

INDICE

1. PREMESSA	3
2. DESCRIZIONE DELL'OPERA	3
3. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	5
3.1. DOCUMENTI REFERENZIATI.....	5
3.1.1. <i>Documenti di progetto</i>	5
3.1.2. <i>Normativa e istruzioni</i>	5
4. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI IMPIEGATI	6
4.1. CALCESTRUZZO.....	6
4.2. ACCIAIO.....	8
5. STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI	9
6. MODELLO DI CALCOLO	10
6.1. PARAMETRI DI SPINTA DEL TERRENO.....	11
6.2. PARAMETRI DI DEFORMABILITÀ DEL TERRENO.....	12
6.3. CARATTERISTICHE DI TARATURA DELLA MOLLA EQUIVALENTE IN TESTA ALLA PARATIA.....	13
7. ANALISI DEI CARICHI	15
8. CRITERI DI VERIFICA	16
8.1. VERIFICHE GEOTECNICHE DELLA PARATIA.....	16
8.1.1. <i>Coefficienti di combinazione per verifiche strutturali e geotecniche della paratia</i>	18
8.2. VERIFICHE STRUTTURALI.....	19
9. RISULTATI DELLE ANALISI	20
9.1. FASI DI CALCOLO.....	20
9.2. SPOSTAMENTI (SLE COMBINAZIONE TIPO RARA).....	21
9.3. SOLLECITAZIONI MASSIME (SLU).....	22
10. VERIFICHE	24
10.1. VERIFICA DELL'OPERA DI SOSTEGNO.....	24
10.1.1. <i>Verifica geotecnica della paratia</i>	24
10.1.2. <i>Verifica strutturale della paratia</i>	25
11. CONCLUSIONI	27

1. ¹PREMESSA

La presente relazione si riferisce alla progettazione definitiva di un'opera provvisoria consistente in una paratia di micropali a sbalzo con forma in pianta a C. L'opera si realizza in prossimità della tratta ferroviaria Bussoleno-Avigliana. Tale paratia ha il compito di contenere il terreno a monte dello scavo che si effettua per l'inserimento del canale scolmatore al di sotto della linea ferroviaria.

Nella presente relazione si dimensionano e verificano le paratie di micropali.

2. DESCRIZIONE DELL'OPERA

La presente relazione di calcolo ha per oggetto l'analisi e le verifiche geotecniche e strutturali della paratia di micropali in calcestruzzo armato. La paratia è realizzata con micropali dotati di armatura tubolare in acciaio.

Per ulteriori indicazioni si rimanda agli elaborati progettuali. Si riporta di seguito una vista in pianta e una sezione della paratia oggetto dello studio.

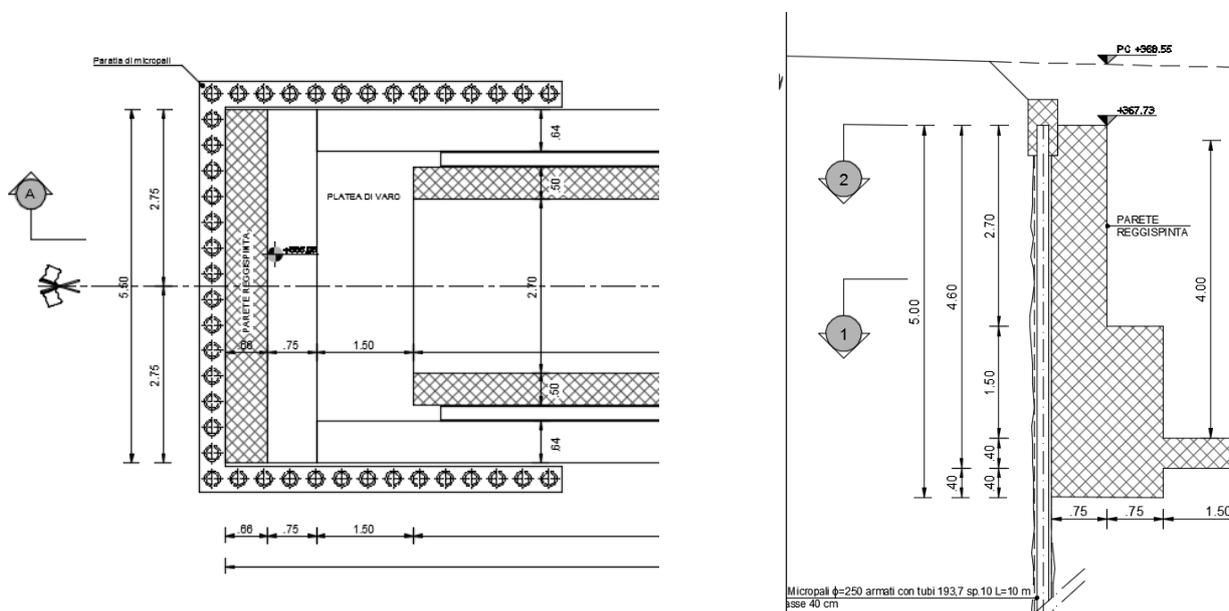


Figura 1: Vista in pianta della paratia con sezione di studio

Nella tabella a seguire si riportano i parametri di calcolo assunti per l'analisi, le verifiche strutturali e le verifiche geotecniche.

PARATIA DI MICROPALI		
Sezione di studio		-
$H_{scavo,max}$	4.50	m
$L_{paratia,max}$	10.00	m
Micropali (C20/25)	Φ (mm)	250
Interasse	i (mm)	400
Tubolare (S275)	D/s (mm)	193.7/10

Nella lunghezza della paratia $L_{paratia,max}$ è incluso anche lo spessore del cordolo sommitale.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO LINEA MODANE-TORINO					
	Relazione di calcolo opere provvisionali 2/2	COMMESSA NT01	LOTTO 04	CODIFICA D26CL	DOCUMENTO IN0100001A	REV. A

3. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

3.1. Documenti Referenziati

I documenti usati come input per il presente documento sono i seguenti:

3.1.1. Documenti di progetto

TITOLO ELABORATO
Relazione geotecnica – NT0IO4D26GEGE0005001A
Profilo Geotecnico 1/2 – NT0IO4D26F6GE0005001A
Profilo Geotecnico 2/2 – NT0IO4D26F6GE0005002A

3.1.2. Normativa e istruzioni

Si riporta nel seguito l'elenco delle leggi e dei decreti di carattere generale, assunti come riferimento:

- Legge 5-1-1971 n° 1086: *Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso, ed a struttura metallica*”;
- Legge. 2 febbraio 1974, n. 64. *Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche*;
- D.M. 14 gennaio 2008 - *Norme Tecniche per le Costruzioni*
- D.M. 17 gennaio 2018 – *Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni*
- 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*;
- D.M. 17 gennaio 2018 – *Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni*
- UNI EN 1998-5 (Eurocodice 8) – *Gennaio 2005: “Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici”*;
- *Manuale RFI RFI DTC SI MA IFS 001 A*;
- *RFI DTC SICS SP IFS 001 A Capitolato opere in conglomerato cementizio.*

4. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI IMPIEGATI

Per la realizzazione delle opere oggetto della presente relazione sono da impiegare i materiali di seguito elencati.

