

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



DIREZIONE TECNICA

U.O. INFRASTRUTTURE NORD

PROGETTO DEFINITIVO PER APPALTO

COMPLETAMENTO DEL NODO DI UDINE – PRG E ACC DEL P.M.  
CARNACCO E OPERE SOSTITUTIVE DEI PL INTERFERENTI

SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311

Relazione di calcolo opera provvisoria

SCALA:

-

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

I Z 0 9    0 0    D    2 6    C L    S L 0 3 0 3    0 0 1    A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione definitiva	F. Serrau <i>F. Serrau</i>	Sett. 2019	C. Laporta <i>C. Laporta</i>	Sett. 2019	S. Lo Presti <i>S. Lo Presti</i>	Sett. 2019	F. Sacchi Sett. 2019

ITALFERR - UO INFRASTRUTTURE NORD  
Det. Ing. Francesco Sacchi  
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma  
n. 231/22 S.p.A.

File: IZ0900D26CLSL0303001A

n. Elab.:

## *INDICE*

Premessa	4
1 DESCRIZIONE DELL'OPERA.....	4
1. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....	6
1.1. Documenti Referenziati .....	6
1.1.1. Normativa e istruzioni .....	6
3 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI IMPIEGATI .....	7
3.1 Calcestruzzo.....	7
3.2 Acciaio	10
4 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI .....	11
5 MODELLO DI CALCOLO .....	13
5.1 Parametri di spinta del terreno .....	14
5.2 Parametri di deformabilità del terreno .....	15
6 Analisi dei carichi .....	16
6.1 Parametri di deformabilità del terreno .....	16
7 CRITERI DI VERIFICA .....	17
7.1 Verifiche geotecniche della paratia.....	17
7.2 Verifiche geotecniche del tirante .....	19
7.2.1 Coefficienti di combinazione per verifiche strutturali e geotecniche della paratia tirantata .	20
7.3 Verifiche strutturali.....	21
8 RISULTATI DELLE ANALISI .....	22
8.1 Fasi di calcolo .....	22
Spostamenti (SLE combinazione tipo Rara) .....	31

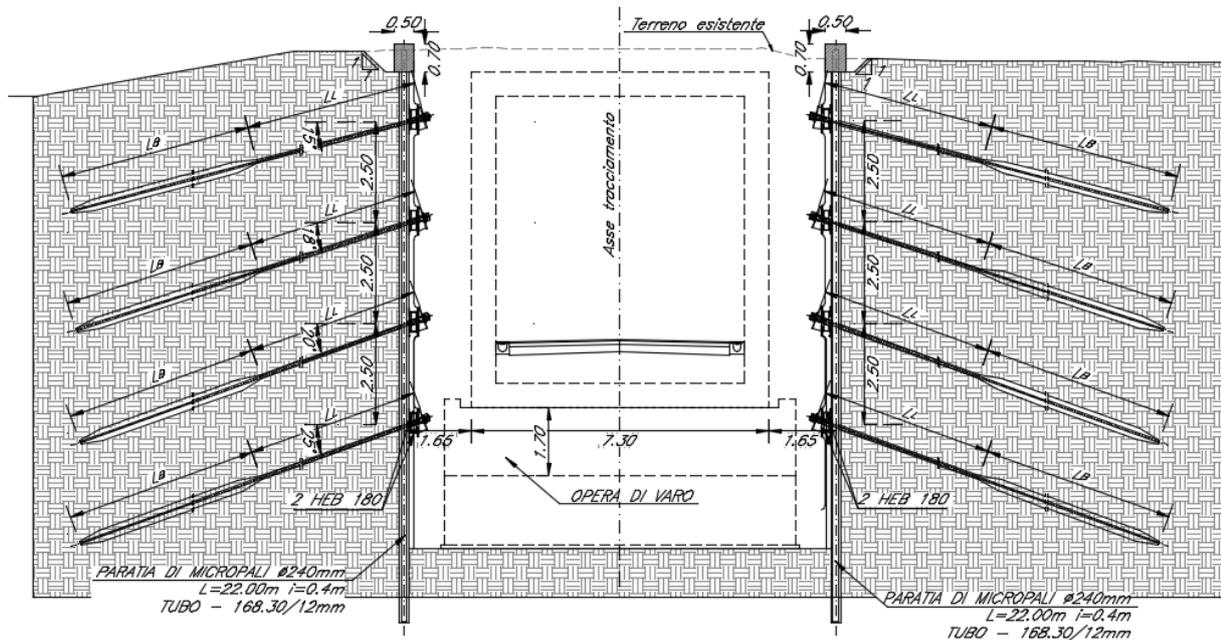
8.2 Sollecitazioni massime (SLU) .....	32
9 VERIFICHE .....	34
9.1 Verifica di stabilità globale.....	34
9.2 Verifica dell'opera di sostegno .....	35
9.2.1 Verifica geotecnica della paratia .....	35
9.2.2 Verifica geotecnica dei tiranti.....	37
9.2.3 Verifica strutturale della paratia .....	40
9.2.4 Verifica strutturale del tirante.....	42
9.2.5 Verifica della trave di ripartizione.....	43
10 CONCLUSIONI .....	44

## PREMESSA

Nella presente relazione si dimensionano e verificano le paratie di micropali, il tirante in acciaio e la trave di ripartizione in acciaio.

## 1 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. Per ulteriori indicazioni si rimanda agli elaborati progettuali. Si riporta di seguito la sezione di studio presa a riferimento per il dimensionamento e la verifica della paratia.



**Figura 1: Sezione di studio paratia**

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

<b>PARATIA DI MICROPALI</b>		
Sezione di studio		-
$H_{scavo,max}$	12.1	m

**SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311**  
**Relazione di calcolo opera provvisoria**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0303 001	A	5 di 44

$L_{paratia,max}$	22	m
Micropali (C25/30)	$\Phi$ (mm)	240
Interasse	i (mm)	400
Tubolare (S355)	D/s (mm)	168.3/12mm

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

<b>TIRANTE</b>										
<b>Modalità di iniezione IRS</b>										
N	z (m)	Passo (m)	i (°)	d (m)	$L_{lib}$ (m)	$L_{anc}$ (m)	$L_{tot}$ (m)	Nr. Trefoli	Trefoli $\emptyset$	Pretiro (kN)
1	-1.5	2.80	15	0.16	10	10	20	5	0.6"	380
2	-4	2.80	18	0.16	9	10	19	5	0.6"	450
3	-6.5	2.40	20	0.16	7	10	17	5	0.6"	450
4	-9	2	25	0.16	6	11	17	5	0.6"	450

Altezza dello scavo	Ordine di tiranti necessari
0m ÷ -2m	-
-2m ÷ -4.5m	1°
-4.5m ÷ -7m	1°,2°
-7m ÷ -9.5m	1°,2°,3°
-9.5m ÷ -12.1m	1°,2°,3°,4°

Rispetto alla sommità degli micropali il primo ordine di tiranti si trova ad una distanza di 1,5 m (quota "z" in tabella), il secondo ordine di tiranti si trova ad una distanza di 4m, il terzo ordine di tiranti si trova ad una distanza di 6.5m, e il quarto ordine di tiranti si trova ad una distanza di 9m.

**TRAVE DI RIPARTIZIONE**

Sezione di studio

Sezione 2 HEB 180

	<b>COMPLETAMENTO DEL NODO DI UDINE – PRG E ACC DEL P.M. CARGNACCO E OPERE SOSTITUTIVE DEI PL INTERFERENTI</b>					
<b>SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311</b> <b>Relazione di calcolo opera provvisoria</b>	COMMESSA IZ09	LOTTO 00	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO SL0303 001	REV. A	FOGLIO 6 di 44

## 1. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

### 1.1. Documenti Referenziati

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

#### 1.1.1. Normativa e istruzioni

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

- Legge 5 novembre 1971 n. 1086: *Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato normale e precompresso ed a struttura metallica.*
- D.M. del 17.01.2018 “*Aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni*” (NTC 2018)
- Circolare del 21.01.2019 contenente le istruzioni per le l'applicazione delle “*Nuove norme tecniche per le costruzioni*” di cui al D.M. del 17.01.2018
  - *Manuale di progettazione RFI DTC SI PS MA IFS 001 C PARTE II – SEZIONE 2;*
  - *Manuale di progettazione RFI DTC SI CS MA IFS 001 C PARTE II – SEZIONE 3;*
- EN 1991-2 “*Eurocodice 1 - Azioni sulle strutture - Parte 2: carichi da traffico sui ponti*”.
- EN 1992-1 “*Eurocodice 2 - Progettazione delle strutture in calcestruzzo - Parte 1-1: Regole generali e regole per edifici*”.
- EN 1992-1 “*Eurocodice 2 - Progettazione delle strutture in calcestruzzo - Parte 2: ponti di calcestruzzo - Progettazione e dettagli costruttivi*”.
- EN 1997-1 “*Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica- Parte 1: Regole generali*”.
- Regolamento (UE) n.1299/2014 del 18 novembre 2014 relativo alle specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema “infrastruttura” del sistema ferroviario dell'Unione Europea.

**SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311**  
**Relazione di calcolo opera provvisoria**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0303 001	A	7 di 44

### 3 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI IMPIEGATI

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

#### 3.1 Calcestruzzo

##### CALCESTRUZZO MICROPALI

Descrizione	Simbolo	Formula	Unità di misura	Valore	Note
Resistenza cubica a compressione	$R_{ck}$		N/mm <sup>2</sup>	25.0	
Resistenza cilindrica a compressione	$f_{ck}$	$0.83 * R_{ck}$	N/mm <sup>2</sup>	20.8	
Resistenza cilindrica media a compressione	$f_{cm}$	$f_{ck} + 8$	N/mm <sup>2</sup>	28.8	
Coefficiente per effetti a lungo termine e sfavorevoli	$\alpha_{cc}$ (>28gg)		-	0.9	
Coefficiente parziale di sicurezza relativo al calcestruzzo	$\gamma_c$		-	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 <sup>2</sup>	11.8	
Resistenza cilindrica media a trazione	$f_{ctm}$	$0.3 * (f_{ck})^{2/3}$	N/mm <sup>2</sup>	2.3	Per classi $\leq$ C50/60
Resistenza cilindrica media a trazione	$f_{ctk}$	$0.7 * f_{ctm}$	N/mm <sup>2</sup>	1.6	
Resistenza di calcolo a trazione	$f_{ctd}$	$f_{ctk} / \gamma_c$	N/mm <sup>2</sup>	1.1	
Resistenza media a trazione per flessione	$f_{ctm}$	$1.2 * f_{ctm}$	N/mm <sup>2</sup>	2.7	
Resistenza cilindrica caratteristica a trazione	$f_{ctk}$	$0.7 * f_{ctm}$	N/mm <sup>2</sup>	1.9	
Modulo elastico	$E_{cm}$	$22000 * (f_{cm} / 10)^{0.3}$	N/mm <sup>2</sup>	30200	
Peso proprio	$\gamma_c$		N/m <sup>3</sup>	25000	
Coefficiente di Poisson	$\nu$		-	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). Per barre di diametro $\leq$ 32mm
Coefficiente di aderenza	$\eta$		-	1.0	
Resistenza tangenziale caratteristica di aderenza	$f_{bk}$	$2.25 * \eta * f_{ctk}$	N/mm <sup>2</sup>	3.6	
Resistenza tangenziale di aderenza di calcolo	$f_{bd}$	$f_{bk} / \gamma_c$	N/mm <sup>2</sup>	2.4	
<b>Tensioni di progetto del cs allo S.L.E</b>					
Massima tensione di compressione in combinazione di carico RARA	$\sigma_c$	$0.55 * f_{ck}$	N/mm <sup>2</sup>	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	$\sigma_c$	$0.40 * f_{ck}$	N/mm <sup>2</sup>	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					

**SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311**  
**Relazione di calcolo opera provvisoria**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0303 001	A	8 di 44

