

S.S. n.21 "della Maddalena"  
 Variante agli abitati di Demonte, Aisone e Vinadio  
 Lotto 1. Variante di Demonte

**PROGETTO DEFINITIVO**

PROGETTAZIONE: ANAS - DIREZIONE PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE LAVORI

I PROGETTISTI:

*ing. Vincenzo Marzi*  
*Ordine Ing. di Bari n.3594*  
*ing. Achille Devitofranceschi*  
*Ordine Ing. di Roma n.19116*  
*geol. Flavio Capozucca*  
*Ordine Geol. del Lazio n.1599*

RESPONSABILE DEL SIA

*arch. Giovanni Magarò*  
*Ordine Arch. di Roma n.16183*

IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE

*geom. Fabio Quondam*

VISTO: IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO :

*ing. Nicolò Canepa*

PROTOCOLLO

DATA

Opere d'arte maggiori  
 Imbocco lato est  
 Relazione di calcolo della galleria artificiale

CODICE PROGETTO			NOME FILE	REVISIONE	SCALA:
<b>PROGETTO</b>	<b>LIV. PROG.</b>	<b>N. PROG.</b>	DPT005_D_1601_T00_GA01_OST_RE02_A.DWG		
DPT005	D	1601	CODICE ELAB. T00GA01OSTRE02	A	—
C					
B					
A	<b>EMISSIONE</b>		<b>Novembre 2017</b>	—	—
REV.	DESCRIZIONE		DATA	REDATTO	VERIFICATO APPROVATO

## INDICE

1	INTRODUZIONE	2
1.1	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	2
1.2	CARATTERISTICHE DEI MATERIALI	2
2	CARATTERISTICHE DELL'OPERA	5
3	INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOTECNICO	8
4	INQUADRAMENTO SISMICO	9
4.1	TIPO DI OPERA: VITA NOMINALE, CLASSE D'USO E PERIODO DI RIFERIMENTO	9
4.1.1	PERICOLOSITÀ SISMICA	10
4.1.2	TEMPO DI RITORNO	10
4.1.3	ACCELERAZIONE MASSIMA AL SUOLO	11
4.2	ACCELERAZIONE MASSIMA AL SITO E COEFFICIENTI SISMICI	12
5	CRITERI DI VERIFICA	13
5.1	AZIONI E RESISTENZE DI PROGETTO	13
6	ANALISI NUMERICHE	15
6.1	METODO DI CALCOLO	15
6.1.1	SEZIONE ANALIZZATA	15
6.1.2	CONDIZIONI AL CONTORNO E INIZIALI	15
6.1.3	LEGGE DI COMPORTAMENTO DEI MATERIALI	15
6.1.4	CARICHI AGGIUNTIVI	16
6.1.5	SIMULAZIONE DELLE FASI ESECUTIVE	16
6.2	RISULTATI E VERIFICHE DEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO	18
6.2.1	RESISTENZE DI CALCOLO	18
6.2.2	SOLLECITAZIONI AGENTI	19
6.2.3	ARMATURA DISPOSTA	21
6.2.4	VERIFICHE ALLO SLU PER SOLLECITAZIONI CHE PROVOCANO TENSIONI NORMALI	21
6.2.5	VERIFICHE ALLO SLE PER SOLLECITAZIONI CHE PROVOCANO TENSIONI NORMALI	24
6.2.6	VERIFICHE ALLO SLU PER SOLLECITAZIONI TAGLIANTI	26

## 1 INTRODUZIONE

La presente relazione fa parte del Progetto Definitivo (cod. Prog. N.TOUP67) della Variante di Demonte e Vinadio (Aisone) – Lotto 1° - variante di Demonte, relativo al *DGACQ 15-14, Accordo Quadro con unico operatore per lotto, ai sensi dell'59, comma 4 del D.Lsd 163/2006. CIG: 6023245B01 – Prot. n. CDG 0138938 – P del 23/12/2016.*

Questo documento descrive il dimensionamento e le verifiche strutturali relative al tratto di galleria artificiale presente all'imbocco lato Est, della galleria.

### 1.1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

La normativa di riferimento è la seguente:

- Decreto Ministero Infrastrutture 14 gennaio 2008 – Nuove norme tecniche per le costruzioni.
- Circolare n.617 del 2 febbraio 2009 del Ministero Infrastrutture e Trasporti – Istruzioni per l'applicazione delle “Nuove norme tecniche per le costruzioni”.

### 1.2 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

I materiali da impiegare per la realizzazione dell'opera sono riportati qui di seguito.

#### CALCESTRUZZO

CLS MAGRO UNI EN 206-1 (2006)

- Classe di resistenza: C12/15

CLS PER OPERE STRUTTURALI UNI EN 206-1 UNI 11104 (2004)

GALLERIA ARTIFICIALE

- Classe di resistenza: C28/35
- Classe di lavorabilità: S4
- Classe di esposizione: XC3
- Diametro massimo inerti: 30mm

Tattamento superfici di estradosso con cls osmotico

CORDOLI

- Classe di resistenza: C25/30
- Classe di lavorabilità: S4
- Classe di esposizione: XC2
- Diametro massimo inerti: 25mm

CLS PROIETTATO

- Destinazione d'uso UNI 10834: temporaneo strutturale (TS)

- Classe di resistenza: C25/30
- Resistenza media su carote  $h/\phi = 1$  a 48h: 13N/mm<sup>2</sup>

#### ACCIAIO

##### ACCIAIO PER ARMATURA CLS

- B450C
- tensione caratteristica a rottura,  $f_{tk}$ : 540MPa
- tensione caratteristica di snervamento,  $f_{yk}$ : 450MPa

##### RETE ELETTROSALDATA

- Tensione caratteristica di snervamento,  $f_{yk}$ : 390MPa

##### PROFILATI E TUBI: S355 J0 (UNI EN 10025)

- Tensione caratteristica di snervamento,  $f_{yk}$ : 355MPa

##### ACCIAIO ARMONICO STABILIZZATO PER TREFOLI Ø0.6"

- Tensione caratteristica di rottura,  $f_{ptk}$ : 1960MPa
- Tensione caratteristica all'1% di deformazioni totali,  $f_{p(1)k}$ : 1670MPa
- Allungamento sotto carico massimo >3.5%

#### MISCELE CEMENTIZIE

##### PER CEMENTAZIONE MICROPALI

- Classe di resistenza cls: C20/25
- Rapporto a/c: 0.5
- Additivo fluidificante e antiritiro

##### PER INIEZIONI TIRANTI

- Classe di resistenza cls: C20/25
- Resistenza a compressione  $R_{ck}$  (a 3gg) > 25MPa
- Rapporto a/c: 0.5
- Additivo fluidificante e antiritiro

##### PER CONSOLIDAMENTI

- Classe di resistenza cls: C20/25
- Rapporto a/c: 0.8
- Bentonite: 2% sul peso del cemento

#### MANUFATTI PREFABBRICATI

##### CANALETTE E COPERTINE

- C.A.V.  $R_{ck} > 30\text{MPa}$  Classe B 125
- Armatura in barre d'acciaio: B450C,
  - o tensione caratteristica a rottura,  $f_{tk}$ : 540MPa
  - o tensione caratteristica di snervamento,  $f_{yk}$ : 430MPa
- R.E.S.: tensione caratteristica di snervamento,  $f_{yk}$ : 390MPa

#### RIEMPIMENTI ED OPERE IN CLS NON ARMATO

##### RIVESTIMENTO COLLETTORI

- Classe di resistenza cls: C12/15

#### DRENAGGI

##### TUBI IN PVC CORRUGATO

- Diametro nominale: Dn  $\varnothing 90\text{mm}$  micro fessurato SN4

#### CORDOLINO BENTONITICO

- Dimensione 20x25mm
- Espansione a contatto con acqua: 6 volte il volume iniziale minimo
- Pressione di rigonfiamento dopo 48h:  $> 600\text{kPa}$

## 2 CARATTERISTICHE DELL'OPERA

La galleria artificiale all'imbocco Est si sviluppa da progressiva 2+523.314 a progressiva 2+553.31, per una lunghezza complessiva di circa 30m.

