

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**U.O. INFRASTRUTTURE NORD**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**RADDOPPIO PONTE S. PIETRO – BERGAMO - MONTELLO**

**LOTTO 9: Opere Civili e Impianti Tecnologici di Piazzale per il completamento del raddoppio della linea Ponte SP – Bergamo e per lo spostamento provvisorio della linea Treviglio – Bergamo**

**VI04 - Viadotto via dei Caniana**

*Opere Provvisionali Spalla A: Relazione di Calcolo*

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

N B 1 R    0 9    D    2 6    C L    V I 0 4 A 4    0 0 3    A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	EMISSIONE ESECUTIVA	G. Grimaldi 	Febbraio 2021	A. Maran 	Febbraio 2021	M. Berlingieri 	Febbraio 2021	A. Perego Febbraio 2021 

File: NB1R09D26CLVI04A4003A

n. Elab.:

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>RADDOPPIO PONTE SAN PIETRO – BERGAMO – MONTELLO</b> LOTTO 9 VI04 – VIADOTTO DI VIA DEI CANIANA					
	<b>VIADOTTO VI04</b> <b>OPERE PROVVISORIALI SPALLA A</b>	COMMESSA <b>NBIR</b>	LOTTO <b>09</b>	CODIFICA <b>D 26 CL</b>	DOCUMENTO <b>VI 04 A4 003</b>	REV. <b>A</b>

## INDICE

1	PREMESSA .....	2
2	NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....	3
2.1	Normative e standard di riferimento.....	3
2.2	Elaborati di riferimento.....	4
3	MATERIALI.....	5
3.1	Calcestruzzo per pali, diaframmi di fondazione, cordoli opere provvisorie .....	5
3.1.1	<i>Calcestruzzo magro per getti di livellamento</i> .....	5
3.1.2	<i>Calcestruzzo pali, diaframmi di fondazione, cordoli opere provvisionali</i> .....	5
3.2	Acciaio .....	5
3.2.1	<i>Acciaio per armatura strutture in c.a.</i> .....	5
3.2.2	<i>Profilati e piastre metalliche</i> .....	6
4	DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA.....	7
5	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	9
5.1	Unità Ug1 – Sabbie ghiaiose e sabbie con ghiaia .....	9
5.1	Unità Ug3b – Argille sabbiose e argille con sabbia.....	9
5.2	Rilevato ferroviario .....	10
5.3	Stratigrafia .....	10
6	CRITERI GENERALI DI MODELLAZIONE ADOTTATI.....	11
6.1	Metodologia di calcolo .....	11
7	CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE E VERIFICA AI SENSI DEL D.M. 17-01-2018 ....	14
7.1	Metodo agli Stati Limite ed Approcci di Progetto .....	14
7.2	Metodo agli Stati Limite ed Approcci di Progetto .....	18
7.3	Modello geometrico di riferimento .....	19
8	ANALISI DELLE OPERE PROVVISORIALI.....	20
8.1	Sezione di calcolo per lo scavo della Spalla A.....	20
9	RISULTATI E VERIFICHE DELLA PARATIA.....	23
9.1	Risultati (Combinazione SLE).....	23
9.2	Risultati e verifiche SLU-STR (combinazione A1+M1+R1) .....	24
9.3	Verifica SLU-GEO paratia di pali (combinazione A2+M2+R1) .....	26

## 1 PREMESSA

Nella relazione di calcolo sono espone le metodologie e i risultati delle verifiche geotecnico-strutturali delle opere di sostegno provvisorie necessarie alla realizzazione degli scavi di sbancamento per le fondazioni della Spalla A del viadotto VI04 su via dei Caniana tra le progressive chilometriche 1+232 e 1+262.

	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>RADDOPPIO PONTE SAN PIETRO – BERGAMO – MONTELLO</b> LOTTO 9 VI04 – VIADOTTO DI VIA DEI CANIANA					
<b>VIADOTTO VI04</b> <b>OPERE PROVVISORIALI SPALLA A</b>	COMMESSA NBIR	LOTTO 09	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO VI 04 A4 003	REV. A	FOGLIO A3 di A17

## 2    **NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO**

### 2.1   **Normative e standard di riferimento**

Sono state prese a riferimento le seguenti Normative nazionali ed internazionali vigenti alla data di redazione del presente documento:

- [1]    *Ministero delle Infrastrutture, DM 17 gennaio 2018, Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»*
- [2]    *Ministero delle Infrastrutture e Trasporti, Circolare 21 Gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP. (G.U. n. 35 del 11 febbraio 2019), «Istruzioni per l'applicazione dell' Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018»*
- [3]    *Istruzione RFI DTC SI PS MA IFS 001 A - Manuale di Progettazione delle Opere Civili - Parte II - Sezione 2 - Ponti e Strutture*
- [4]    *Istruzione RFI DTC SI CS MA IFS 001 A - Manuale di Progettazione delle Opere Civili - Parte II - Sezione 3 - Corpo Stradale*
- [5]    *Regolamento (UE) N.1299/2014 della Commissione del 18 Novembre 2014 relativo alle specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema “infrastruttura” del sistema ferroviario dell'Unione europea modificato dal Regolamento di esecuzione (UE) n° 2019/776 della Commissione del 16 maggio 2019.*

	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>RADDOPPIO PONTE SAN PIETRO – BERGAMO – MONTELLO</b> <b>LOTTO 9</b> <b>VI04 – VIADOTTO DI VIA DEI CANIANA</b>					
<b>VIADOTTO VI04</b> <b>OPERE PROVVISORIALI SPALLA A</b>	COMMESSA <b>NBIR</b>	LOTTO <b>09</b>	CODIFICA <b>D 26 CL</b>	DOCUMENTO <b>VI 04 A4 003</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>A4 di A17</b>

## 2.2 Elaborati di riferimento

Vengono presi a riferimento tutti gli elaborati grafici progettuali di pertinenza.

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>RADDOPPIO PONTE SAN PIETRO – BERGAMO – MONTELLO</b> LOTTO 9 VI04 – VIADOTTO DI VIA DEI CANIANA</p>												
<p><b>VIADOTTO VI04</b> <b>OPERE PROVVISORIALI SPALLA A</b></p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NBIR</td> <td>09</td> <td>D 26 CL</td> <td>VI 04 A4 003</td> <td>A</td> <td>A5 di A17</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	NBIR	09	D 26 CL	VI 04 A4 003	A	A5 di A17
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
NBIR	09	D 26 CL	VI 04 A4 003	A	A5 di A17								

### 3 MATERIALI

Il progetto strutturale prevede l'uso dei materiali con le caratteristiche meccaniche minime riportate nei seguenti paragrafi.

#### 3.1 Calcestruzzo per pali, diaframmi di fondazione, cordoli opere provvisorie

##### *3.1.1 Calcestruzzo magro per getti di livellamento*

- Classe di resistenza: C12/15
- Classe di esposizione: X0

##### *3.1.2 Calcestruzzo pali, diaframmi di fondazione, cordoli opere provvisorie*

- Classe di resistenza: C25/30
- classe di esposizione: XC2
- classe di consistenza: S4
- dimensione massima dell'inerte :  $D_{max} = 32 \text{ mm}$
- copriferro minimo:  $c_{f,min} \geq 40 \text{ mm}$

#### 3.2 Acciaio

##### *3.2.1 Acciaio per armatura strutture in c.a.*

Barre a aderenza migliorata, saldabile, tipo B450C dotato delle seguenti caratteristiche meccaniche:

- tensione caratteristica di rottura:  $f_{tk} \geq 540 \text{ MPa}$
- tensione caratteristica di snervamento:  $f_{yk} \geq 450 \text{ MPa}$
- allungamento caratteristico:  $\geq 7.5 \%$
- rapporto tensione di rottura/ tensione di snervamento:  $f_{tk}/f_{yk} < 1.35$

### *3.2.2 Profilati e piastre metalliche*

- Acciaio tipo: EN 10025-S275 JR
- Tensione di rottura a trazione:  $f_{tk} \geq 430$  MPa
- Tensione di snervamento:  $f_{yk} \geq 275$  MPa

#### 4 DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA

L'opera di sostegno è costituita da una paratia a sbalzo di micropali diametro Ø200 mm disposti ad interasse 0.25 m, di lunghezza 6 m, collegati in testa da un cordolo in calcestruzzo di sezione 0.4x0.40 m. Lo sbalzo massimo è pari a circa 1.3m. L'opera avrà funzione di sostegno allo scavo in adiacenza al via dei Caniana.

