerziale totale)}$$

$$h_I = 6,894 \text{ m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_I = I \times h_I = 54 \text{ kNm/m} \times 6,894 \text{ m} = 372 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

**9.1.1.1 COMBINAZIONE STATICA ( $1 \times G1 + 1 \times G2 + 1 \times G3$ )**Peso proprio  $\times 1$  :

$$M_{G_{tot}} = 25580 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 3095 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta acqua max invaso  $\times 1$ 

$$M_{W_i} = 1244 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_i} = 13534 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_i = 100 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_i = 2020 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Spinta interrimento  $\times 1$ 

$$M_{S_i} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni  $\times 1$ 

$$M_D = 6436 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 770 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{stabilizzante} = 25580 + 1244 \text{ kNm/m} = 26824 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{instabilizzante} = 13534 + 10 + 6436 \text{ kNm/m} = 19980 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 26824 \text{ kNm/m} / 19980 \text{ kNm/m} = 1,34 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{stabilizzante} = (3095 + 100 - 770 \text{ kN/m}) \times 0,75 = 1819 \text{ kNm/m (stabilizzante)}$$

$$V_{instabilizzante} = 2020 + 13 \text{ kNm/m} = 2033 \text{ kNm/m (instabilizzante)}$$

$$V_{stabilizzante} / V_{instabilizzante} = 1819 \text{ kNm/m} / 2033 \text{ kNm/m} = 0,89 < 1 \text{ (verifica negativa)}$$

**9.1.1.2 COMBINAZIONE SISMICA ( $G1 + G2 + G3 + E_{x, valle/monte} + 0.3 \times E_{z, Basso/Alto} + I_x$ )****9.1.1.2.1 Serbatoio pieno**Peso proprio  $\times 1$ 

$$M_{G_{tot}} = 25580 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{tot} = 3095 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$



Spinta acqua (condizione sismica) × 1

$$M_{Wr} = 1120 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{Sr} = 11252 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$W_r = 90 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

$$S_r = 1786 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Spinta interrimento × 1

$$M_{Si} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN /m (instabilizzante)}$$

Sottopressioni × 1

$$M_D = 6109 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$D = 734 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ex (Monte-Valle) × 1

$$M_{Ex, \text{Monte-valle}} = 672 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{x-Ex, \text{monte-valle}} = 93 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{Ez} = (388 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 116 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{z-Ez, \text{basso-alto}} = (47 \text{ kN/m} \times 0,3) = 14 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Azioni inerziali × 1

$$M_I = 372 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$I_{x, \text{monte-valle}} = 54 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 25580 + 1120 \text{ kNm/m} = 26700 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 11252 + 9 + 6109 + 672 + 116 + 372 = 18530 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 26700 \text{ kNm/m} / 18530 \text{ kNm/m} = 1,44 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (3095 + 90 - 734 - 14 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1828 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 1786 + 13,2 + 93 + 54 \text{ kNm/m} = 1946 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1828 \text{ kNm/m} / 1946 \text{ kNm/m} = 0,94 < 1 \text{ (verifica negativa)}$$

**9.1.1.2.2 Serbatoio vuoto**Peso proprio × 1

$$M_{\text{Gtot}} = 25580 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 3095 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

Spinta interrimento × 1

$$M_{\text{Si}} = 9,24 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$S_i = 13,2 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ex (Monte-Valle) × 1

$$M_{\text{Ex, Monte-valle}} = 672 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{x-Ex, monte-valle}} = 93 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

Sisma Ez (Basso-Alto) × 0,3

$$M_{\text{Ez}} = (388 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 116 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{z-Ez, basso-alto}} = (47 \text{ kN/m} \times 0,3) = 14 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 25580 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 9 + 672 + 116 = 797 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 25580 \text{ kNm/m} / 797 \text{ kNm/m} = 32,1 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

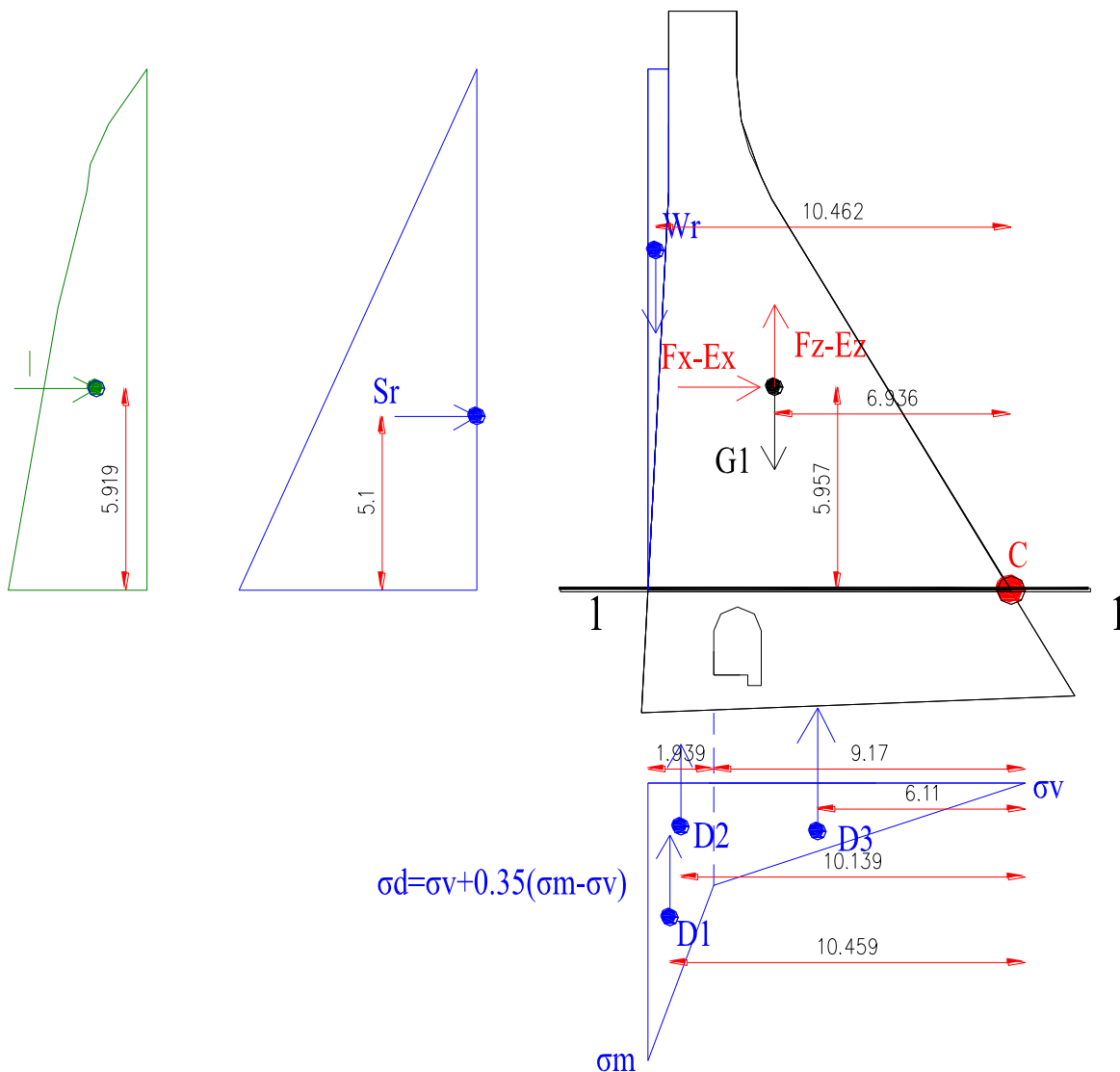
$$V_{\text{stabilizzante}} = (3095 - 14 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 2311 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 13,2 + 93 \text{ kNm/m} = 106 \text{ kNm/m}$$

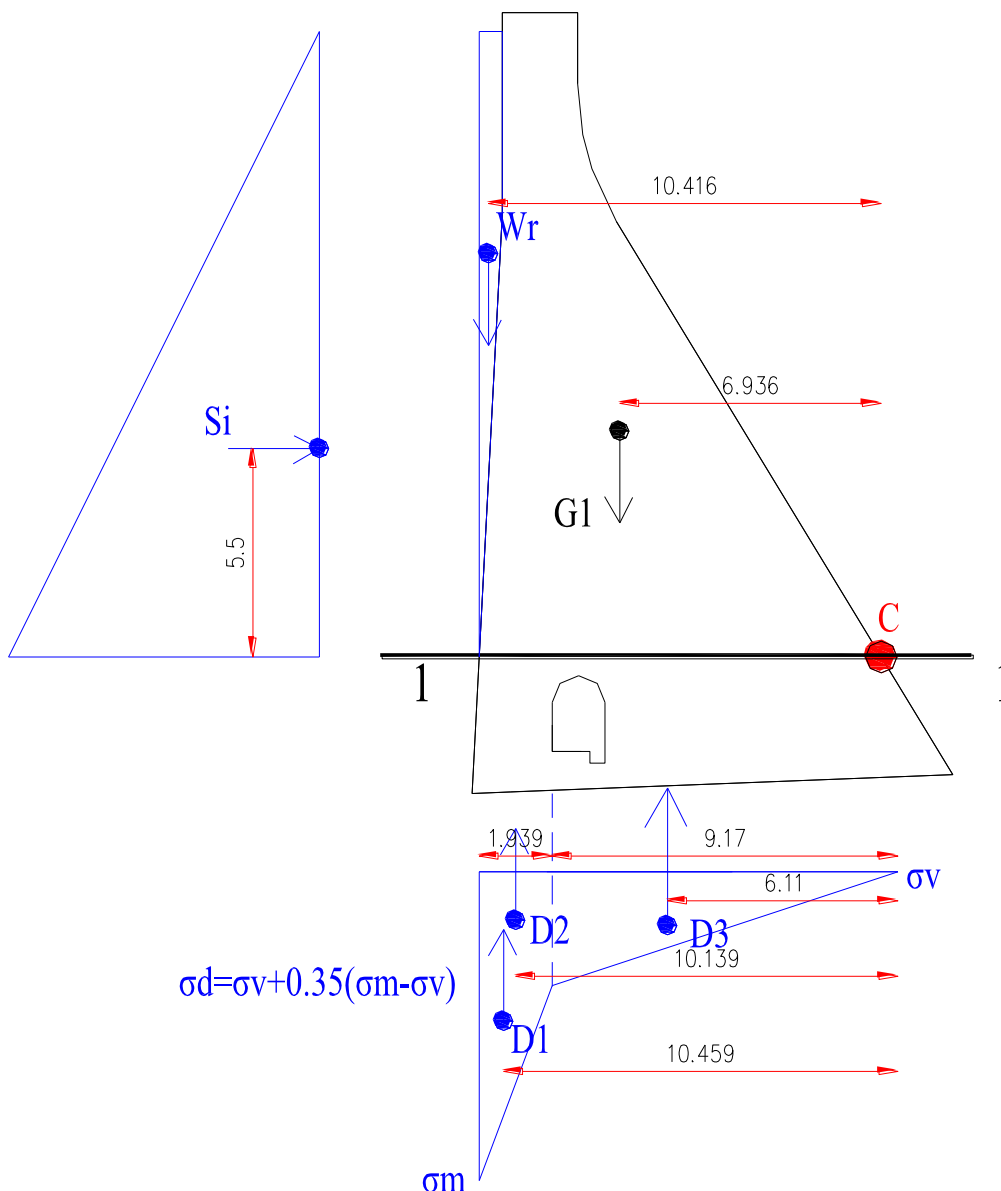
$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 2311 \text{ kNm/m} / 106 \text{ kNm/m} = 21,8 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

9.1.1 AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 1-1

Le verifiche sono condotte su una striscia di diga appesantita di larghezza 1 m:



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua in condizione sismica (+627,6 m) per le verifiche in corrispondenza della sezione 1-1



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massimo invaso (+628,62 m) per la combinazione statica in corrispondenza della sezione 1-1

Le verifiche a ribaltamento e traslazione sono state condotte a favore di sicurezza considerando l'andamento delle sottopressioni lineare tra il nuovo drenone realizzato a monte e la pressione di valle, senza quindi mettere in conto l'ulteriore contributo di riduzione delle sottopressioni dovuto alla presenza del drenone esistente nel corpo diga di valle.

Di seguito si riportano i carichi messi in conto:

Peso proprio

Il peso proprio della sezione trascinabile presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{\text{cls, esist}} = 91,3 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 2166 \text{ kN/m} \text{ (peso diga esistente)}$$

$$b_{G1} = 6,936 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale peso diga esistente rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{G\text{tot}} = G_1 \times b_{G1} = 2166 \text{ kN/m} \times 6,936 \text{ m} = 15023 \text{ kNm/m} \text{ (momento totale stabilizzante)}$$

### Spinta acqua cmb. sismica

$$H_{\text{max}} = 15,3 \text{ m}$$

$$p_{\text{max}} (H=15,3 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 15,3 \text{ m} = 153 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua alla base)}$$

$$S_i = (p_{\text{max}}) \times 15,3 \text{ m} / 2 = (153) \text{ kN/m}^2 \times 15,3 \text{ m} / 2 = 1170 \text{ kN/m} \text{ (spinta orizzontale)}$$

$$W_r = (A_r \times \rho_w) = 5,8 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 58 \text{ kN/m} \text{ (peso acqua)}$$

$$b_{W_r} = 10,462 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{S_r} = 5,1 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{W_r} = W_r \times b_{W_r} = 58 \text{ kN/m} \times 10,462 \text{ m} = 607 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_r} = S_r \times h_{S_r} = 1170 \text{ kN/m} \times 5,1 \text{ m} = 5967 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

### Spinta acqua max invaso

$$H_{\text{max, inv}} = 16,5 \text{ m} \text{ (livello acqua massimo invaso)}$$

$$p_{\text{max}} (H=16,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max, inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 16,5 \text{ m} = 165 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua)}$$

$$S_i = (p_{\text{max}}) \times 16,5 \text{ m} / 2 = (165) \text{ kN/m}^2 \times 16,5 \text{ m} / 2 = 1361 \text{ kN/m} \text{ (spinta orizzontale)}$$

$$W_r = (A_i \times \rho_w) = 6,5 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 65 \text{ kN/m} \text{ (peso acqua)}$$

$$b_{W_{ri}} = 10,416 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{S_i} = 5,5 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{W_i} = W_r \times b_{W_r} = 65 \text{ kN/m} \times 10,416 \text{ m} = 677 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_i} = S_i \times h_{S_i} = 1361 \text{ kN/m} \times 5,5 \text{ m} = 7486 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

### Sottopressioni

$$H_{\text{max}} = 15,3 \text{ m} \text{ (livello acqua massima cmb sismica)}$$

$$\sigma_m (H=15,3 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max, reg}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 15,3 \text{ m} = 153 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua alla base a monte)}$$

$$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (153 - 0 \text{ kN/m}^2) = 54 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,939 \text{ m}) / 2 = (153 \text{ kN/m}^2 - 54 \text{ kN/m}^2) \times (1,939 \text{ m}) / 2 = 96 \text{ kN/m}$$

$$D2 = (\sigma_d) \times (1,939 \text{ m}) = (54 \text{ kN/m}^2) \times (1,939 \text{ m}) = 105 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d) \times (9,17 \text{ m}) / 2 = (54 \text{ kN/m}^2) \times (9,17 \text{ m}) / 2 = 248 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 = 96 + 105 + 248 = 449 \text{ kN/m}$$

$$b_{D1} = 10,459 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 10,139 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 6,11 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 96 \text{ kN/m} \times 10,459 \text{ m} = 1004 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 105 \text{ kN/m} \times 10,139 \text{ m} = 1065 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 248 \text{ kN/m} \times 6,11 \text{ m} = 1515 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 1004 + 1065 + 1515 = 3584 \text{ kNm/m (momento instabilizzante con livello sismico)}$$

$$H_{\text{max.inv}} = 16,5 \text{ m (livello acqua massimo invaso)}$$

$$p_{\text{max}} (H=16,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 16,5 \text{ m} = 165 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua)}$$

$$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (165 - 0 \text{ kN/m}^2) = 58,0 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,939 \text{ m}) / 2 = (165 \text{ kN/m}^2 - 58,0 \text{ kN/m}^2) \times (1,939 \text{ m}) / 2 = 104 \text{ kN/m}$$

$$D2 = (\sigma_d) \times (1,939 \text{ m}) = (58 \text{ kN/m}^2) \times (1,939 \text{ m}) = 113 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (9,17 \text{ m}) / 2 = (58,0 - 0,0 \text{ kN/m}^2) \times (9,17 \text{ m}) / 2 = 266 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 = 104 + 113 + 266 = 483 \text{ kN/m (livello max. invaso)}$$

$$b_{D1} = 10,459 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 10,139 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 6,11 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 104 \text{ kN/m} \times 10,459 \text{ m} = 1088 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 113 \text{ kN/m} \times 10,139 \text{ m} = 1146 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 266 \text{ kN/m} \times 6,11 \text{ m} = 1625 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 1088 + 1146 + 1625 = 3859 \text{ kNm/m (momento instabilizzante con livello massimo invaso)}$$

### Sisma $E_x$ , Monte-valle

$$F_{x-Ex} = 0,03 \times 2166 \text{ kN/m} = 65 \text{ kN/m (direzione Monte-Valle)}$$

$h_{F_x-E_x} = 5,957$  m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{F_x-E_x} = F_{x-E_x} \times h_{F_x-E_x} = 65 \text{ kN/m} \times 5,957 \text{ m} = 387 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

Sisma  $E_z$ , basso-alto

$F_{z-E_z} = 0,015 \times 2166 \text{ kN/m} = 33 \text{ kN/m}$  (direzione Basso-Alto)

$b_{F_z-E_z} = 6,936$  m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$M_{F_z-E_z} = F_{z-E_z} \times b_{F_z-E_z} = 33 \text{ kN/m} \times 6,936 \text{ m} = 229 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

Azioni inerziali acqua invasata

$I = 39 \text{ kN/m}$  (Spinta inerziale totale)

$h_I = 5,919$  m (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_I = I \times h_I = 39 \text{ kNm/m} \times 5,919 \text{ m} = 231 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

**9.1.1.1 COMBINAZIONE STATICA ( $1 \times G1 + 1 \times G2 + 1 \times G3$ )**

Peso proprio  $\times 1$  :

$M_{G_{tot}} = 15023 \text{ kNm/m}$  (momento totale stabilizzante)

$G_{tot} = 2166 \text{ kN/m}$  (stabilizzante)

Spinta acqua max invaso  $\times 1$

$M_{W_i} = 677 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{S_i} = 7486 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$W_i = 65 \text{ kN/m}$  (stabilizzante)

$S_i = 1361 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

Sottopressioni  $\times 1$

$M_D = 3859 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$D = 483 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