Partendo dalla progressiva di fine galleria naturale (pk 2+523.314), la galleria artificiale è costituita da una tratta di lunghezza 3.6m in sottodima, segue una tratta di 22.4m in sezione corrente ed infine il portale di lunghezza 4m.

Nella tabella seguente si riportano le progressive di inizio e fine delle diverse sezioni che compongono l'intera tratta in artificiale.

Sottodima	dal km 2+523.314	al km 2+526.91	L=3.6m
Sezione corrente	dal km 2+526.91	al km 2+549.31	L=22.4m
Portale	dal km 2+549.31	al km 2+553.31	L=4.0m

Le successive figure riportano la planimetria dell'imbocco Est e il profilo longitudinale della galleria artificiale.

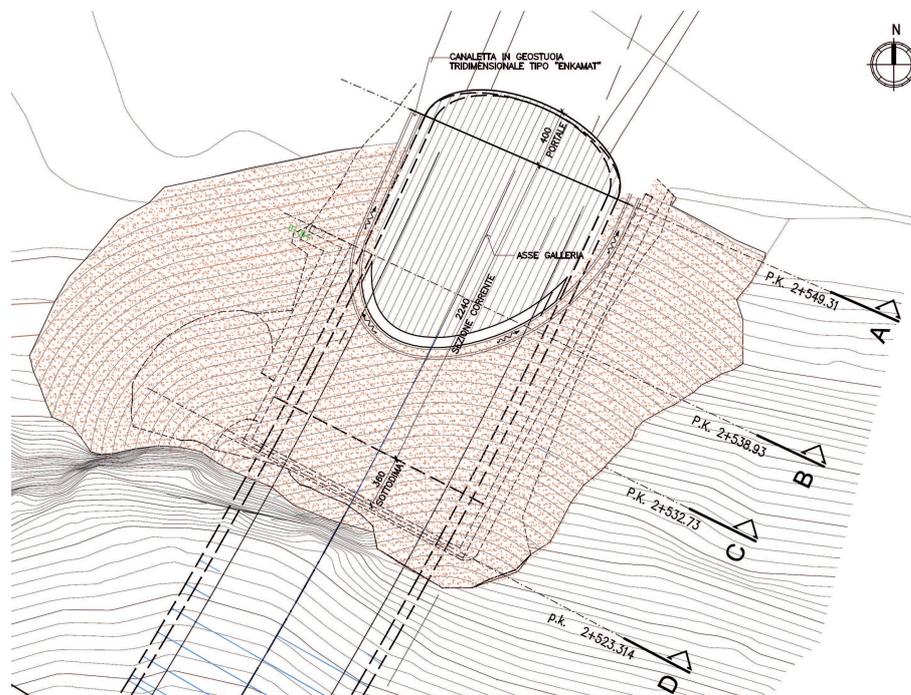


Figura 1: planimetria dell'imbocco Est

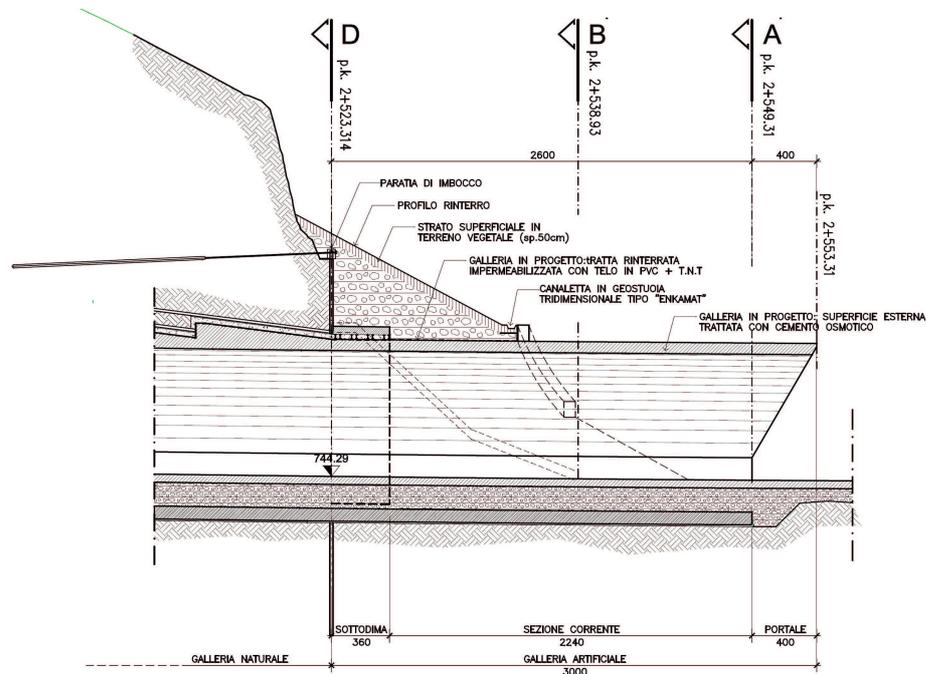


Figura 2: imbocco Est – profilo longitudinale della galleria artificiale

Di seguito si riportano le carpenterie delle sezioni tipo che costituiscono la tratta in artificiale.

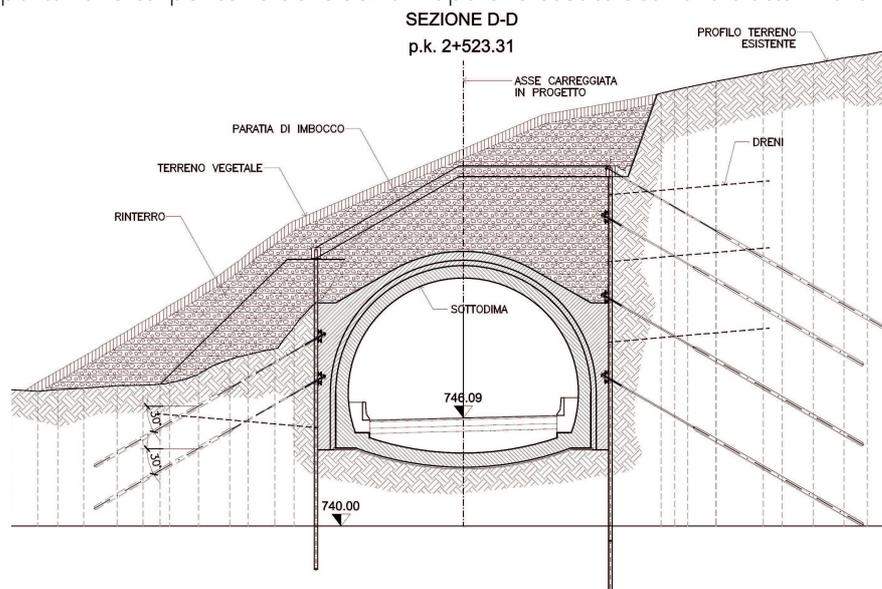


Figura 3: sistemazione definitiva dell'imbocco e carpenteria della sezione sottodima