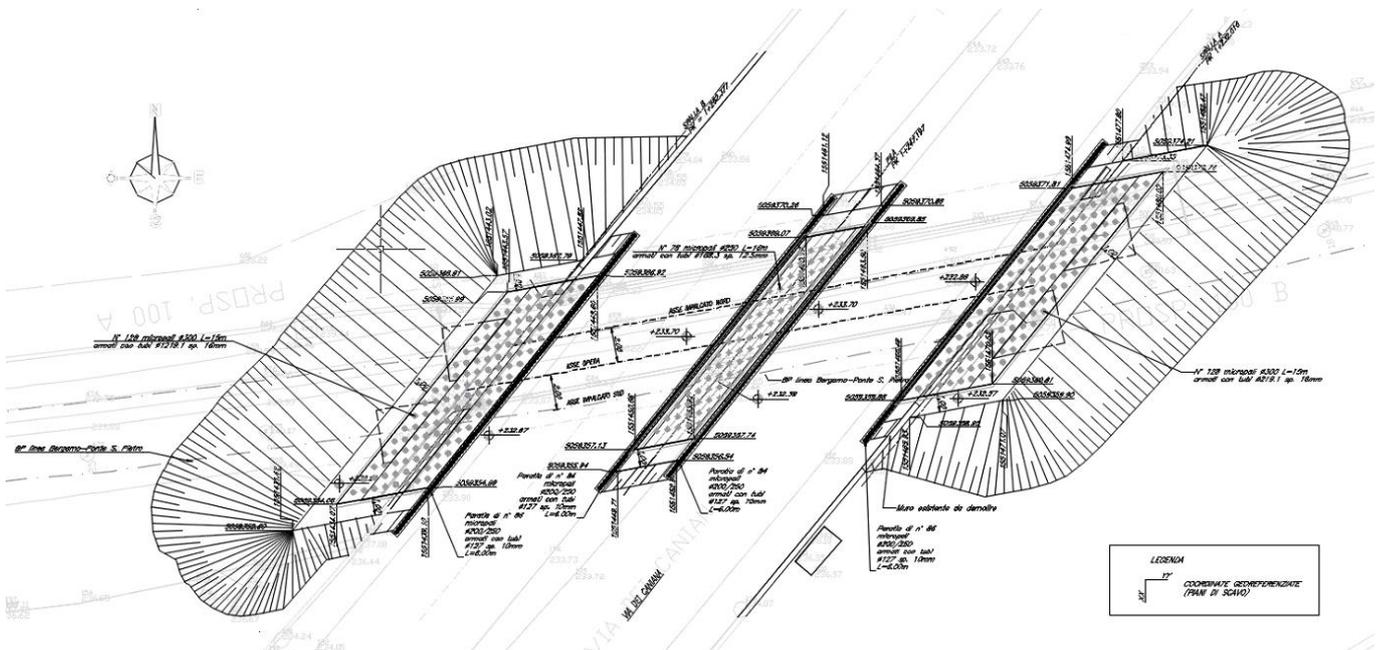


Figura 1 – Spalla A pianta

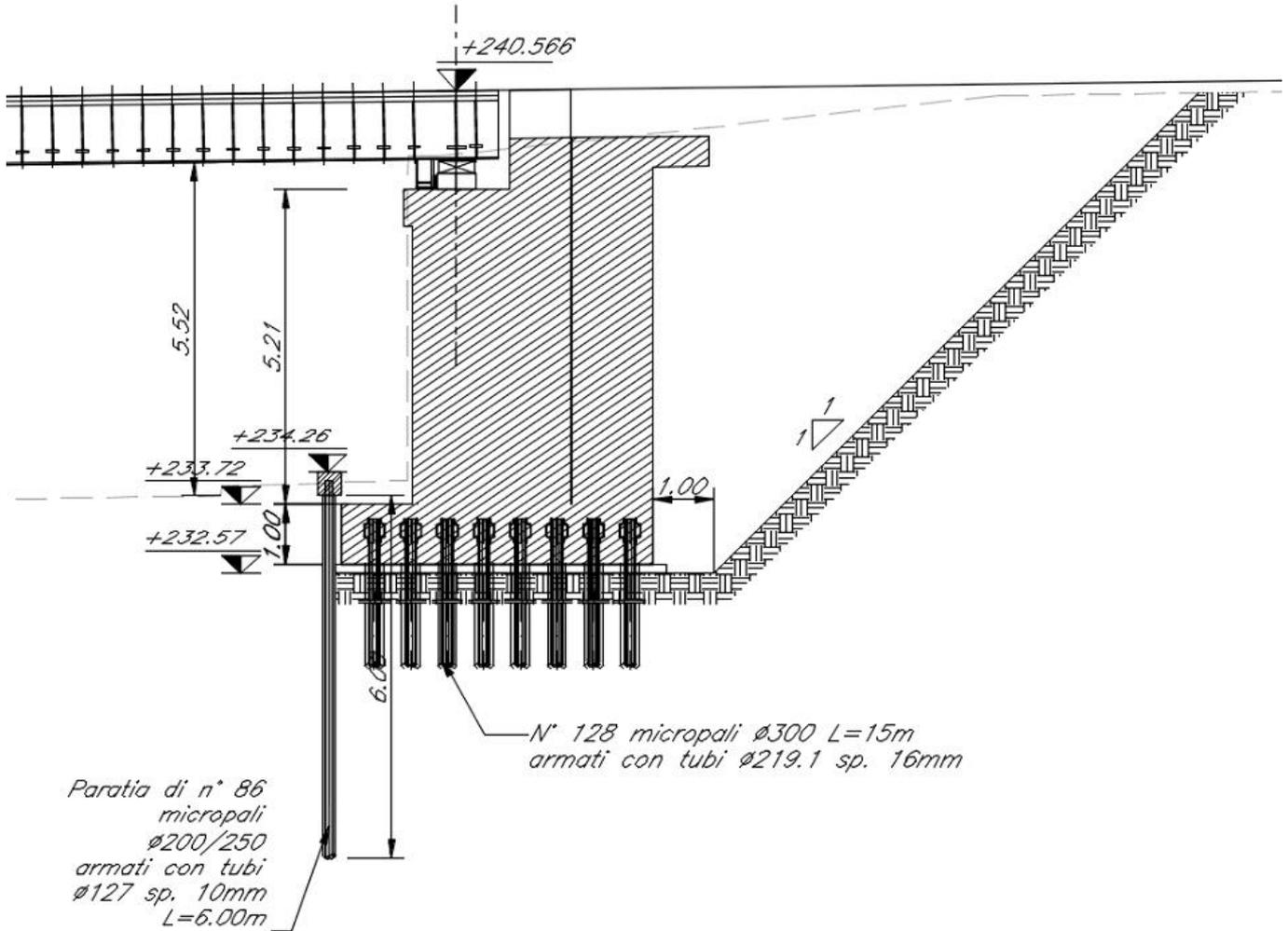


Figura 2 – Spalla A sezione

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>RADDOPPIO PONTE SAN PIETRO – BERGAMO – MONTELO</b> LOTTO 9 VI04 – VIADOTTO DI VIA DEI CANIANA					
	<b>VIADOTTO VI04</b> <b>OPERE PROVVISORIALI SPALLA A</b>	COMMESSA <b>NBIR</b>	LOTTO <b>09</b>	CODIFICA <b>D 26 CL</b>	DOCUMENTO <b>VI 04 A4 003</b>	REV. <b>A</b>

## 5 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Nel seguito si riporta la stratigrafia di progetto ed i valori dei parametri geotecnici caratteristici delle unità presenti nel tratto di linea interessato dal progetto.

### 5.1 Unità Ug1 – Sabbie ghiaiose e sabbie con ghiaia

Sabbie medio-grosse e ghiaie eterometriche, talvolta limose, nella parte più superficiale si ha anche la presenza di resti vegetali, di colore marrone grigio, umide. Sono caratterizzate da resistenze medio – alte, con SPT mediamente tra 15 e 50 colpi/30 cm e Vs da prove Masw variabili tra 150 e 400 m/s.

	Ug1
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	20
$\phi$ (°)	35
$c'$ (kPa)	0
$c_u$ (kPa)	-
$E_{op}$ (MPa)	27.5
$k_v$ (m/s)	1.00E-06

### 5.1 Unità Ug3b – Argille sabbiose e argille con sabbia

Argille sabbiose e argille con sabbia, a volte limose, debolmente ghiaiose, di colore nocciola, da consistenti a molto consistenti. Sono caratterizzate da valori di N<sub>spt</sub> medio alti (generalmente da 20 a 50), valori di pocket penetrometers da 1.0 a 2.5 kg/cm<sup>2</sup>) e Vs da prove Masw nell'ordine dei 300-400 m/s.

	Ug3b
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	19
$\phi$ (°)	24
$c'$ (kPa)	0
$c_u$ (kPa)	50-100
$E_{op}$ (MPa)	37.5
$k_v$ (m/s)	1.0E-06

	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>RADDOPPIO PONTE SAN PIETRO – BERGAMO – MONTELLO</b> LOTTO 9 VI04 – VIADOTTO DI VIA DEI CANIANA					
	<b>VIADOTTO VI04</b> <b>OPERE PROVVISORIALI SPALLA A</b>	COMMESSA <b>NBIR</b>	LOTTO <b>09</b>	CODIFICA <b>D 26 CL</b>	DOCUMENTO <b>VI 04 A4 003</b>	REV. <b>A</b>

## 5.2 Rilevato ferroviario

Per i materiali costituenti il rilevato ferroviario sono stati assunti i seguenti parametri

	R
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	19
$\phi$ (°)	35
$c'$ (kPa)	0
$c_u$ (kPa)	-
$E_{op}$ (MPa)	50
$k_v$ (m/s)	-

## 5.3 Stratigrafia

Nel dimensionamento delle opere è stata considerata la seguente stratigrafia

- per profondità comprese tra 0.0 e 6.0m      Unità Ug1

Il livello idrico è stato considerato ben al di sotto del piede della paratia.