**Verifica ribaltamento**

$M_{\text{stabilizzante}} = 15023 + 677 \text{ kNm/m} = 15700 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{\text{instabilizzante}} = 7486 + 3859 \text{ kNm/m} = 11345 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 15700 \text{ kNm/m} / 11345 \text{ kNm/m} = 1,38 > 1$  (verifica positiva)

**Verifica traslazione**

$V_{\text{stabilizzante}} = (2166 + 65 - 483 \text{ kN/m}) \times 0,75 = 1311 \text{ kNm/m}$  (stabilizzante)

Vinstabilizzante = 1361 kNm/m (instabilizzante)

Vstabilizzante / Vinstabilizzante = 1311 kNm/m / 1361 kNm/m = 0,96 < 1 (verifica negativa)

9.1.1.2 COMBINAZIONE SISMICA ( $G1 + G2 + G3 + E_{x, valle/monte} + 0.3 \times E_{z, Basso/Alto} + I_x$ )

### 9.1.1.2.1 Serbatoio pieno

Peso proprio  $\times 1$

$M_{Gtot} = 15023$  kNm/m (momento totale stabilizzante)

$G_{tot} = 2166$  kN/m (stabilizzante)

Spinta acqua (condizione sismica)  $\times 1$

$M_{Wr} = 607$  kNm/m (momento stabilizzante)

$M_{Sr} = 5967$  kNm/m (momento instabilizzante)

$Wr = 58$  kN/m (stabilizzante)

$Sr = 1170$  kN / m (instabilizzante)

Sottopressioni  $\times 1$

$M_D = 3584$  kNm/m (momento instabilizzante)

$D = 449$  kN/m (instabilizzante)

Sisma Ex (Monte-Valle)  $\times 1$

$M_{Ex, Monte-valle} = 387$  kNm/m (momento instabilizzante)

$F_{x-Ex, monte-valle} = 65$  kN/m (instabilizzante)

Sisma Ez (Basso-Alto)  $\times 0,3$

$M_{Ez} = (229 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 69$  (momento instabilizzante)

$F_{z-Ez, basso-alto} = (33 \text{ kN/m} \times 0,3) = 10$  kN/m (instabilizzante)

Azioni inerziali  $\times 1$

$M_I = 231$  kNm/m (momento instabilizzante)

$I_{x, monte-valle} = 39$  kN/m (instabilizzante)

### Verifica ribaltamento

$M_{stabilizzante} = 15023 + 607$  kNm/m = 15630 kNm/m (momento stabilizzante)

$M_{instabilizzante} = 5967 + 3584 + 387 + 69 + 231 = 10238$  kNm/m (momento instabilizzante)

$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 15630 \text{ kNm/m} / 10238 \text{ kNm/m} = 1,53 > 1$  (verifica positiva)



**Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (2166 + 58 - 449 - 10 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1324 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 1170 + 65 + 39 \text{ kNm/m} = 1274 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1324 \text{ kNm/m} / 1274 \text{ kNm/m} = 1,04 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**9.1.1.2.2 Serbatoio vuoto****Peso proprio  $\times 1$** 

$$M_{\text{Gtot}} = 15023 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 2166 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

**Sisma Ex (Monte-Valle)  $\times 1$** 

$$M_{\text{Ex, Monte-valle}} = 387 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{X-Ex, monte-valle}} = 65 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Sisma Ez (Basso-Alto)  $\times 0,3$** 

$$M_{\text{Ez}} = (229 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 69 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{Z-Ez, basso-alto}} = (33 \text{ kN/m} \times 0,3) = 10 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 15023 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 387 + 69 = 456 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 15023 \text{ kNm/m} / 456 \text{ kNm/m} = 32,9 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

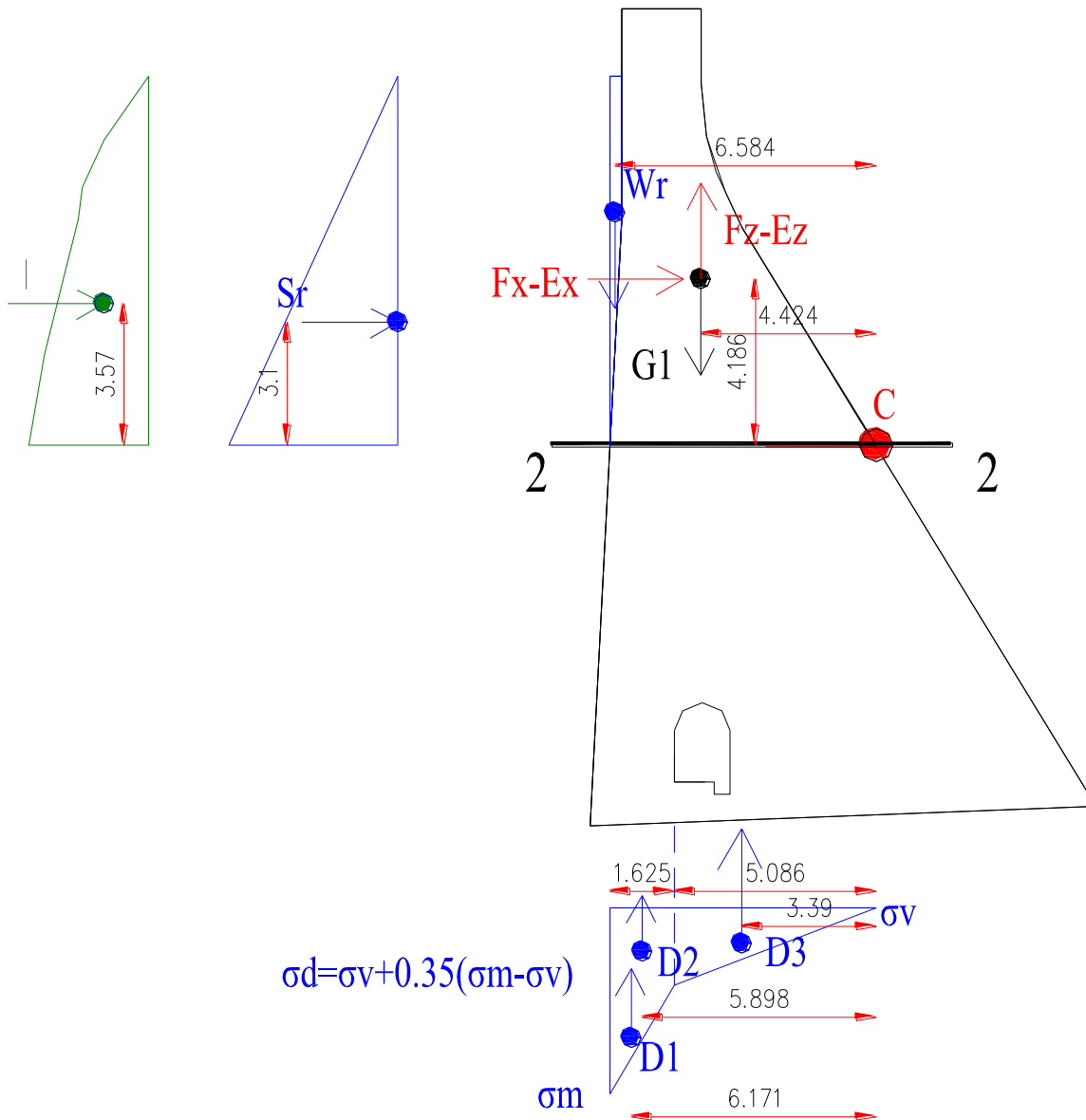
$$V_{\text{stabilizzante}} = (2166 - 10 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 1617 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 65 \text{ kNm/m}$$

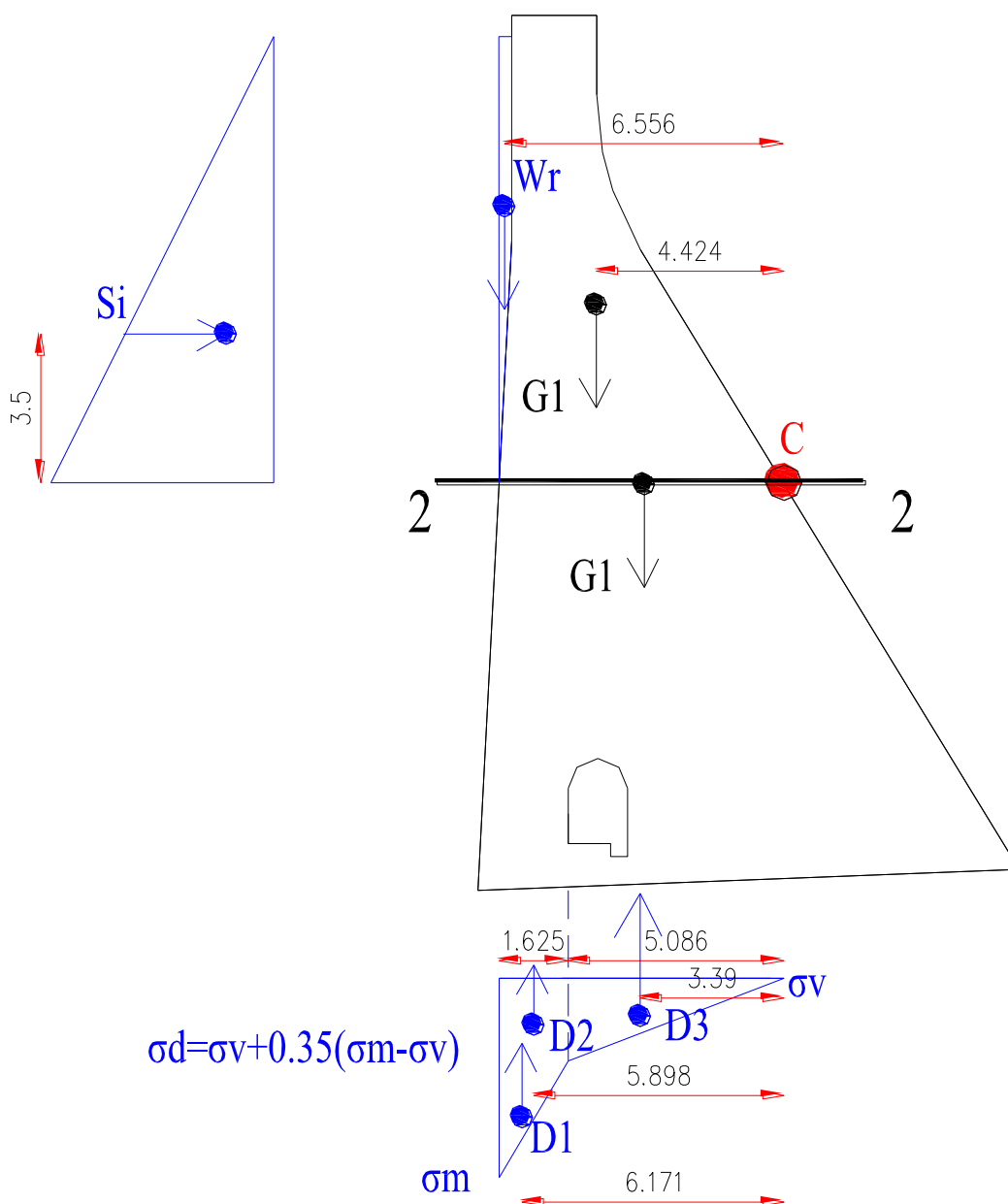
$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 1617 \text{ kNm/m} / 65 \text{ kNm/m} = 24,9 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

9.1.2 AZIONI SOLLECITANTI LA SEZIONE 2-2

Le verifiche sono condotte su una striscia di diga appesantita di larghezza 1 m:



Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua in condizione sismica (+627,6 m) per le verifiche in corrispondenza della sezione 2-2



$$\sigma_d = \sigma_v + 0.35(\sigma_m - \sigma_v)$$

Ubicazione dei carichi agenti e dei bracci con livello acqua massimo invaso (+628,62 m) per la combinazione staticale in corrispondenza della sezione 2-2

Le verifiche a ribaltamento e traslazione sono state condotte a favore di sicurezza considerando l'andamento delle sottopressioni lineare tra il nuovo drenone realizzato a monte e la pressione di valle, senza quindi mettere in conto l'ulteriore contributo di riduzione delle sottopressioni dovuto alla presenza del drenone esistente nel corpo diga di valle.

Di seguito si riportano i carichi messi in conto:

Peso proprio

Il peso proprio della sezione trascinabile presa in esame risulta pari a:

$$G_1 = A_c \times \rho_{\text{cls, esist}} = 39,1 \text{ m}^2 \times 23,72 \text{ kN/m}^3 = 927 \text{ kN/m} \text{ (peso diga esistente)}$$

$$b_{G1} = 4,424 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale peso diga esistente rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{G_{\text{tot}}} = G_1 \times b_{G1} = 927 \text{ kN/m} \times 4,424 \text{ m} = 4101 \text{ kNm/m} \text{ (momento totale stabilizzante)}$$

### Spinta acqua cmb. sismica

$$H_{\text{max}} = 9,3 \text{ m}$$

$$p_{\text{max}} (H=9,3 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 9,3 \text{ m} = 93 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua alla base)}$$

$$S_i = (p_{\text{max}}) \times 9,3 \text{ m} / 2 = (93) \text{ kN/m}^2 \times 9,3 \text{ m} / 2 = 432 \text{ kN/m} \text{ (spinta orizzontale)}$$

$$W_r = (A_r \times \rho_w) = 1,9 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 19 \text{ kN/m} \text{ (peso acqua)}$$

$$b_{W_r} = 6,584 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{S_r} = 3,10 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{W_r} = W_r \times b_{W_r} = 19 \text{ kN/m} \times 6,584 \text{ m} = 125 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_r} = S_r \times h_{S_r} = 432 \text{ kN/m} \times 3,10 \text{ m} = 1339 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

### Spinta acqua max invaso

$$H_{\text{max, inv}} = 10,5 \text{ m} \text{ (livello acqua massimo invaso)}$$

$$p_{\text{max}} (H=10,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max, inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 10,5 \text{ m} = 105 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua)}$$

$$S_i = (p_{\text{max}}) \times 10,5 \text{ m} / 2 = (105) \text{ kN/m}^2 \times 10,5 \text{ m} / 2 = 551 \text{ kN/m} \text{ (spinta orizzontale)}$$

$$W_r = (A_i \times \rho_w) = 2,3 \text{ m}^2 \times 10 \text{ kN/m}^3 = 23 \text{ kN/m} \text{ (peso acqua)}$$

$$b_{W_{ri}} = 6,556 \text{ m} \text{ (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$h_{S_i} = 3,50 \text{ m} \text{ (braccio verticale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{W_i} = W_r \times b_{W_r} = 23 \text{ kN/m} \times 6,556 \text{ m} = 151 \text{ kNm/m} \text{ (momento stabilizzante)}$$

$$M_{S_i} = S_i \times h_{S_i} = 551 \text{ kN/m} \times 3,50 \text{ m} = 1929 \text{ kNm/m} \text{ (momento instabilizzante)}$$

### Sottopressioni

$$H_{\text{max}} = 9,3 \text{ m} \text{ (livello acqua massima cmb sismica)}$$

$$\sigma_m (H=9,3 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max, reg}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 9,3 \text{ m} = 93 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua alla base a monte)}$$

$$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (93 - 0 \text{ kN/m}^2) = 33 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,625 \text{ m}) / 2 = (93 \text{ kN/m}^2 - 33 \text{ kN/m}^2) \times (1,625 \text{ m}) / 2 = 49 \text{ kN/m}$$

$$D2 = (\sigma_d) \times (1,625 \text{ m}) = (33 \text{ kN/m}^2) \times (1,625 \text{ m}) = 54 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d) \times (5,086 \text{ m}) / 2 = (33 \text{ kN/m}^2) \times (5,086 \text{ m}) / 2 = 84 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 = 49 + 54 + 84 = 187 \text{ kN/m}$$

$$b_{D1} = 6,171 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 5,898 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 3,39 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 49 \text{ kN/m} \times 6,171 \text{ m} = 302 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 54 \text{ kN/m} \times 5,898 \text{ m} = 318 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 84 \text{ kN/m} \times 3,39 \text{ m} = 285 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 302 + 318 + 285 = 905 \text{ kNm/m (momento instabilizzante con livello sismico)}$$

$$H_{\text{max.inv}} = 10,5 \text{ m (livello acqua massimo invaso)}$$

$$p_{\text{max}} (H=10,5 \text{ m}) = \rho_w \times H_{\text{max.inv}} = 10 \text{ kN/m}^3 \times 10,5 \text{ m} = 105 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione acqua)}$$

$$\sigma_v (h_v=0 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_d = \sigma_v + 0,35 \times (\sigma_m - \sigma_v) = 0 + 0,35 \times (105 - 0 \text{ kN/m}^2) = 37,0 \text{ kN/m}^2 \text{ (pressione dreno)}$$

$$D1 = (\sigma_m - \sigma_d) \times (1,625 \text{ m}) / 2 = (105 \text{ kN/m}^2 - 37,0 \text{ kN/m}^2) \times (1,625 \text{ m}) / 2 = 55 \text{ kN/m}$$

$$D2 = (\sigma_d) \times (1,625 \text{ m}) = (37 \text{ kN/m}^2) \times (1,625 \text{ m}) = 60 \text{ kN/m}$$

$$D3 = (\sigma_d - \sigma_v) \times (5,086 \text{ m}) / 2 = (37,0 - 0,0 \text{ kN/m}^2) \times (5,086 \text{ m}) / 2 = 94 \text{ kN/m}$$

$$D = D1 + D2 + D3 = 55 + 60 + 94 = 209 \text{ kN/m (livello max. invaso)}$$

$$b_{D1} = 6,171 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D2} = 5,898 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$b_{D3} = 3,39 \text{ m (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)}$$

$$M_{D1} = D1 \times b_{D1} = 55 \text{ kN/m} \times 6,171 \text{ m} = 339 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D2} = D2 \times b_{D2} = 60 \text{ kN/m} \times 5,898 \text{ m} = 354 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{D3} = D3 \times b_{D3} = 94 \text{ kN/m} \times 3,39 \text{ m} = 319 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_D = M_{D1} + M_{D2} + M_{D3} = 339 + 354 + 319 = 1012 \text{ kNm/m (momento instabilizzante con livello massimo invaso)}$$

### Sisma $E_x$ , Monte-valle

$$F_{x-E_x} = 0,03 \times 927 \text{ kN/m} = 28 \text{ kN/m (direzione Monte-Valle)}$$

$h_{F_x-E_x} = 4,186 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_{F_x-E_x} = F_{x-E_x} \times h_{F_x-E_x} = 28 \text{ kN/m} \times 4,186 \text{ m} = 117 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

Sisma  $E_z$ , basso-alto

$F_{z-E_z} = 0,015 \times 927 \text{ kN/m} = 14 \text{ kN/m}$  (direzione Basso-Alto)

$b_{F_z-E_z} = 4,429 \text{ m}$  (braccio orizzontale rispetto punto di rotazione)