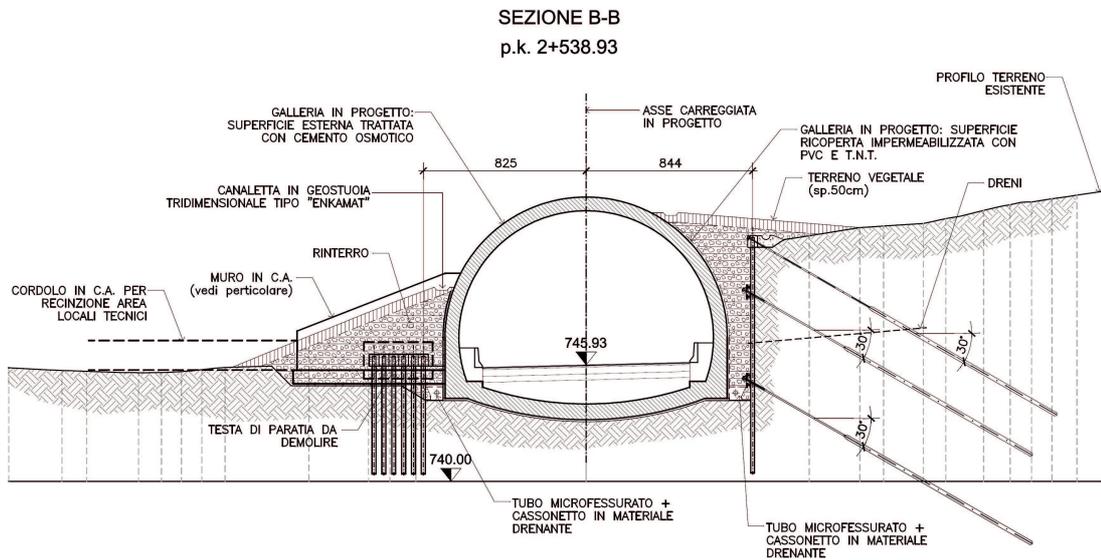


Figura 4: carpenteria sezione corrente

### 3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOTECNICO

Nella zona dell'imbocco Est, dove si sviluppa il tratto in artificiale della galleria, vi è la presenza, in superficie, di detrito di versante (DR), al di sotto del quale l'ammasso roccioso è costituito da metacalcari (UGm1) e più in profondità da carnioli litoidi (UGm2).

Nella tabella seguente si riassumono i parametri geotecnici dell'ammasso roccioso.

Tabella 1: parametri geotecnici utilizzati nelle analisi

Litotipo	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	E (MPa)	$\nu$ (-)
UGm1	24÷26	85÷225	42÷ <b>59</b>	1500÷ <b>1600</b>	0.25÷0.27
UGm2	22÷26	175÷245	39÷ <b>44</b>	1500÷ <b>2100</b>	0.25÷0.29
UGm3	22÷26	45÷190	34÷ <b>54</b>	500÷ <b>1200</b>	0.25÷0.29
UGm_i	14÷22	8÷15	25÷ <b>29</b>	50÷100	0.3÷0.4

dove:

- $\gamma$  peso di volume
- $\phi'$  angolo d'attrito efficace
- c' coesione efficace
- E Modulo di Young
- $\nu$  rapporto di Poisson

Tabella 2: parametri geotecnici del terreno di ritombamento e del detrito di versante

Terreno	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	E (MPa)	$\nu$ (-)
Ritombamento	19	0	35	30	0.3÷0.4
DR	19÷22	0	35÷ <b>40</b>	50÷100	0.3÷0.4

dove:

- $\gamma$  peso di volume
- $\phi'$  angolo d'attrito efficace
- c' coesione efficace
- E Modulo di Young
- $\nu$  rapporto di Poisson

## 4 INQUADRAMENTO SISMICO

### 4.1 TIPO DI OPERA: VITA NOMINALE, CLASSE D'USO E PERIODO DI RIFERIMENTO

La vita nominale dell'opera  $V_N$  è intesa come il numero di anni nei quali la struttura deve poter essere usata per lo scopo al quale è destinata. Nella tabella seguente si riportano i valori della vita nominale di un'opera in funzione delle caratteristiche della stessa.

Tabella 3: vita nominale per diversi tipi di opera.

Tipi di costruzione		Vita nominale $V_N$ [anni]
1	Opere provvisorie	$\leq 10$
2	Opere ordinarie	$\geq 50$
3	Grandi opere	$\geq 100$

Per il caso in esame si fa riferimento a:

- Opere ordinarie: opere di tipo 3 con vita nominale  $\geq 100$ anni.

In presenza di azioni sismiche, in relazione alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso.

Tabella 4: valori del coefficiente d'uso  $C_U$

Classe d'uso	I	II	III	IV
Coefficiente $C_U$	0.7	1.0	1.5	2.0

Nel caso in esame si fa riferimento alla classe d'uso IV cui è associato un coefficiente pari a 2.0.

Le azioni sismiche su ciascuna costruzione sono valutate in relazione ad un periodo di riferimento  $V_R$  definito come prodotto tra la vita nominale ed il coefficiente d'uso.

$$V_R = V_N \cdot C_U$$

Per il caso in esame si ottiene:

- $V_R = 200$  anni

#### 4.1.1 PERICOLOSITÀ SISMICA

La pericolosità sismica si definisce, per il caso in oggetto, in termini di accelerazione orizzontale massima attesa  $a_g$  in condizioni di campo libero, su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale, in considerazione di prefissate probabilità di eccedenza  $P_{VR}$  nel periodo di riferimento  $V_R$ .

#### 4.1.2 TEMPO DI RITORNO

Il valore di progetto dell'accelerazione  $a_g$  viene definito in funzione della "probabilità di superamento" in un dato "tempo di ritorno". Queste due grandezze sono correlate tra loro:

$$T_R = -V_R / \ln(1 - P_{VR})$$

dove:

$T_R$  è il tempo di ritorno

$V_R$  il periodo di riferimento dell'opera

$P_{VR}$  è la probabilità di superamento nel periodo di riferimento

Le probabilità di superamento nel periodo di riferimento  $P_{VR}$ , per ciascuno degli stati limite considerati, sono riportate nella tabella seguente:

Tabella 5: probabilità di superamento  $P_{VR}$  al variare dello stato limite considerato

Stati limite	$P_{VR}$
Stati limite di servizio SLO	81%
SLD	63%
Stati limite ultimi SLV	10%
SLC	5%

Per la struttura in oggetto le verifiche in condizioni sismiche saranno condotte facendo riferimento allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV).

**Nella tabella seguente si riportano i valori della probabilità di superamento e del rispettivo tempo di ritorno relativo alla vita utile dell'opera.**

Tabella 6: probabilità di superamento  $P_{VR}$  al variare dello stato limite considerato

Tipo di opera	$V_N$ [anni]	$C_u$	$V_R$	$P_{VR}$	$T_R$
3	100	2	200	10%	1898

#### 4.1.3 ACCELERAZIONE MASSIMA AL SUOLO

La definizione dell'azione sismica di progetto, nel DM 14/01/2008, non si basa sulla classificazione sismica del territorio. I parametri necessari per la determinazione dell'azione sismica di progetto sono calcolati direttamente per il sito in esame, utilizzando le informazioni disponibili nel reticolo di riferimento (Allegato B del DM 14/01/2008).