## 6 CRITERI GENERALI DI MODELLAZIONE ADOTTATI

### 6.1 Metodologia di calcolo

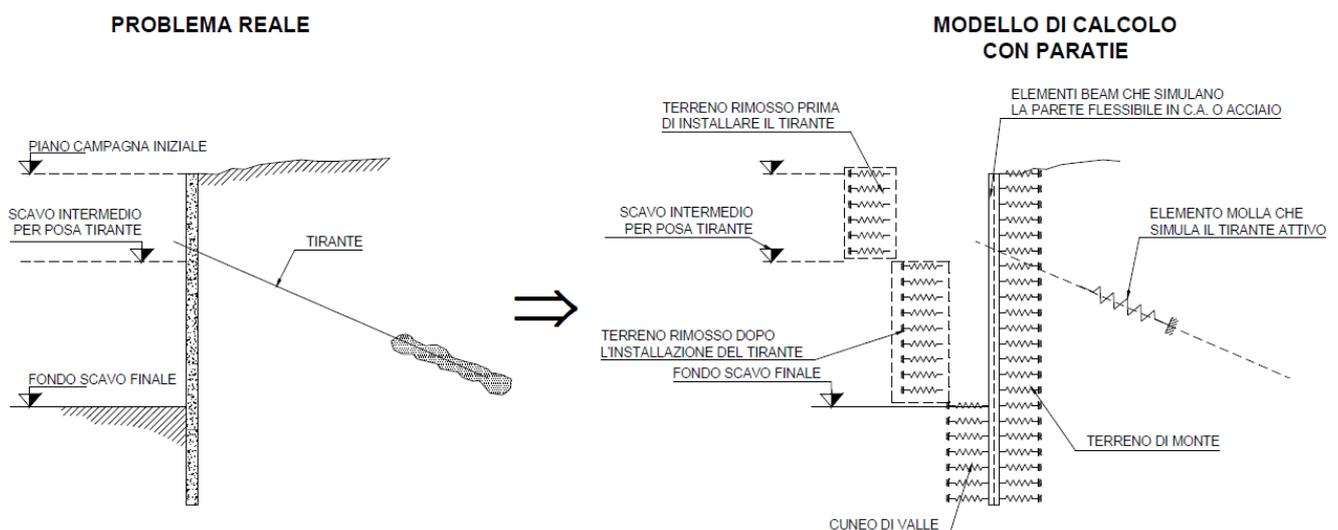
Al fine di rappresentare il comportamento delle paratie durante le varie fasi di lavoro (scavi e/o eventuale inserimento degli elementi di contrasto), è necessario l'impiego di un metodo di calcolo iterativo atto a simulare l'interazione in fase elasto-plastica terreno-paratia.

Lo studio del comportamento di un elemento di paratia inserito nel terreno viene effettuato tenendo conto della deformabilità dell'elemento stesso, considerato in regime elastico, e soggetto alle azioni derivanti dalla spinta dei terreni, dalle eventuali differenze di pressione idrostatiche, dalle spinte dovute ai sovraccarichi esterni e dalla presenza degli elementi di contrasto.

La paratia viene discretizzata con elementi finiti monodimensionali a due gradi di libertà per nodo (spostamento orizzontale e rotazione).

Il terreno viene schematizzato con delle molle secondo un modello elasto-plastico; esso reagisce elasticamente sino a valori limite dello spostamento, raggiunti i quali la reazione corrisponde, a seconda del segno dello stesso spostamento, ai valori limite della pressione attiva o passiva.

Gli spostamenti vengono computati a partire dalla situazione di spinta "a riposo".



Al fine di ottenere informazioni attendibili sull'entità delle sollecitazioni e delle deformazioni nelle paratie è necessario poterne seguire il comportamento durante le principali fasi esecutive.

A tal riguardo, l'interazione fra la paratia e il terreno, è simulata modellando la prima con elementi finiti caratterizzati da una rigidità flessionale ed il secondo con molle elasto-plastiche connesse ai nodi della paratia di rigidità proporzionale al modulo di rigidità del terreno. Inoltre, è possibile modellare eventuali elementi di sostegno della paratia (tiranti, puntoni) con molle dotate di opportuna rigidità. In particolare, la paratia è schematizzata attraverso un diaframma di spessore equivalente ricavato attraverso la seguente espressione:

$$s_{eq} = \sqrt[3]{12E_m J_p}$$

dove:

Em: modulo elastico del materiale costituente la paratia

Jp: inerzia della sezione della paratia

Il terreno si comporta come un mezzo elastico sino a che il rapporto tra la tensione orizzontale efficace ( $\sigma'_h$ ) e la tensione verticale efficace ( $\sigma'_v$ ) risulta compreso tra il coefficiente di spinta attivo ( $k_a$ ) e passivo ( $k_p$ ), mentre quando il rapporto è pari a  $k_a$  o a  $k_p$  il terreno si comporta come un mezzo elasto-plastico. Questo modello, nella sua semplicità concettuale, derivato direttamente dal modello di Winkler, consente una simulazione del comportamento del terreno adeguata agli scopi progettuali. In particolare, vengono superate le limitazioni dei più tradizionali metodi dell'equilibrio limite, non idonei a seguire il comportamento della struttura al variare delle fasi esecutive.

I parametri di deformabilità del terreno compaiono nella definizione della rigidità delle molle. Per un letto di molle distribuite la rigidità di ciascuna di esse,  $k$ , è data da:  $k = E / L$

ove  $E$  è un modulo di rigidità del terreno mentre  $L$  è una grandezza geometrica caratteristica. Poiché nel programma PARATIE le molle sono posizionate a distanze finite  $\Delta$ , la rigidità di ogni molla è:  $k = E\Delta / L$

ove  $E$  è un modulo di rigidità del terreno mentre  $L$  è una grandezza geometrica caratteristica. Poiché nel programma PARATIE le molle sono posizionate a distanze finite  $\Delta$ , la rigidità di ogni molla è:  $k = E\Delta / L$ .

Il valore di  $\Delta$  è fornito dalla schematizzazione ad elementi finiti. Il valore di  $L$  è fissato automaticamente dal programma. Esso rappresenta una grandezza caratteristica che è diversa a valle e a monte della paratia perché diversa è la zona di terreno coinvolta dal movimento in zona attiva e passiva. Si è scelto: in zona attiva (uphill):

$$L_A = \frac{2}{3} \ell_A \tan(45^\circ - \phi' / 2)$$

in zona passiva (downhill):

$$L_P = \frac{2}{3} \ell_P \tan(45^\circ + \phi' / 2)$$

Dove:  $\ell_A = \min\{l, 2H\}$ ;

Dove:  $\ell_P = \min\{l - H, H\}$

con

l = altezza totale della paratia

H = altezza corrente dello scavo.

La logica di questa scelta è illustrata nella pubblicazione di Becci e Nova (1987). Si assume in ogni caso un valore di H non minore di 1/10 dell'altezza totale della parete.

Il programma consente di seguire le fasi evolutive degli scavi a valle dell'opera, determinando, per ciascuna fase di scavo prevista, la deformata dell'opera e le sollecitazioni e gli stati tensionali nel terreno con essa interagente.

Il software consente di tener conto anche della presenza di vincoli lungo la paratia, sia di tipo elastico (molle /tiranti) che di tipo rigido.

La presenza dei tiranti viene infine schematizzata dal software come dei vincoli elastici, la cui deformabilità dipende dalle caratteristiche della sezione resistente in acciaio dei tiranti e dalla lunghezza libera degli stessi, eventualmente incrementata di una quantità funzione dell'efficienza ( $\leq 1$ ) associata al bulbo di ancoraggio.

## 7 CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE E VERIFICA AI SENSI DEL D.M. 17-01-2018

Nel presente paragrafo sono riportate alcune indicazioni salienti della Normativa riguardanti criteri generali di progettazione e verifica delle opere strutturali e geotecniche, oltre a specifiche da adottare per il caso delle Paratie di Sostegno.

### 7.1 Metodo agli Stati Limite ed Approcci di Progetto

Il progetto di opere strutturali e geotecniche va effettuato, come prescritto dal DM 17/01/08, con i criteri del metodo **semiprobabilistico agli stati limite** basati sull'impiego dei coefficienti parziali di sicurezza. Nel metodo semiprobabilistico agli stati limite, la sicurezza strutturale è verificata tramite il confronto tra la resistenza e l'effetto delle azioni. La normativa distingue inoltre tra **Stati Limite Ultimi** e **Stati Limite di Esercizio**.

