

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

SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019

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 2 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: IZ0900D26CLSL0200001A

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
2 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI IMPIEGATI	7
2.1 Calcestruzzo.....	7
2.2 Acciaio	10
3 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI	11
4 MODELLO DI CALCOLO	13
4.1 Parametri di spinta del terreno	14
4.2 Parametri di deformabilità del terreno	15
5 Analisi dei carichi	16
5.1 Parametri di deformabilità del terreno	16
6 CRITERI DI VERIFICA	17
6.1 Verifiche geotecniche della paratia.....	17
6.2 Verifiche geotecniche del tirante	19
6.2.1 Coefficienti di combinazione per verifiche strutturali e geotecniche della paratia tirantata .	20
6.3 Verifiche strutturali.....	21
7 RISULTATI DELLE ANALISI	22
7.1 Fasi di calcolo	22
7.2 Sollecitazioni massime (SLU)	32

8	VERIFICHE	34
8.1	Verifica di stabilità globale.....	34
8.2	Verifica dell'opera di sostegno	35
8.2.1	Verifica geotecnica della paratia	35
8.2.2	Verifica geotecnica dei tiranti.....	37
8.2.3	Verifica strutturale della paratia	40
8.2.4	Verifica strutturale del tirante.....	42
8.2.5	Verifica della trave di ripartizione.....	43
9	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. La paratia è realizzata con micropali dotati di armatura tubolare in acciaio. In testa alla paratia si trovano dei tiranti costituiti da trefoli in acciaio, fissati ad una trave di ripartizione in acciaio.

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.

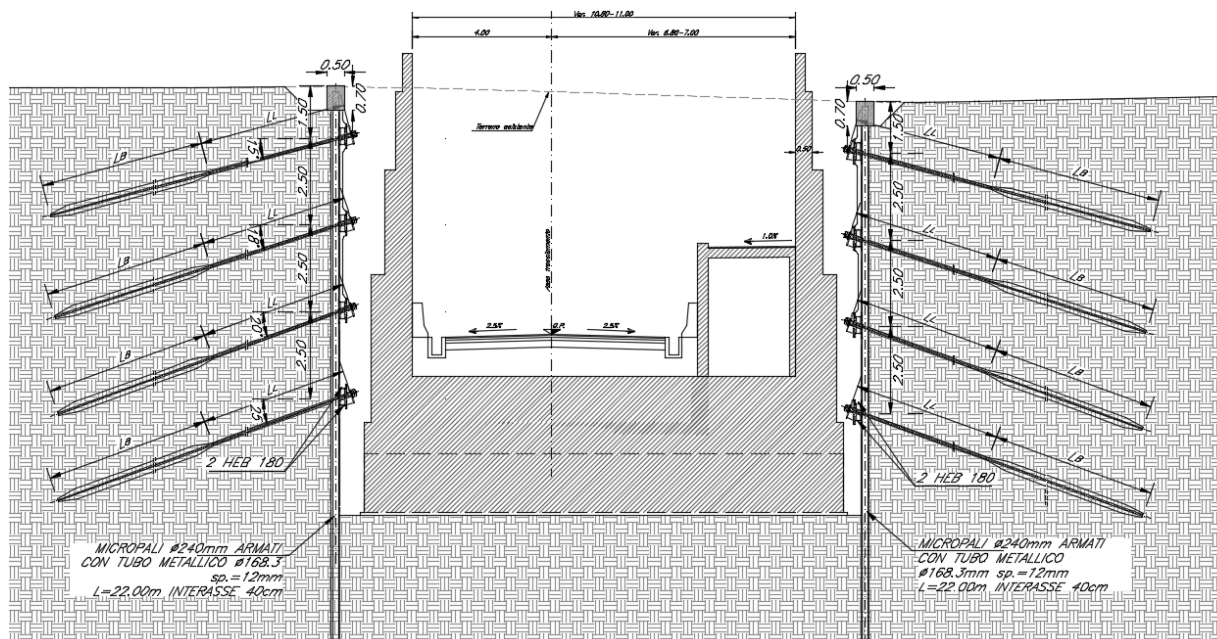


Figura 1: Sezione di studio della paratia con scavo massimale (nella parte del muro reggispinta).

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 -

SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019
Relazione di calcolo opera provvisoria

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0203 001	A	5 di 44

$H_{scavo,max}$	12.60	m
$L_{paratia,max}$	22	m
Micropali (C25/30)	Φ (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.

TIRANTE										
Modalità di iniezione IRS										
Nr.	z (m)	Passo (m)	i (°)	d (m)	L_{lib} (m)	L_{anc} (m)	L_{tot} (m)	Nr. Trefoli	Trefoli	Pretiro
									\emptyset	(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 (dall inizio della paratia)	Ordine di tiranti necessari
0m ÷ -2m	-
-2m ÷ -4.5m	1°
-4.5m ÷ -7m	1°,2°
-7m ÷ -9.5m	1°,2°,3°
-9.5m ÷ -12.6m	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

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	COMPLETAMENTO DEL NODO DI UDINE – PRG E ACC DEL P.M. CARGNACCO E OPERE SOSTITUTIVE DEI PL INTERFERENTI					
SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019 Relazione di calcolo opera provvisoria	COMMESSA IZ09	LOTTO 00	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO SL0203 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.

SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019
Relazione di calcolo opera provvisoria

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0203 001	A	7 di 44

2 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI IMPIEGATI

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

2.1 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} (>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). Per barre di diametro \leq 32mm
Coefficiente di aderenza	η		-	1.0	
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 cs 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					

SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019
Relazione di calcolo opera provvisoria

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0203 001	A	8 di 44

CALCESTRUZZO TIRANTE

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	a_{cc} (>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}	$(a_{cc} * f_{ck}) / \gamma_c$	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}	$0.7 * f_{cm}$	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}	$1.2 * f_{cm}$	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 cs 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					

SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019
Relazione di calcolo opera provvisoria

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0203 001	A	9 di 44

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	a_{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}	$(a_{cc} * f_{ck}) / \gamma_c$	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_{ctm}	$1.2 * f_{ctm}$	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 cs 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					

SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019
Relazione di calcolo opera provvisoria

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0203 001	A	10 di 44

2.2 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_{yd}	f_{yk} / γ_s	N/mm ²	391.3	
Modulo elastico	E_s		N/mm ²	206000	
Tensioni di progetto del ds allo S.L.E.					
Tensione massima di esercizio per l'acciaio	σ_s	$0.75 * f_{yk}$	N/mm ²	337.5	

ACCIAIO PER MICROPALI

ACCIAIO S355

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_{yk}		N/mm ²	355	
Resistenza caratteristica a rottura	f_{tk}		N/mm ²	490	

ACCIAIO PER TRAVE DI RIPARTIZIONE

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_{yk}		N/mm ²	275	
Resistenza caratteristica a rottura	f_{tk}		N/mm ²	430	

ACCIAIO PER TIRANTE

ACCIAIO ARMONICO PER TREFOLI

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_{yk}		N/mm ²	1670	
Resistenza caratteristica a rottura	f_{tk}		N/mm ²	1860	

3 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 p.c.	γ	c_u	c'	ϕ'	E
	m	kN/m ³	kPa	kPa	°	MPa
Unità A – Sabbia limosa /limo sabbioso	0-1.5	18	-	0	32	25
Unità B – Ghiaia sabbiosa con ciottoli	1.5-30	20	-	0	38	65

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 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 medio di N_{SPT} . 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).

SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019
Relazione di calcolo opera provvisoriale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0203 001	A	12 di 44

Sondaggio	Profondità m	Liao e Whitman - 1985	
		N _{spt}	N _{spt}
		N ₆₀ (colpi/cm)	(N ₁) ₆₀
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_{spt} nei sondaggi.

Abaco per il calcolo di s per sabbie e ghiaie

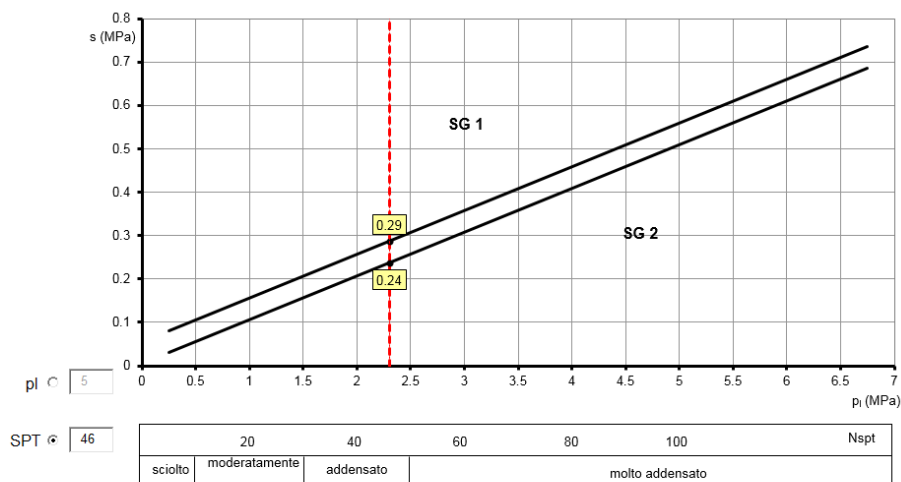


Tabella 3: Abaco di Bustamante e Doix.

