



Anas SpA

Direzione Progettazione e Realizzazione Lavori

S.S. 131 di "Carlo Felice"

Adeguamento e messa in sicurezza della S.S.131
Risoluzione dei nodi critici – 1° stralcio
dal km 158+000 al km 162+700

PROGETTO ESECUTIVO

CA283

PROGETTAZIONE: ANAS–Direzione Progettazione e Realizzazione Lavori

PROGETTISTI:

Dott. Ing. Achille DEVITOFRANCESCHI Dott. Ing. Alessandro MICHELI
Ordine Ing. di Roma n. 19116 Ordine Ing. di Roma n. 19645

IL GEOLOGO

Dott. Geol. Serena MAJETTA
Ordine Geol. Lazio n. 928

COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE

Geom. Fabio QUONDAM

VISTO: IL RESP. DEL PROCEDIMENTO

Dott. Ing. Salvatore FRASCA

PROTOCOLLO

DATA

Svincolo di Bonorva Sud – Cavalcavia CV01
Muri di risvolto spalle
Relazione di calcolo

CODICE PROGETTO

PROGETTO LIV. PROG. N. PROG.

LOPLSP E 1701

NOME FILE

T00CV01GETRE01A

CODICE ELAB. T00CV01GETRE01

REVISIONE

A

SCALA:

–

D

C

B

A

EMISSIONE

ing. A. Mangiola

ing. E. Mittiga

ing. A. Micheli

REV.

DESCRIZIONE

DATA

REDATTO

VERIFICATO

APPROVATO

S.S. 131 di “Carlo Felice”

Adeguamento e messa in sicurezza della S.S. 131

Risoluzione di nodi critici – 1° stralcio

Dal km 158+000 al km 162+700

Svincolo di Bonorva Sud - Cavalcavia CV01

Muri di risvolto spalle

Relazione di calcolo

INDICE

1.	INTRODUZIONE.....	3
2.	RIFERIMENTI NORMATIVI E BIBLIOGRAFICI.....	4
2.1	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	4
2.2	RIFERIMENTI PROGETTUALI.....	4
2.3	SOFTWARE UTILIZZATI	4
3.	CARATTERISTICHE DEI MATERIALI	5
4.	DESCRIZIONE DELL'OPERA	6
5.	CONDIZIONI GEOTECNICHE.....	7
6.	ANALISI DEL MURO DI SOSTEGNO	10
6.1	COMBINAZIONI E COEFFICIENTI PARZIALI	10
6.2	METODOLOGIA DI CALCOLO, LEGAMI COSTITUTIVI E PARAMETRI.....	12
6.2.1	<i>Metodologia e legami costitutivi dei materiali.....</i>	<i>12</i>
6.2.2	<i>Parametri geotecnici e definizione dei legami costitutivi.....</i>	<i>12</i>
6.2.3	<i>Elementi strutturali.....</i>	<i>12</i>
6.2.4	<i>Pesi propri.....</i>	<i>13</i>
6.2.5	<i>Sovraccarico stradale.....</i>	<i>13</i>
6.2.6	<i>Carico dovuto a collisione da veicolo sulla barriera stradale.....</i>	<i>13</i>
6.2.7	<i>Azione sismica.....</i>	<i>13</i>
6.2.8	<i>Stabilità globale e verifiche geotecniche.....</i>	<i>15</i>
6.3	DISCRETIZZAZIONE DI CALCOLO	16
6.4	FASI DI CALCOLO.....	17
6.5	RISULTATI DI CALCOLO.....	22
6.6	VERIFICHE DI RESISTENZA DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI.....	32
7.	ALLEGATO 1: TERMINOLOGIA UTILIZZATA NELLA VERIFICA DELLE SEZIONI IN C.A.	35

1. INTRODUZIONE

Nella presente relazione di calcolo si riportano le verifiche geotecniche e strutturali relative ai muri andatori del Cavalcavia CV01, previsto nell'ambito dello Svincolo di Bonorva Sud, al km 0+941.50 della S.S. 131.

Nel seguito si sviluppano i seguenti punti:

- Descrizione dell'opera;
- Descrizione delle condizioni geotecniche del sito: definizione della stratigrafia e dei parametri geotecnici di progetto;
- Metodologie di calcolo;
- Principali risultati dell'analisi;
- Verifica di resistenza delle sezioni in c.a.;
- Analisi di stabilità globale e verifiche geotecniche.

Tutte le verifiche sono state condotte in accordo al metodo semiprobabilistico agli stati limite secondo quanto indicato dalle NTC 2008 (Doc. Rif. [1]) e dalla relativa circolare applicativa del 2009 (Doc. Rif. [2]).

2. RIFERIMENTI NORMATIVI E BIBLIOGRAFICI

2.1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- [1] Decreto Ministeriale del 14 gennaio 2008: "Approvazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni", G.U. n.29 del 04.2.2008, Supplemento Ordinario n.30.
- [2] Circolare 2 febbraio 2009, n. 617 - Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008.
- [3] UNI EN 1998-1-1. Ottobre 1997 - Eurocodice 8 – Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture – Parte 1-1:Regole generali – Azioni sismiche e requisiti generali per le strutture.

2.2 RIFERIMENTI PROGETTUALI

- [4] T00_GE00_GET_RE01_A - "*Relazione geotecnica generale*".
- [5] T00_GE00_GET_FG03_A - "*Svincolo di Bonorva Sud - Sezioni geotecniche Cavalcavia CV01*".
- [6] T00_CV01_GET_DI01_A - "*Svincolo di Bonorva Sud - Cavalcavia CV01 - Muri di risvolto spalle - Planimetria*".
- [7] T00_CV01_GET_DI02_A - "*Svincolo di Bonorva Sud - Cavalcavia CV01 - Muri di risvolto spalle - Prospetti*".
- [8] T00_CV01_GET_PE01_A - "*Svincolo di Bonorva Sud - Cavalcavia CV01 - Muri di risvolto spalle - Pianta Scavi*".
- [9] T00_CV01_GET_SZ01_A - "*Svincolo di Bonorva Sud - Cavalcavia CV01 - Muri di risvolto spalle - Sezioni trasversali e Sezione Tipi*".
- [10] T00_CV01_GET_CA01_A - "*Svincolo di Bonorva Sud - Cavalcavia CV01 - Muri di risvolto spalle - Spalla 1 - Carpenterie e Armature*".
- [11] T00_CV01_GET_CA02_A - "*Svincolo di Bonorva Sud - Cavalcavia CV01 - Muri di risvolto spalle - Spalla 2 - Carpenterie e Armature*".

2.3 SOFTWARE UTILIZZATI

- [12] Plaxis 2D v2017.0. Il programma di calcolo è stato adottato per le analisi FEM 2D. In accordo a quanto prescritto nel paragrafo 10.2 del D.M. 14/01/2008, il progettista certifica la affidabilità del suddetto codice di calcolo e l'idoneità di utilizzo nel caso specifico.
- [13] SEZCA. Geostru. Programma per la verifica delle sezioni in c.a.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

I materiali che costituiscono le opere di sostegno sono i seguenti:

Calcestruzzo per muri:

- Caratteristica di resistenza minima C28/35
- Classe di esposizione XC2
- Resistenza caratteristica cilindrica $f_{ck}=28$ MPa
- Resistenza caratteristica cubica $R_{ck}=35$ MPa
- Valore medio resistenza caratteristica cilindrica $f_{cm}=37$ MPa
- Valore medio resistenza a trazione assiale $f_{ctm}=2.835$ MPa
- Modulo di elasticità secante $E_{cm}=32580$ MPa
- Classe di consistenza S3

Acciaio per armature ordinarie:

- Tipo di acciaio B450C
- Modulo elastico $E_s=210000000$ kN/m²
- Tensione caratteristica di snervamento $f_{yk}\geq 450$ MPa
- Tensione caratteristica di rottura $f_{tk}\geq 540$ MPa
- Tensione di calcolo $f_{yd} = 391$ MPa

4. DESCRIZIONE DELL'OPERA

I muri andatori del Cavalcavia CV01, previsto nell'ambito dello Svincolo di Bonorva Sud, al km 0+941.50 della S.S. 131, saranno la continuazione dei muri delle spalle, ed avranno la funzione di contenere il materiale da rilevato costituente il rilevato d'approccio, fino al raccordo con le scarpate con pendenza 2/3 (h/v) e banca orizzontale intermedia di larghezza 2.5 m. Essi saranno conformati come muri ad "U". Nella seguente immagine si riporta la semi-sezione tipo (simmetrica).

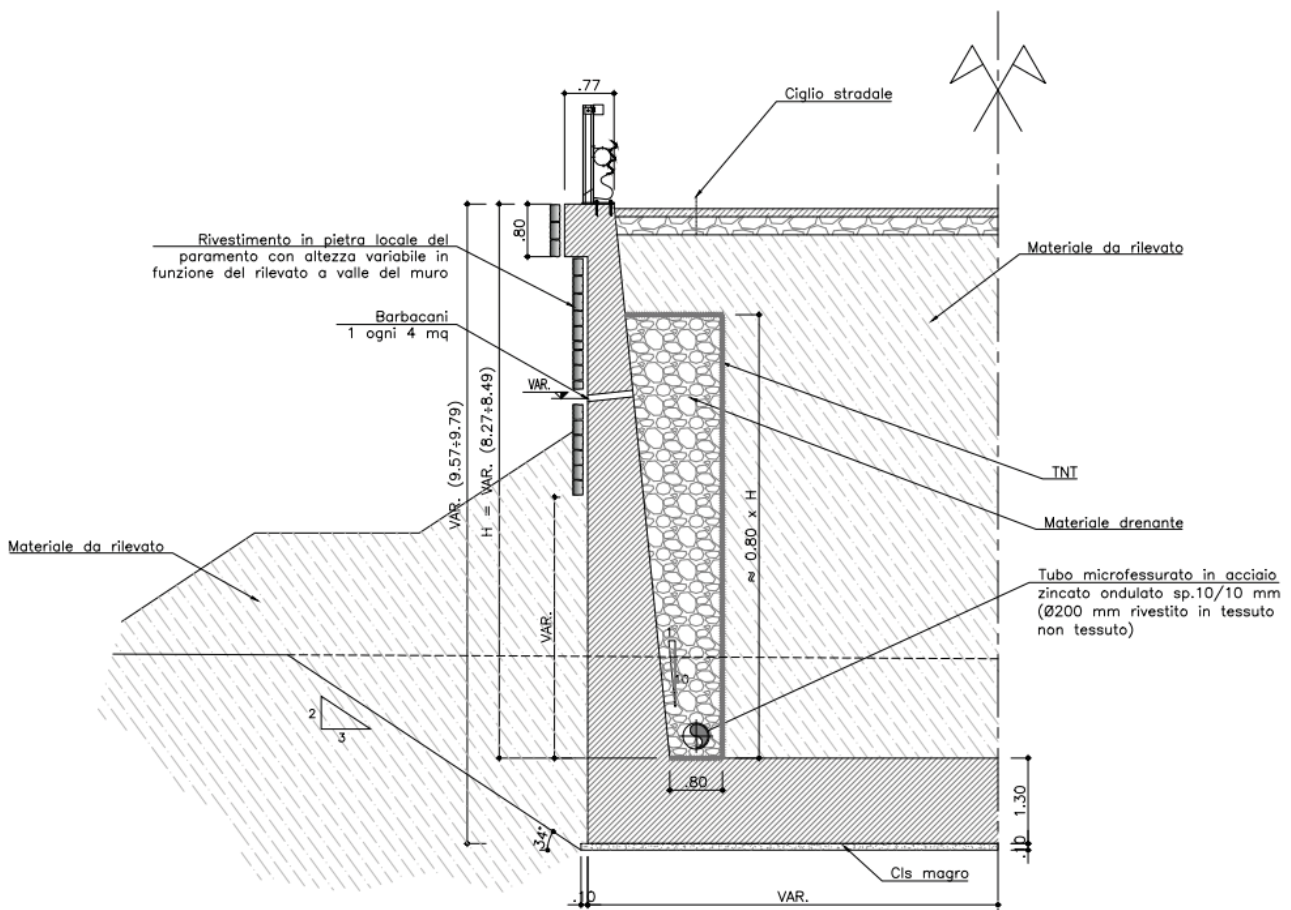


Figura 1 – Sezione tipo

L'opera si sviluppa con altezze e lunghezza della fondazione variabili in funzione della geometria dei rilevati di approccio al cavalcavia. In particolare l'altezza del paramento varia da un minimo di 8.27 m ed un massimo di 8.49 m.

Lo scavo provvisorio verrà conformato con pendenza 2/3 (v/h).

5. CONDIZIONI GEOTECNICHE

Nella seguenti figure si riportano le sezioni stratigrafiche di riferimento.

