



AREA SERVIZI TERRITORIALI METROPOLITANI
Servizio Progettazione Costruzioni e Manutenzione Strade

INTERVENTO FINANZIATO NELL'AMBITO DEL PATTO PER BOLOGNA

VARIANTE ALLA S.P. 65 "DELLA FUTA"

NODO DI RASTIGNANO - 2° LOTTO DI COMPLETAMENTO
TRATTO COMPRESO TRA SVINCOLO DI RASTIGNANO E PONTE DELLE OCHE
NEI COMUNI DI SAN LAZZARO DI SAVENA, BOLOGNA E PIANORO

PROGETTO DEFINITIVO

CORPO STRADALE

OPERE D'ARTE MAGGIORI

VIADOTTO RASTIGNANO

RELAZIONE DI CALCOLO OPERE PROVISIONALI

IL PROGETTISTA SPECIALISTICO

Ing. Marco Pietro D'Angelantonio
Ord. Ingg. Milano N.20155

RESPONSABILE GEOTECNICA
ALL'APERTO

IL RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE



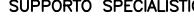
Ing. Raffaele Rinaldesi
Ord. Ingg. Macerata N. A1068

IL DIRETTORE TECNICO

Ing. Orlando Mazza
Ord. Ingg. Pavia N. 1496

PROGETTAZIONE NUOVE OPERE AUTOSTRADALI

CODICE IDENTIFICATIVO																							Ordinatore:									
RIFERIMENTO PROGETTO					RIFERIMENTO DIRETTORIO									RIFERIMENTO ELABORATO																		
Codice Commessa		Lotto, Sub- Cod. Prog. Appalto		Fase	Capitolo	Paragrafo	WBS tipologia progressivo		PARTE D'OPERA			Tip.	Disciplina	Progressivo		Rev.																
1	1	1	4	4	4	0	0	0	1	P	D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	A	P	E	0	1	0	2	-	-	SCALA: —

 	PROJECT MANAGER:		SUPPORTO SPECIALISTICO:		REVISIONE	
	Ing. Raffaele Rinaldesi Ord. Ingg. Macerata N. A1068		 ENSER SOCIETA' DI INGEGNERIA		n.	data
	REDDATTO:		VERIFICATO:		0	FEBBRAIO 2018
					1	—
					2	—
					3	—
				4	—	

VISTO DEL PROPRIETARIO DELLE OPERE		VISTO DEL CONCEDENTE	
IL RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO Ing. Pietro Luminasi		Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti DIPARTIMENTO PER LE INFRASTRUTTURE, GLI AFFARI GENERALI ED IL PERSONALE STRUTTURA DI VIGILANZA SULLE CONCESSIONARIE AUTOSTRADALI	

SPEA Engineering

VARIANTE ALLA SP65 “DELLA FUTA”

PROGETTO DEFINITIVO

NODO DI RASTIGNANO – 2° LOTTO DI COMPLETAMENTO

TRATTO COMPRESO TRA SVINCOLO DI RASTIGNANO E PONTE DELLE
OCHE NEI COMUNI DI SAN LAZZARO DI SAVENA, BOLOGNA E PIANORO

**RELAZIONE DI CALCOLO OPERE PROVVISORIALI E
DEFINITIVE DEL VIADOTTO RASTIGNANO**



INDICE

1	PREMESSA.....	4
2	NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	6
2.1	Normativa.....	6
2.2	Altri documenti di riferimento	6
3	CARATTERISTICHE DEI MATERIALI	7
4	DESCRIZIONE DELLE OPERE	8
4.1	Pila 1	8
4.2	Pila 2	9
4.3	Pila 3	12
4.4	Pila 4	14
5	CARATTERIZZAZIONE STRATIGRAFICA E GEOTECNICA DI RIFERIMENTO	16
6	CRITERI DI PROGETTO E DI ANALISI	17
6.1	Approcci progettuali e criteri di verifica.....	17
6.2	Combinazione delle azioni	17
6.3	Descrizione della metodologia di calcolo	18
6.3.1	Plaxis. Metodologia e legami costitutivi dei materiali	18
6.3.2	Plaxis. Stabilità globale.....	19
6.3.3	Plaxis. Analisi in condizioni A1+M1	20
7	ANALISI E VERIFICHE	21
7.1	Pila 1	21
7.1.1	Modello Plaxis	21
7.1.2	Dati di input dei materiali	22
7.1.3	Descrizione fasi di calcolo	23
7.1.4	Sintesi dei risultati per gli Stati Limite di Esercizio (SLE)	25
7.1.4.1	SLE - Spostamenti	25
7.1.4.2	SLE - Sollecitazioni nei micropali	27
7.1.4.3	SLE - Sollecitazioni nei cordoli in c.a.	28
7.1.5	Sintesi dei risultati per gli Stati Limite Ultimi strutturali (STR).....	30
7.1.5.1	SLU/STR Sollecitazioni nei micropali.....	30
7.1.5.2	SLU/STR Sollecitazioni nei cordoli in c.a.	32
7.1.5.3	Sintesi dei risultati per gli Stati Limite Ultimi geotecnici (GEO)	32
7.1.6	Verifiche SLU di tipo strutturale	35
7.1.6.1	Verifiche strutturali micropali	35
7.1.6.2	Verifiche strutturali cordoli in c.a.	38
7.1.7	Verifiche SLU di tipo geotecnico	42
7.2	Pila 2	43
7.2.1	Modello Plaxis	43
7.2.2	Dati di input dei materiali	44
7.2.3	Descrizione fasi di calcolo	45
7.2.4	Sintesi dei risultati per gli Stati Limite di Esercizio.....	48
7.2.4.1	SLE - Spostamenti	48
7.2.4.2	SLE - Sollecitazioni nei micropali della berlinese definitiva	51
7.2.4.3	SLE - Sollecitazioni nei micropali della berlinese provvisoria.....	51
7.2.4.4	SLE - Sollecitazioni nel cordolo in c.a. della berlinese provvisoria	53

7.2.4.5	SLE - Sollecitazioni nei tiranti	53
7.2.5	Sintesi dei risultati per gli Stati Limite Ultimi strutturali (STR)	54
7.2.5.1	SLU/STR Sollecitazioni nei Micropali della Berlinese Definitiva	54
7.2.5.2	SLU/STR Sollecitazioni nei Micropali della Berlinese Provvisoriale	54
7.2.5.3	SLU/STR Sollecitazioni nel cordolo in c.a. della berlinese provvisoriale	56
7.2.5.4	SLU Tiranti	56
7.2.5.5	SLU/STR Trave di ripartizione dei tiranti	56
7.2.6	Sintesi dei risultati per gli Stati Limite Ultimi geotecnici (GEO)	58
7.2.6.1	SLU/GEO A2+M2+R1	58
7.2.6.2	Sintesi dei risultati per le analisi di stabilità (GEO_stab)	59
7.2.7	Verifiche SLU di tipo strutturale	61
7.2.7.1	Verifiche strutturali micropali Paratia Definitiva	61
7.2.7.2	Verifiche strutturali micropali Paratia Provvisoriale	63
7.2.7.3	Verifiche strutturali cordolo in c.a. berlinese provvisoriale	65
7.2.7.4	Verifiche strutturali trave di ripartizione tiranti	67
7.2.8	Verifiche SLU di tipo geotecnico	68
7.2.9	Verifiche dei tiranti di ancoraggio	68
7.2.9.1	Resistenza a sfilamento del bulbo di ancoraggio	68
7.2.9.2	Resistenza a trazione dei trefoli	72
7.2.9.3	Sintesi delle verifiche sui tiranti	72
7.3	Pila 3	74
7.4	Pila 4	74
7.4.1	Modello Plaxis	74
7.4.2	Dati di input dei materiali	75
7.4.3	Descrizione fasi di calcolo	76
7.4.4	Sintesi dei risultati per gli Stati Limite di Esercizio (SLE)	77
7.4.4.1	SLE - Spostamenti	77
7.4.4.2	SLE - Sollecitazioni nei micropali	79
7.4.4.3	SLE - Sollecitazioni nei cordoli in c.a.	81
7.4.5	Sintesi dei risultati per gli Stati Limite Ultimi strutturali (STR)	81
7.4.5.1	SLU/STR Sollecitazioni nei micropali	81
7.4.5.2	SLU/STR Sollecitazioni nei cordoli in c.a.	83
7.4.5.3	Sintesi dei risultati per gli Stati Limite Ultimi geotecnici (GEO)	83
7.4.6	Verifiche SLU di tipo strutturale	85
7.4.6.1	Verifiche strutturali micropali	85
7.4.6.2	Verifiche strutturali cordoli in c.a.	88

1 PREMESSA

La presente relazione di calcolo è stata redatta a corredo del Progetto Definitivo per la realizzazione degli interventi di completamento del III lotto della rete viaria di adduzione Strada Lungosavena nell'ambito del Potenziamento del Sistema tangenziale di Bologna Borgo Panigale e San Lazzaro.

Oggetto della presente relazione è il dimensionamento e la verifica delle opere provvisorie necessarie per la realizzazione delle fondazioni delle pile del Viadotto Rastignano e il dimensionamento e la verifica dell'opera di sostegno definitiva necessaria in prossimità della Pila 2 per il sostegno di Via del Paleotto.

Tale Viadotto, di lunghezza complessiva pari a 258.00 m, è costituito da 5 campate di lunghezza pari rispettivamente a 39 m, 60 m, 65 m, 60 m e 39 m misurate in asse tracciato.

In particolare, in corrispondenza di ciascuna pila si prevede la realizzazione di una coronella di micropali verticali disposti lungo una circonferenza di raggio pari 4.70 m risultando praticamente tangenti al futuro plinto di fondazione delle pile. I micropali presentano lunghezze diverse in relazione alle profondità da raggiungere in corrispondenza di ciascuna pila e sono sempre collegati in testa da un cordolo in c.a. Nel caso della pila 1 e 4 si prevede la realizzazione anche di cordoli in c.a. intermedi al fine di limitare le deformazioni e garantire la stabilità degli scavi.

Scopo delle suddette opere provvisorie è infatti quello di consentire gli scavi per la realizzazione dei plinti di fondazione delle pile che dovranno fondarsi sul Substrato minimizzando i volumi di scavo.

In corrispondenza della pila 2 si necessita anche di un'opera definitiva la cui funzione è quella di sostenere la Via del Paleotto provvisoriamente durante gli scavi per la realizzazione dell'opera provvisoria posta a valle e definitivamente a seguito della riprofilatura dell'alveo. Si prevede pertanto la realizzazione di una paratia di micropali ancorata mediante un ordine di tiranti.

Nella seguente figura si riporta l'andamento planimetrico del tracciato e l'ubicazione dell'opera.

Nei seguenti paragrafi si riporta:

- l'elenco delle norme e della bibliografia di riferimento e degli altri documenti progettuali di riferimento (capitolo 2);
- le caratteristiche dei materiali adottati (capitolo 3);
- una descrizione delle opere di sostegno previste (capitolo 4);
- la caratterizzazione stratigrafica e geotecnica di riferimento (capitolo 5);
- la descrizione dei criteri di progetto e di analisi (capitolo 6)
- risultati di calcoli e delle verifiche per ciascuna opera (capitolo 7).

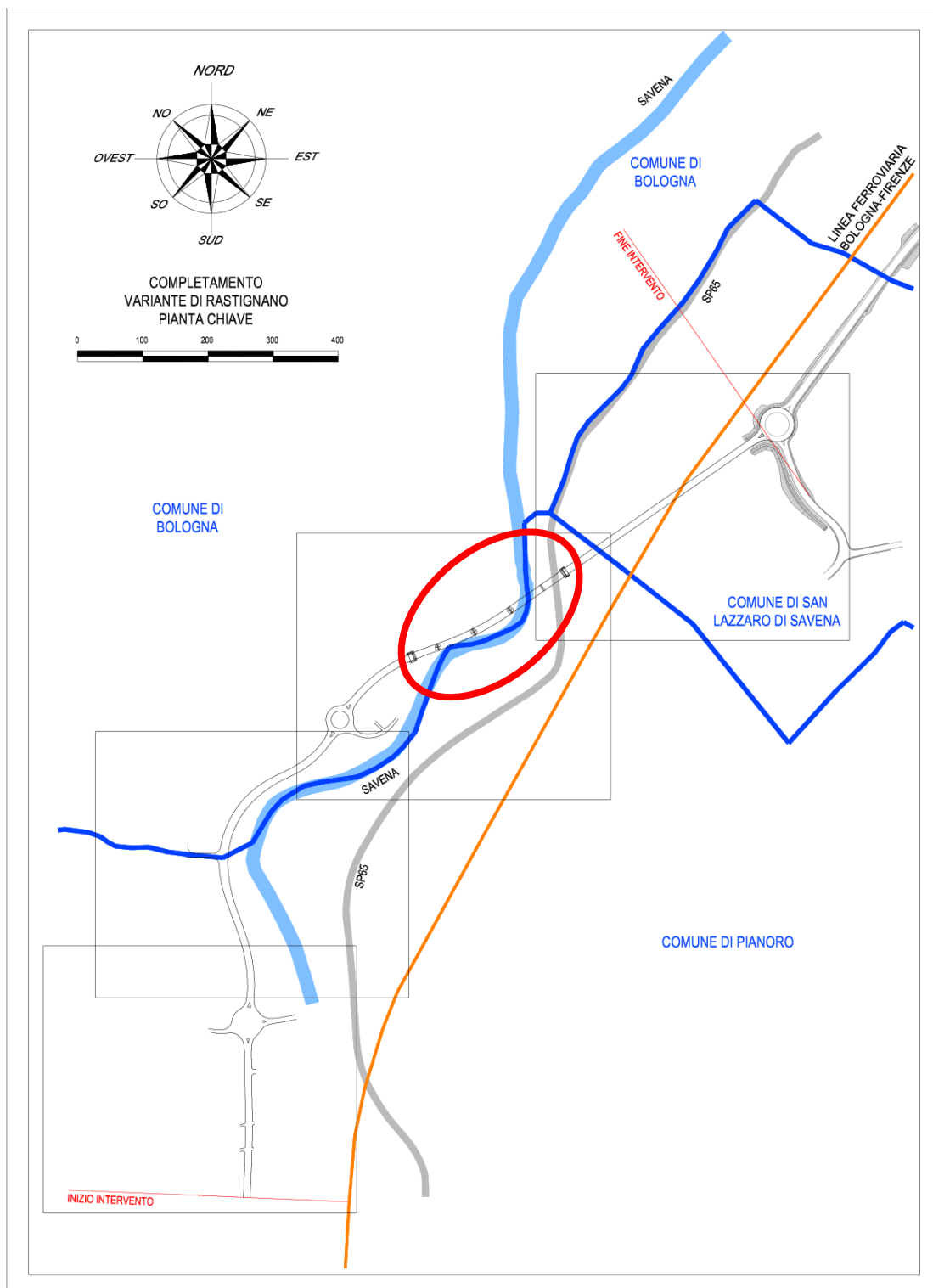


Figura 1-1: Andamento planimetrico del tracciato e ubicazione dell'opera

2 NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1 Normativa

La presente relazione di calcolo è stata redatto in conformità alle seguenti Normative:

- D.M. 14 gennaio 2008 - Norme Tecniche per le costruzioni (pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008 - Suppl. Ordinario n.30);
- CIRCOLARE 2 febbraio 2009, n. 617 - Istruzioni per l'applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008;
- EN 1993-1-1:2005 Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings.

2.2 Altri documenti di riferimento

Nella presente relazione si è fatto riferimento:

- alla seguente ulteriore fonte bibliografica:
 - Bustamante M., Doix B. (1985) "Une méthode pour le calcul des tirants et des micropieux injectés", Bull Liason Labo, P. et Ch. n°140, nov-déc. pp74-95;
 - Raccomandazioni AICAP : « Ancoraggi nei terreni e nelle rocce », giugno 2012
- ai seguenti documenti di progetto:
 - APE 0003_Profilo e Sezioni Geotecnici Viadotto Rastignano ;
 - APE 0001_Relazione geotecnica;
 - APE 0103_Pianta degli scavi e delle opere provvisoriali delle pile

3 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

Il progetto strutturale prevede l'uso dei materiali con le caratteristiche meccaniche minime riportate di seguito:

- Calcestruzzo per cordolo in c.a.:

Classe di resistenza	C25/30
Classe di esposizione	XC2
resistenza cubica a compressione caratteristica	$R_{ck}=30$ MPa
resistenza cilindrica a compressione caratteristica	$f_{ck}=25$ MPa
Modulo elastico	$E_{cm}=31476$ MPa
- Miscela cementizia per micropali e iniezione tiranti:

Classe di resistenza:	C25/30
-----------------------	--------
- Acciaio da armatura per c.a.:

acciaio B450C	
Tensione caratteristica di snervamento	$f_{yk} \geq 450.0$ MPa
Tensione di snervamento di calcolo	$f_{yd} = 391.0$ MPa
- Acciaio per armatura micropali:

acciaio	
S355 H (Secondo UNI EN 10210-1)	
tensione caratteristica di snervamento	$f_{y,k} = 355$ MPa
tensione caratteristica di rottura	$f_{t,k} = 510$ MPa
Modulo elastico	$E=210\,000$ MPa
- Acciaio armonico per trefoli dotato delle seguenti caratteristiche:

tensione caratteristica di rottura:	$f_{ptk} \geq 1860$ MPa
tensione caratteristica all'1% di deformazione:	$f_{p(1)k} \geq 1670$ MPa
allungamento sotto carico massimo:	$A_{gt} \geq 3.5$ %
sezione nominale:	150 mm ²

4 DESCRIZIONE DELLE OPERE

Nel presente capitolo si riporta una descrizione dettagliata delle opere provvisorie e definitive previste per la realizzazione delle fondazioni delle pile.

4.1 Pila 1

In corrispondenza della pila 1, al fine di consentire la realizzazione del plinto di fondazione come previsto in progetto si necessita la realizzazione di uno scavo dall'attuale piano campagna variabile tra le quote +96.50 m e +97.50 m fino al raggiungimento dell'Unità geotecnica SUB il cui tetto è presumibilmente posto a quota +90.50 m.

Al fine di limitare l'estensione planimetrica degli scavi si prevede di realizzare un piano di lavoro orizzontale alla quota +97.20 m e di realizzare da tale quota la coronella di micropali disposta planimetricamente come indicato in Figura 4-1.

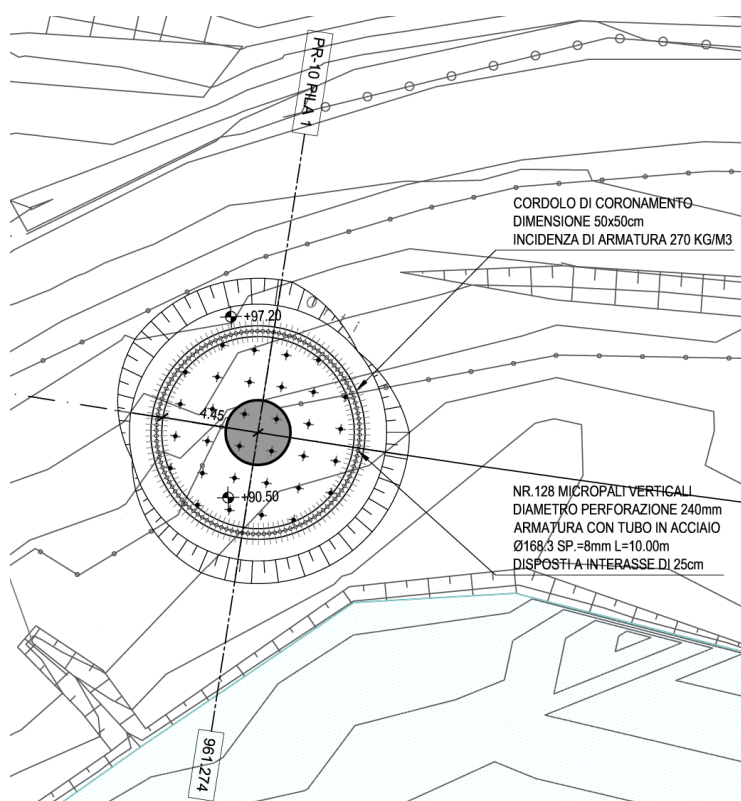


Figura 4-1: Stralcio planimetrico opera provvisoria pila 1.

In particolare l'opera è costituita da 128 micropali verticali di diametro esterno $\phi 240$ mm, disposti ad interasse di 0.25 m lungo una circonferenza di raggio pari 4.70 m, armati con un tubolare in acciaio di diametro esterno $\phi 168.3$ mm, spessore pari a 8 mm e lunghezza pari a 10.00 m.

I micropali sono collegati in testa mediante un cordolo in c.a. avente dimensioni 0.50 m x 0.50 m. La quota di intradosso cordolo è posta a +97.20 m.

Si prevede di realizzare un primo scavo fino alla quota intermedia +94.20 m al fine di consentire la realizzazione di un ulteriore cordolo anulare in c.a. di contrasto interno alla coronella di micropali avente dimensioni 0.40 m x 0.40 m la cui quota di intradosso è posta proprio a +94.15m e di completare gli scavi fino alla quota +90.50 m (quota alla quale si presume di

incontrare l'Unità geotecnica SUB). L'altezza di scavo massima prevista risulta pertanto pari a 6.70 m.

Si prevede pertanto di riempire immediatamente lo scavo con calcestruzzo magro fino alla quota di imposta della fondazione della pila 1 posta a +91.50 m.

Nella seguente figura si riporta la sezione trasversale dell'opera in asse al viadotto.

**PILA - P1 -
SEZIONE TRASVERSALE**

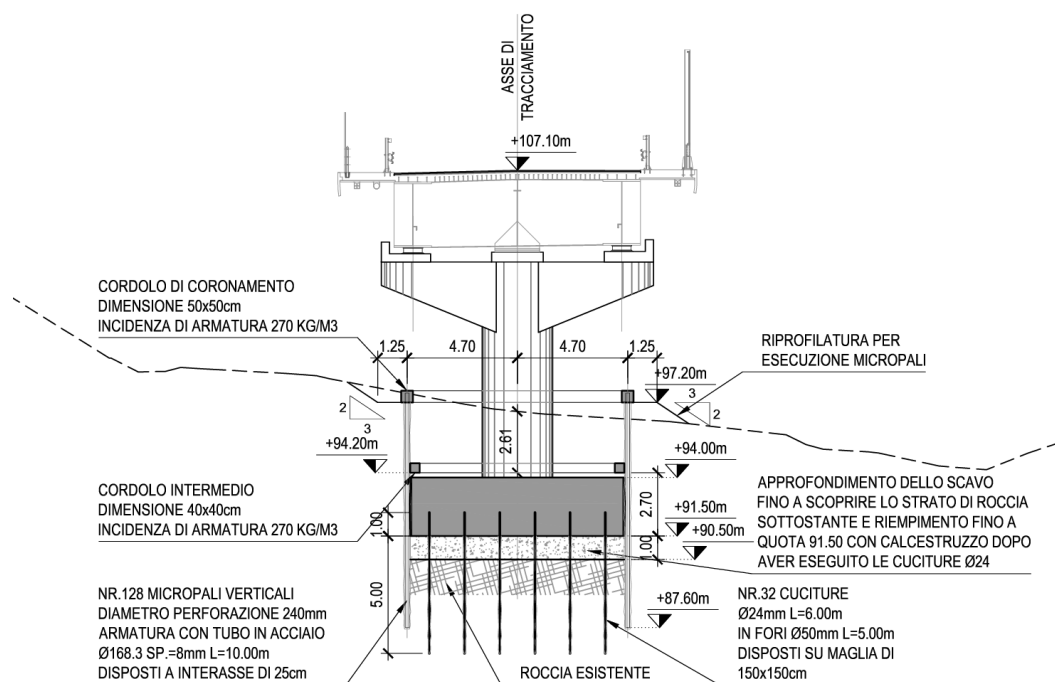


Figura 4-2: Sezione tipo opera provvisoriale pila 1.

4.2 Pila 2

In corrispondenza della pila 2, al fine di consentire la realizzazione del plinto di fondazione come previsto in progetto e di garantire la stabilità di Via del Paleotto nel lungo termine a seguito della riprofilatura dell'alveo si prevede la realizzazione delle due berlinesi di micropali disposte planimetricamente come indicato in Figura 4-3.