**CALCESTRUZZO TIRANTE**

Descrizione	Simbolo	Formula	Unità di misura	Valore	Note
Resistenza cubica a compressione	$R_{ck}$		N/mm <sup>2</sup>	25.0	
Resistenza cilindrica a compressione	$f_{ck}$	$0.83 * R_{ck}$	N/mm <sup>2</sup>	20.8	
Resistenza cilindrica media a compressione	$f_{cm}$	$f_{ck} + 8$	N/mm <sup>2</sup>	28.8	
Coefficiente per effetti a lungo termine e sfavorevoli	$a_{cc}$ (>28gg)		-	0.9	
Coefficiente parziale di sicurezza relativo al calcestruzzo	$\gamma_c$		-	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	$f_{cd}$	$(a_{cc} * f_{ck}) / \gamma_c$	N/mm <sup>2</sup>	11.8	
Resistenza cilindrica media a trazione	$f_{ctm}$	$0.3 * (f_{ck})^{2/3}$	N/mm <sup>2</sup>	2.3	Per classi $\leq$ C50/60
Resistenza cilindrica media a trazione	$f_{ctk}$	$0.7 * f_{ctm}$	N/mm <sup>2</sup>	1.6	
Resistenza di calcolo a trazione	$f_{ctd}$	$f_{ctk} / \gamma_c$	N/mm <sup>2</sup>	1.1	
Resistenza media a trazione per flessione	$f_{ctm}$	$1.2 * f_{ctm}$	N/mm <sup>2</sup>	2.7	
Resistenza cilindrica caratteristica a trazione	$f_{ctk}$	$0.7 * f_{ctm}$	N/mm <sup>2</sup>	1.9	
Modulo elastico	$E_{cm}$	$22000 * (f_{cm} / 10)^{0.3}$	N/mm <sup>2</sup>	30200	
Peso proprio	$\gamma_c$		N/m <sup>3</sup>	25000	
Coefficiente di Poisson	$\nu$		-	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	$\eta$		-	1.0	Per barre di diametro $\leq$ 32mm
Resistenza tangenziale caratteristica di aderenza	$f_{bk}$	$2.25 * \eta * f_{ctk}$	N/mm <sup>2</sup>	3.6	
Resistenza tangenziale di aderenza di calcolo	$f_{bd}$	$f_{bk} / \gamma_c$	N/mm <sup>2</sup>	2.4	
<b>Tensioni di progetto del cs allo S.L.E</b>					
Massima tensione di compressione in combinazione di carico RARA	$\sigma_c$	$0.55 * f_{ck}$	N/mm <sup>2</sup>	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	$\sigma_c$	$0.40 * f_{ck}$	N/mm <sup>2</sup>	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					

**SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311**  
**Relazione di calcolo opera provvisoria**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0303 001	A	9 di 44

**CALCESTRUZZO CORDOLO**

Descrizione	Simbolo	Formula	Unità di misura	Valore	Note
Resistenza cubica a compressione	$R_{ck}$		N/mm <sup>2</sup>	30.0	
Resistenza cilindrica a compressione	$f_{ck}$	$0.83 * R_{ck}$	N/mm <sup>2</sup>	24.9	
Resistenza cilindrica media a compressione	$f_{cm}$	$f_{ck} + 8$	N/mm <sup>2</sup>	32.9	
Coefficiente per effetti a lungo termine e sfavorevoli	$\alpha_{cc}$ ( $t > 28$ gg)		-	0.9	
Coefficiente parziale di sicurezza relativo al calcestruzzo	$\gamma_c$		-	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 <sup>2</sup>	14.1	
Resistenza cilindrica media a trazione	$f_{ctm}$	$0.3 * (f_{ck})^{2/3}$	N/mm <sup>2</sup>	2.6	Per classi $\leq$ C50/60
Resistenza cilindrica media a trazione	$f_{ctk}$	$0.7 * f_{ctm}$	N/mm <sup>2</sup>	1.8	
Resistenza di calcolo a trazione	$f_{ctd}$	$f_{ctk} / \gamma_c$	N/mm <sup>2</sup>	1.2	
Resistenza media a trazione per flessione	$f_{ctm}$	$1.2 * f_{ctm}$	N/mm <sup>2</sup>	3.1	
Resistenza cilindrica caratteristica a trazione	$f_{ctk}$	$0.7 * f_{ctm}$	N/mm <sup>2</sup>	2.1	
Modulo elastico	$E_{cm}$	$22000 * (f_{cm} / 10)^{0.3}$	N/mm <sup>2</sup>	31447	
Peso proprio	$\gamma_c$		N/m <sup>3</sup>	25000	
Coefficiente di Poisson	$\nu$		-	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	$\eta$		-	1.0	Per barre di diametro $\leq$ 32mm
Resistenza tangenziale caratteristica di aderenza	$f_{bk}$	$2.25 * \eta * f_{ctk}$	N/mm <sup>2</sup>	4.0	
Resistenza tangenziale di aderenza di calcolo	$f_{bd}$	$f_{bk} / \gamma_c$	N/mm <sup>2</sup>	2.7	
<b>Tensioni di progetto del cs allo S.L.E</b>					
Massima tensione di compressione in combinazione di carico RARA	$\sigma_c$	$0.55 * f_{ck}$	N/mm <sup>2</sup>	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	$\sigma_c$	$0.40 * f_{ck}$	N/mm <sup>2</sup>	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					

**SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311**  
**Relazione di calcolo opera provvisoria**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0303 001	A	10 di 44

## 3.2 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 <sup>2</sup>	540	
Resistenza caratteristica a snervamento	$f_{y, nom}$		N/mm <sup>2</sup>	450	
Coefficiente parziale di sicurezza relativo all'acciaio	$\gamma_s$		-	1.15	
Resistenza di calcolo	$f_{yd}$	$f_{yk} / \gamma_s$	N/mm <sup>2</sup>	391.3	
Modulo elastico	$E_s$		N/mm <sup>2</sup>	206000	
<b>Tensioni di progetto del ds allo S.L.E.</b>					
Tensione massima di esercizio per l'acciaio	$\sigma_s$	$0.75 * f_{yk}$	N/mm <sup>2</sup>	337.5	

### ACCIAIO PER MICROPALI

#### ACCIAIO S355

Descrizione	Simbolo	Formula	Unità di misura	Valore	Note
Modulo elastico	E		N/mm <sup>2</sup>	210000	
Coefficiente di Poisson	$\nu$		-	0.3	
Modulo di elasticità trasversale	G	$E / (2 * (1 + \nu))$	N/mm <sup>2</sup>	80769	
Coefficiente di espansione termica lineare	$\alpha$		1/°C	1.20E-05	Per T fino a 100°C
Densità	$\rho$		kg/m <sup>3</sup>	7850	
Resistenza caratteristica a snervamento	$f_{yk}$		N/mm <sup>2</sup>	355	
Resistenza caratteristica a rottura	$f_{tk}$		N/mm <sup>2</sup>	490	

### ACCIAIO PER TRAVE DI RIPARTIZIONE

#### ACCIAIO S275

Descrizione	Simbolo	Formula	Unità di misura	Valore	Note
Modulo elastico	E		N/mm <sup>2</sup>	210000	
Coefficiente di Poisson	$\nu$		-	0.3	
Modulo di elasticità trasversale	G	$E / [2 * (1 + \nu)]$	N/mm <sup>2</sup>	80769	
Coefficiente di espansione termica lineare	$\alpha$		1/°C	1.20E-05	Per T fino a 100°C
Densità	$\rho$		kg/m <sup>3</sup>	7850	
Resistenza caratteristica a snervamento	$f_{yk}$		N/mm <sup>2</sup>	275	
Resistenza caratteristica a rottura	$f_{tk}$		N/mm <sup>2</sup>	430	

### ACCIAIO PER TIRANTE

#### ACCIAIO ARMONICO PER TREFOLI

Descrizione	Simbolo	Formula	Unità di misura	Valore	Note
Modulo elastico	E		N/mm <sup>2</sup>	210000	
Coefficiente di Poisson	$\nu$		-	0.3	
Modulo di elasticità trasversale	G	$E / [2 * (1 + \nu)]$	N/mm <sup>2</sup>	80769	
Coefficiente di espansione termica lineare	$\alpha$		1/°C	1.20E-05	Per T fino a 100°C
Densità	$\rho$		kg/m <sup>3</sup>	7850	
Resistenza caratteristica a snervamento	$f_{yk}$		N/mm <sup>2</sup>	1670	
Resistenza caratteristica a rottura	$f_{tk}$		N/mm <sup>2</sup>	1860	

## 4 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	$\gamma$	$c_u$	$c'$	$\phi'$	E
	m	kN/m <sup>3</sup>	kPa	kPa	°	MPa
Sabbia con argilla limosa ghiaiosa	0-1.8	18	-	0	30	45
Ghiaia sabbiosa con ciottoli	1.8-30	20	-	0	34	70

**Tabella 1: Parametri geotecnici della stratigrafia di riferimento**

I parametri riportati in tabella rappresentano:

- $\gamma$  = peso di volume del terreno [kN/m<sup>3</sup>];
- $c_u$  = coesione non drenata [kPa];
- $c'$  = coesione efficace [kPa];
- $\phi'$  = angolo d'attrito interno di picco [°];
- $E'$  = modulo elastico operativo del terreno [MPa];

La falda si considera ad una profondità di 31.8m dal piano campagna.

Per i parametri relativi al calcolo delle tensioni tangenziali lungo il bulbo di calcestruzzo, si prende a riferimento l'abaco di Bustamante e Doix con riferimento al valore di  $N_{SPT}$  medio. Si è considerato che il sondaggio S3-2015 ha gli stessi valori di  $N_{SPT}$  come gli sondaggi S1-2015 e S2-2015. Dal rapporto geotecnico abbiamo preso un valore medio  $N_{1(60)} = 46$ . Si considerano i valori minimi di "α" e i massimi per le tensioni tangenziali (Metodo IRS).

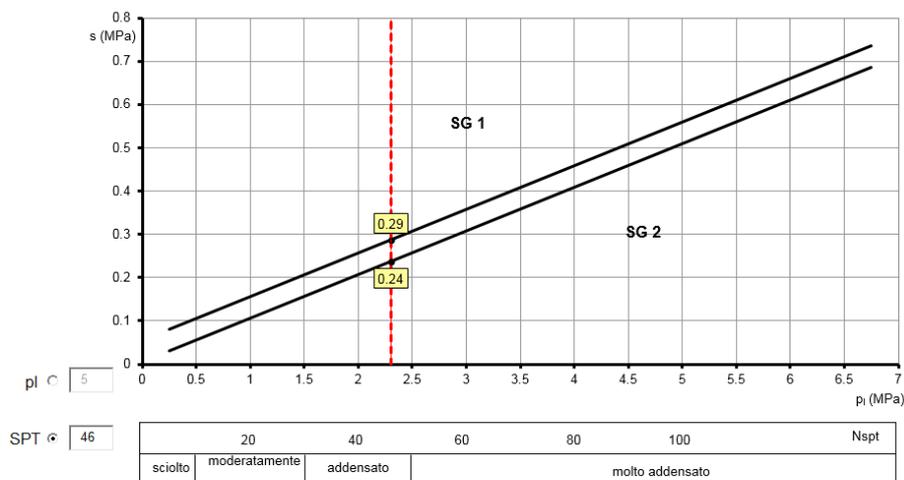
**SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311**  
**Relazione di calcolo opera provvisoriale**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0303 001	A	12 di 44

Sondaggio	Profondità m	Liao e Whitman - 1985	
		N <sub>spt</sub> N <sub>60</sub> (colpi/cm)	N <sub>spt</sub> (N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub>
S2-2015	3	54	70
	6	50	46
	9	72	54
	12	82	53
	15	82	47
	18	81	43
	21	82	40
	24	78	36
	27	82	35
	BH1-2019	2	6
4,3		82	93
7		82	69
9		82	61
11		82	55
14		77	46
20,4		82	41
25,7		70	31
26,5		82	36
28,7		81	34
S1-2015	3	82	100
	6	82	75
	9	82	61
	12	82	53
	15	82	47
	18	71	37
	21	82	40
	24	82	37
	27	82	35
	30	78	32
	33	69	27
	36	82	31
	39	82	31

**Tabella 2: Valori N<sub>spt</sub> nei sondaggi.**

Abaco per il calcolo di s per sabbie e ghiaie



**Tabella 3: Abaco di Bustamante e Doix.**

A favore di sicurezza abbiamo assunto un valore massimo di  $q_{skin}$  di 200 kPa e un valore massimo del coefficiente  $\alpha = 1.4$ .