4.1. Calcestruzzo

CALCESTRUZZO MICROPALI					
Descrizione	Simbolo	Formula	Unità di misura	Valore	Note
Resistenza cubica a compressione	R_{ck}		N/mm^2	25.0	
Resistenza cilindrica a compressione	f_{ck}	$0.83 * R_{ck}$	N/mm^2	20.8	
Resistenza cilindrica media a compressione	f_{cm}	$f_{ck} + 8$	N/mm^2	28.8	
Coefficiente per effetti a lungo termine e sfavorevoli	α_{cc} (t>28gg)		-	0.9	
Coefficiente parziale di sicurezza relativo al calcestruzzo	γ_c		-	1.5	Viene ridotto a 1.40 per produzioni continuative di elementi o strutture soggette a controllo continuativo del calcestruzzo dal quale risulti un coefficiente di variazione (rapporto tra scarto quadratico medio e valore medio della resistenza) non superiore al 10%)
Resistenza di calcolo a compressione	f_{cd}	$(\alpha_{cc} * f_{ck}) / \gamma_c$	N/mm^2	11.8	
Resistenza cilindrica media a trazione	f_{ctm}	$0.3 * (f_{ck})^{2/3}$	N/mm^2	2.3	Per classi $\leq C50/60$
Resistenza cilindrica media a trazione	f_{ctk}	$0.7 * f_{ctm}$	N/mm^2	1.6	
Resistenza di calcolo a trazione	f_{ctd}	f_{ctk} / γ_c	N/mm^2	1.1	
Resistenza media a trazione per flessione	f_{ctm}	$1.2 * f_{ctm}$	N/mm^2	2.7	
Resistenza cilindrica caratteristica a trazione	f_{ctk}	$0.7 * f_{ctm}$	N/mm^2	1.9	
Modulo elastico	E_{cm}	$22000 * (f_{cm} / 10)^{0.3}$	N/mm^2	30200	
Peso proprio	γ_c		N/m^3	25000	
Coefficiente di Poisson	ν		-	0.2	Secondo quanto prescritto al punto 11.2.10.4 della NTC208, per il coefficiente di Poisson può adottarsi, a seconda dello stato di sollecitazione, un valore compreso tra 0 (calcestruzzo fessurato) e 0.2 (calcestruzzo non fessurato).
Coefficiente di aderenza	η		-	1.0	Per barre di diametro $\leq 32mm$
Resistenza tangenziale caratteristica di aderenza	f_{bk}	$2.25 * \eta * f_{ctk}$	N/mm^2	3.6	
Resistenza tangenziale di aderenza di calcolo	f_{bd}	f_{bk} / γ_c	N/mm^2	2.4	
Tensioni di progetto del cls allo S.L.E.					
Massima tensione di compressione in combinazione di carico RARA	σ_c	$0.55 * f_{ck}$	N/mm^2	11.4	Nel caso di elementi piani (solette, pareti, ...) gettati in opera con calcestruzzi ordinari e con spessori di calcestruzzo minori di 50 mm i valori limite sopra scritti vanno ridotti del 20%.
Massima tensione di compressione in combinazione di carico PERMANENTE	σ_c	$0.40 * f_{ck}$	N/mm^2	8.3	Nel caso di elementi piani (solette, pareti, ...) gettati in opera con calcestruzzi ordinari e con spessori di calcestruzzo minori di 50 mm i valori limite sopra scritti vanno ridotti del 20%.
					Calcestruzzo con mix design studiato in modo da eliminare fenomeni di ritiro

CALCESTRUZZO CORDOLO					
Descrizione	Simbolo	Formula	Unità di misura	Valore	Note
Resistenza cubica a compressione	R_{ck}		N/mm ²	30.0	
Resistenza cilindrica a compressione	f_{ck}	$0.83 * R_{ck}$	N/mm ²	24.9	
Resistenza cilindrica media a compressione	f_{cm}	$f_{ck} + 8$	N/mm ²	32.9	
Coefficiente per effetti a lungo termine e sfavorevoli	α_{cc} (t>28gg)		-	0.9	
Coefficiente parziale di sicurezza relativo al calcestruzzo	γ_c		-	1.5	Viene ridotto a 1.40 per produzioni continuative di elementi o strutture soggette a controllo continuativo del calcestruzzo dal quale risulti un coefficiente di variazione (rapporto tra scarto quadratico medio e valore medio della resistenza) non superiore al 10%)
Resistenza di calcolo a compressione	f_{cd}	$(\alpha_{cc} * f_{ck}) / \gamma_c$	N/mm ²	14.1	
Resistenza cilindrica media a trazione	f_{ctm}	$0.3 * (f_{ck})^{2/3}$	N/mm ²	2.6	Per classi \leq C50/60
Resistenza cilindrica media a trazione	f_{ctk}	$0.7 * f_{ctm}$	N/mm ²	1.8	
Resistenza di calcolo a trazione	f_{ctd}	f_{ctk} / γ_c	N/mm ²	1.2	
Resistenza media a trazione per flessione	f_{ctfm}	$1.2 * f_{ctm}$	N/mm ²	3.1	
Resistenza cilindrica caratteristica a trazione	f_{ctk}	$0.7 * f_{ctm}$	N/mm ²	2.1	
Modulo elastico	E_{cm}	$22000 * (f_{cm} / 10)^{0.3}$	N/mm ²	31447	
Peso proprio	γ_c		N/m ³	25000	
Coefficiente di Poisson	ν		-	0.2	Secondo quanto prescritto al punto 11.2.10.4 della NTC208, per il coefficiente di Poisson può adottarsi, a seconda dello stato di sollecitazione, un valore compreso tra 0 (calcestruzzo fessurato) e 0.2 (calcestruzzo non fessurato).
Coefficiente di aderenza	η		-	1.0	Per barre di diametro \leq 32mm
Resistenza tangenziale caratteristica di aderenza	f_{bk}	$2.25 * \eta * f_{ctk}$	N/mm ²	4.0	
Resistenza tangenziale di aderenza di calcolo	f_{bd}	f_{bk} / γ_c	N/mm ²	2.7	
Tensioni di progetto del cls allo S.L.E.					
Massima tensione di compressione in combinazione di carico RARA	σ_c	$0.55 * f_{ck}$	N/mm ²	13.7	Nel caso di elementi piani (solette, pareti, ...) gettati in opera con calcestruzzi ordinari e con spessori di calcestruzzo minori di 50 mm i valori limite sopra scritti vanno ridotti del 20%.
Massima tensione di compressione in combinazione di carico PERMANENTE	σ_c	$0.40 * f_{ck}$	N/mm ²	10.0	Nel caso di elementi piani (solette, pareti, ...) gettati in opera con calcestruzzi ordinari e con spessori di calcestruzzo minori di 50 mm i valori limite sopra scritti vanno ridotti del 20%.
					Calcestruzzo con mix design studiato in modo da eliminare fenomeni di ritiro