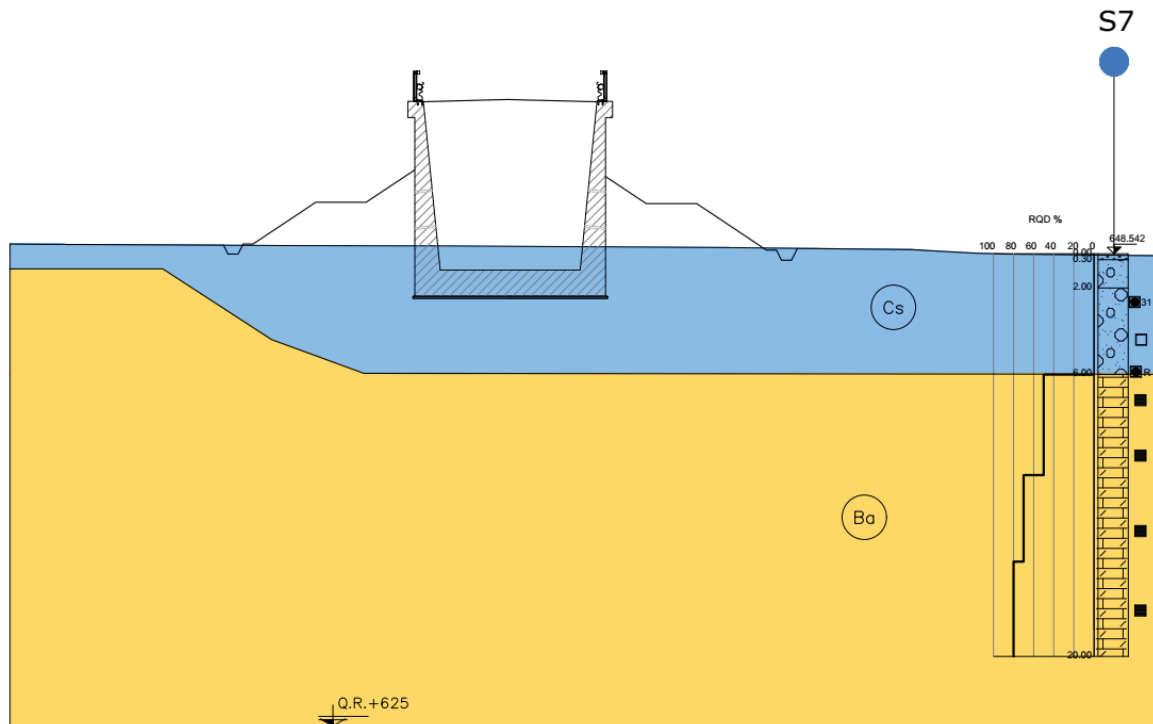


Figura 2 – Sezione geotecnica di riferimento

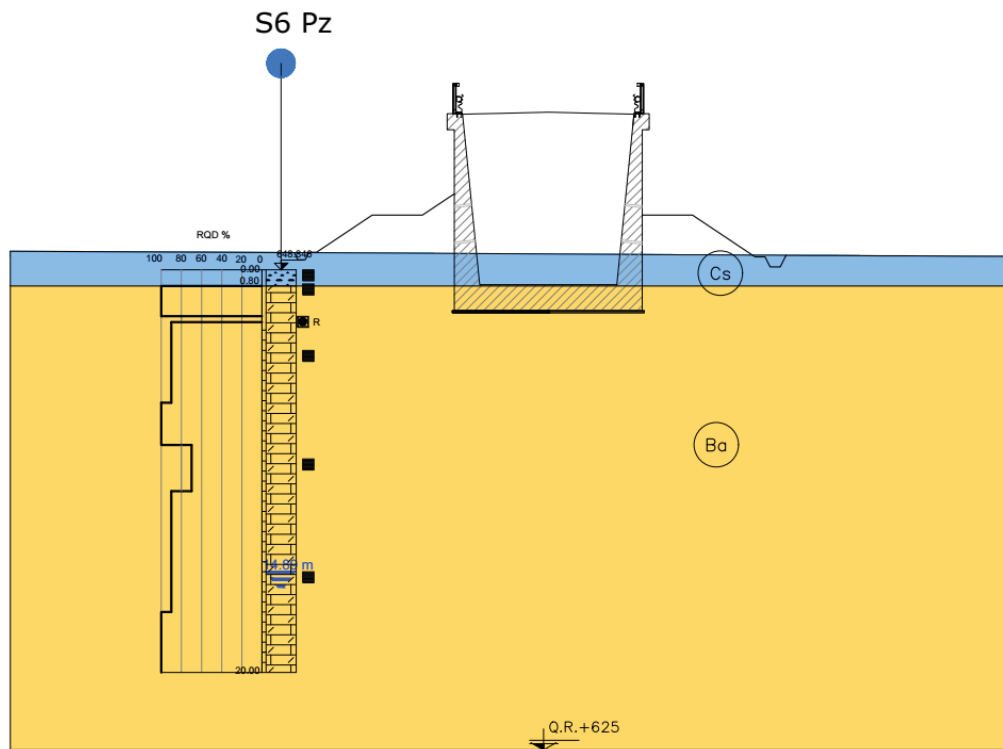


Figura 3 – Sezione geotecnica di riferimento

Di seguito si riportano i parametri geotecnici di progetto, per ulteriori dettagli si rimanda alla Relazione geotecnica generale (Doc. Rif. [4]).

Unità Cs (coltre superficiale ghiaioso sabbioso) da 0.0 a 1.0÷6.0 m di profondità da p.c.

$\gamma = 17.0 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$\phi' = 35^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c' = 0 \text{ kPa}$	coesione drenata
$E_0 = 130 \div 400 \text{ MPa}$	modulo di deformazione elastico iniziale (a piccole deformazioni)

Unità Ba (Basalto di Campeda) da 1.0÷6.0 alla massima profondità di interesse progettuale:

$\gamma = 25.0 \text{ kN/m}^3$	peso di volume
$\phi' = 26 \div 42^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c' = 26 \div 96 \text{ kPa}$	coesione drenata
$E' = 63 \div 700 \text{ MPa}$	modulo di deformazione

La falda è stata rilevata a circa 15 m da p.c..

È inoltre necessario caratterizzare il **materiale da rilevato (unità Ril)**, che costituisce il riempimento interno ed esterno al muro ad “U”.

$\gamma = 18.5 \text{ kN/m}^3$	peso di volume
$\phi' = 36^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c' = 0$	coesione drenata
$E' = 50 \text{ MPa}$	modulo di deformazione

6. ANALISI DEL MURO DI SOSTEGNO

6.1 COMBINAZIONI E COEFFICIENTI PARZIALI

Le analisi sono state effettuate in conformità al DM 14 gennaio 2008 (Norme Tecniche per le Costruzioni). In particolare la norma prevede tre combinazioni progettuali distinte e alternative. Per il caso specifico, trattandosi di un muro ad "U", devono essere effettuate le verifiche con riferimento ai seguenti stati limite:

SLU di tipo geotecnico (GEO)

- stabilità globale del complesso opera di sostegno-terreno;
- collasso per carico limite dell'insieme fondazione-terreno;

SLU di tipo strutturale (STR)

- raggiungimento della resistenza negli elementi strutturali

Le verifiche allo SLU sono condotte secondo l'Approccio 1 e le combinazioni di seguito elencate:

- Combinazione 1: (A1+M1+R1) (SLU STR)
- Combinazione 2: (A2+M2+R2) (SLU GEO)

La normativa vigente prevede i coefficienti riportati nelle seguenti tabelle.

Tabella 1 – Coefficienti parziali di normativa

COEFFICIENTI SULLE AZIONI γ_F

Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni.

CARICHI	EFFETTO	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1) STR	(A2) GEO
Permanenti	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Permanenti non strutturali ⁽¹⁾	Favorevole	γ_{G2}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Variabili	Favorevole	γ_{Q1}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

(1) Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. i carichi permanenti portati) siano compiutamente definiti, si potranno adottare gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

COEFFICIENTI SUI MATERIALI γ_M

Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

PARAMETRO	GRANDEZZA ALLA QUALE APPLICARE IL COEFFICIENTE PARZIALE	COEFFICIENTE PARZIALE γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	γ_φ	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	γ_c	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ	γ_γ	1,0	1,0

COEFFICIENTI SULLE RESISTENZE γ_R

Coefficienti parziali γ_R per le verifiche agli stati limite ultimi STR e GEO di muri di sostegno.

VERIFICA	COEFFICIENTE PARZIALE (R1)	COEFFICIENTE PARZIALE (R2)	COEFFICIENTE PARZIALE (R3)
Capacità portante della fondazione	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,4$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,1$
Resistenza del terreno a valle	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,4$

6.2 METODOLOGIA DI CALCOLO, LEGAMI COSTITUTIVI E PARAMETRI

6.2.1 Metodologia e legami costitutivi dei materiali

PLAXIS è un codice di calcolo agli elementi finiti utilizzabile per eseguire analisi di stabilità e di deformazione nell'ambito di molteplici applicazioni geotecniche e di interazione terreno-struttura. Il programma permette di simulare situazioni reali riconducibili a condizioni di deformazione piane (plain strain).

Presenta una vasta libreria di legami costitutivi attribuibili ai terreni. Sono disponibili inoltre elementi strutturali di vario tipo che consentono di simulare diaframmi, pali, ancoraggi ecc.

Per le analisi si adotta un approccio in tensioni efficaci, quindi nei problemi che coinvolgono la determinazione delle pressioni neutre le stesse possono essere generate attraverso l'analisi del moto di filtrazione in regime stazionario; quest'ultimo richiede l'introduzione delle condizioni al contorno per la quota piezometrica e per le condizioni di flusso (superfici impermeabili, punti di emungimento, sorgenti etc.)

6.2.2 Parametri geotecnici e definizione dei legami costitutivi

Per le unità costituenti il terreno esistente e il rilevato stradale esistente si è adottato un semplice legame costitutivo alla Mohr-Coulomb.

Nella seguente Tabella 2 si riportano, per i litotipi di interesse progettuale, i parametri geotecnici di resistenza e di rigidità che ne caratterizzano il comportamento numerico.

Tabella 2 – Parametri geotecnici dei terreni assunti nelle analisi

	Cs	Ba	Ril	
γ	17.0	25.0	18.5	kN/m ³
c'	0	26	0	kPa
ϕ'	35	30	36	deg
E'	30	100	50	MPa

6.2.3 Elementi strutturali

Nel modello FEM 2D il muro ad "U" è stato modellato con elementi snelli (tipo *beam*), con legame costitutivo elastico-lineare, aventi rigidità assiale e flessionale proprio di una sezione in c.a. ($E = 30$ GPa, $\nu = 0.18$) di spessore 1.30 m.

Nel modello, le proprietà degli elementi interfaccia sono state applicate definendo dei materiali con legame costitutivo analogo a quello dei terreni circostanti, con resistenza ad attrito ridotta al 70%, ma con coesione e resistenza alla trazione nulla, in modo da consentirne il distacco.

6.2.4 Pesì propri

Per il calcolo del peso proprio delle strutture si assumono i pesi unitari di seguito indicati:

- Struttura in c.a. $\gamma_1 = 25.0 \text{ kN/m}^3$;
- Terreno di riempimento: $\gamma_2 = 18.5 \text{ kN/m}^3$.

6.2.5 Sovraccarico stradale

Nel caso specifico si terrà conto di un sovraccarico accidentale uniforme indefinito dovuto al traffico stradale pari a 20 kPa.

Tale carico, per determinare la combinazione SLU STR, è applicato con fattore di amplificazione pari al rapporto tra i coefficienti parziali per le azioni variabili e permanenti, $\gamma_Q / \gamma_G = 1.5 / 1.3$. Grazie a tale accorgimento, le azioni interne di verifica degli elementi strutturali allo SLU STR, sono ottenute amplificando gli effetti per $\gamma_G = 1.3$.

6.2.6 Carico dovuto a collisione da veicolo sulla barriera stradale

Ai sensi delle Norme Tecniche per le Costruzioni 2008, paragrafo 3.6.3.3.2 "Traffico Veicolare sopra i Ponti", in sommità del muro, considerato per metro lineare, è applicata una forza orizzontale da 100 kN ed una coppia di 100 kNm, spingenti verso l'esterno del muro.

Tale carico è concomitante con il carico variabile da traffico stradale di 20 kPa applicato a monte.

L'applicazione dei carichi suddetti costituisce per l'opera uno SLU di combinazione eccezionale, pertanto le azioni interne derivanti si verificano allo SLU STR, senza necessità di amplificare le azioni agenti (permanentì e variabili)

6.2.7 Azione sismica

L'analisi della sicurezza dei muri di sostegno in condizioni sismiche può essere eseguita mediante metodi dell'equilibrio limite in condizioni pseudostatiche.

Nelle verifiche allo stato limite ultimo, i coefficienti di accelerazione sismica k_h e k_v valgono rispettivamente:

$$k_h = \beta_m a_{max}/g$$

$$k_v = \pm 0.5 k_h$$

dove:

a_{max} = accelerazione massima attesa al sito in considerazione

g = accelerazione di gravità

β_m = coefficiente riduttivo che tiene conto dei possibili spostamenti dell'opera

L'accelerazione massima è stata valutata come:

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

in cui:

a_g = accelerazione massima attesa al sito di riferimento sul substrato rigido

S_S = coefficiente di amplificazione stratigrafica

S_T = coefficiente di amplificazione topografica

Il coefficiente riduttivo β_m viene desunto dalla tabella 7.11.II della normativa vigente.