$M_{F_z-E_z} = F_{z-E_z} \times b_{F_z-E_z} = 14 \text{ kN/m} \times 4,429 \text{ m} = 62 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

Azioni inerziali acqua invasata

$I = 17 \text{ kN/m}$  (Spinta inerziale totale)

$h_I = 3,57 \text{ m}$  (braccio verticale rispetto punto di rotazione)

$M_I = I \times h_I = 17 \text{ kNm/m} \times 3,57 \text{ m} = 61 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

#### 9.1.2.1 COMBINAZIONE STATICA ( $1 \times G1 + 1 \times G2 + 1 \times G3$ )

Peso proprio  $\times 1$ :

$M_{G_{tot}} = 4101 \text{ kNm/m}$  (momento totale stabilizzante)

$G_{tot} = 927 \text{ kN/m}$  (stabilizzante)

Spinta acqua max invaso  $\times 1$

$M_{W_i} = 151 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{S_i} = 1929 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$W_i = 23 \text{ kN/m}$  (stabilizzante)

$S_i = 551 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

Sottopressioni  $\times 1$

$M_D = 1012 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$D = 209 \text{ kN/m}$  (instabilizzante)

#### Verifica ribaltamento

$M_{stabilizzante} = 4101 + 151 \text{ kNm/m} = 4252 \text{ kNm/m}$  (momento stabilizzante)

$M_{instabilizzante} = 1929 + 1012 \text{ kNm/m} = 2941 \text{ kNm/m}$  (momento instabilizzante)

$M_{stabilizzante} / M_{instabilizzante} = 4252 \text{ kNm/m} / 2941 \text{ kNm/m} = 1,45 > 1$  (verifica positiva)

#### Verifica traslazione

$V_{stabilizzante} = (927 + 23 - 209 \text{ kN/m}) \times 0,75 = 556 \text{ kNm/m}$  (stabilizzante)

Vinstabilizzante = 551 kNm/m (instabilizzante)

Vstabilizzante / Vinstabilizzante = 556 kNm/m / 551 kNm/m = 1,01 >1 (verifica positiva)

9.1.2.2 COMBINAZIONE SISMICA ( $G1 + G2 + G3 + E_{x, valle/monte} + 0.3 \times E_{z, Basso/Alto} + I_x$ )

#### 9.1.2.2.1 Serbatoio pieno

Peso proprio  $\times 1$

$M_{Gtot} = 4101$  kNm/m (momento totale stabilizzante)

$G_{tot} = 927$  kN/m (stabilizzante)

Spinta acqua (condizione sismica)  $\times 1$

$M_{Wr} = 125$  kNm/m (momento stabilizzante)

$M_{Sr} = 1339$  kNm/m (momento instabilizzante)

$Wr = 19$  kN/m (stabilizzante)

$Sr = 432$  kN /m (instabilizzante)

Sottopressioni  $\times 1$

$M_D = 905$  kNm/m (momento instabilizzante)

$D = 187$  kN/m (instabilizzante)

Sisma Ex (Monte-Valle)  $\times 1$

$M_{Ex, Monte-valle} = 117$  kNm/m (momento instabilizzante)

$F_{x-Ex, monte-valle} = 28$  kN/m (instabilizzante)

Sisma Ez (Basso-Alto)  $\times 0,3$

$M_{Ez} = (62 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 19$  (momento instabilizzante)

$F_{z-Ez, basso-alto} = (14 \text{ kN/m} \times 0,3) = 4$  kN/m (instabilizzante)

Azioni inerziali  $\times 1$

$M_I = 61$  kNm/m (momento instabilizzante)

$I_{x, monte-valle} = 17$  kN/m (instabilizzante)

#### Verifica ribaltamento

Mstabilizzante = 4101 + 125 kNm/m = 4226 kNm/m (momento stabilizzante)

Minstabilizzante = 1339 + 905 + 117 + 19 + 61 = 2441 kNm/m (momento instabilizzante)

Mstabilizzante / Minstabilizzante = 4226 kNm/m / 2441 kNm/m = 1,73 >1 (verifica positiva)

**Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (927 + 19 - 187 - 4 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 566 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 432 + 28 + 17 \text{ kNm/m} = 477 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 566 \text{ kNm/m} / 477 \text{ kNm/m} = 1,19 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**9.1.2.2.2 Serbatoio vuoto****Peso proprio  $\times 1$** 

$$M_{\text{Gtot}} = 4101 \text{ kNm/m (momento totale stabilizzante)}$$

$$G_{\text{tot}} = 927 \text{ kN/m (stabilizzante)}$$

**Sisma Ex (Monte-Valle)  $\times 1$** 

$$M_{\text{Ex, Monte-valle}} = 117 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{X-Ex, monte-valle}} = 28 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Sisma Ez (Basso-Alto)  $\times 0,3$** 

$$M_{\text{Ez}} = (62 \text{ kNm/m}) \times 0,3 = 19 \text{ (momento instabilizzante)}$$

$$F_{\text{Z-Ez, basso-alto}} = (14 \text{ kN/m} \times 0,3) = 4 \text{ kN/m (instabilizzante)}$$

**Verifica ribaltamento**

$$M_{\text{stabilizzante}} = 4101 \text{ kNm/m (momento stabilizzante)}$$

$$M_{\text{instabilizzante}} = 117 + 19 = 136 \text{ kNm/m (momento instabilizzante)}$$

$$M_{\text{stabilizzante}} / M_{\text{instabilizzante}} = 4101 \text{ kNm/m} / 136 \text{ kNm/m} = 30,2 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$

**Verifica traslazione**

$$V_{\text{stabilizzante}} = (927 - 4 \text{ kNm/m}) \times 0,75 = 692 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{instabilizzante}} = 28 \text{ kNm/m}$$

$$V_{\text{stabilizzante}} / V_{\text{instabilizzante}} = 692 \text{ kNm/m} / 28 \text{ kNm/m} = 24,7 > 1 \text{ (verifica positiva)}$$




**RAPPORTO TECNICO DI PROVA**  
**IMPIANTO IDROELETTRICO DI OLMO AL BREMBO**  
**DIGA DI CASSIGLIO**

**Indagini sperimentali**  
**Prove dinamiche ambientali sul corpo diga**  
**Prove MASW e HVSR su terreno**



**p.c. Italgen Spa**

<i>Documento</i> RdP-234-2017	<i>Data</i> Gennaio 2018	<i>Pagine relazione</i> 35
<i>Revisione</i> Rev.01	<i>data revisione</i> ---	<i>Allegati</i> ---
<i>Il Responsabile</i> Paolo Panzeri 		

## **INDICE**

<b>1. PREMESSE E SCOPI .....</b>	<b>3</b>
<b>2. PROVA DINAMICA AMBIENTALE .....</b>	<b>4</b>
2.1 ATTREZZATURA DI PROVA E MODALITÀ DI REGISTRAZIONE.....	4
2.2 L'ELABORAZIONE DEI DATI .....	9
2.3 I MODI SPERIMENTALI INDIVIDUATI .....	19
<b>3. INDAGINE SISMICA ATTIVA CON METODO MASW .....</b>	<b>23</b>
3.1 AREA DI STUDIO .....	23
3.2 INDAGINE CONDOTTA E STRUMENTAZIONE UTILIZZATA.....	24
3.3 CLASSIFICAZIONE DEL SUOLO DI FONDAZIONE.....	25
3.4 ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI.....	27
<b>4. CARATTERIZZAZIONE DINAMICA CON TECNICA HVSR.....</b>	<b>29</b>
4.1 INDAGINE HVSR SU TERRENO .....	29
4.2 INDAGINI HVSR SULLA STRUTTURA .....	34

## **1. PREMESSE E SCOPI**

La presente relazione riferisce in merito alle indagini diagnostiche conoscitive condotte sulla Diga di Cassiglio (BG) che fa parte dell'impianto idroelettrico di Olmo al Brembo. La Diga è in calcestruzzo a gravità e l'attuale gestore della Diga è la società Italgen Spa con Sede in Villa di Serio (BG).

Le indagini sperimentali di seguito descritte si sono rese necessarie in seguito alla trasmissione della relazione istruttoria del 27 febbraio 2017 della "Direzione Generale per le dighe – Divisione 4 - Coordinamento istruttorie progetti e vigilanza lavori" al fine di validare il modello di calcolo FEM e per l'esecuzione delle verifiche sismiche dell'opera.

Le indagini sperimentali eseguite sulla Diga sono le seguenti:

- prova dinamica ambientale

Sulla diga è stata eseguita una prova dinamica ambientale per caratterizzare il comportamento dinamico dell'opera attraverso la registrazione e successiva analisi delle vibrazioni ambientali per la valutazione delle prime frequenze proprie fondamentali e relative deformate modali nella condizione di esercizio. Il comportamento dinamico rilevato sperimentalmente potrà poi essere impiegato per verificare e mettere a punto la modellazione numerica FEM della diga allo stato di fatto

- prove HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratios)

La prova HVSR è una prova di valutazione dinamica ambientale speditiva. Anche questa tecnica (metodo a stazione singola tromino - sismica passiva) non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sull'edificio. In particolar modo con la tecnica a "Stazione Singola" viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero "Horizontal to Vertical Spectral Ratios). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione e individuare le frequenze fondamentali di questa vibrazione. Nel caso specifico è stata eseguita una prova HVSR sulla diga e una prova sul terreno

- prova MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

Per determinare la categoria del sottosuolo in accordo a quanto specificato al §3.2.2 del D.M.14/01/2008 (Norme Tecniche per le Costruzioni) è stata eseguita un'indagine sismica con stendimento MASW al fine di determinare il parametro Vs30 relativo alla velocità Vs delle onde sismiche nei 30 metri sottostanti il piano di fondazione

Le attività sono state eseguite il 22 settembre e il 18-19 Ottobre 2017 dalla P&P di Seriate (BG) per conto dello spettabile Italgen Spa.

## 2. PROVA DINAMICA AMBIENTALE

### 2.1 Attrezzatura di prova e modalità di registrazione

La prova dinamica ambientale consiste nel rilevare la sola risposta della struttura sottoposta a vibrazioni ambientali, per poi effettuare attraverso tecniche di analisi modale operazionale, la stima delle grandezze che caratterizzano la risposta dinamica della struttura. Nel caso specifico l'azione ambientale era rappresentata principalmente dalle vibrazioni prodotte sul corpo Diga dall'acqua in ingresso nel bacino di monte proveniente dal torrente Stabina.

L'attrezzatura di prova era costituita da:

#### Sensori

Per quanto concerne gli accelerometri utilizzati, sono stati impiegati accelerometri ICP 393B12 della PCP Piezotronics, caratterizzati da elevata sensibilità (10 V/g), risoluzione dell'ordine di  $8 \times \mu\text{g rms}$  capaci di operare nel campo di frequenza sino a 2000 Hz. Le caratteristiche principali dei sensori utilizzati sono:

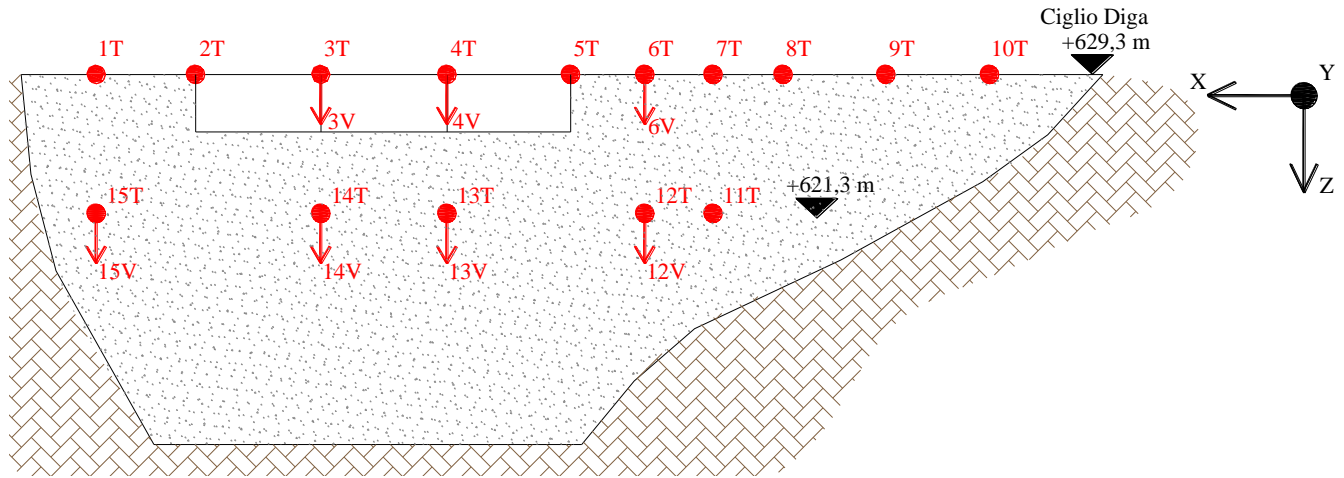
▪ . Costruttore:	PCP Piezotronics (USA)
▪ . Modello:	ICP (M) 393B12
▪ . Principio di funzionamento:	piezoelettrico con elemento sensibile in ceramica
▪ . Campo di misura:	0,5 $\text{g}_{\text{peak}}$ 5 (m/s <sup>2</sup> ) peak
▪ . Campo di frequenza (5 %):	0,15 ÷ 1000 Hz
▪ . Campo di frequenza (10 %):	0,10 ÷ 2000 Hz
▪ . Frequenza di risonanza:	> 12 khz
▪ . Sensibilità:	10 V/g      1 (V)/(m/s <sup>2</sup> )
▪ . Sensibilità trasversale:	< 7 %
▪ . Risoluzione:	> $8 \times \mu\text{g rms}$ 80 ( $\mu\text{m/s}^2$ ) rms
▪ . Limite di accelerazione allo shock:	5.000 g      50.000 m/s <sup>2</sup>
▪ . Alimentazione:	18 ÷ 30 Vdc
▪ . Non linearità ed isteresi:	< $\pm 1 \%$
▪ . Massa:	210 grammi

In relazione alla conformazione della struttura da esaminare e al comportamento dinamico atteso sono stati selezionati i seguenti livelli da monitorare mediante l'utilizzo di n. 22 sensori di misura accelerometrici disposti come schematicamente illustrato di seguito:

**Tabella: Configurazioni sensori di misura**

<b>Nome</b>	<b>Quota</b>	<b>Direzione</b>
1T	629,3 m / Ciglio Diga	Trasversale - Y
2T	629,3 m / Ciglio Diga	Trasversale - Y
3T	629,3 m / Ciglio Diga	Trasversale - Y
3V	629,3 m / Ciglio Diga	Verticale - Z
4T	629,3 m / Ciglio Diga	Trasversale - Y
4V	629,3 m / Ciglio Diga	Verticale - Z
5T	629,3 m / Ciglio Diga	Trasversale - Y
6T	629,3 m / Ciglio Diga	Trasversale - Y
6V	629,3 m / Ciglio Diga	Verticale - Z
7T	629,3 m / Ciglio Diga	Trasversale - Y
8T	629,3 m / Ciglio Diga	Trasversale - Y
9T	629,3 m / Ciglio Diga	Trasversale - Y
10T	629,3 m / Ciglio Diga	Trasversale - Y
11T	621,3 m / Ciglio Diga	Trasversale - Y
12T	621,3 m / Ciglio Diga	Trasversale - Y
12V	621,3 m / Ciglio Diga	Verticale - Z
13T	621,3 m / Ciglio Diga	Trasversale - Y
13V	621,3 m / Ciglio Diga	Verticale - Z
14T	621,3 m / Ciglio Diga	Trasversale - Y
14V	621,3 m / Ciglio Diga	Verticale - Z
15T	621,3 m / Ciglio Diga	Trasversale - Y
15V	621,3 m / Ciglio Diga	Verticale - Z

In totale sono stati disposti n.13 sensori (10 trasversali-Y e 3 verticali-Z) sul ciglio Diga a quota 629,3 m ubicati sulla passerella di camminamento e in totale n.9 sensori (5 trasversali-Y e 4 verticali-Z) a circa metà altezza a quota 621,3 m ubicati sul paramento di valle.



*Ubicazione dei sensori accelerometrici sulla Diga*

Di seguito sono riportate alcune fotografie degli accelerometri installati e delle operazioni di montaggio:



*Operazioni di installazione degli accelerometri sul paramento di valle della Diga mediante operatore abilitato per lavori su funi*



*Sensori ubicati sul paramento di valle*





*Sensori ubicati sulla passerella di coronamento*

### **Sistema di registrazione**

I singoli trasduttori sono stati collegati in cascata ad un “condizionatore di segnale”, ad un filtro antialiasing con frequenza di taglio pari a 100 Hz e infine al sistema di registrazione vero e proprio.

La frequenza di campionamento è stata assunta pari a  $f_s=600$  Hz e i dati sono stati registrati in file consecutivi di 30 minuti (1800 sec – 1080000 punti).

Il monitoraggio è stato effettuato in modo continuo dalle ore 17:00 del 18/10/2017 fino alle ore 14:00 del 19/10/2017. Il periodo di monitoraggio è risultato adeguato per assicurare la validità statistica alle successive elaborazioni.

Sistema di acquisizione Quantum X della HBM a 24 bit in grado di assicurare un'elevata risoluzione nella registrazione di segnali di ampiezza anche molto piccoli quali quelli determinati dall'eccitazione ambientale.

Tutti i sensori di misura sono stati acquistati contemporaneamente mediante specifico sistema di acquisizione dinamico multicanale.