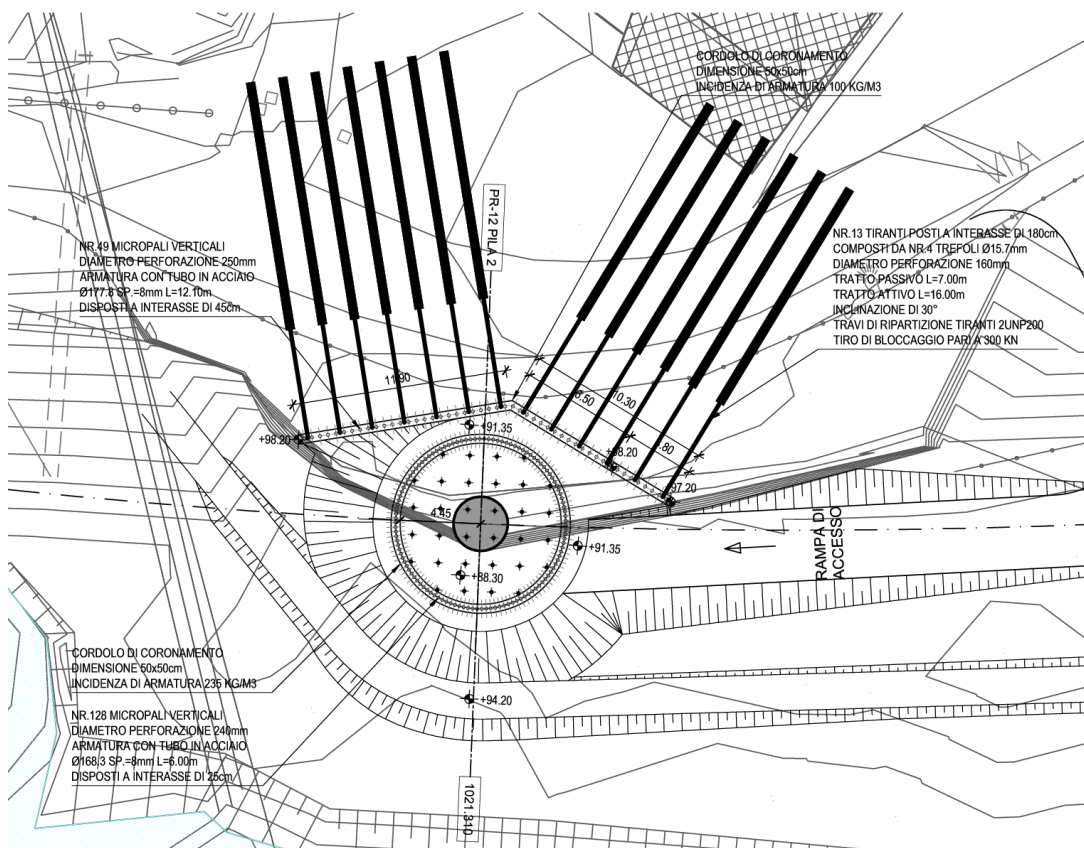


Figura 4-3: Stralcio planimetrico opere provvisoriale e definitiva pila 2.

La berlinese definitiva, disposta a protezione di via del Paleotto, è costituita da micropali verticali di diametro esterno $\phi 240$ mm disposti ad interasse di 0.45 m ed armati con un tubolare in acciaio di diametro esterno $\phi 177.8$ mm e spessore pari a 8 mm di lunghezza pari a 12.00 m.

I micropali sono collegati in testa da un cordolo in c.a. di dimensioni 0.50 m x 0.50 m con estradosso a quota costante +98.20 m e un tratto terminale di 3.80 m a quota variabile tra 98.20 m e 97.20

Si prevede una prima fase di scavo fino alla quota +95.70 m (-2.50 m da estradosso cordolo) al fine di realizzare un ordine di tiranti di ancoraggio alla quota +96.20 m (-2.00 m da estradosso cordolo) aventi le seguenti caratteristiche:

- N° trefoli: 4;
- Area trefolo $A_{tr}=150 \text{ mm}^2$;
- Diametro di perforazione: $\phi_{per}=160\text{mm}$;
- Lunghezza del tratto passivo $L_p = 7 \text{ m}$;
- Lunghezza del tratto attivo $L_a = 16 \text{ m}$;
- Interasse $i=1.80 \text{ m}$;
- Tiro di bloccaggio $N_{pret}=300\text{kN}$

Le spinte delle terre vengono trasferite ai tiranti mediante il sistema di ripartizione costituito da 2 UPN 200 accoppiati distanti 300mm.

Si prevede quindi di realizzare lo scavo antistante la berlinese definitiva fino alla quota +91.35 m ($h_{\text{scavo}} = 6.85$ m) realizzando, lato alveo, un arginello provvisorio con quota sommitale +94.00 m per limitare il pericolo di allagamento degli scavi in relazione al presunto livello di piena di cantiere.

Dalla quota +91.35 m sarà realizzata l'opera provvisoria costituita da 128 micropali verticali di diametro esterno $\phi 240$ mm, disposti ad interasse di 0.25 m lungo una circonferenza di raggio pari 4.70 m, armati con un tubolare in acciaio di diametro esterno $\phi 168.3$ mm, spessore pari a 8 mm e lunghezza pari a 6.00 m.

I micropali dell'opera provvisoria sono collegati in testa mediante un cordolo in c.a. avente dimensioni 0.50 m x 0.50 m. La quota di intradosso cordolo è posta a +91.35 m. Tale opera consente di approfondire lo scavo al suo interno fino alla quota di intradosso del magro di fondazione posta a +88.30 m. L'altezza di scavo risulta pari a 3.05 m.

A seguito della realizzazione delle fondazioni e dell'elevazione della pila 2 si prevede di rinterrare lo scavo e risagomare l'alveo fino alla quota +93.83 m. ($h_{\text{scavo,definitiva}} = 4.37$ m). Nella seguente figura si riporta la sezione trasversale dell'opera in asse al viadotto.

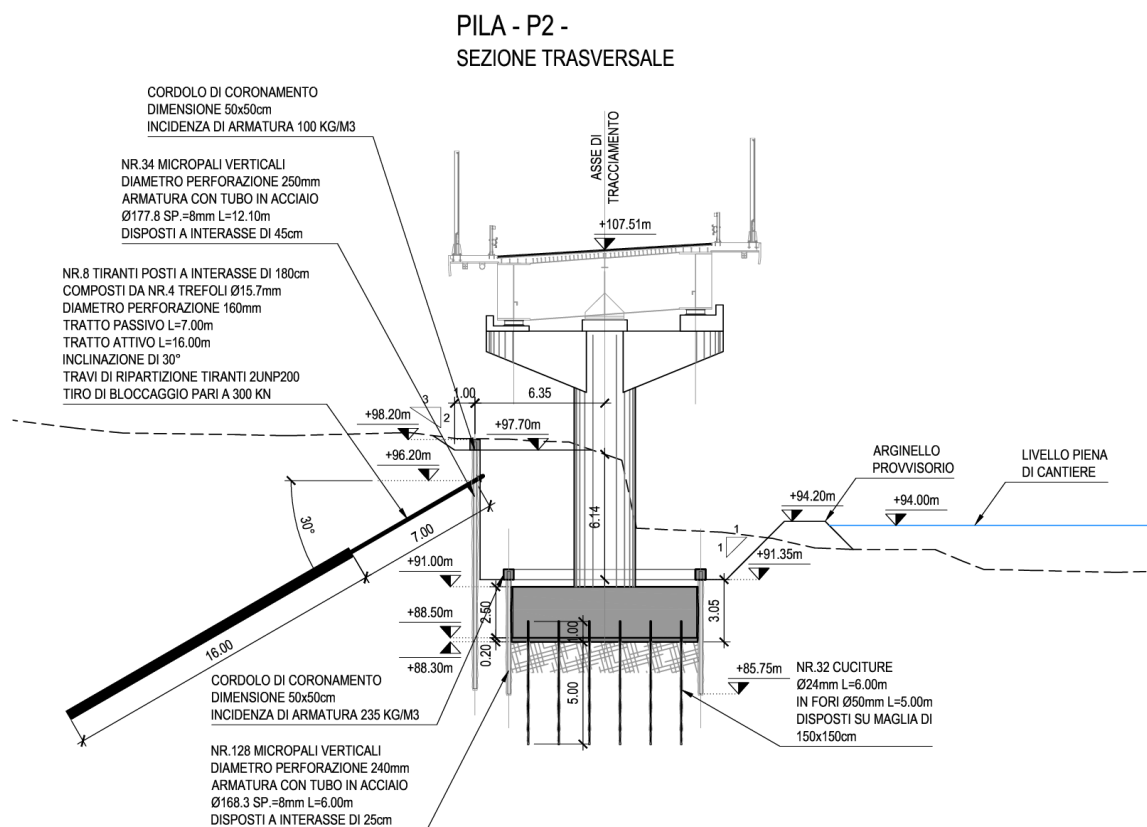


Figura 4-4: Sezione trasversale dell'opera provvisoria pila 2.

4.3 Pila 3

In corrispondenza della pila 3, al fine di consentire la realizzazione del plinto di fondazione come previsto in progetto si necessita la realizzazione di uno scavo dall'attuale piano campagna variabile tra le quote +93.30 m e +94.40 m fino alla quota di intradosso magrone pari a +87.80 m.

Al fine di limitare l'estensione planimetrica degli scavi si prevede di realizzare uno sbancamento preliminare con scarpate aventi pendenza variabile da 2v/3h (lato monte) a 1/1 (lato alveo) fino alla quota +90.85 m (piano lavoro) e di realizzare da tale quota la coronella di micropali disposta planimetricamente come indicato in Figura 4-5.

Lato alveo si prevede la realizzazione di un arginello provvisorio con quota sommitale +94.00 m per limitare il pericolo di allagamento degli scavi in relazione al presunto livello di piena di cantiere.

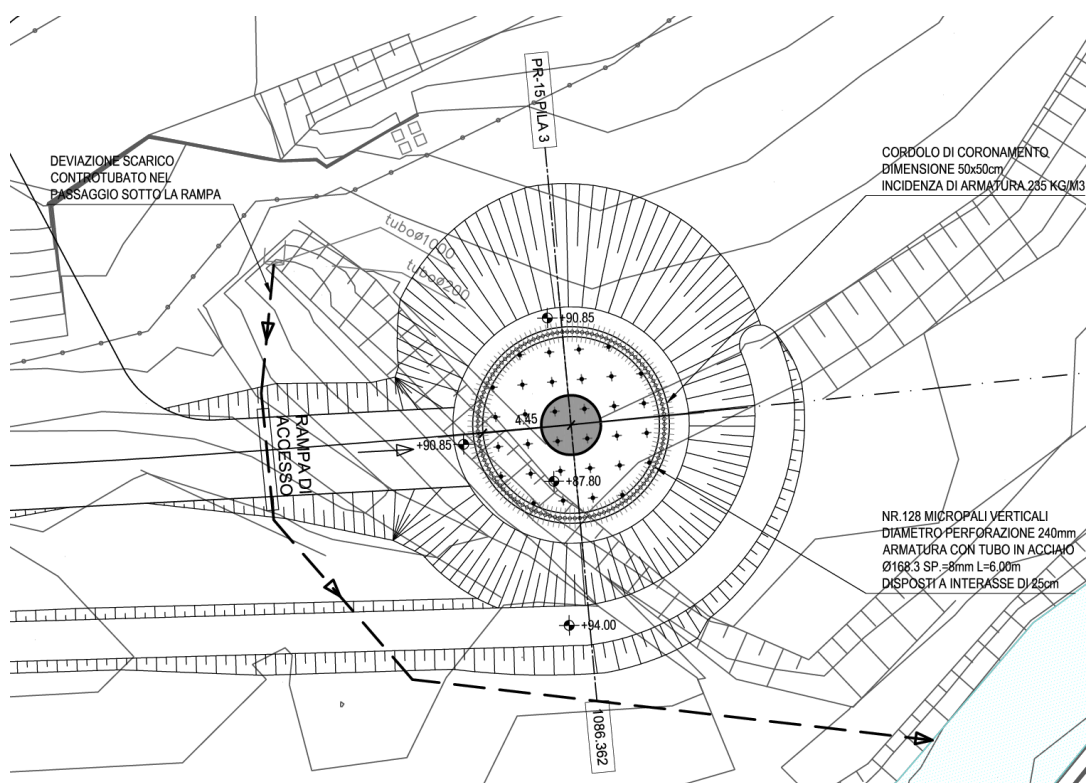


Figura 4-5: Stralcio planimetrico opera provvisoria pila 3.

In particolare l'opera è costituita da 128 micropali verticali di diametro esterno $\phi 240$ mm, disposti ad interasse di 0.25 m lungo una circonferenza di raggio pari 4.70 m, armati con un tubolare in acciaio di diametro esterno $\phi 168.3$ mm, spessore pari a 8 mm e lunghezza pari a 6.00 m.

I micropali sono collegati in testa mediante un cordolo in c.a. avente dimensioni 0.50 m x 0.50 m. La quota di intradosso cordolo è posta a +90.85 m.

L'altezza di scavo massima prevista risulta pari a 3.05 m.

Nella seguente figura si riporta la sezione trasversale dell'opera in asse al viadotto.

PILA - P3 -
SEZIONE TRASVERSALE

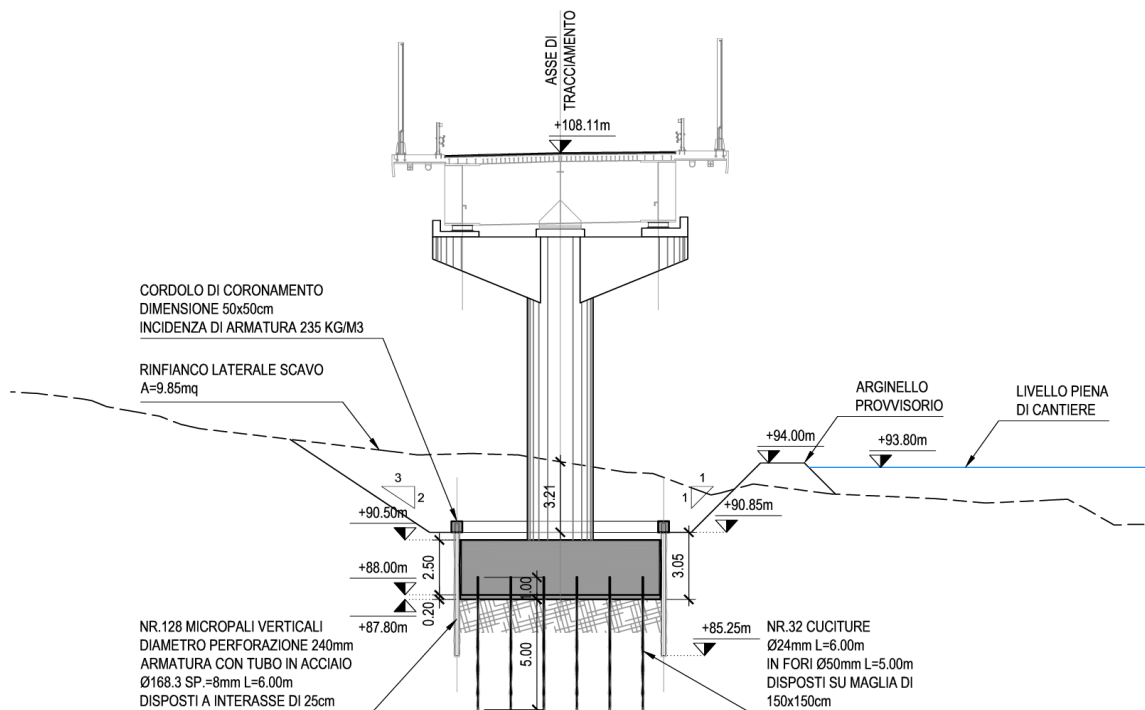


Figura 4-6: Sezione trasversale opera provvisoria pila 3.

4.4 Pila 4

In corrispondenza della pila 4, al fine di consentire la realizzazione del plinto di fondazione come previsto in progetto si necessita la realizzazione di uno scavo dall'attuale piano campagna variabile tra le quote +95.60 me +97.50 m fino al raggiungimento dell'Unità geotecnica SUB il cui tetto è presumibilmente posto a quota +90.00 m.

Si prevede di realizzare dal piano campagna attuale la coronella di micropali disposta planimetricamente come indicato in Figura 4-7.

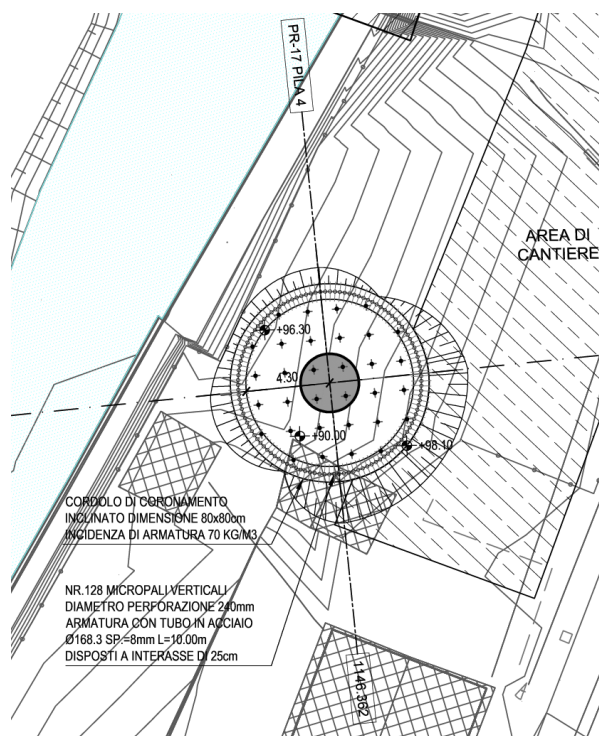


Figura 4-7: Stralcio planimetrico opera provvisoria pila 4.

In particolare l'opera è costituita da 128 micropali verticali di diametro esterno $\phi 240$ mm, disposti ad interasse di 0.25 m lungo una circonferenza di raggio pari 4.70 m, armati con un tubolare in acciaio di diametro esterno $\phi 168.3$ mm, spessore pari a 8 mm e lunghezza pari a 10.00 m.

I micropali sono collegati in testa mediante un cordolo in c.a. avente dimensioni 0.80 m x 0.80 m. L'intradosso cordolo è variabile tra la quota massima +97.30 m e la quota minima +95.50 m. Si prevede di realizzare lo scavo in 3 step rispettivamente fino alle quote +95.00 m, +92.50 m e +90.00 m al fine di consentire la realizzazione di due ulteriori cordolo anulare in c.a. di contrasto interni alla coronella di micropali aventi dimensioni 0.50 m x 0.50 m la cui quota di intradosso è posta proprio a +95.00 m e 92.50 m prima di completare gli scavi fino alla quota +90.00 m (quota alla quale si presume di incontrare l'Unità geotecnica SUB). L'altezza di scavo risulta pertanto variabile tra a 6.30m e 8.10 m.

Si prevede pertanto di riempire immediatamente lo scavo con calcestruzzo magro fino alla quota di imposta della fondazione della pila 4 posta a +92.30 m.

Nella seguente figura si riporta la sezione trasversale dell'opera in asse al viadotto.

PILA - P4 -
SEZIONE TRASVERSALE

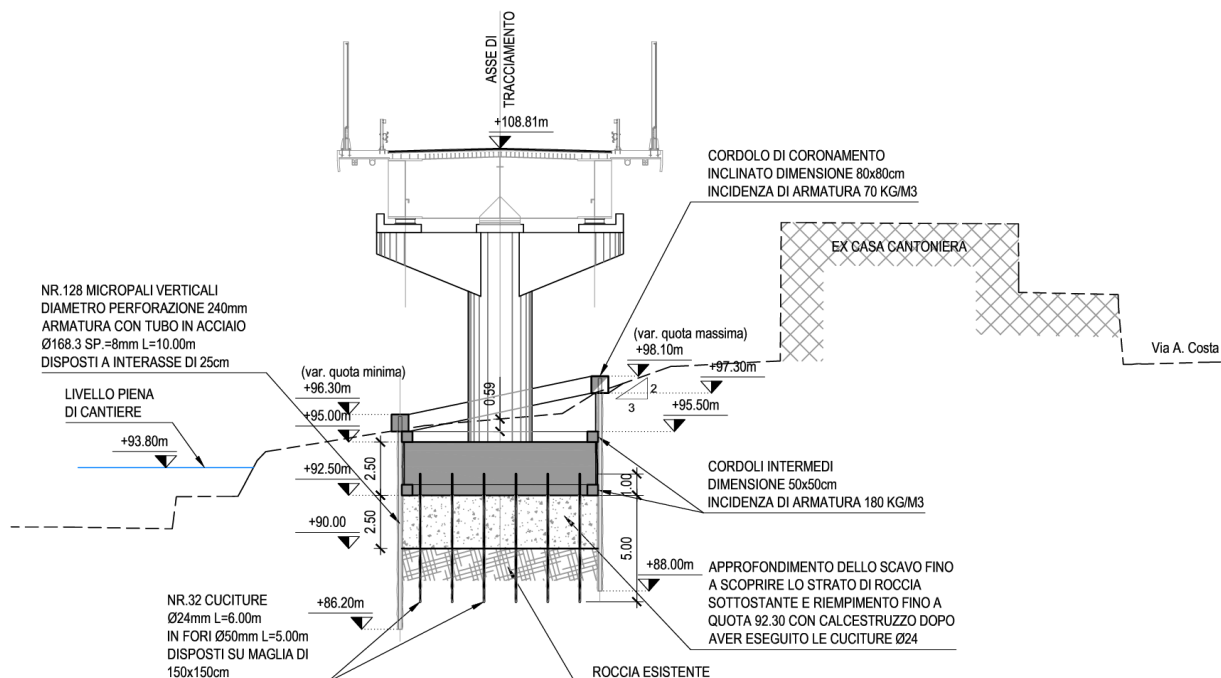


Figura 4-8: Sezione trasversale opera provvisoriale pila 4.

5 CARATTERIZZAZIONE STRATIGRAFICA E GEOTECNICA DI RIFERIMENTO

Per la definizione della stratigrafia di riferimento e dei parametri geotecnici di riferimento si è fatto riferimento alla relazione geotecnica (elaborato APE 0001 – Relazione geotecnica), ed al profilo longitudinale geotecnico in corrispondenza dell'opera (elaborato APE 0003 – Profilo e Sezioni Geotecniche – Viadotto Rastignano).

In particolare nelle aree oggetto di intervento si individuano le seguenti unità geotecniche di riferimento:

- **UNITÀ RIP** – Depositi antropici (riporto) prevalentemente incoerenti
- **UNITÀ 1 DAG** – Depositi alluvionali prevalentemente incoerenti a grana grossa
- **UNITÀ 2 DAS** – Depositi alluvionali prevalentemente incoerenti a grana fine
- **UNITÀ 3 DAF** – Depositi alluvionali prevalentemente coesivi
- **UNITÀ SUB alt** – Substrato alterato
Porzione alterata ed allentata del substrato, costituito da marne e argilliti, subordinatamente siltiti ed areniti talora argillificate.
- **UNITÀ SUB** – Substrato
Marne, argilliti, intercalate a siltiti ed areniti fini da sciolte, tendenzialmente poco cementate

La stratigrafia e il livello di falda considerati in corrispondenza di ciascuna pila e è stata definita sulla base del profilo longitudinale geotecnico alla progressiva di interesse ed è specificata nei relativi capitoli.

Nella seguente tabella si sintetizzano i parametri geotecnici di riferimento; adottati nelle elaborazioni per le suddette unità stratigrafiche.

Unità	γ (kN/m ³)	ϕ'_k (°)	c'_k (kPa)	c_{uk} (kPa)	E' (Mpa)
RIP	19.0	30÷34 [32]	0÷2 [1]	-	10÷20 [15]
1-DAG	20.0	35÷40 [37.5]	0÷2 [1]	-	25÷35 [30]
2-DAS	20.0	32÷36 [34.0]	0÷4 [2]	-	8÷10 [9]
3-DAF	19.0	25÷30 [27.5]	4÷8 [6]	50÷100 [75]	4÷6 [5]
SUB alt	22.0	24÷26 [25]	20÷25 [22.5]	250÷400 [250]	30÷35 [32.5]
SUB	22.0	31÷35 [31]	50÷60 [50]	-	100÷150 [100]

Tabella 5-1: - Parametri geotecnici caratteristici di resistenza al taglio e di deformabilità

6 CRITERI DI PROGETTO E DI ANALISI

L'analisi è stata condotta per ciascuna opera con riferimento alla geometria delle opere descritta al precedente capitolo 4 adottando i criteri nel seguito descritti in accordo al DM 14 gennaio 2008 (Norme Tecniche per le Costruzioni - NTC).

6.1 Approcci progettuali e criteri di verifica

Le verifiche inerenti le paratie sono state sviluppate con riferimento alle NTC 2008, adottando per gli stati limite ultimi (SLU) di tipo strutturale (STR) e geotecnico (GEO) l'approccio 1 che prevede le seguenti due combinazioni:

- combinazione 1: A1+M1+R1 (STR);
- combinazione 2: A2+M2+R1 (GEO).

Le verifiche di stabilità del complesso opera di sostegno-terreno sono state condotte con riferimento a:

- Approccio 1, combinazione 2: A2+M2+R2 (GEO-stab).

Le verifiche geotecniche a sfilamento degli ancoraggi (micropalo a cavalletto nel caso della pila 1 e tiranti nel caso delle pile 2 e 4) sono state condotte con riferimento alla combinazione A1+M1+R3 in accordo al § 6.6.2 delle NTC 2008.

I coefficienti parziali per le azioni (A), per i parametri geotecnici del terreno (M) e per le resistenze (R) sono in accordo alla tab. 6.2.I, 6.2.II, 6.8.I (stabilità), 6.6.1 e 6.6.III (ancoraggi), di cui alle NTC 2008.

Per gli stati limite ultimi, la verifica di sicurezza è soddisfatta se:

$$R_d \geq E_d,$$

dove:

- R_d = resistenza di progetto;
- E_d = valore di progetto dell'effetto delle azioni.

In condizioni di esercizio gli spostamenti dell'opera di sostegno dovranno essere compatibili con la funzionalità dell'opera stessa.

6.2 Combinazione delle azioni

Si sono considerate le seguenti combinazioni delle azioni:

- Combinazione fondamentale impiegata per gli stati limite ultimi (SLU):

$$\gamma_G \cdot G + \gamma_Q \cdot Q_k$$

- Combinazione caratteristica (rara) impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE):

$$G + Q_k$$

dove:

- **G** rappresenta le azioni permanenti dovute al peso proprio degli elementi;

- Q_k rappresenta l'azione variabile corrispondente nel caso in esame al sovraccarico stradale pari a 20 kPa ;
- γ sono i coefficienti per le azioni agli SLU assunti in accordo alla tab. 6.2.I di cui alle NTC 2008.