## 5 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 17.0.5 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 rigidità delle molle.

Per tener conto della presenza del tirante e della trave di ripartizione in testa alla paratia, si inseriscono degli elementi specifici attia modellare i suddetti elementi strutturali.

## 5.1 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  $\sigma'_h$  a quella verticale  $\sigma'_v$  attraverso la relazione:

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

$K_0$  dipende dalla resistenza del terreno, attraverso il suo angolo di attrito efficace  $\phi'$  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  $\delta$  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

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

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

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.

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

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

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

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

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

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

## 5.2 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:

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

Nelle relazioni presentate,  $\Delta$  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 ANALISI DEI CARICHI

I carichi considerati nel modello di calcolo si riferiscono ai carichi permanenti strutturali associati alla spinta del terreno ed a un carico accidentale a monte dovuto alla presenza dei mezzi agricoli di 20 kN/m<sup>2</sup>.

### 6.1 Parametri di deformabilità del terreno

La spinta attiva e passiva del terreno a monte e a valle della paratia è valutata a partire dal modello geotecnico adottato secondo l'approccio di Rankine per cui:

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

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

Il valore limite della tensione orizzontale è quindi pari a:

$$\sigma'_h = K_A \sigma'_v - 2c' \sqrt{K_A}$$

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

Le forze dovute alle spinte attiva e passiva del terreno sono automaticamente valutate dal software di calcolo per le diverse fasi di realizzazione dell'opera.

## 7 CRITERI DI VERIFICA

Le analisi di verifica della paratia, del tirante e della trave di ripartizione 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;
  - sfilamento di uno o più ancoraggi.
- SLU di tipo strutturale (STR)
  - raggiungimento della resistenza strutturale della paratia;
  - raggiungimento della resistenza strutturale di uno o più ancoraggi;
  - raggiungimento della resistenza strutturale della trave di ripartizione.

### 7.1 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.

**SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311**  
**Relazione di calcolo opera provvisoria**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0303 001	A	18 di 44

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 $\gamma_F$ (o $\gamma_R$ )	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  $\gamma_{G1}$

**Tabella 4: 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 $\gamma_M$	(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	$\gamma_V$	$\gamma_V$	1,0	1,0

**Tabella 5: Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno (6.2.II)**

Tab. 6.5.I - Coefficienti parziali  $\gamma_R$  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 6: 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
$\gamma_R$	1,1

**Tabella 7: Coefficienti parziali per le verifiche agli SLU di stabilità globale (6.8.I)**

**SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311**  
**Relazione di calcolo opera provvisoria**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0303 001	A	19 di 44

## 7.2 Verifiche geotecniche del tirante

La verifica di sfilamento della fondazione dell'ancoraggio (GEO) è stata effettuata con riferimento alla combinazione A1+M1+R3 (par. 6.6.2 delle NTC 2018), tenendo conto dei coefficienti riportati nelle precedenti tabelle e, per quanto riguarda R3, con quelli della Tabella 6.6.I.

*Tab. 6.6.I - Coefficienti parziali per la resistenza degli ancoraggi*

	Simbolo	Coefficiente parziale
Temporanei	$\gamma_R$	1,1
Permanenti	$\gamma_R$	1,2

### Tabella 8– Coefficienti di sicurezza per la resistenza di ancoraggi (6.6.I)

In dette verifiche, la massima azione di progetto  $E_d$  è stata confrontata con la resistenza di progetto  $R_{ad}$ , determinata applicando alla resistenza caratteristica  $R_{ak}$  i fattori parziali  $\gamma_R$  riportati nella precedente tabella. Il valore caratteristico della resistenza allo sfilamento  $R_{ak}$  non è stato determinato con prove di progetto su ancoraggi di prova, e pertanto la normativa prescrive di valutare  $R_{ak}$  come il minore dei valori ottenuti applicando i coefficienti di correlazione  $\xi_{a3}$  e  $\xi_{a4}$  riportati nella Tabella 6.6.III rispettivamente al valor medio e al valor minimo delle resistenze  $R_{a,c}$  ottenute dal calcolo:

$$R_{ak} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{a,c})_{\text{medio}}}{\xi_{a3}}; \frac{(R_{a,c})_{\text{min}}}{\xi_{a4}} \right\}$$

*Tab. 6.6.III - Fattori di correlazione per derivare la resistenza caratteristica dalle prove geotecniche, in funzione del numero n di profili di indagine*

Numero di profili di indagine	1	2	3	4	≥ 5
$\xi_{a3}$	1,80	1,75	1,70	1,65	1,60
$\xi_{a4}$	1,80	1,70	1,65	1,60	1,55

Nel caso in esame, si è scelto cautelativamente di considerare un numero di verticali indagate pari a 1, e utilizzare di conseguenza i seguenti coefficienti di riduzione:

- $\xi_{a3} = 1.80$
- $\xi_{a4} = 1.80$

**SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311**  
**Relazione di calcolo opera provvisoria**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0303 001	A	20 di 44

### 7.2.1 Coefficienti di combinazione per verifiche strutturali e geotecniche della paratia tirantata

#### Coefficienti A

Nome	Carichi	Carichi	Carichi	Carichi	Carico
	Permanenti Sfavorevoli	Permanenti Favorevoli	Variabili Sfavorevoli	Variabili Favorevoli	Sismico
Simbolo	$\gamma_G$	$\gamma_G$	$\gamma_Q$	$\gamma_Q$	$\gamma_{QE}$
Nominal	1	1	1	1	1
SLE (Rara)	1	1	1	1	0
A1+M1+R1 (R3 per tiranti)	1.3	1	1.5	0	0
A2+M2+R1	1	1	1.3	0	0
A2+M2+R2	1	1	1.3	0	0

#### Coefficienti M

Nome	Parziale su $\tan(\phi')$	Parziale su $c'$	Parziale su $S_u$	Parziale su $q_u$	Parziale su peso specifico
Simbolo	$\gamma_\phi$	$\gamma_c$	$\gamma_{c_u}$	$\gamma_{q_u}$	$\gamma_v$
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	1.6	1
A2+M2+R2	1.25	1.25	1.4	1.6	1

#### Coefficienti R

Nome	Parziale resistenza terreno (es. $K_p$ )	Parziale resistenza Tiranti permanenti	Parziale resistenza Tiranti temporanei	Parziale elementi strutturali
Simbolo	$\gamma_{Re}$	$\gamma_{ap}$	$\gamma_{at}$	
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	1.2	1.1	1

**Tabella 9: Coefficienti parziali per le verifiche agli SLE, SLU e sismiche considerati in Paratie Plus**

### 7.3 Verifiche strutturali

Le verifiche strutturali delle membrature in acciaio dei micropali, del tirante e della trave di ripartizione sono state sviluppate nel rispetto delle indicazioni riportate al paragrafo 4.2.4 delle NTC 2018.

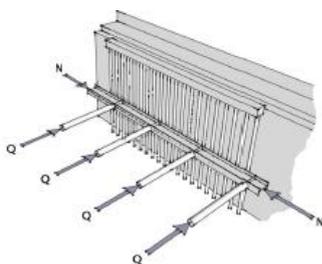
Nello specifico per quanto riguarda i micropali sono condotte le verifiche a flessione monoassiale (paragrafo 4.2.4.1.2.3 delle NTC 2018) e taglio (paragrafo 4.2.4.1.2.4 delle NTC 2018). Nelle immagini a seguire si riporteranno i diagrammi delle sollecitazioni agenti e le relative verifiche espresse 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.

La verifica strutturale del tirante di ancoraggio consiste nella verifica della rottura per trazione dei trefoli. Per la realizzazione dell'ancoraggio si utilizza acciaio armonico e per il soddisfacimento della suddetta verifica si deve garantire il soddisfacimento della presente disuguaglianza.

$$F_d \leq A_{trefoli} \cdot f_{yd}$$

Per quanto riguarda la trave di ripartizione, si riportano le verifiche di resistenza 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). La trave si modella come un elemento con campata di luce pari all'interasse tra i tiranti. La trave si considera soggetta ad un carico uniformemente distribuito pari al rapporto tra la forza concentrata nel tirante e la luce della stessa.

Le sollecitazioni di progetto sulla trave si calcolano come segue.



Sia \$q\$ la reazione, per unità di larghezza nel vincolo. la reazione complessiva \$Q\$ nel tirante (o nel puntone) è quindi pari a

$$Q = q \cdot S$$

Il momento flettente, alle estremità 1 e 2 è pari a, rispettivamente

$$M_{1,2} = \alpha_{1,2} \cdot Q \cdot S$$

In campata, nel punto medio tra due appoggi successivi, il momento è pari a

$$M_0 = 0.125 \cdot Q \cdot S + 0.5 \cdot (M_1 + M_2)$$

Si può notare quindi che, per modellare una trave in semplice appoggio, basta porre \$\alpha\_1 = \alpha\_2 = 0\$; per modellare una trave con momento negativo pari ad uno schema a doppio incastro si pone \$\alpha\_1 = \alpha\_2 = -(1/12)\$.

Per quanto riguarda il vincolo della trave nelle sezioni di estremità si considera una condizione intermedia tra il sistema di trave in semplice appoggio e trave incastrata. Nello specifico si considera \$\alpha\_1 = \alpha\_2 = -1/12\$.

**SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311**  
**Relazione di calcolo opera provvisoria**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0303 001	A	22 di 44

## 8 RISULTATI DELLE ANALISI

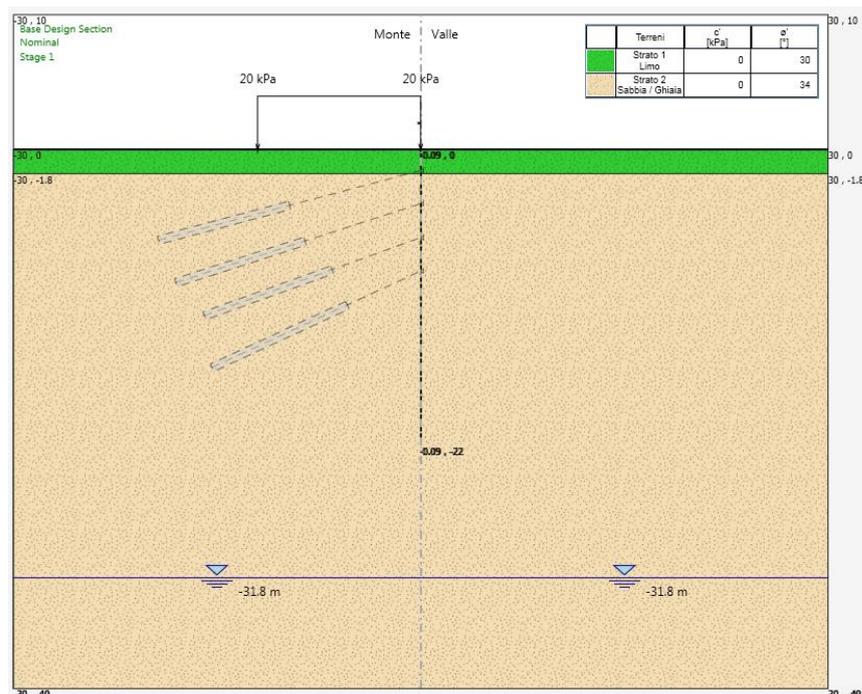
Le analisi eseguite si riferiscono alle sole condizioni statiche, trattandosi di opere provvisoriale con durata prevista in progetto inferiore a 2 anni (par. 2.4.1 delle NTC 2008).