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

4 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.

4.1 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

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

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

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 “ δ ” diverso da zero, i coefficienti di spinta attiva e passiva sono calcolati con la relazione di Lancellotta (2002) e valgono:

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

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

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

4.2 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, 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):

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

5 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/m².

5.1 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.

6 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.

6.1 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.

SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019
Relazione di calcolo opera provvisoria

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0203 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 γ_F (o γ_R)	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 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 γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \phi'_k$	$\gamma_{\phi'}$	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_V	γ_V	1,0	1,0

Tabella 5: 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 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
γ_R	1,1

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

6.2 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	γ_R	1,1
Permanenti	γ_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 γ_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 ξ_{a3} e ξ_{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
ξ_{a3}	1,80	1,75	1,70	1,65	1,60
ξ_{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:

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

SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019
Relazione di calcolo opera provvisoria

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0203 001	A	20 di 44

6.2.1 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	γ_G	γ_G	γ_Q	γ_Q	γ_{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	γ_ϕ	γ_c	γ_{c_u}	γ_{q_u}	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	1.6	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	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	1.2	1.1	1

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

6.3 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.

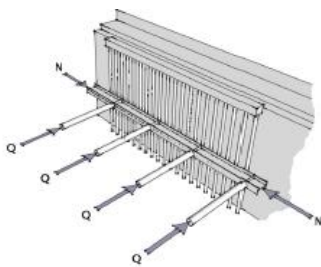
Nello specifico per quanto riguarda i micropali sono condotte le verifiche a flessione monoassiale (paragrafo 4.2.4.1.2.3 delle NTC 2018) e taglio (paragrafo 4.2.4.1.2.4 delle NTC 2018). Nelle immagini a seguire si riporteranno i diagrammi delle sollecitazioni agenti e le relative verifiche espresse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

7 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).

7.1 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 -12.6m;

Le fasi sono illustrate nelle figure seguenti.

SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019
Relazione di calcolo opera provvisoriale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0203 001	A	23 di 44

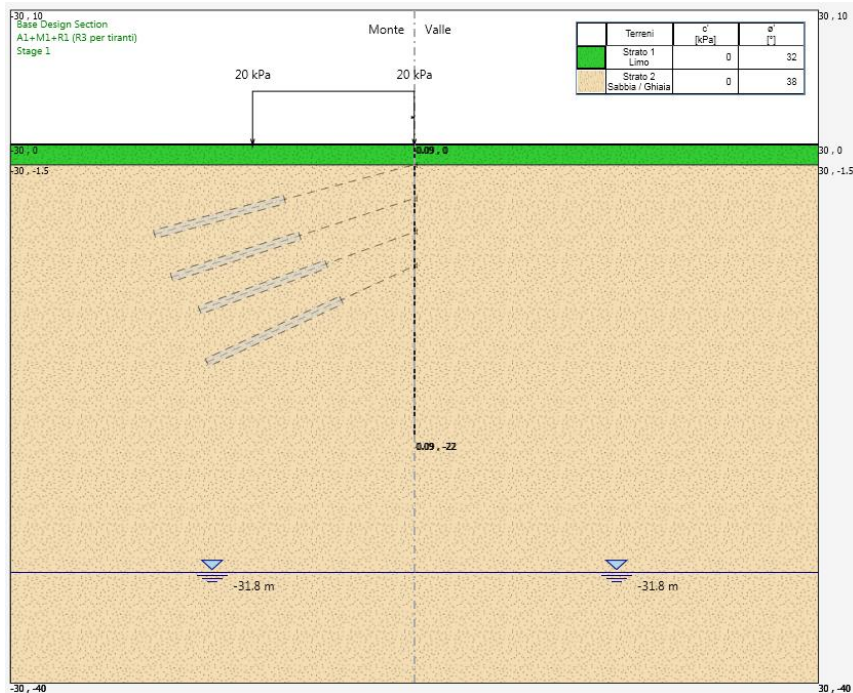
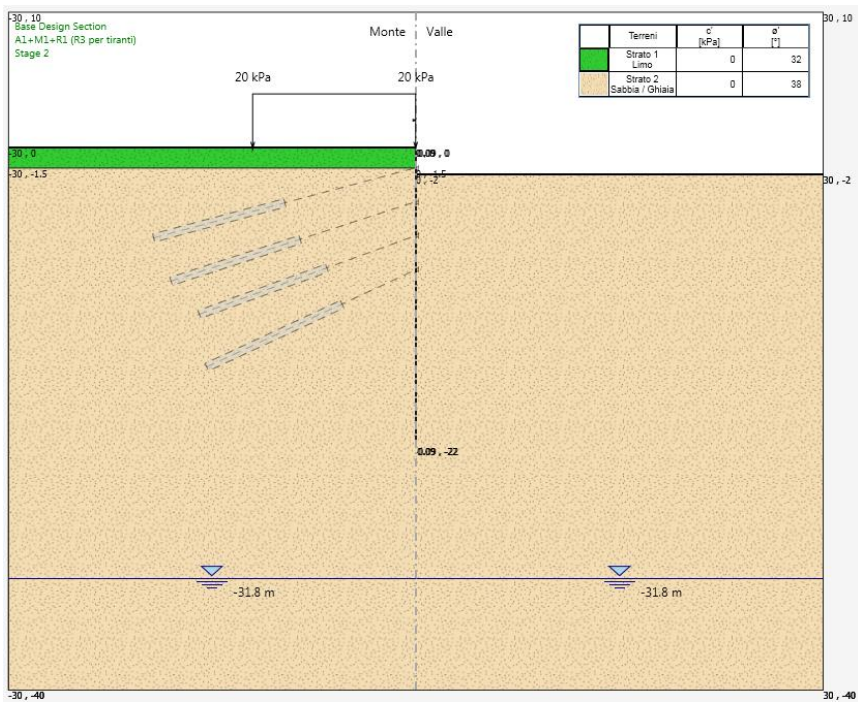


Figura 2 – Fase 1



SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019
Relazione di calcolo opera provvisoriale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0203 001	A	24 di 44

Figura 3 – Fase 2

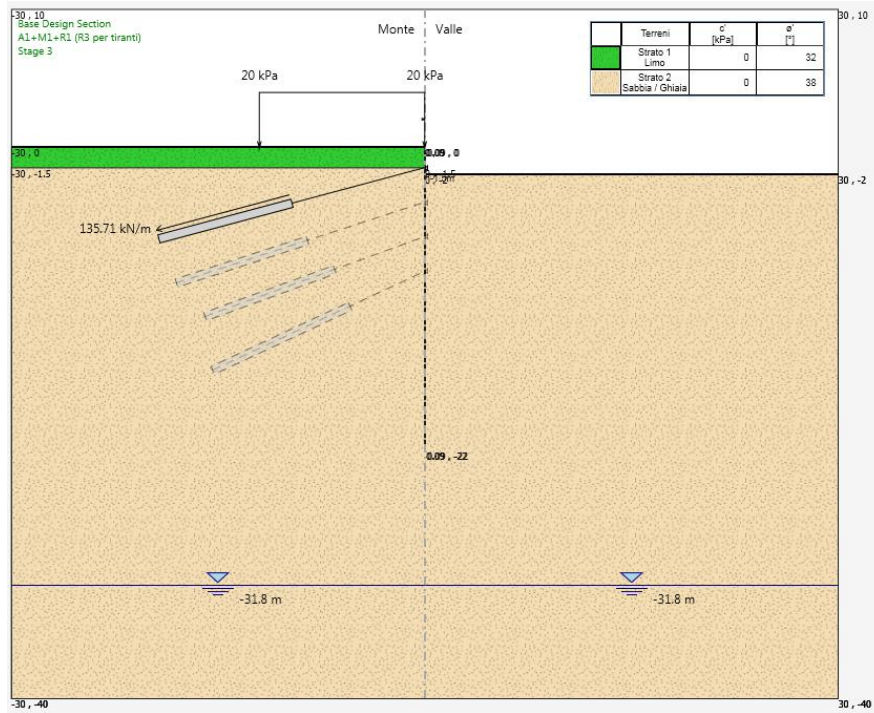


Figura 4 – Fase 3

SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019
Relazione di calcolo opera provvisoriale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0203 001	A	25 di 44