6.3 Descrizione della metodologia di calcolo

L'analisi di interazione terreno-opera è stata condotta con un modello FEM 2D utilizzando il programma di calcolo Plaxis 2D, codice appositamente sviluppato per lo studio di problematiche geotecniche e di interazione terreno-struttura.

La modellazione eseguita mira ad analizzare i principali aspetti tenso-deformativi connessi con la realizzazione dell'opera di sostegno prevista in progetto:

- determinazione delle massime sollecitazioni sugli elementi strutturali per il loro dimensionamento e verifica;
- analisi e verifica della stabilità geotecnica dell'opera.

La modellazione è, quindi, idonea anche ad indagare la stabilità globale del sistema geotecnico struttura-terreno ed all'analisi dei fenomeni deformativi indotti dalle instabilità attualmente presenti; consente di ottenere campi di spostamento che tengano correttamente conto dei fenomeni di interazione terreno-struttura.

Il codice Plaxis presenta una vasta libreria di legami costitutivi attribuibili ai terreni; sono disponibili inoltre elementi strutturali di vario tipo che consentono di simulare elementi strutturali che interagiscono con il terreno circostante mediante elementi interfaccia.

Le analisi sono state condotte mediante modellazioni volte a rappresentare il sistema geotecnico struttura-terreno con la simulazione sequenziale delle principali fasi costruttive previste.

La descrizione ha carattere generale (soluzione numerica, legami costitutivi e significato dei parametri di input); nei successivi capitoli, esplicitamente dedicati alle modellazioni, verranno esposte le caratteristiche di dettaglio delle analisi svolte ed i parametri di input considerati.

6.3.1 *Plaxis. Metodologia e legami costitutivi dei materiali*

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

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

Visto il grado di conoscenze dei terreni, il modello costitutivo utilizzato, è quello di Hardening-Soil con comportamento Drained.

6.3.2 Plaxis. Stabilità globale

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

- $c'_{prova} = c' / FS_{prova}$
- $\phi'_{prova} = \arctan(\tan \phi' / FS_{prova})$.

In Figura 6-1 la progressiva riduzione delle resistenze è rappresentata nel piano di Mohr-Coulomb per il singolo elemento di terreno. Si osserva che i parametri di deformabilità non influenzano in maniera apprezzabile i risultati del calcolo e, pertanto, possono essere considerati senza particolari affinamenti.

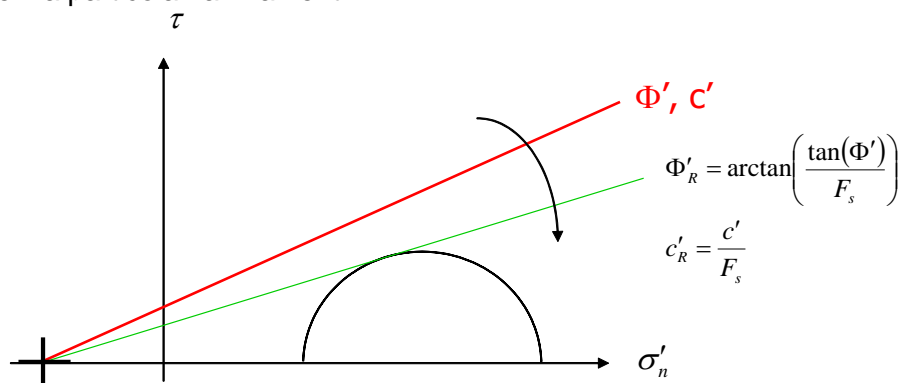



Figura 6-1: Phi-c reduction method

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

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

 gruppo Atlantia	VARIANTE ALLA SP65 "DELLA FUTA" NODO DI RASTIGNANO – 2° LOTTO DI COMPLETAMENTO Tratto compreso tra svincolo di Rastignano e Ponte Delle Oche nei comuni di San Lazzaro di Savena, Bologna e Pianoro Progetto Definitivo RELAZIONE DI CALCOLO OPERE PROVVISORIALI DEL VIADOTTO RASTIGNANO
--	--

non richiedono pertanto la conoscenza dei legami tensioni-deformazioni ma del solo criterio di resistenza dei terreni interessati).

In Plaxis il moltiplicatore totale:

$$\Sigma M_{sf} = \tan \varphi_{input} / \tan \varphi_{reduced} = c_{input} / c_{reduced},$$

è utilizzato per definire il fattore di sicurezza:

$$FS = \text{resistenza disponibile} / \text{resistenza a rottura} = \text{valore di } \Sigma M_{sf} \text{ a rottura}.$$

6.3.3 Plaxis. Analisi in condizioni A1+M1

Per la combinazione A1+M1, le azioni variabili sono amplificate preventivamente mediante il coefficiente parziale $\gamma_Q/\gamma_{G1}=1.5/1.3=1.15$; i risultati dell'analisi Plaxis in termini di azioni interne sono poi amplificati per il fattore moltiplicativo $\gamma_{G1}=1.3$.

7 ANALISI E VERIFICHE

7.1 Pila 1

7.1.1 Modello Plaxis

Per il calcolo delle opere provvisorie previste in corrispondenza della pila 1 è stato sviluppato cautelativamente il modello di calcolo piano riportato nella seguente figura, rappresentativo della sezione trasversale al viadotto in asse alla pila con altezza di scavo tra le quote +97.20 m (piano di lavoro) e +90.50 (presunto tetto dell'Unità SUB) ovvero pari a 6.70 m.

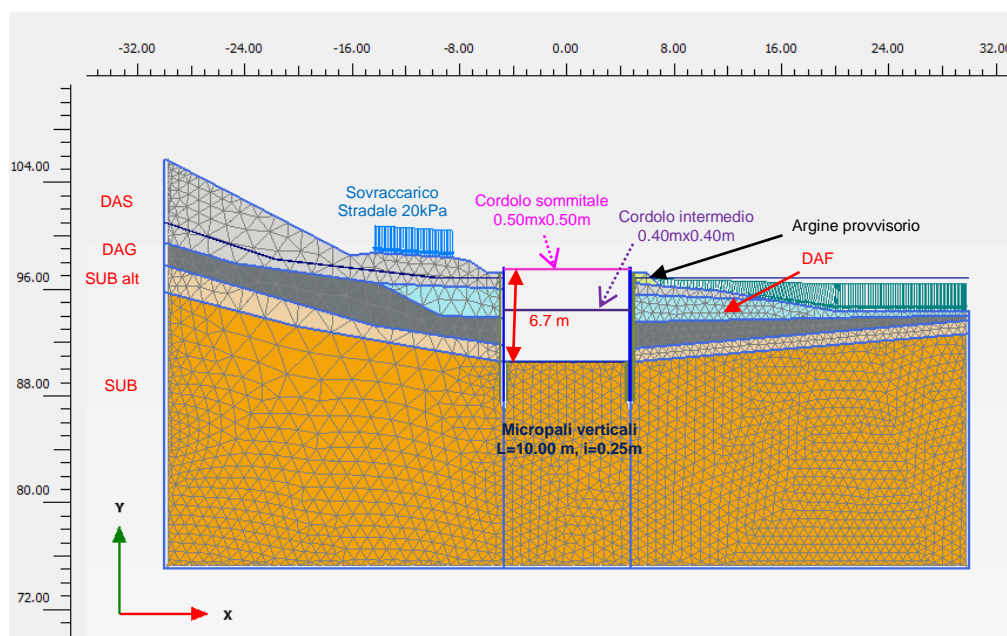


Figura 7-1: Modello di calcolo Plaxis - Opere provvisionali Pila 1


Si è adottata la stratigrafia riportata nella seguente tabella con riferimento alle quote in asse pila.

Quote assolute [m s.l.m.]		Quote da piano lavoro [m]		Unità
da	A	da	a	
97.20	96.81	0.00	0.39	RIP
96.81	95.61	0.39	1.59	DAS
95.61	93.57	1.59	3.63	DAF
93.57	91.48	3.63	5.72	DAG
91.48	90.50	5.72	6.70	SUB alt
<90.50		>6.70		SUB

Tabella 7-1: - Stratigrafia di riferimento Pila 1

La falda è stata assunta con livello iniziale a quota +96.81 m in asse pila, mentre durante le fasi di scavo essendo i micropali tangenti si è adottato il livello di falda internamente allo scavo coincidente con il fondo scavo stesso, mentre esternamente coincidente con il livello iniziale.

A tergo della paratia (lato via del Paleotto) si è applicato il sovraccarico stradale pari a 20 kPa per una striscia di larghezza 5.80 m agente sul piano campagna ad una distanza dalla paratia pari a 3.85m.

	<p style="text-align: right;">VARIANTE ALLA SP65 "DELLA FUTA NODO DI RASTIGNANO – 2° LOTTO DI COMPLETAMENTO Tratto compreso tra svincolo di Rastignano e Ponte Delle Oche nei comuni di San Lazzaro di Savena, Bologna e Pianoro Progetto Definitivo RELAZIONE DI CALCOLO OPERE PROVVISORIALI DEL VIADOTTO RASTIGNANO</p>
---	--

7.1.2 Dati di input dei materiali

Per i principali parametri geotecnici adottati nelle elaborazioni Plaxis per i diversi materiali si rimanda al §5.

I micropali verticali sono stati modellati mediante elementi "Plate" le cui caratteristiche sono indicate nella tabella seguente.

Parameter	Name	Unit	
Micropali verticali			
ϕ_{perf} 240 mm – Armatura ϕ 168.3 mm sp. 8 mm - i=0.25m			
Type of behaviour			Elastic; Isotropic
Normal stiffness	EA	kN/m	7 505 189
Flexural rigidity	EI	kNm ² /m	25 892
Unit weight	w	kN/m/m	5.22
Poisson's ratio	ν	-	0.0

Tabella 7-2: - Dati di input elementi strutturali schematizzati come "plate".

In particolare i valori finalizzati al calcolo della rigidezza assiale e flessionale sono stati calcolati considerando il solo contributo del tubolare.

Il cordolo sommitale e il cordolo intermedio in c.a. sono stati modellati mediante degli elementi "Node to Node Anchor" resistenti a solo sforzo assiale le cui caratteristiche sono riassunte nella seguente tabella.

Parameter	Name	Unit	
Cordolo sommitale 0.50m x 0.50m			
Material type			Elastic; Isotropic
Normal stiffness	EA	kN/m	18 076
L_{spacing}	-	m	1.00
$F_{\text{max, comp}}$	-	kN	753
Cordolo intermedio 0.40m x 0.40m			
Material type			Elastic; Isotropic
Normal stiffness	EA	kN/m	7454
L_{spacing}	-	m	1.00
$F_{\text{max, comp}}$	-	kN	482

Tabella 7-3: - Dati di input elementi strutturali schematizzati come "node to node anchor".

I cordoli in c.a sono stati schematizzati quindi come puntelli equivalenti con interasse pari a 1 m, reagenti a compressione e la cui rigidezza è stata stimata come la rigidezza di un anello soggetto a un carico distribuito secondo lo schema riportato nella seguente figura.

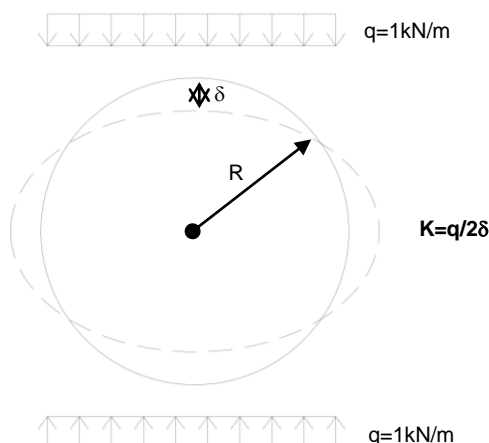


Figura 7-2: Cordolo in c.a. - Schema adottato per la valutazione della rigidezza assiale del puntello equivalente

Nella seguente tabella si riporta una sintesi dei valori di rigidezza del puntello equivalente ad un anello avente raggio $R=4.80\text{m}$ per diverse sezioni analizzate mediante l'ausilio di un modello SAP.

Sezione	δ [mm]	K [kN/m]
0.40 m x 0.40 m	0.63	793
0.50 m x 0.50 m	0.26	1923
0.60 m x 0.60 m	0.13	3846
0.80 m x 0.80 m	0.04	12500

Tabella 7-4: Determinazione delle rigidezze per il puntello equivalente all'anello in c.a.

7.1.3 Descrizione fasi di calcolo

Le analisi eseguite sono di tipo sequenziale e riproducono in successione tutte le principali fasi operative previste per la realizzazione dell'opera e condizioni di verifica. La messa in opera degli elementi strutturali (paratie) viene simulata attivando i relativi elementi strutturali, mentre la fase di scavo viene simulata mediante la disattivazione attivazione dei cluster di terreno corrispondenti.

Le fasi di calcolo considerate sono riportate nel seguito:

- Fase 0. Fase geostatica iniziale (Figura 7-3);
- Fase 1. Realizzazione piano di lavoro a +97.20 m (Figura 7-4);
- Fase 2. Realizzazione micropali e cordolo sommitale (Figura 7-5)
- Fase 3. Applicazione sovraccarico stradale 20 kPa (Figura 7-6);
- Fase 4. SLE/Scavo a +94.20m (Figura 7-7)
- Fase 5. SLU/STR A1+M1+R1 Scavo a + 94.20m;
- Fase 6. SLU/GEO A2+M2+R1 Scavo a +94.20 m;

Fase 7. SLE/Realizzazione cordolo a quota+94.40 m (quota asse cordolo) e scavo a quota +90.50m (a partire dalla Fase 4) (Figura 7-8);

Fase 8. SLU/STR A1+M1+R1;

Fase 9. SLU/GEO A2+M2+R1;

Fase 10. SLU/GEO_stab A2+M2+R2.

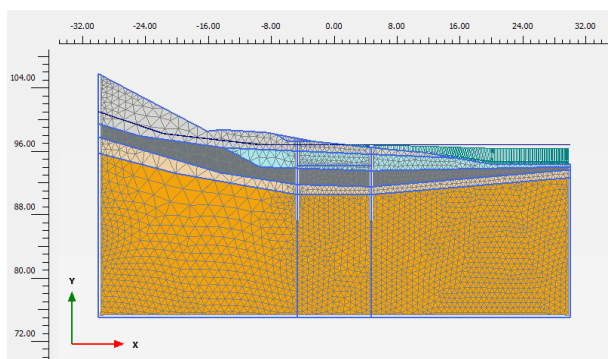


Figura 7-3: Fase 0– Fase geostatica iniziale

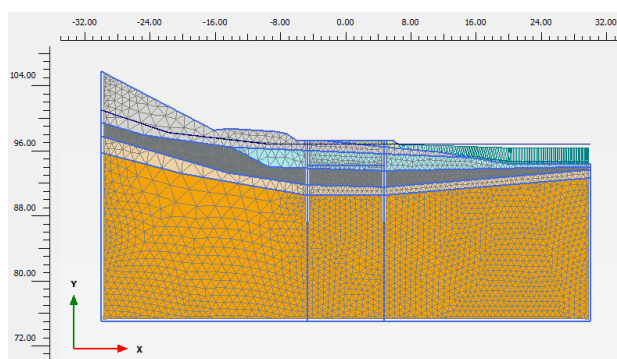


Figura 7-4: Fase 1 – Realizzazione piano di lavoro a +97.20m

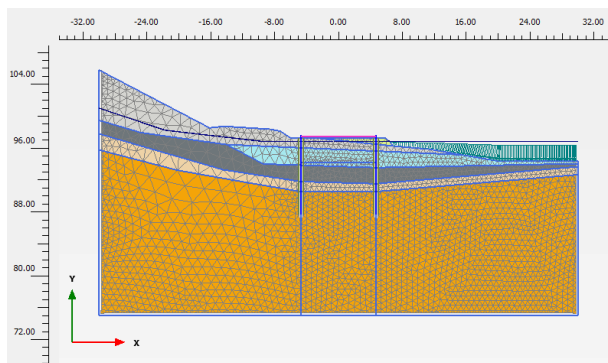


Figura 7-5: Fase 2 – Realizzazione micropali e cordolo sommitale

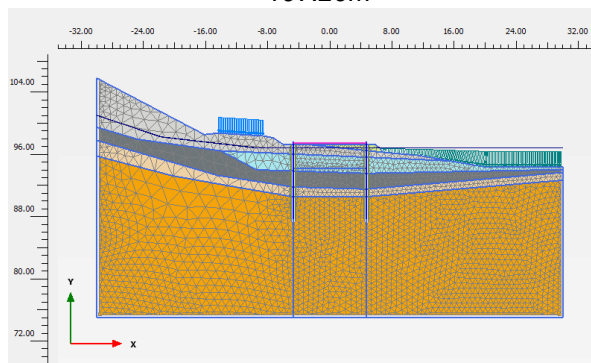


Figura 7-6: Fase 3 – Applicazione sovraccarico stradale 20 kPa

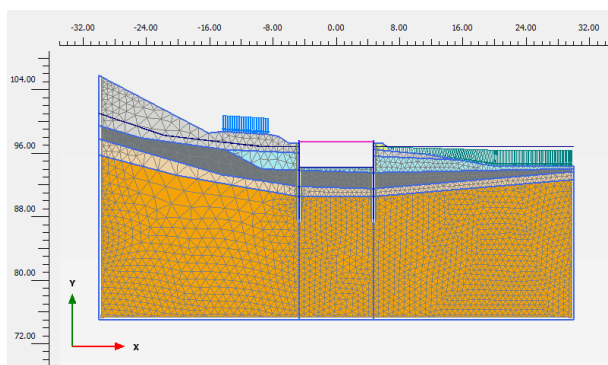


Figura 7-7: Fasi 4, 5, 6 – Scavo a quota +94.20m

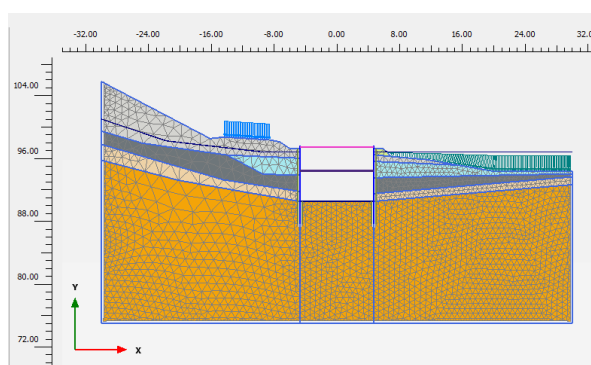


Figura 7-8: Fase 7,8,9 – Realizzazione cordolo a quota+94.40 m (quota asse cordolo) e scavo a quota +90.50m

7.1.4 Sintesi dei risultati per gli Stati Limite di Esercizio (SLE)

Nel seguito è riportata una sintesi dei risultati in termini di:

- spostamenti;
- sollecitazioni sugli elementi strutturali.

7.1.4.1 SLE - Spostamenti

Nel seguito è riportata una sintesi dei risultati in termini di spostamenti.

Si ottiene:

- In fase 4 uno spostamento orizzontale variabile tra circa 0.4 cm (lato alveo) a circa 1.3 cm (lato strada) (Figura 7-9);
- In fase 7 uno spostamento orizzontale variabile tra circa 2.2 cm (lato alveo) a circa 5.3 cm (lato strada) (Figura 7-10).

Tali spostamenti risultano compatibili con la funzionalità dell'opera.

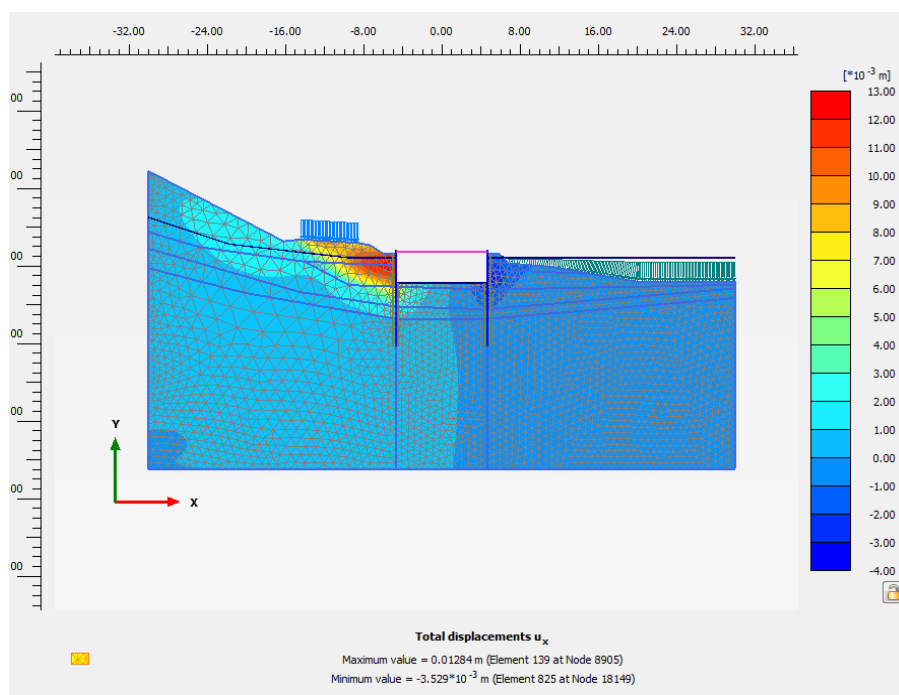


Figura 7-9: Fase 4 – SLE Combinazione Rara: Spostamenti orizzontali

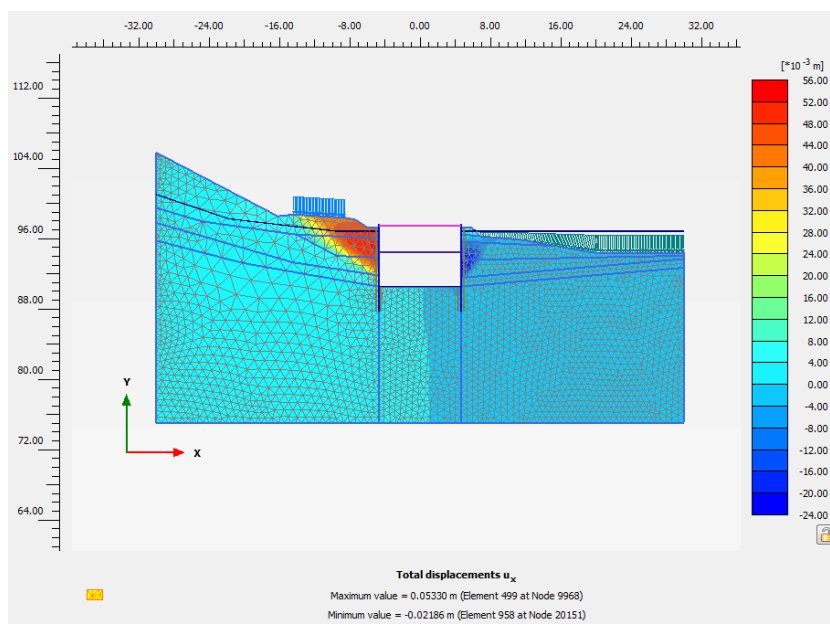


Figura 7-10: Fase 7 – SLE Combinazione Rara: Spostamenti orizzontali

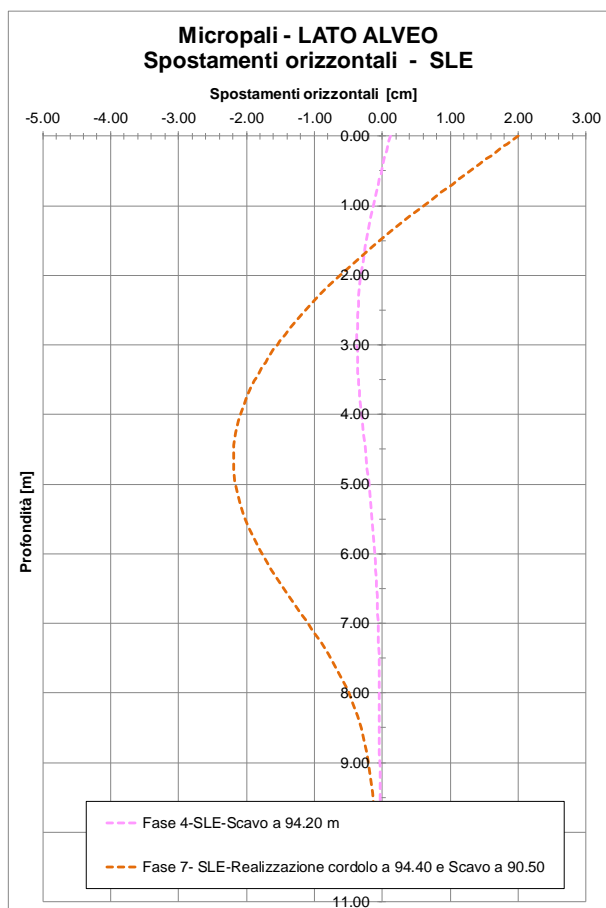
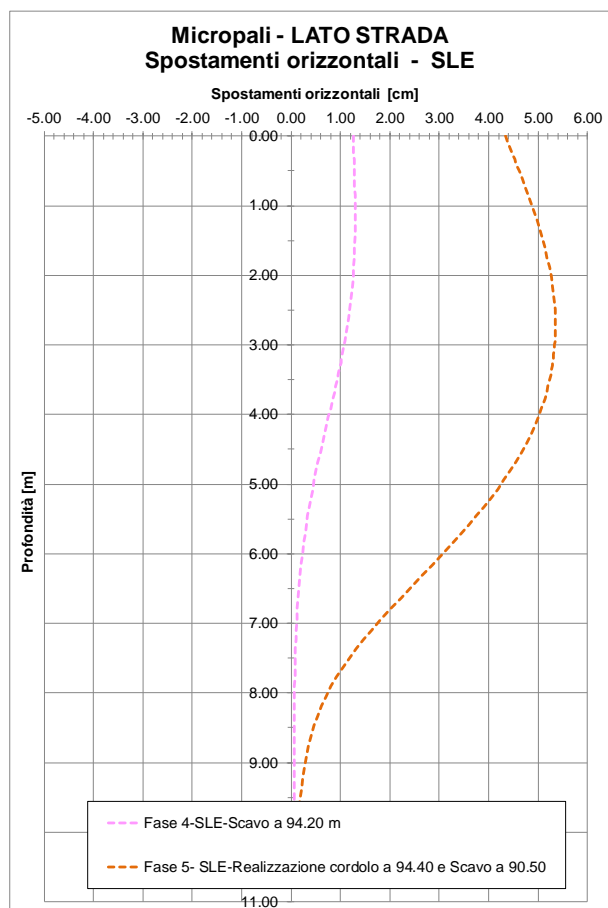


Figura 7-11: Fasi 4 e 7 – SLE Combinazione Rara: Spostamenti orizzontali micropali lato strada e lato alveo

7.1.4.2 SLE - Sollecitazioni nei micropali

Nel seguito è riportata una sintesi dei risultati in termini di sollecitazioni allo stato limite di esercizio.