**E' stata presa come riferimento per l'opera in esame la zona nel comune di Demonte.**

I valori al sito sono ottenuti mediando i parametri spettrali ( $a_g$ ,  $F_0$ ,  $T^*_c$ ) dei 4 nodi più prossimi al sito stesso mediante la seguente formula:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{P_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i}}$$

dove:

P valore del parametro nel sito in esame;

$P_i$  valore del parametro nell'i-esimo punto della maglia contenente il sito in esame;

$d_i$  di distanza del sito in esame dall'i-esimo punto della maglia.

Qualora nel reticolo non siano riportati i valori dei parametri spettrali per il tempo di ritorno richiesto, è possibile ricavare i parametri di interesse mediante interpolazione tra i valori dei parametri corrispondenti ai due tempi di ritorno che comprendono il tempo di ritorno voluto:

$$\log(P) = \log(P_1) + \log(P_2/P_1) \cdot \log(T_R/T_{R1}) \cdot [\log(T_{R2}/T_{R1})]^{-1}$$

dove:

$T_R$  è il periodo di ritorno richiesto corrispondente al periodo di riferimento ed alla probabilità di superamento nel periodo di riferimento per lo stato limite considerato

$T_{R1}$  e  $T_{R2}$  sono i periodi di ritorno più prossimi a  $T_R$  per i quali si dispone del generico parametro P.

Nella tabella seguente si riportano i valori dell'accelerazione massima su suolo roccioso ( $a_g$ ) e dei parametri spettrali ( $F_0$ ,  $T^*_c$ ) per lo SLV e il rispettivo tempo di ritorno.

Tabella 7: accelerazione massima al suolo e parametri sismici

Stato limite	Opera	Prob. di superamento	$T_r$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_0$ [-]	$T^*_c$ [sec]
--------------	-------	----------------------	--------------	-----------	-----------	---------------

SLV	3	10%	1898	0.239	2.522	0.309
-----	---	-----	------	-------	-------	-------

Gli effetti di amplificazione locale dovuti alla stratigrafia e alla conformazione topografica sono tenuti in conto mediante i parametri  $S_S$  ed  $S_T$ .

Cautelativamente, è stata considerata la categoria di sottosuolo C; in considerazione dei parametri  $a_g$  ed  $F_0$  definiti nella Tabella 3.5, si ottiene  $S_S=1.34$  (DM 14/01/2008 Tab.3.2.V).

Per tener conto delle condizioni topografiche si utilizzano i valori del coefficiente topografico  $S_T$  riportati nella Tab.3.2.VI del DM 14/01/2008. Per il caso in esame si assume  $S_T=1.0$ .

#### 4.2 ACCELERAZIONE MASSIMA AL SITO E COEFFICIENTI SISMICI

L'accelerazione massima orizzontale al sito ( $a_{max}$ ) è calcolata come prodotto dell'accelerazione su suolo roccioso e dei fattori di amplificazione:

$$a_{max}=a_g \cdot S_S \cdot S_T$$

Per il caso in esame l'accelerazione massima orizzontale al sito per lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) risulta pari a:

$$a_{max}=0.239 \cdot 1.34 \cdot 1=0.320g$$

I coefficienti sismici orizzontale e verticale utilizzati nelle presenti analisi sono i seguenti:

$$k_h=0.320$$

$$k_v=0.160.$$

## 5 CRITERI DI VERIFICA

Nel presente capitolo sono descritti i metodi, le assunzioni di calcolo ed i parametri di progetto adottati per le verifiche strutturali delle gallerie artificiali. Le verifiche sono state condotte secondo il metodo degli stati limite. Le verifiche agli stati limite prevedono un approccio di tipo semiprobabilistico in base al quale le azioni e le resistenze di progetto sono definite sulla base dei valori caratteristici applicando i coefficienti parziali di seguito definiti:

Azioni:  $F_d = (F_k \times \Psi) \times \gamma_F$

Proprietà del terreno:  $X_d = X_k / \gamma_M$

Resistenza del terreno:  $R_d = R_k / \gamma_R$

Dove:

F: indica genericamente un'azione,

$\Psi$ : indica un fattore  $\leq 1.0$  che è definito nell'ambito della combinazione di carico;

X: indica genericamente un parametro di resistenza del terreno;

R: indica genericamente la resistenza limite calcolata;

$\gamma_F, \gamma_M, \gamma_R$ : indicano i coefficienti parziali.

Una volta definiti i parametri di progetto si verifica che valga la relazione:

$$E_d \leq R_d$$

Dove:

$$E_d = F_k \times \Psi \times \gamma_F \text{ [effetti delle azioni],}$$

$$R_d = 1 / \gamma_R \times R_k \text{ (} F_k \times \Psi \times \gamma_F, X_k / \gamma_M \text{) [resistenza del terreno].}$$

### 5.1 AZIONI E RESISTENZE DI PROGETTO

I coefficienti parziali  $\gamma_F$  che si riferiscono alle azioni sono indicati nella tabella seguente.

Tabella 8: coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni.

Carichi	Effetto	Coefficiente parziale	(A1)	(A2)
		$\gamma_F$ (o $\gamma_E$ )		
Permanenti	Favorevole	$\gamma_G$	1.0	1.0
	Sfavorevole		1.3	1.0
Variabili	Favorevole	$\gamma_Q$	0	0
	Sfavorevole		1.5	1.3

I coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno sono riportati nella tabella seguente.

Tabella 9: coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno.

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale $\gamma_M$	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan\phi'_k$	$\gamma_{\phi'}$	1.0	1.25
Coesione efficace	$c'_k$	$\gamma_{c'}$	1.0	1.25
Resistenza non drenata	$c_{uk}$	$\gamma_{c_u}$	1.0	1.4
Peso dell'unità di volume	$\gamma$	$\gamma_{\gamma}$	1.0	1.0

## 6 ANALISI NUMERICHE

### 6.1 METODO DI CALCOLO

Il metodo di calcolo impiegato è quello degli elementi finiti (FEM) implementato tramite il codice commerciale RS2, ver.9.020, prodotto dalla Rocscience Inc®.

RS2 è un programma agli elementi finiti che consente di svolgere analisi bi-dimensionali in campo elasto-plastico per la valutazione dello stato di sforzo e di spostamento al contorno di opere geotecniche e gallerie, e di analizzare la risposta tensio-deformativa dei sostegni installati a supporto degli scavi.

#### 6.1.1 SEZIONE ANALIZZATA

Le analisi sono state condotte per le condizioni di massima copertura; le caratteristiche della sezione analizzata sono riportate nella tabella seguente.

Tabella 10: sezione analizzata

Imbocco	Galleria Artificiale	Copertura (*)
	Sezione sotto dima	6.6m
Est	Spessore minimo calotta: 70cm	Riempimento: terreno di riporto
	Spessore minimo soletta: 80cm	

*\*la copertura è misurata dall'estradosso del rivestimento della galleria artificiale*

#### 6.1.2 CONDIZIONI AL CONTORNO E INIZIALI

Il modello numerico è realizzato tramite una maglia d'elementi triangolari i cui confini sono stati collocati ad una distanza dalla sezione della galleria tale da non risentire degli effetti di bordo. Il bordo superiore del modello coincide con il profilo topografico del terreno.