4.2. Acciaio

ACCIAIO DA C.A.					
Acciaio ad aderenza migliorata B450C					
Descrizione	Simbolo	Formula	Unità di misura	Valore	Note
Resistenza caratteristica di rottura	$f_{t\ nom}$		N/mm ²	540	
Resistenza caratteristica a snervamento	$f_{y\ nom}$		N/mm ²	450	
Coefficiente parziale di sicurezza relativo all'acciaio	γ_s		-	1.15	
Resistenza di calcolo	$f_{y\ d}$	$f_{y\ k} / \gamma_s$	N/mm ²	391.3	
Modulo elastico	E_s		N/mm ²	206000	
Tensioni di progetto del cls allo S.L.E.					
Tensione massima di esercizio per l'acciaio	σ_s	$0.75 * f_{y\ k}$	N/mm ²	337.5	

ACCIAIO PER MICROPALI					
ACCIAIO S275					
Descrizione	Simbolo	Formula	Unità di misura	Valore	Note
Modulo elastico	E		N/mm ²	210000	
Coefficiente di Poisson	ν		-	0.3	
Modulo di elasticità trasversale	G	$E / [2 * (1+\nu)]$	N/mm ²	80769	
Coefficiente di espansione termica lineare	α		1/°C	1.20E-05	Per T fino a 100°C
Densità	ρ		kg/m ³	7850	
Resistenza caratteristica a snervamento	$f_{y\ k}$		N/mm ²	275	
Resistenza caratteristica a rottura	$f_{t\ k}$		N/mm ²	430	

5. STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI

Nel rispetto dell'elaborato contenente la definizione dei parametri geotecnici, la paratia oggetto della relazione presenta una stratigrafia di progetto come riportata nel seguito.

Tipologia	z dal PF	γ	c_u	c'	ϕ'	E
	m	kN/m ³	kPa	kPa	°	MPa
Unità A – Sabbie e ghiaie	0.00-5.00	19.00	-	0.00 ²	32	20.00
Unità A – Sabbie e ghiaie	5.00-....	19.00	-	0.00	36	35.00

Tabella 1: Parametri geotecnici della stratigrafia di riferimento

I parametri riportati in tabella rappresentano:

- γ = peso di volume del terreno [kN/m³];
- c_u = coesione non drenata [kPa];
- c' = coesione efficace [kPa];
- ϕ' = angolo d'attrito interno di picco [°];
- E' = modulo elastico operativo del terreno [MPa];

La falda si considera ad una profondità di 3.00 m dal piano campagna. Le misure piezometriche a disposizione, indicano che durante i lavori è possibile, in particolare in alcuni periodi dell'anno, riscontrare la presenza di falda freatica a pochi metri dal piano campagna. Al fine di garantire l'abbattimento della falda e creare condizioni di lavoro ottimali, anche nel caso in cui il periodo dei lavori dovesse coincidere con il periodo di massimo innalzamento della falda, sarà predisposto un impianto provvisorio di emungimento attorno all'area di scavo.

	PROGETTO DEFINITIVO LINEA MODANE-TORINO					
	Relazione di calcolo opere provvisionali 2/2	COMMESSA NT01	LOTTO 04	CODIFICA D26CL	DOCUMENTO IN0100001A	REV. A

6. MODELLO DI CALCOLO

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

Allo scopo si impiega il programma di calcolo "PARATIE PLUS" Versione 18.1 della HarpaCeas S.r.l. di Milano.

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".

Con tale metodo, si può quindi seguire analiticamente la successione delle fasi di costruzione, di carico e di contrasto, consentendo di fornire informazioni attendibili sull'entità delle deformazioni e sugli effetti che esse inducono sul diagramma delle pressioni esercitate dal terreno sulla paratia.

I parametri che caratterizzano il modello dunque possono essere distinti in due classi: parametri di spinta e parametri di deformabilità del terreno che compaiono nella definizione della rigidezza delle molle.

Per tener conto della presenza della paratia con forma in pianta a C, si inserisce in testa alla paratia una molla tale da rappresentare la rigidezza complessiva del sistema. Per il calcolo della rigidezza di tale molla si rimanda ai paragrafi successivi.

6.1. Parametri di spinta del terreno

I parametri di spinta sono il coefficiente di spinta a riposo e i coefficienti di spinta attiva e passiva.

Il coefficiente di spinta a riposo fornisce lo stato tensionale presente in sito prima delle operazioni di scavo. Esso lega la tensione orizzontale efficace σ'_h a quella verticale σ'_v attraverso la relazione:

$$\sigma'_h = K_0 \sigma'_v$$

K_0 dipende dalla resistenza del terreno, attraverso il suo angolo di attrito efficace ϕ' e dalla sua storia geologica. Si può assumere che:

$$K_0 = K_0^{NC} (OCR)^m$$

dove:

$$K_0^{NC} = 1 - \sin \phi'$$

è il coefficiente di spinta a riposo per un terreno normalconsolidato ($OCR=1$). OCR è il grado di sovraconsolidazione e m è un parametro empirico, di solito compreso tra 0.4 e 0.7. Ladd et al. (1977), Jamiolkowski et al. (1979) forniscono valori di m per argille italiane.