Si intendono positivi gli sforzi assiali di compressione.

		Micropali Lato Strada	Micropali Lato Alveo
$V_{Ed,max}$	[kN]	40.48	34.23
$N_{Ed,max}$	[kN]	22.20	15.94
$N_{Ed,min}$	[kN]	-4.65	-5.12
$M_{Ed,max}$	[kNm]	38.30	32.13

Tabella 7-5: - SLE- Sintesi sollecitazioni massime.

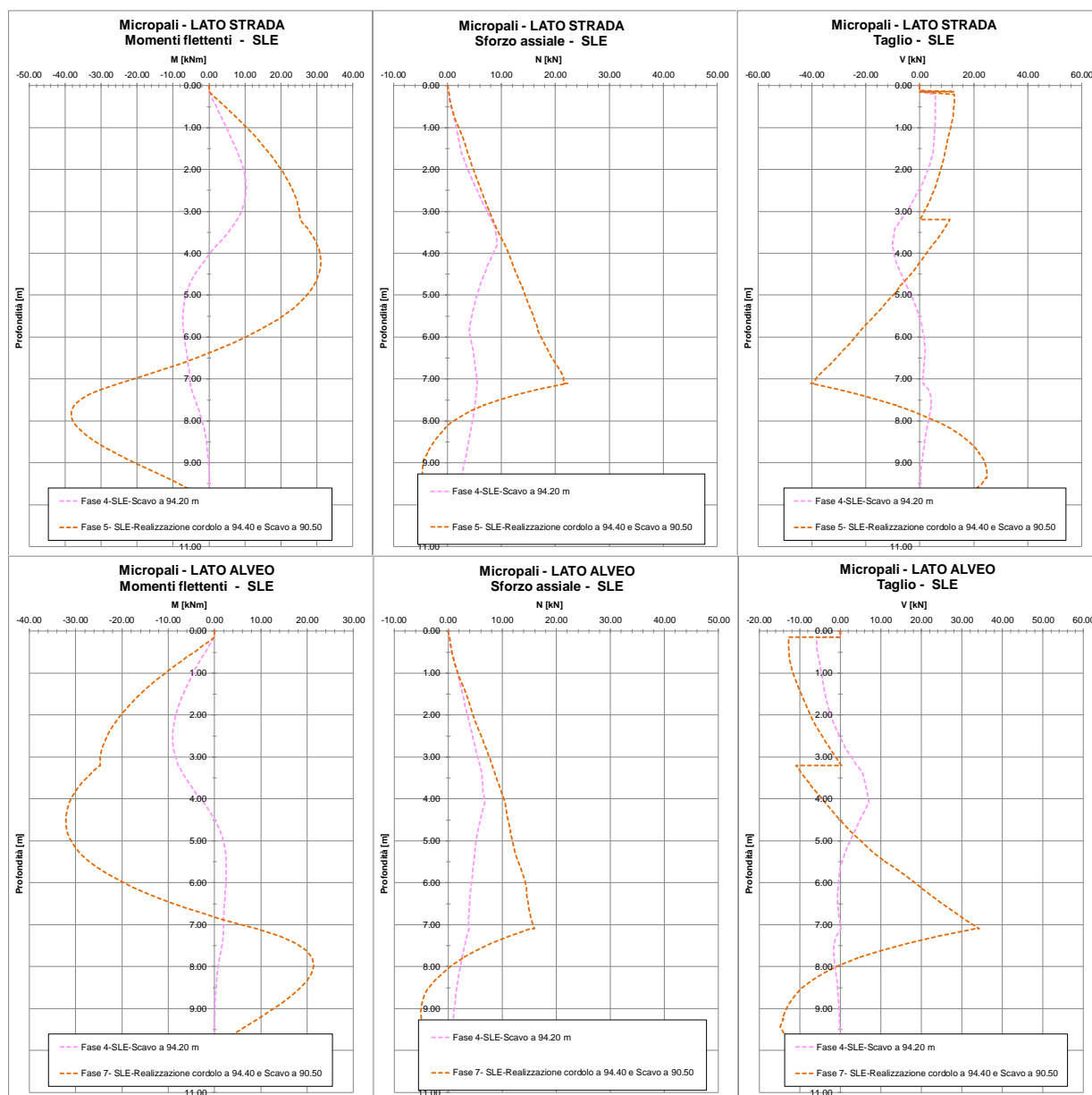


Figura 7-12: Fasi 4 e 7 - SLE - Diagrammi delle sollecitazioni

7.1.4.3 SLE - Sollecitazioni nei cordoli in c.a.

Nella seguente tabella si riassume la massima azione di compressione agente negli elementi "Node to Node Anchor" con interasse pari a 1m adottati per schematizzare i cordoli in c.a.

Fase	Cordolo sommitale 0.50 m x 0.50 m N_{SLE} [kN]	Cordolo intermedio 0.40 m x 0.40 m N_{SLE} [kN]
Fase 4 – SLE	22.40	-
Fase 6 – SLE	51.64	50.23

Tabella 7-6: SLE - "Node to node anchor" Sollecitazioni

Alla luce della schematizzazione adottata il carico assiale N_{ED} ottenuto corrisponde al carico distribuito q .

Adottando la formulazione riportata nella seguente tabella il caso di carico C con carico ripartito laterale è possibile ricavare il valore della sollecitazione flessionale M e di compressione N agente nei cordoli in c.a.

	A	B	C	D	E
	PESO PROPRIO	CARICO RIPARTITO SUPERIORE	CARICO RIPARTITO LATERALE	CARICO TRIANGOLARE LATERALE	REAZIONE RADIALE COSTANTE SETTORE $2\varphi_s = 60^\circ$
SCHEMA					
SEZIONE VERTICALE SUPERIORE	$M = \frac{1}{2} \gamma_1 sr^2$ $N = -\frac{1}{2} \gamma_1 sr$	$M = (\frac{4}{3\pi} - \frac{1}{8}) pr^2 = 0.29941 pr^2$ $N = -\frac{1}{3\pi} pr = -0.10610 pr$	$M = -\frac{1}{4} qr^2$ $N = qr$	$M = -\frac{5}{48} zr^2 = -0.10417 zr^2$ $N = \frac{5}{16} zr = 0.31250 zr$	(Q=reazione totale) $M = -0.0073038 Qr$ $N = 0.014817 Q$
SEZIONE ORIZZONTALE MEDIANA	$M = -\frac{\pi-2}{2} \gamma_1 sr^2 = -0.57080 \gamma_1 sr^2$ $N = \frac{\pi}{2} \gamma_1 sr = 1.57080 \gamma_1 sr$	$M = (\frac{1}{\pi} - \frac{5}{8}) pr^2 = -0.30669 pr^2$ $N = pr$	$M = \frac{1}{4} qr^2$ $N = 0$	$M = \frac{1}{8} zr^2 = 0.125 zr^2$ $N = 0$	$M = 0.0075118 Qr$ $N = 0$
SEZIONE VERTICALE INFERIORE	$M = \frac{3}{2} \gamma_1 sr^2$ $N = \frac{1}{2} \gamma_1 sr$	$M = (\frac{2}{3\pi} + \frac{3}{8}) pr^2 = 0.58721 pr^2$ $N = \frac{1}{3\pi} pr = 0.10610 pr$	$M = -\frac{1}{4} qr^2$ $N = qr$	$M = -\frac{7}{48} zr^2 = -0.14583 zr^2$ $N = \frac{11}{16} zr = 0.68750 zr$	$M = -0.11165 Qr$ $N = 0.11916 Q$

Tabella 7-7: Formulario per calcolo di tubi interrati

Sulla base dei risultati riportati in Tabella 7-6 si ottengono in corrispondenza dei cordoli le sollecitazioni agenti allo SLE riportate nella seguente tabella.

Cordolo	$q_{max,SLE}$ [kN/m]	R [m]	$N_{Ed,SLE}$ [kN]	$M_{Ed,SLE}$ [kNm]
Cordolo sommitale 0.50 m x 0.50 m	51.64	4.70	242.71	285.18
Cordolo intermedio 0.40 m x 0.40 m	50.23	4.38	220.01	240.91

Tabella 7-8: SLE – Sollecitazioni nei cordoli in c.a.

7.1.5 Sintesi dei risultati per gli Stati Limite Ultimi strutturali (STR)

7.1.5.1 SLU/STR Sollecitazioni nei micropali

Nel seguito è riportata una sintesi dei risultati in termini di sollecitazioni allo stato limite ultimo di tipo strutturale (STR).

Si intendono positivi gli sforzi assiali di compressione.

		Micropali Lato Strada	Micropali Lato Alveo
$V_{Ed,max}$	[kN]	52.85	44.48
$N_{Ed,max}$	[kN]	29.62	20.54
$N_{Ed,min}$	[kN]	-5.40	-6.75
$M_{Ed,max}$	[kNm]	49.97	41.87

Tabella 7-9: - SLU/STR A1+M1+R1- Sintesi sollecitazioni massime.

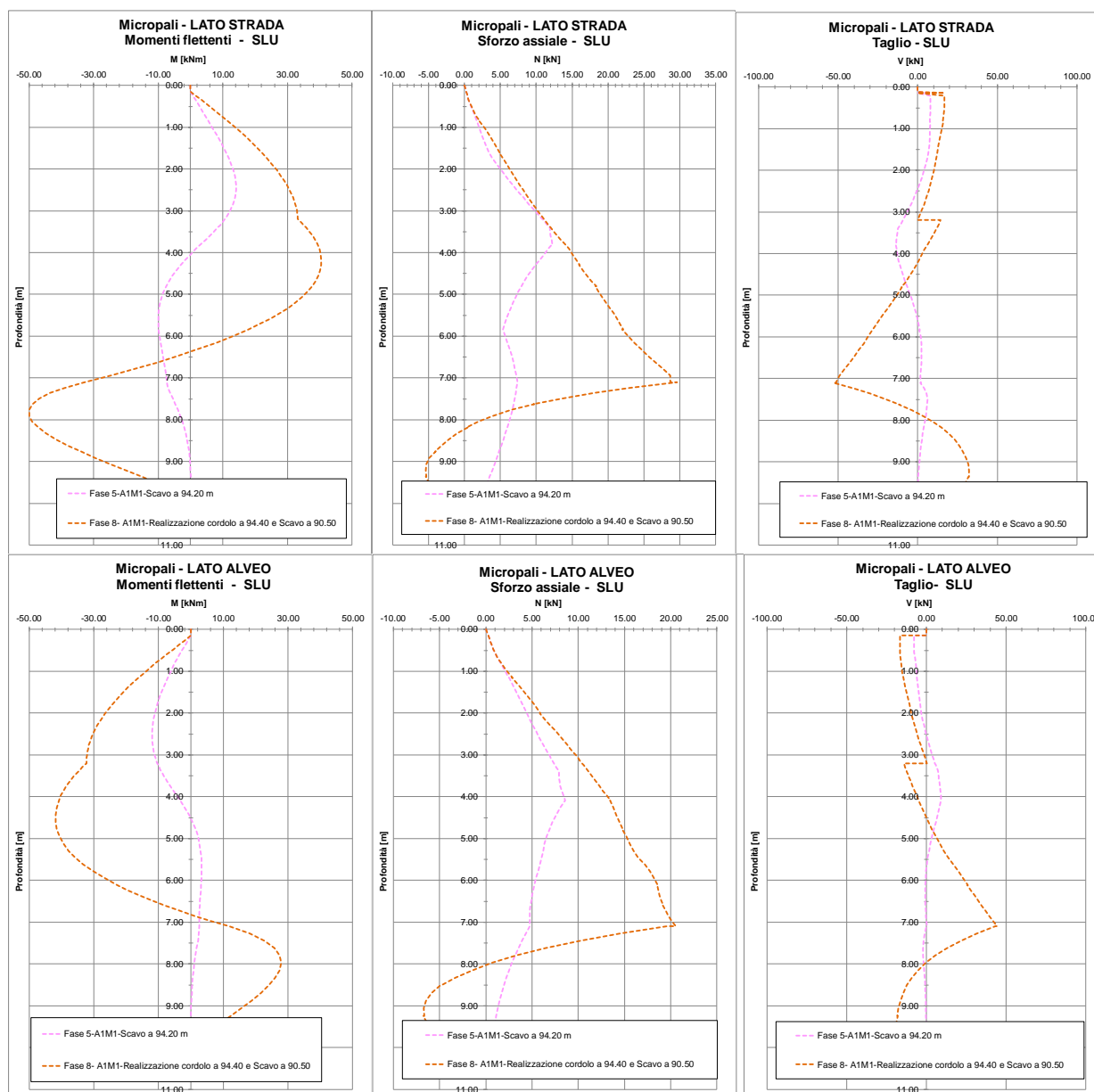


Figura 7-13: Fasi 5 e 8 – SLU/STR A1+M1+R1 - Diagrammi delle sollecitazioni

7.1.5.2 SLU/STR Sollecitazioni nei cordoli in c.a.

Nella seguente tabella si riassume la massima azione di compressione agente negli elementi "Node to Node Anchor" con interasse pari a 1m adottati per schematizzare i cordoli in c.a.

Fase	Cordolo sommitale 0.50 m x0.50 m N_{SLU} [kN]	Cordolo intermedio 0.40 m x0.40 m N_{SLU} [kN]
Fase 5 – SLU/STR	31.60	
Fase 8 – SLU/STR	67.71	65.66

Tabella 7-10: SLU/STR - "Node to node anchor" Sollecitazioni

Alla luce della schematizzazione adottata il carico assiale N_{ED} ottenuto corrisponde al carico distribuito q .

Con riferimento alla formulazione riportata al §7.1.4.2, e sulla base dei risultati riportati nella precedente tabella si ottengono in corrispondenza dei cordoli le sollecitazioni agenti allo SLU riportate nella seguente tabella.

Cordolo	$q_{max,SLU}$ [kN/m]	R [m]	$N_{Ed,SLU}$ [kN]	$M_{Ed,SLU}$ [kNm]
Cordolo sommitale 0.50 m x0.50 m	67.71	4.70	318.24	373.93
Cordolo intermedio 0.40 m x0.40 m	65.66	4.38	287.60	314.91

Tabella 7-11: SLU/STR – Sollecitazioni agenti nei cordoli in c.a.

7.1.5.3 Sintesi dei risultati per gli Stati Limite Ultimi geotecnici (GEO)

Nel seguito è riportata una sintesi dei risultati per gli limite ultimi di tipo geotecnico GEO.

7.1.5.3.1 SLU/GEO A2+M2+R1

Con i parametri del terreno ridotti con i coefficienti parziali M2 si è avuto la convergenza dei modelli Plaxis a conferma del soddisfacimento delle verifiche nei confronti della rotazione dell'opera. Nelle figure seguenti si riporta il campo di spostamenti al termine della fase di calcolo.

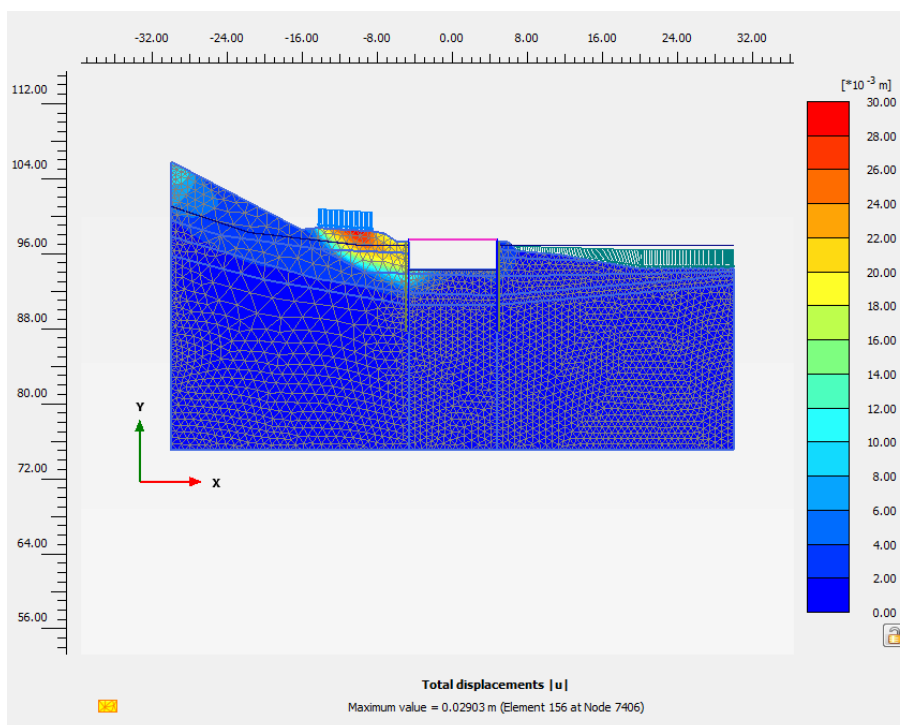


Figura 7-14: Fase 6 – SLU/GEO A2+M2+R1 - Combinazione fondamentale, campo di spostamenti

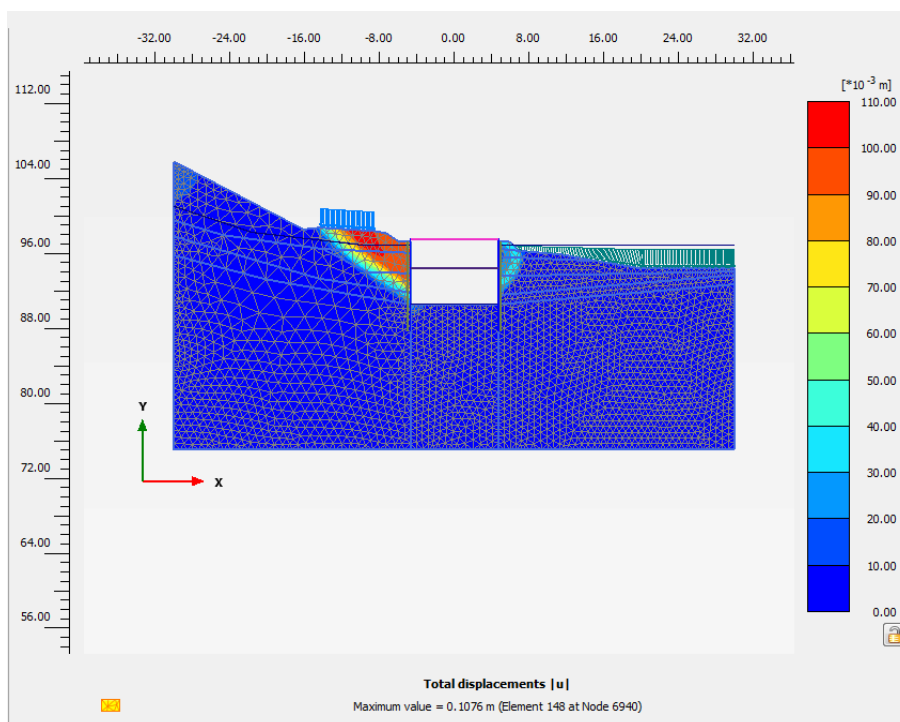


Figura 7-15: Fase 9 – SLU/GEO A2+M2+R1 - Combinazione fondamentale, campo di spostamenti

7.1.5.3.2 Sintesi dei risultati per le analisi di stabilità (GEO_stab)

L'analisi di stabilità dell'insieme terreno-opera è stata effettuata secondo l'approccio 1, combinazione 2: A2+M2+R2.

Nelle figure seguenti si riportano i risultati delle analisi Plaxis (phi-c reduction) in termini di moltiplicatore totale ΣM_{sf} e di mappa a colori degli spostamenti dalla quale si evince il cinematismo critico per il quale si è ottenuto un coefficiente di sicurezza superiore al minimo richiesto da normativa.

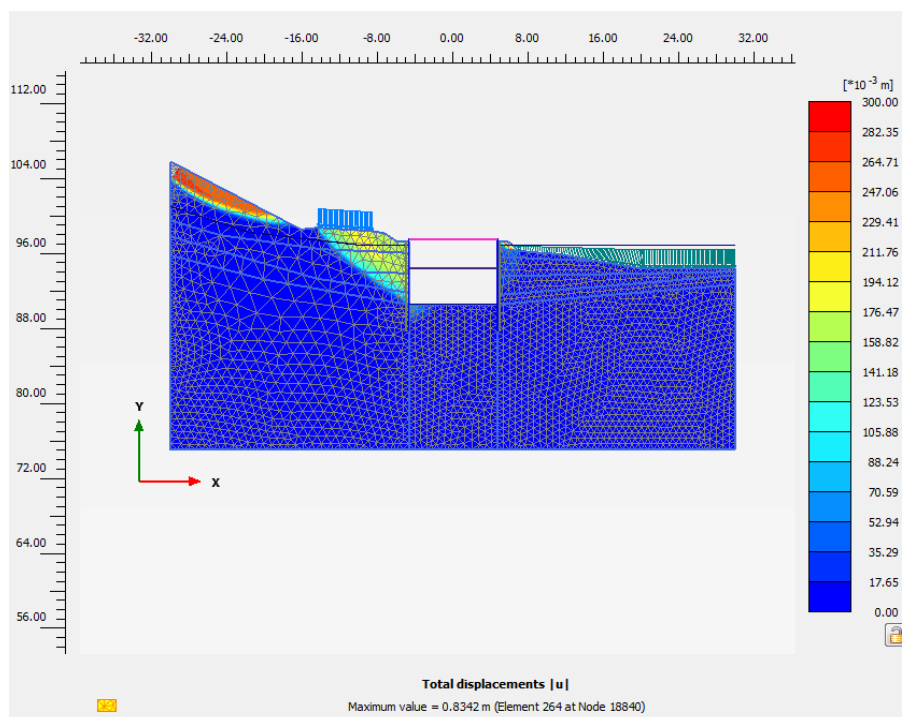


Figura 7-16: Fase 9 – SLU/GEO_stab A2+M2+R2-Combinazione fondamentale. Cinematismo critico

Il cinematismo critico non riguarda l'opera bensì il versante a monte di via del Paleotto.

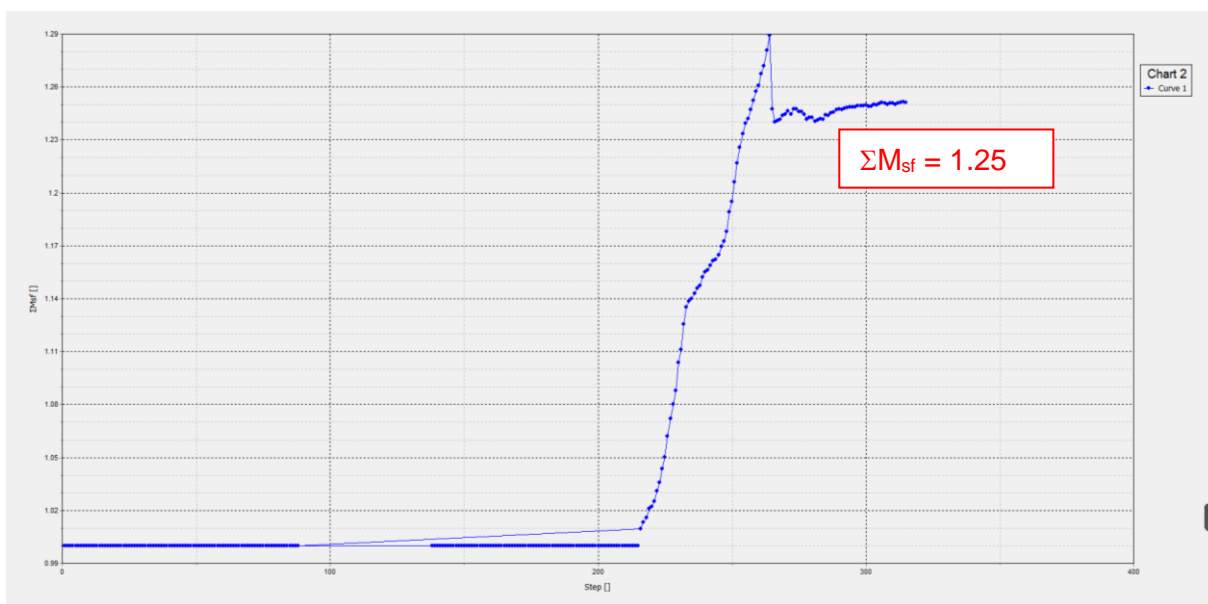


Figura 7-17: Fase 9 – SLU/GEO_stab A2+M2+R2-Combinazione fondamentale. Moltiplicatore totale ΣM_{sf}

7.1.6 Verifiche SLU di tipo strutturale

Nel seguito si riportano le verifiche allo SLU nei confronti del raggiungimento della resistenza strutturale dei vari elementi che costituiscono l'opera.