### 8.1 Fasi di calcolo

L'analisi si compone complessivamente di 10 fasi di calcolo:

- Fase 1: modello iniziale con pali  $\phi 240$  a interasse 400 mm realizzati con profondità di infissione pari a 22 m;
- Fase 2: realizzazione dello scavo fino alla quota -2 m;
- Fase 3: realizzazione del primo ordine di tiranti a quota -1.5 m e tesatura.
- Fase 4: realizzazione dello scavo fino alla quota -4.5 m;
- Fase 5: realizzazione del secondo ordine di tiranti a quota -4m e tesatura;
- Fase 6: realizzazione dello scavo fino alla quota -7 m;
- Fase 7: realizzazione del terzo ordine di tiranti a quota -6.5m e tesatura;
- Fase 8: realizzazione dello scavo fino alla quota -9.5 m;
- Fase 9: realizzazione del quarto ordine di tiranti a quota -9m e tesatura;
- Fase 10: realizzazione dello scavo con il profilo del terreno definitivo a -12.1m;

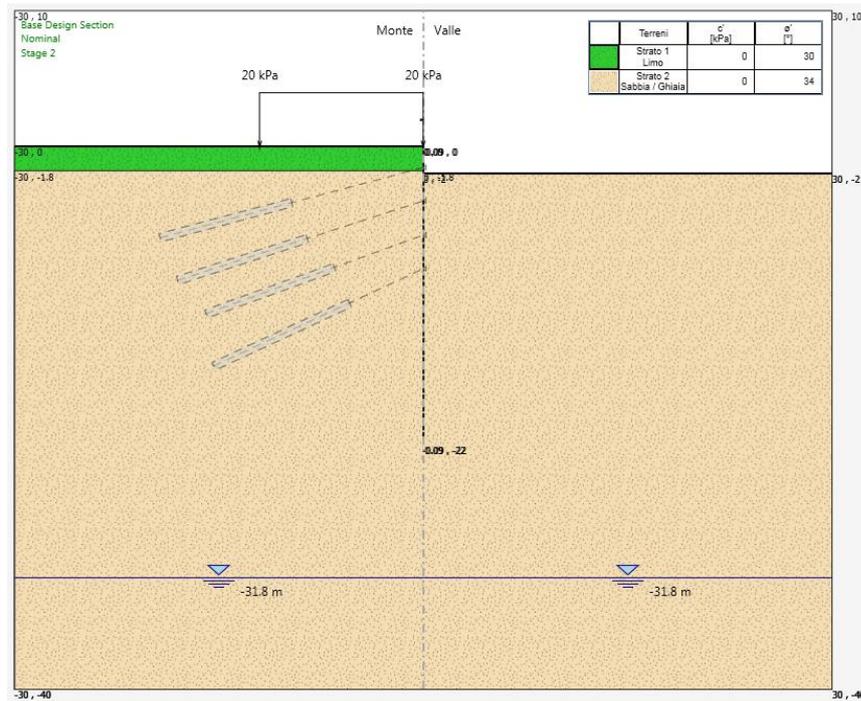
Le fasi sono illustrate nelle figure seguenti.



**SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311**  
**Relazione di calcolo opera provvisoria**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0303 001	A	23 di 44

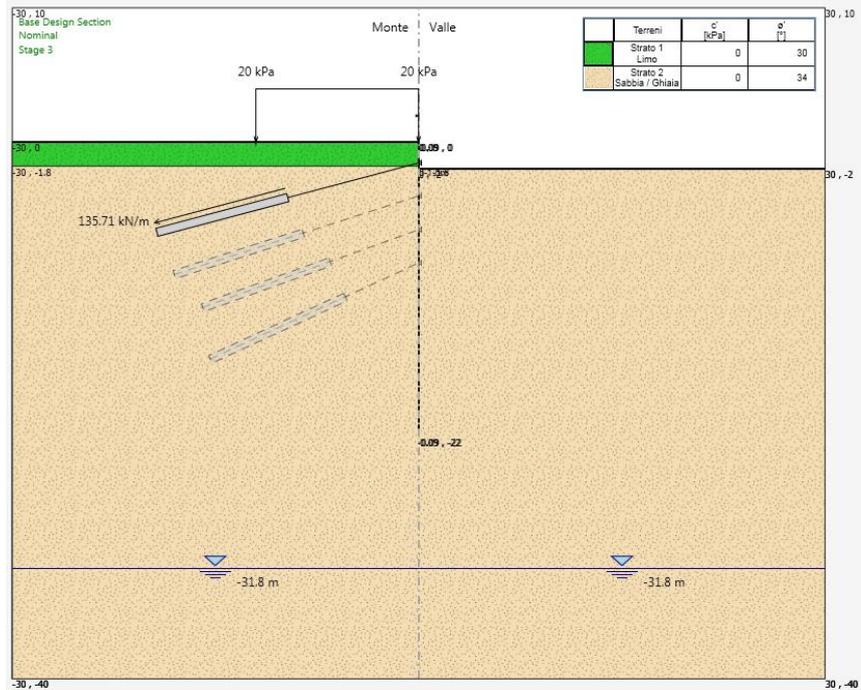
**Figura 2 – Fase 1**



**Figura 3 – Fase 2**

**SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311**  
**Relazione di calcolo opera provvisoria**

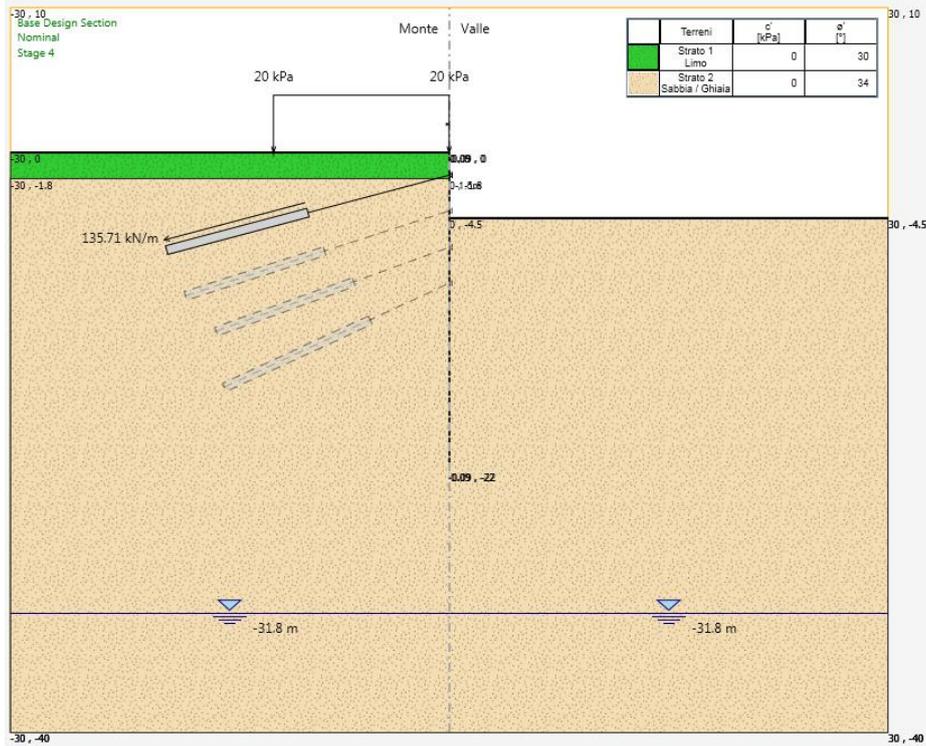
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0303 001	A	24 di 44



**Figura 4 – Fase 3**

**SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311**  
**Relazione di calcolo opera provvisoriale**

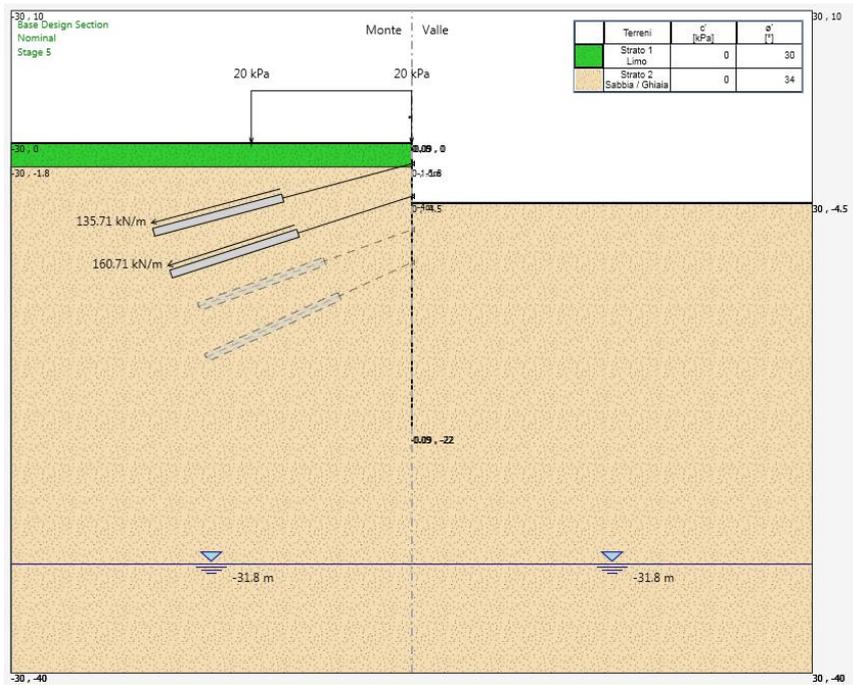
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0303 001	A	25 di 44



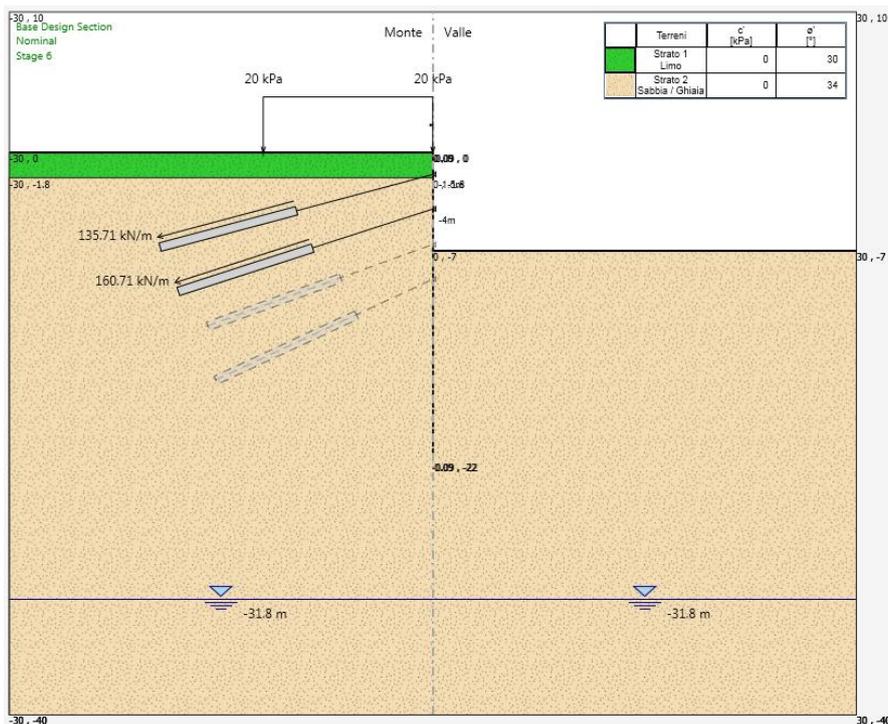
**Figura 5 – Fase 4**

**SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311**  
**Relazione di calcolo opera provvisoria**

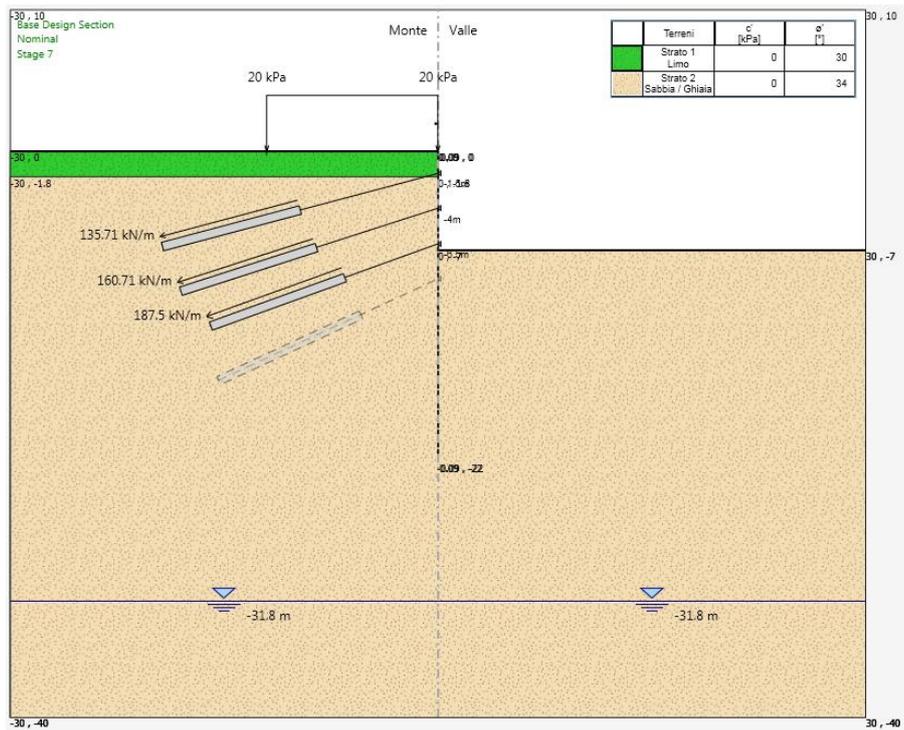
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0303 001	A	26 di 44