Il coefficiente di spinta attiva e passiva sono dati secondo Rankine per una parete liscia, da

$$K_A = \tan^2(45^\circ - \phi'/2)$$

$$K_P = \tan^2(45^\circ + \phi'/2)$$

Attraverso valori opportuni di K_A e K_P si può tener conto dell'angolo di attrito δ tra paratia e terreno e della pendenza del terreno a monte ed entro la luce di scavo; si possono usare a questo scopo i valori desunti da NAVFAC (1986) o quelle elaborate da Caquot e Kerisel (1948)

Il valore limite della tensione orizzontale sarà dato da

$$\sigma'_A = K_A \sigma'_v - 2c' \sqrt{K_A} \quad \text{oppure}$$

$$\sigma'_P = K_P \sigma'_v + 2c' \sqrt{K_P}$$

a seconda che il collasso avvenga in spinta attiva o passiva rispettivamente. c' è la coesione drenata del terreno. Nel caso in cui si voglia tenere conto dell'adesione a tra parete e terreno, i limiti attivo e passivo si modificano come segue.

$$\sigma'_A = K_A \sigma'_v - c' K_{ac} \quad \text{con } K_{ac} = 2\sqrt{K_A(1 + a/c')} \leq 2.56\sqrt{K_A}$$

$$\sigma'_P = K_P \sigma'_v + c' K_{pc} \quad \text{con } K_{pc} = 2\sqrt{K_P(1 + a/c')} \leq 2.56\sqrt{K_P}$$

Per terreni a pendenza nulla, con angolo di attrito paratia-terreno “ δ ” diverso da zero, i coefficienti di spinta attiva e passiva sono calcolati con la relazione di Lancellotta (2002) e valgono:

$$k_{a,p} = \left[\frac{\cos \delta}{1 \pm \sin \delta} \left(\cos \delta \mp \sqrt{\sin^2 \phi' - \sin^2 \delta} \right) \right] e^{\mp 2\theta \tan \phi'}$$

$$2\theta_{p,a} = \arcsen \left(\frac{\sin \delta}{\sin \phi'} \right) \mp \delta$$

Nei calcoli si considera un angolo di attrito paratia-terreno “ δ ” pari a $1/2$ di ϕ' per la spinta passiva e pari a zero per quella attiva.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO LINEA MODANE-TORINO					
	Relazione di calcolo opere provvisionali 2/2	COMMESSA NT01	LOTTO 04	CODIFICA D26CL	DOCUMENTO IN0100001A	REV. A

6.2. Parametri di deformabilità del terreno

Per la definizione del modulo di Young si utilizza il modello elasto-plastico inserendo il valore di E manualmente. Il programma provvede automaticamente a calcolare le costanti di sottofondo per ogni fase di scavo come:

$$K_{monte} = \frac{E_m \cdot \Delta}{B_m} \quad e \quad K_{valls} = \frac{E_v \cdot \Delta}{B_v}$$

Nelle relazioni presentate, Δ è il valore fornito dalla schematizzazione agli elementi finiti e B_m e B_v sono rispettivamente le estensioni laterali del cuneo di spinta attiva e passiva del terreno alla quota del baricentro del cuneo stesso, per ogni fase di scavo:

$$B_m = \frac{2}{3} \cdot \lambda_A \cdot \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi'}{2}\right)$$

$$B_v = \frac{2}{3} \cdot \lambda_P \cdot \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right)$$

$$\lambda_A = \min(H_{paratia}; 2H_{scavo})$$

$$\lambda_P = \min(H_{paratia} - H_{scavo}; H_{scavo})$$

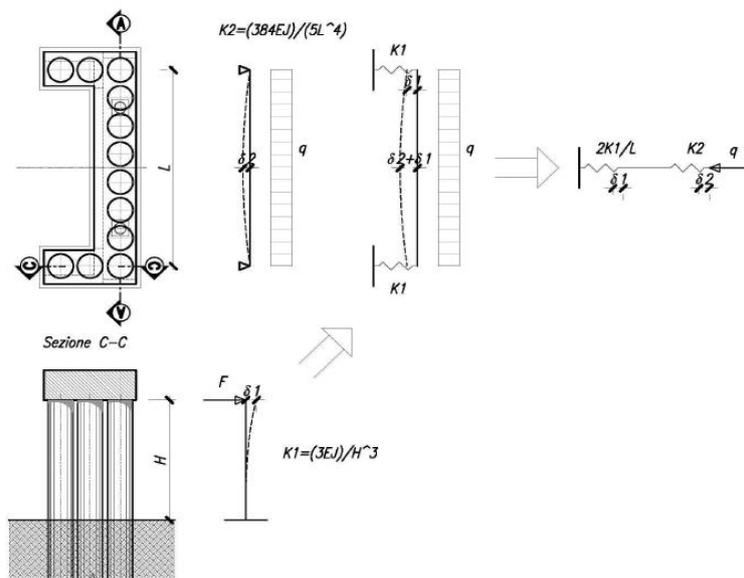
Si assume in ogni caso un valore di altezza dello scavo H_{scavo} non minore di 1/10 dell'altezza totale della paratia $H_{paratia}$.

Il modulo elastico in fase incrudente si assume pari a 1.60 volte il modulo elastico di primo carico E_{vc} (ha un valore assunto pari al modulo elastico del terreno):

$$E_{ur} = 1.60 \cdot E_{vc}$$

6.3. Caratteristiche di taratura della molla equivalente in testa alla paratia

Per tener conto dell'irrigidimento della trave di coronamento e degli sviluppi laterali, si considera lo schema riportato nella figura che segue. In tale schema il comportamento dei micropali laterali è simulato come una mensola di altezza H e quello della trave di coronamento è simulato come una trave incerniera ai lati di luce L.



Nell'analisi numerica si simula la presenza dei suddetti irrigidimenti laterali con due molle in serie di rigidezza complessiva $2K_1$ e la presenza della trave di coronamento con una molla di rigidezza K_2 . Considerando che lo studio della paratia si riferisce ad 1 m del suo sviluppo longitudinale, la rigidezza $2K_1$ viene divisa per la lunghezza L della trave di coronamento. La rigidezza equivalente della molla vale:

$$K_{eq} = \frac{K_2 \cdot 2 \cdot K_1 / L}{K_2 + 2 \cdot K_1 / L}$$

Il calcolo di questa rigidezza risulta essere piuttosto cautelativo, dal momento che gli elementi laterali della paratia sono tali da subire spostamenti trascurabili e comportarsi quindi come un vincolo fisso. Data la presente considerazione gli spostamenti calcolati nei successivi paragrafi risultano essere maggiori di quelli che si avranno effettivamente nella realtà

Nella tabella che segue si riporta il calcolo della rigidezza equivalente della molla in testa alla paratia.