7.1.6.1 Verifiche strutturali micropali

Con riferimento alle caratteristiche dei materiali riportate al § 3, alle sollecitazioni risultanti sintetizzate al §7.1.5.1 e alle caratteristiche geometriche dei tubolari metallici ($\phi_{est}=168.3$ mm-sp.8 mm), sono state condotte le verifiche allo SLU nei confronti del raggiungimento della resistenza strutturale dei micropali per sollecitazioni di taglio e presso-tenso flessione retta in accordo alle prescrizioni riportate al paragrafo 4.2.4.1 delle NTC 2008 e alla norma EN 1993-1-1.

Nella seguente tabella si riporta il tasso di sfruttamento massimo ottenuto per le fasi di calcolo 5 e 7 per i micropali lato Strada e per i micropali lato Alveo

Tabella 7-12 : Tasso di sfruttamento massimo Micropali

Lato	Fase SLU	$N_{Ed}/N_{pl,Rd}$	$V_{Ed}/V_{ply,Rd}$	$M_{Ed}/M_{VN,pl,y,Rd}$
Strada	Fase 5	0.01 (z=3.78m)	0.16 (z=7.10m)	0.20 (z=2.38m)
	Fase 7	0.02 (z=7.10m)	0.21 (z=7.10m)	0.72 (z=7.77m)
Alveo	Fase 5	0.01 (z=4.09m)	0.14 (z=7.10m)	0.17 (z=2.38m)
	Fase 7	0.02 (z=7.10m)	0.18 (z=7.10m)	0.60 (z=7.10m)

A titolo esemplificativo si riporta il calcolo condotto per la sezione per la quale è stato ottenuto tasso di sfruttamento massimo pari a **0.72**.

DATI DI INPUT

© Dott. Ing. Simone Caffè - 25/02/2013 (macro Excel sviluppata dall'Ing. Marco Panzano)

Tipo di acciaio utilizzato

S 355

Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di resistenza	γ_{M0}	1.05 [-]
Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di stabilità	γ_{M1}	1.05 [-]
Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di rottura	γ_{M2}	1.25 [-]

Caratteristiche del profilo

Sezione trasversale del tubolare

Ø168.3/8

Diametro esterno del profilo tubolare (UTENTE)	d_{ext}	[mm]
Spessore del profilo tubolare (UTENTE)	t	[mm]
Diametro esterno del profilo tubolare utilizzato nelle verifiche	168.3	[mm]
Spessore del profilo tubolare utilizzato nelle verifiche	8	[mm]

Comb.	N_{Ed}	$V_{z,Ed}$	$V_{y,Ed}$	$M_{y,Ed}$	$M_{z,Ed}$	T_{Ed}	Verifica
[n°]	[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[-]
1	6.56	3.61		49.97			✓ 0.72

RESISTENZA E STABILITA' DEI PROFILI TUBOLARI - Metodo B - EN 1993 - 1 - 1:2010

Materiali utilizzati

© Dott. Ing. Simone Caffè - 25/02/2013

Valore di snervamento dell'acciaio del profilo	f_{yk}	355 [N/mm ²]
Valore di rottura dell'acciaio del profilo	f_{uk}	510 [N/mm ²]
Modulo di elasticità dell'acciaio del profilo	E	210000 [N/mm ²]
Modulo di elasticità tangenziale dell'acciaio del profilo	G	80769 [N/mm ²]
Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di resistenza	γ_{M0}	1.05 [-]
Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di stabilità	γ_{M1}	1.05 [-]
Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di rottura	γ_{M2}	1.25 [-]

Caratteristiche meccaniche del profilo

Diametro esterno del profilo tubolare	d_{ext}	168.30 [mm]
Spessore del profilo tubolare	t	8.00 [mm]
Diametro interno	d_{int}	152.30 [mm]
Raggio esterno	r_{ext}	84.15 [mm]
Raggio interno	r_{int}	76.15 [mm]
Area della sezione trasversale	A	4029 [mm ²]
Momento d'inerzia della sezione trasversale attorno all'asse forte	I_y	1.2973E+07 [mm ⁴]
Modulo di resistenza elastico attorno all'asse forte	$W_{el,y}$	1.5416E+05 [mm ³]
Modulo di resistenza plastico attorno all'asse forte	$W_{pl,y}$	2.0574E+05 [mm ³]
Area resistente a taglio nel piano dell'anima	$A_{v,z}$	2565 [mm ²]
Raggio d'inerzia attorno all'asse forte	i_y	56.75 [mm]
Momento d'inerzia della sezione trasversale attorno all'asse debole	I_z	1.2973E+07 [mm ⁴]
Modulo di resistenza elastico attorno all'asse debole	$W_{el,z}$	1.5416E+05 [mm ³]
Modulo di resistenza plastico attorno all'asse debole	$W_{pl,z}$	2.0574E+05 [mm ³]
Area resistente a taglio nel piano delle ali	$A_{v,y}$	2565 [mm ²]
Raggio d'inerzia attorno all'asse debole	i_z	56.75 [mm]
Momento d'inerzia torsionale	I_t	2.595E+07 [mm ⁴]

Caratteristiche di sollecitazione nella sezione di verifica		
Forza normale (positiva se di compressione)	N_{Ed}	6.56 [kN]
Forza di taglio agente in direzione parallela all'anima	V_{zEd}	3.61 [kN]
Forza di taglio agente in direzione parallela alle ali	V_{yEd}	[kN]
Momento flettente attorno all'asse maggiore di inerzia	M_{yEd}	49.97 [kNm]
Momento flettente attorno all'asse minore di inerzia	M_{zEd}	[kNm]
Momento torcente primario (alla Saint Venant)	T_{Ed}	[kNm]
Classificazione della sezione trasversale di verifica		
Coefficiente ϵ	ϵ	0.814 [-]
Rapporto tra diametro esterno e spessore	ρ	21.038 [-]
Rapporto limite per la classe 1	ρ_1	33.099 [-]
Rapporto limite per la classe 2	ρ_2	46.338 [-]
Rapporto limite per la classe 3	ρ_3	59.577 [-]
Classificazione della sezione trasversale	CL	1
Verifiche di resistenza della sezione trasversale		
Resistenza a trazione pura		
Resistenza plastica a trazione	N_{tRd}	1362.11 [kN]
Verifica a trazione pura	ρ_{Nt}	0.000 [-]
Resistenza a compressione pura		
Resistenza a compressione pura	N_{cRd}	1362.11 [kN]
Verifica a compressione pura	ρ_{Nc}	0.005 [-]
Resistenza a torsione e taglio		
Diametro medio della sezione trasversale	d_{med}	160.30 [mm]
Area della sezione compresa nel diametro medio	Ω	20181.66 [mm ²]
Tensioni tangenziali dovute al momento torcente	τ_{tEd}	0.00 [N/mm ²]
Verifica tensionale per pura torsione	ρ_T	0.000 [-]
Resistenza plastica a taglio	$V_{pl,Rd}$	500.65 [kN]
Resistenza plastica a taglio ridotta per effetto della torsione	$V_{pl,T,Rd}$	500.65 [kN]
Verifica a taglio in direzione z - z	ρ_{Vz}	0.007 [-]
Verifica a taglio in direzione y - y	ρ_{Vy}	0.000 [-]
Resistenza a flessione		
Modulo di resistenza di calcolo per flessione attorno all'asse y - y	W_y	2.06E+05 [mm ³]
Resistenza a flessione attorno all'asse y - y	$M_{cy,Rd}$	69.56 [kNm]
Verifica flessionale attorno all'asse y - y	ρ_{My}	0.718 [-]
Modulo di resistenza di calcolo per flessione attorno all'asse z - z	W_z	2.06E+05 [mm ³]
Resistenza a flessione attorno all'asse z - z	$M_{cz,Rd}$	69.56 [kNm]
Verifica flessionale attorno all'asse z - z	ρ_{Mz}	0.000 [-]
Resistenza a flessione e taglio (per sezioni in classe 1 o 2)		
Fattore di riduzione per la presenza della forza di taglio in direzione z - z	$\rho_{Vz,red}$	1.00 [-]
Fattore di riduzione per la presenza della forza di taglio in direzione y - y	$\rho_{Vy,red}$	1.00 [-]
Resistenza a flessione ridotta, per flessione attorno all'asse y - y	$M_{Vy,Rd}$	69.56 [kNm]
Verifica flessionale attorno all'asse y - y	$\rho_{My - Vz}$	0.718 [-]
Resistenza a flessione ridotta, per flessione attorno all'asse z - z	$M_{Vz,Rd}$	69.56 [kNm]
Verifica flessionale attorno all'asse z - z	$\rho_{Mz - Vy}$	0.000 [-]
Resistenza a flessione, forza assiale e taglio		
<u>Calcolo plastico per sezioni in classe 1 o 2</u>		
Coefficiente n	n	0.005 [-]
Resistenza a flessione ridotta, per flessione attorno all'asse y - y	$M_{Ny,Rd}$	69.55 [kNm]
Resistenza a flessione ridotta, per flessione attorno all'asse z - z	$M_{Nz,Rd}$	69.55 [kNm]
Verifica di presso/tenso flessione biassiale (metodo EN1993 - 1 - 1:2010)	$\rho_{N - My - Mz - pl}$	0.516 [-]
Verifica di presso/tenso flessione biassiale (metodo cautelativo)	$\rho_{N - My - Mz - pl}$	0.723 [-]

7.1.6.2 Verifiche strutturali cordoli in c.a.

Con riferimento, alle caratteristiche dei materiali di cui al §3, alla geometria dei cordoli e al valore delle sollecitazioni risultanti riportate al §7.1.4.3 e al §7.1.5.2 sono state condotte le verifiche a pressoflessione con l'ausilio del software Vca SLU.

7.1.6.2.1 Cordolo sommitale

Sono state ipotizzate 15 barre ϕ 26 perimetrali e staffe chiuse ϕ 10/250 mm.

Di seguito sono riportati i risultati delle verifiche a pressoflessione allo SLU e il calcolo delle tensioni nel calcestruzzo allo SLE (rara).

Risulta:

- Verifiche SLU a pressoflessione:
 $M_{ed} = 373.93 \text{ kNm} < M_{rd} = 618.5 \text{ kNm}$
- Verifiche tensioni SLE rara:
 $\sigma_c = 11.21 < 0.6 \cdot f_{ck} = 0.6 \cdot 25 = 15 \text{ MPa}$
 $\sigma_s = 202.2 < 0.8 \cdot f_{yk} = 0.8 \cdot 450 = 360 \text{ MPa}$

Verifica C.A. S.L.U. - File: sommitaleSLU

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

TITOLO : SLU

N° Vertici 4 Zoom N° barre 15 Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
1	-25	-25
2	25	-25
3	25	25
4	-25	25

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
4	5.31	-19.6	-19.6
5	5.31	19.6	9.8
6	5.31	-19.6	9.8
7	5.31	19.6	0
8	5.31	0	-19.6
9	5.31	19.6	-9.8

Sollecitazioni S.L.U. Metodo n

N Ed 318.24 kN
M Ed 373.93 kNm
M yEd 0

P.to applicazione N
Centro Baricentro cls
Coord. [cm] xN 0 yN 0

Tipo rottura
Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

Metodo di calcolo
S.L.U. Metodo n

Tipo flessione
Retta Deviata

N° rett. 100

Calcola MRd Dominio M-N

L0 0 cm Col. modello

Precompresso

Materiali

B450C C25/30

ϵ_{su} 67.5 ‰ ϵ_{c2} 2 ‰
 f_{yd} 391.3 N/mm² ϵ_{cu} 3.5 ‰
 E_s 200 000 N/mm² f_{cd} 14.17 N/mm²
 E_s/E_c 15 f_{cc}/f_{cd} 0.8 [2]
 ϵ_{syd} 1.957 ‰ $\sigma_{c,adm}$ 9.75 N/mm²
 $\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm² τ_{co} 0.6 N/mm²
 τ_{cl} 1.829 N/mm²

M xRd 618.5 kNm

σ_c -14.17 N/mm²
 σ_s 391.3 N/mm²
 ϵ_c 3.5 ‰
 ϵ_s 6.337 ‰
d 44.6 cm
x 15.87 x/d 0.3558
 δ 0.8847

Figura 7-18: Cordolo Sommitale Verifiche SLU a pressoflessione

Verifica C.A. S.L.U. - File: sommitaleSLE

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008

Titolo: SLE

N° Vertici: 4 Zoom N° barre: 15 Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
1	-25	-25
2	25	-25
3	25	25
4	-25	25

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
4	5.31	-19.6	-19.6
5	5.31	19.6	9.8
6	5.31	-19.6	9.8
7	5.31	19.6	0
8	5.31	0	-19.6
9	5.31	19.6	-9.8

Solllecitazioni: S.L.U. Metodo n

N_{Ed}: 242.71 kN
M_{Ed}: 285.18 kNm
M_{yEd}: 0

P.to applicazione N: Centro Baricentro cls
Coord.[cm]: xN 0 yN 0

Metodo di calcolo: S.L.U. + S.L.U. - Metodo n

Materiali: B450C C25/30

ε_{su}: 67.5 ‰ ε_{c2}: 2 ‰
f_{yd}: 391.3 N/mm² ε_{cu}: 3.5 ‰
E_s: 200 000 N/mm² f_{cd}: 14.17 N/mm²
E_s/E_c: 15 f_{cc}/f_{cd}: 0.8
ε_{syd}: 1.957 ‰ σ_{c,adm}: 9.75 N/mm²
σ_{s,adm}: 255 N/mm² τ_{co}: 0.6
τ_{c1}: 1.829

σ_c: -11.21 N/mm²
σ_s: 202.2 N/mm²
ε_s: 1.011 ‰
d: 45.25 cm
x: 20.54 x/d: 0.454
δ: 1

Verifica N° iterazioni: 3

Precompresso

Figura 7-19: Cordolo Sommitale Calcolo delle tensioni SLE in combinazione rara.

7.1.6.2.2 Cordolo intermedio

Sono state ipotizzate 16 barre ϕ 28 perimetrali e staffe chiuse ϕ 10/250 mm.

Di seguito sono riportati i risultati delle verifiche a pressoflessione allo SLU e il calcolo delle tensioni nel calcestruzzo allo SLE (rara).

Risulta:

- Verifiche SLU a pressoflessione:
 $M_{ed} = 314.91 \text{ kNm} < M_{rd} = 287.60 \text{ kNm}$
- Verifiche tensioni SLE rara:
 $\sigma_c = 13.85 < 0.6 \cdot f_{ck} = 0.6 \cdot 25 = 15 \text{ MPa}$
 $\sigma_s = 200.1 < 0.8 \cdot f_{yk} = 0.8 \cdot 450 = 360 \text{ MPa}$

Verifica C.A. S.L.U. - File: intermedioSLU

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008

Titolo: SLU

N° Vertici 4 Zoom N° barre 16 Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
1	-20	-20
2	20	-20
3	20	20
4	-20	20

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
12	6.16	7.3	14.7
13	6.16	-7.3	-14.7
14	6.16	7.3	-14.7
15	6.16	0	14.7
16	6.16	-14.7	0

Sollecitazioni S.L.U. Metodo n

N_{Ed} 287.60 kN
M_{Ed} 314.91 kNm
M_{yEd} 0

P.to applicazione N
Centro Baricentro cls
Coord.[cm] xN 0 yN 0

Tipo rottura Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

M_{xRd} 503.4 kNm

Materiali B450C C25/30

ϵ_{su} 67.5 ‰ ϵ_{c2} 2 ‰
 f_{yd} 391.3 N/mm² ϵ_{cu} 3.5 ‰
 E_s 200 000 N/mm² f_{cd} 14.17 N/mm²
 E_s/E_c 15 f_{cc}/f_{cd} 0.8
 ϵ_{syd} 1.957 ‰ $\sigma_{c,adm}$ 9.75 N/mm²
 $\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm² τ_{co} 0.6
 τ_{c1} 1.829

σ_c -14.17 N/mm²
 σ_s 391.3 N/mm²
 ϵ_s 3.5 ‰
 ϵ_s 3.87 ‰
d 34.7 cm
x 16.48 x/d 0.4749
 δ 1

Tipo Sezione
☐ Rettan.re ☐ Trapezi
☐ a T ☐ Circolare
☐ Rettangoli ☒ Coord.

Metodo di calcolo
☒ S.L.U.+ ☐ S.L.U.-
☐ Metodo n

Tipo flessione
☒ Retta ☐ Deviata

N° rett. 100
Calcola MRd Dominio M-N
L₀ 0 cm Col. modello

☐ Precompresso

Figura 7-20: Cordolo Intermedio Verifiche SLU a pressoflessione

Verifica C.A. S.L.U. - File: intermedioSLE

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008

Titolo: SLE

N° Vertici 4 Zoom N° barre 16 Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
1	-20	-20
2	20	-20
3	20	20
4	-20	20

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
12	6.16	7.3	14.7
13	6.16	-7.3	-14.7
14	6.16	7.3	-14.7
15	6.16	0	14.7
16	6.16	-14.7	0

Sollecitazioni S.L.U. Metodo n

N_{Ed} 220.01 kN
M_{Ed} 240.91 kNm
M_{yEd} 0

P.to applicazione N
Centro Baricentro cls
Coord.[cm] xN 0 yN 0

Tipo Sezione
☐ Rettan.re ☐ Trapezi
☐ a T ☐ Circolare
☐ Rettangoli ☒ Coord.

Metodo di calcolo
☐ S.L.U.+ ☒ S.L.U.-
☒ Metodo n

Verifica

N° iterazioni: 3

☐ Precompresso

Materiali B450C C25/30

ϵ_{su} 67.5 ‰ ϵ_{c2} 2 ‰
 f_{yd} 391.3 N/mm² ϵ_{cu} 3.5 ‰
 E_s 200 000 N/mm² f_{cd} 14.17 N/mm²
 E_s/E_c 15 f_{cc}/f_{cd} 0.8
 ϵ_{syd} 1.957 ‰ $\sigma_{c,adm}$ 9.75 N/mm²
 $\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm² τ_{co} 0.6
 τ_{c1} 1.829

σ_c -13.85 N/mm²
 σ_s 200.1 N/mm²
 ϵ_s 1 ‰
d 34.7 cm
x 17.67 x/d 0.5093
 δ 1


Figura 7-21: Cordolo Intermedio Calcolo delle tensioni SLE in combinazione rara.

Tenuto conto che:

- la modellazione condotta è una modellazione piana 2D che non consente di tenere conto delle reali condizioni geometriche circolari dello scavo e che pertanto risulta essere cautelativa;

- il cordolo intermedio è posto a circa 3 m al disotto del piano di lavoro e quindi ad una profondità tale da risentire in maniera inferiore della asimmetria della sezione che è causa delle sollecitazione di natura flessionale che possono insorgere per ovalizzazione dello stesso

rimandando a modellazioni di dettaglio da svilupparsi nella successiva fase di progettazione si ritiene adeguato adottare per il cordolo intermedio la medesima incidenza di armatura che si ottiene per il cordolo sommitale.

 <small>gruppo Atlantia</small>	<p style="text-align: right;">VARIANTE ALLA SP65 "DELLA FUTA</p> <p style="text-align: center;">NODO DI RASTIGNANO – 2° LOTTO DI COMPLETAMENTO</p> <p>Tratto compreso tra svincolo di Rastignano e Ponte Delle Oche nei comuni di San Lazzaro di Savena, Bologna e Pianoro</p> <p style="text-align: right;">Progetto Definitivo</p> <p style="text-align: center;">RELAZIONE DI CALCOLO OPERE PROVVISORIALI DEL VIADOTTO RASTIGNANO</p>
---	--

7.1.7 Verifiche SLU di tipo geotecnico

Con i parametri del terreno ridotti con i coefficienti parziali M2 si è avuto la convergenza dei modelli Plaxis a conferma del soddisfacimento delle verifiche nei confronti della rotazione dell'opera (vedasi il paragrafo 7.1.5.3.1).

7.2 Pila 2

7.2.1 Modello Plaxis

Per il calcolo della berlinese definitiva e delle opere provvisionali in corrispondenza della pila 2 è stato sviluppato il modello di calcolo riportato nella seguente figura, rappresentativo della sezione trasversale al viadotto in asse alla pila.

La berlinese definitiva viene realizzata dalla quota +97.70 m. Si prevede uno scavo provvisorio fino alla quota +91.35m, piano di lavoro per l'esecuzione della coronella di micropali provvisionali. L'altezza di scavo provvisoria è pertanto 6.35 m.

Dal piano di lavoro 91.35m si prevede di approfondire lo scavo all'interno della berlinese provvisoria fino alla quota +88.30 m (intradosso magro di fondazione della pila 2).

La berlinese provvisoria pertanto deve sostenere una altezza di scavo pari a 3.05 m.

A seguito della realizzazione delle fondazioni e del fusto della pila si prevede di risagomare l'alveo fino alla quota +94.00 m in corrispondenza della berlinese definitiva per la quale risulta una altezza di scavo definitiva pari a 3.70m.

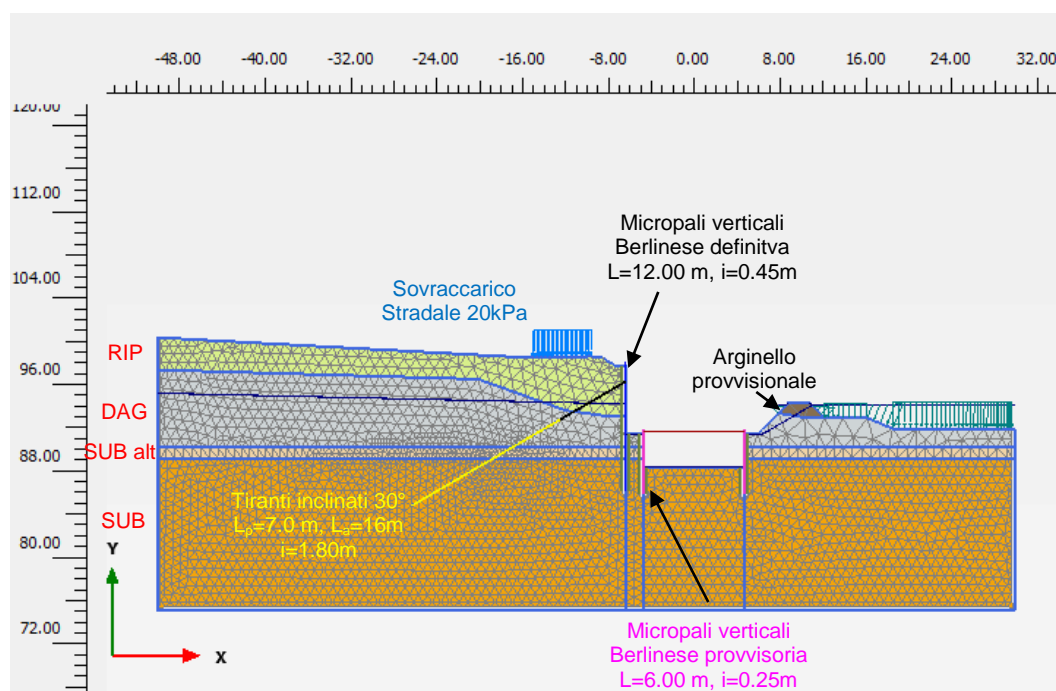


Figura 7-22: Modello di calcolo Plaxis - Opere provvisionali Pila 2

Si è adottata la stratigrafia riportata nella seguente tabella con riferimento alle quote in asse pila.

Quote assolute [m s.l.m.]		Unità
da	A	
p.c.	92.95	RIP
92.95	90.20	DAG
90.20	89.20	SUB alt
<89.20		SUB

Tabella 7-13: - Stratigrafia di riferimento Pila 2

La falda è stata assunta con livello iniziale a quota +94.03 m in asse pila, mentre durante le fasi di scavo essendo si è adottato il livello di falda lato scavo coincidente con il fondo scavo stesso.

A tergo della paratia definitiva (lato via del Paleotto) si è applicato il sovraccarico stradale pari a 20 kPa per una striscia di larghezza 5.50 m agente sul piano campagna ad una distanza dalla paratia pari a 3.18m.

7.2.2 Dati di input dei materiali

Per i principali parametri geotecnici adottati nelle elaborazioni Plaxis per i diversi materiali si rimanda al §5.

I dati di input per gli elementi verticali delle berlinesi rappresentati nel modello con elemento "Plate", sono indicati nella tabella seguente.

Parameter	Name	Unit	
Micropali Paratia definitiva			
ϕ_{perf} 240 mm – Armatura ϕ 177.8 mm sp. 8 mm - i=0.45m			
Type of behaviour			Elastic; Isotropic
Normal stiffness	EA	kN/m	4 267 707
Flexural rigidity	EI	kNm ² /m	15 389
Unit weight	w	kN/m/m	2.93
Poisson's ratio	v	-	0.0
Micropali verticali provvisionali			
ϕ_{perf} 240 mm – Armatura ϕ 168.3 mm sp. 8 mm - i=0.25m			
Type of behaviour			Elastic; Isotropic
Normal stiffness	EA	kN/m	7 505 189
Flexural rigidity	EI	kNm ² /m	25 892
Unit weight	w	kN/m/m	5.22
Poisson's ratio	v	-	0.0

Tabella 7-14: - Dati di input elementi strutturali schematizzati come "plate".

In particolare i valori finalizzati al calcolo della rigidezza assiale e flessionale sono stati calcolati considerando il solo contributo del tubolare.

Il cordolo sommitale in c.a. della berlinese provvisoria è stato modellato mediante un elemento "Node to Node Anchor" resistenti a solo sforzo assiale le cui caratteristiche sono riassunte nella seguente tabella analogamente a quanto fatto per la pila 1 (§7.1.2).