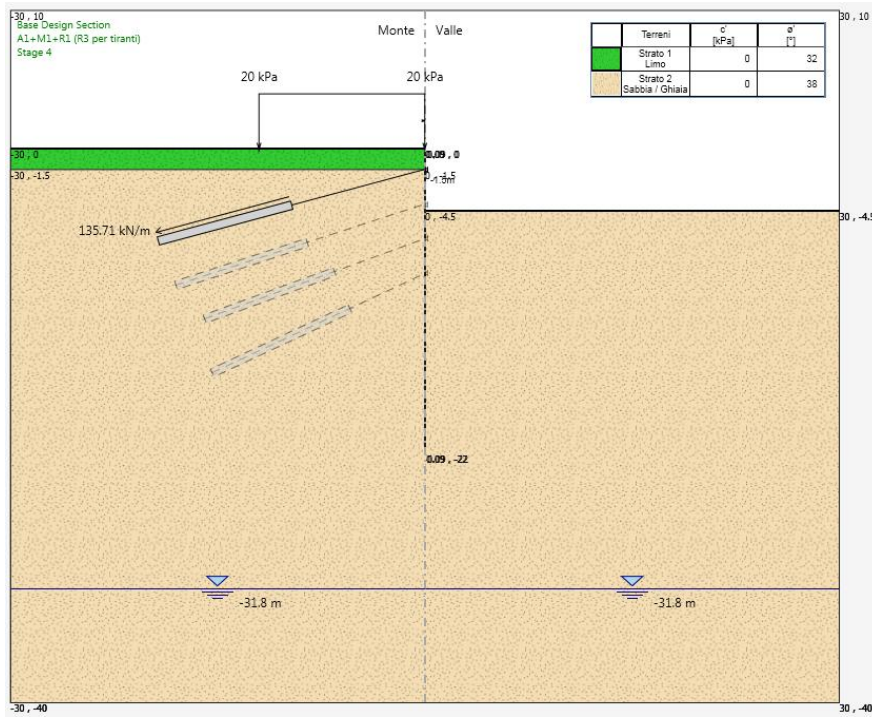


Figura 5 – Fase 4

SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019
Relazione di calcolo opera provvisoriale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0203 001	A	26 di 44

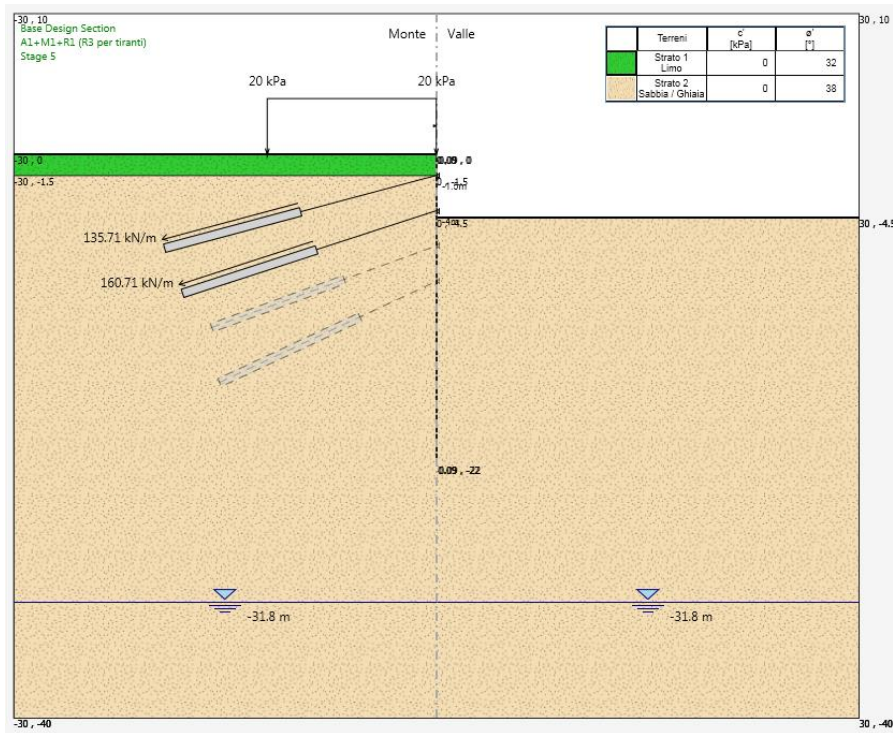


Figura 6 – Fase 5

SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019
Relazione di calcolo opera provvisoriale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0203 001	A	27 di 44

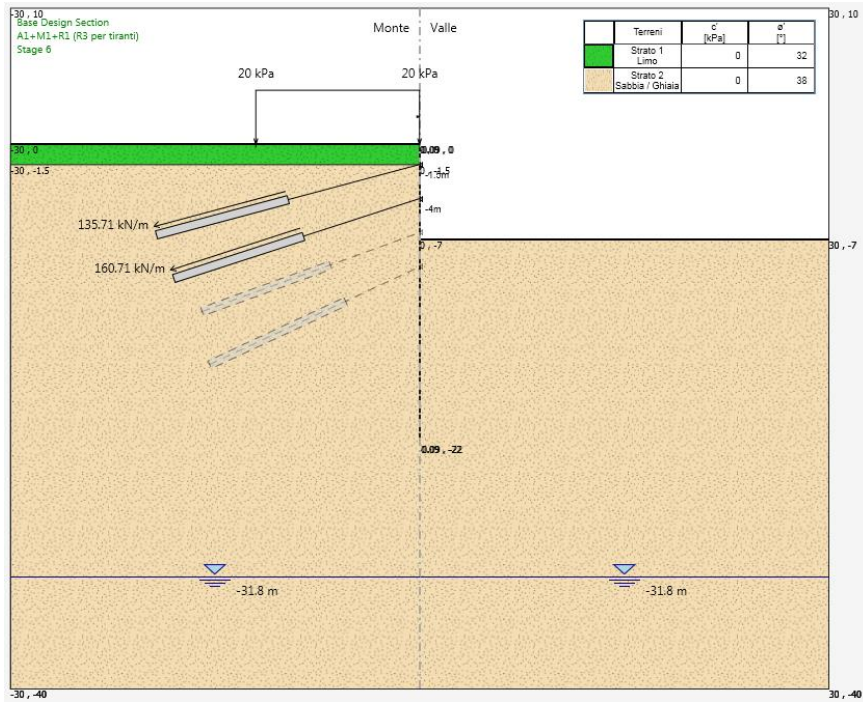


Figura 7 – Fase 6

SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019
Relazione di calcolo opera provvisoriale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0203 001	A	28 di 44

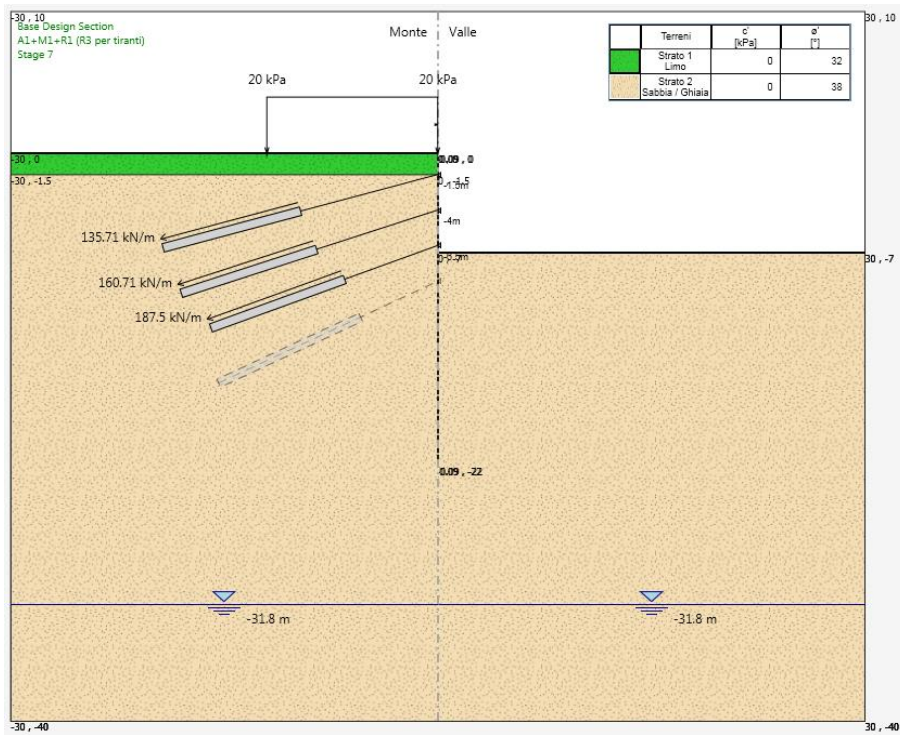


Figura 8 – Fase 7

SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019
Relazione di calcolo opera provvisionale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0203 001	A	29 di 44