## 2.2 L'elaborazione dei dati

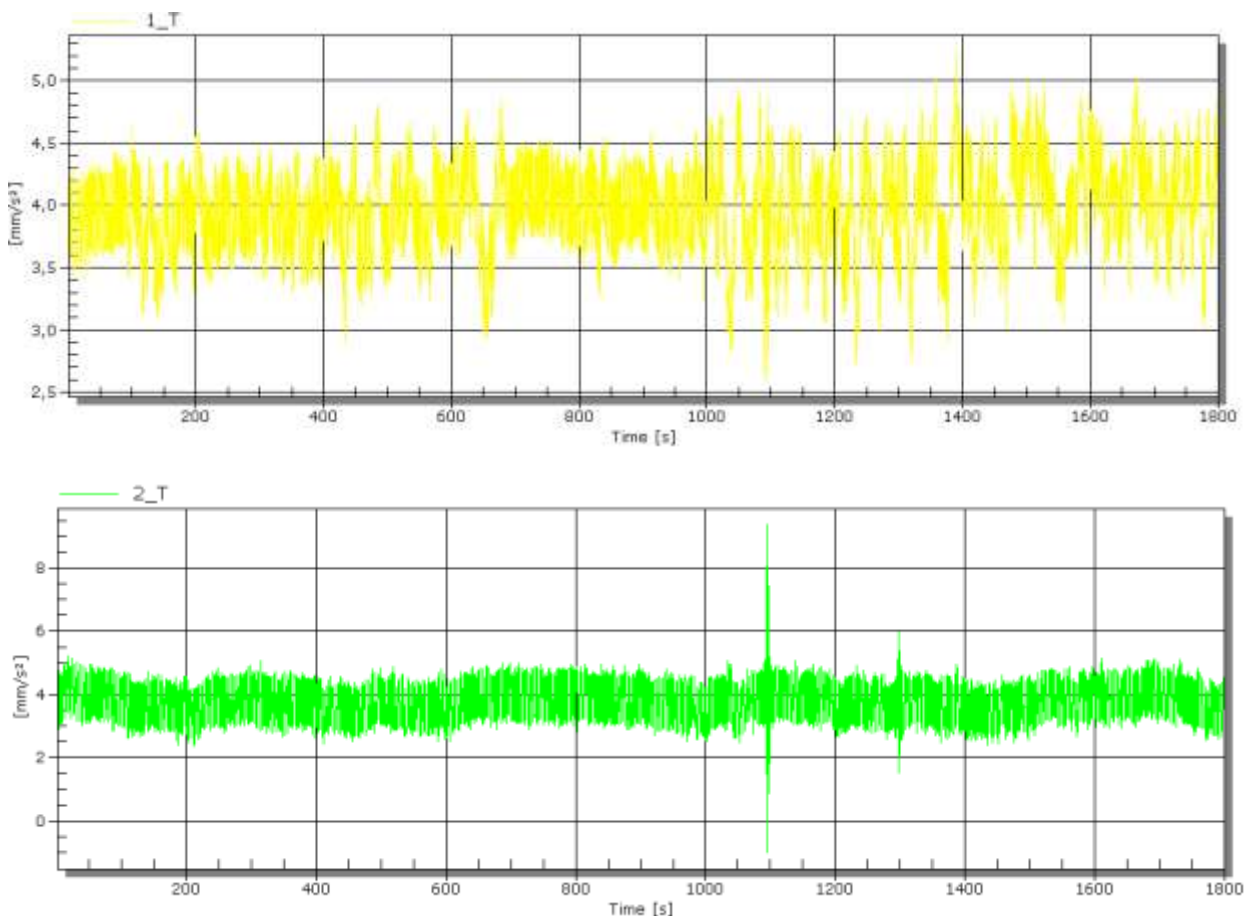
I dati registrati sono stati elaborati con il programma: “Operational Modal Analysis “ sviluppato da LMS che permette l'individuazione del numero di modi presenti nell'intervallo di frequenza analizzato, la stima dei parametri modali con la tecnica nota come Polimax e la successiva individuazione di alcuni indici per una valutazione dell'affidabilità delle stime effettuate.

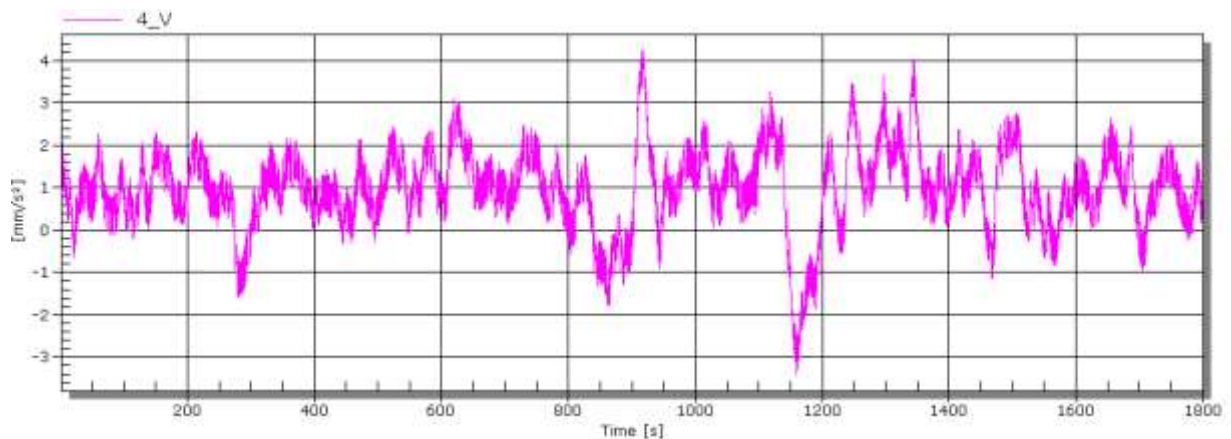
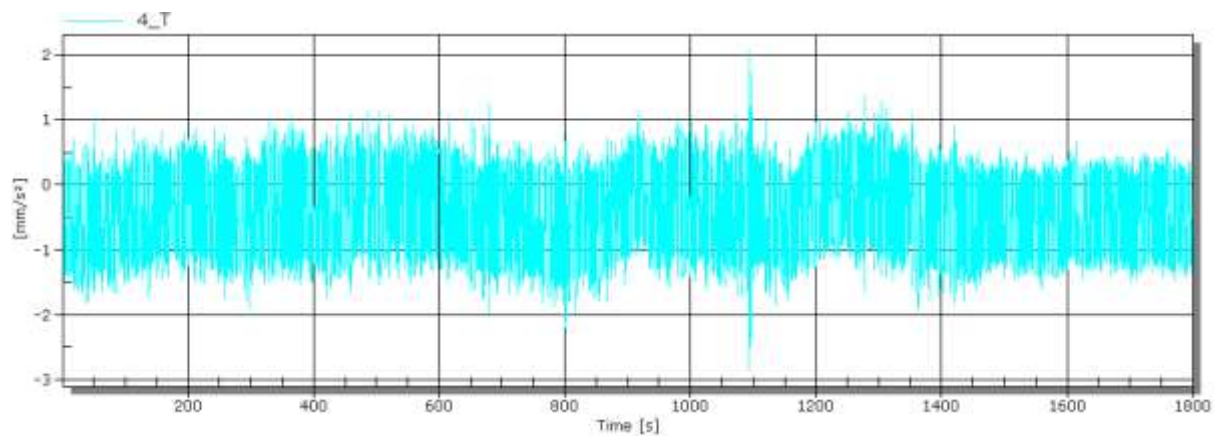
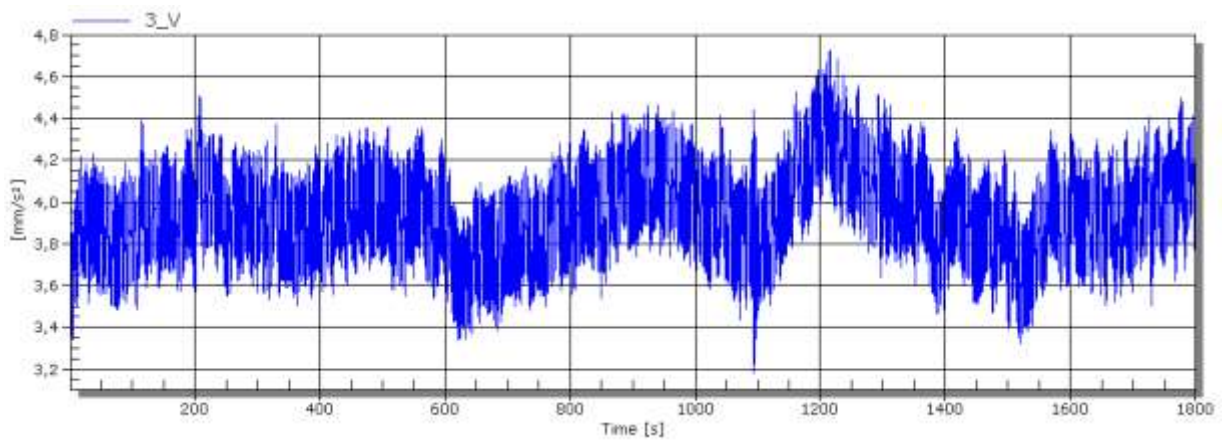
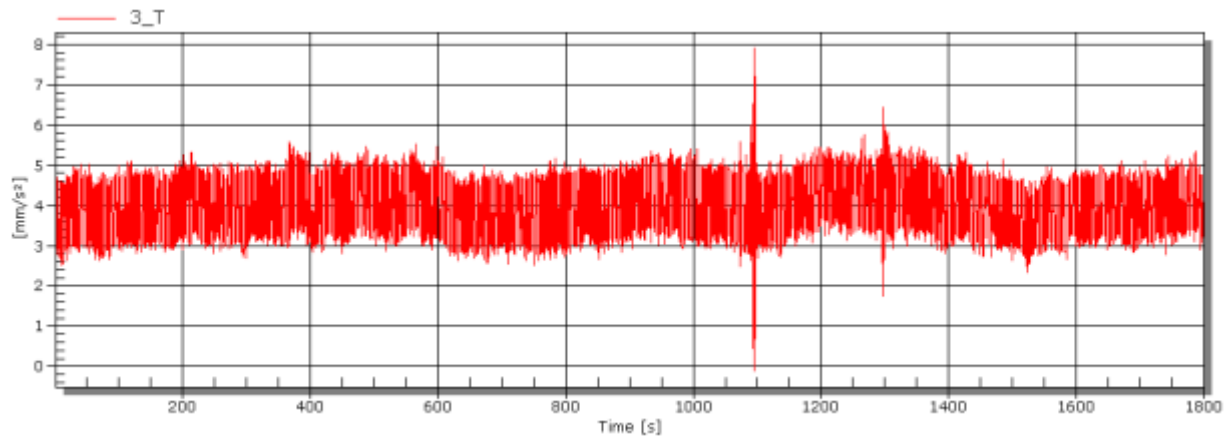
L'elaborazione è stata sviluppata secondo i seguenti passi.

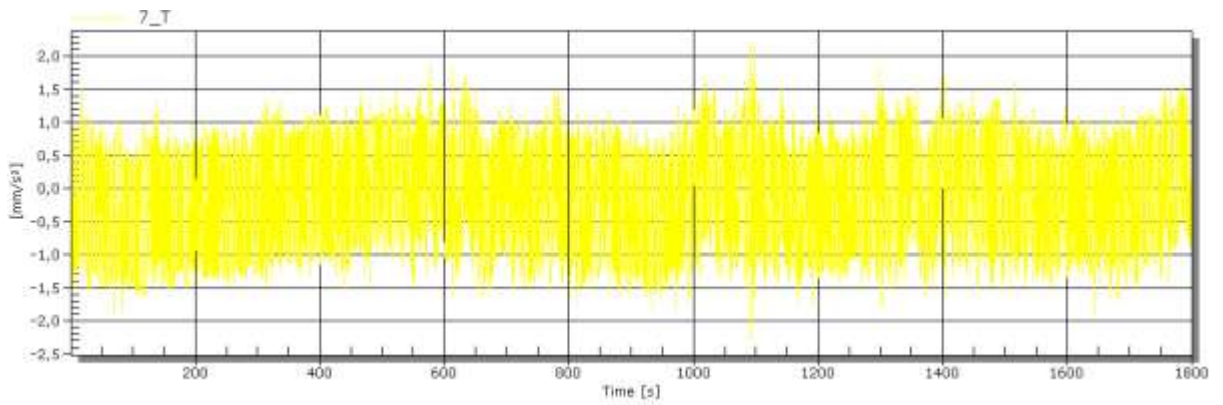
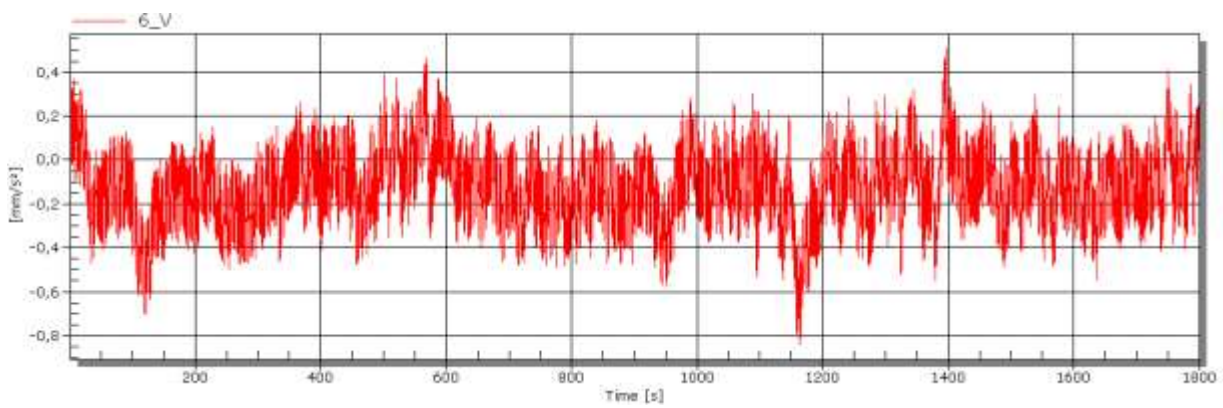
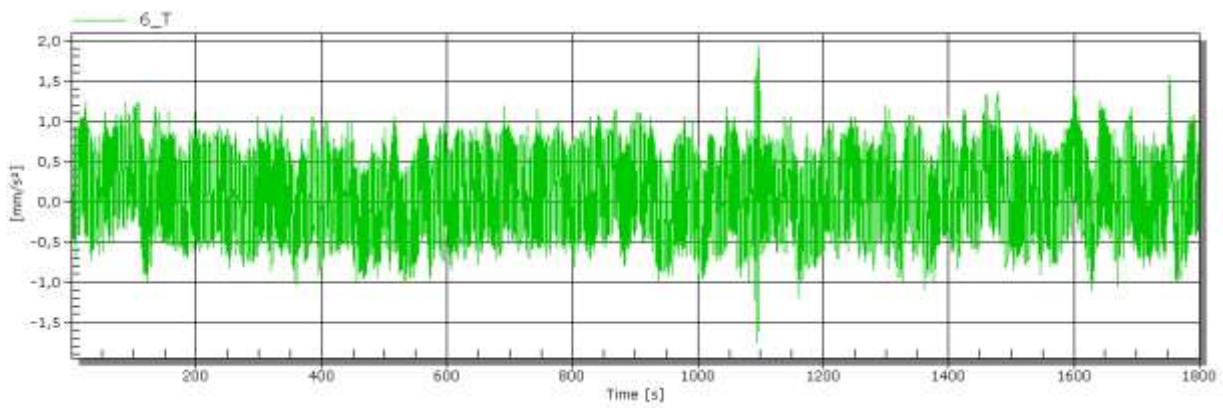
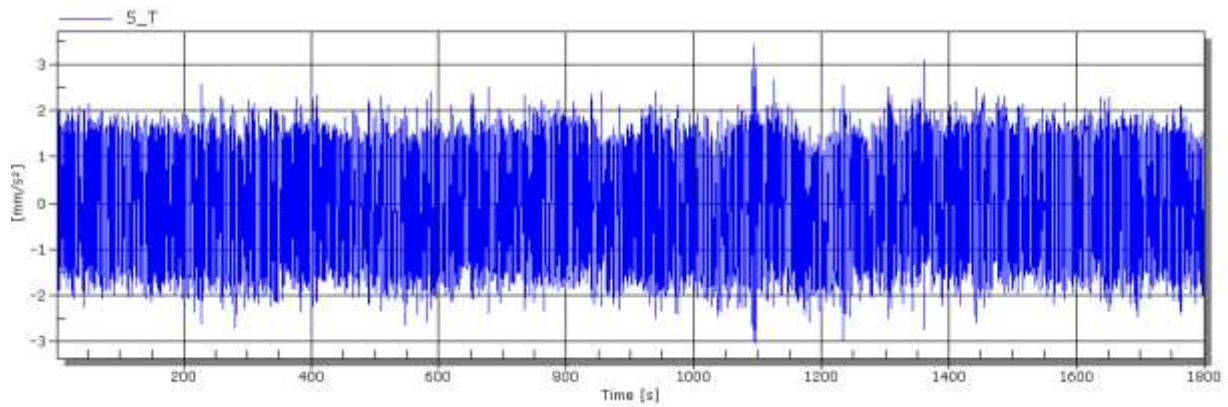
### A) Scelta dell'intervallo di registrazione da utilizzare per le elaborazioni

Poiché l'eccitazione ambientale presenta le caratteristiche tipiche di un segnale random non stazionario con la sovrapposizione in alcuni casi di transitori di tipo impulsivo dovuti ad attività antropica, è stata dapprima effettuata una verifica della qualità delle registrazioni per una scelta degli intervalli durante i quali l'eccitazione mostrava maggior regolarità.