Taratura molla equivalente in testa alla paratia			
Rigidezza secondo schema a mensola associata ad una fila di pali di bordo			
Diametro esterno	d_{ext}	193.70	mm
Spessore	t	10.00	mm
Diametro interno	d_{int}	173.70	mm
Momento d'inerzia della sezione del micropalo	J_m	24415881.83	mm ⁴
Area della sezione del micropalo	A	5771.11	mm ²
Numero di micropali di bordo per lato inclusi quelli di angolo	n	14.00	-
Momento d'inerzia della sezione del micropalo	J_f	341822345.61	mm ⁴
Modulo elastico dell'acciaio	E_p	210000.00	N/mm ²
Altezza della mensola	H_m	4.50	m
Rigidezza K_1 associata ad una sola fila di pali di bordo	K_1	2363.22	kN/m
Rigidezza della trave di testata nell'ipotesi di trave con appoggiata con carico distribuito			
Larghezza del cordolo	b	0.40	m
Altezza del cordolo	h	0.75	m
Lunghezza della paratia inclusi i micropali di angolo	L_p	6.00	m
Momento d'inerzia della sezione del cordolo	J_c	0.01	m ⁴
Modulo elastico del calcestruzzo del cordolo	E_c	31,447.16	N/mm ²
Rigidezza K_2 associata al cordolo in testa alla paratia	K_2	26205.97	kN/m
Rigidezza equivalente della molla in testa alla paratia			
Rigidezza equivalente del sistema	K_{eq}	764.75	kN/m



PROGETTO DEFINITIVO
LINEA MODANE-TORINO

Relazione di calcolo opere provvisionali 2/2

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NT01	04	D26CL	IN010001A	A	15 di 27

7. ANALISI DEI CARICHI

I carichi considerati nel modello di calcolo si riferiscono ai carichi permanenti strutturali associati alla sola spinta del terreno.

	PROGETTO DEFINITIVO LINEA MODANE-TORINO					
	Relazione di calcolo opere provvisionali 2/2	COMMESSA NT01	LOTTO 04	CODIFICA D26CL	DOCUMENTO IN0100001A	REV. A

8. CRITERI DI VERIFICA

Le analisi di verifica della paratia sono state effettuate secondo le NTC 2018 tenendo conto di possibili SLU di tipo geotecnico e di tipo strutturale. Nello specifico sono state effettuate le verifiche dei seguenti stati limite:

- SLU di tipo geotecnico (GEO)
 - collasso per raggiungimento della resistenza del terreno con rotazione attorno ad un punto della paratia;
 - instabilità globale dell'insieme terreno-opera.
- SLU di tipo strutturale (STR)
 - raggiungimento della resistenza strutturale della paratia;

8.1. Verifiche geotecniche della paratia

Le verifiche per il dimensionamento strutturale e geotecnico sono state effettuate con la Combinazione 1 dell'Approccio 1 (A1+M1+R1) e Combinazione 2 dell'Approccio 1 (A2+M2+R1). La verifica di stabilità globale dell'insieme terreno-opera è stata effettuata secondo la Combinazione 2 (A2+M2+R2).

I coefficienti numerici per A, M ed R sono riportati nelle Tabelle 6.2.I e 6.2.II, 6.5.I e 6.8.I delle NTC 2018. In condizioni di esercizio sono stati valutati gli spostamenti dell'opera per valutare la compatibilità con la funzionalità della stessa e con la sicurezza e funzionalità di eventuali preesistenze.

Nelle immagini a seguire si riportano le tabelle con i coefficienti di calcolo per le verifiche strutturali e geotecniche dell'opera di sostegno oggetto dello studio.

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

	Effetto	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_{F^*})	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_Q	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾ 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 γ_{G1}

Tabella 2: Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU (6.2.I)

Tab. 6.2.II – 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	$\tan \phi'_k$	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_γ	1,0	1,0

Tabella 3: Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno (6.2.II)

Tab. 6.5.I - Coefficienti parziali γ_R per le verifiche agli stati limite ultimi di muri di sostegno

Verifica	Coefficiente parziale (R3)
Capacità portante della fondazione	$\gamma_R = 1,4$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,1$
Ribaltamento	$\gamma_R = 1,15$
Resistenza del terreno a valle	$\gamma_R = 1,4$

Tabella 4: Coefficienti parziali per le verifiche agli SLU di muri di sostegno (6.5.I)

Tab. 6.8.I - Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e di fronti di scavo

COEFFICIENTE	R2
γ_R	1,1

Tabella 5: Coefficienti parziali per le verifiche agli SLU di stabilità globale (6.8.I)

8.1.1. Coefficienti di combinazione per verifiche strutturali e geotecniche della paratia

Coefficienti A

Nome	Carichi Permanenti Sfavoevoli	Carichi Permanenti Favorevoli	Carichi Variabili Sfavoevoli	Carichi Variabili Favorevoli	Carico Sismico	Pressioni Acqua Lato Monte	Pressioni Acqua Lato Valle	Carichi Permanenti Destabilizzanti	Carichi Permanenti Stabilizzanti	Carichi Variabili Destabilizzanti	Carichi Permanenti Destabilizzanti	Carichi Permanenti Stabilizzanti	Carichi Variabili Destabilizzanti
Simbolo	γ_G	γ_G	γ_Q	γ_Q	γ_{QE}	γ_G	γ_G	γ_{Gdst}	γ_{Gstb}	γ_{Qdst}	γ_{Gdst}	γ_{Gstb}	γ_{Qdst}
Nominal	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SLE (Rara)	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
A1+M1+R1 (R3 per tiranti)	1.3	1	1.5	1	0	1.3	1	1	1	1	1	1	1
A2+M2+R1	1	1	1.3	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
A2+M2+R2	1	1	1.3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Coefficienti M

Nome	Parziale su $\tan(\phi')$	Parziale su c'	Parziale su S_u	Parziale su q_u	Parziale su peso specifico
Simbolo	γ_ϕ	γ_c	γ_{cu}	γ_{qu}	γ_v
Nominal	1	1	1	1	1
SLE (Rara)	1	1	1	1	1
A1+M1+R1 (R3 per tiranti)	1	1	1	1	1
A2+M2+R1	1.25	1.25	1.4	1	1
A2+M2+R2	1.25	1.25	1.4	1	1