Parameter	Name	Unit	
Cordolo sommitale 0.50m x 0.50m			
Material type			Elastic; Isotropic
Normal stiffness	EA	kN/m	18 076
L _{spacing}	-	m	1.00
F _{max, comp}	-	kN	753

Tabella 7-15: - Dati di input elementi strutturali schematizzati come "node to node anchor".

I dati di input dei tiranti di ancoraggio, rappresentati nel modello con elemento "Anchor" (parte passiva) e "Geogrid" (parte attiva), sono indicati nella seguente tabella.

Parameter	Name	Unit	
Tiranti 30° - Anchor			
Type of behaviour			Elastoplastic
Normal stiffness	EA	KN	117 600
Spacing	$L_{spacing}$	m	1.80
Maximum tension	$F_{max,tens}$	kN	651.59
Tiranti 30° - Geogrid			
Type of behaviour			Elastoplastic
Normal stiffness	EA_1	KN/m	65 333
Maximum force	N_p	kN/m	361.99

Tabella 7-16: Dati di input tiranti di ancoraggio.

7.2.3 Descrizione fasi di calcolo

Le analisi eseguite sono di tipo sequenziale e riproducono in successione tutte le principali fasi operative previste per la realizzazione dell'opera e condizioni di verifica. La messa in opera degli elementi strutturali (paratie e tirante) viene simulata attivando i relativi elementi strutturali, mentre la fase di scavo viene simulata mediante la disattivazione attivazione dei cluster di terreno corrispondenti.

Le fasi di calcolo considerate sono riportate nel seguito:

- Fase 0. Fase geostatica iniziale (Figura 7-23);
- Fase 1. Realizzazione piano di lavoro a quota +97.70 m (Figura 7-24);
- Fase 2. Realizzazione micropali berlinese definitiva (Figura 7-25);
- Fase 3. Applicazione del sovraccarico stradale 20 kPa (Figura 7-26);
- Fase 4. Scavo a quota +95.70 m (Figura 7-27);
- Fase 5. Realizzazione tiranti a quota +96.20 m (n° trefoli 3, $L_p=7m$, $L_a=16m$, $i=1.80m$) e pretensione $N_{pret}=300$ kN (Figura 7-28)
- Fase 6. SLE - Scavo a quota +91.35 m (Figura 7-29)
- Fase 7. SLU/STR A1+M1+R1 - Scavo a quota +91.35 m;
- Fase 8. SLU/GEO A2+M2+R1 - Scavo a quota +91.35 m;
- Fase 9. Realizzazione micropali berlinese provvisoriale e cordolo sommitale (Figura 7-30) a partire dalla Fase 6;
- Fase 10. SLE – Scavo a quota +88.30 m (Figura 7-31)
- Fase 11. SLU/STR A1+M1+R1 – Scavo a quota +88.30 m;
- Fase 12. SLU/GEO A2+M2+R1 – Scavo a quota +88.30 m;
- Fase 13. SLE - Riprofilatura alveo fino a quota +94.00m – Configurazione finale (Figura 7-32) a partire dalla Fase 10;
- Fase 14. SLU/STR A1+M1+R1 – Configurazione finale;
- Fase 15. SLU/GEO_stab A2+M2+R2 – Configurazione finale;
- Fase 16. SLV/STR M1 ($k_h=0.108$, $k_v=0$) a partire dalla Fase 13;
- Fase 17. SLV/GEO M2 ($k_h=0.108$, $k_v=0$) a partire dalla Fase 13;
- Fase 18. STB/GEO – Scavo a + 88.30m a partire dalla Fase 12;
- Fase 19. STB/GEO Statica – Configurazione finale a partire dalla Fase 15;
- Fase 20. SLV+/GEO per STB ($k_h=0.071$; $k_v=0.0305$) a partire dalla Fase 13;
- Fase 21. STB/GEO SLV+;

Fase 22. SLV-/GEO per STB ($k_h=0.071g$; $k_v=-0.0305g$) a partire dalla Fase 13;

Fase 23. STB/GEO SLV-

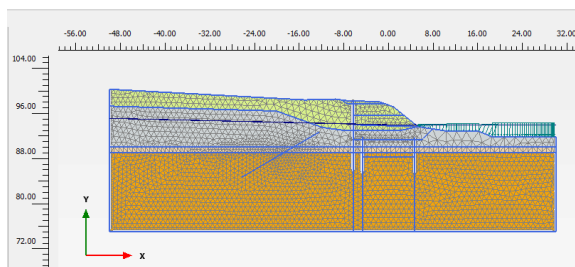


Figura 7-23: Fase 0 - Fase geostatica iniziale

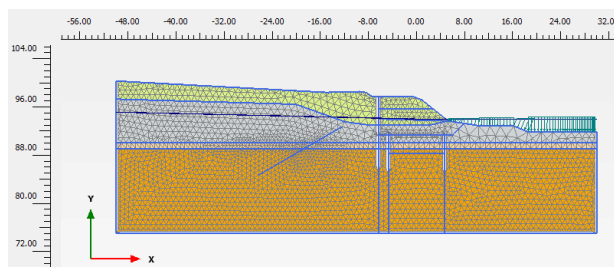


Figura 7-24: Fase 1 – Realizzazione piano di lavoro +97.70 m

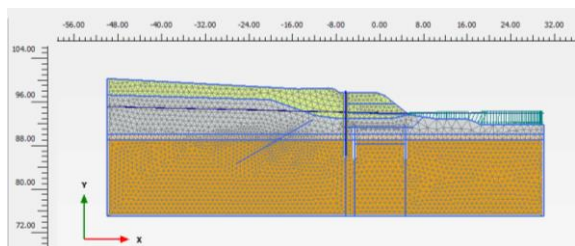


Figura 7-25: Fase 2 – Realizzazione micropali definitivi

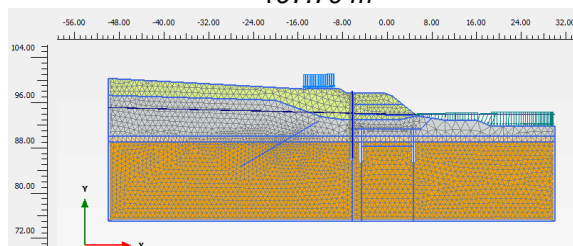


Figura 7-26: Fase 3 – Applicazione sovraccarico

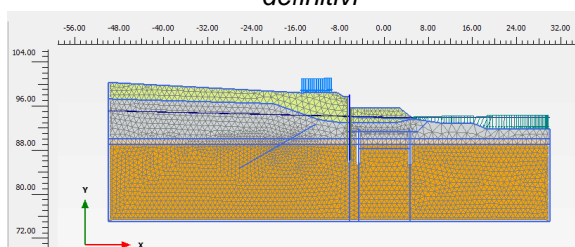


Figura 7-27: Fase 4 – Scavo a quota +95.70 m

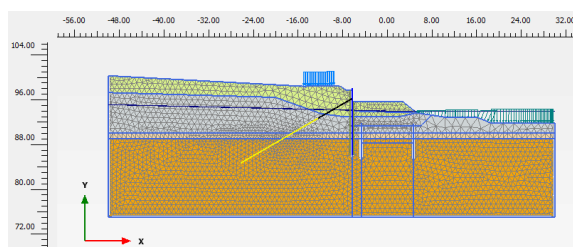


Figura 7-28: Fase 5 – Realizzazione tiranti a quota +96.20 m

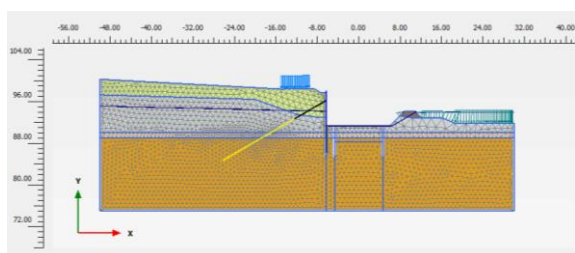


Figura 7-29: Fasi 6, 7, 8 – Scavo a quota +91.35 m

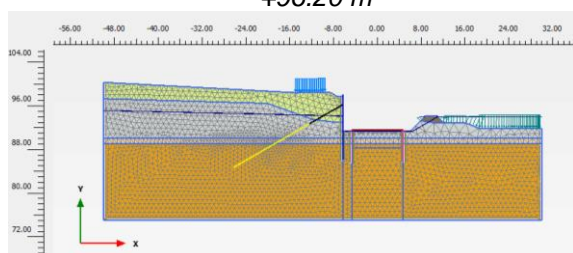


Figura 7-30: Fase 9 – Realizzazione berlinese provvisoria

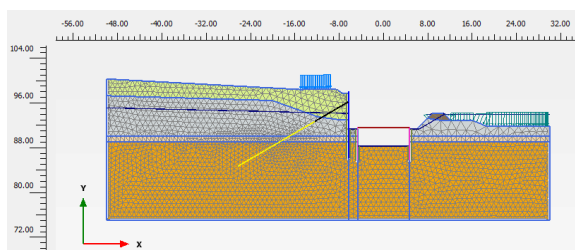


Figura 7-31: Fasi 10, 11, 12 – Scavo a quota +88.30 m

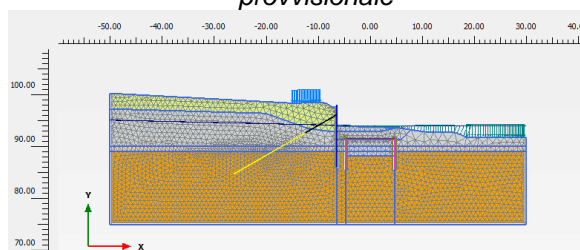


Figura 7-32: Fasi 13, 14, 15 – Configurazione finale

La determinazione dei coefficienti sismici per il calcolo dell'opera definitiva è stata condotta in accordo al paragrafo 7.11.6.3.1 del DM 14/01/2008.

Assumendo:

- coefficiente di deformabilità dei terreni interagenti $\alpha \cong 1.0$;
- coefficiente di deformabilità dell'opera in funzione della altezza complessiva della paratia (H) $\beta = 0.429$ corrispondente ad uno spostamento massimo $u_s \cong 6.00$ cm ($= 0.005 \cdot H$ con H altezza complessiva della paratia)
- l'accelerazione massima $a_{max}=0.252g$

risultano i seguenti coefficienti sismici:

- $k_h = \alpha \cdot \beta \cdot \frac{a_{max}}{g} = 0.108$
- $k_v = 0.000$

La determinazione dei coefficienti sismici per le verifiche di stabilità dell'opera è stata condotta in accordo al paragrafo 7.11.3.5.2 del DM 14/01/2008.

Assumendo:

- $\beta_s = 0.28$;

risulta:

- $k_h = \beta_s \cdot \frac{a_{max}}{g} = 0.071$
- $k_v = \pm 0.5 \cdot k_h = \pm 0.035$

Il valore di a_{max} è stato determinato a partire dai seguenti dati:

- vita nominale: $V_N = 50$ anni
- classe d'uso: IV
da cui risulta:
 - coefficiente d'uso: $C_U = 2.0$
 - periodo di riferimento per l'azione sismica: $V_R = V_N \times C_U = 100$ anni
- coordinate geografiche di riferimento (secondo sistema ED50) per l'opera in esame sono:
 - Longitudine: $11^\circ.357749$
 - Latitudine: $44^\circ.446124$
- Categoria di sottosuolo B

SLATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_o [-]	T_C^* [s]
SLO	60	0.075	2.471	0.274
SLD	101	0.093	2.466	0.283
SLV	949	0.211	2.434	0.313
SLC	1950	0.258	2.477	0.324

Parametri indipendenti

STATO LIMITE	SLV
a_d	0.211 g
F_o	2.434
T_C	0.313 s
S_S	1.194
C_C	1.387
S_T	1.000
q	0.800

Parametri dipendenti

S	1.194
η	1.250
T_B	0.145 s
T_C	0.435 s
T_D	2.444 s

7.2.4 Sintesi dei risultati per gli Stati Limite di Esercizio

Nel seguito è riportata una sintesi dei risultati in termini di:

- spostamenti;
- sollecitazioni sugli elementi strutturali.

7.2.4.1 SLE - Spostamenti

Nel seguito è riportata una sintesi dei risultati in termini di spostamenti.

Gli spostamenti massimi si ottengono in Fase 10 durante l'approfondimento dello scavo all'interno dell'opera provvisoria per raggiungere la quota +88.30.

Essi sono dell'ordine di circa 3.3 cm per la berlinese definitiva e di circa 2 cm per la berlinese provvisoria.

Tali spostamenti risultano compatibili con la funzionalità dell'opera.

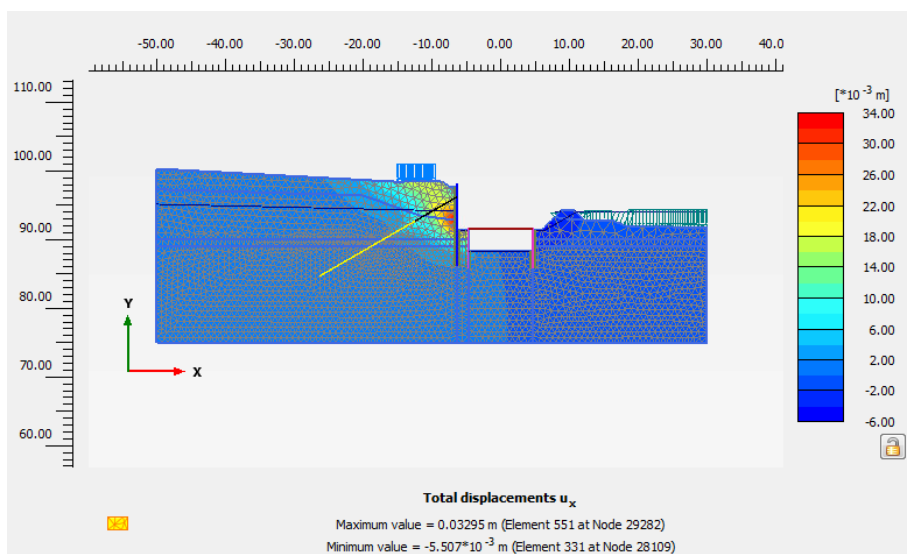


Figura 7-33: Fase 10 SLE – Scavo a quota +88.30 m: Spostamenti orizzontali

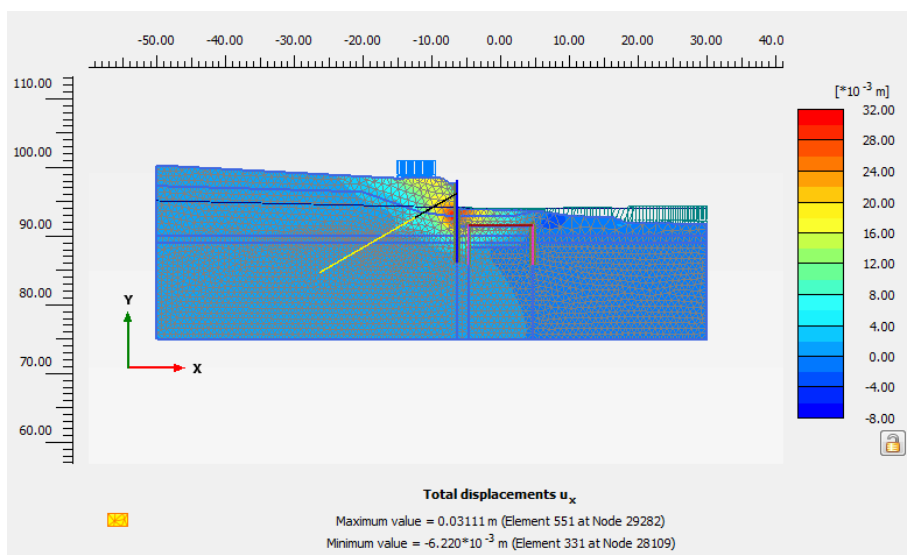


Figura 7-34: Fase 13 SLE – Configurazione finale: Spostamenti orizzontali

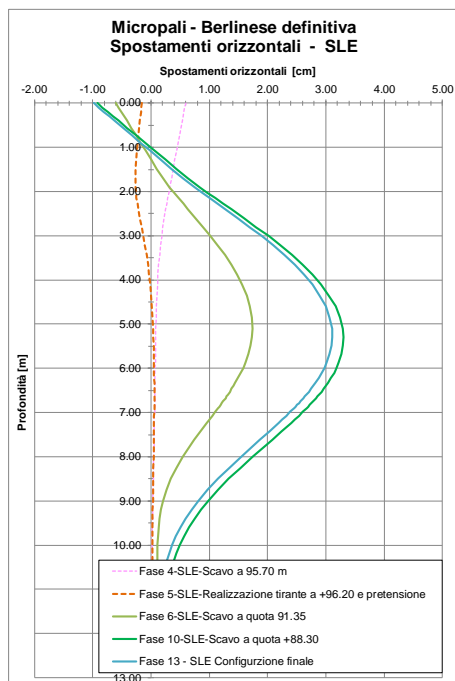


Figura 7-35: SLE: Spostamenti orizzontali berlinese definitiva

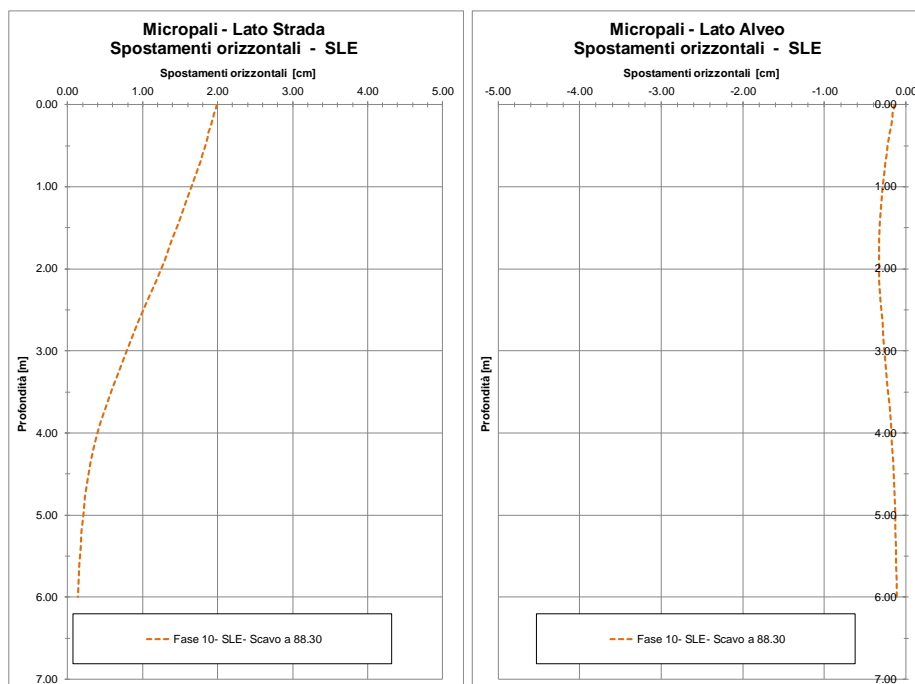


Figura 7-36: SLE: Spostamenti orizzontali berlinese provvisoriale

7.2.4.2 SLE - Sollecitazioni nei micropali della berlinese definitiva

Nel seguito è riportata una sintesi dei risultati in termini di sollecitazioni allo stato limite di esercizio.

Si intendono positivi gli sforzi assiali di compressione.

		Micropali Berlinese definitiva
$V_{Ed,max}$	[kN]	46.69
$N_{Ed,max}$	[kN]	81.93
$N_{Ed,min}$	[kN]	0
$M_{Ed,max}$	[kNm]	36.56

Tabella 7-17: - SLE- Sintesi sollecitazioni massime.

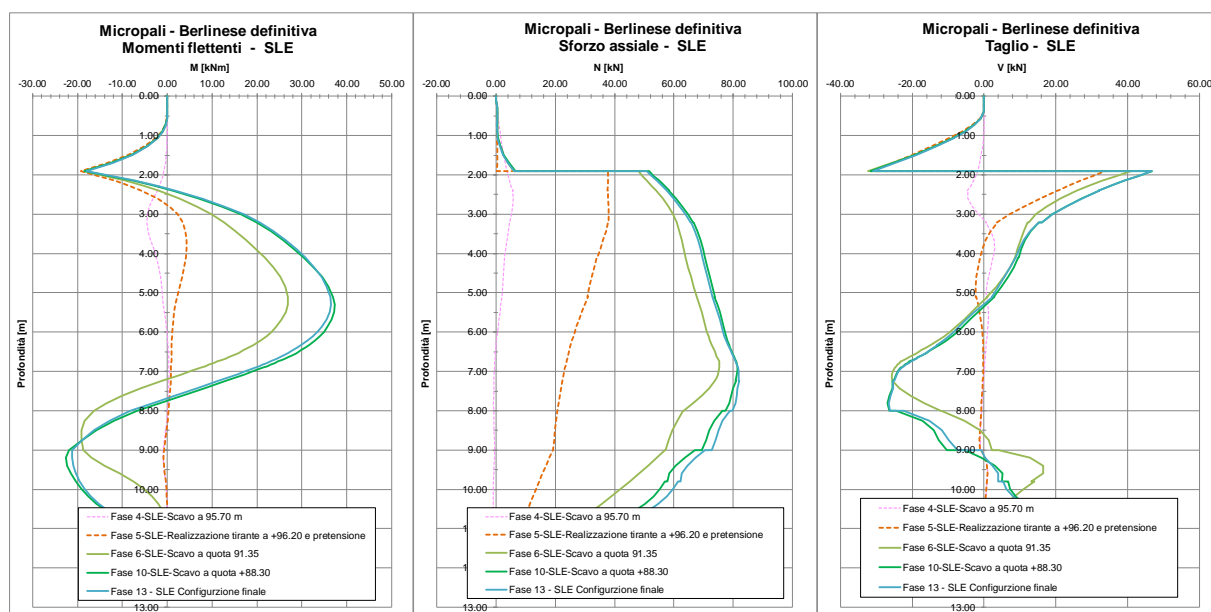


Figura 7-37: SLE – Fasi 4, 5, 6, 10 e 13 - Diagrammi delle sollecitazioni

7.2.4.3 SLE - Sollecitazioni nei micropali della berlinese provvisoria

Nel seguito è riportata una sintesi dei risultati in termini di sollecitazioni allo stato limite di esercizio.

Si intendono positivi gli sforzi assiali di compressione.

		Micropali Lato Strada	Micropali Lato Alveo
$V_{Ed,max}$	[kN]	23.74	11.73
$N_{Ed,max}$	[kN]	20.30	10.11
$N_{Ed,min}$	[kN]	0	0
$M_{Ed,max}$	[kNm]	14.69	7.18

Tabella 7-18: - SLE - Fase 10 - Sintesi sollecitazioni massime.

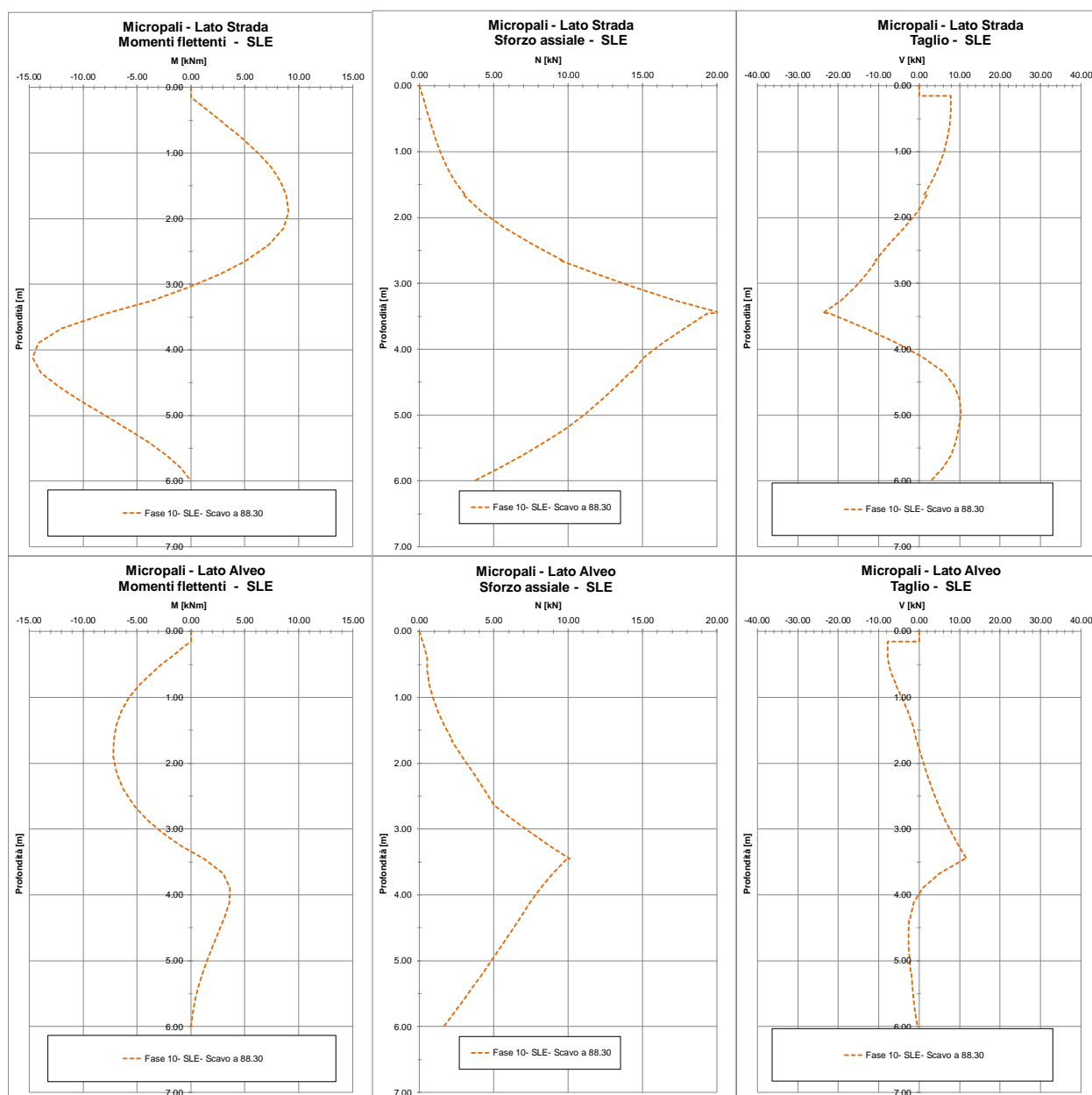


Figura 7-38: SLE - Diagrammi delle sollecitazioni

7.2.4.4 SLE - Sollecitazioni nel cordolo in c.a. della berlinese provvisoria

Nella seguente tabella si riassume la massima azione di compressione agente nell'elemento "Node to Node Anchor" con interasse pari a 1m adottato per schematizzare il cordolo in c.a. della berlinese provvisoria

Fase	Cordolo sommitale 0.50 m x 0.50 m N_{SLE} [kN]
Fase10 – SLE	31.19

Tabella 7-19: SLE - "Node to node anchor" Sollecitazioni

Alla luce della schematizzazione adottata il carico assiale N_{ED} ottenuto corrisponde al carico distribuito q .