**Figura 6 – Fase 5**



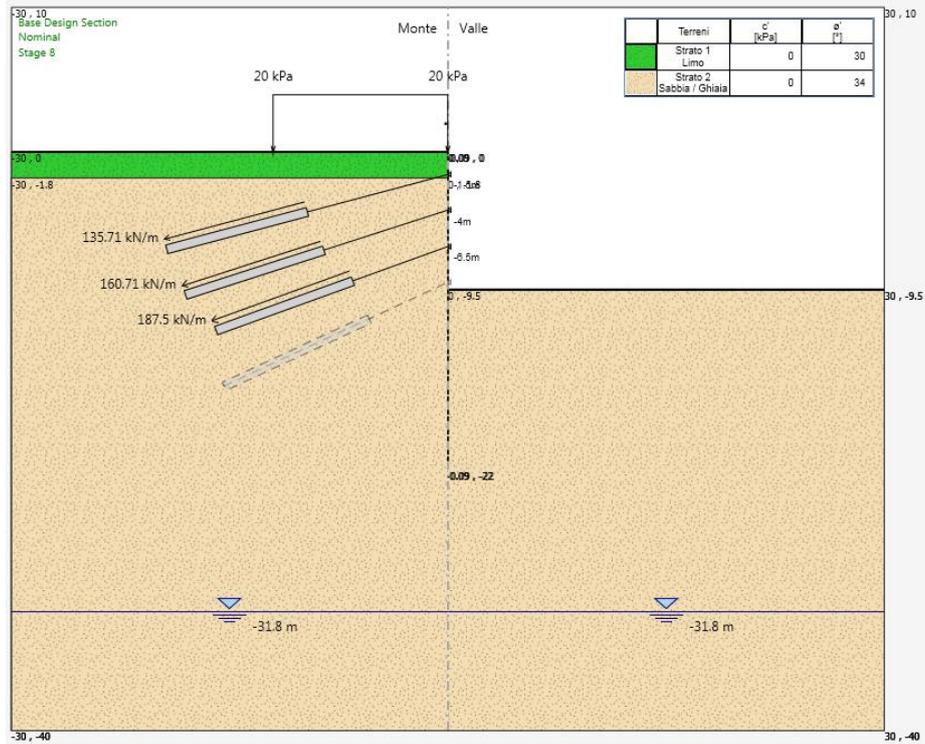
**Figura 7 – Fase 6**



**Figura 8 – Fase 7**

**SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311**  
**Relazione di calcolo opera provvisoria**

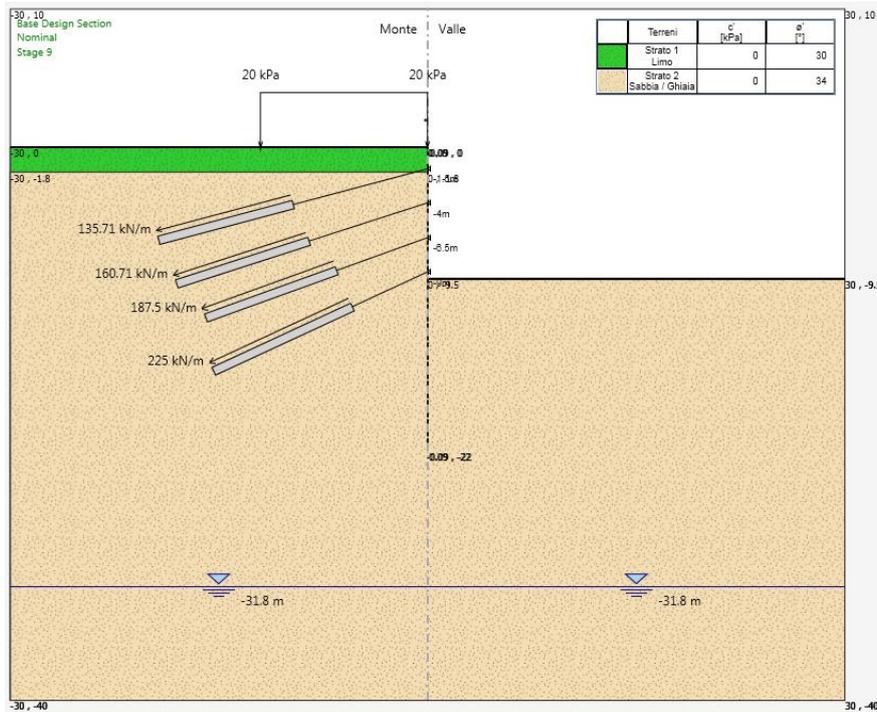
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0303 001	A	28 di 44



**Figura 9 – Fase 8**

**SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311**  
**Relazione di calcolo opera provvisoria**

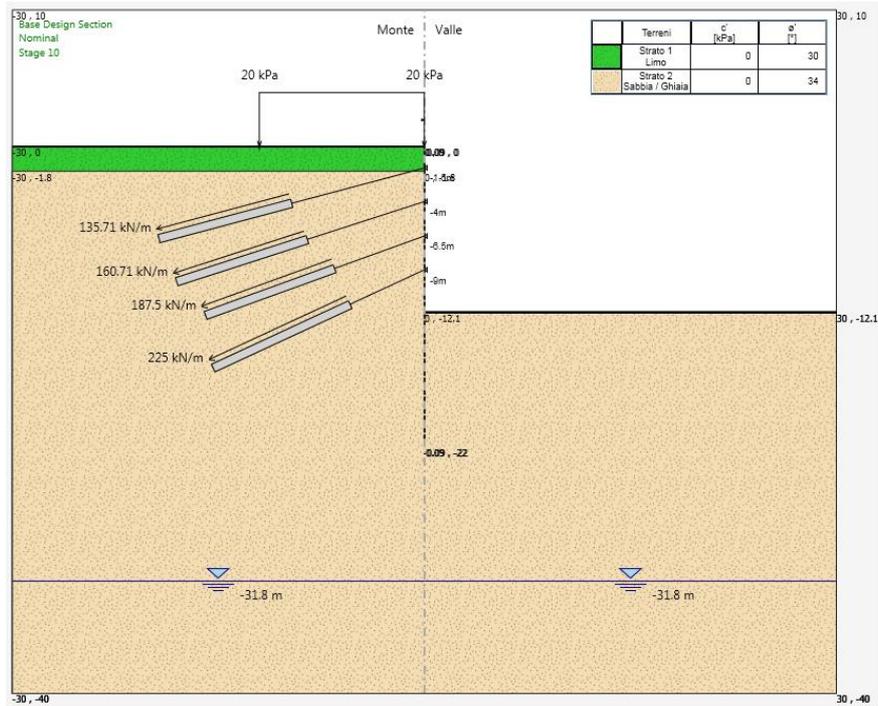
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0303 001	A	29 di 44



**Figura 10 – Fase 9**

**SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311**  
**Relazione di calcolo opera provvisoriale**

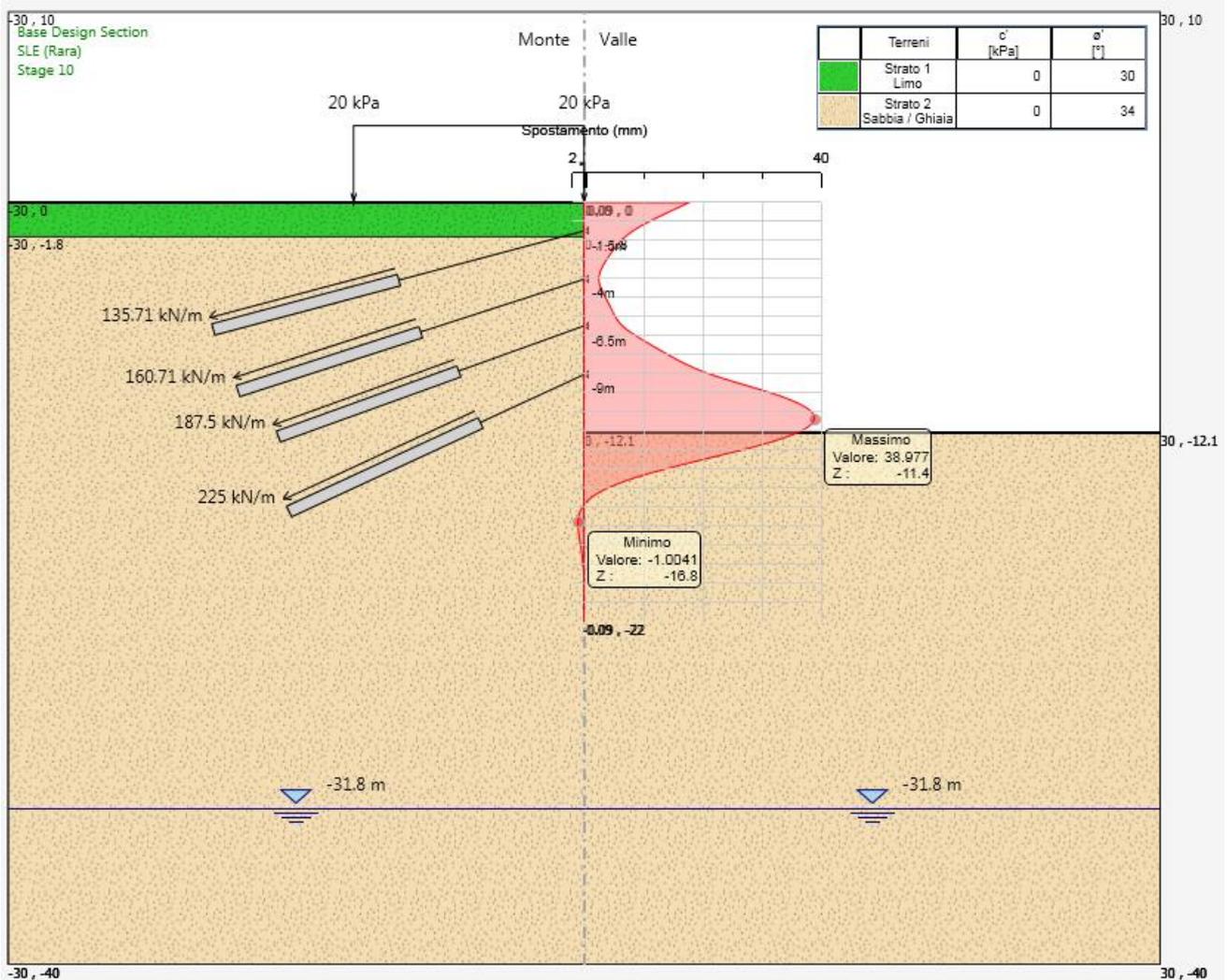
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0303 001	A	30 di 44