Nel caso in esame, per $a_g/g = 0.06$, $S_T=1.2$, categoria sottosuolo C ($S_S=1.5$), $\beta_m = 0.18$, si ottiene:

$$k_h = 0.019 \quad ; \quad k_v = \pm 0.010$$

Per l'analisi di stabilità globale si considera $\beta_s = 0.20$ quindi:

$$k_h = \beta_s \cdot a_{max} / g = 0.022 \cdot \quad \text{coeff. sismico orizzontale}$$

$$k_v = \pm 0.5 k_h = \pm 0.011 \quad \text{coeff. sismico verticale}$$

6.2.8 Stabilità globale e verifiche geotecniche

La determinazione del coefficiente di sicurezza avviene mediante un algoritmo iterativo ($\phi' - c'$ reduction method, Dawson, Roth and Drescher, 1999) che, sulla base dei dati di partenza (c' e $\tan \phi'$), determina successive condizioni di equilibrio del sistema eseguendo, ad ogni ciclo, una progressiva riduzione delle resistenze fino al raggiungimento del collasso (condizione di non equilibrio del sistema):

$$c'_{\text{prova}} = c' / FS_{\text{prova}}$$

$$\phi'_{\text{prova}} = \arctan(\tan \phi' / FS_{\text{prova}})$$

In Figura 4 la progressiva riduzione delle resistenze è rappresentata nel piano di Mohr-Coulomb per il singolo elemento di terreno. Si osserva che i parametri di deformabilità non influenzano in maniera apprezzabile i risultati del calcolo e, pertanto, possono essere considerati senza particolari affinamenti.

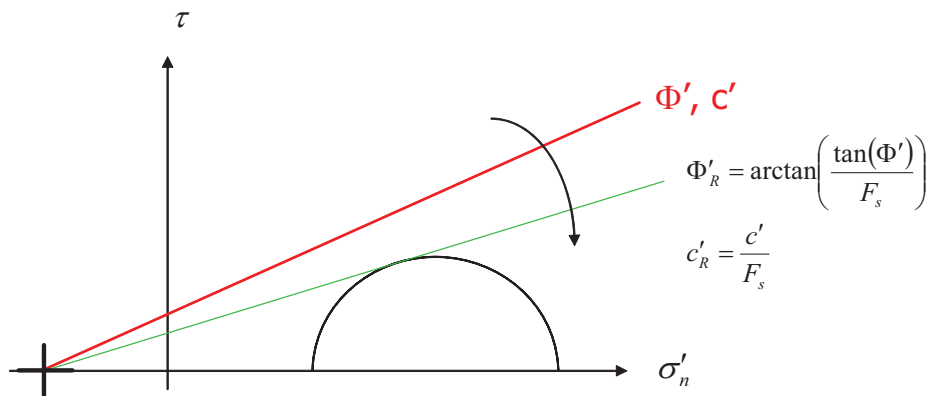


Figura 4 – Phi-c reduction method

Rispetto ai classici metodi dell'equilibrio limite presenta numerosi vantaggi (e.g. Dawson and Roth, 1999, and Cala and Flisiak, 2001):

- le superfici di rottura si propagano in maniera "naturale"; quindi non occorre specificare preventivamente i cinematismi e le potenziali superfici di rottura su cui ricercare il coefficiente di sicurezza minimo;
- non richiede al definizione di ipotesi di calcolo "artificiali" (es. ipotesi sulle forze di interfaccia);
- la metodologia non implica limitazioni sulla forma e la modalità di propagazione delle potenziali superfici di rottura (anche multiple e/o con propagazioni complesse delle zone di snervamento) in funzione delle esigenze del sistema;
- l'interazione con eventuali elementi strutturali vengono modellate in maniera realistica con una mobilitazione delle resistenze in funzione della deformazione relativa rispetto al terreno circostante e non semplicemente mediante forze equivalenti.
- la soluzione converge in un meccanismo che è cinematicamente ammissibile (si noti che i metodi classici dell'equilibrio limite prescindono dalla valutazione degli spostamenti e non richiedono pertanto la conoscenza dei legami tensioni-deformazioni ma del solo criterio di resistenza dei terreni interessati).

Le analisi di stabilità sono svolte a partire dalle configurazioni di progetto, provvisorie o definitive, maggiormente cautelative, ossia la fase di raggiungimento dello scavo massimo, la fase di applicazione dei carichi accidentali a monte (se presente) e la fase sismica.

Tale analisi equivalgono alla verifica SLU (GEO) prevista dalla normativa vigente: Approccio 1 Combinazione 2 (A2+M2+R2), in base alla quale la stabilità geotecnica deve essere verificata con i parametri di resistenza del terreno ridotti tramite i coefficienti parziali del gruppo M2 ($\gamma_M = 1.25$ sia per la coesione sia per la resistenza al taglio, $\gamma_R = 1.1$).

Pertanto, per verificare le verifiche di stabilità geotecnica richieste dalla normativa occorre avere $FS > 1.25 \cdot 1.1 = 1.375$.

Nel caso in esame, trattandosi di un muro ad "U", l'analisi di stabilità globale consente di verificare anche la capacità portante della fondazione; ottemperando alle verifiche geotecniche è sufficiente infatti ottenere $FS > 1.25$ ($\gamma_M = 1.25$, $\gamma_R = 1.0$) per verificare la capacità portante allo SLU GEO.

6.3 DISCRETIZZAZIONE DI CALCOLO

La mesh è costituita da elementi finiti triangolari a 15 nodi, quindi con funzioni di forma del 4° grado, con 12 punti di integrazione numerica interni per ogni elemento. Le dimensioni della mesh, in relazione alle dimensioni degli scavi, sono sempre sufficienti a garantire che i risultati delle analisi siano indipendenti dalla particolare discretizzazione adottata e sono tali da permettere di vincolare il lato inferiore della mesh bloccando gli spostamenti verticali e orizzontali ed i lati sinistro e destro bloccando gli spostamenti orizzontali.

Nella seguente immagine si riporta la discretizzazione di calcolo adottate, in cui è evidenziata la successione stratigrafica. Il dominio discretizzato ha una larghezza di 60 m e un'altezza di 60 m circa, costituito da circa 1800 elementi triangolari.

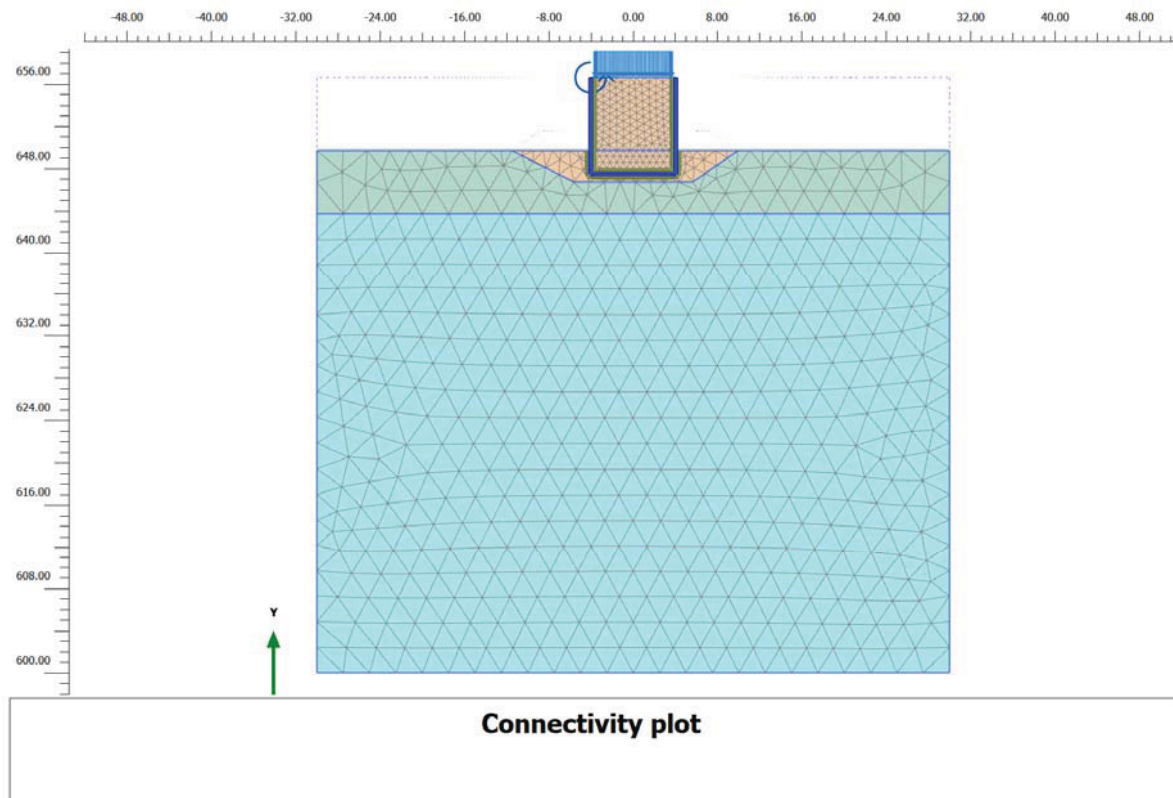


Figura 5 – Discretizzazione di calcolo

6.4 FASI DI CALCOLO

Il tipo di analisi utilizzato consente di riprodurre nel dettaglio la storia della costruzione di opere geotecniche. In generale, mediante il codice FEM utilizzato, possono essere schematizzate gli elementi strutturali, l'evoluzione delle condizioni idrauliche al contorno, la variazione delle condizioni di vincolo e di carico.

Le analisi eseguite sono di tipo sequenziale, riproducendo in successione tutte le principali fasi operative previste per la realizzazione dell'opera. Quindi, il termine di ciascuna analisi rappresenta la condizione iniziale per la fase successiva. Le fasi di scavo vengono simulate mediante la disattivazione dei cluster di terreno corrispondenti, mentre la messa in opera o la rimozione degli elementi strutturali viene simulata attivando o disattivando gli elementi strutturali corrispondenti.

I modelli 2D sviluppati includono tutte le principali fasi esecutive, nella configurazione definitiva a lungo termine, per l'evento sismico, per gli stati limite di progetto previsti dalla normativa.

Nel seguito si illustrano le fasi di calcolo considerate:

- Fase 1. Inizializzazione geostatica.
- Fase 2. Scavo fino al piano di imposta della fondazione.
- Fase 3. Esecuzione del muro e del rilevato (SLE QP – Combinazione Quasi Permanente).
- Fase 4. Applicazione del carico stradale (SLE R – Combinazione Caratteristica/Rara).
- Fase 5. Applicazione del carico dovuto a collisione da veicolo sulla barriera stradale e del carico stradale (SLU Combinazione Eccezionale)
- Fase 6. Applicazione della spinta sismica (statica-equivalente) allo SLV.
- Fase 7. A partire dalla fase SLE R (Fase 4.) e dalla fase sismica SLV (Fase 6.) si esegue la verifica di stabilità globale, riducendo progressivamente i parametri di resistenza al taglio dei terreni (*ϕ' - c' reduction method*) fino al collasso del sistema geotecnico, verificando un fattore di sicurezza globale maggiore di 1.375 (FS min = 1.25 x 1.1), in osservanza alla normativa per la verifica SLU GEO (cfr. § 6.1).

La fase di calcolo SLE R (Fase 4.) è amplificata per $\gamma_G = 1.3$ al fine di ottenere la corrispondente combinazione SLU STR (cfr. § 6.2.5, 6.1).

Le principali fasi di calcolo sono rappresentate nelle seguenti immagini, per le varie sezioni di calcolo.