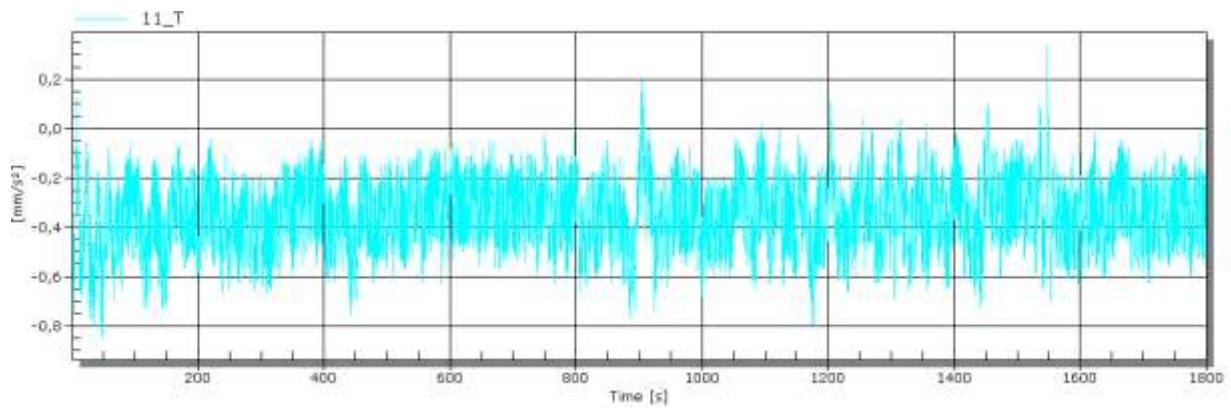
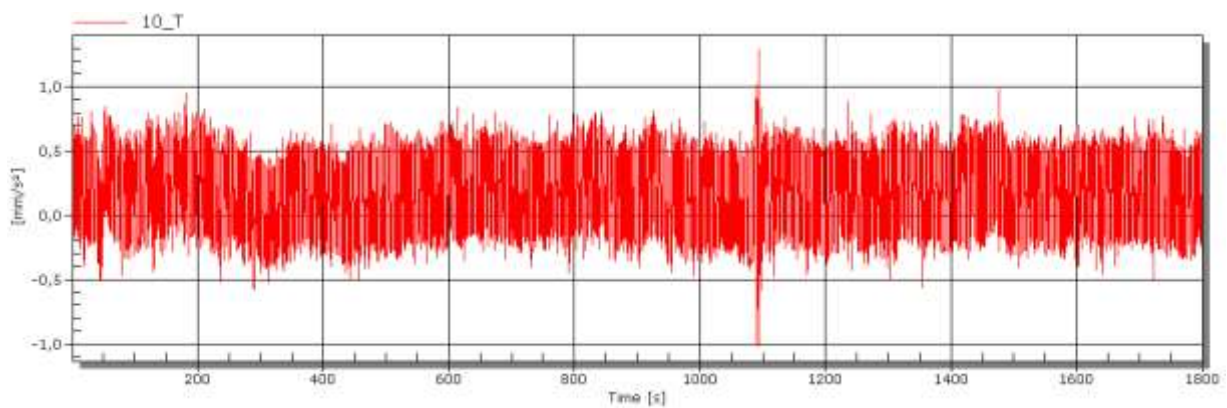
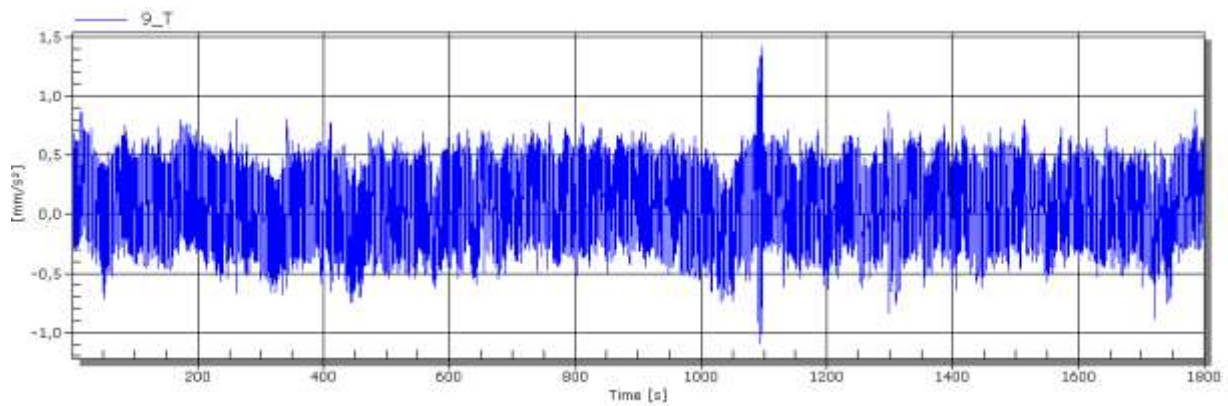
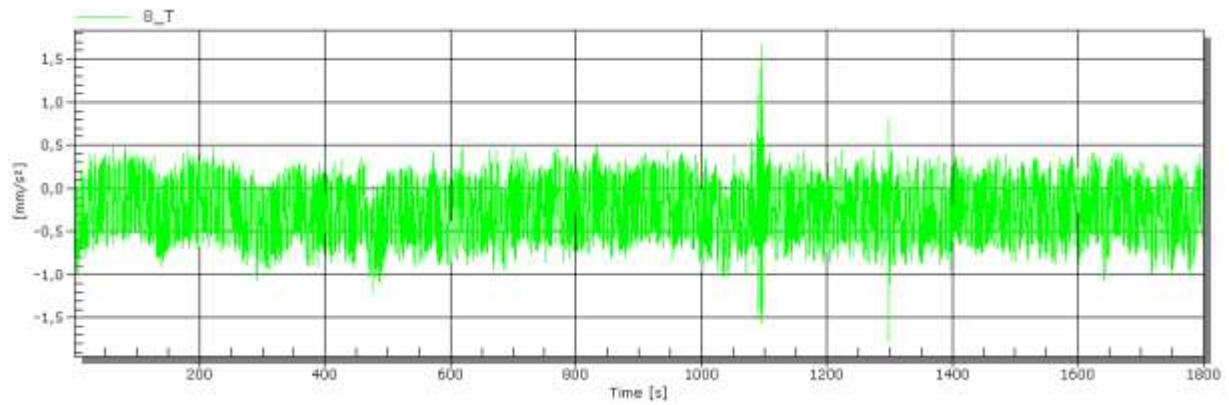
Di seguito a titolo esemplificativo vengono illustrati i grafici dei rilievi sperimentali relativi ad una tipica registrazione da 30 minuti. La registrazione, che si riferisce al periodo dalle ore 09:20 alle 09:50 del 19/10/2017, risulta caratterizzata da una buona risposta delle posizioni di misura per tutto il periodo di osservazione.

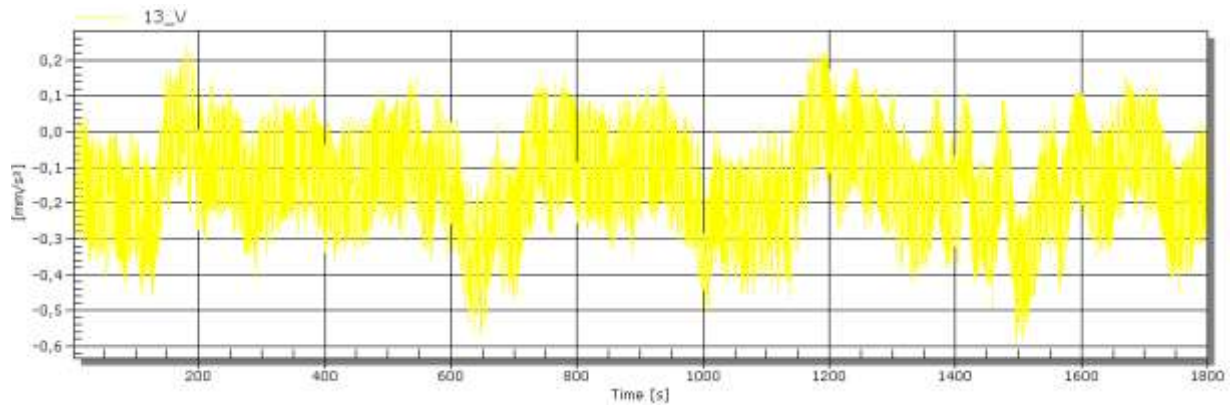
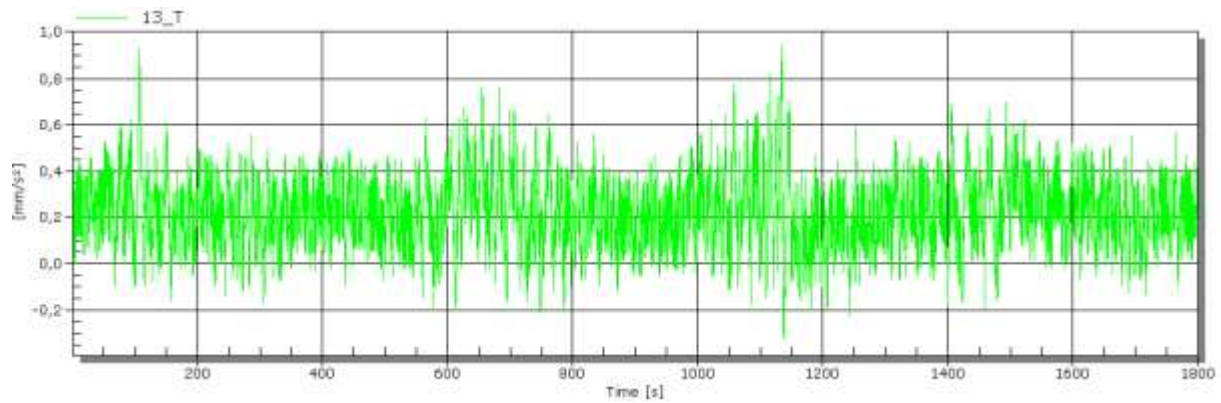
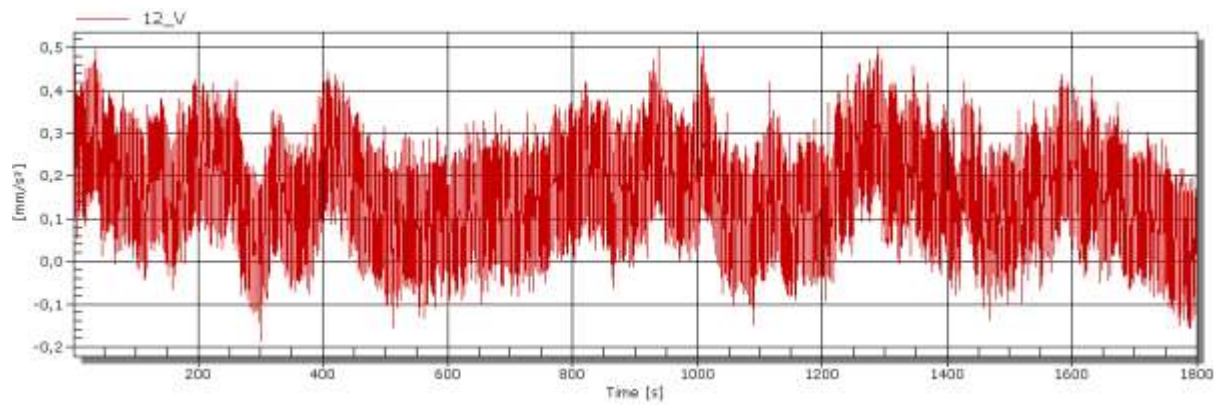
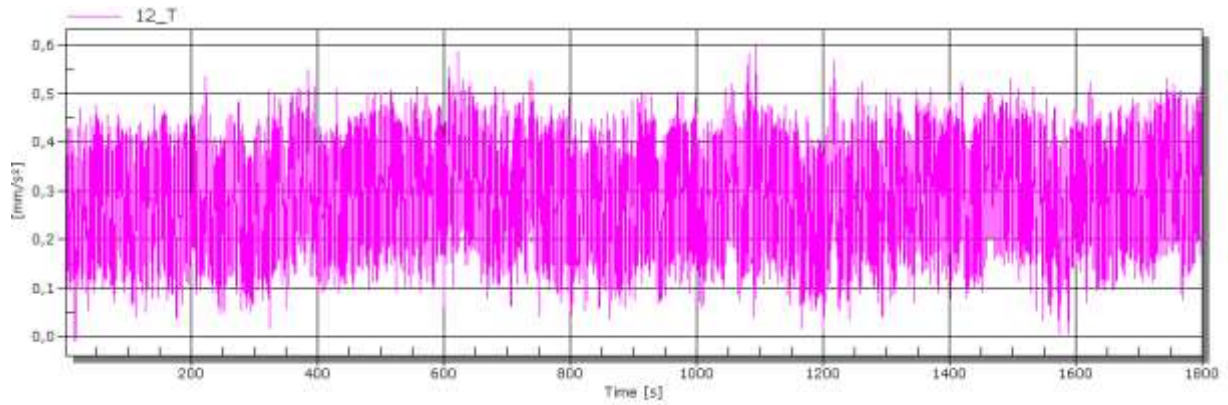




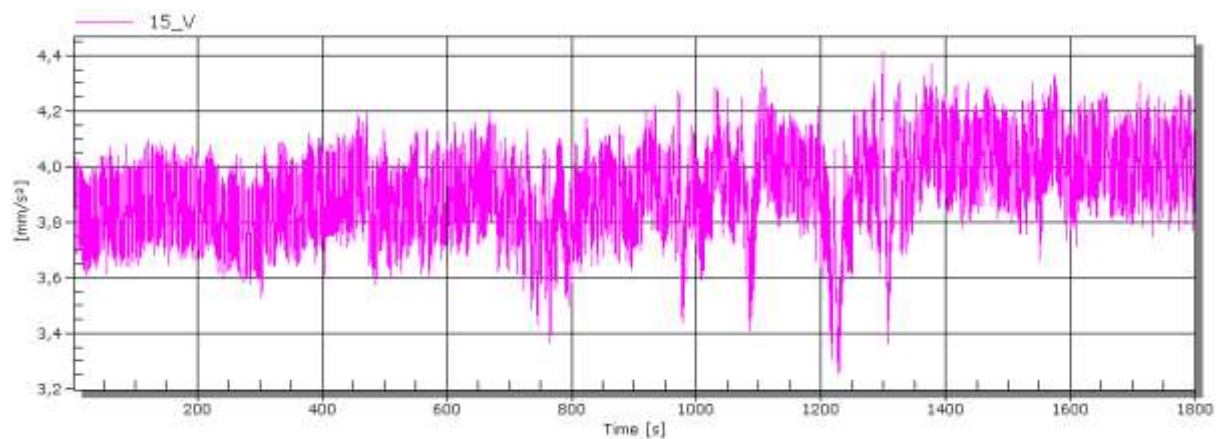
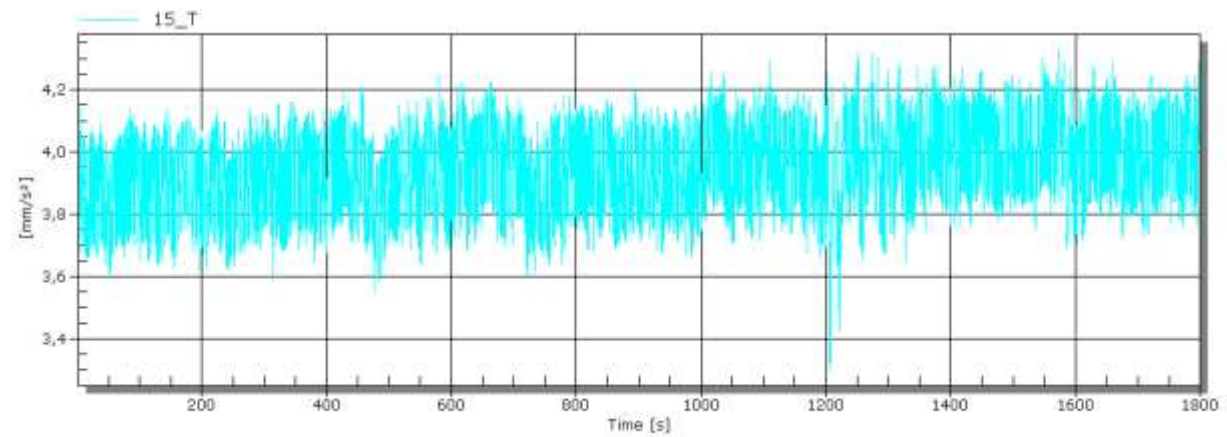
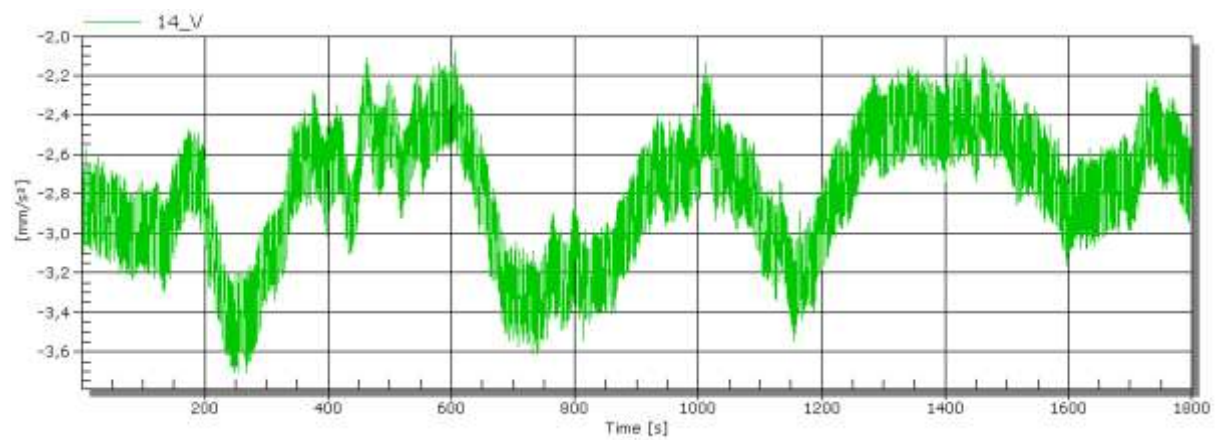
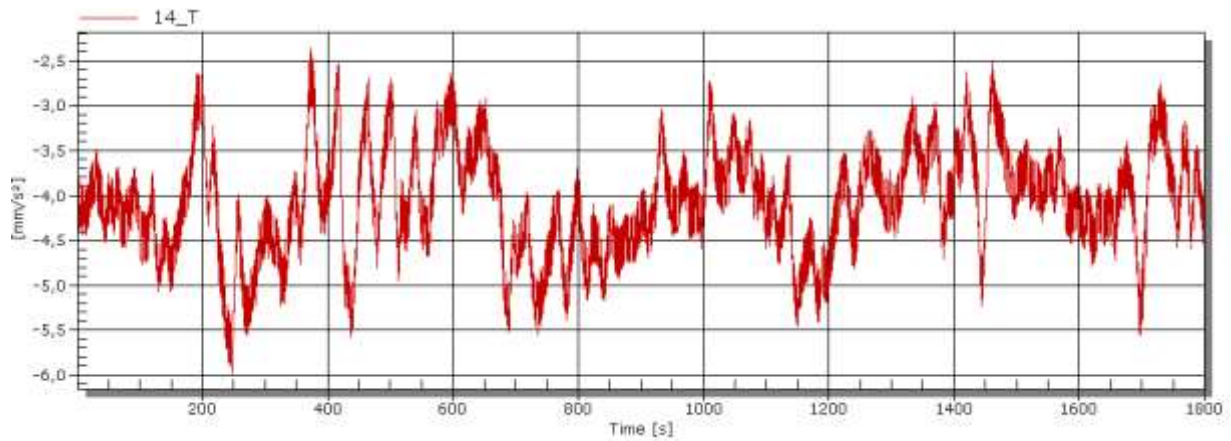












### Calcolo della matrice della Densità Spettrale di Potenza

La matrice delle densità spettrali è il punto di partenza per l'utilizzo dell'algoritmo Polimax; fra le diverse tecniche disponibili per il calcolo della densità spettrale di un processo random, avendo a disposizione un numero elevato di campioni, si è fatto uso del metodo classico che determina la densità spettrale come media delle densità spettrali di ogni singolo campione.

Pertanto il calcolo è stato eseguito nel modo seguente:

- applicazione ad ogni singolo campione della finestra di Hanning
- calcolo della trasformata di Fourier discreta di ogni campione definita come:

$$DFT_x^i = \sum_{n=0}^{N-1} x_n^i \cdot e^{-\frac{2\pi}{N}kn}, \quad k = 0, \dots, N-1$$

- calcolo della densità spettrale del campione i-esimo

$$PSD_{xx}^i = \frac{1}{T} \cdot (DFT_x^i)^* \cdot DFT_x^i \quad \text{densità spettrale di potenza diretta per la time history } x_n$$

$$PSD_{xy}^i = \frac{1}{T} \cdot (DFT_x^i)^* \cdot DFT_y^i \quad \text{densità spettrale di potenza incrociata tra le time history } x_n \text{ e } y_n$$

essendo:

$(DFT_x)^*$  e  $(DFT_y)^*$  i complessi coniugati rispettivamente di  $DFT_x$  e  $DFT_y$

- calcolo della densità spettrale dell'intero processo

$$PSD_{xx} = \frac{1}{N} \sum_i PSD_{xx}^i \quad PSD_{xy} = \frac{1}{N} \sum_i PSD_{xy}^i$$

Poiché il calcolo della trasformata di Fourier è stato eseguito utilizzando un numero di punti  $N_p = 8192$  sui 1080000 disponibili l'effettiva durata della registrazione è risultata essere di 13,6 s e conseguentemente la risoluzione in frequenza è stata pari a 0.07 Hz, valore del tutto adeguato per cogliere in modo accurato il comportamento dinamico della struttura.