**Figura 11 – Fase 10**

### Spostamenti (SLE combinazione tipo Rara)

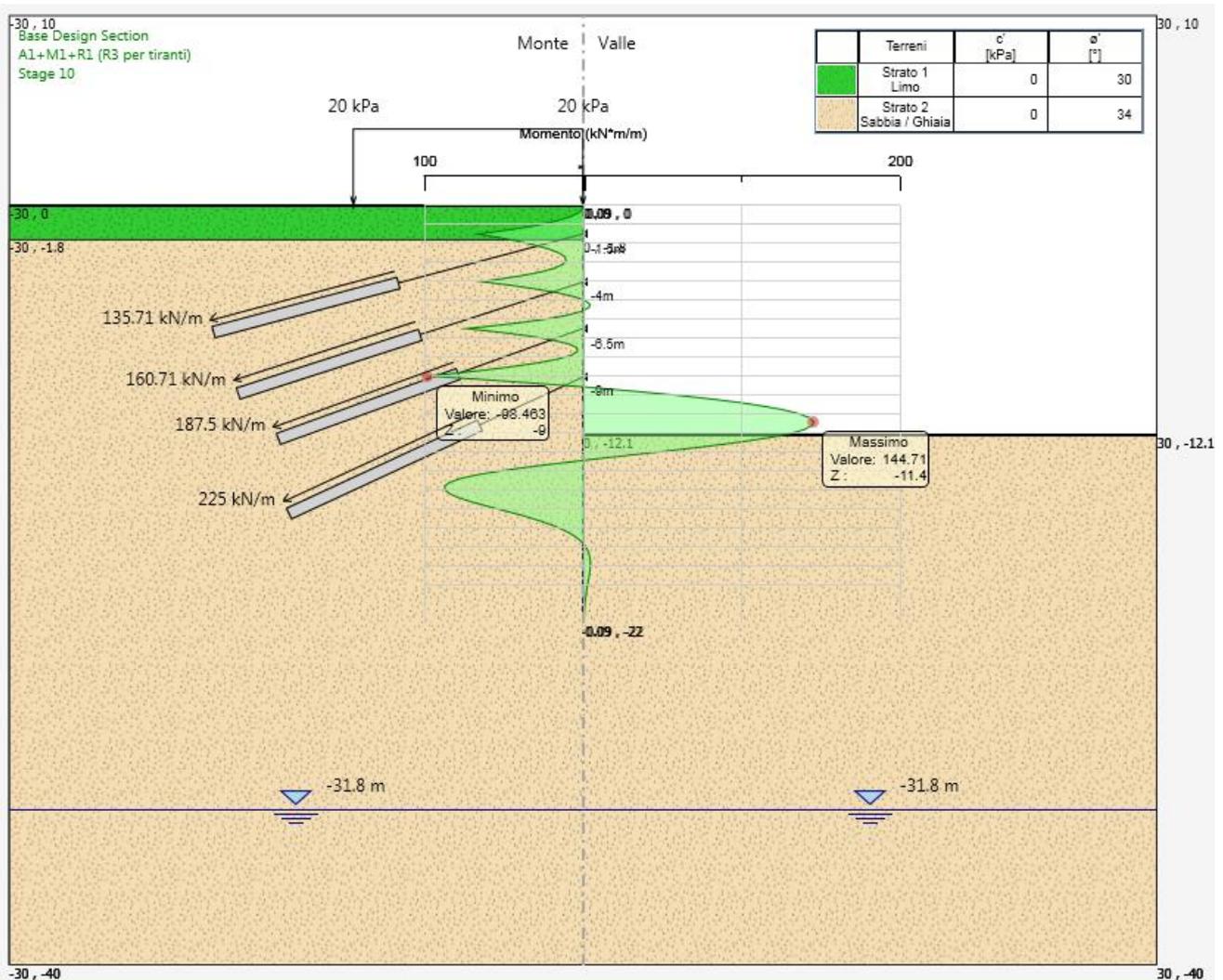
Il massimo spostamento orizzontale si ottiene per la paratia durante la fase 10 e risulta inferiore al convenzionale limite di accettabilità di  $H/200' = 12100\text{mm}/200 = 60.5\text{mm}$  e per questo la verifica agli SLE risulta soddisfatta.



**Figura 12 – Diagramma spostamenti orizzontali paratia**

## 8.2 Sollecitazioni massime (SLU)

### Sollecitazioni massime di momento flettente

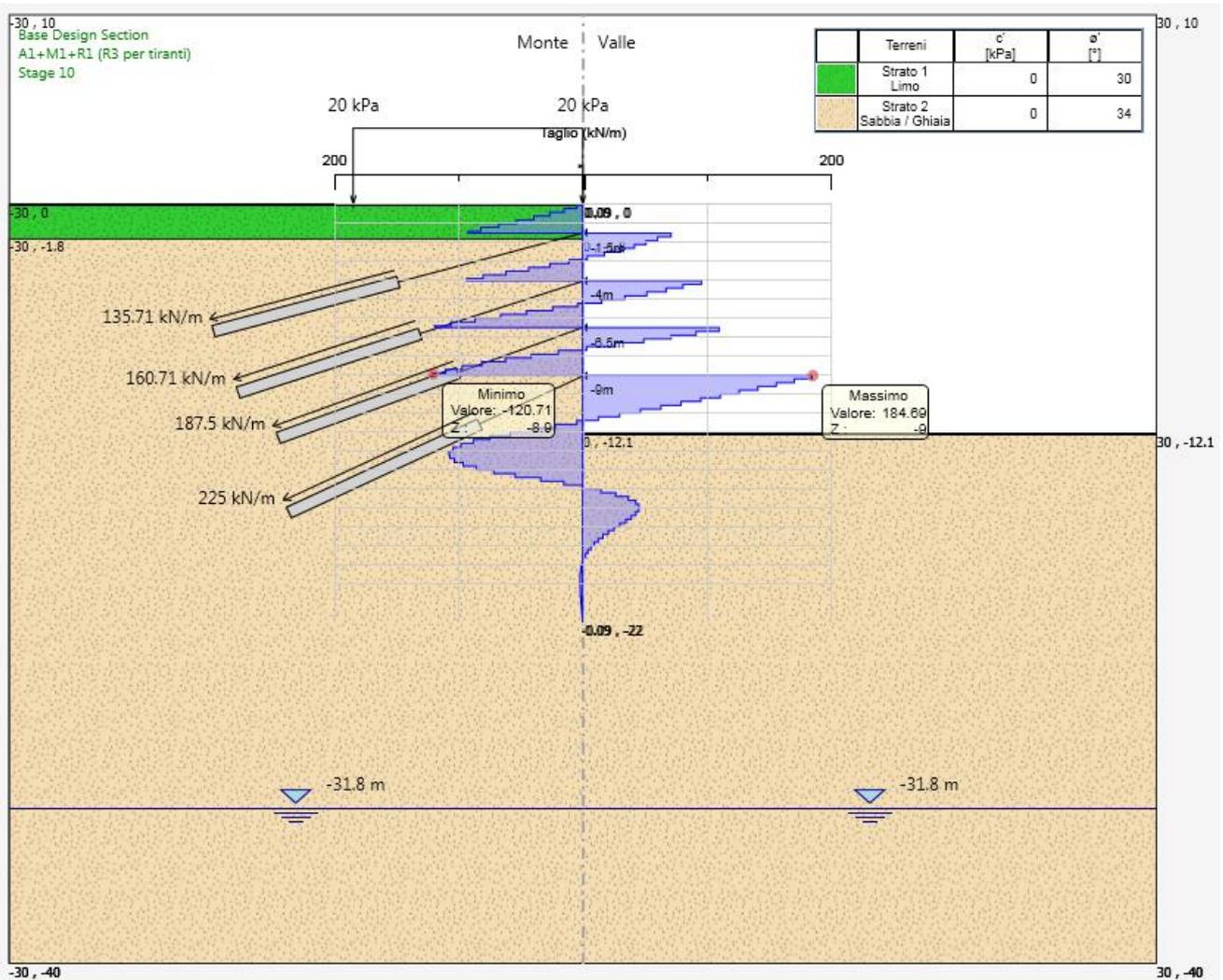


**Figura 13 – Diagramma di momento flettente per la paratia**

$M_{max,d^{**}}$
kNm/m
144.71

**Tabella 10: Sollecitazioni di flessione massima sulla paratia in condizione statica**

*Sollecitazioni massime di taglio*



**Figura 14 – Diagramma di taglio per la paratia**

$V_{max,d}$
kN/m
184.69

**Tabella 11: Sollecitazioni di taglio massime sulla paratia in condizione statica**



**SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311**  
**Relazione di calcolo opera provvisoria**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0303 001	A	35 di 44

## 9.2 Verifica dell'opera di sostegno

### 9.2.1 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)>

Min. spostamento laterale [mm] per tiranti) (Stage 10)	-1.02	Z = -16.8 m	D.A.	A1+M1+R1	(R3)
Max. spostamento laterale [mm] per tiranti) (Stage 10)	39.87	Z = -11.4 m	D.A.	A1+M1+R1	(R3)
Max. Rapporto Spinte (Efficace/Passiva) (Lato SX) per tiranti) (Stage 9)		0.12	D.A.	A1+M1+R1	(R3)
Max. Rapporto Spinte (Efficace/Passiva) (Lato DX) per tiranti) (Stage 10)		0.36	D.A.	A1+M1+R1	(R3)

#### Riepilogo per la DA <A2+M2+R1>

Min. spostamento laterale [mm]	-1.7	Z = -18.4 m	D.A.	A2+M2+R1	(Stage 10)
Max. spostamento laterale [mm] (Stage 10)	110.54	Z = -11.6 m	D.A.	A2+M2+R1	
Max. Rapporto Spinte (Efficace/Passiva) (Lato SX) 9)		0.16	D.A.	A2+M2+R1	(Stage 9)
Max. Rapporto Spinte (Efficace/Passiva) (Lato DX) 10)		0.48	D.A.	A2+M2+R1	(Stage 10)

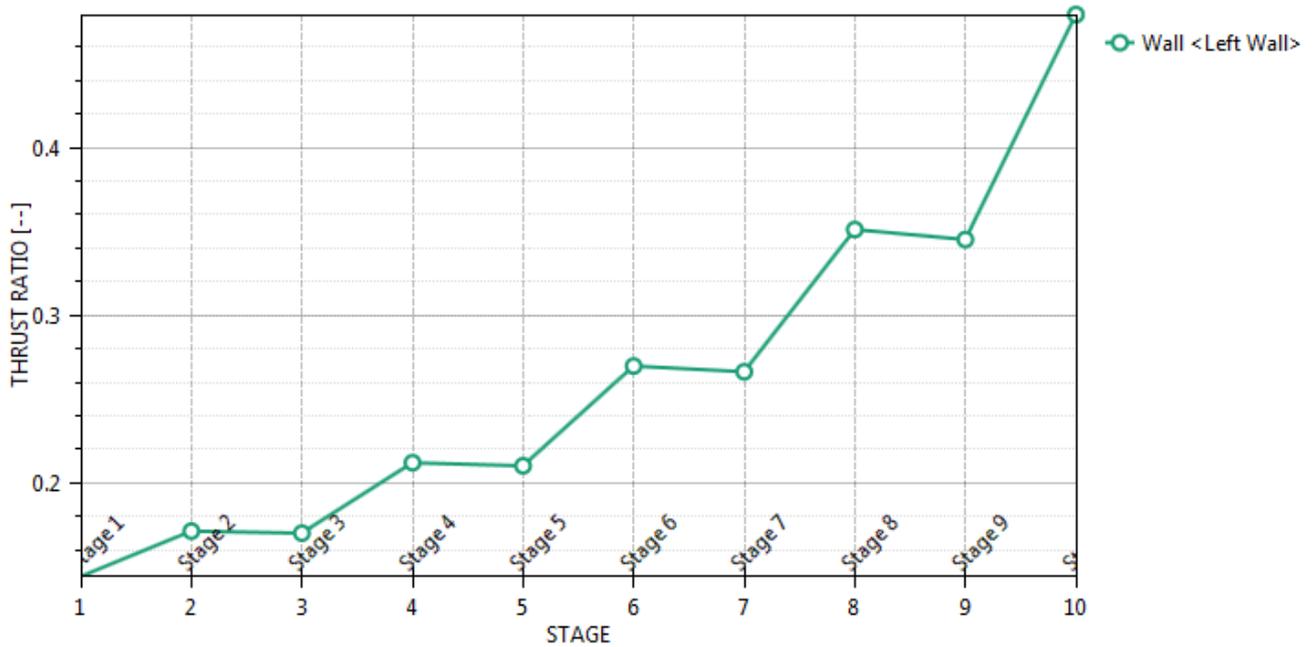
**SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311**  
**Relazione di calcolo opera provvisoriale**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0303 001	A	36 di 44

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

### Massimi rapporti di mobilitazione spinta passiva

D.A. <A2+M2+R1>



 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<b>COMPLETAMENTO DEL NODO DI UDINE – PRG E ACC DEL P.M. CARGNACCO E OPERE SOSTITUTIVE DEI PL INTERFERENTI</b>					
<b>SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311</b> <b>Relazione di calcolo opera provvisoria</b>	COMMESSA IZ09	LOTTO 00	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO SL0303 001	REV. A	FOGLIO 37 di 44

## 9.2.2 Verifica geotecnica dei tiranti

### Lunghezza del tratto libero

La lunghezza libera dei tiranti  $L_{lib\_i}$  è stata stimata a partire dalla distanza  $d_i$  misurata, lungo la direzione del tirante  $i$ -esimo di inclinazione nota, dalla testa dello stesso ad un piano inclinato rispetto alla verticale di un angolo pari a  $45^\circ - \varphi'/2$  e passante per il piede della paratia. La lunghezza libera dell' $i$ -esimo tirante è stata posta pari alla distanza  $d_i$  incrementata del 20%.