Lo stato tensionale iniziale è stato supposto litostatico con un coefficiente di spinta a riposo,  $k_0$  pari a  $1 - \sin\phi$ . Lo stato tensionale geostatico è stato riprodotto nel modello tramite la fase 1, applicando un campo di sforzo di tipo gravitazionale.

#### 6.1.3 LEGGE DI COMPORTAMENTO DEI MATERIALI

La legge di comportamento (criterio di rottura di Mohr-Coulomb) degli elementi che simulano il terreno è stata assunta di tipo elasto-plastico ideale (valori di picco coincidenti con i valori residui).

Le opere di presidio sono modellizzate tramite elementi monodimensionali di tipo *liner* con comportamento elastico e spessore corrispondente alla loro rigidità. Gli ancoraggi sono stati introdotti nel mo-

dello tramite elementi *tieback* e caratteristiche corrispondenti ai tiranti a trefoli. A lungo termine le opere di presidio, di tipo provvisorio, vengono disattivate.

Il rivestimento definitivo è simulato tramite elementi triangolari; la legge di comportamento degli elementi del rivestimento è stata assunta di tipo elastico lineare.

#### 6.1.4 CARICHI AGGIUNTIVI

##### Evento sismico

Ai fini delle verifiche strutturali del rivestimento definitivo, si è anche effettuata un'analisi sismica di tipo pseudostatico. Tale analisi comporta la definizione del coefficiente sismico orizzontale e verticale rispettivamente pari a:

$$k_h=0.320$$

$$k_v=0.160.$$

#### 6.1.5 SIMULAZIONE DELLE FASI ESECUTIVE

Le fasi esecutive comprendono la fase geostatica, le fasi di messa in opera delle opere di sostegno agli scavi (paratie e tiranti), lo scavo fino alla quota di imposta dell'arco rovescio, il getto del rivestimento definitivo, la costruzione della dima, il ritombamento di entrambe le canne, la disattivazione delle opere di sostegno agli scavi e l'ultima fase prevede un'analisi pseudo statica che simula l'evento sismico.

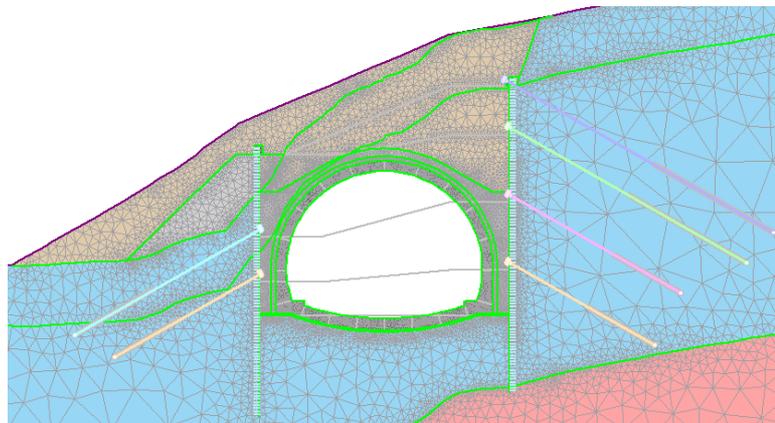
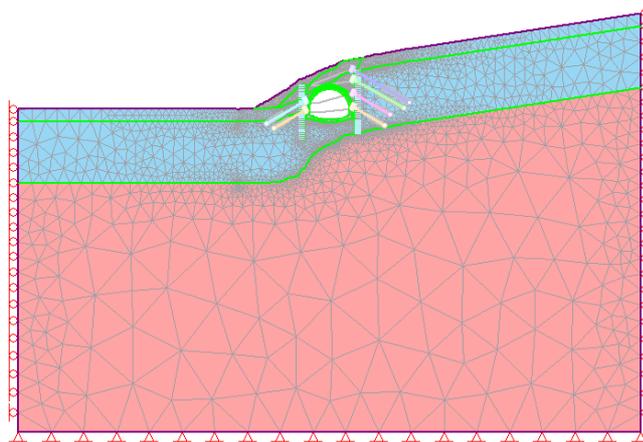
Di seguito si riportano le fasi esecutive impiegate nei modelli di calcolo

Tabella 11: sintesi delle fasi utilizzate per il modello di calcolo della galleria artificiale – imbocco Est

Fase	Descrizione
1	Condizione geostatica
2	Realizzazione della protesi in misto cementato
3	Sbancamento fino alla quota di testa delle paratie di micropali
4	Installazione delle paratie e realizzazione dei cordoli
5	Installazione del primo ordine di tiranti, lato monte
6-11	Fasi di scavo e successiva installazione dei tiranti (ordini 2, 3 e 4, lato monte e ordini 1 e 2, lato valle)
12	Completamento dello scavo
13	Getto del rivestimento della galleria artificiale
14	Getto della dima
15-16	Ritombamento
17	Situazione a lungo termine (disattivazione delle opere di presidio e decadimento delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo della dima)
18	Simulazione dell'evento sismico

Tabella 12: modello di calcolo adottato – imbocco Est

Gruppo geotecnico principale: UGm1		
Parametri geotecnici	Angolo di attrito, $\varphi'$	44°
	Coesione, $c'$	100kPa
	Modulo di deformabilità, E	1500MPa
	Peso specifico, $\gamma$	24kN/m <sup>3</sup>
Stato tensionale	$\sigma_h/\sigma_v = 0.305$	
Sisma	$k_h = 0.320, k_v = 0.160$	
Numero di fasi costruttive simulate	18, software: RS2, ver.9.020 (Rocscience Inc®)	



## 6.2 RISULTATI E VERIFICHE DEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO

Nel presente paragrafo si illustrano i criteri generali di verifica di resistenza del rivestimento definitivo della sezione analizzata. Nei successivi capitoli si sintetizzeranno le verifiche tramite tabelle esplicative. Le verifiche sono state eseguite allo stato limite ultimo (SLU).

### 6.2.1 RESISTENZE DI CALCOLO

I valori di calcolo delle resistenze dei materiali si ricavano dividendo ciascun valore caratteristico per il fattore di sicurezza parziale  $\gamma_m$  specifico del materiale considerato (vedi tabella seguente).

I valori di calcolo delle resistenze dei materiali si ricavano dividendo ciascun valore caratteristico per il fattore di sicurezza parziale  $\gamma_m$  specifico del materiale considerato.

Tabella 13: fattore di sicurezza parziale dei materiali.

Stato limite	Acciaio, $\gamma_s$	Calcestruzzo, $\gamma_c$
SLU	1.15	1.50

Di seguito si riportano i valori delle resistenze di calcolo, ottenute come rapporto tra la resistenza caratteristica ed il coefficiente  $\gamma_m$ :  $f_d = f_k/\gamma_m$

Tabella 14: tensione di snervamento di calcolo.

Acciaio	$f_{yd}$ [MPa]
B450C	391

Tabella 15: resistenze di calcolo calcestruzzo.

Classe di calcestruzzo	$f_{cd}$ [MPa]	$\sigma_{cu}$ [MPa]	$f_{ctd}$ [MPa]	$f_{cfd}$ [MPa]
C28/35	18.67	15.87	1.29	1.55

dove:

$f_{cd}$  = resistenza a compressione cilindrica di calcolo,

$\sigma_{cu}$  = resistenza a compressione di calcolo per effetto dei carichi di lunga durata ( $=0.85*f_{cd}$  cls armato)

$f_{ctd}$  = resistenza a trazione di calcolo,

$f_{cfd}$  = resistenza a trazione per flessione di calcolo ( $=1.2*f_{ctd}$ ).