La verifica della sicurezza nei riguardi degli **stati limite ultimi** di resistenza è stata effettuata con il “metodo dei coefficienti parziali” di sicurezza espresso dalla equazione formale:  $R_d \geq E_d$ . Dove:

$R_d$  è la resistenza di progetto

$$R_d = \frac{1}{\gamma_R} R \left[ \gamma_F F_k ; \frac{X_k}{\gamma_M} ; a_d \right]$$

$E_d$  è il valore di progetto dell'effetto delle azioni.

$$E_d = E \left[ \gamma_F F_k ; \frac{X_k}{\gamma_M} ; a_d \right] \quad \text{oppure} \quad E_d = \gamma_E \cdot E \left[ F_k ; \frac{X_k}{\gamma_M} ; a_d \right]$$

Il coefficiente  $\gamma_R$  opera direttamente sulla resistenza del sistema.

I coefficienti parziali di sicurezza,  $\gamma_{Mi}$  e  $\gamma_{Fj} = \gamma_{Ej}$ , associati rispettivamente al materiale  $i$ -esimo e all'azione  $j$ -esima, tengono in conto la variabilità delle rispettive grandezze e le incertezze relative alle tolleranze geometriche e all'affidabilità del modello di calcolo.

In accordo a quanto stabilito al §2.6.1 del DM 17.01.18, la verifica della condizione  $R_d \geq E_d$  deve essere effettuata impiegando diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali, rispettivamente definiti per le azioni (A1 e A2), per i parametri geotecnici (M1 e M2) e per le resistenze (R1, R2 e R3). I diversi gruppi di coefficienti di sicurezza parziali sono scelti nell'ambito di due approcci progettuali distinti e alternativi. Nel primo Approccio progettuale (**Approccio 1**) le verifiche si eseguono con due diverse combinazioni di gruppi di coefficienti ognuna delle quali può essere critica per differenti aspetti dello stesso progetto, convenzionalmente indicate come di seguito:

*A1+M1+R1*

*A2+M2+R2*

Nel secondo approccio progettuale (**Approccio 2**) le verifiche si eseguono con un'unica combinazione di gruppi di coefficienti

Gli stati limite di verifica si distinguono in genere in:

- **EQU** perdita di equilibrio della struttura fuori terra, considerata come corpo rigido.
- **STR** raggiungimento della resistenza degli elementi strutturali.
- **GEO** raggiungimento della resistenza del terreno interagente con la struttura con sviluppo di meccanismi di collasso dell'insieme terreno-struttura;
- **UPL** perdita di equilibrio della struttura o del terreno, dovuta alla spinta dell'acqua (sollevamento per galleggiamento).
- **HYD** erosione e sifonamento del terreno dovuta ai gradienti idraulici.

I coefficienti parziali da applicare alle azioni sono quelli definiti alla Tab 2.6.I del DM 17.01.18 di seguito riportata per chiarezza espositiva:

Tab. 2.6.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU

		Coefficiente	EQU	A1	A2
		$\gamma_F$			
Carichi permanenti $G_1$	Favorevoli	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti non strutturali $G_2^{(1)}$	Favorevoli	$\gamma_{G2}$	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevoli	$\gamma_Q$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3

<sup>(1)</sup> Nel caso in cui l'intensità dei carichi permanenti non strutturali o di una parte di essi (ad es. carichi permanenti portati) sia ben definita in fase di progetto, per detti carichi o per la parte di essi nota si potranno adottare gli stessi coefficienti parziali validi per le azioni permanenti.

Nella Tab. 2.6.I il significato dei simboli è il seguente:

$\gamma_{G1}$  coefficiente parziale dei carichi permanenti  $G_1$ ;

$\gamma_{G2}$  coefficiente parziale dei carichi permanenti non strutturali  $G_2$ ;

$\gamma_Q$  coefficiente parziale delle azioni variabili Q.

Nel caso in cui l'azione sia costituita dalla spinta del terreno, per la scelta dei coefficienti parziali di sicurezza valgono le indicazioni riportate nel Capitolo 6.

I valori dei coefficienti parziali da applicare ai materiali e/o alle caratteristiche dei terreni (M) sono definiti nelle specifiche sezioni della norma, ed in particolare al Cap. 4 per ciò che concerne i

coefficienti parziali da applicare ai materiali strutturali, mentre al Cap.6 sono indicati quelli da applicare alle caratteristiche meccaniche dei terreni.

I coefficienti parziali da applicare alle resistenze (R) sono infine unitari sulle capacità resistenti degli elementi strutturali, mentre assumono in genere valore diverso da 1 per ciò che concerne verifiche che attengono il controllo di meccanismi di stabilità locale o globale; i valori da adottare per ciascun meccanismo di verifica, sono definiti nelle specifiche sezioni di normativa dedicate al calcolo delle diverse opere geotecniche.

La verifica della sicurezza nei riguardi degli **stati limite di esercizio** viene effettuata invece controllando gli aspetti di funzionalità e lo stato tensionale e/o deformativo delle opere, con riferimento ad una combinazione di verifica caratterizzata da coefficienti parziali sulle azioni e sui materiali tutti unitari.

Al § 2.5.3 del DM 17.01.18, sono infine definiti i criteri con cui le diverse azioni presenti vanno combinate per ciascuno stato limite di verifica previsto dalla Normativa, di seguito riportati per completezza:

### 2.5.3. COMBINAZIONI DELLE AZIONI

Ai fini delle verifiche degli stati limite, si definiscono le seguenti combinazioni delle azioni.

– Combinazione fondamentale, generalmente impiegata per gli stati limite ultimi (SLU):

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots \quad [2.5.1]$$

– Combinazione caratteristica, cosiddetta rara, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) irreversibili:

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots \quad [2.5.2]$$

– Combinazione frequente, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) reversibili:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots \quad [2.5.3]$$

– Combinazione quasi permanente (SLE), generalmente impiegata per gli effetti a lungo termine:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots \quad [2.5.4]$$

– Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E:

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots \quad [2.5.5]$$

– Combinazione eccezionale, impiegata per gli stati limite ultimi connessi alle azioni eccezionali A:

$$G_1 + G_2 + P + A_d + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots \quad [2.5.6]$$

Gli effetti dell'azione sismica saranno valutati tenendo conto delle masse associate ai seguenti carichi gravitazionali:

$$G_1 + G_2 + \sum_j \psi_{2j} Q_{kj} \quad [2.5.7]$$

Nelle combinazioni si intende che vengano omessi i carichi  $Q_{kj}$  che danno un contributo favorevole ai fini delle verifiche e, se del caso, i carichi  $G_n$ .

Nell'ambito della progettazione geotecnica, la normativa definisce inoltre nella Tab 6.2.II, i valori dei coefficienti parziali M1/M2 da applicare ai parametri caratteristici dei terreni nell'ambito delle diverse combinazioni contemplate dai due approcci di progetto come già illustrati al paragrafo precedente:

**Tab. 6.2.II – 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	$c_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	$\gamma_r$	$\gamma_\gamma$	1,0	1,0

Tali valori agiscono sulle proprietà dei terreni, condizionando sia le azioni (spinte ed incrementi di spinta), sia le resistenze nei riguardi delle verifiche di stabilità dell'insieme opere-terreno con esse interagenti da effettuare caso per caso in funzione del tipo di opera. (Paratie, Muri, Pali di Fondazione ecc..)

Inoltre, ribadisce i valori dei coefficienti da applicare alle azioni nella Tab 6.2.II di seguito riportata:

Tali valori agiscono sulle proprietà dei terreni, condizionando sia le azioni (spinte ed incrementi di spinta), sia le resistenze nei riguardi delle verifiche di stabilità dell'insieme opere-terreno con esse interagenti da effettuare caso per caso in funzione del tipo di opera. (Paratie, Muri, Pali di Fondazione ecc..). Inoltre, ribadisce i valori dei coefficienti da applicare alle azioni nella Tab 6.2.II di seguito riportata:

**Tab. 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni**

	Effetto	Coefficiente Parziale $\gamma_F$ (o $\gamma_E$ )	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti $G_1$	Favorevole	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	$\gamma_Q$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

<sup>(1)</sup> Per i carichi permanenti  $G_2$  si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti  $\gamma_{G1}$

	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>RADDOPPIO PONTE SAN PIETRO – BERGAMO – MONTELLO</b> LOTTO 9 VI04 – VIADOTTO DI VIA DEI CANIANA					
<b>VIADOTTO VI04</b> <b>OPERE PROVVISORIALI SPALLA A</b>	COMMESSA NBIR	LOTTO 09	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO VI 04 A4 003	REV. A	FOGLIO A18 di A17

## 7.2 Metodo agli Stati Limite ed Approcci di Progetto

Per le paratie, al § 6.5.3.1.2 del DM 17.01.18 viene specificato che si devono considerare almeno i seguenti **Stati Limite Ultimi**, accertando che la condizione  $R_d \geq E_d$  sia soddisfatta per ogni stato limite considerato:

*SLU di tipo geotecnica (GEO) e di tipo idraulico (UPL e HYD)*

- collasso per rotazione intorno a un punto dell'opera (atto di moto rigido);
- collasso per carico limite verticale;
- sfilamento di uno o più ancoraggi;
- instabilità del fondo scavo in terreni a grana fine in condizioni non drenate;
- instabilità del fondo scavo per sollevamento;
- sifonamento del fondo scavo;

instabilità globale del complesso opera di sostegno-terreno;

*SLU di tipo strutturale (STR)*

- raggiungimento della resistenza in uno o più ancoraggi;
- raggiungimento della resistenza in uno o più puntoni o di sistemi di contrasto;
- raggiungimento della resistenza strutturale della paratia.