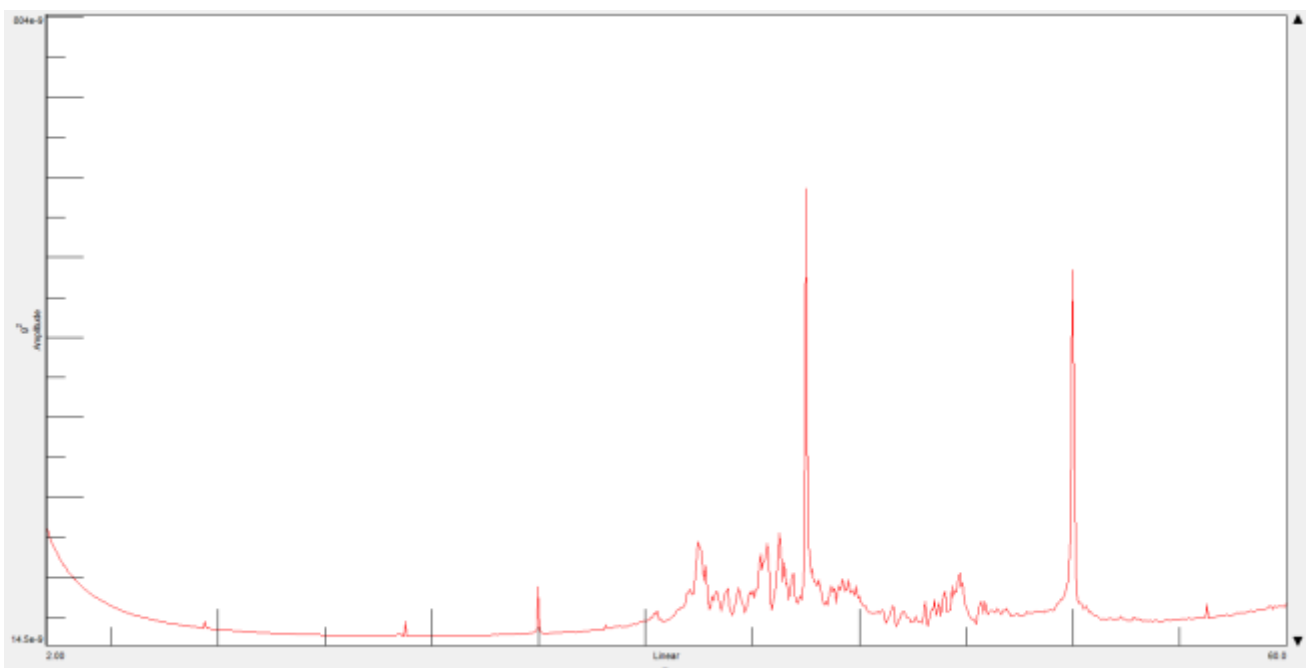
## B) L'identificazione modale con il metodo Polimax

Il metodo utilizzato per la determinazione dei parametri modali, sviluppato da LMS, è noto come “PoliMax Modal Parameter Estimation Method” e permette, a partire dalla conoscenza degli spettri della risposta, di determinare simultaneamente i poli (frequenze proprie) e i residui; tali parametri vengono ottenuti attraverso la minimizzazione di una opportuna funzione errore una volta scelto l'ordine (e quindi il numero di poli) con cui può essere decomposta la matrice delle densità spettrali.

In pratica il processo di individuazione dei modi procede partendo da modelli che hanno un ordine molto superiore rispetto ai modi presumibilmente presenti nel campo di frequenza esplorato ed escludendo poi attraverso il ricorso al diagramma di stabilizzazione i modi spuri (introdotti cioè dal metodo di calcolo) da quelli fisici.

Tale scelta si opera ricalcolando i parametri di modelli il cui ordine viene di volta in volta diminuito; nel corso di questo processo soltanto i poli effettivi del sistema rimangono stabili.

La figura seguente mostra a titolo d'esempio il diagramma di stabilizzazione relativo al tratto di interesse e i poli stabili scelti quindi come modi della struttura. Di seguito sono stati individuati i modi principali della struttura:



*Diagramma di stabilizzazione tra 2,0 Hz – 60,0 Hz*



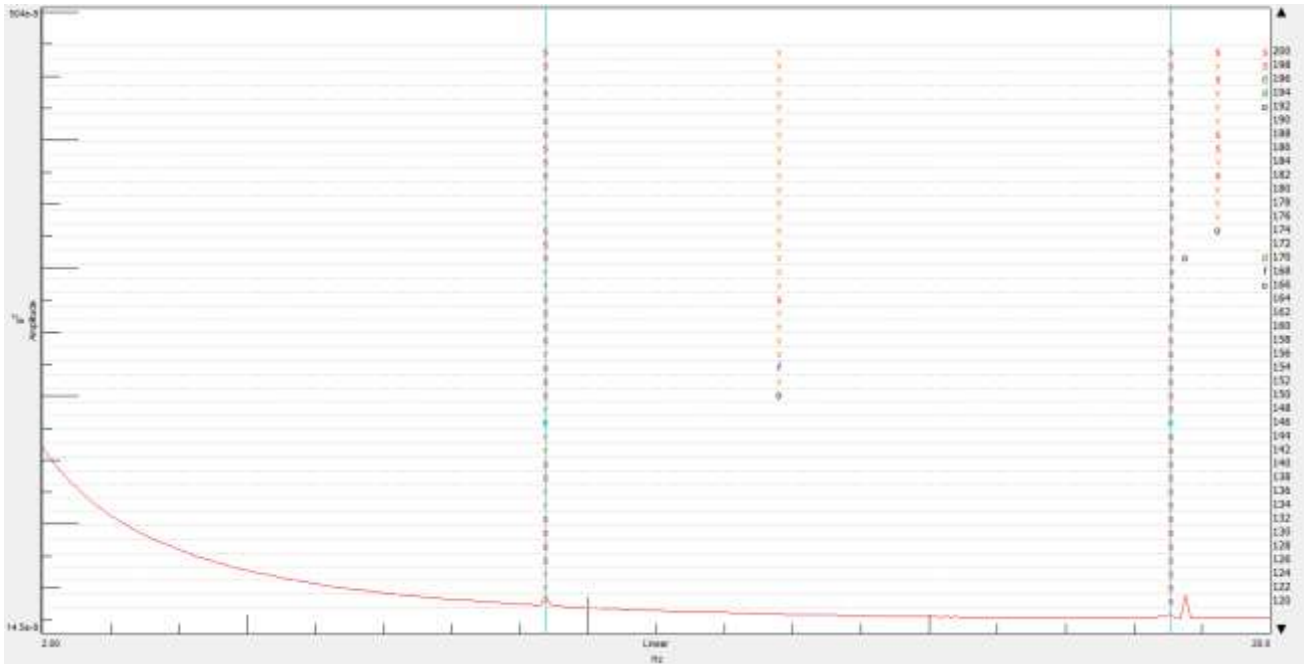


Diagramma di stabilizzazione tra 2,0 Hz - 20,0 Hz  
 $f_1 = 9,4$  Hz;  $f_2 = 18,5$  Hz

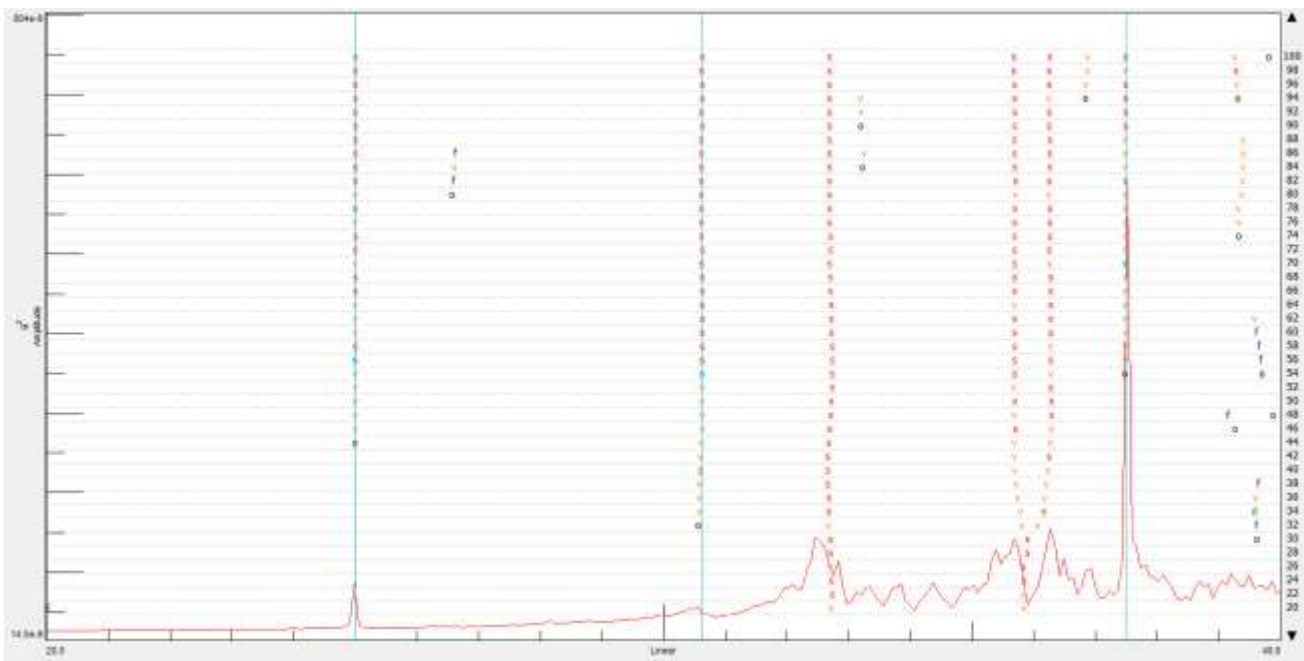


Diagramma di stabilizzazione tra 20,0 Hz - 40,0 Hz  
 $f_3 = 25,0$  Hz;  $f_4 = 30,6$  Hz e  $f_5 = 37,5$  Hz.

### C) Validazione dei dati

Il grado di confidenza sui valori dei parametri modali estratti con il metodo Polimax può essere valutato tramite il calcolo di una serie di indici; fra questi il più significativo è l'indicatore MAC.

#### Modal Assurance Criterion (MAC)

L'indicatore MAC per due vettori complessi X e Y assume un valore prossimo ad 1 se fra i due vettori esiste una relazione lineare mentre assume un valore circa 0 per vettori linearmente indipendenti; applicato alle forme modali stimate permette dunque una verifica della loro ortogonalità

Nel caso in oggetto l'indicatore MAC è stato calcolato per tutte le coppie di modi individuati ed è riportato nella tabella seguente avendo normalizzato a 100 il valore dell'indice lungo la diagonale principale:

	<i>Mode 1</i> <i>9,4 Hz</i>	<i>Mode 2</i> <i>18,5 Hz</i>	<i>Mode 3</i> <i>25,0 Hz</i>	<i>Mode 4</i> <i>30,6 Hz</i>	<i>Mode 5</i> <i>37,5 Hz</i>
<i>Mode 1</i> <i>9,4 Hz</i>	100	16	14	2	9
<i>Mode 2</i> <i>18,5 Hz</i>	16	100	17	31	14
<i>Mode 3</i> <i>25,0 Hz</i>	14	17	100	26	19
<i>Mode 4</i> <i>30,6 Hz</i>	2	31	26	100	40
<i>Mode 5</i> <i>37,5 Hz</i>	9	14	19	40	100

*Valori dell'indicatore AutoMac*

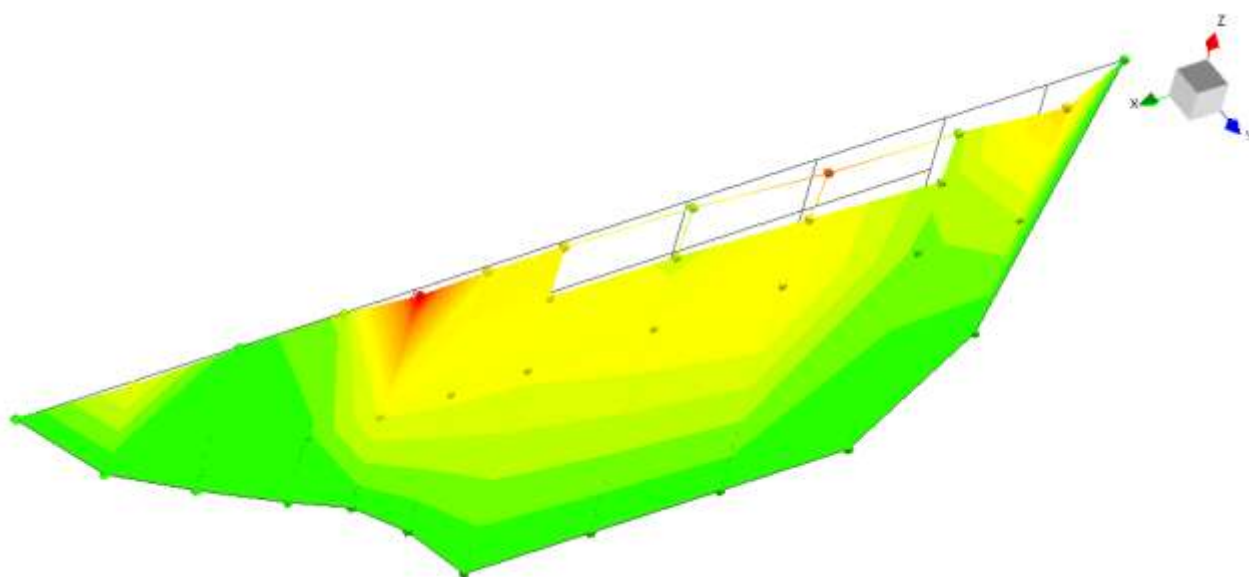
I valori assunti dai termini fuori diagonale assumono valori modesti del tutto accettabili a indicare indipendenza tra i modi principali individuati mediante l'analisi.

### **2.3 I modi sperimentali individuati**

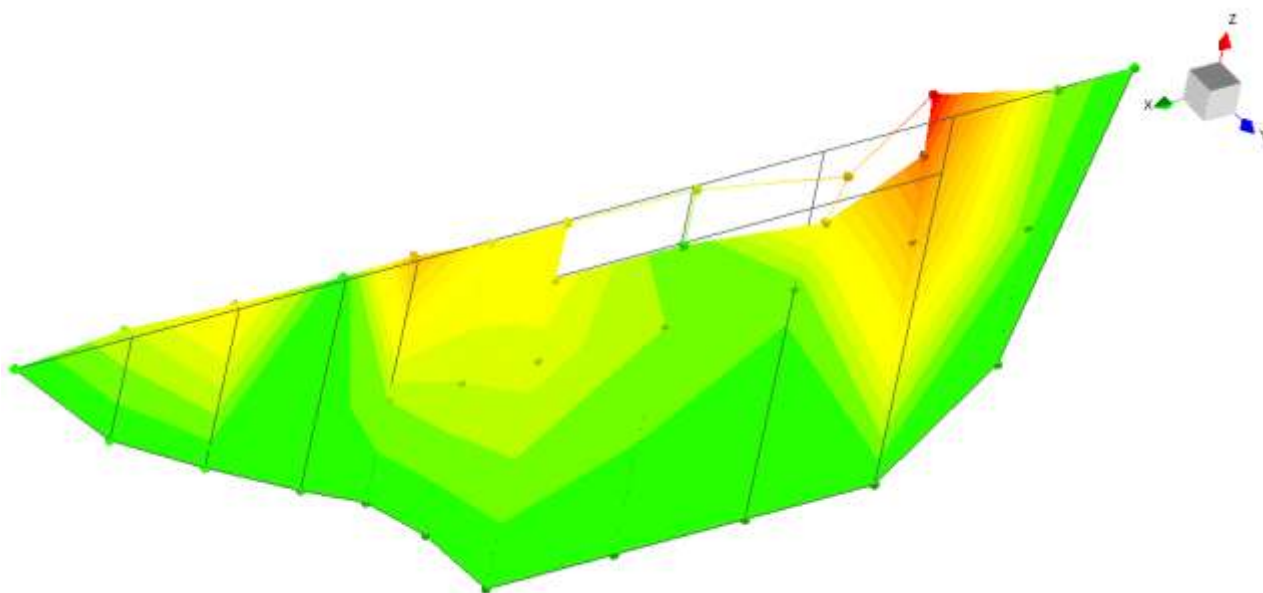
Il processo di analisi della risposta ambientale dell'edificio ha portato ad individuare i primi modi principali di vibrare del manufatto. La tabella successiva riporta la frequenza propria di ciascun modo individuato, oltre a descrivere in termini indicativi la deformata che è illustrata nelle immagini seguenti:

#### *Risultati dell'analisi modale*

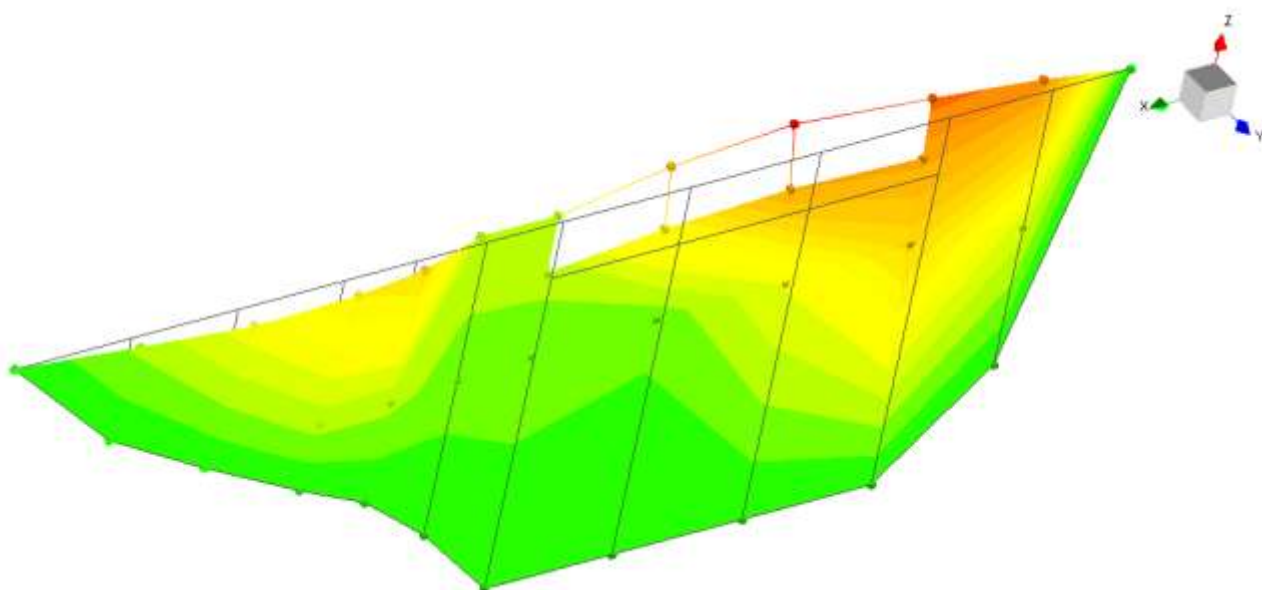
<b>Modo</b>	<b>Frequenza</b>	<b>Deformata indicativa</b>
<b>f1</b>	<b>9,4 Hz</b>	<b>Modo proprio di vibrare di natura prevalentemente flessionale con traslazione fuori piano (direzione Y) del corpo Diga</b>
<b>f2</b>	<b>18,5 Hz</b>	<b>Modo proprio di vibrare di natura prevalentemente flessionale che coinvolge prevalentemente le n.2 pile sulla soglia sfiorante della Diga che presentano un movimento di traslazione in controfase fuori piano (direzione Y)</b>
<b>f3</b>	<b>25,0 Hz</b>	<b>Modo proprio di vibrare di natura prevalentemente flessionale con deformata del corpo Diga caratterizzata da n.2 flessi</b>
<b>f4</b>	<b>30,6 Hz</b>	<b>Modo proprio di vibrare di natura prevalentemente flessionale che coinvolge prevalentemente le n.2 pile sulla soglia sfiorante della Diga che presentano un movimento di traslazione in fase fuori piano (direzione Y)</b>
<b>f5</b>	<b>37,5 Hz</b>	<b>Modo proprio di vibrare di natura prevalentemente flessionale con deformata del corpo Diga caratterizzata da n.3 flessi</b>



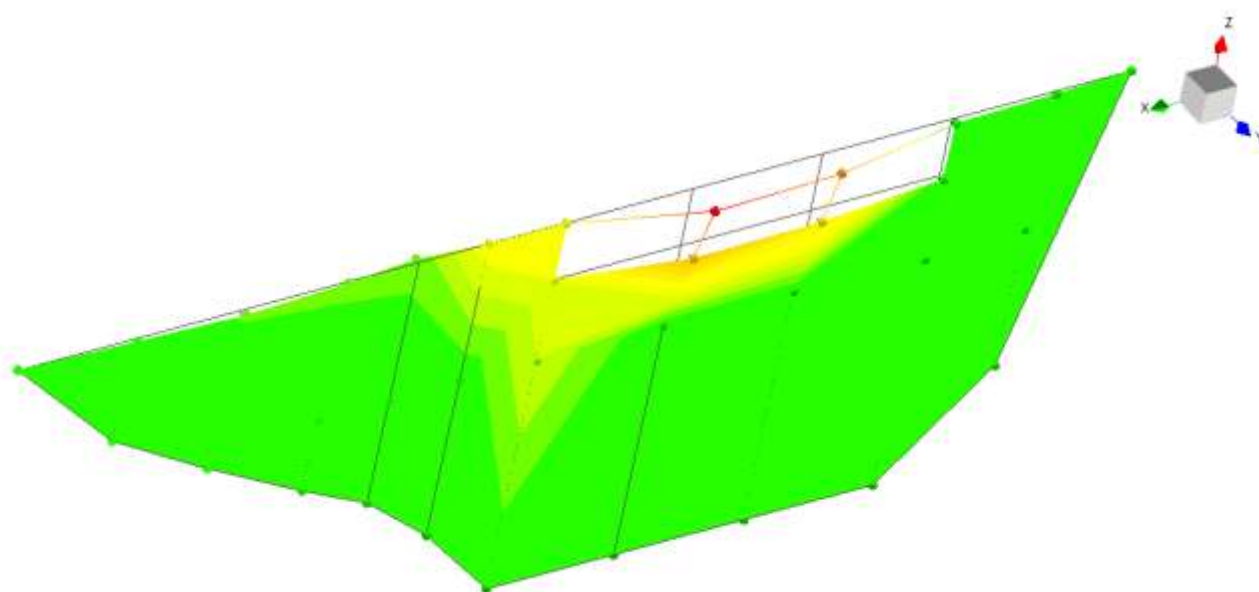
**Modo 1 – Frequenza 9,4 Hz**



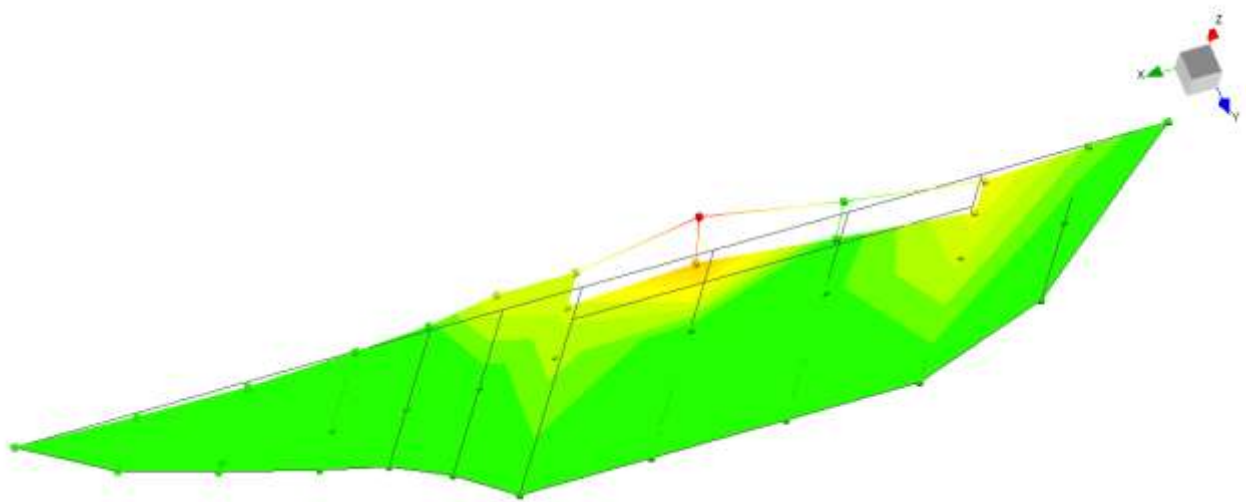
**Modo 2 – Frequenza 18,5 Hz**



**Modo 3 – Frequenza 25,0 Hz**



**Modo 4 – Frequenza 30,6 Hz**



**Modo 5 – Frequenza 37,5 Hz**

### 3. INDAGINE SISMICA ATTIVA CON METODO MASW

All'interno della campagna di indagini in oggetto è stata eseguita anche un'indagine sismica di tipo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), finalizzata alla determinazione dei parametri sismici del terreno.

Scopo principale dell'indagine è stato quello di caratterizzare il terreno tramite l'analisi del parametro fisico della velocità sismica delle onde superficiali nei primi 30 m di substrato, avendo come obiettivi:

- caratterizzazione sismica del substrato investigato
- calcolo del parametro di  $V_{s30}$  lungo i profili

#### 3.1 Area di studio

Con riferimento allo schema grafico riportato di seguito, l'area di indagine è costituita da un'area verde sita nelle immediate vicinanze della diga. Lo stendimento, di lunghezza pari a 57.5 m, è stato collocato in un'area che presentava una superficie sufficientemente ampia, piana, che permettesse uno stendimento rettilineo ed il più possibile libera da disturbi esterni.



*Ubicazione dello stendimento Masw*



### 3.2 Indagine condotta e strumentazione utilizzata

I parametri dell'indagine sismica condotta con tecnica MASW sono riportati nella tabella seguente.

Profilo sismico	Lunghezza stendimento* (m)	Distanza intergeofonica (m)	Record length (s)	Sample interval (ms)
MASW	57.5	2.5	1	0.256

\*La lunghezza è riferita ai metri coperti dai geofoni impiegati e non considera le energizzazioni effettuate al di fuori degli stessi



*Stendimento dei n. 24 geofoni di misura e fase di energizzazione*



Di seguito viene elencata la strumentazione utilizzata per l'esecuzione dell'indagine sismica.

Strumentazione	Quantità
Sismografo Echo 24/2010 24 canali - 24 bit	1
Cavo multipolare	2
Geofoni 4,5 Hz	24
Hammer switch	1
Mazza strumentata da 7 Kg	1

Le tecniche per la determinazione della velocità delle onde sismiche di taglio sono diverse e si distinguono principalmente tra tecniche di tipo diretto o indiretto e tra tecniche di tipo attivo e di tipo passivo. Nessuna tecnica è in grado di garantire la completa affidabilità nella determinazione dei parametri dei terreni presenti nel sottosuolo. Occorre pertanto appoggiarsi ad informazioni di tipo stratigrafico per poter interpretare correttamente le informazioni deducibili dall'interpretazione dei dati delle campagne d'indagine.

### 3.3 Classificazione del suolo di fondazione

La recente normativa nazionale in materia di Norme Tecniche delle Costruzioni subentrata nell'ottobre 2005 all'Ordinanza 3274 del Presidente del Consiglio dei Ministri, e più recentemente aggiornata nel 2008, ha introdotto tra l'altro una nuova normativa tecnica in materia di progettazione antisismica. La nuova normativa nazionale introduce una classificazione dei suoli per la definizione dell'azione sismica di progetto. Tale classificazione distingue tra cinque categorie principali (dalla A alla E) alle quali sono aggiunte altre due (S1 ed S2) per le quali è richiesta l'effettuazione di studi di dettaglio per la valutazione, in fase di progettazione esecutiva, dell'azione sismica da considerare.

TIPO DI TERRENO	PROFILO STRATIGRAFICO	PARAMETRI		
		Vs30 [m/s]	NSPT	Cu [kPa]
A	Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi, caratterizzati da valori di Vs30 superiori a 800 m/s, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 5 m	> 800		
B	Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti, con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30 compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero resistenza penetrometrica NSPT > 50, o coesione non drenata cu > 250 kPa)	< 800 > 360	> 50	> 250
C	Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate o di argille di media consistenza, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di Vs30 compresi tra 180 e 360 m/s (15 < NSPT < 50, 70	< 360 > 180	< 50 > 15	< 250 > 70

TIPO DI TERRENO	PROFILO STRATIGRAFICO	PARAMETRI		
		Vs30 [m/s]	NSPT	Cu [kPa]
	<cu<250 kPa)			
<b>D</b>	Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti, caratterizzati da valori di Vs30 < 180 m/s (NSPT<15, cu<70 kPa)	< 180	< 15	< 70
<b>E</b>	Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali, con valori di Vs30 simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso tra 5 e 20 m, giacenti su di un substrato di materiale più rigido con Vs30 > 800 m/s			
<b>S1</b>	Depositi costituiti da, o che includono, uno strato spesso almeno 10 m di argille / limi di bassa consistenza, con elevato indice di plasticità (PI > 40) e contenuto di acqua, caratterizzati da valori di Vs30 < 100 m/s (10 < cu < 20 kPa)	< 100		< 20 > 10
<b>S2</b>	Depositi di terreni soggetti a liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabile nei tipi precedenti			

Tale classificazione si basa principalmente sulla conoscenza del valore del parametro  $V_{S30}$  che rappresenta il valore medio della velocità di propagazione delle onde di taglio (S) entro i primi 30 metri di profondità.

Il valore di  $V_{S30}$  viene calcolato mediante la seguente espressione:

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{(i=1,N)} h_i/V_i}$$

dove  $h_i$  e  $V_i$  indicano rispettivamente lo spessore in metri e la velocità delle onde di taglio in m/sec (per deformazioni di taglio  $\gamma < 10^{-6}$ , per deformazioni piccole e nel campo delle deformazioni elastiche) dello strato i-esimo per un totale degli N-strati riconosciuti nei primi 30 metri di sottosuolo a partire dalla superficie.

La determinazione del valore delle onde di taglio negli strati superficiali, insieme ad una dettagliata ricostruzione stratigrafica del sottosuolo, è ritenuta fondamentale per valutare sia gli effetti legati allo scuotimento indotto dal sisma sul terreno (fenomeni di liquefazione, fenomeni di dilatanza o di addensamento, instabilità di versanti, collasso di cavità sotterranee) che la conseguente risposta del sottosuolo (fenomeni di amplificazione sismica legati sia ad effetti morfologici che litologici, presenza di faglie attive).

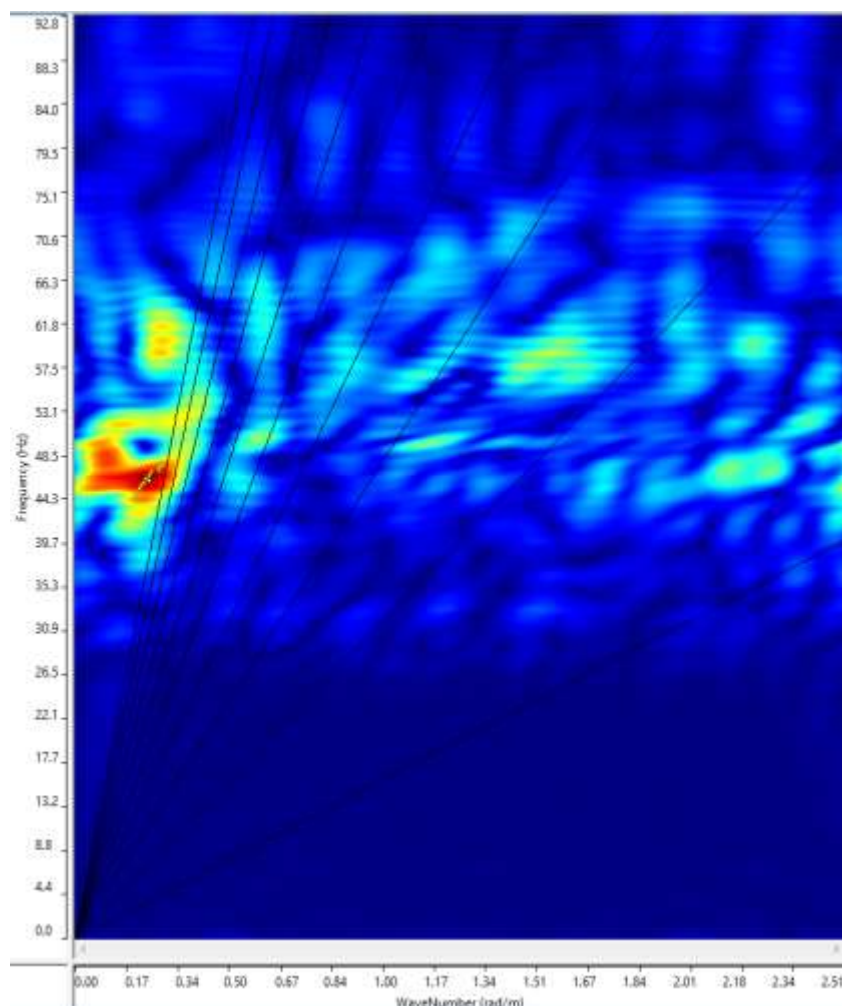
In seguito ai fenomeni di rifrazione / diffrazione che si verificano in corrispondenza di ogni contrasto d'impedenza lungo la direzione di propagazione dei fronti d'onda (a partire dalla sorgente sismica), le onde di taglio che raggiungono la superficie topografica, risultano pressoché verticali determinando così in tale punto spostamenti orizzontali rilevanti ai fini della stabilità delle costruzioni.

### 3.4 Analisi dei risultati ottenuti

Nel caso specifico, relativamente all'indagine MASW condotta vengono di seguito riportate:

- lo spettro nel dominio  $f - k$  di potenza e picking manuale della curva di dispersione;
- una tabella riportante lo spessore dei vari strati ed i relativi valori di  $V_s$  al variare della profondità di indagine;
- il profilo del modello sintetico utilizzato per approssimare la curva di dispersione sperimentale a quella calcolata.

L'indagine MASW, pur con l'approssimazione congenita del metodo, consente di approfondire le informazioni sul modello stratigrafico del sito in esame. In particolare, l'analisi delle onde superficiali è in grado di definire una stratificazione anche all'interno del terreno.

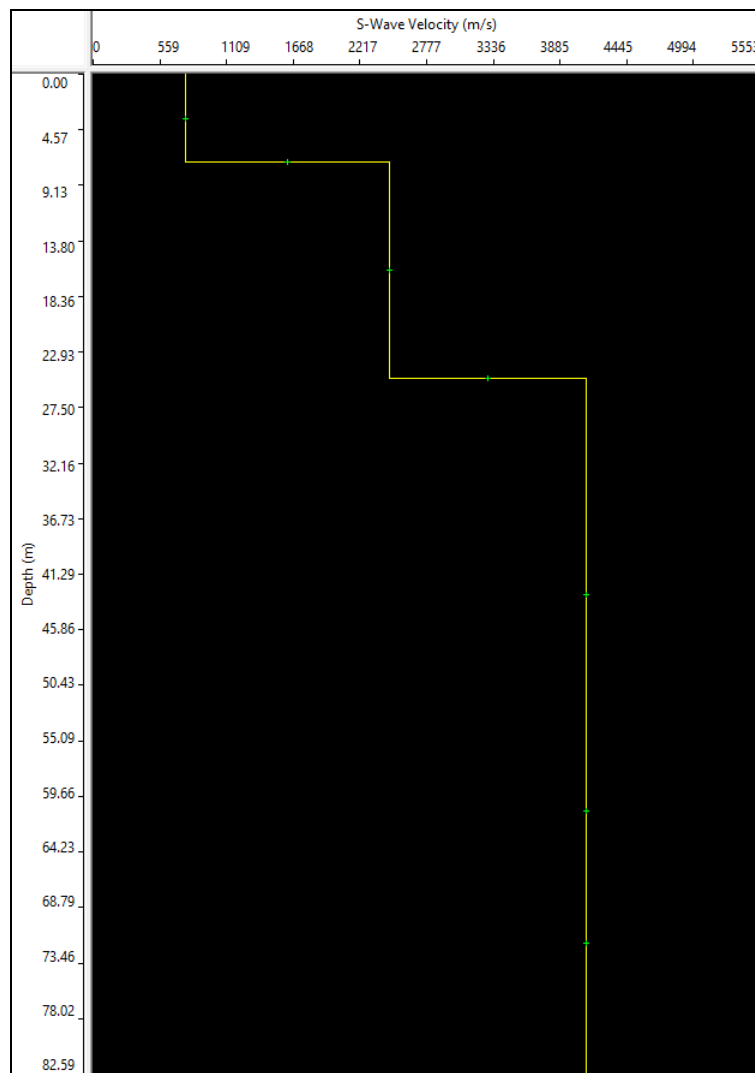


*Spettro di potenza e picking manuale della curva di dispersione*

Strato	Prof. [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
1	0.00	7.28	771
2	7.28	17.79	2467
3	25.07	inf.	4105

*Tabella dei valori di velocità delle onde S (Vs) in funzione dello spessore degli strati riscontrati*

Per quanto riguarda l’area in esame i risultati ottenuti mostrano un valore di riferimento di **Vs30** pari a **1681 m/s** equivalente ad un suolo di fondazione di **tipo A**: questa categoria racchiude “Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi, caratterizzati da valori di Vs30 superiori a 800 m/s, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 5 m”.