## 6.2.2 SOLLECITAZIONI AGENTI

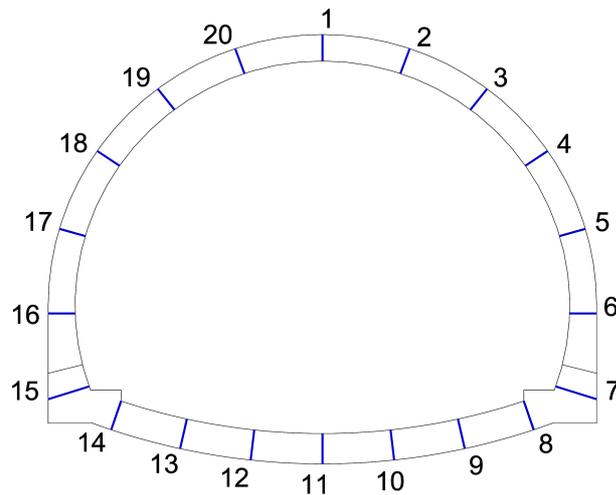
Nella tabella seguente si riportano, per le condizioni più gravose, le sollecitazioni agenti sul rivestimento definitivo della galleria artificiale. Si effettuano quindi le verifiche di resistenza del rivestimento in condizioni di esercizio (SLE) e a stato limite ultimo (SLU).

Tabella 16: G.A. imbocco Est – sollecitazioni agenti sul rivestimento definitivo – valori caratteristici (N>0 se di compressione, M>0 se tende le fibre in intradosso)

Sezione	Spessore [cm]	Condizione di carico	N [kN/m]	M [kNm/m]	T [kN/m]
1	70	Ritombamento	70.8	91.8	21.4
		Lungo termine	94.4	84.8	24.9
		Sisma	381.2	22.7	176.5
2	70	Ritombamento	76.4	73.1	61.7
		Lungo termine	97.5	73.5	55.8
		Sisma	216.5	239.7	72.4
3	70	Ritombamento	486.2	-3.5	113.1
		Lungo termine	505.1	3.7	110.8
		Sisma	577.2	310.7	87.2
4	70	Ritombamento	872.8	-73.9	31.7
		Lungo termine	892.8	-67.2	35.4
		Sisma	944.9	222.5	117.6
5	70	Ritombamento	1013.3	-86.2	14.4
		Lungo termine	1050.6	-92.6	7.3
		Sisma	1164.8	-6.7	173.9
6	71	Ritombamento	842.0	-25.7	108.4
		Lungo termine	922.5	-28.9	106.5
		Sisma	1213.3	-373.7	175.2
7	112	Ritombamento	599.6	24.5	182.9
		Lungo termine	767.0	10.2	219.7
		Sisma	1325.0	-1062.7	469.1
8	80	Ritombamento	-98.5	-0.7	112.5
		Lungo termine	-67.7	-5.4	146.5
		Sisma	1487.7	-74.6	223.8
9	80	Ritombamento	-242.0	48.1	26.1
		Lungo termine	-221.4	55.7	24.8
		Sisma	1570.2	35.4	29.1

Sezione	Spessore [cm]	Condizione di carico	N [kN/m]	M [kNm/m]	T [kN/m]
10	80	Ritombamento	-276.9	42.8	3.0
		Lungo termine	-249.9	46.0	5.3
		Sisma	1514.3	29.7	14.7
11	80	Ritombamento	-276.9	35.3	1.2
		Lungo termine	-249.4	38.0	0.8
		Sisma	1371.2	7.7	41.5
12	80	Ritombamento	-257.1	41.6	6.7
		Lungo termine	-238.5	46.7	3.2
		Sisma	1142.9	33.7	99.8
13	80	Ritombamento	-211.0	41.0	24.2
		Lungo termine	-200.2	50.5	24.1
		Sisma	842.6	127.4	136.7
14	80	Ritombamento	-73.1	7.9	83.8
		Lungo termine	-45.8	1.2	122.7
		Sisma	667.2	219.8	134.6
15	112	Ritombamento	522.1	51.1	147.2
		Lungo termine	651.6	7.1	174.6
		Sisma	969.2	408.3	231.7
16	71	Ritombamento	716.7	-21.8	102.1
		Lungo termine	781.0	-28.0	85.9
		Sisma	1099.3	198.2	176.3
17	70	Ritombamento	898.2	-84.8	26.5
		Lungo termine	928.0	-78.8	18.0
		Sisma	1354.2	-43.8	148.8
18	70	Ritombamento	829.7	-72.2	7.5
		Lungo termine	853.7	-63.0	7.5
		Sisma	1349.0	-230.0	139.7
19	70	Ritombamento	670.0	-18.4	73.3
		Lungo termine	696.1	-17.9	66.2
		Sisma	1294.1	-318.2	44.7
20	70	Ritombamento	280.0	56.6	79.0
		Lungo termine	292.9	43.0	76.1
		Sisma	915.0	-187.0	144.5

Sezione	Spessore [cm]	Condizione di carico	N [kN/m]	M [kNm/m]	T [kN/m]
---------	---------------	----------------------	----------	-----------	----------



### 6.2.3 ARMATURA DISPOSTA

Nella tabella seguente si riporta l'armatura disposta per la sezione della galleria artificiale.

Tabella 17: armatura prevista per la galleria artificiale lato Est

Posizione	Armatura flettente intradosso	Armatura flettente estradosso	Armatura a taglio	Copriferro [cm]	$R_{ck}$ calcestruzzo [MPa]
Calotta	5Ø18	5Ø18	1Ø14/50/20	8	35
Piedritto	5Ø18	5Ø18	1Ø14/50/20	8	35
Muretta	5Ø18	5Ø18	1Ø14/50/20	8	35
Arco rovescio	5Ø18	5Ø18	1Ø14/50/20	8	35

### 6.2.4 VERIFICHE ALLO SLU PER SOLLECITAZIONI CHE PROVOCANO TENSIONI NORMALI

Di seguito si riportano le verifiche strutturali allo SLU. Per le verifiche allo stato limite ultimo si verifica che il fattore di sicurezza  $FS_u$ , definito come  $M_u/M$ , sia maggiore di 1.30 per le verifiche statiche e maggiore di 1.0 per le verifiche dinamiche (evento sismico).