Si ha quindi per l' $i$ -esimo tirante:

$$L_{lib\_i} \geq 1.2 \cdot d_i \geq 1.2 \cdot \left( \frac{(H + t - h_i) \cdot \sin(45 - \varphi'/2)}{\sin(45 + \varphi'/2 + \alpha_i)} \right)$$

Dove:

- $\alpha_i$  = inclinazione del tirante rispetto l'orizzontale
- $\varphi$  = angolo d'attrito del terreno
- $H$  = altezza fuori terra paratia
- $t$  = infissione paratia
- $h_i$  = profondità tirante

Si è tenuto conto anche della presenza dei binari sopra al rilevato, pertanto si è incrementata tale lunghezza in modo da far iniziare il bulbo di calcestruzzo ad una distanza tale da andare oltre il binario più distante dalla paratia. In questo modo il bulbo si viene a trovare ad una profondità tale da avere una tensione efficace del terreno sufficientemente grande.

### Lunghezza del bulbo (o fondazione)

La lunghezza di ancoraggio  $L_{anc}$  viene stimata per via iterativa in modo da garantire il soddisfacimento della resistenza allo sfilamento del bulbo di calcestruzzo dal terreno. La tensione limite di aderenza tra il bulbo ed il terreno è determinata in funzione della profondità dell'ancoraggio dal piano campagna e dei parametri geomeccanici che caratterizzano il terreno.

La resistenza nominale allo sfilamento del bulbo di calcestruzzo vale:

$$R_{a,c} = \sum_{strato} (\pi \cdot \alpha \cdot D_d \cdot L_{anc} \cdot q_{skin})$$

Dove:

- $\alpha$  = coefficiente funzione della modalità esecutiva dei tiranti e della natura dei terreni
- $D_d$  = diametro di perforazione dell'i-esimo tirante
- $L_{anc,i}$  = lunghezza ancoraggio tirante dell'i-esimo tirante
- $q_{skin}$  = tensione tangenziale di aderenza bulbo/terreno dell'iesimo tirante

La resistenza allo sfilamento è caratterizzata attraverso tre parametri quali, la tecnologia realizzativa, il coefficiente  $\alpha$  che rappresenta il rapporto tra il diametro reso del bulbo e diametro di perforazione e la tensione unitaria  $q_{skin}$ . In particolare, si utilizzano iniezioni multiple e selettive - metodo IRS, attraverso valvole poste ad interasse non superiore a 0.50 m. I valori di  $q_{skin}$  sono stati stimati a partire dall'abaco di Bustamente e Doix con riferimento al valore di  $N_{SPT}$  medio (vedi relazione geotecnica).

**SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311**  
**Relazione di calcolo opera provvisoria**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0303 001	A	39 di 44

## Verifica geotecnica

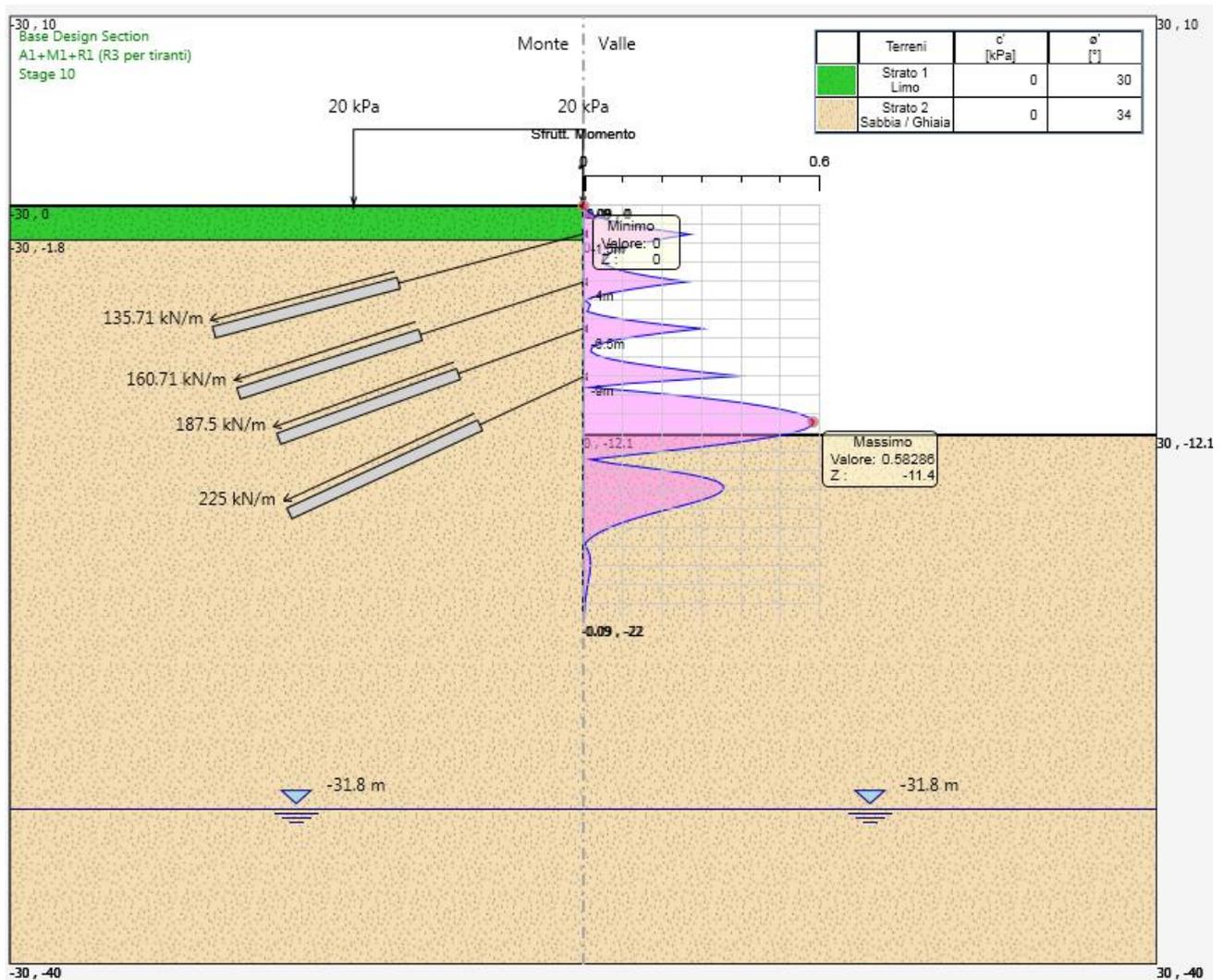
Design Assumption:

Tiranti  Puntoni  Travi di Ripartizione in Acciaio  Travi di Ripartizione in Calcestruzzo

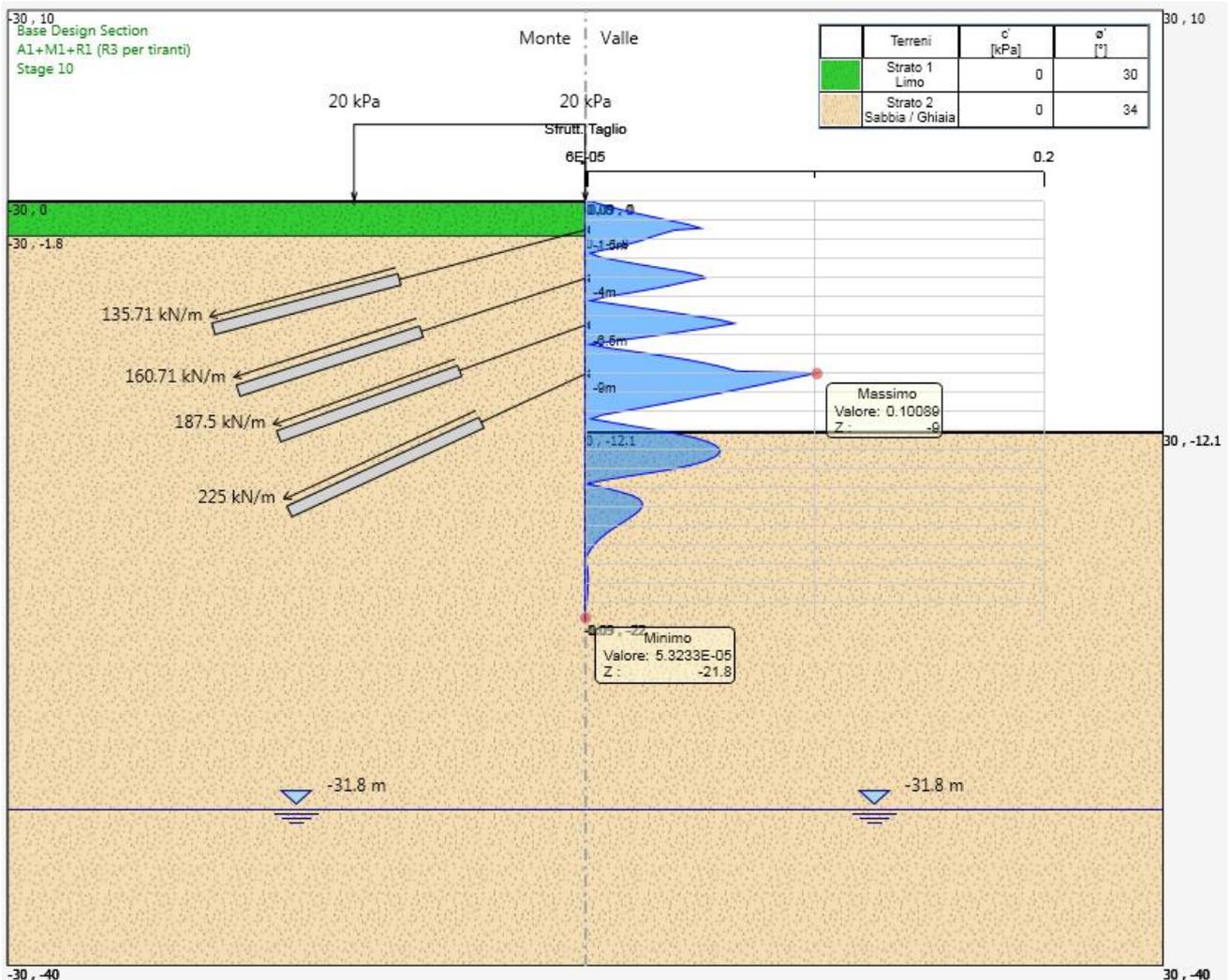
Tirante	Stage	Sollecitazione (kN)	Resistenza GEO (kN)	Resistenza STR (kN)	Sfruttamento GEO	Sfruttamento STR	Resistenza	Gerarchia delle Resistenze
Tirante 1	Stage 3	493.95	710.82	1009.3	0.695	0.489	✓	✓
Tirante 1	Stage 4	503.88	710.82	1009.3	0.709	0.499	✓	✓
Tirante 1	Stage 5	503.56	710.82	1009.3	0.708	0.499	✓	✓
Tirante 1	Stage 6	499.86	710.82	1009.3	0.703	0.495	✓	✓
Tirante 1	Stage 7	501	710.82	1009.3	0.705	0.496	✓	✓
Tirante 1	Stage 8	501.1	710.82	1009.3	0.705	0.496	✓	✓
Tirante 1	Stage 9	500.95	710.82	1009.3	0.705	0.496	✓	✓
Tirante 1	Stage 10	501.35	710.82	1009.3	0.705	0.497	✓	✓
Tirante 2	Stage 5	584.95	710.82	1009.3	0.823	0.58	✓	✓
Tirante 2	Stage 6	603.58	710.82	1009.3	0.849	0.598	✓	✓
Tirante 2	Stage 7	600.64	710.82	1009.3	0.845	0.595	✓	✓
Tirante 2	Stage 8	593	710.82	1009.3	0.834	0.588	✓	✓
Tirante 2	Stage 9	594.99	710.82	1009.3	0.837	0.59	✓	✓
Tirante 2	Stage 10	594.36	710.82	1009.3	0.836	0.589	✓	✓
Tirante 3	Stage 7	585	710.81	1009.3	0.823	0.58	✓	✓
Tirante 3	Stage 8	640.35	710.81	1009.3	0.901	0.634	✓	✓
Tirante 3	Stage 9	632.82	710.81	1009.3	0.89	0.627	✓	✓
Tirante 3	Stage 10	616.71	710.81	1009.3	0.868	0.611	✓	✓
Tirante 4	Stage 9	585	781.9	1009.3	0.748	0.58	✓	✓
Tirante 4	Stage 10	697.02	781.9	1009.3	0.891	0.691	✓	✓