*Profilo del modello sintetico di calcolo*

Si ricorda infine che l’eventuale presenza di informazioni di tipo stratigrafico potrebbe consentire di affinare ulteriormente la modellazione, per meglio interpretare le informazioni deducibili dall’analisi dei dati della presente campagna d’indagine.

#### **4. CARATTERIZZAZIONE DINAMICA CON TECNICA HVSR**

In un'area prossima allo stendimento di indagine con metodo MASW, è stata eseguita la caratterizzazione sismica del terreno tramite la tecnica di indagine sismica passiva HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*), al fine di individuare le frequenze caratteristiche di risonanza del sito.

Analogamente a quanto fatto per l'indagine HVSR condotta su terreno, è stata eseguita una prova HVSR sul coronamento della diga, al fine di confrontare la frequenza fondamentale di risonanza della struttura con quella del terreno su cui sorge.



*Ubicazione delle prove HVSR*

#### **4.1 Indagine HVSR su terreno**

##### **4.1.1 Metodologia di indagine**

La prova a stazione singola, nota anche come prova HVSR, consiste nella valutazione sperimentale dei rapporti di ampiezza spettrale fra le componenti orizzontali (H) e la componente verticale (V) delle vibrazioni ambientali sulla superficie del terreno misurati in un punto con un apposito sismometro a tre componenti.

Il risultato di questa prova è una curva sperimentale che rappresenta il valore del rapporto fra le ampiezze spettrali medie delle vibrazioni ambientali in funzione della frequenza di vibrazione. Le frequenze alle quali la curva H/V mostra dei massimi sono legate alle frequenze di risonanza del terreno al di sotto del punto di misura. Pertanto, questa prova ha lo scopo principale di mettere in luce la possibile presenza di fenomeni di risonanza sismica.

#### **4.1.2 Strumentazione utilizzata**

Per le attività in campo è stato utilizzato un geofono triassiale 3D con frequenza naturale di risonanza a 2 Hz. Un aspetto importante delle misure HVSR è il tempo di acquisizione che è funzione della frequenza caratteristica dei picchi che si intende registrare e di conseguenza della possibile profondità dei riflettori sismici e del relativo contrasto di impedenza acustica. Per tale motivo si è deciso di effettuare una registrazione dei dati della durata di 1200 secondi, ad una frequenza di campionamento di 200 Hz.

L'elaborazione dei dati acquisiti è eseguita mediante software Geopsyack-2.5.0 versione 2.9.0. La durata dei 6 intervalli temporali analizzati è di 40 secondi, in grado di garantire un'analisi corretta anche alle frequenze più basse. L'intervallo delle frequenze analizzate varia quindi da 0.1 Hz a 20.0 Hz. Il calcolo ed il tipo di lisciamento (smoothing) degli spettri utilizzato è quello proposto da Konno & Omhachi.



*Dettaglio posizione geofono di misura e strumentazione di acquisizione dati*



### 4.1.3 Risultati ottenuti

Di seguito si riportano i risultati ottenuti attraverso l'analisi dei dati che è stata effettuata come illustrato nel paragrafo precedente.

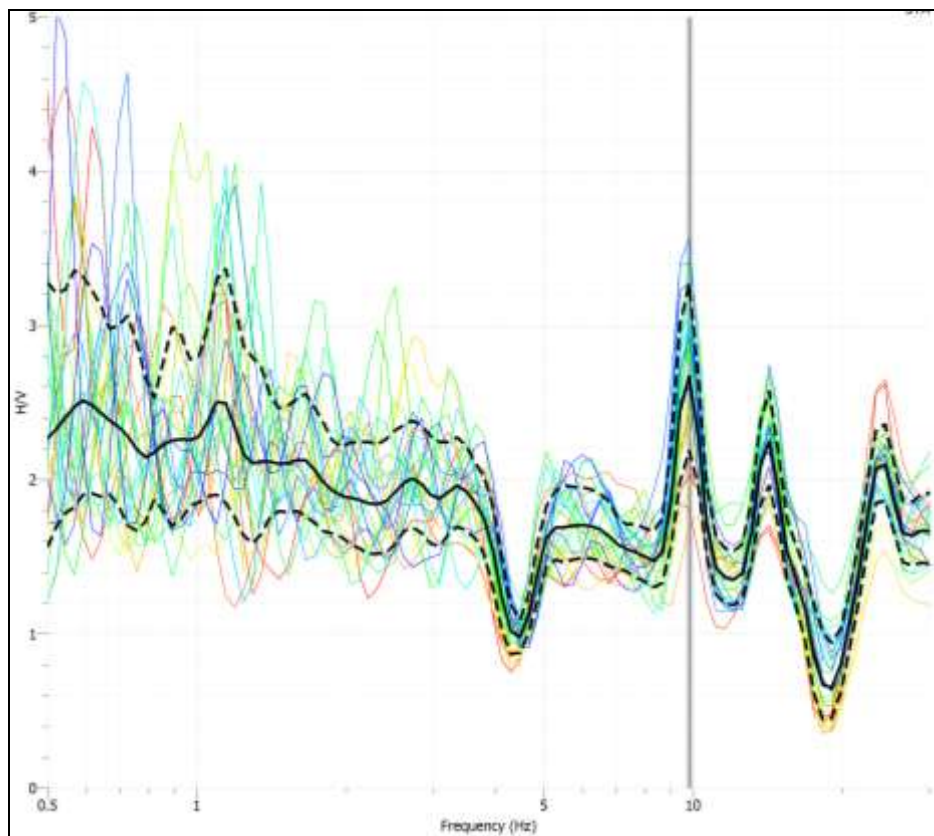


Grafico delle curve H/V

La curva di colore nero a tratto continuo rappresenta il rapporto H/V medio, mentre le curve di colore nero tratteggiate, dette “curve di confidenza”, sono il risultato della moltiplicazione (curva superiore) e divisione (curva inferiore) dei valori del rapporto H/V medio per la deviazione standard dei valori delle singole curve H/V. Le curve colorate sono i rapporti H/V delle singole finestre.

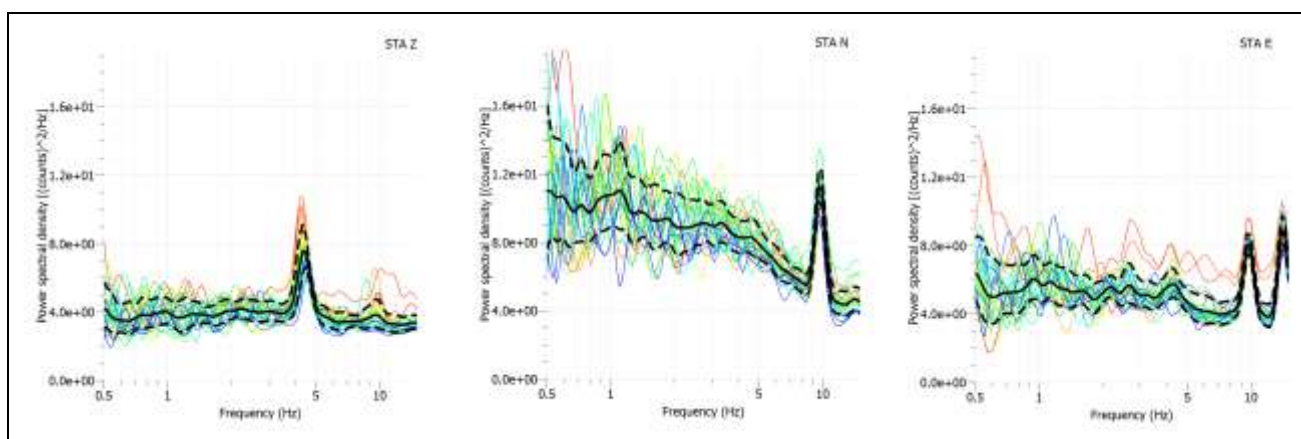
Le due bande grigie identificano la frequenza principale, o  $f_0$ , individuata automaticamente dal programma. La  $f_0$  del rapporto medio è esattamente al centro delle due bande, mentre l'area coperta dalle bande è ottenuta aggiungendo e sottraendo alla  $f_0$  del rapporto medio la deviazione standard delle  $f_0$  delle singole curve.

Un'eventuale area tratteggiata di rosso nella parte iniziale del grafico indica invece la zona di frequenze in cui il rapporto calcolato risulta poco affidabile, in quanto le finestre temporali scelte per l'elaborazione non sono lunghe a sufficienza per raggiungere quelle basse frequenze.

Stante quanto detto, la frequenza principale  $f_0$  del picco della curva H/V sperimentale risulta pari a  $9.82 \pm 0.11$  Hz.

La prova HVSR è stata condotta su una zona pianeggiante di terreno posta a valle della diga. I risultati forniti dall'indagine in termini di frequenza di risonanza pari a  $f_0 = 9.82 \pm 0.11$  Hz risultano indicare la presenza di uno strato di copertura di circa 6,0 - 7,0 m costituito da terreno collocato sopra strati rocciosi. Dal grafico sono anche evidenti frequenze più basse comprese da 0,5 fino a 3-4 Hz che mostrano la presenza di amplificazioni in una banda larga di frequenza che corrisponde alla stratigrafia rocciosa sottostante con transizioni tra roccia fratturata e roccia sana. Situazione quest'ultima che corrisponde in effetti al sito su cui poggia la diga posta più a monte, da ritenersi pertanto non interessato da particolari frequenze caratteristiche di risonanza.

Un'elaborazione accessoria che ha consentito di verificare la validità del rapporto H/V calcolato è la visualizzazione separata degli spettri di frequenza delle singole componenti. In particolare, l'andamento dello spettro della componente verticale in relazione a quello delle componenti orizzontali ha permesso di avere un'indicazione sulla natura dei picchi evidenziati dal rapporto H/V, se di origine naturale o antropica.

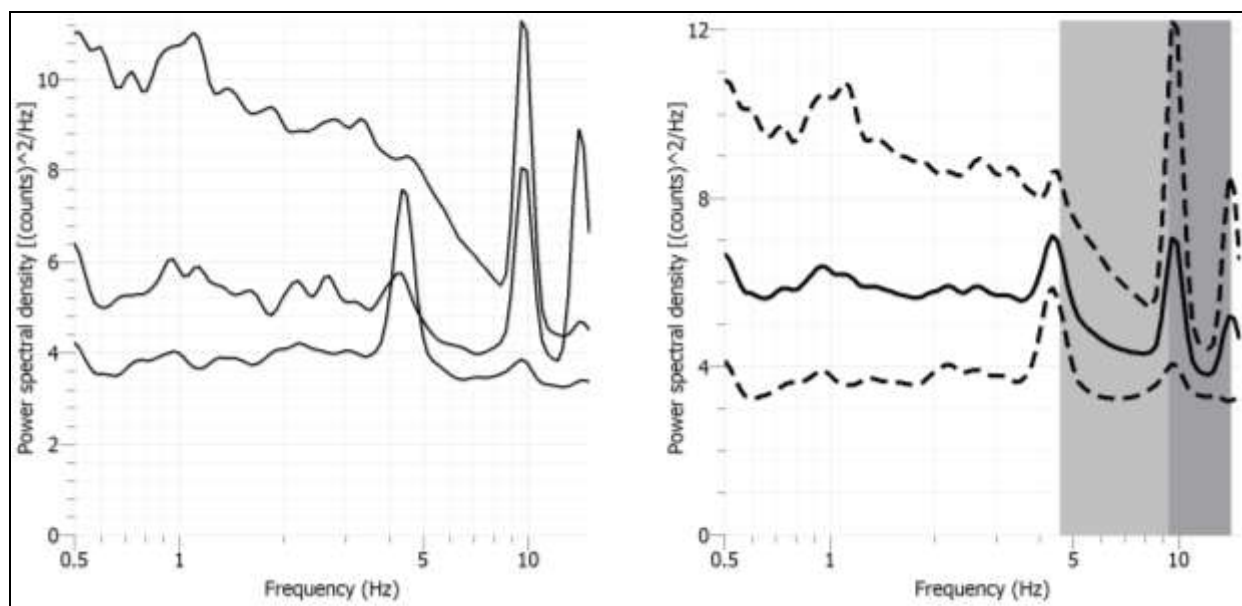


**Spettro delle curve rispettivamente nelle direzioni verticale (Z) ed orizzontali (N ed E)**

I tre grafici sopra riportati rappresentano i singoli spettri nelle tre direzioni di misura, nella visualizzazione con spettro medio (curva nera continua), curve di confidenza (curve nere tratteggiate) ed uno spettro colorato per ogni finestra di analisi.

Nell'immagine sottostante invece il grafico a sinistra raggruppa gli spettri medi di tutte e tre le componenti. Il grafico a destra rappresenta lo spettro medio complessivo e la sua deviazione standard.





Spettro medio delle tre componenti di misura (a sinistra) e spettro medio complessivo ( a destra)

L'esame delle figure sopra riportate evidenzia una buona corrispondenza dei picchi di amplificazione alle diverse frequenze nelle direzioni orizzontali rispetto a quella verticale, ad ulteriore conferma della validità del rapporto H/V calcolato.

Altre informazioni che aiutano ad avere un'idea della bontà dell'indagine HVSR riguardano la stazionarietà del rapporto H/V.

Per stazionarietà si intende la stabilità del rapporto H/V lungo tutta la durata dell'indagine: i singoli rapporti H/V correlati ciascuno ad una finestra temporale dovrebbero essere più simili possibile, specie per quanto riguarda la frequenza a cui si manifesta il picco, o i picchi, di ampiezza del rapporto. Si può avere un'idea della stazionarietà del rapporto osservando le curve colorate, che rappresentano i singoli rapporti H/V, nel grafico delle curve del rapporto H/V definitivo.

## 4.2 Indagini HVSR sulla struttura

Analogamente a quanto fatto per l'indagine HVSR condotta su terreno, sono stati elaborati i dati ottenuti da una prova HVSR condotta sulla diga, al fine di confrontare le frequenze fondamentali di risonanza della struttura con quella del terreno su cui sorge.

L'indagine è stata condotta sul coronamento della diga, posizionando lo strumento di misura in prossimità della posizione di misura accelerometrica POS 4. Le frequenze fondamentali di risonanza della struttura determinata con misura HVSR a stazione singola sono risultate pari a circa:

$$f_1 = 7,0 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 17,3 \text{ Hz}$$

$$f_3 = 34,5 \text{ Hz}$$

$$f_4 = 49,1 \text{ Hz}$$

Si fa notare che la frequenza ottenuta con indagine HVSR sulla diga, tenuto conto anche della complessità e della disomogeneità della struttura, è da ritenersi significativa ai fini del confronto con la frequenza ottenuta con indagine HVSR su terreno.

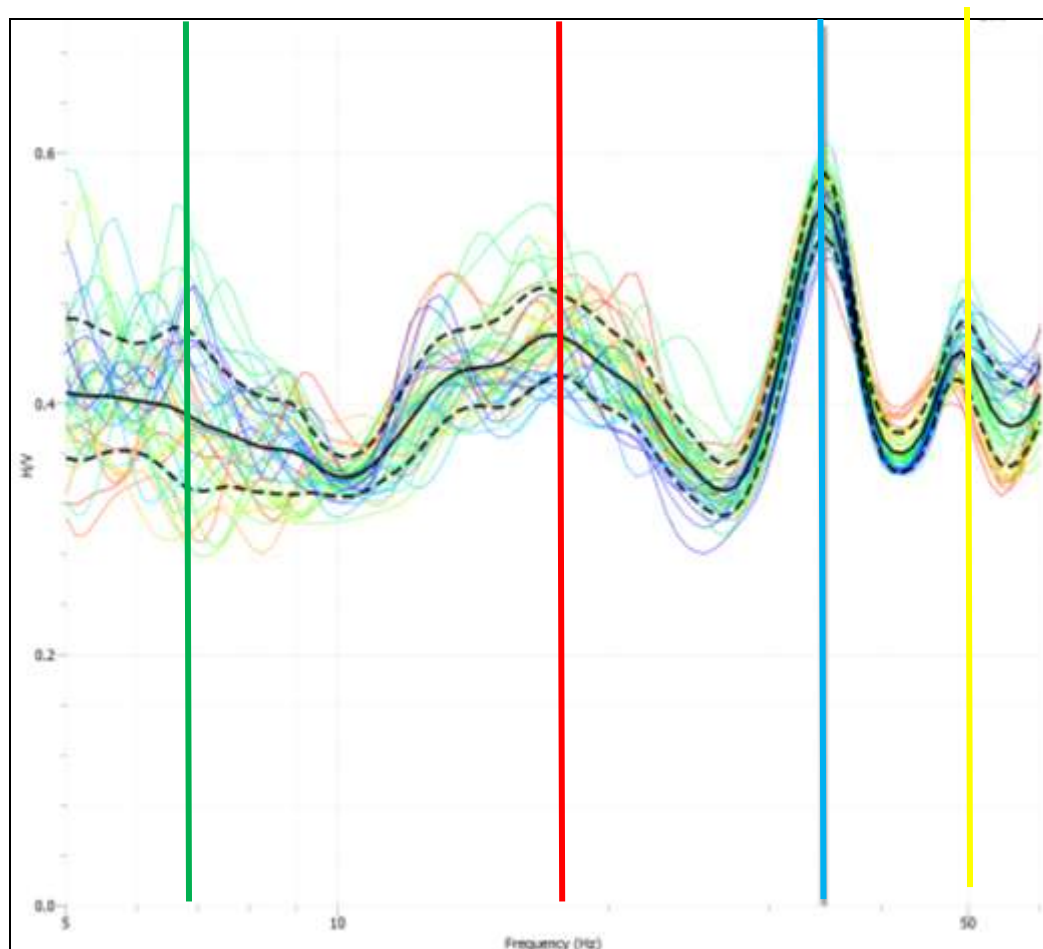


Grafico H/V in funzione della frequenza  
f1 = 7,0 Hz (in verde), f2 = 17,3 Hz (in rosso), f3 = 34,5 Hz (in blu), f4 = 49,1 Hz (in giallo)



**Indagini HVSR condotte sul coronamento della diga**