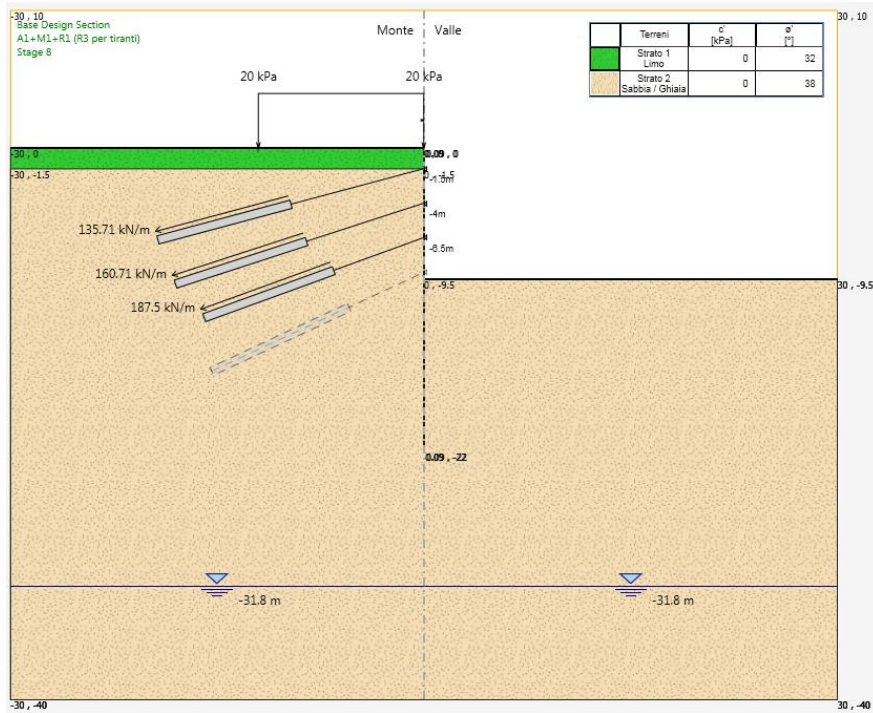


Figura 9 – Fase 8

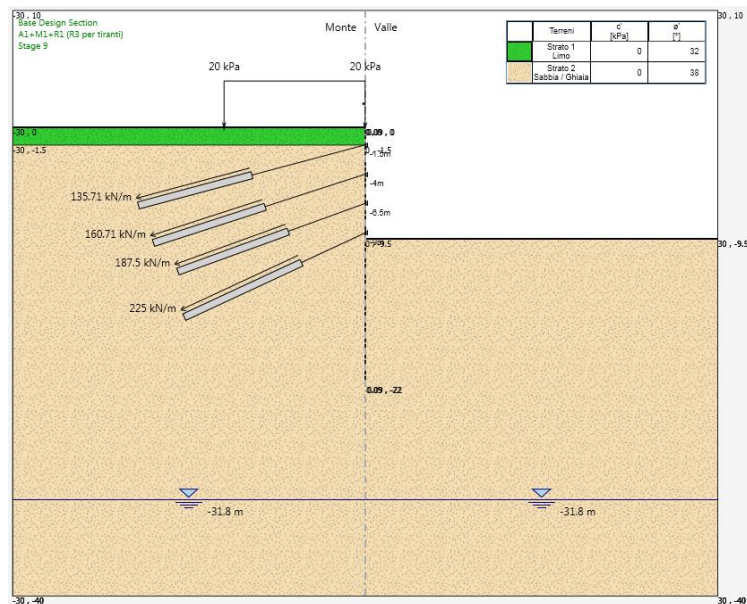


Figura 10 – Fase 9

SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019
Relazione di calcolo opera provvisoriale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0203 001	A	30 di 44

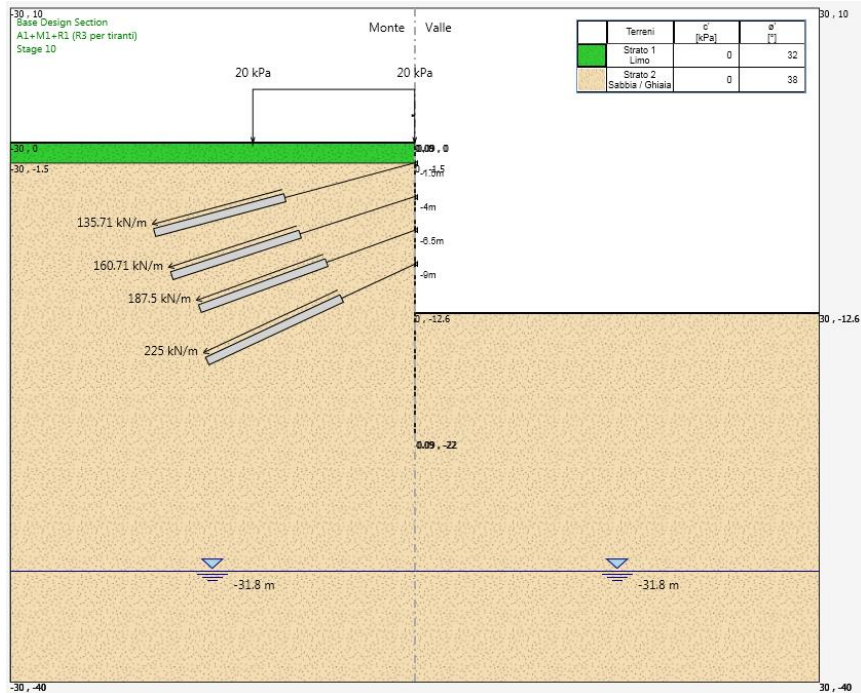


Figura 11 – Fase 10

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 $H/200=12600\text{mm}/200=63\text{mm}$ e per questo la verifica agli SLE risulta soddisfatta.