### 9.2.3 Verifica strutturale della paratia

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



**Figura 16 – Diagramma di sfruttamento a momento flettente (involoppo)**



**Figura 17 – Diagramma di sfruttamento a taglio (involoppo)**

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)>**

**Risultati Elementi parete (Beam)**

Paratia	Max. momento (assoluto) [kNm/m]	144.71	Z = -11.4 m
D.A. A1+M1+R1 (R3 per tiranti) (Stage 10)			
	Max. taglio [kN/m]	184.69	Z = -9.2 m D.A. A1+M1+R1
(R3 per tiranti) (Stage 10)			

**SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311**  
**Relazione di calcolo opera provvisoria**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0303 001	A	42 di 44

SteelWord: massimo struttamento in flessione 0.583 Z = -11.4 m  
D.A. A1+M1+R1 (R3 per tiranti) (Stage 10)

SteelWord: massimo struttamento a taglio 0.101 Z = -9 m D.A.  
A1+M1+R1 (R3 per tiranti) (Stage 10)

### Riepilogo per la DA <A2+M2+R1>

#### Risultati Elementi parete (Beam)

Paratia Max. momento (assoluto) [kNm/m] 200.34 Z = -11.8 m  
D.A. A2+M2+R1 (Stage 10)

Max. taglio [kN/m] 203.07 Z = -9.2 m D.A. A2+M2+R1  
(Stage 10)

SteelWord: massimo struttamento in flessione 0.807 Z = -11.8 m  
D.A. A2+M2+R1 (Stage 10)

SteelWord: massimo struttamento a taglio 0.111 Z = -9 m D.A.  
A2+M2+R1 (Stage 10)

### 9.2.4 Verifica strutturale del tirante

Le verifiche strutturali dei tiranti di ancoraggio sono di seguito riportate:

Design Assumption:

Tiranti

Tirante	Stage	Sollecitazione (kN)	Resistenza GEO (kN)	Resistenza STR (kN)	Sfruttamento GEO	Sfruttamento STR	Resistenza	Gerarchia delle Resistenze
Tirante 1	Stage 3	493.95	710.82	1009.3	0.695	0.489	✓	✓
Tirante 1	Stage 4	503.88	710.82	1009.3	0.709	0.499	✓	✓
Tirante 1	Stage 5	503.56	710.82	1009.3	0.708	0.499	✓	✓
Tirante 1	Stage 6	499.86	710.82	1009.3	0.703	0.495	✓	✓
Tirante 1	Stage 7	501	710.82	1009.3	0.705	0.496	✓	✓
Tirante 1	Stage 8	501.1	710.82	1009.3	0.705	0.496	✓	✓
Tirante 1	Stage 9	500.95	710.82	1009.3	0.705	0.496	✓	✓
Tirante 1	Stage 10	501.35	710.82	1009.3	0.705	0.497	✓	✓
Tirante 2	Stage 5	584.95	710.82	1009.3	0.823	0.58	✓	✓
Tirante 2	Stage 6	603.58	710.82	1009.3	0.849	0.598	✓	✓
Tirante 2	Stage 7	600.64	710.82	1009.3	0.845	0.595	✓	✓
Tirante 2	Stage 8	593	710.82	1009.3	0.834	0.588	✓	✓
Tirante 2	Stage 9	594.99	710.82	1009.3	0.837	0.59	✓	✓
Tirante 2	Stage 10	594.36	710.82	1009.3	0.836	0.589	✓	✓
Tirante 3	Stage 7	585	710.81	1009.3	0.823	0.58	✓	✓
Tirante 3	Stage 8	640.35	710.81	1009.3	0.901	0.634	✓	✓
Tirante 3	Stage 9	632.82	710.81	1009.3	0.89	0.627	✓	✓
Tirante 3	Stage 10	616.71	710.81	1009.3	0.868	0.611	✓	✓
Tirante 4	Stage 9	585	781.9	1009.3	0.748	0.58	✓	✓
Tirante 4	Stage 10	697.02	781.9	1009.3	0.891	0.691	✓	✓

**SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311**  
**Relazione di calcolo opera provvisoria**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0303 001	A	43 di 44

## 9.2.5 Verifica della trave di ripartizione

Le verifiche strutturali della trave di ripartizione sono di seguito riportate.

Design Assumption:

Tiranti  Puntoni  Travi di Ripartizione in Acciaio  Travi di Ripartizione in Calcestruzzo

Trave di Ripartizione	Connessione	Sezione	Materiale	Passo orizz. (m)	D.A.	Stage	Carico distribuito (kN/m)	Azione Assiale (kN)	Sfruttamento Momento	Sfruttamento Taglio	Instabilità
Default Waler	Tirante 1	HE 180B	S275	2.8	A1+M1+R1 (R3)	Stage 3	176.41	0	0.534	0.56	0
Default Waler	Tirante 1	HE 180B	S275	2.8	A1+M1+R1 (R3)	Stage 4	179.96	0	0.546	0.571	0
Default Waler	Tirante 1	HE 180B	S275	2.8	A1+M1+R1 (R3)	Stage 5	179.84	0	0.545	0.571	0
Default Waler	Tirante 2	HE 180B	S275	2.8	A1+M1+R1 (R3)	Stage 5	208.91	0	0.642	0.663	0
Default Waler	Tirante 1	HE 180B	S275	2.8	A1+M1+R1 (R3)	Stage 6	178.52	0	0.541	0.566	0
Default Waler	Tirante 2	HE 180B	S275	2.8	A1+M1+R1 (R3)	Stage 6	215.57	0	0.665	0.684	0
Default Waler	Tirante 1	HE 180B	S275	2.8	A1+M1+R1 (R3)	Stage 7	178.93	0	0.542	0.568	0
Default Waler	Tirante 2	HE 180B	S275	2.8	A1+M1+R1 (R3)	Stage 7	214.51	0	0.662	0.681	0
Default Waler	Tirante 3	HE 180B	S275	2.4	A1+M1+R1 (R3)	Stage 7	243.75	0	0.55	0.663	0
Default Waler	Tirante 1	HE 180B	S275	2.8	A1+M1+R1 (R3)	Stage 8	178.96	0	0.542	0.568	0
Default Waler	Tirante 2	HE 180B	S275	2.8	A1+M1+R1 (R3)	Stage 8	211.79	0	0.652	0.672	0
Default Waler	Tirante 3	HE 180B	S275	2.4	A1+M1+R1 (R3)	Stage 8	266.81	0	0.612	0.726	0
Default Waler	Tirante 1	HE 180B	S275	2.8	A1+M1+R1 (R3)	Stage 9	178.91	0	0.542	0.568	0
Default Waler	Tirante 2	HE 180B	S275	2.8	A1+M1+R1 (R3)	Stage 9	212.5	0	0.654	0.674	0
Default Waler	Tirante 3	HE 180B	S275	2.4	A1+M1+R1 (R3)	Stage 9	263.67	0	0.603	0.717	0
Default Waler	Tirante 4	HE 180B	S275	2	A1+M1+R1 (R3)	Stage 9	292.5	0	0.459	0.663	0
Default Waler	Tirante 1	HE 180B	S275	2.8	A1+M1+R1 (R3)	Stage 10	179.05	0	0.543	0.568	0
Default Waler	Tirante 2	HE 180B	S275	2.8	A1+M1+R1 (R3)	Stage 10	212.27	0	0.654	0.673	0
Default Waler	Tirante 3	HE 180B	S275	2.4	A1+M1+R1 (R3)	Stage 10	256.96	0	0.585	0.699	0
Default Waler	Tirante 4	HE 180B	S275	2	A1+M1+R1 (R3)	Stage 10	348.51	0	0.567	0.79	0

Design Assumption:

Tiranti  Puntoni  Travi di Ripartizione in Acciaio  Travi di Ripartizione in Calcestruzzo

Trave di Ripartizione	Connessione	Sezione	Materiale	Passo orizz. (m)	D.A.	Stage	Carico distribuito (kN/m)	Azione Assiale (kN)	Sfruttamento Momento	Sfruttamento Taglio	Instabilità
Default Waler	Tirante 1	HE 180B	S275	2.8	A2+M2+R1	Stage 3	135.7	0	0.41	0.431	0
Default Waler	Tirante 1	HE 180B	S275	2.8	A2+M2+R1	Stage 4	145.32	0	0.439	0.461	0
Default Waler	Tirante 1	HE 180B	S275	2.8	A2+M2+R1	Stage 5	145.1	0	0.439	0.46	0
Default Waler	Tirante 2	HE 180B	S275	2.8	A2+M2+R1	Stage 5	160.7	0	0.486	0.51	0
Default Waler	Tirante 1	HE 180B	S275	2.8	A2+M2+R1	Stage 6	142.34	0	0.43	0.452	0
Default Waler	Tirante 2	HE 180B	S275	2.8	A2+M2+R1	Stage 6	177.57	0	0.538	0.563	0
Default Waler	Tirante 1	HE 180B	S275	2.8	A2+M2+R1	Stage 7	142.74	0	0.431	0.453	0
Default Waler	Tirante 2	HE 180B	S275	2.8	A2+M2+R1	Stage 7	176.48	0	0.535	0.56	0
Default Waler	Tirante 3	HE 180B	S275	2.4	A2+M2+R1	Stage 7	187.5	0	0.416	0.51	0
Default Waler	Tirante 1	HE 180B	S275	2.8	A2+M2+R1	Stage 8	142.5	0	0.431	0.452	0
Default Waler	Tirante 2	HE 180B	S275	2.8	A2+M2+R1	Stage 8	171.9	0	0.52	0.545	0
Default Waler	Tirante 3	HE 180B	S275	2.4	A2+M2+R1	Stage 8	237.85	0	0.535	0.647	0
Default Waler	Tirante 1	HE 180B	S275	2.8	A2+M2+R1	Stage 9	142.46	0	0.431	0.452	0
Default Waler	Tirante 2	HE 180B	S275	2.8	A2+M2+R1	Stage 9	172.59	0	0.522	0.548	0
Default Waler	Tirante 3	HE 180B	S275	2.4	A2+M2+R1	Stage 9	234.69	0	0.527	0.638	0
Default Waler	Tirante 4	HE 180B	S275	2	A2+M2+R1	Stage 9	225	0	0.347	0.51	0
Default Waler	Tirante 1	HE 180B	S275	2.8	A2+M2+R1	Stage 10	142.76	0	0.431	0.453	0
Default Waler	Tirante 2	HE 180B	S275	2.8	A2+M2+R1	Stage 10	171.74	0	0.52	0.545	0
Default Waler	Tirante 3	HE 180B	S275	2.4	A2+M2+R1	Stage 10	224.32	0	0.502	0.61	0
Default Waler	Tirante 4	HE 180B	S275	2	A2+M2+R1	Stage 10	333.7	0	0.536	0.756	0

**SL03 Nuovo sottopasso al km 10+311**  
**Relazione di calcolo opera provvisoriale**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0303 001	A	44 di 44

## **10 CONCLUSIONI**

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