Per le paratie, i calcoli di progetto devono comprendere la verifica degli eventuali ancoraggi, puntoni o strutture di controventamento.

Con riferimento infine agli **Stati Limite di Esercizio**, bisogna controllare che gli spostamenti dell'opera di sostegno e del terreno circostante siano compatibili con la funzionalità dell'opera e con la sicurezza e funzionalità di eventuali manufatti adiacenti, oltre che verificare, nei riguardi degli aspetti strutturali, la compatibilità degli stati tensionali dei materiali costituenti l'opera.

In aggiunta a quanto sopra, al § C6.5.3.1.2 della Circolare Applicativa n 7 del 21 gennaio 2019 viene inoltre specificato quanto segue:

Nelle verifiche nei confronti di stati limite ultimi geotecnici delle paratie, si considera lo sviluppo di meccanismi di collasso determinati dalla mobilitazione della resistenza del terreno ed eventualmente della struttura e, specificamente, dal raggiungimento delle condizioni di equilibrio limite nel terreno interagente con la paratia o con parte di essa. Le analisi devono essere condotte con la Combinazione 2

	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>RADDOPPIO PONTE SAN PIETRO – BERGAMO – MONTELLO</b> LOTTO 9 VI04 – VIADOTTO DI VIA DEI CANIANA					
<b>VIADOTTO VI04</b> <b>OPERE PROVVISORIALI SPALLA A</b>	COMMESSA <b>NBIR</b>	LOTTO <b>09</b>	CODIFICA <b>D 26 CL</b>	DOCUMENTO <b>VI 04 A4 003</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>A19 di A17</b>

(A2+M2+R1),

Nelle verifiche nei confronti di stati limite per raggiungimento della resistenza negli elementi strutturali l'analisi deve essere svolta utilizzando la Combinazione 1 (A1+M1+R1), nella quale i coefficienti sui parametri di resistenza del terreno (M1) e sulla resistenza globale del sistema (R1) sono unitari, mentre le azioni permanenti e variabili sono amplificate mediante i coefficienti parziali del gruppo A1.

In relazione a tali specifiche integrative contenute nella Circolare Applicativa, ciascuno degli Stati Limite di verifica previsti per le Paratie, è stato esaminato riferendosi alla Combinazioni 1 per il caso deli Stati Limite STR ed alla Combinazione 2 per gli Stati Limite (GEO) e di tipo idraulico (UPL e HYD)

### 7.3 Modello geometrico di riferimento

Secondo quanto indicato al paragrafo 6.5.2.2 delle NTC2018, il modello geometrico deve tenere conto delle possibili variazioni del profilo del terreno a monte e a valle del paramento rispetto ai valori nominali. Nel caso in cui la funzione di sostegno è affidata alla resistenza del volume di terreno a valle dell'opera, la quota di valle deve essere diminuita di una quantità pari al minore dei seguenti valori:

- 10% dell'altezza di terreno da sostenere nel caso di opere a sbalzo;
- 10 % della differenza di quota fra il livello inferiore di vincolo e il fondo scavo nel caso di opere vincolate;
- 0,50 m.

Cautelativamente in fase di analisi la quota di fondo scavo è stata incrementata di 0.50 m.

Il suddetto paragrafo non si applica per le verifiche idrauliche.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>RADDOPPIO PONTE SAN PIETRO – BERGAMO – MONTELLO</b> LOTTO 9 VI04 – VIADOTTO DI VIA DEI CANIANA					
	<b>VIADOTTO VI04</b> <b>OPERE PROVVISORIALI SPALLA A</b>	COMMESSA NBIR	LOTTO 09	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO VI 04 A4 003	REV. A

## 8 ANALISI DELLE OPERE PROVVISORIALI

### 8.1 Sezione di calcolo per lo scavo della Spalla A

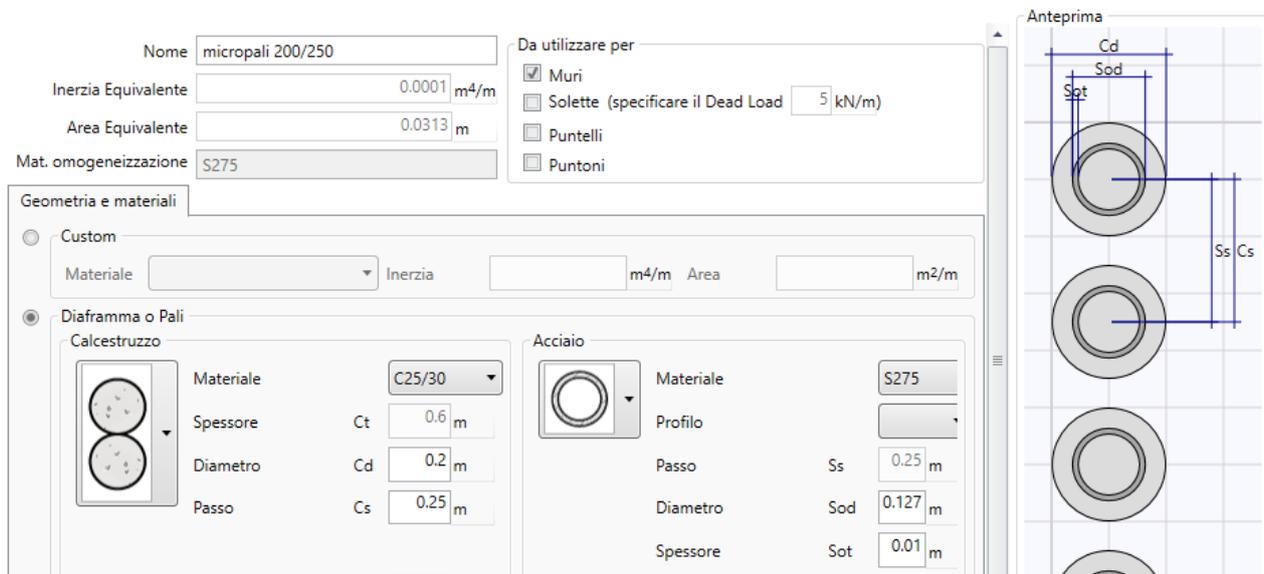
#### Paratia di pali in c.a.:

- $D_p = 200$  mm                      diametro di perforazione
- $i = 0.25$  m                            interasse longitudinale tra i pali
- $L = 6.0$  m                              lunghezza del palo
- $D = 127$  mm                          diametro armatura tubolare
- $S = 10$  mm                            spessore tubolare

#### Geometria Sezione Di Calcolo

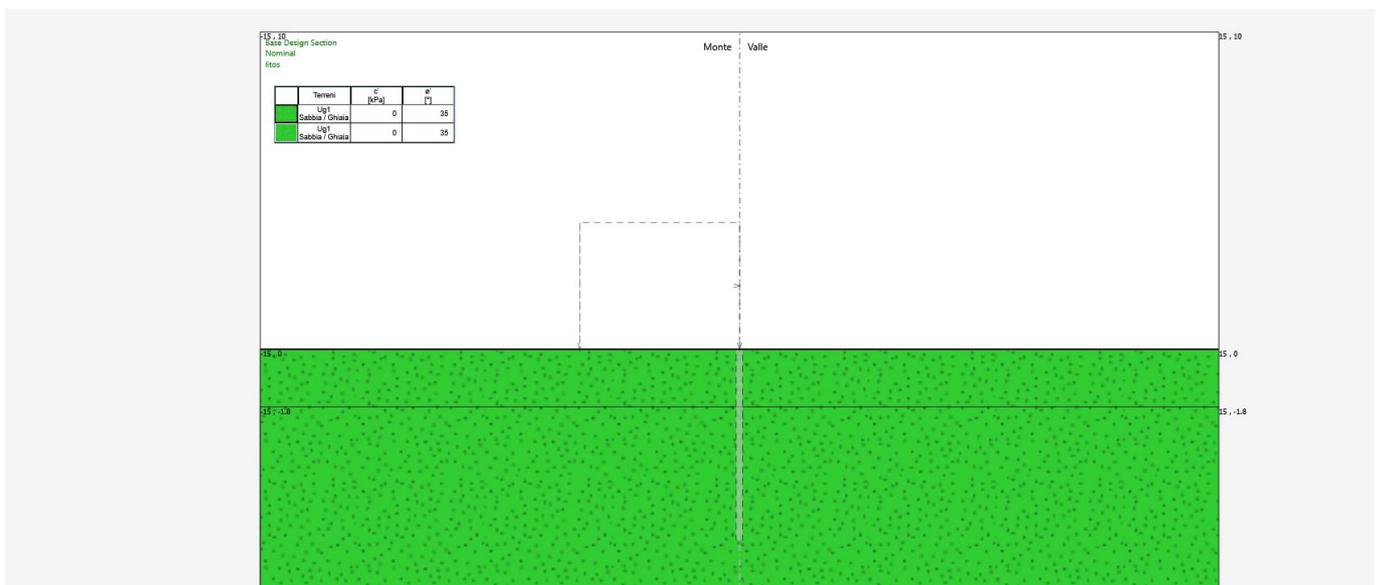
La massima altezza di scavo è di circa 1.3 m. Tale valore è stato incrementato rispetto a quello nominale di 0.5 m. Anche se in fase di scavo la circolazione in via dei Caniana verrà addossata alla pila, nel calcolo si è tenuto conto del carico accidentale pari a  $q = 20$  kPa in testa alla paratia.