Coefficienti R

Nome	Parziale resistenza terreno (es. K_p)	Parziale resistenza Tiranti permanenti	Parziale resistenza Tiranti temporanei	Parziale elementi strutturali
Simbolo	γ_{Re}	γ_{ap}	γ_{at}	
Nominal	1	1	1	1
SLE (Rara)	1	1	1	1
A1+M1+R1 (R3 per tiranti)	1	1.2	1.1	1
A2+M2+R1	1	1.2	1.1	1
A2+M2+R2	1	1.2	1.1	1

Tabella 6: Coefficienti parziali per le verifiche agli SLE, SLU e sismiche considerati in Paratie Plus

	PROGETTO DEFINITIVO LINEA MODANE-TORINO					
Relazione di calcolo opere provvisionali 2/2	COMMESSA NT01	LOTTO 04	CODIFICA D26CL	DOCUMENTO IN0100001A	REV. A	FOGLIO 19 di 27

8.2. Verifiche strutturali

Le verifiche strutturali delle membrature in acciaio dei micropali e del puntone sono state sviluppate nel rispetto delle indicazioni riportate al paragrafo 4.2.4 delle NTC 2018.

Nello specifico per quanto riguarda i micropali sono condotte le verifiche a flessione monoassiale (paragrafo 4.2.4.1.2.3 delle NTC 2018) e taglio (paragrafo 4.2.4.1.2.4 delle NTC 2018). Nelle immagini a seguire si riporteranno i diagrammi delle sollecitazioni agenti e le relative verifiche espresse in termini di fattore di sfruttamento. Le sollecitazioni si riferiscono all'intera paratia estesa longitudinalmente di 1 m. I gradi di sfruttamento si riferiscono alla verifica strutturale del singolo micropalo.

9. RISULTATI DELLE ANALISI

Le analisi eseguite si riferiscono alle sole condizioni statiche, trattandosi di opere provvisionali con durata prevista in progetto inferiore a 2 anni (par. 2.4.1 delle NTC 2008).

9.1. Fasi di calcolo

L'analisi si compone complessivamente di 3 fasi di calcolo:

1. Ricostruzione dello stato tensionale;
2. Attivazione della paratia di micropali;
3. Scavo di 4.50 m.

Nell'immagine a seguire si riporta la condizione assunta dalla paratia una volta concluso lo scavo.

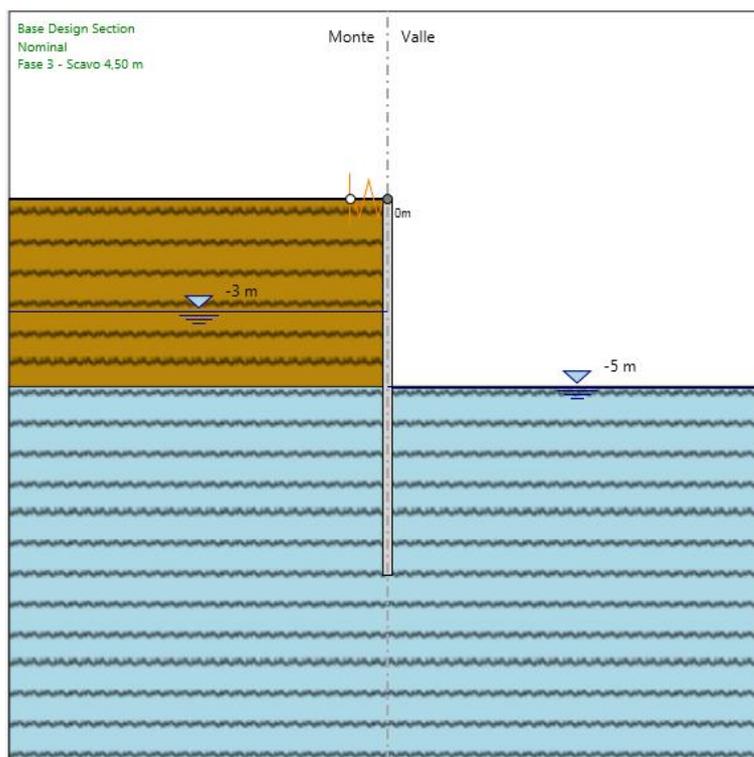


Figura 2 – Configurazione finale sezione di studio Paratia

9.2. Spostamenti (SLE combinazione tipo Rara)

Il massimo spostamento orizzontale che si ottiene per la paratia risulta pari a **49.60 mm**.