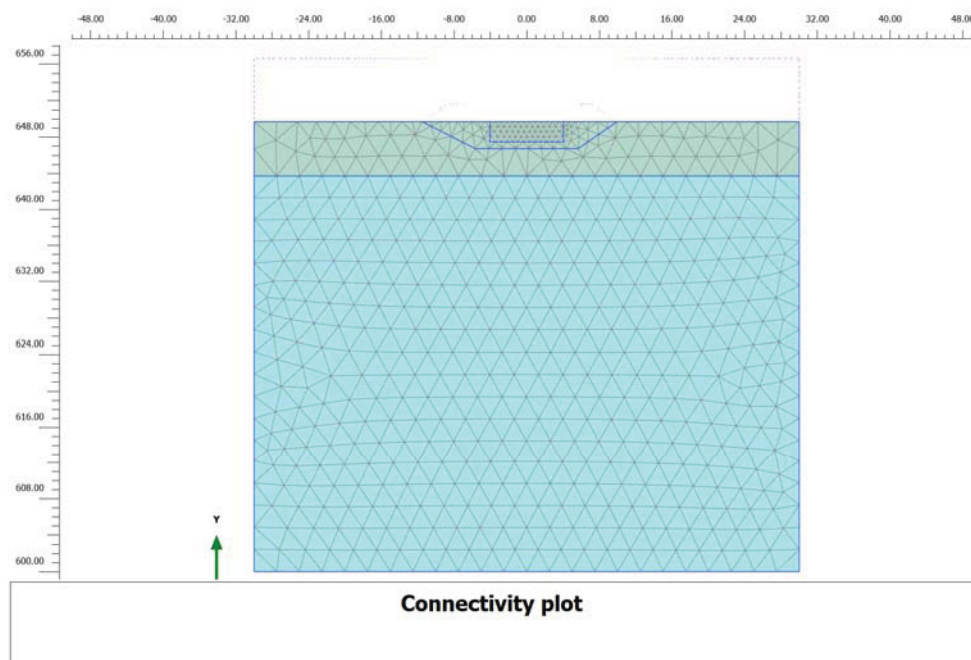


Figura 6 – Inizializzazione geostatica

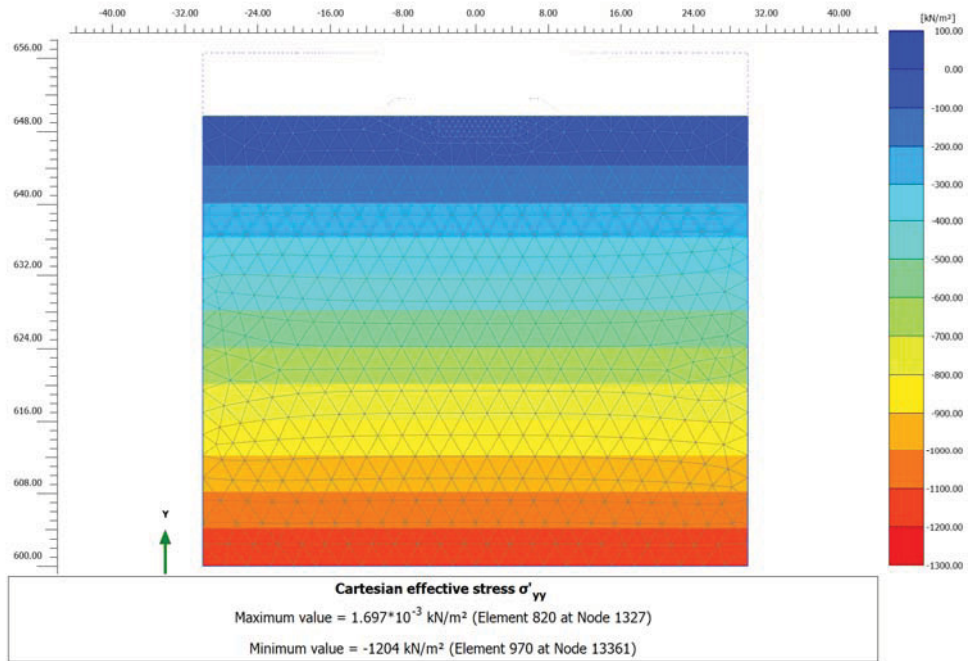


Figura 7 – Tensioni verticali efficaci

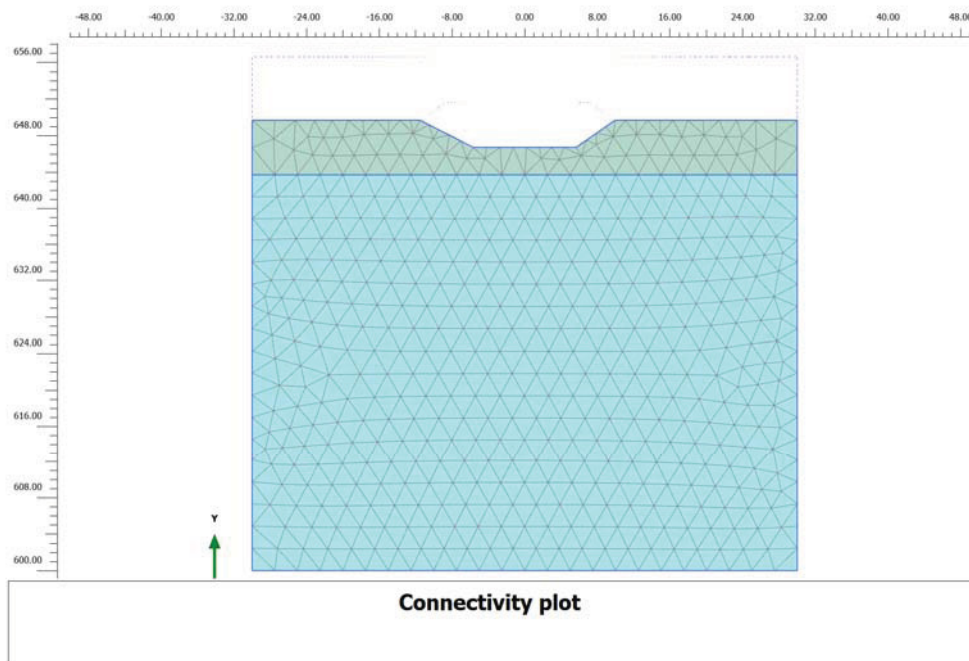


Figura 8 – Scavo

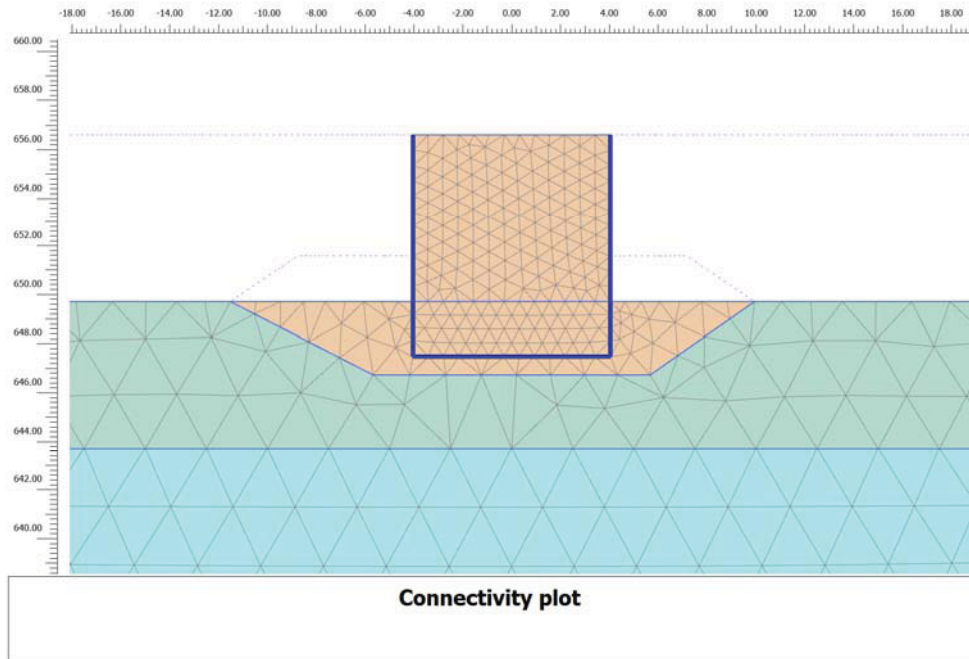


Figura 9 – Sistemazione finale (SLE QP)

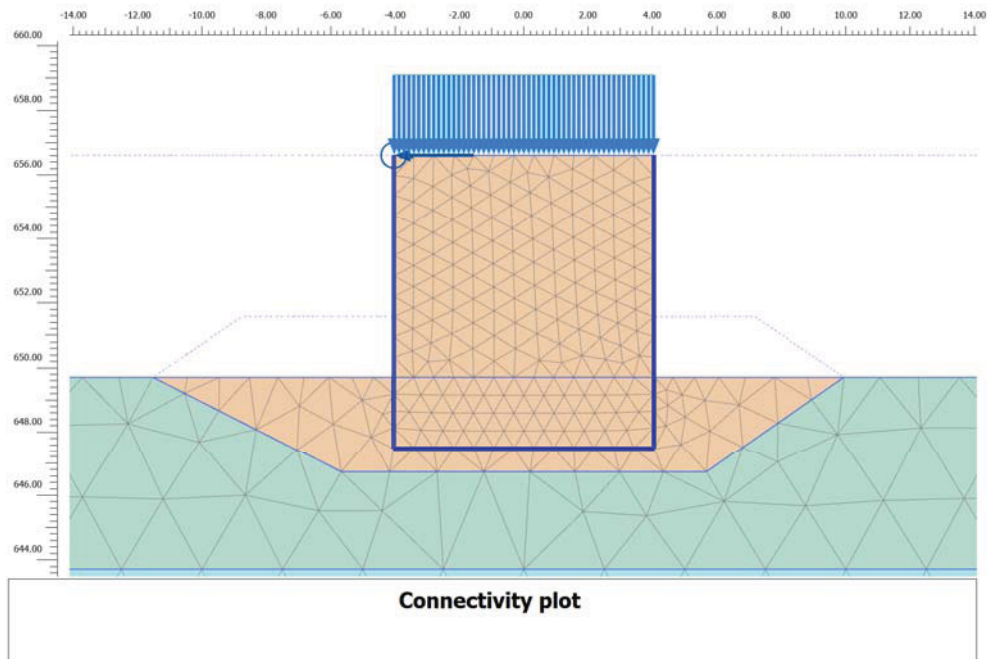


Figura 10 – Applicazione dei carichi stradali e da urto sulla barriera (SLU Eccezionale)

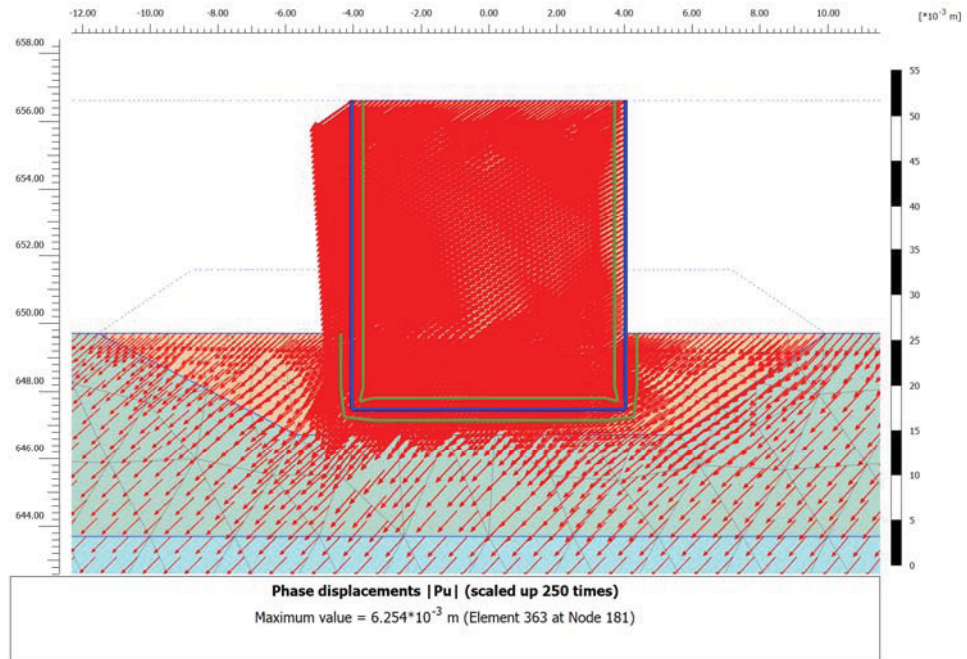


Figura 11 – Applicazione dell'azione sismica (vettori spostamento di fase risultanti)

6.5 RISULTATI DI CALCOLO

Nelle seguenti immagini si riporta:

- il campo di spostamenti totali al completamento dell'opera
- le azioni interne di momento flettente, azione assiale e taglio sugli elementi strutturali, per le principali configurazioni di verifica
- la tabella riassuntiva delle azioni interne massime negli elementi strutturali
- evidenza della verifica di stabilità globale e di capacità portante