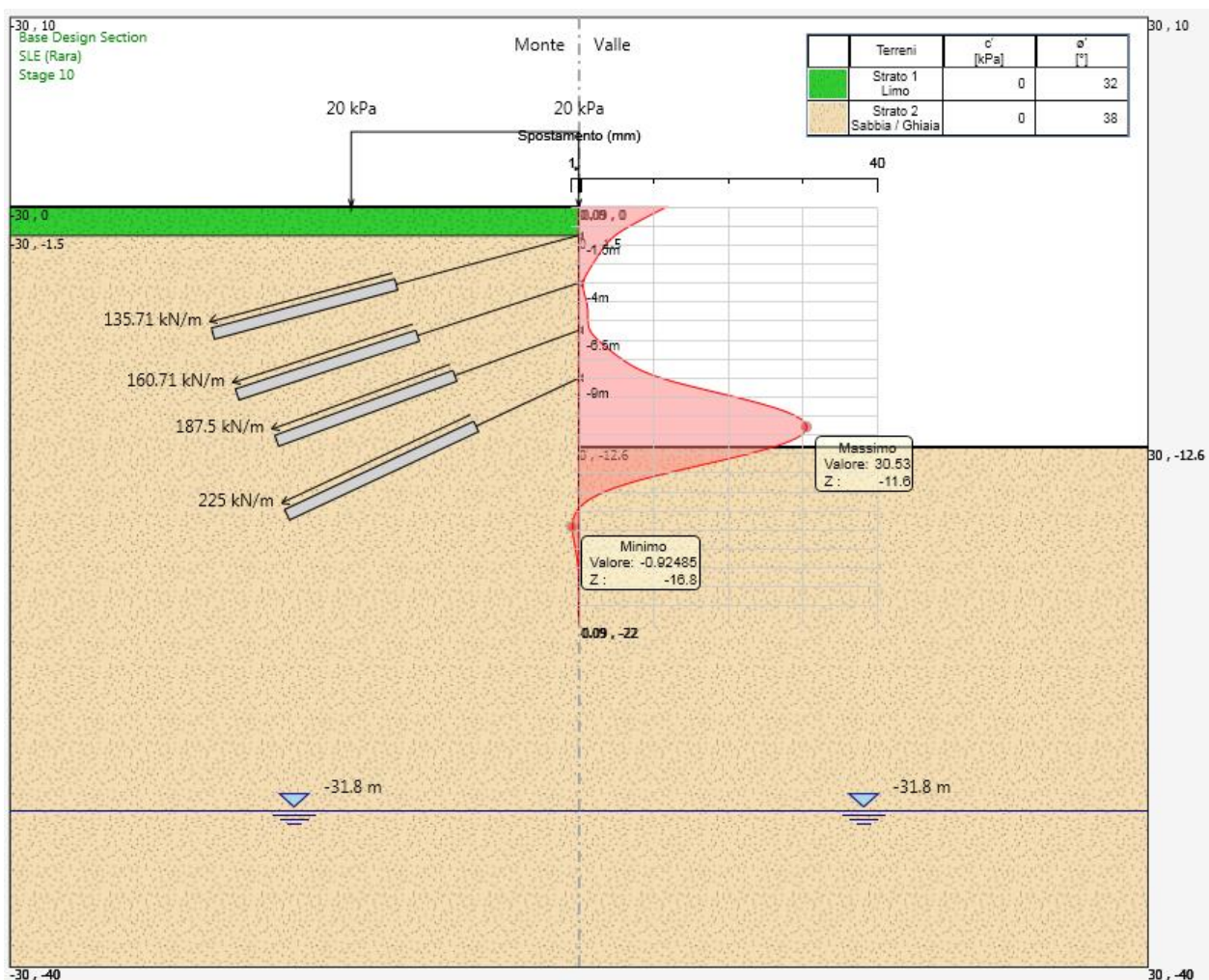


Figura 12 – Diagramma spostamenti orizzontali paratia

7.2 Sollecitazioni massime (SLU)

Sollecitazioni massime di momento flettente

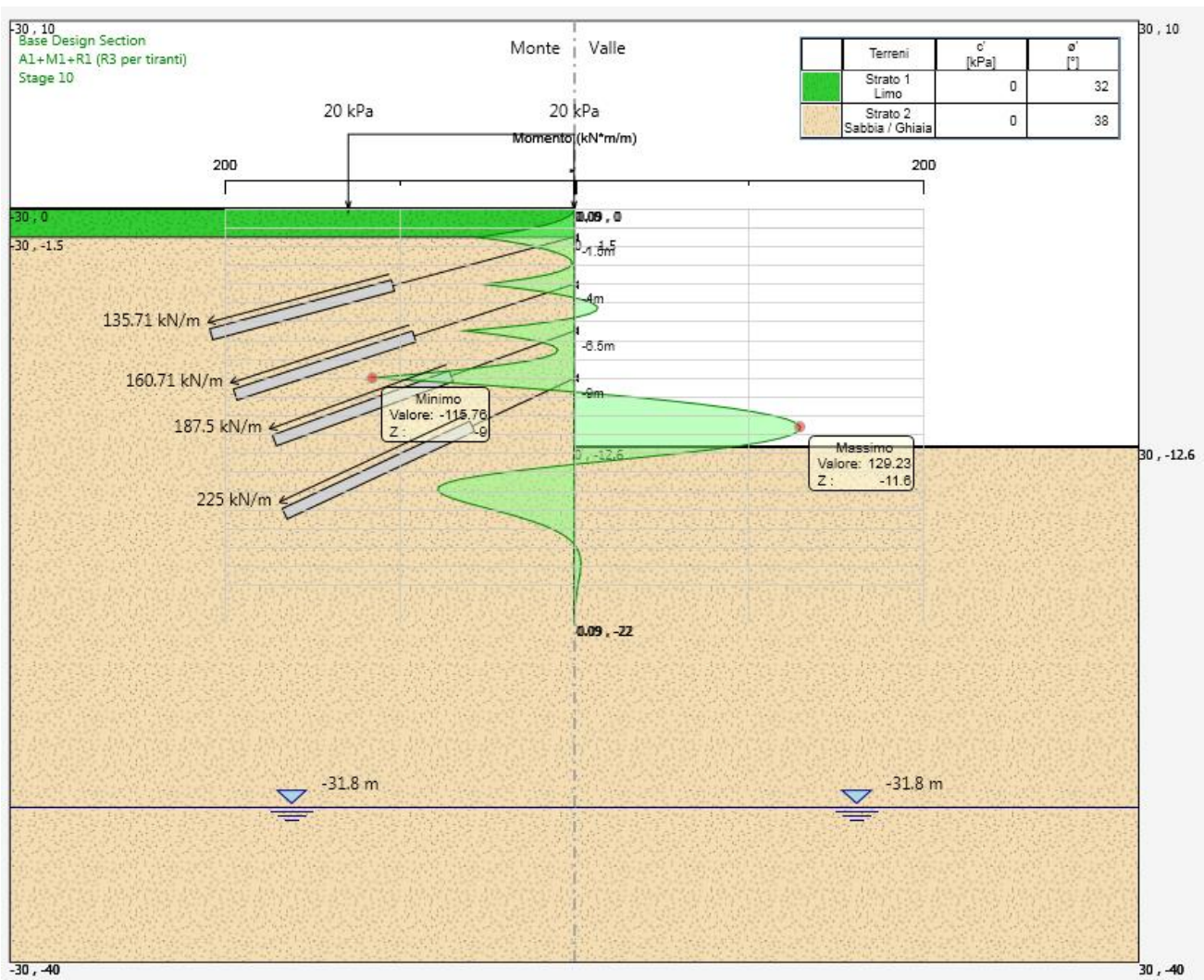


Figura 13 – Diagramma di momento flettente per la paratia

$M_{max,d^{**}}$
kNm/m
129.23

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

SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019
Relazione di calcolo opera provvisoriale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0203 001	A	33 di 44

Sollecitazioni massime di taglio

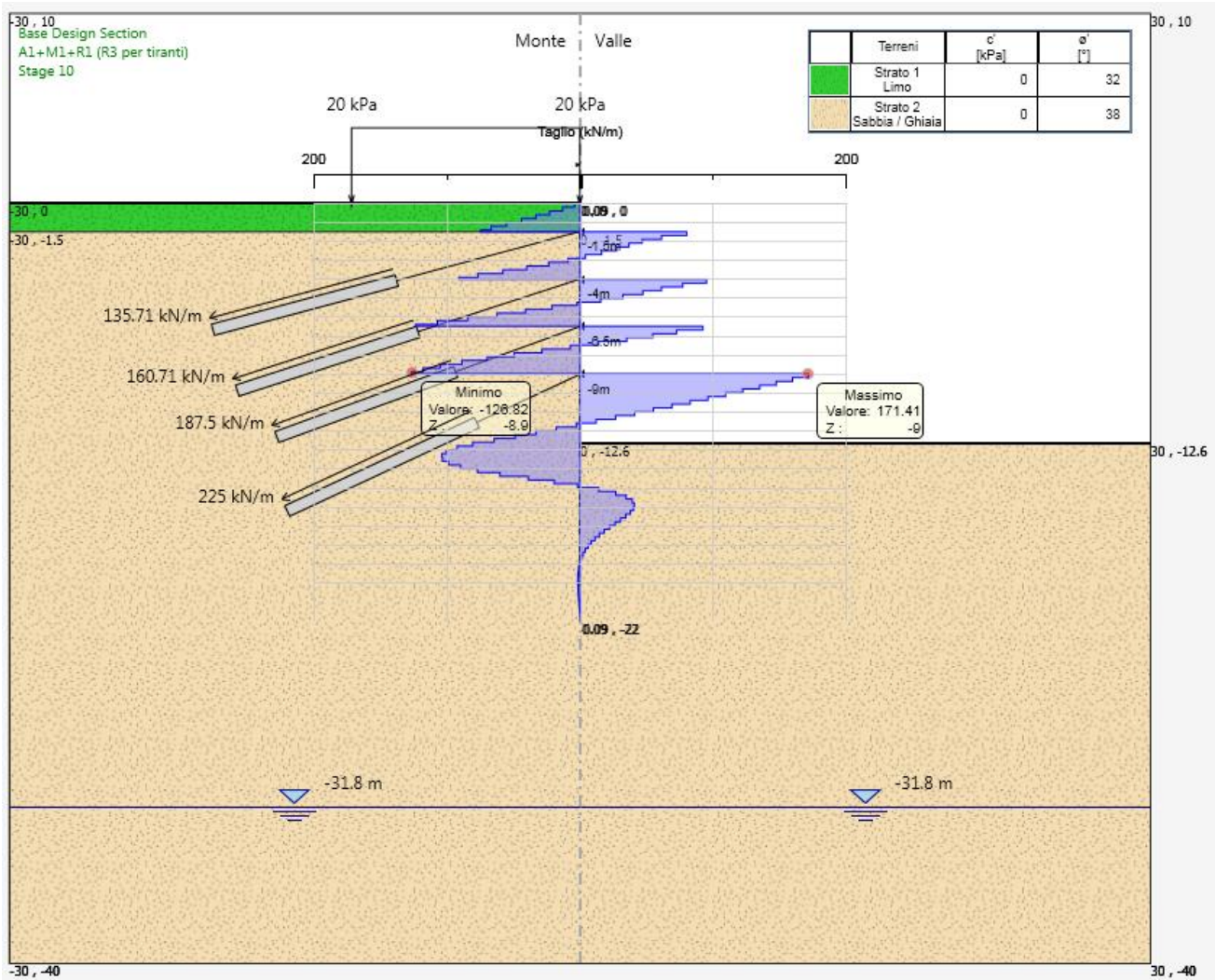


Figura 14 – Diagramma di taglio per la paratia

$V_{max,d}$
kN/m
171.41

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

SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019
Relazione di calcolo opera provvisoriale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0203 001	A	34 di 44

8 VERIFICHE

8.1 Verifica di stabilità globale

Il massimo coefficiente di sicurezza nei confronti della stabilità globale è:

$$FS = 2.733 > 1.10$$

Calcolato con la teoria di Bishop in combinazione A2+M2+R2.