Altezza fuori terra	1.80	[m]
Profondità di infissione	4.20	[m]
Altezza totale della paratia	6.0	[m]
Numero di file di pali	1	[m]
Interasse fra i pali della fila	0.25	[m]
Diametro pali	0.20	[m]

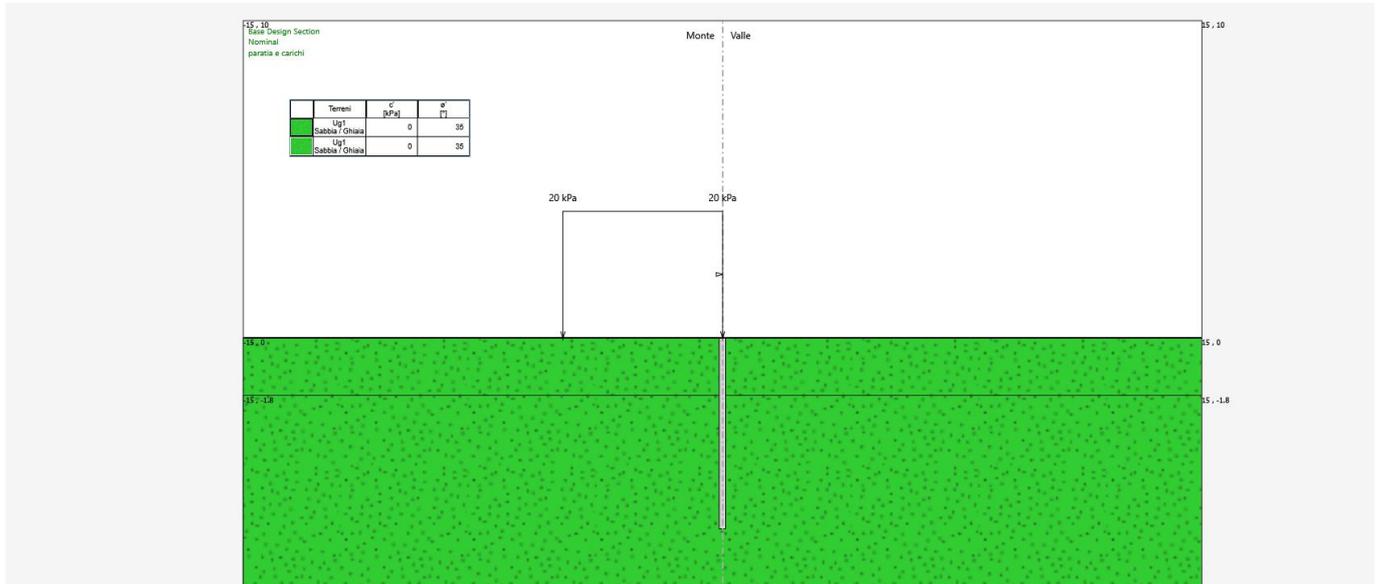


Il cordolo di collegamento dei pali ha dimensioni trasversali 0.40 m x 0.40 m. Di seguito si riportano le fasi di calcolo che sono state analizzate in successione.

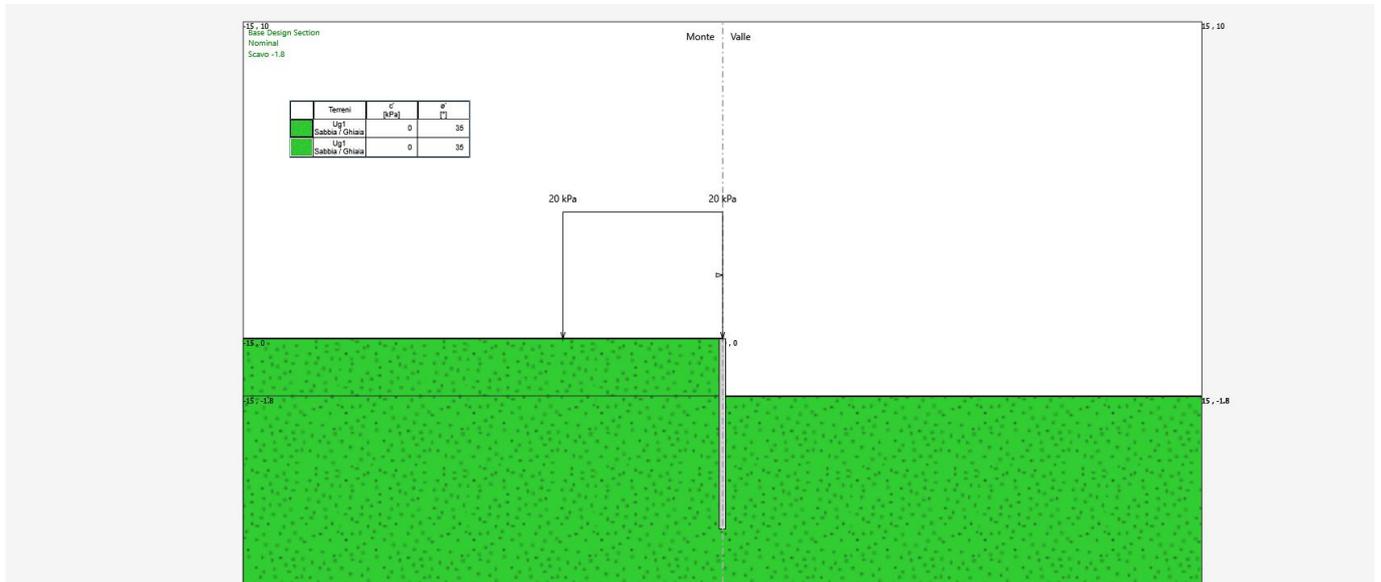
### FASE 0: Generazione stato tensionale iniziale



### FASE 1: Installazione delle paratie di pali e attivazione dei sovraccarichi



**FASE 2: Scavo fino ad una profondità di 1.80 m dal p.c**

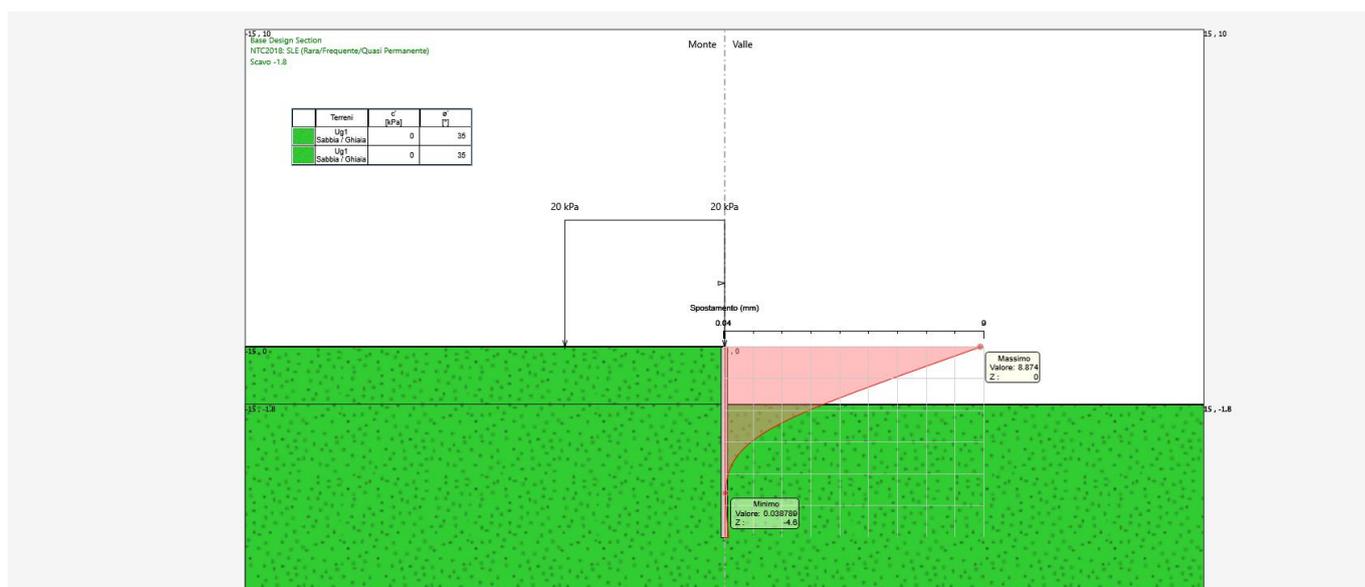


## 9 RISULTATI E VERIFICHE DELLA PARATIA

Nel seguito si espongono, in sintesi, i principali risultati di interesse progettuale.