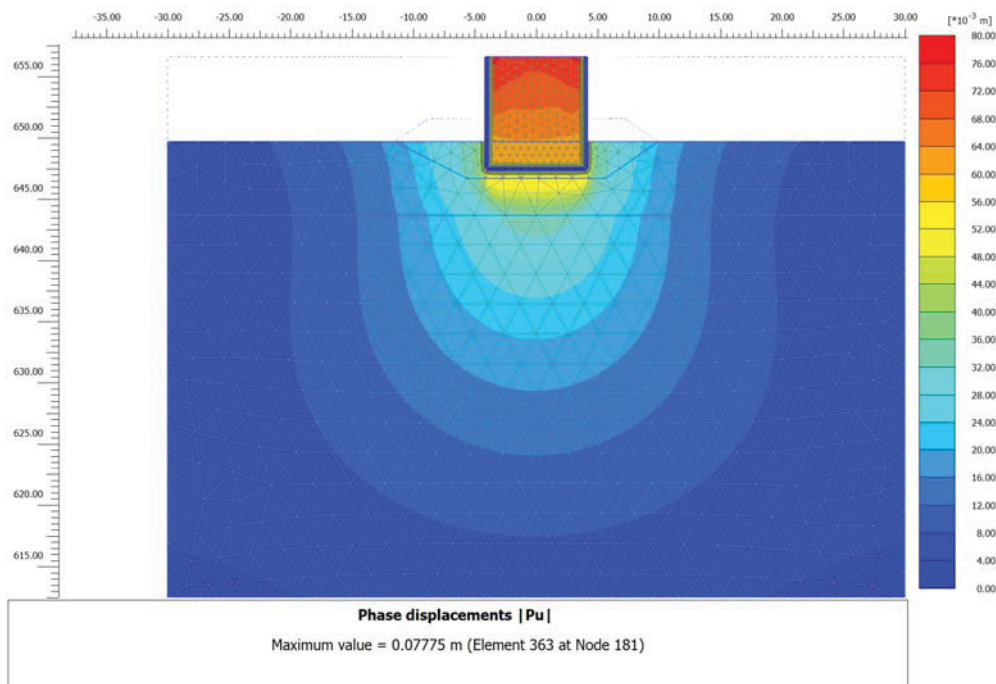


Figura 12 – Spostamenti totali al completamento dell'opera

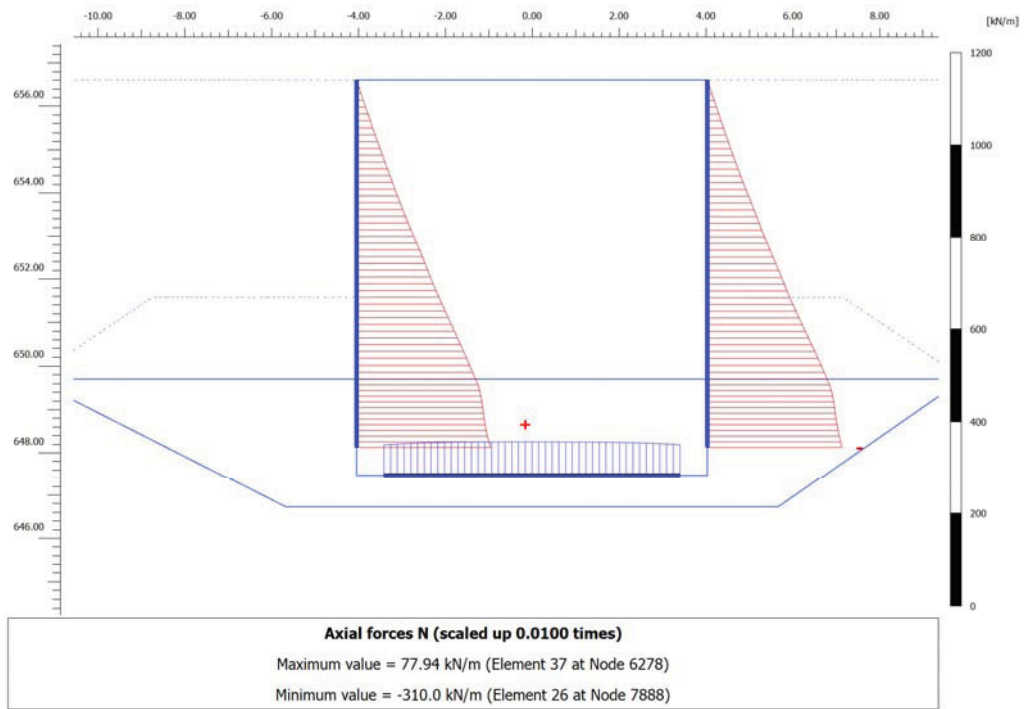


Figura 13 – Azione assiale allo SLE QP

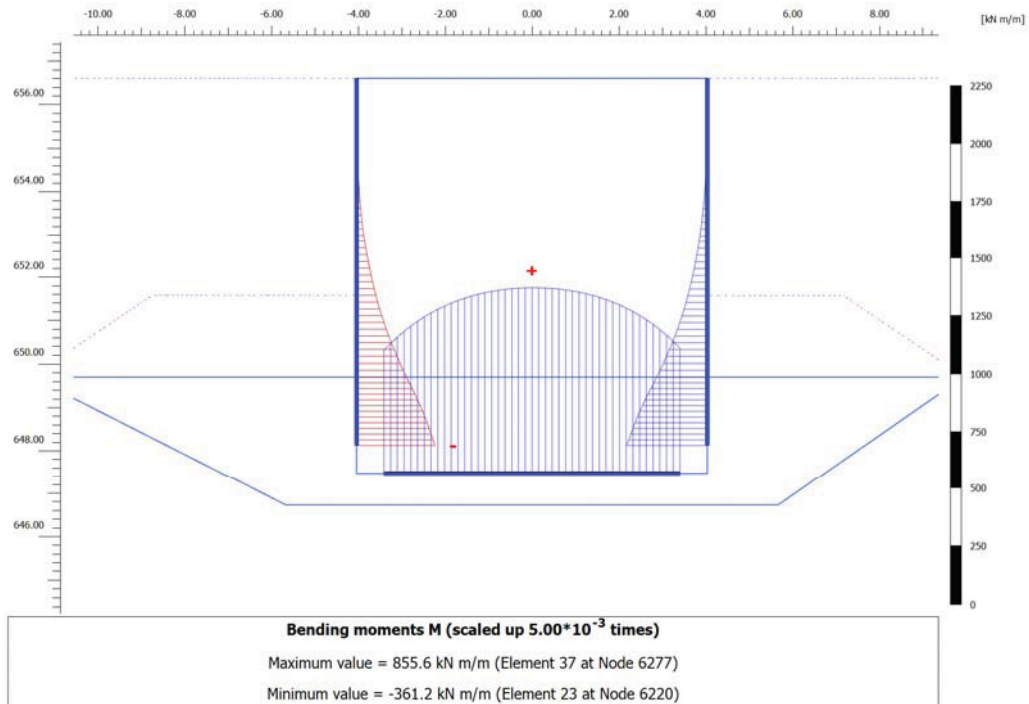


Figura 14 – Momento flettente allo SLE QP

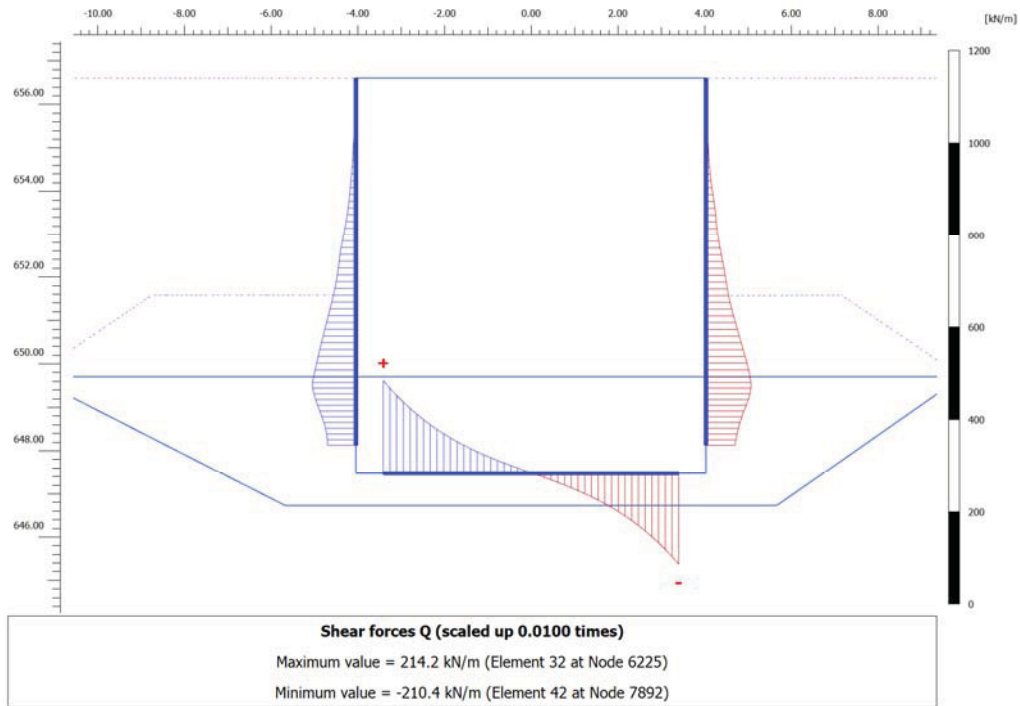


Figura 15 – Taglio allo SLE QP

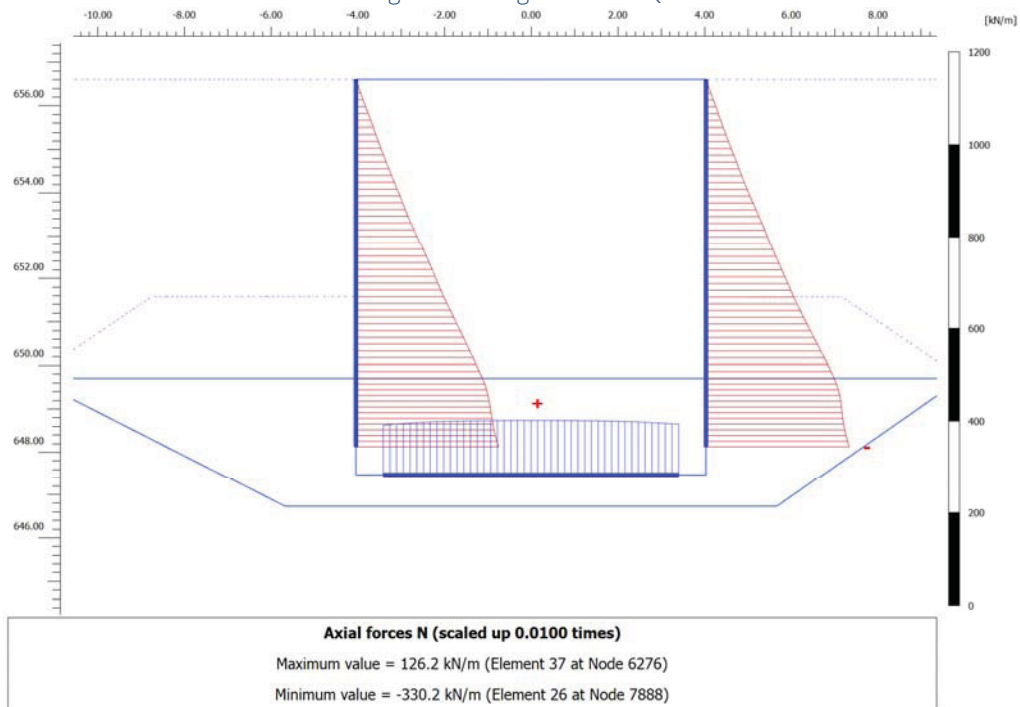


Figura 16 – Azione assiale allo SLE R

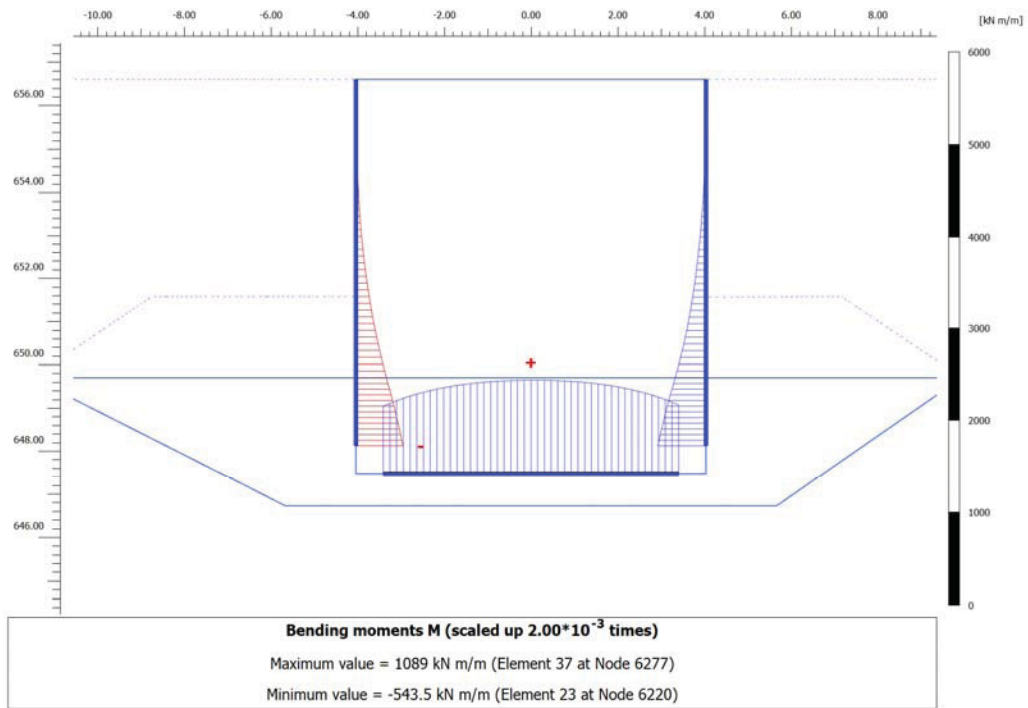


Figura 17 – Momento flettente allo SLE R

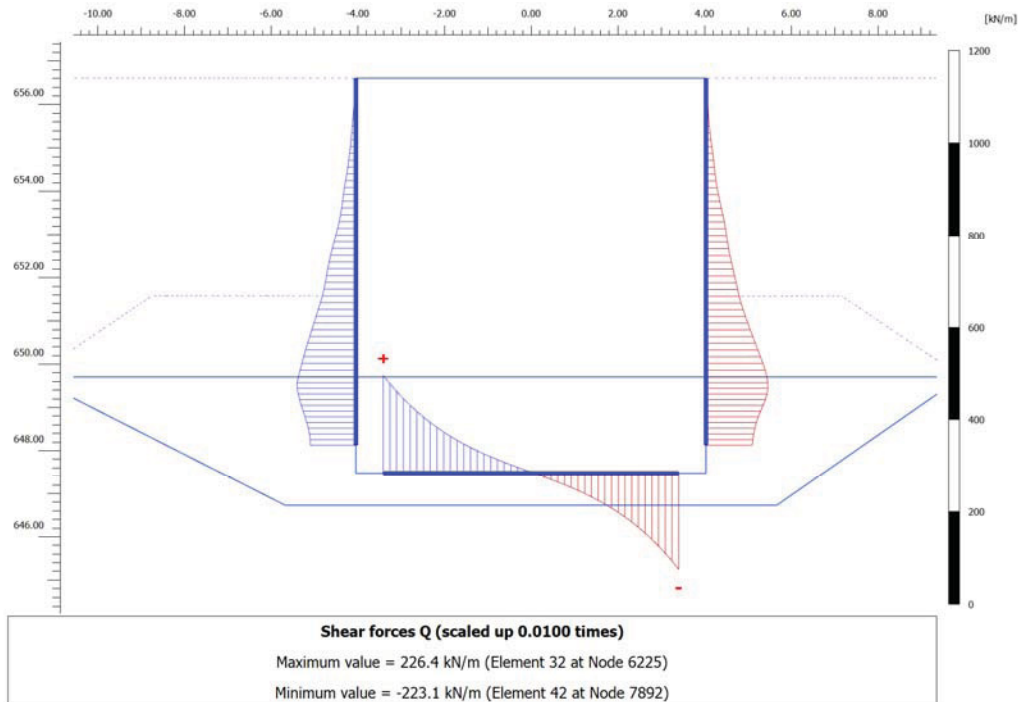


Figura 18 – Taglio allo SLE R

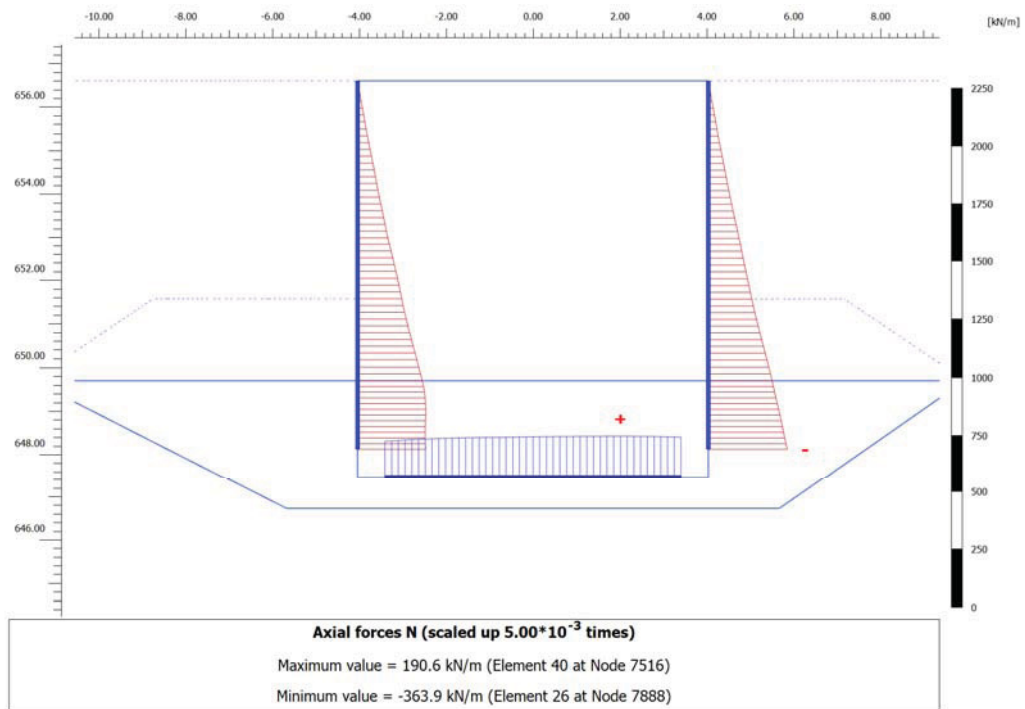


Figura 19 – Azione assiale allo SLU Combinazione Eccezionale