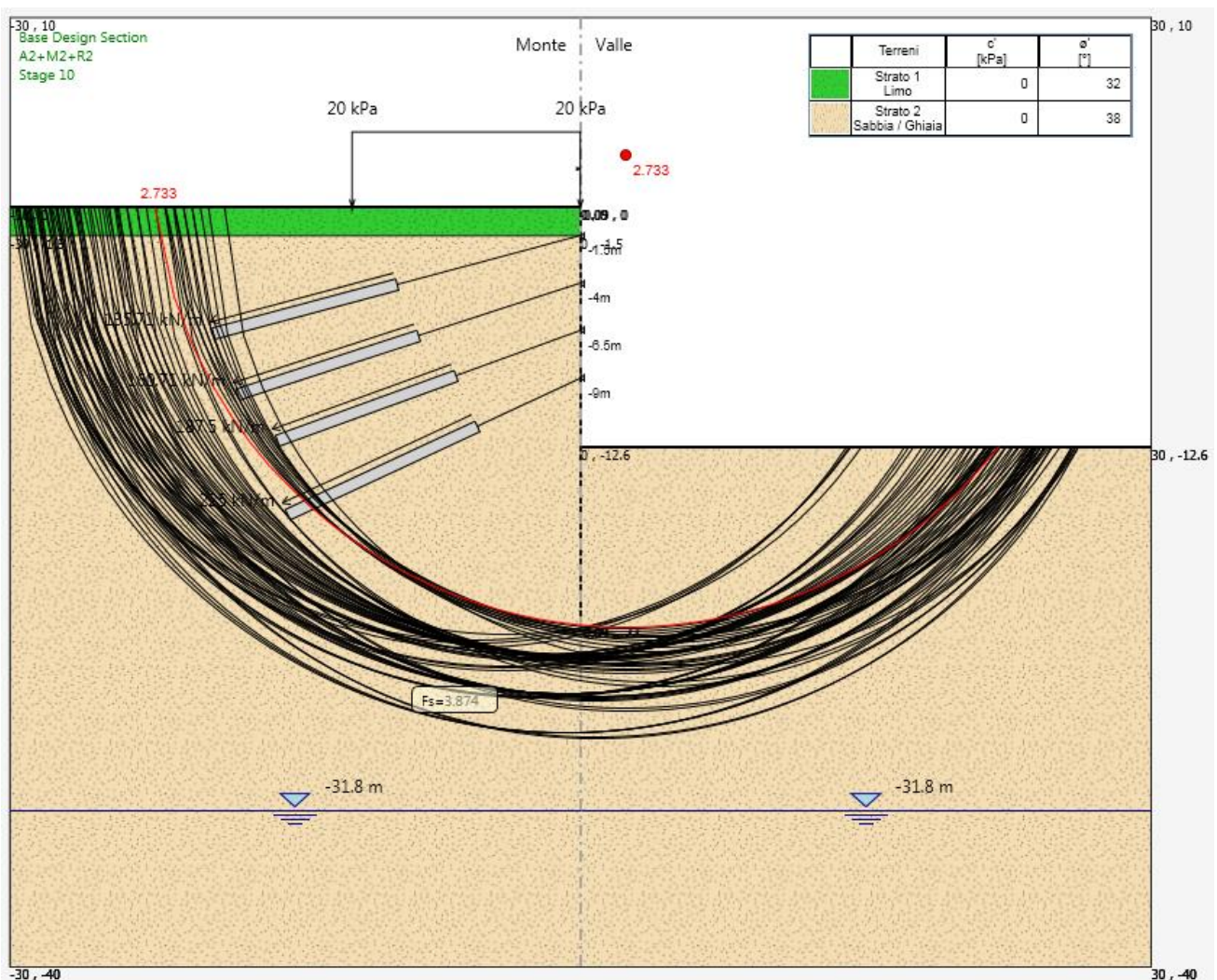


Figura 15 – Diagramma con curve limite di stabilità globale

SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019
Relazione di calcolo opera provvisoria

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0203 001	A	35 di 44

8.2 Verifica dell'opera di sostegno

8.2.1 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] (tiranti) (Stage 10)	-0.94	Z = -16.8 m	D.A.	A1+M1+R1	(R3 per tiranti)
Max. spostamento laterale [mm] (per tiranti) (Stage 10)	31.11	Z = -11.6 m	D.A.	A1+M1+R1	(R3 per tiranti)
Max. Rapporto Spinte (Efficace/Passiva) (per tiranti) (Stage 9)		(Lato SX)	0.1	D.A.	A1+M1+R1 (R3 per tiranti)
Max. Rapporto Spinte (Efficace/Passiva) (per tiranti) (Stage 10)		(Lato DX)	0.33	D.A.	A1+M1+R1 (R3 per tiranti)

Riepilogo per la DA <A2+M2+R1>

Min. spostamento laterale [mm]	-1.65	Z = -18.2 m	D.A.	A2+M2+R1	(Stage 10)
Max. spostamento laterale [mm]	82.59	Z = -11.8 m	D.A.	A2+M2+R1	(Stage 10)
Max. Rapporto Spinte (Efficace/Passiva)		(Lato SX)	0.13	D.A.	A2+M2+R1 (Stage 9)
Max. Rapporto Spinte (Efficace/Passiva)		(Lato DX)	0.43	D.A.	A2+M2+R1 (Stage 10)

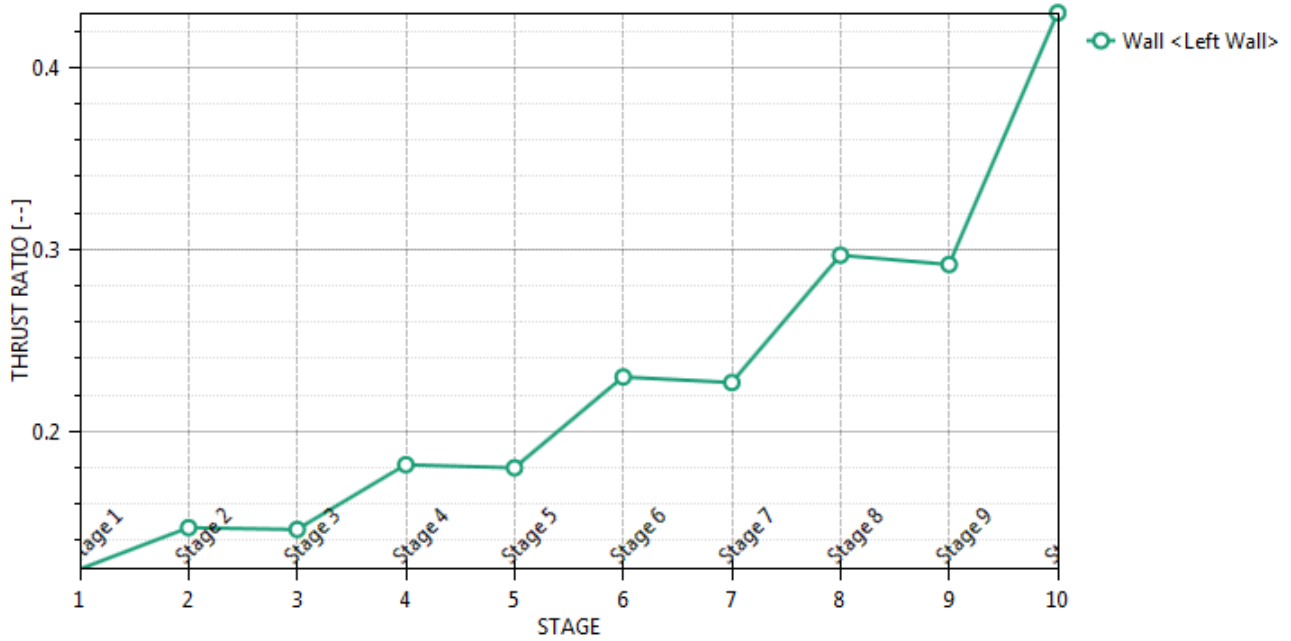
Per la combinazione che fornisce la massima mobilitazione della spinta passiva si riporta il relativo grafico.

SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019
Relazione di calcolo opera provvisoriale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0203 001	A	36 di 44

Massimi rapporti di mobilitazione spinta passiva

D.A. <A2+M2+R1>



8.2.2 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:

- α_i = inclinazione del tirante rispetto l'orizzontale
- φ = 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:

- α = 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 α 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).

Verifica geotecnica

SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019
Relazione di calcolo opera provvisoria

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0203 001	A	39 di 44

Design Assumption: **A1+M1+R1 (R3 per tiranti)**

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	498.71	710.82	1009.3	0.702	0.494	✓	✓
Tirante 1	Stage 5	499.07	710.82	1009.3	0.702	0.494	✓	✓
Tirante 1	Stage 6	496.91	710.82	1009.3	0.699	0.492	✓	✓
Tirante 1	Stage 7	497.95	710.82	1009.3	0.701	0.493	✓	✓
Tirante 1	Stage 8	498.17	710.82	1009.3	0.701	0.494	✓	✓
Tirante 1	Stage 9	497.98	710.82	1009.3	0.701	0.493	✓	✓
Tirante 1	Stage 10	498.32	710.82	1009.3	0.701	0.494	✓	✓
Tirante 2	Stage 5	584.95	710.82	1009.3	0.823	0.58	✓	✓
Tirante 2	Stage 6	595.29	710.82	1009.3	0.837	0.59	✓	✓
Tirante 2	Stage 7	592.56	710.82	1009.3	0.834	0.587	✓	✓
Tirante 2	Stage 8	588.16	710.82	1009.3	0.827	0.583	✓	✓
Tirante 2	Stage 9	590.05	710.82	1009.3	0.83	0.585	✓	✓
Tirante 2	Stage 10	589.54	710.82	1009.3	0.829	0.584	✓	✓
Tirante 3	Stage 7	585	710.81	1009.3	0.823	0.58	✓	✓
Tirante 3	Stage 8	614.08	710.81	1009.3	0.864	0.608	✓	✓
Tirante 3	Stage 9	607.12	710.81	1009.3	0.854	0.602	✓	✓
Tirante 3	Stage 10	592.98	710.81	1009.3	0.834	0.588	✓	✓
Tirante 4	Stage 9	585	781.9	1009.3	0.748	0.58	✓	✓
Tirante 4	Stage 10	677.58	781.9	1009.3	0.867	0.671	✓	✓

8.2.3 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.

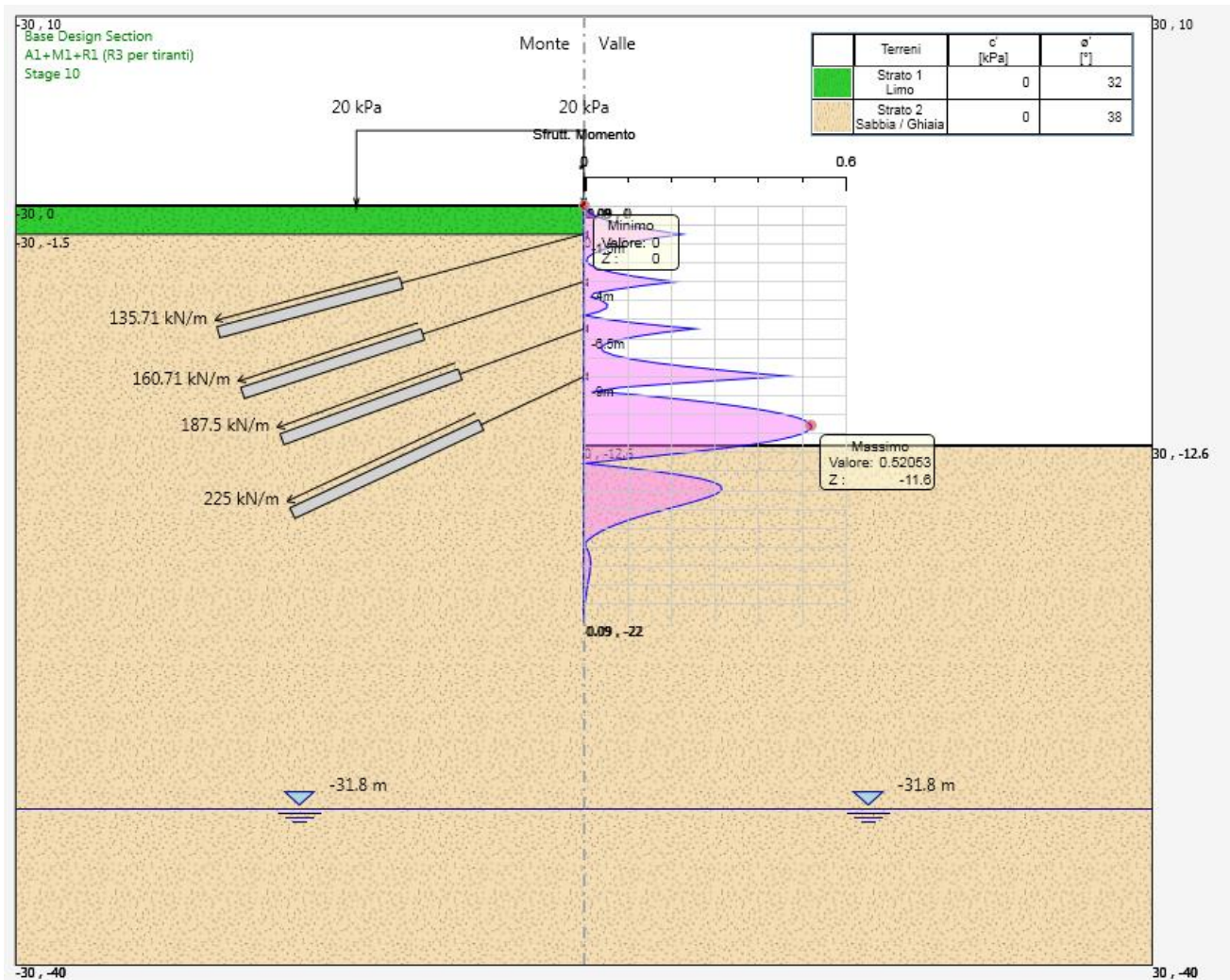


Figura 16 – Diagramma di sfruttamento a momento flettente (inviluppo)

SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019
Relazione di calcolo opera provvisoriale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0203 001	A	41 di 44