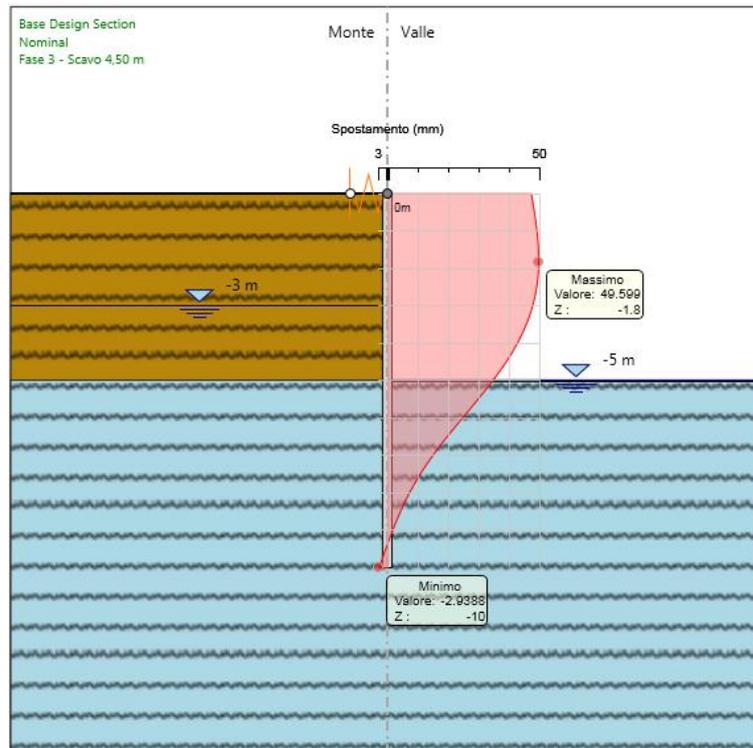


Figura 3 – Diagramma spostamenti orizzontali paratia

9.3. Sollecitazioni massime (SLU)

Sollecitazioni massime di momento flettente

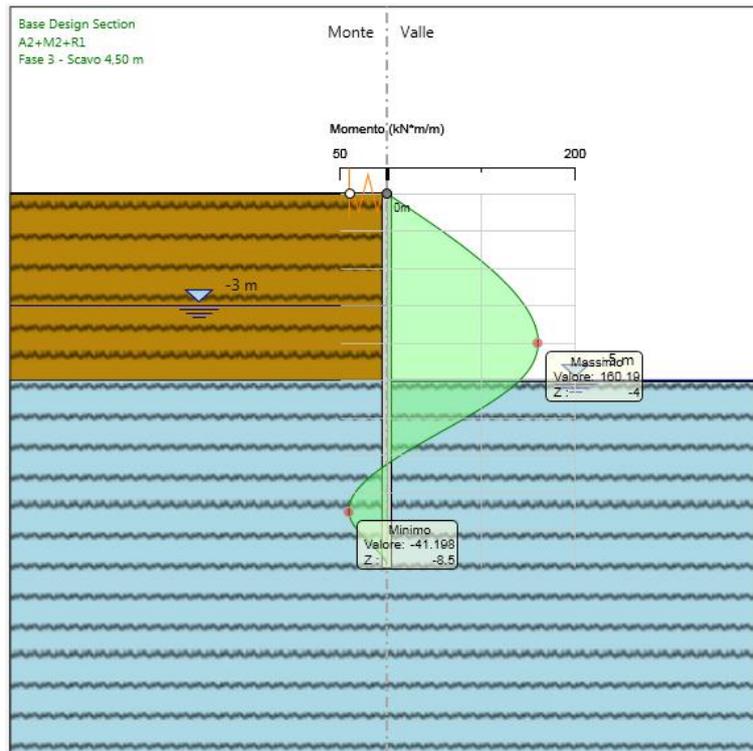


Figura 4 – Diagramma di momento flettente per la paratia

$M_{max,d^{**}}$
kNm/m
160.19

Tabella 7: Sollecitazioni di flessione massima sulla paratia in condizione statica

Sollecitazioni massime di taglio

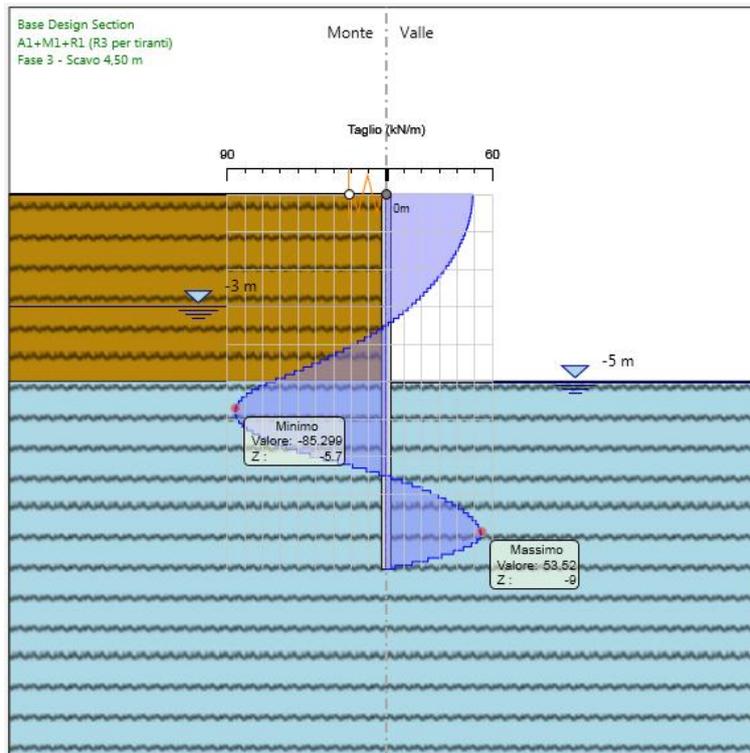


Figura 5 – Diagramma di taglio per la paratia

$V_{\max,d}$
kN/m
85.30

Tabella 8: Sollecitazioni di taglio massime sulla paratia in condizione statica

10. VERIFICHE

10.1. Verifica dell'opera di sostegno

10.1.1. Verifica geotecnica della paratia

Per valutare la capacità geotecnica della struttura il programma fornisce per via diretta il raggiungimento di un risultato di convergenza nel modello. Quando tale situazione si presenta è possibile ritenere soddisfatta automaticamente la condizione di equilibrio attorno a un punto di rotazione.

Un modo indiretto per valutare la capacità geotecnica della struttura, consiste nel valutare la percentuale di mobilitazione della spinta passiva relativa al tratto infisso di paratia. L'entità di tale rapporto permette di valutare il livello di sfruttamento geotecnico della struttura rispetto le condizioni limite. Naturalmente tale rapporto deve essere minore o uguale all'unità, affinché non sia violato il criterio di resistenza della struttura.

A seguire si riporta un riepilogo del livello di sfruttamento geotecnico della struttura.

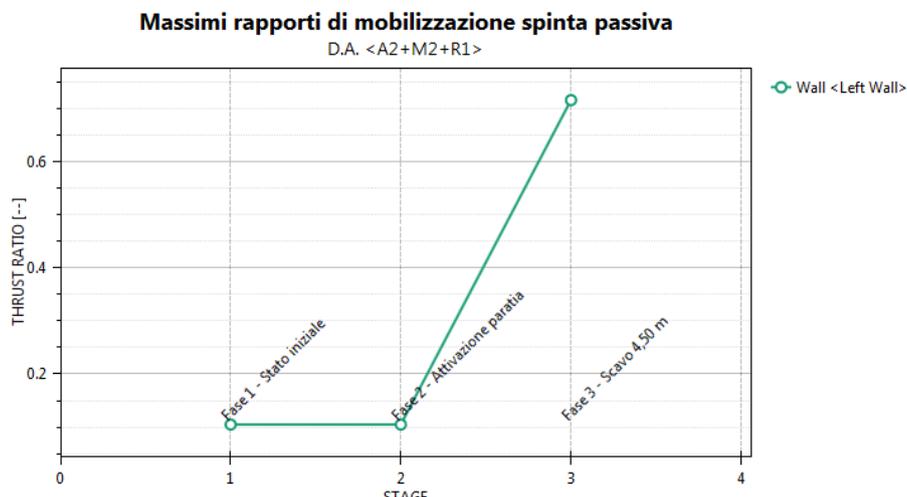
Riepilogo per la DA <A1+M1+R1 (R3 per tiranti)>