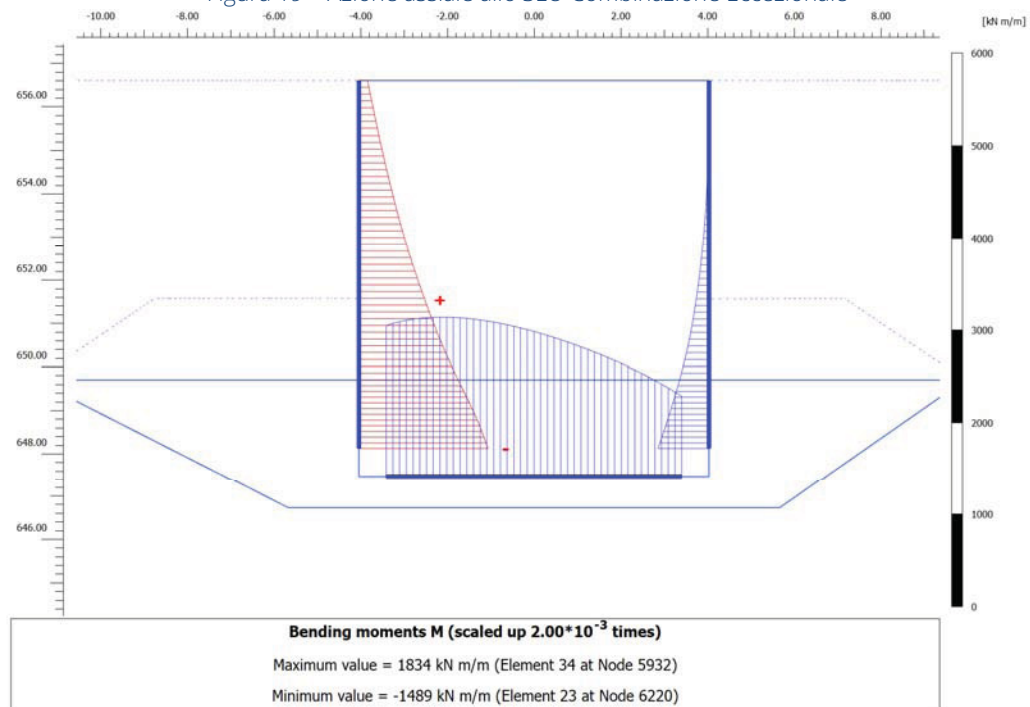


Figura 20 – Momento flettente allo SLU Combinazione Eccezionale

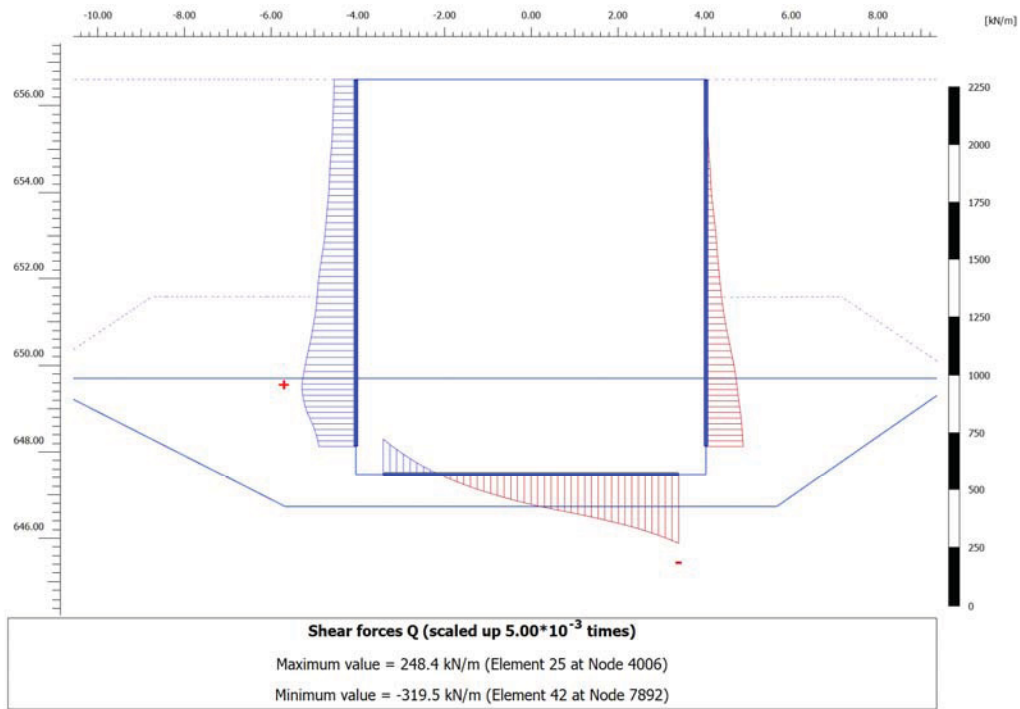


Figura 21 – Taglio allo SLU Combinazione Eccezionale

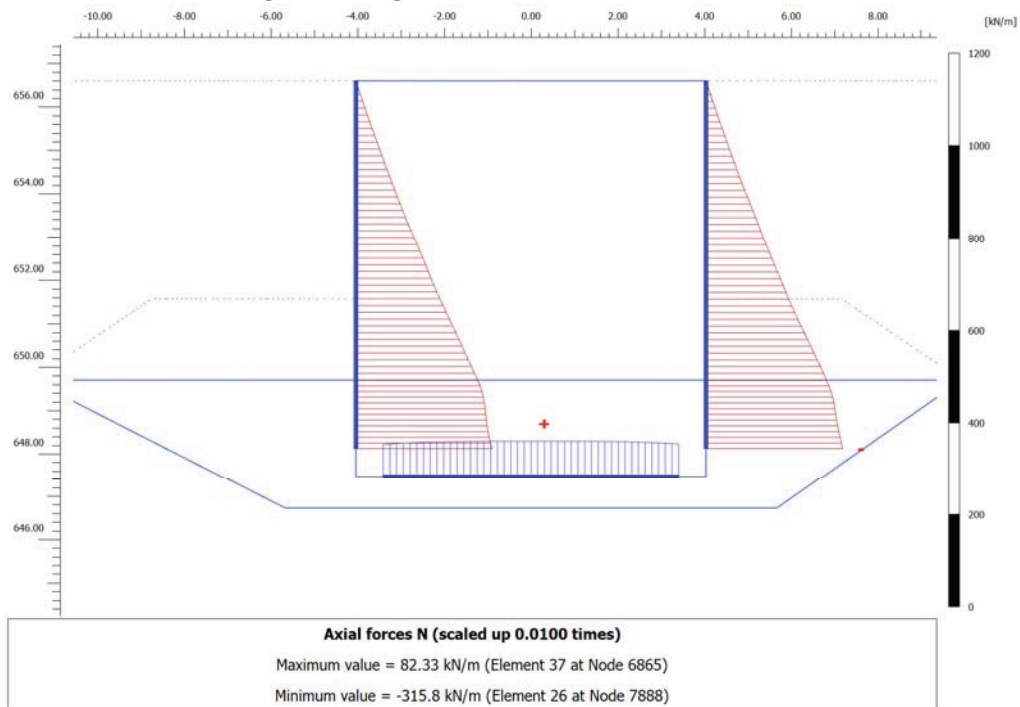


Figura 22 – Azione assiale allo SLV

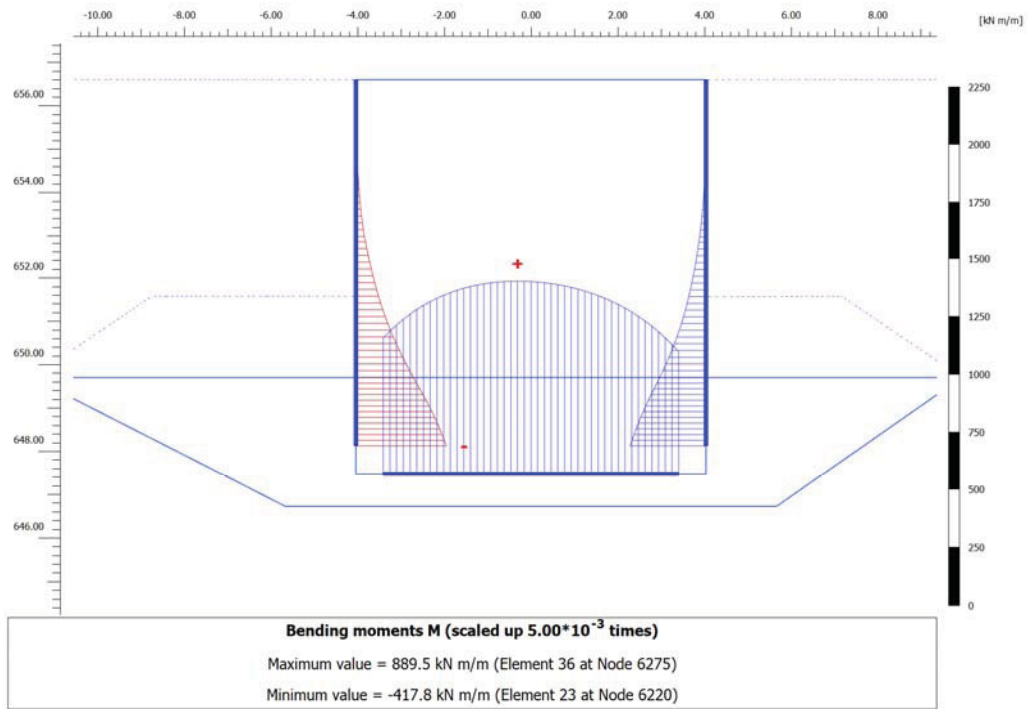


Figura 23 – Momento flettente allo SLV

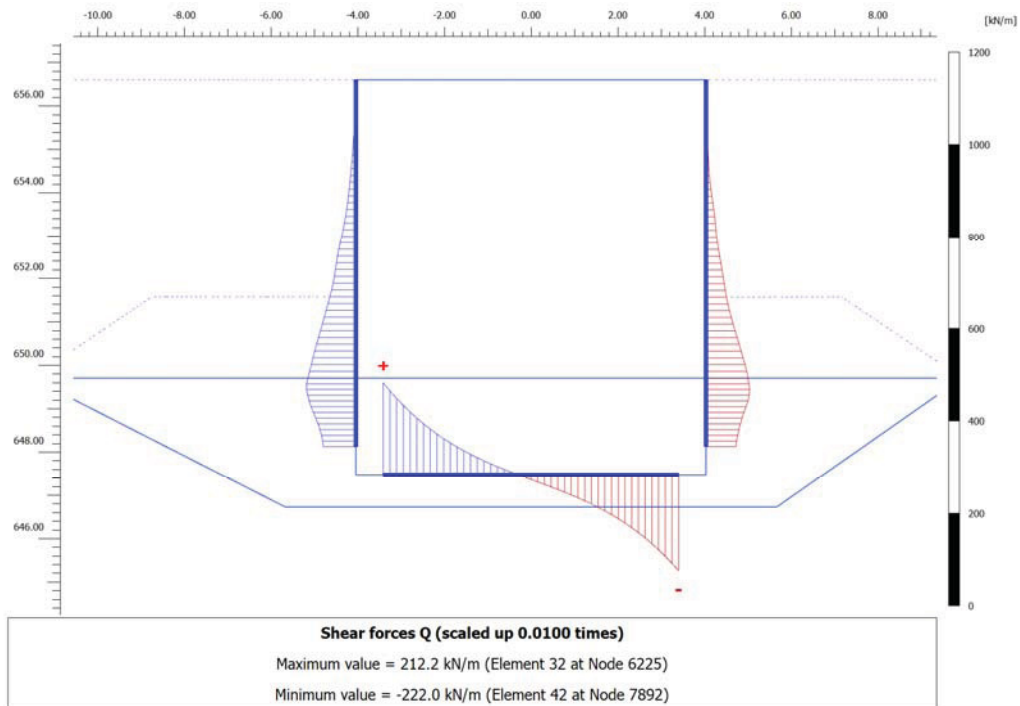


Figura 24 – Taglio allo SLV

Nella seguente tabella si riportano sinteticamente i massimi risultati in termini di azione interne sugli elementi in c.a., finalizzati alle verifiche di resistenza. Nella tabella, le azioni assiali negative sono di compressione.