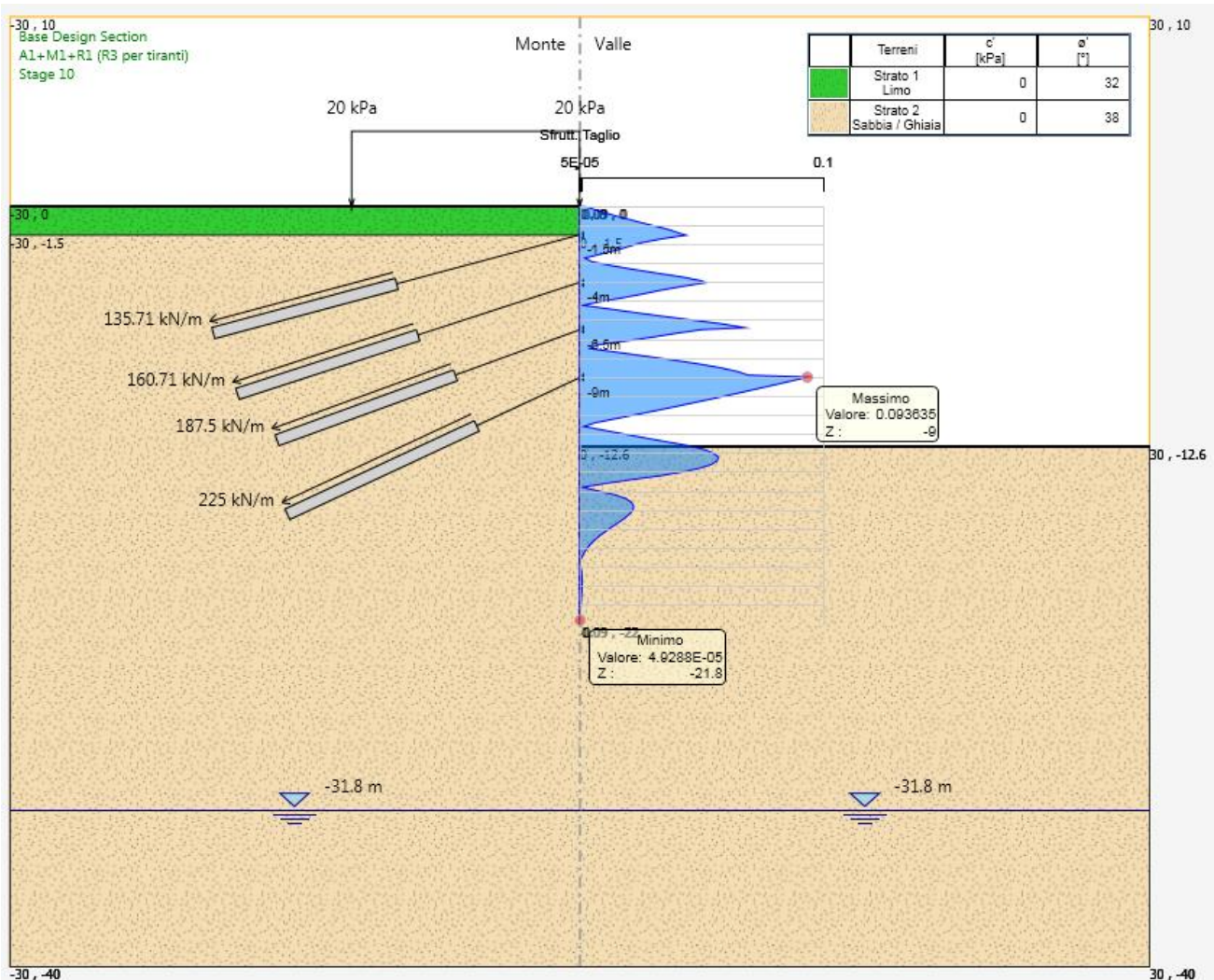


Figura 17 – Diagramma di sfruttamento a taglio (involoppo)

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)>

Paratia	Max. momento (assoluto) [kNm/m]	129.23	Z = -11.6 m	D.A.
A1+M1+R1 (R3 per tiranti) (Stage 10)				
	Max. taglio [kN/m]	171.41	Z = -9.2 m	D.A. A1+M1+R1
(R3 per tiranti) (Stage 10)				
	SteelWord: massimo sfruttamento in flessione	0.521	Z = -11.6 m	
D.A. A1+M1+R1 (R3 per tiranti) (Stage 10)				

SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019
Relazione di calcolo opera provvisoriale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0203 001	A	42 di 44

SteelWord: massimo struttamento a taglio 0.094 Z = -9 m D.A.
A1+M1+R1 (R3 per tiranti) (Stage 10)

Riepilogo per la DA <A2+M2+R1>

Paratia Max. momento (assoluto) [kNm/m] 175.84 Z = -11.8 m D.A.
A2+M2+R1 (Stage 10)

Max. taglio [kN/m] 188.05 Z = -9.2 m D.A. A2+M2+R1
(Stage 10)

SteelWord: massimo struttamento in flessione 0.708 Z = -11.8 m
D.A. A2+M2+R1 (Stage 10)

SteelWord: massimo struttamento a taglio 0.103 Z = -9 m D.A.
A2+M2+R1 (Stage 10)

8.2.4 Verifica strutturale del tirante

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

Design Assumption: A1+M1+R1 (R3 per 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	498.71	710.82	1009.3	0.702	0.494	✓	✓
Tirante 1	Stage 5	499.07	710.82	1009.3	0.702	0.494	✓	✓
Tirante 1	Stage 6	496.91	710.82	1009.3	0.699	0.492	✓	✓
Tirante 1	Stage 7	497.95	710.82	1009.3	0.701	0.493	✓	✓
Tirante 1	Stage 8	498.17	710.82	1009.3	0.701	0.494	✓	✓
Tirante 1	Stage 9	497.98	710.82	1009.3	0.701	0.493	✓	✓
Tirante 1	Stage 10	498.32	710.82	1009.3	0.701	0.494	✓	✓
Tirante 2	Stage 5	584.95	710.82	1009.3	0.823	0.58	✓	✓
Tirante 2	Stage 6	595.29	710.82	1009.3	0.837	0.59	✓	✓
Tirante 2	Stage 7	592.56	710.82	1009.3	0.834	0.587	✓	✓
Tirante 2	Stage 8	588.16	710.82	1009.3	0.827	0.583	✓	✓
Tirante 2	Stage 9	590.05	710.82	1009.3	0.83	0.585	✓	✓
Tirante 2	Stage 10	589.54	710.82	1009.3	0.829	0.584	✓	✓
Tirante 3	Stage 7	585	710.81	1009.3	0.823	0.58	✓	✓
Tirante 3	Stage 8	614.08	710.81	1009.3	0.864	0.608	✓	✓
Tirante 3	Stage 9	607.12	710.81	1009.3	0.854	0.602	✓	✓
Tirante 3	Stage 10	592.98	710.81	1009.3	0.834	0.588	✓	✓
Tirante 4	Stage 9	585	781.9	1009.3	0.748	0.58	✓	✓
Tirante 4	Stage 10	677.58	781.9	1009.3	0.867	0.671	✓	✓

SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019
Relazione di calcolo opera provvisoria

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0203 001	A	43 di 44

8.2.5 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	178.11	0	0.54	0.565	0
Default Waler	Tirante 1	HE 180B	S275	2.8	A1+M1+R1 (R3)	Stage 5	178.24	0	0.54	0.565	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	177.47	0	0.538	0.563	0
Default Waler	Tirante 2	HE 180B	S275	2.8	A1+M1+R1 (R3)	Stage 6	212.6	0	0.655	0.674	0
Default Waler	Tirante 1	HE 180B	S275	2.8	A1+M1+R1 (R3)	Stage 7	177.84	0	0.539	0.564	0
Default Waler	Tirante 2	HE 180B	S275	2.8	A1+M1+R1 (R3)	Stage 7	211.63	0	0.651	0.671	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	177.92	0	0.539	0.564	0
Default Waler	Tirante 2	HE 180B	S275	2.8	A1+M1+R1 (R3)	Stage 8	210.06	0	0.646	0.666	0
Default Waler	Tirante 3	HE 180B	S275	2.4	A1+M1+R1 (R3)	Stage 8	255.87	0	0.582	0.696	0
Default Waler	Tirante 1	HE 180B	S275	2.8	A1+M1+R1 (R3)	Stage 9	177.85	0	0.539	0.564	0
Default Waler	Tirante 2	HE 180B	S275	2.8	A1+M1+R1 (R3)	Stage 9	210.73	0	0.648	0.669	0
Default Waler	Tirante 3	HE 180B	S275	2.4	A1+M1+R1 (R3)	Stage 9	252.97	0	0.574	0.688	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	177.97	0	0.539	0.565	0
Default Waler	Tirante 2	HE 180B	S275	2.8	A1+M1+R1 (R3)	Stage 10	210.55	0	0.648	0.668	0
Default Waler	Tirante 3	HE 180B	S275	2.4	A1+M1+R1 (R3)	Stage 10	247.08	0	0.559	0.672	0
Default Waler	Tirante 4	HE 180B	S275	2	A1+M1+R1 (R3)	Stage 10	338.79	0	0.547	0.768	0

SL02 Nuovo sottopasso al km 8+019
Relazione di calcolo opera provvisoriale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ09	00	D 26 CL	SL0203 001	A	44 di 44

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	139.8	0	0.422	0.444	0
Default Waler	Tirante 1	HE 180B	S275	2.8	A2+M2+R1	Stage 5	139.8	0	0.422	0.444	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	138.11	0	0.417	0.438	0
Default Waler	Tirante 2	HE 180B	S275	2.8	A2+M2+R1	Stage 6	169.19	0	0.512	0.537	0
Default Waler	Tirante 1	HE 180B	S275	2.8	A2+M2+R1	Stage 7	138.5	0	0.419	0.439	0
Default Waler	Tirante 2	HE 180B	S275	2.8	A2+M2+R1	Stage 7	168.12	0	0.508	0.533	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	138.52	0	0.419	0.439	0
Default Waler	Tirante 2	HE 180B	S275	2.8	A2+M2+R1	Stage 8	165.16	0	0.499	0.524	0
Default Waler	Tirante 3	HE 180B	S275	2.4	A2+M2+R1	Stage 8	214.49	0	0.478	0.583	0
Default Waler	Tirante 1	HE 180B	S275	2.8	A2+M2+R1	Stage 9	138.47	0	0.418	0.439	0
Default Waler	Tirante 2	HE 180B	S275	2.8	A2+M2+R1	Stage 9	165.82	0	0.501	0.526	0
Default Waler	Tirante 3	HE 180B	S275	2.4	A2+M2+R1	Stage 9	211.44	0	0.471	0.575	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	138.75	0	0.419	0.44	0
Default Waler	Tirante 2	HE 180B	S275	2.8	A2+M2+R1	Stage 10	165	0	0.499	0.523	0
Default Waler	Tirante 3	HE 180B	S275	2.4	A2+M2+R1	Stage 10	202.18	0	0.45	0.55	0
Default Waler	Tirante 4	HE 180B	S275	2	A2+M2+R1	Stage 10	320.28	0	0.51	0.726	0

9 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.