Max. Rapporto Spinte (Efficace/Passiva) (Lato SX) (R3 per tiranti) (Fase 2 - Attivazione paratia)	0.07	D.A.	A1+M1+R1
Max. Rapporto Spinte (Efficace/Passiva) (Lato DX) (R3 per tiranti) (Fase 3 - Scavo 4,50 m)	0.44	D.A.	A1+M1+R1

Riepilogo per la DA <A2+M2+R1>

Max. Rapporto Spinte (Efficace/Passiva) (Lato SX) (Fase 2 - Attivazione paratia)	0.1	D.A.	A2+M2+R1
Max. Rapporto Spinte (Efficace/Passiva) (Lato DX) (Fase 3 - Scavo 4,50 m) (>0.5)	0.72	D.A.	A2+M2+R1

Per la combinazione che fornisce la massima mobilitazione della spinta passiva si riporta il relativo grafico.



10.1.2. Verifica strutturale della paratia

Nelle immagini che seguono si riportano le percentuali massime di sfruttamento dei profili dei micropali, per quanto riguarda le verifiche a flessione e taglio.

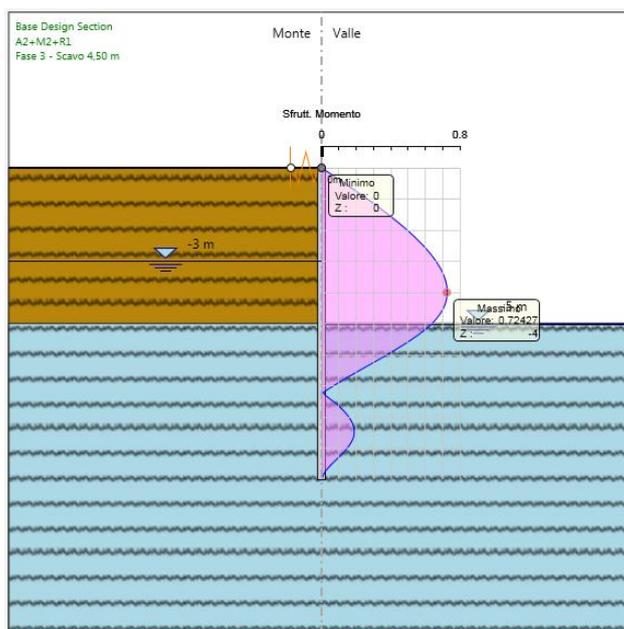


Figura 6 – Diagramma di sfruttamento a momento flettente

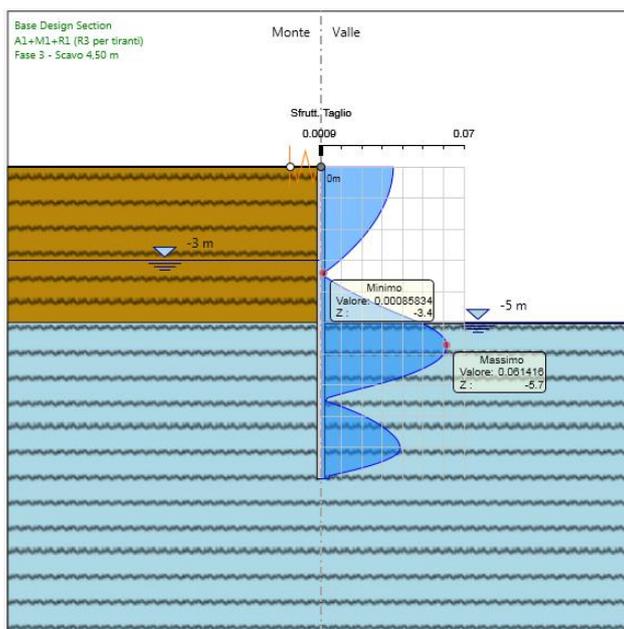


Figura 7 – Diagramma di sfruttamento a taglio



PROGETTO DEFINITIVO
LINEA MODANE-TORINO

Relazione di calcolo opere provvisionali 2/2

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NT01	04	D26CL	IN0100001A	A	26 di 27

Nell'immagine a seguire si riporta un riepilogo dei risultati degli esiti delle verifiche a flessione e taglio dei micropali in acciaio.

Riepilogo per la DA <A1+M1+R1 (R3 per tiranti)>

Paratia Max. momento (assoluto) [kNm/m] 114.51 Z = -3.5 m
D.A. A1+M1+R1 (R3 per tiranti) (Fase 3 - Scavo 4,50 m)
Max. taglio [kN/m] 85.3 Z = -5.8 m D.A. A1+M1+R1
(R3 per tiranti) (Fase 3 - Scavo 4,50 m)
SteelWord: massimo struttamento in flessione 0.518 Z = -3.5
m D.A. A1+M1+R1 (R3 per tiranti) (Fase 3 - Scavo 4,50 m)
SteelWord: massimo struttamento a taglio 0.061 Z = -5.7 m
D.A. A1+M1+R1 (R3 per tiranti) (Fase 3 - Scavo 4,50 m)

Riepilogo per la DA <A2+M2+R1>

Paratia Max. momento (assoluto) [kNm/m] 160.19 Z = -4 m D.A.
A2+M2+R1 (Fase 3 - Scavo 4,50 m)
Max. taglio [kN/m] 70.4 Z = -6.4 m D.A. A2+M2+R1
(Fase 3 - Scavo 4,50 m)
SteelWord: massimo struttamento in flessione 0.724 Z = -4 m
D.A. A2+M2+R1 (Fase 3 - Scavo 4,50 m)
SteelWord: massimo struttamento a taglio 0.051 Z = -6.3 m
D.A. A2+M2+R1 (Fase 3 - Scavo 4,50 m)

11. CONCLUSIONI

Con la presente relazione si è proceduto al progetto e alla verifica delle paratie provvisorie di micropali, allo stato limite ultimo e allo stato limite di esercizio. Le verifiche rispettano le indicazioni delle Normative tecniche di riferimento.

Dai calcoli eseguiti si determinano le seguenti caratteristiche dei micropali:

- $D = 250$ mm diametro micropali
- $L = 10.00$ m lunghezza di calcolo micropali
- $i = 0.40$ m interasse longitudinale
- tubolare 193.7x10 mm armatura micropalo
- S275 classe di resistenza acciaio tubo armatura