### 9.1 Risultati (Combinazione SLE)

Dall'inviluppo degli spostamenti in combinazione SLE si osserva che lo spostamento massimo orizzontale della paratia risulta pari a circa 9 mm.



## 9.2 Risultati e verifiche SLU-STR (combinazione A1+M1+R1)

Dall'involuppo del momento flettente in combinazione A1+M1+R1 si osserva che il massimo valore sulla paratia si ha ad una quota di 2.80 m da testa palo e risulta pari a 27.4 kNm/m.

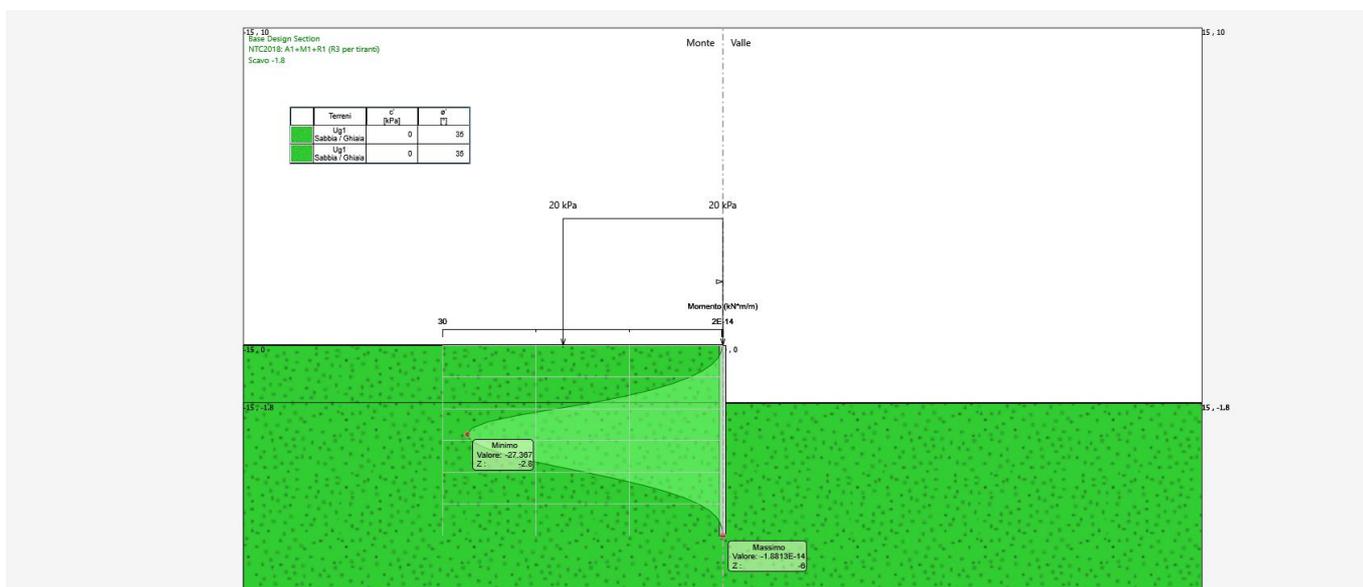


Figura 3: momento flettente allo SLU-STR

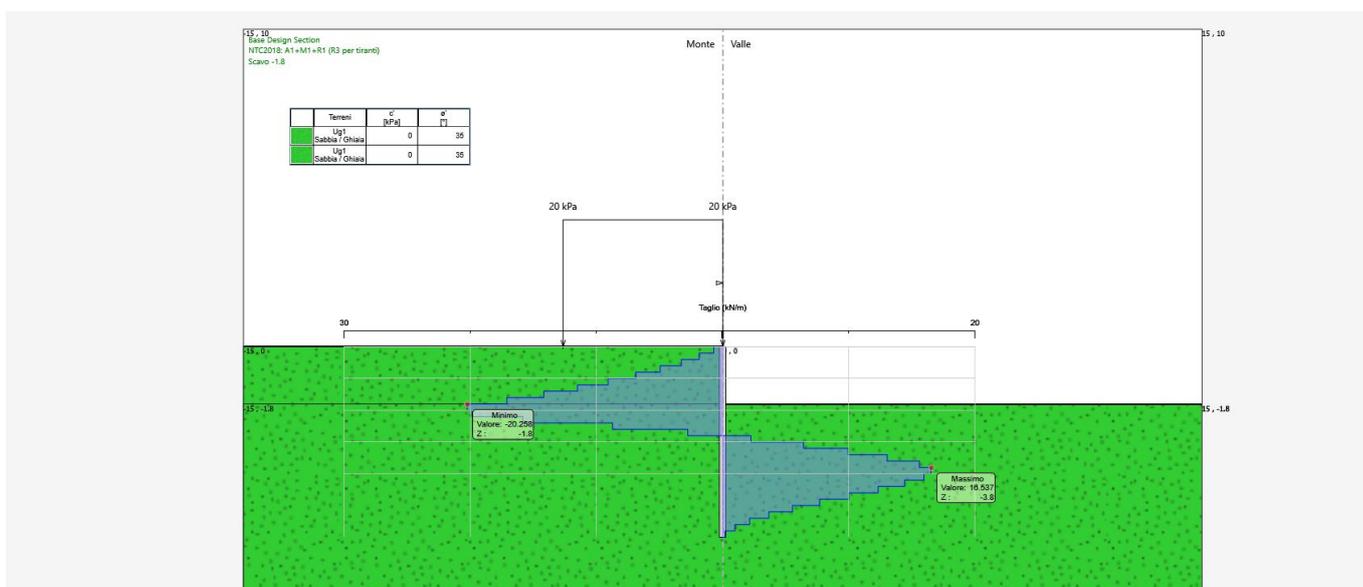


Figura 4: forza di taglio allo SLU-STR

Nel seguito si riportano i risultati delle verifiche strutturali dei micropali a presso-flessione e a

taglio.