Tabella 18: G.A. imbocco Est – verifica S.L.U. pressoflessione (N+ compressione; M+ fibre tese intradosso)

Sezione	Spessore [cm]	Posizione	Condizione di carico	Armatura di-sposta	N [kN/m]	M [kNm/m]	M <sub>u</sub> [kNm/m]	F <sub>Su</sub>
1	70	Calotta	Ritombamento	5Ø18:i 5Ø18:e	70.8	91.8	321.0	3.50
			Lungo termine		94.4	84.8	328.0	3.90
			Sisma		381.2	22.7	412.7	>5
2	70	Calotta	Ritombamento	5Ø18:i 5Ø18:e	76.4	73.1	322.6	4.14
			Lungo termine		97.5	73.5	329.0	4.48
			Sisma		216.5	239.7	364.4	1.52
3	70	Calotta	Ritombamento	5Ø18:i 5Ø18:e	486.2	-3.5	-87.9	>5
			Lungo termine		505.1	3.7	89.4	>5
			Sisma		577.2	310.7	469.3	1.51
4	70	Calotta	Ritombamento	5Ø18:i 5Ø18:e	872.8	-73.9	-552.1	>5
			Lungo termine		892.8	-67.2	-557.6	>5
			Sisma		944.9	222.5	571.9	2.57
5	70	Calotta	Ritombamento	5Ø18:i 5Ø18:e	1013.3	-86.2	-590.4	>5
			Lungo termine		1050.6	-92.6	-600.5	>5
			Sisma		1164.8	-6.7	-70.6	>5
6	71	Piedritto	Ritombamento	5Ø18:i 5Ø18:e	842.0	-25.7	-347.7	>5
			Lungo termine		922.5	-28.9	-355.8	>5
			Sisma		1213.3	-373.7	-654.6	1.75
7	112	Muretta	Ritombamento	5Ø18:i 5Ø18:e	599.6	24.5	725.9	>5
			Lungo termine		767.0	10.2	251.2	>5
			Sisma		1325.0	-1062.7	-1150.1	1.08
8	80	Arco rovescio	Ritombamento	5Ø18:i 5Ø18:e	-98.5	-0.7	-6.9	>5
			Lungo termine		-67.7	-5.4	-63.6	>5
			Sisma		1487.7	-74.6	-608.0	>5
9	80	Arco Rovescio	Ritombamento	5Ø18:i 5Ø18:e	-242.0	48.1	122.1	2.54
			Lungo termine		-221.4	55.7	140.2	2.52
			Sisma		1570.2	35.4	298.0	>5
10	80	Arco Rovescio	Ritombamento	5Ø18:i 5Ø18:e	-276.9	42.8	103.8	2.42
			Lungo termine		-249.9	46.0	116.4	2.53
			Sisma		1514.3	29.7	261.5	>5
11	80	Arco Rovescio	Ritombamento	5Ø18:i 5Ø18:e	-276.9	35.3	90.8	2.57
			Lungo termine		-249.4	38.0	102.8	2.70

Sezione	Spessore [cm]	Posizione	Condizione di carico	Armatura di-sposta	N [kN/m]	M [kNm/m]	M <sub>u</sub> [kNm/m]	F <sub>Su</sub>
			Sisma		1371.2	7.7	78.2	>5
12	80	Arco Rovescio	Ritombamento	5Ø18:i	-257.1	41.6	107.0	3.40
			Lungo termine	5Ø18:e	-238.5	46.7	121.0	2.60
			Sisma		1142.9	33.7	381.2	>5
13	80	Arco Rovescio	Ritombamento	5Ø18:i	-211.0	41.0	120.4	2.94
			Lungo termine	5Ø18:e	-200.2	50.5	140.5	2.80
			Sisma		842.6	127.4	633.8	4.97
14	80	Arco rovescio	Ritombamento	5Ø18:i	-73.1	7.9	80.4	>5
			Lungo termine	5Ø18:e	-45.8	1.2	24.1	>5
			Sisma		667.2	219.8	576.0	2.62
15	112	Muretta	Ritombamento	5Ø18:i	522.1	51.1	765.0	>5
			Lungo termine	5Ø18:e	651.6	7.1	207.0	>5
			Sisma		969.2	408.3	982.1	2.40
16	71	Piedritto	Ritombamento	5Ø18:i	716.7	-21.8	-346.6	>5
			Lungo termine	5Ø18:e	781.0	-28.0	-400.8	>5
			Sisma		1099.3	198.2	623.8	3.15
17	70	Calotta	Ritombamento	5Ø18:i	898.2	-84.8	559.1	>5
			Lungo termine	5Ø18:e	928.0	-78.8	-567.3	>5
			Sisma		1354.2	-43.8	-360.7	>5
18	70	Calotta	Ritombamento	5Ø18:i	829.7	-72.2	-540.2	>5
			Lungo termine	5Ø18:e	853.7	-63.0	-546.9	>5
			Sisma		1349.0	-230.0	-679.2	2.95
19	70	Calotta	Ritombamento	5Ø18:i	670.0	-18.4	-311.7	>5
			Lungo termine	5Ø18:e	696.1	-17.9	-293.7	>5
			Sisma		1294.1	-318.2	-665.0	2.09
20	70	Calotta	Ritombamento	5Ø18:i	280.0	56.6	383.1	>5
			Lungo termine	5Ø18:e	292.9	43.0	387.0	>5
			Sisma		915.0	-187.0	-563.7	3.01

### 6.2.5 VERIFICHE ALLO SLE PER SOLLECITAZIONI CHE PROVOCANO TENSIONI NORMALI

Le verifiche a S.L.E. risultano soddisfatte quando l'ampiezza ridotta delle fessure  $w < 0.3\text{mm}$ , la tensione massima nel calcestruzzo  $\sigma_{c, \max} \leq 0.45f_{ck}$  (13.07MPa per cls classe C28/35) e la tensione massima nell'acciaio  $\sigma_{s, \max} \leq 0.8f_{yk} = 360\text{MPa}$ .

Tabella 19: G.A. imbocco Est – verifica S.L.E. fessurazione (N+ compressione; M+ fibre tese intradosso)

Sezione	Spessore [cm]	Posizione	Condizione di carico	N [kN/m]	M [kNm/m]	$\sigma_{c, \max}$ [Nmm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{s, \max}$ [Nmm <sup>2</sup> ]	M <sub>fess</sub> [kNm/m]	w [mm]
1	70	Calotta	Ritombamento	70.8	91.8	2.23	-98.7	198.1	-
			Lungo termine	94.4	84.8	2.05	-80.5	207.6	-
2	70	Calotta	Ritombamento	76.4	73.1	1.77	-71.2	205.6	-
			Lungo termine	97.5	73.5	1.77	-64.1	214.0	-
3	70	Calotta	Ritombamento	486.2	-3.5	0.70	Compress.	-	-
			Lungo termine	505.1	3.7	0.73	Compress.	-	-
4	70	Calotta	Ritombamento	872.8	-73.9	2.00	Compress.	-	-
			Lungo termine	892.8	-67.2	1.96	Compress.	-	-
5	70	Calotta	Ritombamento	1013.3	-86.2	2.33	Compress.	-	-
			Lungo termine	1050.6	-92.6	2.46	Compress.	-	-
6	71	Piedritto	Ritombamento	842.0	-25.7	1.40	Compress.	-	-
			Lungo termine	922.5	-28.9	1.55	Compress.	-	-
7	112	Muretta	Ritombamento	599.6	24.5	0.63	Compress.	-	-
			Lungo termine	767.0	10.2	0.71	Compress.	-	-
8	80	Arco rovescio	Ritombamento	-98.5	-0.7	2.51	-39.6	-11.3	-
			Lungo termine	-67.7	-5.4	-1.22	-33.2	-85.1	-
9	80	Arco rovescio	Ritombamento	-242.0	48.1	-1.42	-154.2	137.3	-
			Lungo termine	-221.4	55.7	-0.10	-155.4	150.3	-
10	80	Arco rovescio	Ritombamento	-276.9	42.8	-2.87	-161.4	122.8	-
			Lungo termine	-249.9	46.0	-1.84	-154.7	133.0	-
11	80	Arco rovescio	Ritombamento	-276.9	35.3	-3.64	-152.2	111.6	-
			Lungo termine	-249.4	38.0	-2.64	-144.7	122.0	-
12	80	Arco rovescio	Ritombamento	-257.1	41.6	-2.48	-152.1	125.5	-
			Lungo termine	-238.5	46.7	-1.47	-151.1	136.4	-
13	80	Arco rovescio	Ritombamento	-211.0	41.0	-1.33	-133.3	136.0	-
			Lungo termine	-200.2	50.5	-0.08	-140.7	150.4	-
14	80	Arco	Ritombamento	-73.1	7.9	-1.11	-38.4	102.1	-