Con riferimento alla formulazione riportata al §7.1.4.2, e sulla base dei risultati riportati nella precedente tabella si ottengono in corrispondenza del cordolo le sollecitazioni riportate nella seguente tabella.

Cordolo	$q_{max,SLE}$ [kN/m]	R [m]	$N_{Ed,SLE}$ [kN]	$M_{Ed,SLE}$ [kNm]
Cordolo sommitale 0.50 m x 0.50 m	31.19	4.70	146.60	172.25

Tabella 7-20: SLE – Sollecitazioni nel cordolo in c.a. della berlinese provvisoria

7.2.4.5 SLE - Sollecitazioni nei tiranti

Nella seguente tabella si riassume la massima azione di progetto agente agli SLE.

Fase	Tirante $N_{Ed,SLE}$ [kN]
Fase 6 – SLE- Scavo a +91.35 m	337.17
Fase 9 – SLE- Realizzazione micropali paratia provvisoria	337.09
Fase 10 – SLE- Scavo a +88.30 m	361.94
Fase 13 – SLE- Configurazione finale	358.38

Tabella 7-21: SLE-Tiranti. Sollecitazioni

7.2.5 Sintesi dei risultati per gli Stati Limite Ultimi strutturali (STR)

7.2.5.1 SLU/STR Sollecitazioni nei Micropali della Berlinese Definitiva

Nel seguito è riportata una sintesi dei risultati in termini di sollecitazioni allo stato limite ultimo di tipo strutturale (STR).

Si intendono positivi gli sforzi assiali di compressione.

		Micropali Berlinese definitiva
$V_{Ed,max}$	[kN]	61.03
$N_{Ed,max}$	[kN]	107.48
$N_{Ed,min}$	[kN]	0
$M_{Ed,max}$	[kNm]	48.74

Tabella 7-22: - Fasi 7, 11, 14 e 17 - SLU/STR A1+M1+R1- Sintesi sollecitazioni massime.

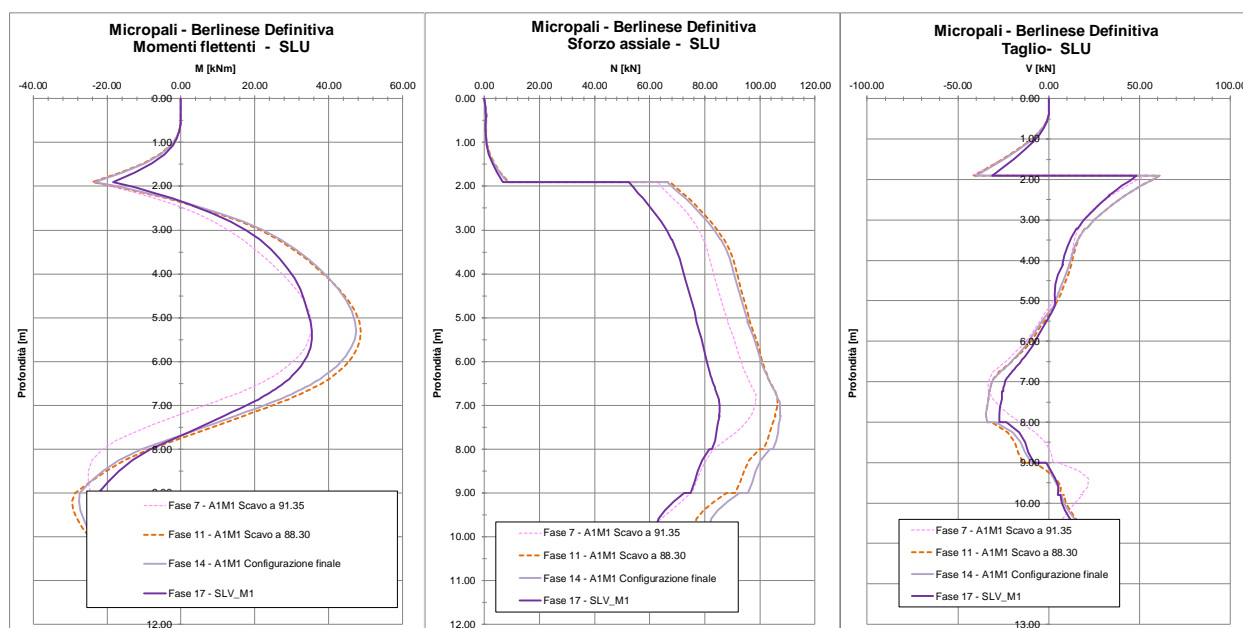


Figura 7-39: Fasi 7, 11, 14 e 17 – SLU/STR A1+M1+R1 - Diagrammi delle sollecitazioni

7.2.5.2 SLU/STR Sollecitazioni nei Micropali della Berlinese Provvisoria

Nel seguito è riportata una sintesi dei risultati in termini di sollecitazioni allo stato limite ultimo di tipo strutturale (STR).

Si intendono positivi gli sforzi assiali di compressione.

		Micropali Lato strada	Micropali Lato Alveo
$V_{Ed,max}$	[kN]	31.17	15.28
$N_{Ed,max}$	[kN]	26.63	13.08
$N_{Ed,min}$	[kN]	0	0
$M_{Ed,max}$	[kNm]	19.23	9.40

Tabella 7-23: - Fase 11 - SLU/STR A1+M1+R1- Sintesi sollecitazioni massime.

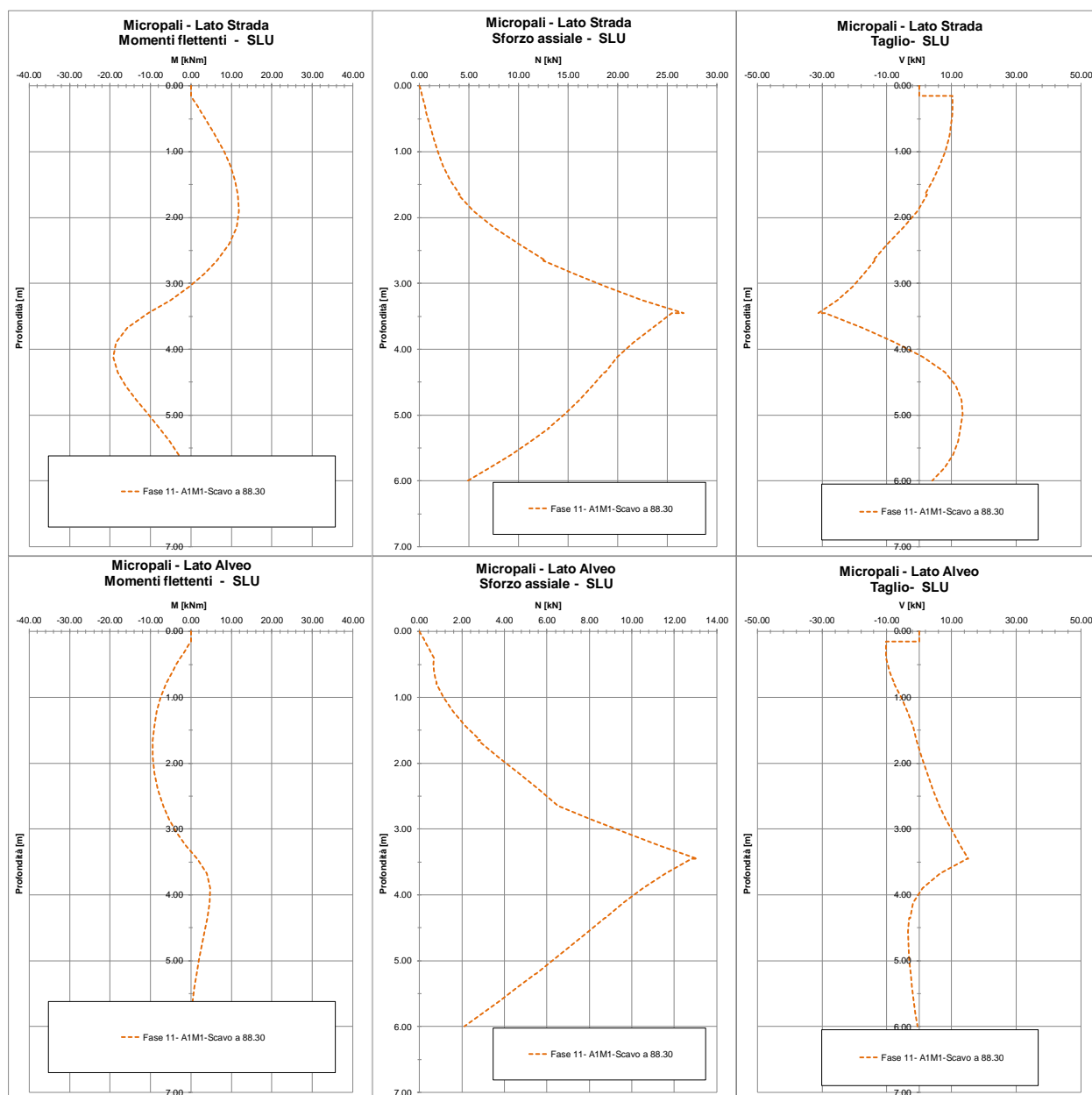



Figura 7-40: Fase 11 – SLU/STR A1+M1+R1 - Diagrammi delle sollecitazioni

 gruppo Atlantia	VARIANTE ALLA SP65 "DELLA FUTA NODO DI RASTIGNANO – 2° LOTTO DI COMPLETAMENTO Tratto compreso tra svincolo di Rastignano e Ponte Delle Oche nei comuni di San Lazzaro di Savena, Bologna e Pianoro Progetto Definitivo RELAZIONE DI CALCOLO OPERE PROVVISORIALI DEL VIADOTTO RASTIGNANO
--	--

7.2.5.3 SLU/STR Sollecitazioni nel cordolo in c.a. della berlinese provvisoria

Nella seguente tabella si riassume la massima azione di compressione agente nell'elemento "Node to Node Anchor" con interasse pari a 1m adottato per schematizzare il cordolo in c.a. della berlinese provvisoria.

Fase	Cordolo sommitale 0.50 m x0.50 m N_{SLU} [kN]
Fase 11 – SLU/STR	41.07

Tabella 7-24: SLU/STR - "Node to node anchor" Sollecitazioni

Alla luce della schematizzazione adottata il carico assiale N_{ED} ottenuto corrisponde al carico distribuito q .

Con riferimento alla formulazione riportata al §7.1.4.2, e sulla base dei risultati riportati nella precedente tabella si ottengono in corrispondenza del cordolo le sollecitazioni agenti allo SLU riportate nella seguente tabella.

Cordolo	$q_{max,SLU}$ [kN/m]	R [m]	$N_{Ed,SLU}$ [kN]	$M_{Ed,SLU}$ [kNm]
Cordolo sommitale 0.50 m x0.50 m	41.07	4.70	193.03	226.81

Tabella 7-25: SLU/STR – Sollecitazioni agenti nei cordoli in c.a.

7.2.5.4 SLU Tiranti

Nella seguente tabella si riassume la massima azione di progetto agente sui tiranti agli SLU.

Fase	Tirante $N_{Ed,SLE}$ [kN]
Fase 7 – SLU/STR A1+M1+R1 - Scavo a quota +91.35 m	439.53
Fase 11 – SLU/STR A1+M1+R1 - Scavo a quota +88.30 m	471.66
Fase 14 – SLU/STR A1+M1+R1 – Configurazione finale	466.40
Fase 16 – SLV/STR M1	367.25

Tabella 7-26: SLU-Tiranti. Sollecitazioni

7.2.5.5 SLU/STR Trave di ripartizione dei tiranti

Di seguito si sintetizza il calcolo condotto per la determinazione delle sollecitazioni agenti allo SLU sulla trave di ripartizione dei tiranti, costituita da 2 profili UPN 200 accoppiati distanti 300 mm.

La trave di ripartizione è schematizzata come una trave continua appoggiata in corrispondenza dei tiranti e caricata con un carico uniformemente distribuito.

Sulla base dei risultati riportati al precedente paragrafo è possibile definire il carico massimo di trazione (N_{Ed}) agente sui tiranti allo SLU che risulta $N_{Ed,SLU} = 471.66$ kN.

Si determina quindi il carico q uniformemente distribuito e le due componenti verticale e orizzontale che risultano pertanto:

- $q = \frac{N_{Ed}}{i}$;
- $q_h = q_x = q \cdot \cos \alpha$;
- $q_v = q_y = q \cdot \sin \alpha$;

dove:

- α angolo di inclinazione del micropalo pari a 30° rispetto all'orizzontale;
- i interasse tra i micropali.

Il carico $q_v = q_y$ deve essere incrementato con il peso proprio del cordolo amplificato per il coefficiente $\gamma_{A1} = 1.3$ per la combinazione A1-M1.

In particolare per il calcolo delle sollecitazioni si è considerato lo schema statico di trave continua su più appoggi con campate di luce pari a l'interasse tra i tiranti ovvero 2.0 m.

Si riportano nella seguente tabella le sollecitazioni risultanti per la trave di ripartizione per le verifiche agli SLU in combinazione A1M1

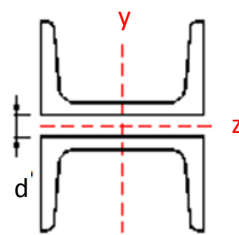
<u>Sollecitazione tirante</u>		<u>Dimensioni trave</u>			
$N_{ED,SLU}$	= 471.66 kN	2 UPN 200 - $d_0=300$ mm			
		w	= 0.506 kN/m		
i	= 1.8 m				
α	= 30 °				
<u>Condizioni SLU</u>					
q_{SLU}	= 262.03 kN/m	Trave continua			
$q_{h,SLU}$	= 226.93 kPa	$M_{y,ED}$	= 73.52 kNm	$V_{z,ED}$	= 204.23 KN
$q_{v,SLU}$	= 131.67 kPa	$M_{z,ED}$	= 42.66 kNm	$V_{y,ED}$	= 118.51 KN
		Sbalzi laterali di 1 m			
		$M_{y,ED}$	= 113.46 kNm	$V_{z,ED}$	= 226.93 KN
		$M_{z,ED}$	= 65.837 kNm	$V_{y,ED}$	= 131.67 KN

Tabella 7-27: Fase 11 – SLU/STR A1+M1+R1 – Sollecitazioni trave di ripartizione tiranti

7.2.6 Sintesi dei risultati per gli Stati Limite Ultimi geotecnici (GEO)

Nel seguito è riportata una sintesi dei risultati per gli limiti ultimi di tipo geotecnico GEO.

7.2.6.1 SLU/GEO A2+M2+R1

Con i parametri del terreno ridotti con i coefficienti parziali M2 si è avuto la convergenza dei modelli Plaxis a conferma del soddisfacimento delle verifiche nei confronti della rotazione dell'opera. Nelle figure seguenti si riporta il campo di spostamenti al termine della fase di calcolo.

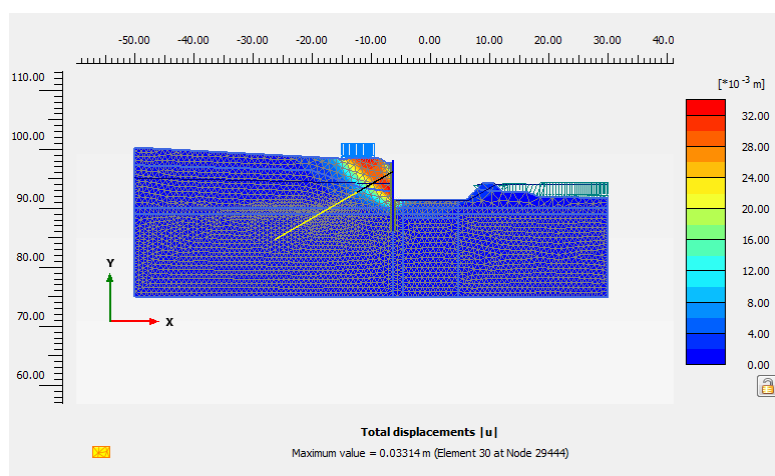


Figura 7-41: Fase 8 – SLU/GEO A2+M2+R1 - Scavo a quota +91.35 m, campo di spostamenti

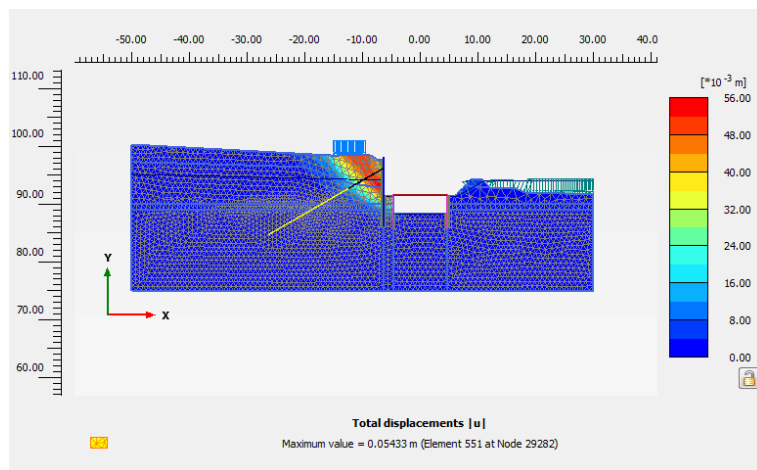


Figura 7-42: Fase 12 – SLU/GEO A2+M2+R1 – Scavo a quota +88.30 m, campo di spostamenti

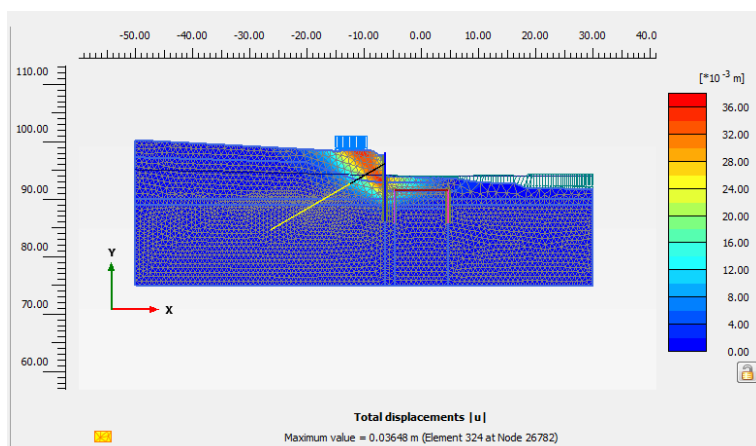


Figura 7-43: Fase 15 – SLU/GEO_stab A2+M2+R2 – Configurazione finale, campo di spostamenti

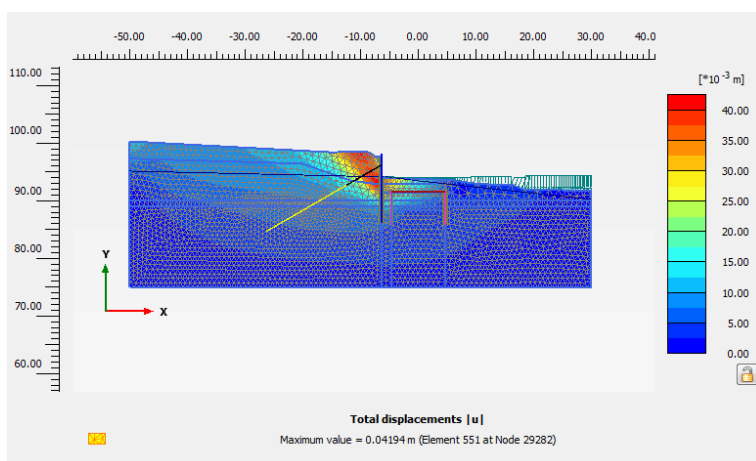


Figura 7-44: Fase 17 – SLV/GEO M2 ($k_r=0.108$, $k_v=0$), campo di spostamenti

7.2.6.2 Sintesi dei risultati per le analisi di stabilità (GEO_stab)

L'analisi di stabilità dell'insieme terreno-opera è stata effettuata secondo l'approccio 1, combinazione 2: A2+M2+R2.

Nelle figure seguenti si riportano i risultati delle analisi Plaxis (phi-c reduction) in termini di moltiplicatore totale ΣM_{sf} e di mappa a colori degli spostamenti dalla quale si evince il cinematisma critico per il quale si è ottenuto un coefficiente di sicurezza superiore al minimo richiesto da normativa.

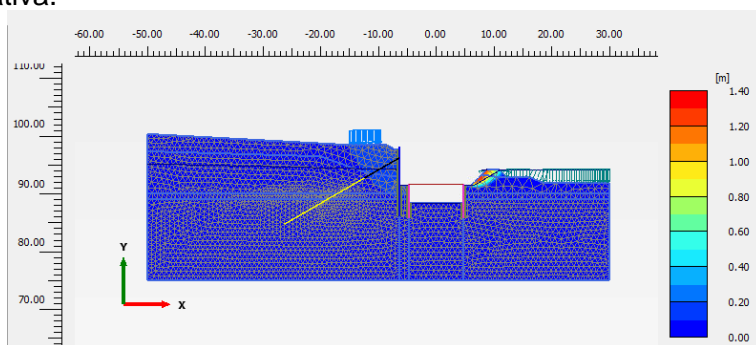


Figura 7-45: Fase 18 – STB/GEO – Scavo a + 88.30m - Cinematismo critico

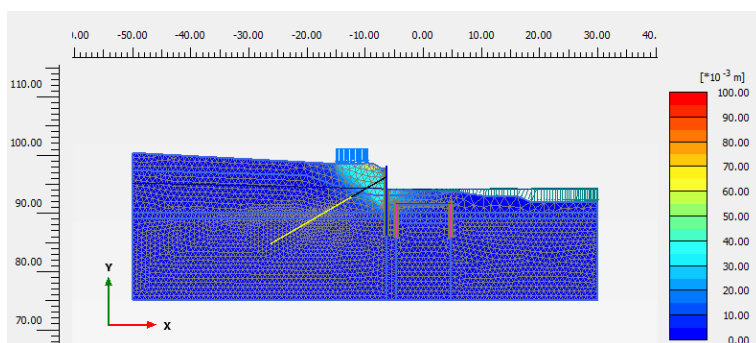


Figura 7-46: Fase 19 – STB/GEO Statica – Configurazione finale - Cinematismo critico

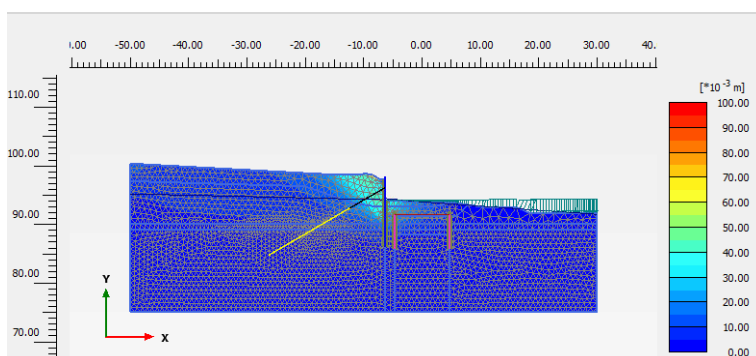


Figura 7-47: Fase 21 – STB/GEO SLV+ - Cinematismo critico

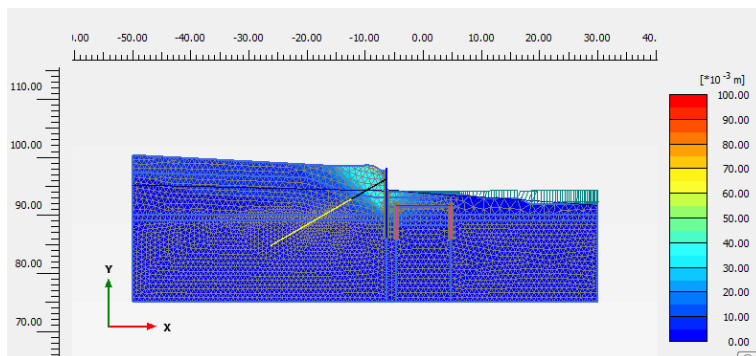


Figura 7-48: Fase 23– STB/GEO SLV- - Cinematismo critico

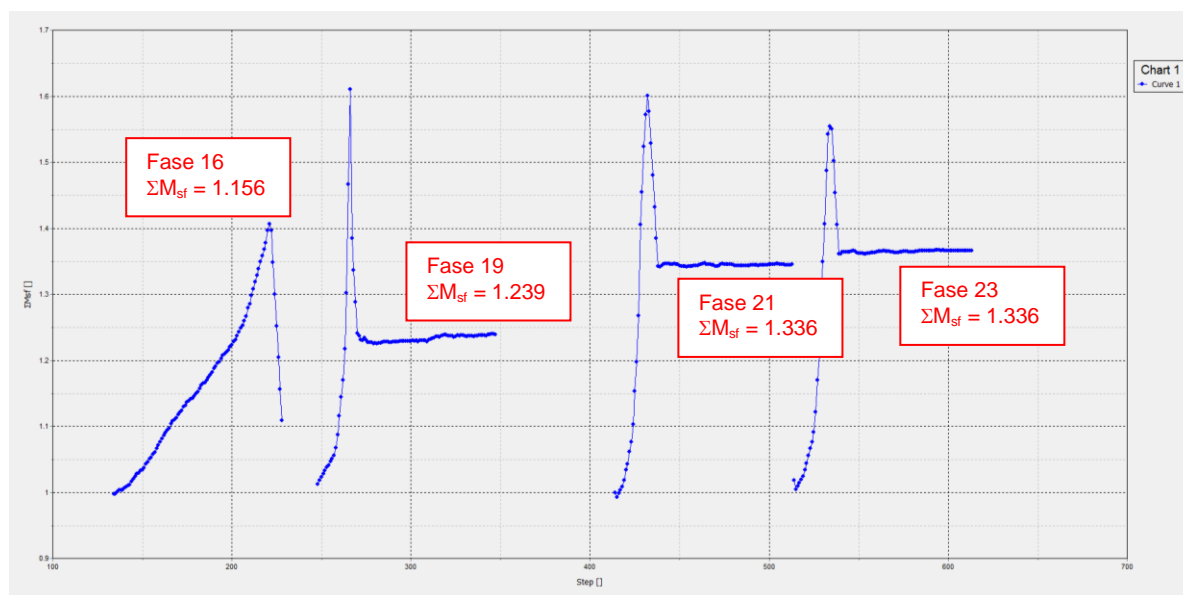


Figura 7-49: Fasi 18,19,21 e 23 – SLU/GEO_stab A2+M2+R2. Moltiplicatore totale ΣM_{sf}

7.2.7 Verifiche SLU di tipo strutturale

Nel seguito si riportano le verifiche allo SLU nei confronti del raggiungimento della resistenza strutturale dei vari elementi che costituiscono l'opera.