Tabella 3 – Sintesi azioni interne elementi in c.a.

		SLE QP	SLE R	SLU STR	SLU Ecc	SLV
Paramento in elevazione B = 1.00 m H = 1.26 m	N [kN] =	-310	-330	-330	-313	-316
	M [kN m] =	371	555	722	1489	418
	T [kN] =	104	143	186	248	114
Ciabatta di fondazione B = 1.00 m H = 1.30 m	N [kN] =	78	126	164	191	82
	M [kN m] =	856	1089	1416	1834	890
	T [kN] =	214	226	294	320	222

I valori allo SLU statici derivanti dalla combinazione SLE Caratteristica/Rara (SLU R STR), si ottengono amplificando questi ultimi per il coefficiente parziale $\gamma_G = 1.3$, in accordo a quanto assunto al paragrafo 6.1 e 6.2.5.

Nelle seguenti immagini si espone il campo di spostamenti globali ottenuti al termine dell'analisi *c-φ-reduction* effettuata con la finalità di soddisfare la verifica di stabilità globale dell'opera, nella configurazione di scavo massimo e in condizioni sismiche. Nella successiva immagine si riporta anche il diagramma dell'incremento del fattore di sicurezza con lo spostamento totale di un punto di controllo. Quest'ultimo evidenzia che il fattore di sicurezza alla stabilità globale ottenuto è superiore al minimo imposto dalla normativa, pari a 1.375 (=1.25·1.1) (cfr. 6.1 e 6.2.8), pertanto la verifica di stabilità globale è soddisfatta. L'analisi soddisfa inoltre anche la verifica di capacità portante della fondazione, ottenendo $FS > 1.25$ (=1.25·1.0), che corrisponde alla combinazione SLU GEO.

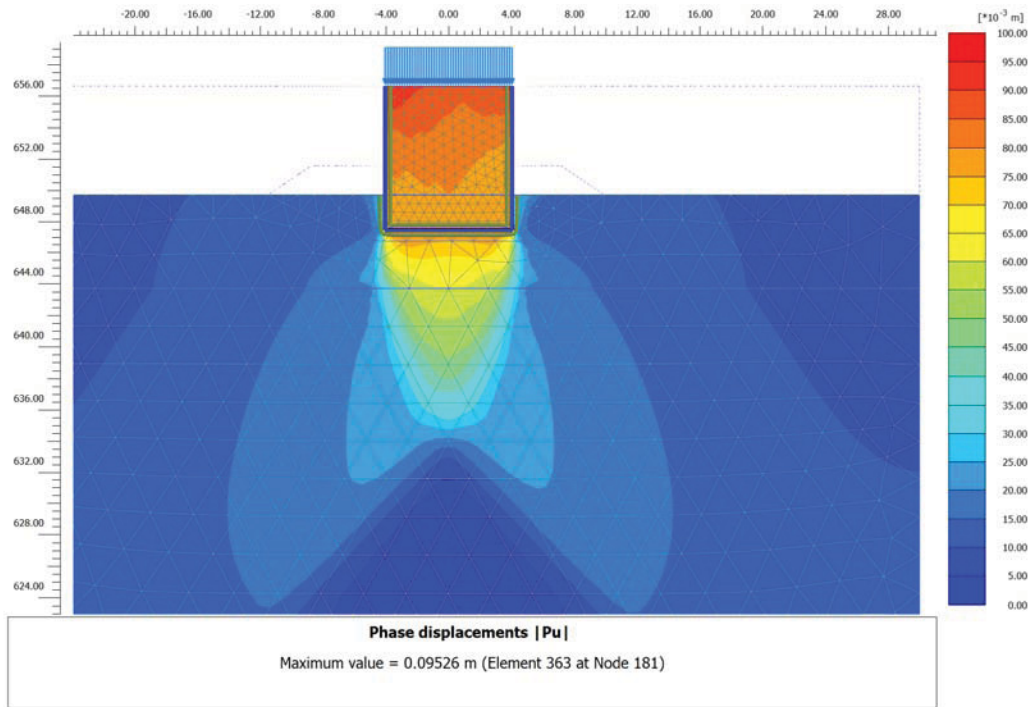


Figura 25 – Spostamenti globali al termine della verifica di stabilità globale, in fase statica (SLE R), per FS > 2.0

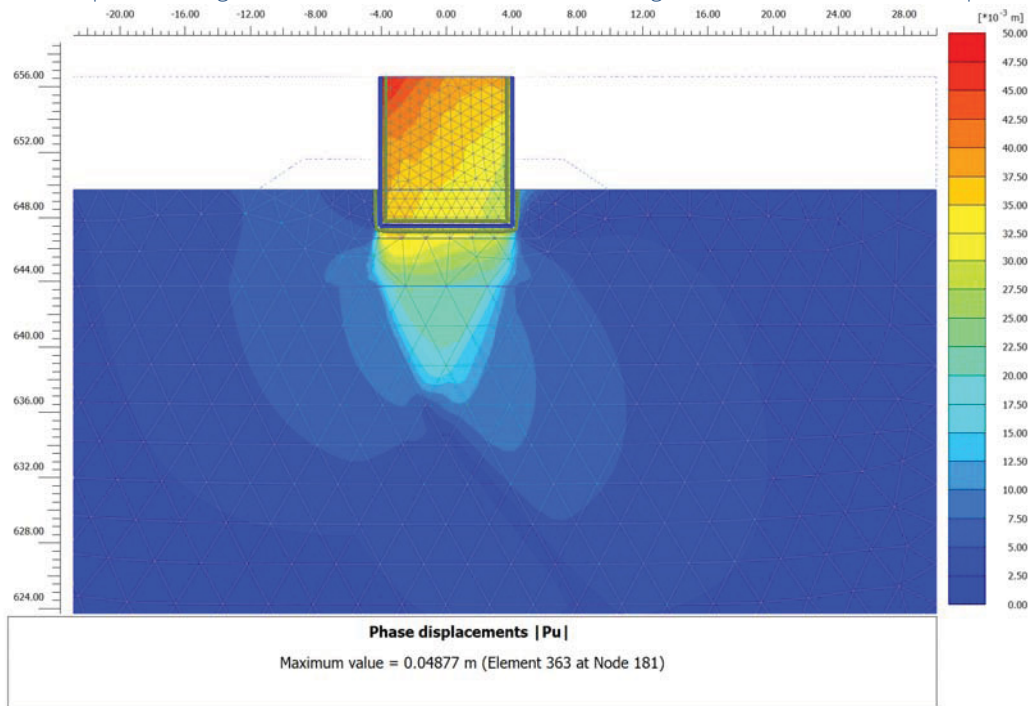


Figura 26 – Spostamenti globali al termine della verifica di stabilità globale, in fase sismica (SLV GEO), per FS = 1.67

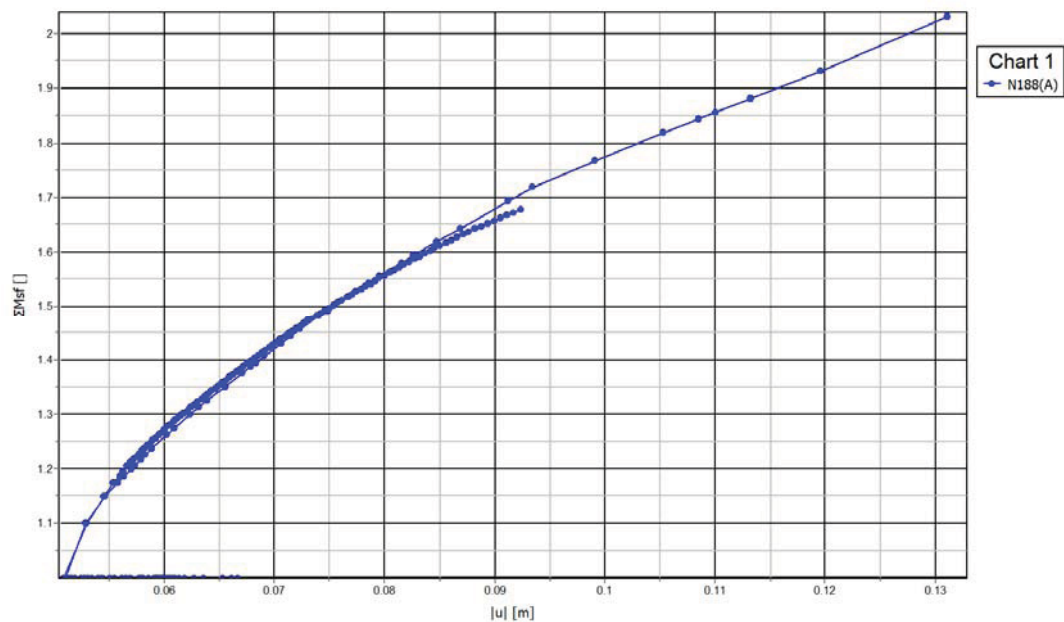


Figura 27 – Sicurezza alla stabilità globale Vs spostamento totale del punto di controllo (FS=1.67)

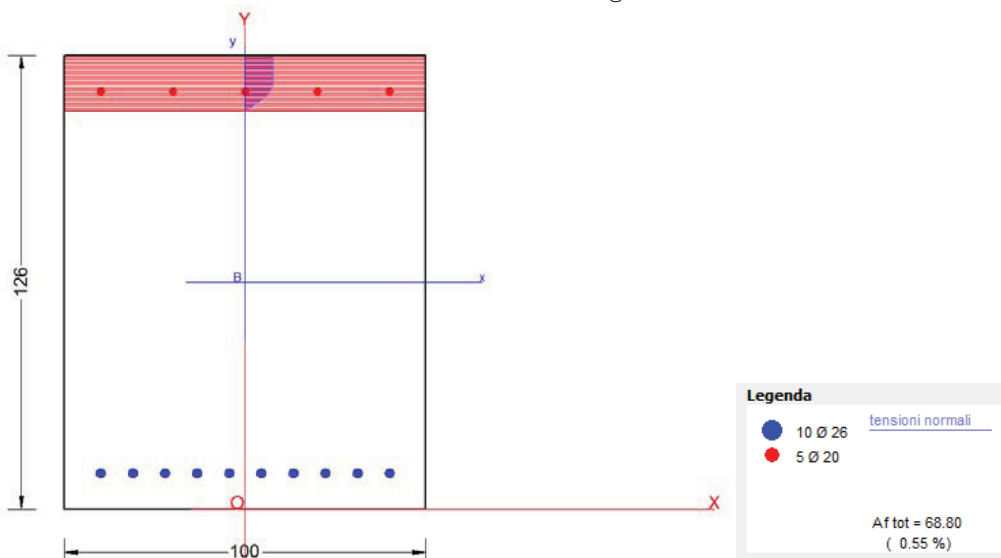
6.6 VERIFICHE DI RESISTENZA DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI

Di seguito si riportano le verifiche di resistenza della soletta di fondazione e del paramento in elevazione per tutte le sezioni tipo, sia in forma grafica con rappresentazione della distribuzione delle tensioni in condizioni ultime, sia in forma numerica con l'output di verifica. Il significato della terminologia utilizzata è riportato in Allegato 1. Le verifiche sono condotte per tutte le terne di sollecitazioni esposte in Tabella 3.

Per il paramento in elevazione si prevede la seguente armatura di calcolo:

- Ferri longitudinali lato interno: $\varnothing 26/10$
- Ferri longitudinali lato esterno: $\varnothing 20/20$

La figura seguente mostra la schermata del codice di verifica per la combinazione maggiormente critica, evidenziando la geometria della sezione, le armature longitudinali di calcolo e la distribuzione delle tensioni in condizioni ultime. Il tabulato successivo mostra i risultati di dettaglio di tutte le verifiche effettuate.