Sezione	Spessore [cm]	Posizione	Condizione di carico	N [kN/m]	M [kNm/m]	$\sigma_{c,max}$ [Nmm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{s,max}$ [Nmm <sup>2</sup> ]	M <sub>fess</sub> [kNm/m]	w [mm]
		rovescio	Lungo termine	-45.8	1.2	-1.08	-19.5	37.0	-
15	112	Muretta	Ritombamento	522.1	51.1	0.68	Compress.	-	-
			Lungo termine	651.6	7.1	0.59	Compress.	-	-
16	71	Piedritto	Ritombamento	716.7	-21.8	1.19	Compress.	-	-
			Lungo termine	781.0	-28.0	1.35	Compress.	-	-
17	70	Calotta	Ritombamento	898.2	-84.8	2.16	Compress.	-	-
			Lungo termine	928.0	-78.8	2.14	Compress.	-	-
18	70	Calotta	Ritombamento	829.7	-72.2	1.93	Compress.	-	-
			Lungo termine	853.7	-63.0	1.86	Compress.	-	-
19	70	Calotta	Ritombamento	670.0	-18.4	1.11	Compress.	-	-
			Lungo termine	696.1	-17.9	1.14	Compress.	-	-
20	70	Calotta	Ritombamento	280.0	56.6	1.10	-4.50	449.5	-
			Lungo termine	292.9	43.0	0.88	Compress.	-	-

dove:

$\sigma_{c,max}$  = tensione massima nel calcestruzzo (positivo di compressione)

$\sigma_{s,max}$  = tensione di compressione o trazione massima nell'acciaio (positivo di compressione)

N = sforzo normale da modello di calcolo (positivo di compressione)

M = momento da modello di calcolo

w = ampiezza fessure

M<sub>fess</sub> = momento di prima fessurazione

Le verifiche risultano tutte soddisfatte.

## 6.2.6 VERIFICHE ALLO SLU PER SOLLECITAZIONI TAGLIANTI

Nel caso di elementi strutturali dotati di armature trasversali a taglio occorre verificare che il taglio di progetto ( $V_{Ed}$ ) sia minore di  $V_{Rd}$

dove:

$$V_{Rd} = \min(V_{Rsd}, V_{Rcd})$$

$V_{Rsd}$ , è la resistenza di calcolo a "taglio trazione" dell'armatura trasversale

$$V_{Rsd} = 0.9 \cdot d \cdot (A_{sw}/s) \cdot f_{yd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) \cdot \sin\alpha$$

$V_{Rcd}$ , è la resistenza di calcolo a "taglio compressione" del calcestruzzo

$$V_{Rcd} = 0.9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) / (1 + \text{ctg}^2\theta)$$

Per il significato delle diverse entità si rimanda al paragrafo 4.1.2.1.3.1 del NTC2008.

La verifica al taglio è stata svolta prendendo in esame le condizioni più sfavorevoli.

Tabella 20: G.A. imbocco Est- verifica S.L.U. taglio

Sezione	Spessore [cm]	Posizione	Condizione di carico	Armatura disposta	$V_k$ [kN]	$V_d$ [kN]	$V_{Rsd}$ [kN]	$V_{Rcd}$ [kN]	$V_{Rd}$ [kN]
1	70	Calotta	Lungo termine	1Ø14/50/20	24.9	32.4	908	1725	908
			Sisma		176.5	176.5	908	1768	908
2	70	Calotta	Lungo termine	1Ø14/50/20	55.8	72.5	908	1726	908
			Sisma		72.4	72.4	908	1744	908
3	70	Calotta	Lungo termine	1Ø14/50/20	110.8	144.0	908	1786	908
			Sisma		87.2	87.2	908	1797	908
4	70	Calotta	Lungo termine	1Ø14/50/20	35.4	46.0	908	1844	908
			Sisma		117.6	117.6	908	1852	908
5	70	Calotta	Lungo termine	1Ø14/50/20	7.3	9.5	908	1867	908
			Sisma		173.9	173.9	908	1884	908
6	71	Piedritto	Lungo termine	1Ø14/50/20	106.5	138.5	922	1874	922
			Sisma		175.2	175.2	922	1917	922
7	112	Muretta	Lungo termine	1Ø14/50/20	219.7	285.6	1477	2900	1477
			Sisma		469.1	469.1	1477	2984	1477
8	80	Arco rovescio	Lungo termine	1Ø14/50/20	146.5	190.5	1044	1967	1044
			Sisma		223.8	223.8	1044	2189	1044
9	80	Arco Rovescio	Lungo termine	1Ø14/50/20	24.8	32.2	1044	1967	1044
			Sisma		29.1	29.1	1044	2201	1044
10	80	Arco	Lungo termine	1Ø14/50/20	5.3	6.9	1044	1967	1044

Sezione	Spessore [cm]	Posizione	Condizione di carico	Armatura disposta	$V_k$ [kN]	$V_d$ [kN]	$V_{Rsd}$ [kN]	$V_{Rcd}$ [kN]	$V_{Rd}$ [kN]
		Rovescio	Sisma		14.7	14.7	1044	2193	1044
11	80	Arco	Lungo termine	1Ø14/50/20	0.8	1.0	1044	1967	1044
		Rovescio	Sisma		41.5	41.5	1044	2172	1044
12	80	Arco	Lungo termine	1Ø14/50/20	3.2	4.2	1044	1967	1044
		Rovescio	Sisma		99.8	99.8	1044	2138	1044
13	80	Arco	Lungo termine	1Ø14/50/20	24.1	31.3	1044	1967	1044
		Rovescio	Sisma		136.7	136.7	1044	2093	1044
14	80	Arco	Lungo termine	1Ø14/50/20	122.7	159.5	1044	1967	1044
		Rovescio	Sisma		134.6	134.6	1044	2066	1044
15	112	Muretta	Lungo termine	1Ø14/50/20	174.6	227.0	1477	2883	1477
			Sisma		231.7	231.7	1477	2931	1477
16	71	Piedritto	Lungo termine	1Ø14/50/20	85.9	111.7	922	1853	922
			Sisma		176.3	176.3	922	1900	922
17	70	Calotta	Lungo termine	1Ø14/50/20	18.0	23.4	908	1849	908
			Sisma		148.8	148.8	908	1913	908
18	70	Calotta	Lungo termine	1Ø14/50/20	7.5	9.8	908	1838	908
			Sisma		139.7	139.7	908	1912	908
19	70	Calotta	Lungo termine	1Ø14/50/20	66.2	86.1	908	1815	908
			Sisma		44.7	44.7	908	1904	908
20	70	Calotta	Lungo termine	1Ø14/50/20	76.1	98.9	908	1755	908
			Sisma		144.5	144.5	908	1847	908

Le verifiche risultano soddisfatte in quanto  $V_{Ed} < V_{Rd}$ .



**Anas S.p.A.**

Via Monzambano, 10 - 00185 Roma

[www.stradeanas.it](http://www.stradeanas.it)