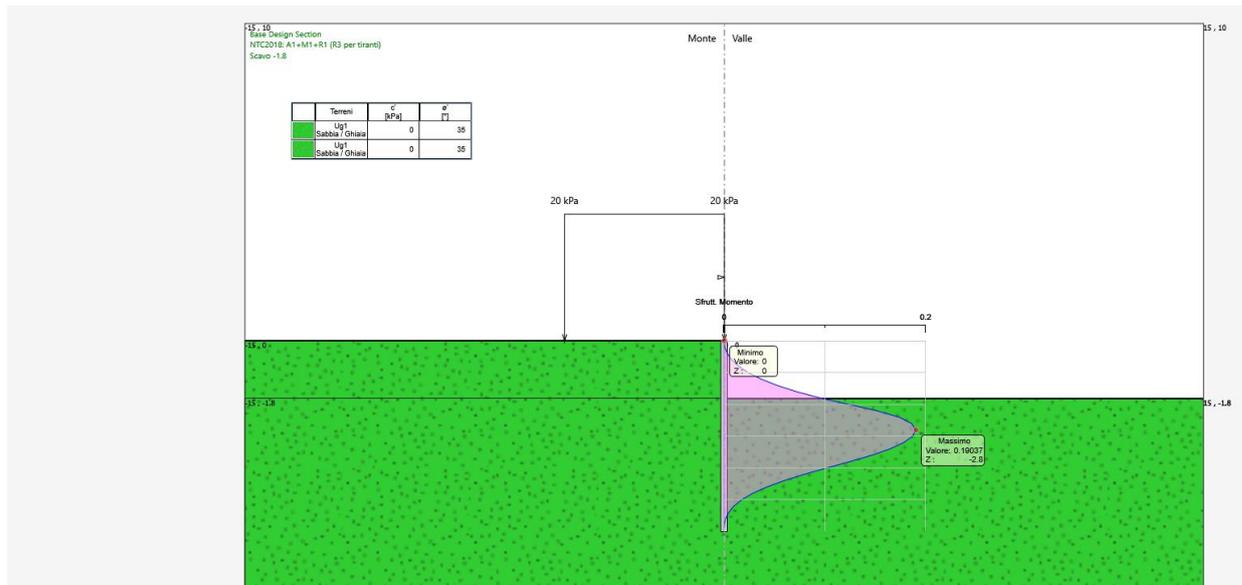


Figura 5: tasso di sfruttamento dell'armatura a flessione allo SLU-STR

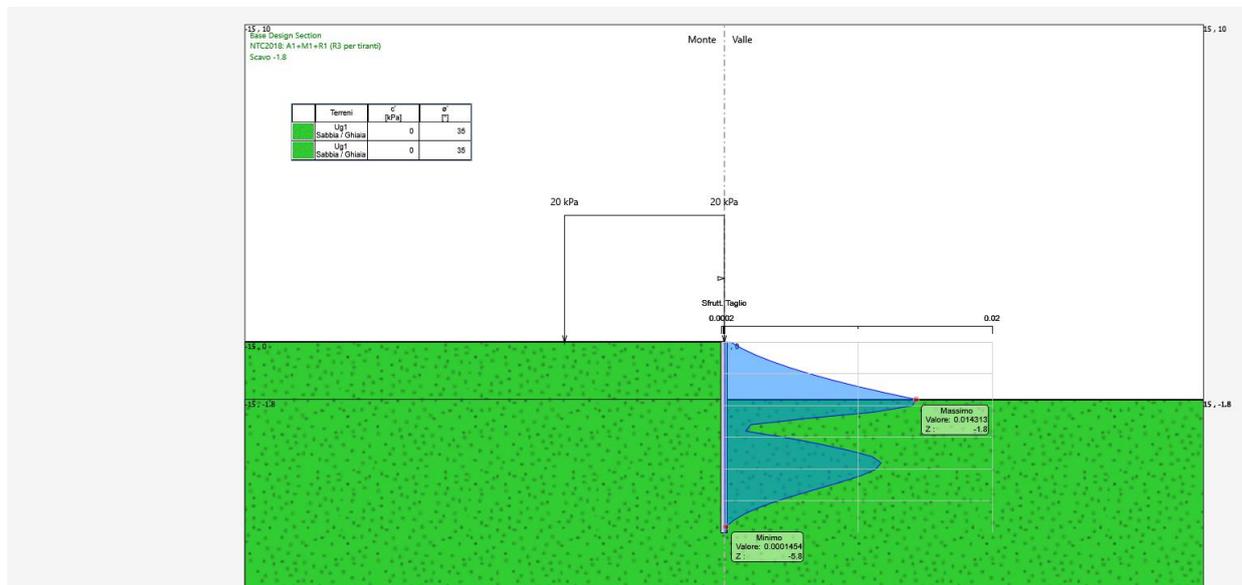


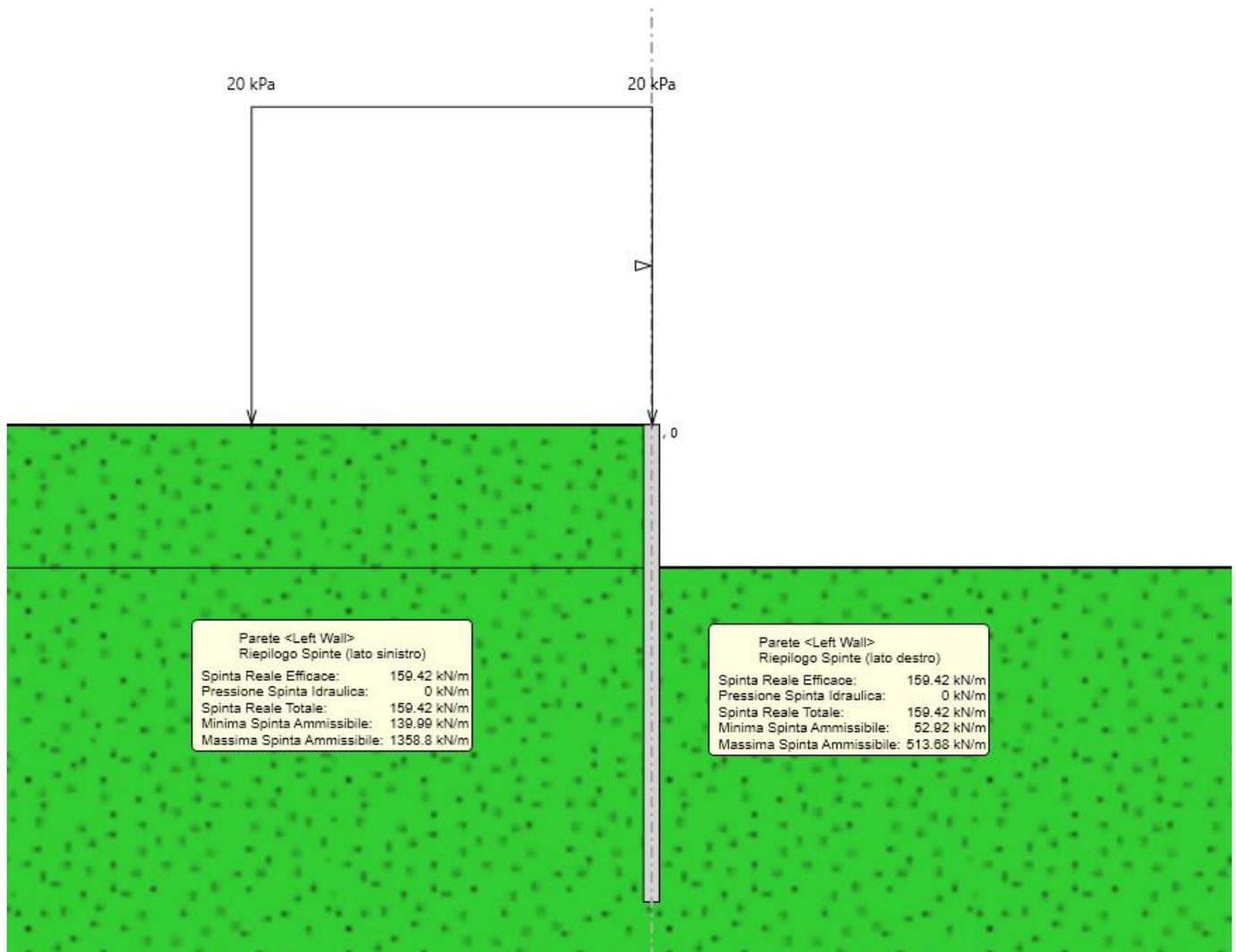
Figura 6: tasso di sfruttamento dell'armatura a taglio allo SLU-STR

**VIADOTTO VI04**  
**OPERE PROVVISORIALI SPALLA A**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NBIR	09	D 26 CL	VI 04 A4 003	A	A26 di A17

### 9.3 Verifica SLU-GEO paratia di pali (combinazione A2+M2+R1)

Il massimo rapporto di mobilitazione della spinta passiva è circa il 31%

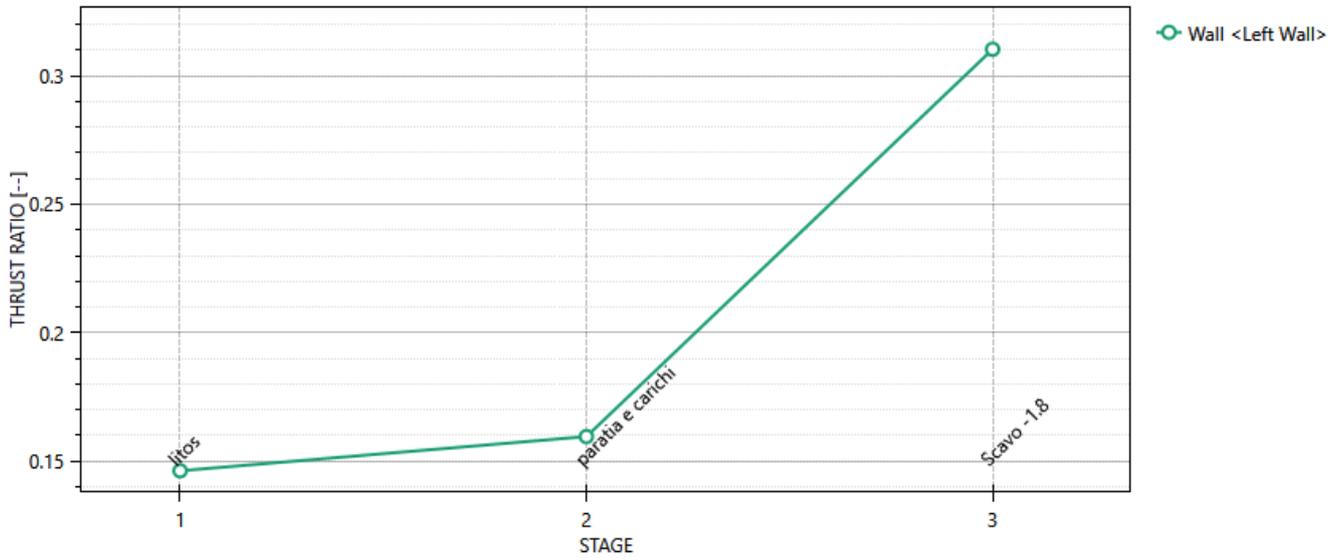


**VIADOTTO VI04**  
**OPERE PROVVISORIALI SPALLA A**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NBIR	09	D 26 CL	VI 04 A4 003	A	A27 di A17

### Massimi rapporti di mobilitazione spinta passiva

D.A. <NTC2018: A2+M2+R1>



### Massimi rapporti di mobilitazione spinta passiva

Result Title :Wall <Left Wall>

STAGE	THRUST_RATIO [-]
1	0.146
2	0.16
3	0.31