ST.LIM.ULTIMI - SFORZI PER OGNI COMBINAZIONE ASSEGNATA

N°Comb.	N	Mx	Vy	MT
1	330.00	722.00	186.00	0.00
2	313.00	1489.00	248.00	0.00
3	316.00	418.00	114.00	0.00

COMB. RARE (S.L.E.) - SFORZI PER OGNI COMBINAZIONE ASSEGNATA

N°Comb.	N	Mx
1	330.00	555.00

COMB. QUASI PERMANENTI (S.L.E.) - SFORZI PER OGNI COMBINAZIONE ASSEGNATA

N°Comb.	N	Mx
1	310.00	371.00 (1077.20)

METODO AGLI STATI LIMITE ULTIMI - RISULTATI PRESSO-TENSO FLESSIONE

N°Comb	Ver	N	Mx	N ult	Mx ult	Mis.Sic.	Yn	M sn	x/d	C.Rid.	As Tesa
1	S	330.00	722.00	330.06	2447.19	3.353	110.3	2317.97	---	---	---
2	S	313.00	1489.00	312.79	2438.41	1.633	110.4	2310.36	---	---	---
3	S	316.00	418.00	316.18	2440.13	5.716	110.4	2311.73	---	---	---

METODO SLU - VERIFICHE A TAGLIO SENZA ARMATURE TRASVERSALI (§ 4.1.2.1.3.1 NTC)

N°Comb	Ver	Vsdu	Vwct	d	bw	Ro	Scp
1	S	186.00	506.58	116.0	100.0	0.0046	0.03
2	S	248.00	504.23	116.0	100.0	0.0046	0.02
3	S	114.00	504.65	116.0	100.0	0.0046	0.03

COMBINAZIONI RARE IN ESERCIZIO - VERIFICA MASSIME TENSIONI NORMALI

N°Comb	Ver	Sc max	Yc max	Sc min	Yc min	Sf min	Ys min	Dw Eff.	Ac Eff.	As Eff.	D barre
1	S	2.12	126.0	-1.51	0.0	-18.3	116.0	0.0	0	0.0	0.0

COMBINAZIONI QUASI PERMANENTI IN ESERCIZIO - VERIFICA MASSIME TENSIONI NORMALI

N°Comb	Ver	Sc max	Yc max	Sc min	Yc min	Sf min	Ys min	Dw Eff.	Ac Eff.	As Eff.	D barre
1	S	1.49	126.0	-0.95	0.0	-11.4	116.0	0.0	0	0.0	0.0

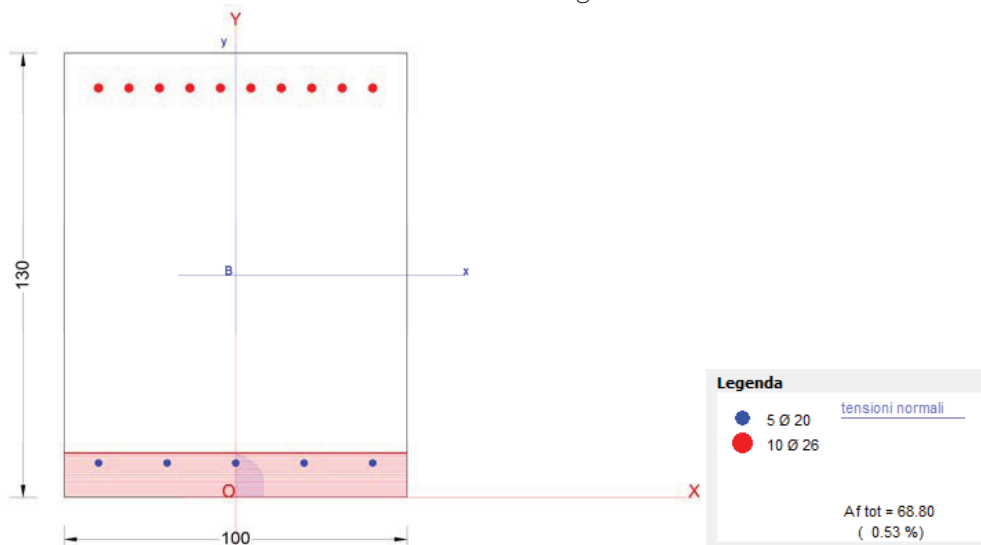
COMBINAZIONI QUASI PERMANENTI IN ESERCIZIO - VERIFICA APERTURA FESSURE

N°Comb	Ver	ScImax	ScImin	Sc Eff	K3	Beta12	Eps	Srm	Ap.Fess.	M Fess.
1	S	1.49	-0.95	0.0	---	---	---	---	---	1077.20

Per la soletta di fondazione si prevede la seguente armatura di calcolo:

- Ferri longitudinali superiori: $\varnothing 26/10$
- Ferri longitudinali inferiori: $\varnothing 20/20$
- Armatura trasversale: $\varnothing 16/25$

La figura seguente mostra la schermata del codice di verifica per la combinazione maggiormente critica, evidenziando la geometria della sezione, le armature longitudinali di calcolo e la distribuzione delle tensioni in condizioni ultime. Il tabulato successivo mostra i risultati di dettaglio di tutte le verifiche effettuate.



ST.LIM.ULTIMI - SFORZI PER OGNI COMBINAZIONE ASSEGNATA

N°Comb.	N	Mx	Vy	MT
1	-164.00	-1416.00	294.00	0.00
2	-191.00	-1834.00	320.00	0.00
3	-82.00	-890.00	222.00	0.00

COMB. RARE (S.L.E.) - SFORZI PER OGNI COMBINAZIONE ASSEGNATA

N°Comb.	N	Mx
1	-126.00	-1089.00

COMB. QUASI PERMANENTI (S.L.E.) - SFORZI PER OGNI COMBINAZIONE ASSEGNATA

N°Comb.	N	Mx
1	-78.00	-856.00 (-920.34)

METODO AGLI STATI LIMITE ULTIMI - RISULTATI PRESSO-TENSO FLESSIONE

N°Comb	Ver	N	Mx	N ult	Mx ult	Mis.Sic.	Yn	M sn	x/d	C.Rid.	As Tesa
1	S	-164.00	-1416.00	-164.04	-2271.73	1.626	12.9	-2168.24	---	---	---
2	S	-191.00	-1834.00	-190.81	-2257.15	1.238	12.8	-2155.30	---	---	---
3	S	-82.00	-890.00	-81.81	-2316.44	2.648	13.4	-2207.90	---	---	---

METODO AGLI STATI LIMITE ULTIMI - VERIFICHE A TAGLIO

N°Comb	Ver	Vsdu	Vrd	Vcd	Vwd	bw	Teta	Acw	ASt
1	N	294.00	0.00	2953.25	1699.39	100.0	21.80	1.000	2.8
2	N	320.00	0.00	2953.25	1699.39	100.0	21.80	1.000	3.0
3	N	222.00	0.00	2953.25	1699.39	100.0	21.80	1.000	2.1

COMBINAZIONI RARE IN ESERCIZIO - VERIFICA MASSIME TENSIONI NORMALI

N°Comb	Ver	Sc max	Yc max	Sc min	Yc min	Sf min	Ys min	Dw Eff.	Ac Eff.	As Eff.	D barre
1	S	5.12	0.0	0.00	33.3	-199.9	10.0	28.2	2820	53.1	8.9

COMBINAZIONI QUASI PERMANENTI IN ESERCIZIO - VERIFICA MASSIME TENSIONI NORMALI

N°Comb	Ver	Sc max	Yc max	Sc min	Yc min	Sf min	Ys min	Dw Eff.	Ac Eff.	As Eff.	D barre
1	S	4.04	0.0	0.00	33.7	-155.3	10.0	28.2	2820	53.1	8.9

COMBINAZIONI QUASI PERMANENTI IN ESERCIZIO - VERIFICA APERTURA FESSURE

N°Comb	Ver	Sclmax	Sclmin	Sc Eff	K3	Beta12	Eps	Srm	Ap.Fess.	M Fess.
1	S	2.63	-2.57	-14.4	0.195	0.50	0.000328	300	0.167	-920.34

7. ALLEGATO 1: TERMINOLOGIA UTILIZZATA NELLA VERIFICA DELLE SEZIONI IN C.A.

ST.LIM.ULTIMI - SFORZI PER OGNI COMBINAZIONE ASSEGNATA

N	Sforzo normale [kN] applicato nel baricentro (posit. se di compress.)
Mx	Coppia concentrata [kN m] applicata all'asse x baric. della sezione con verso positivo se tale da comprimere il lembo sup. della sezione
VY	Taglio [kN] in direzione parallela all'asse Y del riferim. generale
MT	Momento torcente [kN m]

COMB. RARE (S.L.E.) - SFORZI PER OGNI COMBINAZIONE ASSEGNATA

N	Sforzo normale [kN] applicato nel baricentro (positivo se di compress.)
Mx	Coppia [kNm] applicata all'asse x baricentrico con verso positivo se tale da comprimere il lembo superiore della sezione

COMB. QUASI PERMANENTI (S.L.E.) - SFORZI PER OGNI COMBINAZIONE ASSEGNATA

N	Sforzo normale [kN] applicato nel baricentro (positivo se di compress.)
Mx	Coppia [kNm] applicata all'asse x baricentrico (tra parentesi il Momento di fessurazione) con verso positivo se tale da comprimere il lembo superiore della sezione

METODO AGLI STATI LIMITE ULTIMI - RISULTATI PRESSO-TENSO FLESSIONE

Ver	S = combinazione verificata / N = combin. non verificata
N	Sforzo normale baricentrico assegnato [kN] (positivo se di compressione)
Mx	Momento flettente assegnato [kNm] riferito all'asse x baricentrico
N ult	Sforzo normale ultimo [kN] nella sezione (positivo se di compress.)
Mx ult	Momento flettente ultimo [kNm] riferito all'asse x baricentrico
Mis.Sic.	Misura sicurezza = rapporto vettoriale tra (N ult, Mx ult) e (N, Mx) Verifica positiva se tale rapporto risulta ≥ 1.000
Yneutro	Ordinata [cm] dell'asse neutro a rottura nel sistema di rif. X, Y, O sez.
Mx sn.	Momento flettente allo snervamento [kNm]
x/d	Rapp. di duttilità a rottura solo se N = 0 (travi)
C.Rid.	Coeff. di riduz. momenti in travi continue [formula (4.1.1)NTC]

METODO SLU - VERIFICHE A TAGLIO SENZA ARMATURE TRASVERSALI (§ 4.1.2.1.3.1 NTC)

Ver	S = comb.verificata a taglio/ N = comb. non verificata
Vsdu	Taglio agente [daN] uguale al taglio Vy di comb. (sollecit. retta)
Vwct	Taglio trazione resistente [kN] in assenza di staffe [formula (4.1.14)NTC]
d	Altezza utile sezione [cm]
bw	Larghezza minima sezione [cm]
Ro	Rapporto geometrico di armatura longitudinale [< 0.02]
Scp	Tensione media di compressione nella sezione [Mpa]

METODO AGLI STATI LIMITE ULTIMI - VERIFICHE A TAGLIO

Ver	S = comb.verificata a taglio-tors./ N = comb. non verificata
Vsdu	Taglio agente [kN] uguale al taglio Vy di comb. (sollecit. retta)
Vrd	Taglio resistente [kN] in assenza di staffe [formula (4.1.14)NTC]
Vcd	Taglio compressione resistente [kN] lato conglomerato [formula (4.1.19)NTC]
Vwd	Taglio trazione resistente [kN] assorbito dalle staffe [formula (4.1.18)NTC]
bw	Larghezza minima [cm] sezione misurata parallelam. all'asse neutro
Teta	Angolo [gradi sessadec.] di inclinazione dei puntoni di conglomerato
Acw	Coefficiente maggiorativo della resistenza a taglio per compressione
Ast	Area staffe/metro strettamente necessaria per taglio e torsione [cm ² /m]

COMBINAZIONI RARE IN ESERCIZIO - VERIFICA MASSIME TENSIONI NORMALI

Ver	S = combinazione verificata / N = combin. non verificata
Sc max	Massima tensione di compress.(+) nel conglom. in fase fessurata ([Mpa]
Yc max	Ordinata in cm della fibra corrisp. a Sc max (sistema rif. X,Y,0)
Sc min	Minima tensione di compress.(+) nel conglom. in fase fessurata ([Mpa]
Yc min	Ordinata in cm della fibra corrisp. a Sc min (sistema rif. X,Y,0)
Sf min	Minima tensione di trazione (-) nell'acciaio [Mpa]
Ys min	Ordinata in cm della barra corrisp. a Sf min (sistema rif. X,Y,0)
Dw Eff.	Spessore di conglomerato [cm] in zona tesa considerata aderente alle barre
Ac eff.	Area di congl. [cm ²] in zona tesa aderente alle barre (verifica fess.)
As eff.	Area Barre tese di acciaio [cm ²] ricadente nell'area efficace(verifica fess.)
D barre	Distanza media in cm tra le barre tese efficaci utilizzata nel calcolo di fessurazione (se Dbarre >140 viene posto Dbarre=140 nel calcolo di fess. [B.6.6.3 Circ. 252/'96])

COMBINAZIONI QUASI PERMANENTI IN ESERCIZIO - VERIFICA APERTURA FESSURE

Ver	S = combinazione verificata / N = combin. non verificata
ScImax	Massima tensione nel conglomerato nello STATO I non fessurato [Mpa]
ScImin	Minima tensione nel conglomerato nello STATO I non fessurato [Mpa]
Sc Eff	Tensione al limite dello spessore teso efficace nello STATO I [Mpa]
K3	Coeff. di normativa = $0,25 (ScImin + ScEff) / (2 ScImin)$
Beta12	Prodotto dei Coeff. di aderenza Beta1*Beta2
Eps	Deformazione unitaria media tra le fessure
Srm	Distanza media in mm tra le fessure
Ap.fess.	Apertura delle fessure in mm = $1,7 * Eps * Srm$
M fess.	Momento di prima fessurazione [kNm]