7.2.7.1 Verifiche strutturali micropali Paratia Definitiva

Con riferimento alle caratteristiche dei materiali riportate al § 3, alle sollecitazioni risultanti riportate al §7.2.5.1 e alle caratteristiche geometriche dei tubolari metallici ($\phi_{est}=177.8$ mm-sp.8 mm), sono state condotte le verifiche allo SLU nei confronti del raggiungimento della resistenza strutturale dei micropali per sollecitazioni di taglio e presso-tenso flessione retta in accordo alle prescrizioni riportate al paragrafo 4.2.4.1 delle NTC 2008 e alla norma EN 1993-1-1.

Nella seguente tabella si riporta il tasso di sfruttamento massimo ottenuto per le fasi di calcolo 7, 11, 14, 17.

Tabella 7-28 : Tasso di sfruttamento massimo Micropali

Fase SLU	$N_{Ed}/N_{pl,Rd}$	$V_{Ed}/V_{ply,Rd}$	$M_{Ed}/M_{VN,pl,y,Rd}$
Fase 7	0.07 (z=6.90m)	0.20 (z=1.90m)	0.45 (z=5.10m)
Fase 11	0.07 (z=6.90m)	0.23 (z=1.90m)	0.62 (z=5.29m)
Fase 14	0.07 (z=6.90m)	0.23 (z=1.90m)	0.61 (z=5.29m)
Fase 17	0.06 (z=7.07m)	0.18 (z=1.90m)	0.46 (z=5.29m)

A titolo esemplificativo si riporta il calcolo condotto per la sezione per la quale è stato ottenuto tasso di sfruttamento massimo pari a **0.62**.

DATI DI INPUT

© Dott. Ing. Simone Caffè - 25/02/2013 (macro Excel sviluppata dall'Ing. Marco Panzano)

Tipo di acciaio utilizzato

S 355

Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di resistenza	γ_{M0}	1.05 [-]
Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di stabilità	γ_{M1}	1.05 [-]
Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di rottura	γ_{M2}	1.25 [-]

Caratteristiche del profilo

Sezione trasversale del tubolare

Ø177.8/8

Diametro esterno del profilo tubolare (UTENTE)	d_{ext}	[mm]
Spessore del profilo tubolare (UTENTE)	t	[mm]
Diametro esterno del profilo tubolare utilizzato nelle verifiche	177.8	[mm]
Spessore del profilo tubolare utilizzato nelle verifiche	8	[mm]

Comb.	N_{Ed}	$V_{z,Ed}$	$V_{y,Ed}$	$M_{y,Ed}$	$M_{z,Ed}$	T_{Ed}	Verifica
[n°]	[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[-]
1	97.54	0.76		48.74			✓ 0.62

RESISTENZA E STABILITA' DEI PROFILI TUBOLARI - Metodo B - EN 1993 - 1 - 1:2010

Materiali utilizzati		© Dott. Ing. Simone Caffè - 25/02/2013
Valore di snervamento dell'acciaio del profilo	f_{yk}	355 [N/mm ²]
Valore di rottura dell'acciaio del profilo	f_{uk}	510 [N/mm ²]
Modulo di elasticità dell'acciaio del profilo	E	210000 [N/mm ²]
Modulo di elasticità tangenziale dell'acciaio del profilo	G	80769 [N/mm ²]
Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di resistenza	γ_{M0}	1.05 [-]
Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di stabilità	γ_{M1}	1.05 [-]
Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di rottura	γ_{M2}	1.25 [-]

Caratteristiche meccaniche del profilo

Diametro esterno del profilo tubolare	d_{ext}	177.80 [mm]
Spessore del profilo tubolare	t	8.00 [mm]
Diametro interno	d_{int}	161.80 [mm]
Raggio esterno	r_{ext}	88.90 [mm]
Raggio interno	r_{int}	80.90 [mm]
Area della sezione trasversale	A	4268 [mm ²]
Momento d'inerzia della sezione trasversale attorno all'asse forte	I_y	1.5414E+07 [mm ⁴]
Modulo di resistenza elastico attorno all'asse forte	$W_{el,y}$	1.7339E+05 [mm ³]
Modulo di resistenza plastico attorno all'asse forte	$W_{pl,y}$	2.3083E+05 [mm ³]
Area resistente a taglio nel piano dell'anima	$A_{v,z}$	2717 [mm ²]
Raggio d'inerzia attorno all'asse forte	i_y	60.10 [mm]
Momento d'inerzia della sezione trasversale attorno all'asse debole	I_z	1.5414E+07 [mm ⁴]
Modulo di resistenza elastico attorno all'asse debole	$W_{el,z}$	1.7339E+05 [mm ³]
Modulo di resistenza plastico attorno all'asse debole	$W_{pl,z}$	2.3083E+05 [mm ³]
Area resistente a taglio nel piano delle ali	$A_{v,y}$	2717 [mm ²]
Raggio d'inerzia attorno all'asse debole	i_z	60.10 [mm]
Momento d'inerzia torsionale	I_t	3.083E+07 [mm ⁴]

Verifiche di resistenza della sezione trasversale		
Resistenza a trazione pura		
Resistenza plastica a trazione	$N_{t,Rd}$	1442.83 [kN]
Verifica a trazione pura	ρ_{Nt}	0.000 [-]
Resistenza a compressione pura		
Resistenza a compressione pura	$N_{c,Rd}$	1442.83 [kN]
Verifica a compressione pura	ρ_{Nc}	0.068 [-]
Resistenza a torsione e taglio		
Diametro medio della sezione trasversale	d_{med}	169.80 [mm]
Area della sezione compresa nel diametro medio	Ω	22644.63 [mm ²]
Tensioni tangenziali dovute al momento torcente	$\tau_{t,Ed}$	0.00 [N/mm ²]
Verifica tensionale per pura torsione	ρ_T	0.000 [-]
Resistenza plastica a taglio	$V_{pl,Rd}$	530.32 [kN]
Resistenza plastica a taglio ridotta per effetto della torsione	$V_{pl,T,Rd}$	530.32 [kN]
Verifica a taglio in direzione z - z	ρ_{Vz}	0.001 [-]
Verifica a taglio in direzione y - y	ρ_{Vy}	0.000 [-]
Resistenza a flessione		
Modulo di resistenza di calcolo per flessione attorno all'asse y - y	W_y	2.31E+05 [mm ³]
Resistenza a flessione attorno all'asse y - y	$M_{cy,Rd}$	78.04 [kNm]
Verifica flessionale attorno all'asse y - y	ρ_{My}	0.625 [-]
Modulo di resistenza di calcolo per flessione attorno all'asse z - z	W_z	2.31E+05 [mm ³]
Resistenza a flessione attorno all'asse z - z	$M_{cz,Rd}$	78.04 [kNm]
Verifica flessionale attorno all'asse z - z	ρ_{Mz}	0.000 [-]
Resistenza a flessione e taglio (per sezioni in classe 1 o 2)		
Fattore di riduzione per la presenza della forza di taglio in direzione z - z	$\rho_{Vz,red}$	1.00 [-]
Fattore di riduzione per la presenza della forza di taglio in direzione y - y	$\rho_{Vy,red}$	1.00 [-]
Resistenza a flessione ridotta, per flessione attorno all'asse y - y	$M_{Vy,Rd}$	78.04 [kNm]
Verifica flessionale attorno all'asse y - y	$\rho_{My - Vz}$	0.625 [-]
Resistenza a flessione ridotta, per flessione attorno all'asse z - z	$M_{Vz,Rd}$	78.04 [kNm]
Verifica flessionale attorno all'asse z - z	$\rho_{Mz - Vy}$	0.000 [-]

7.2.7.2 Verifiche strutturali micropali Paratia Provvisoria

Con riferimento alle caratteristiche dei materiali riportate al § 3, alle sollecitazioni risultanti riportate al §7.2.5.2 e alle caratteristiche geometriche dei tubolari metallici ($\phi_{est}=168.3$ mm-sp.8 mm), sono state condotte le verifiche allo SLU nei confronti del raggiungimento della resistenza strutturale dei micropali per sollecitazioni di taglio e presso-tenso flessione retta in accordo alle prescrizioni riportate al paragrafo 4.2.4.1 delle NTC 2008 e alla norma EN 1993-1-1.

Nella seguente tabella si riporta il tasso di sfruttamento massimo ottenuto per la fase di calcolo 11 per i micropali lato Strada e per i micropali lato Alveo

Tabella 7-29 : Tasso di sfruttamento massimo Micropali

Lato	Fase SLU	$N_{Ed}/N_{pl,Rd}$	$V_{Ed}/V_{ply,Rd}$	$M_{Ed}/M_{VN,ply,Rd}$
Strada	Fase 11	0.02 (z=3.45m)	0.12 (z=3.45m)	0.28 (z=4.12m)
Alveo	Fase 11	0.01 (z=3.45m)	0.06 (z=3.45m)	0.14 (z=1.90m)

A titolo esemplificativo si riporta il calcolo condotto per la sezione per la quale è stato ottenuto tasso di sfruttamento massimo pari a **0.28**.

DATI DI INPUT

© Dott. Ing. Simone Caffè - 25/02/2013 (macro Excel sviluppata dall'Ing. Marco Panzano)

Tipo di acciaio utilizzato S 355

Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di resistenza	γ_{M0}	1.05 [-]
Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di stabilità	γ_{M1}	1.05 [-]
Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di rottura	γ_{M2}	1.25 [-]

Caratteristiche del profilo

Sezione trasversale del tubolare	Ø168.3/8	
Diametro esterno del profilo tubolare (UTENTE)	d_{ext}	[mm]
Spessore del profilo tubolare (UTENTE)	t	[mm]
Diametro esterno del profilo tubolare utilizzato nelle verifiche		168.3 [mm]
Spessore del profilo tubolare utilizzato nelle verifiche		8 [mm]

Comb.	N_{Ed}	$V_{z,Ed}$	$V_{y,Ed}$	$M_{y,Ed}$	$M_{z,Ed}$	T_{Ed}	Verifica
[n°]	[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[-]
1	19.92	1.17		19.23			✓ 0.28

RESISTENZA E STABILITA' DEI PROFILI TUBOLARI - Metodo B - EN 1993 - 1 - 1:2010

Materiali utilizzati © Dott. Ing. Simone Caffè - 25/02/2013

Valore di snervamento dell'acciaio del profilo	f_{yk}	355 [N/mm ²]
Valore di rottura dell'acciaio del profilo	f_{uk}	510 [N/mm ²]
Modulo di elasticità dell'acciaio del profilo	E	210000 [N/mm ²]
Modulo di elasticità tangenziale dell'acciaio del profilo	G	80769 [N/mm ²]
Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di resistenza	γ_{M0}	1.05 [-]
Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di stabilità	γ_{M1}	1.05 [-]
Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di rottura	γ_{M2}	1.25 [-]

Caratteristiche meccaniche del profilo

Diametro esterno del profilo tubolare	d_{ext}	168.30 [mm]
Spessore del profilo tubolare	t	8.00 [mm]
Diametro interno	d_{int}	152.30 [mm]
Raggio esterno	r_{ext}	84.15 [mm]
Raggio interno	r_{int}	76.15 [mm]
Area della sezione trasversale	A	4029 [mm ²]
Momento d'inerzia della sezione trasversale attorno all'asse forte	I_y	1.2973E+07 [mm ⁴]
Modulo di resistenza elastico attorno all'asse forte	$W_{el,y}$	1.5416E+05 [mm ³]
Modulo di resistenza plastico attorno all'asse forte	$W_{pl,y}$	2.0574E+05 [mm ³]
Area resistente a taglio nel piano dell'anima	$A_{v,z}$	2565 [mm ²]
Raggio d'inerzia attorno all'asse forte	i_y	56.75 [mm]
Momento d'inerzia della sezione trasversale attorno all'asse debole	I_z	1.2973E+07 [mm ⁴]
Modulo di resistenza elastico attorno all'asse debole	$W_{el,z}$	1.5416E+05 [mm ³]
Modulo di resistenza plastico attorno all'asse debole	$W_{pl,z}$	2.0574E+05 [mm ³]
Area resistente a taglio nel piano delle ali	$A_{v,y}$	2565 [mm ²]
Raggio d'inerzia attorno all'asse debole	i_z	56.75 [mm]
Momento d'inerzia torsionale	I_t	2.595E+07 [mm ⁴]

Caratteristiche di sollecitazione nella sezione di verifica

Forza normale (positiva se di compressione)	N_{Ed}	19.92 [kN]
Forza di taglio agente in direzione parallela all'anima	$V_{z,Ed}$	1.17 [kN]
Forza di taglio agente in direzione parallela alle ali	$V_{y,Ed}$	[kN]
Momento flettente attorno all'asse maggiore di inerzia	$M_{y,Ed}$	19.23 [kNm]
Momento flettente attorno all'asse minore di inerzia	$M_{z,Ed}$	[kNm]
Momento torcente primario (alla Saint Venant)	T_{Ed}	[kNm]

Classificazione della sezione trasversale di verifica		
Coefficiente ε	ε	0.814 [-]
Rapporto tra diametro esterno e spessore	ρ	21.038 [-]
Rapporto limite per la classe 1	ρ_1	33.099 [-]
Rapporto limite per la classe 2	ρ_2	46.338 [-]
Rapporto limite per la classe 3	ρ_3	59.577 [-]
Classificazione della sezione trasversale	CL	1
Verifiche di resistenza della sezione trasversale		
Resistenza a trazione pura		
Resistenza plastica a trazione	$N_{l,Rd}$	1362.11 [kN]
Verifica a trazione pura	ρ_{Nt}	0.000 [-]
Resistenza a compressione pura		
Resistenza a compressione pura	$N_{c,Rd}$	1362.11 [kN]
Verifica a compressione pura	ρ_{Nc}	0.015 [-]
Resistenza a torsione e taglio		
Diametro medio della sezione trasversale	d_{med}	160.30 [mm]
Area della sezione compresa nel diametro medio	Ω	20181.66 [mm ²]
Tensioni tangenziali dovute al momento torcente	$\tau_{t,Ed}$	0.00 [N/mm ²]
Verifica tensionale per pura torsione	ρ_T	0.000 [-]
Resistenza plastica a taglio	$V_{pl,Rd}$	500.65 [kN]
Resistenza plastica a taglio ridotta per effetto della torsione	$V_{pl,T,Rd}$	500.65 [kN]
Verifica a taglio in direzione z - z	ρ_{Vz}	0.002 [-]
Verifica a taglio in direzione y - y	ρ_{Vy}	0.000 [-]
Resistenza a flessione		
Modulo di resistenza di calcolo per flessione attorno all'asse y - y	W_y	2.06E+05 [mm ³]
Resistenza a flessione attorno all'asse y - y	$M_{cy,Rd}$	69.56 [kNm]
Verifica flessionale attorno all'asse y - y	ρ_{My}	0.276 [-]
Modulo di resistenza di calcolo per flessione attorno all'asse z - z	W_z	2.06E+05 [mm ³]
Resistenza a flessione attorno all'asse z - z	$M_{cz,Rd}$	69.56 [kNm]
Verifica flessionale attorno all'asse z - z	ρ_{Mz}	0.000 [-]

7.2.7.3 Verifiche strutturali cordolo in c.a. berlinese provvisoriale

Sono state ipotizzate 15 barre ϕ 24 perimetrali e staffe chiuse ϕ 10/250 mm.

Di seguito sono riportati i risultati delle verifiche a pressoflessione allo SLU e il calcolo delle tensioni nel calcestruzzo allo SLE (rara).

Risulta:

- Verifiche SLU a pressoflessione:
 $M_{ed} = 226.81 \text{ kNm} < M_{rd} = 287.60 \text{ kNm}$
- Verifiche tensioni SLE rara:
 $\sigma_c = 7.41 < 0.6 \cdot f_{ck} = 0.6 \cdot 25 = 15 \text{ MPa}$
 $\sigma_s = 142 < 0.8 \cdot f_{yk} = 0.8 \cdot 450 = 360 \text{ MPa}$

Verifica C.A. S.L.U. - File: SLU

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008

Titolo: SLU

N° Vertici 4 Zoom N° barre 15 Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
1	-25	-25
2	25	-25
3	25	25
4	-25	25

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
11	4.52	-9.8	19.6
12	4.52	9.8	19.6
13	4.52	-9.8	-19.6
14	4.52	9.8	-19.6
15	4.52	0	19.6

Sollecitazioni S.L.U. Metodo n

N_{Ed} 193.03 kN
M_{Ed} 226.81 kNm
M_{yEd} 0

P.to applicazione N
Centro Baricentro cls
Coord.[cm] xN 0 yN 0

Tipo rottura Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

M_{xRd} 527 kNm

Materiali B450C C25/30

ϵ_{su} 67.5 ‰ ϵ_{c2} 2 ‰
 f_{yd} 391.3 N/mm² ϵ_{cu} 3.5 ‰
 E_s 200 000 N/mm² f_{cd} 14.17 N/mm²
 E_s/E_c 15 f_{cc}/f_{cd} 0.8
 ϵ_{syd} 1.957 ‰ $\sigma_{c,adm}$ 9.75 N/mm²
 $\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm² τ_{co} 0.6
 τ_{c1} 1.829

σ_c -14.17 N/mm²
 σ_s 391.3 N/mm²
 ϵ_s 7.841 ‰
d 44.6 cm
x 13.76 x/d 0.3086
 δ 0.8258

Tipo Sezione
Rettan.re Trapezi
a T Circolare
Rettangoli Coord.

Metodo di calcolo
S.L.U.+ S.L.U.-
Metodo n

Tipo flessione
Retta Deviata

N° rett. 100
Calcola MRd Dominio M-N
L₀ 0 cm Col. modello

Precompresso

Figura 7-50: Cordolo berlinese provvisoriale Verifiche SLU a pressoflessione

Verifica C.A. S.L.U. - File: SLE

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008

Titolo: SLE

N° Vertici 4 Zoom N° barre 15 Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
1	-25	-25
2	25	-25
3	25	25
4	-25	25

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
11	4.52	-9.8	19.6
12	4.52	9.8	19.6
13	4.52	-9.8	-19.6
14	4.52	9.8	-19.6
15	4.52	0	19.6

Sollecitazioni S.L.U. Metodo n

N_{Ed} 146.60 kN
M_{Ed} 172.25 kNm
M_{yEd} 0

P.to applicazione N
Centro Baricentro cls
Coord.[cm] xN 0 yN 0

Materiali B450C C25/30

ϵ_{su} 67.5 ‰ ϵ_{c2} 2 ‰
 f_{yd} 391.3 N/mm² ϵ_{cu} 3.5 ‰
 E_s 200 000 N/mm² f_{cd} 14.17 N/mm²
 E_s/E_c 15 f_{cc}/f_{cd} 0.8
 ϵ_{syd} 1.957 ‰ $\sigma_{c,adm}$ 9.75 N/mm²
 $\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm² τ_{co} 0.6
 τ_{c1} 1.829

σ_c -7.411 N/mm²
 σ_s 142 N/mm²
 ϵ_s 0.7099 ‰
d 45.3 cm
x 19.89 x/d 0.4391
 δ 0.9889

Tipo Sezione
Rettan.re Trapezi
a T Circolare
Rettangoli Coord.

Metodo di calcolo
S.L.U.+ S.L.U.-
Metodo n

Verifica N° iterazioni: 3

Precompresso

Figura 7-51: Cordolo Berlinese provvisoriale Calcolo delle tensioni SLE in combinazione rara.

7.2.7.4 Verifiche strutturali trave di ripartizione tiranti

Con riferimento, alle caratteristiche dei materiali di cui al §3, alla geometria della trave di ripartizione e al valore delle sollecitazioni risultanti riportate al §7.2.5.5 sono state condotte le verifiche di resistenza a taglio e flessione deviata.

Per il calcolo dei tagli resistenti si è fatto riferimento alla seguente formulazione:

$$V_{c,Rd} = \frac{A_v \cdot f_{yk}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

dove:

- A_v è l'area resistente al taglio della sezione in acciaio;
- f_{yk} rappresenta la tensione di snervamento caratteristica dell'acciaio = 355 MPa;
- γ_{M0} rappresenta il coefficiente di sicurezza per la resistenza della sezione = 1.05

Per il calcolo dei momenti resistenti si è fatto riferimento alla seguente formulazione relativa alle sezioni di classe 1 e 2:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,min} \cdot f_{yk}^{F+T}}{\gamma_{M0}}$$

dove:

- $W_{pl,min}$ rappresenta il modulo di resistenza plastico minimo della sezione in acciaio;
- $f_{yk}^{F+T} = (1-\rho) \cdot f_{yk}$ rappresenta la tensione di snervamento caratteristica dell'acciaio per flessione e taglio;
- $\rho = \begin{cases} V_{Ed} \leq 0.5 \cdot V_{c,Rd} \rightarrow 0 \\ V_{Ed} > 0.5 \cdot V_{c,Rd} \rightarrow \left[\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{c,Rd}} - 1 \right]^2 \end{cases}$ rappresenta la quota parte di resistenza decurtata a causa della sollecitazione tagliante;
- f_{yk} rappresenta la tensione di snervamento caratteristica dell'acciaio = 355MPa;
- γ_{M0} rappresenta il coefficiente di sicurezza per la resistenza della sezione = 1.05

Per la verifica a flessione biassiale si è fatto riferimento alla seguente formulazione valida per sezioni generiche di classe 1 e 2:

$$\left(\frac{M_{y,ED}}{M_{y,Rd}} \right) + \left(\frac{M_{z,ED}}{M_{z,Rd}} \right) \leq 1$$

Si riporta nelle seguenti tabelle il risultato delle verifiche condotte che risultano essere soddisfatte.

Profilato	Verifica a taglio			Influenza del taglio sulla verifica a flessione			Verifica a flessione deviata			Coefficiente di verifica
2UPN200 d ₀ =300mm	V _{Ed-y,max} [kN]	V _{Rd-y} [kN]	Verifica	Condizione	ρ	f _y ^{t+k} [Mpa]	M _{Ed-z,max} [kNm]	W _{plz} [cm ³]	M _{Rd-z} [kNm]	0.59
	118.51	673.4	V _{Ed-y,max} < V _{Rd-y}	V _{Ed-y,max} < 0.5 · V _{Rd-y}	0	355	42.66	1096	370.55	
	V _{Ed-z,max} [kN]	V _{Rd-z} [kN]	Verifica	Condizione	ρ	f _y ^{t+k} [Mpa]	M _{Ed-y,max} [kNm]	W _{ply} [cm ³]	M _{Rd-y} [kNm]	
	204.23	673.4	V _{Ed-z,max} < V _{Rd-z}	V _{Ed-y,max} < 0.5 · V _{Rd-y}	0	355	73.52	456	154.17	

Tabella 7-30: Verifiche strutturali Travi di ripartizione – Schema di trave continua su più appoggi

Profilato	Verifica a taglio			Influenza del taglio sulla verifica a flessione			Verifica a flessione deviata			Coefficiente di verifica
2UPN200 d ₀ =300mm	V _{Ed-y,max} [kN]	V _{Rd-y} [kN]	Verifica	Condizione	ρ	f _y ^{t+k} [Mpa]	M _{Ed-z,max} [kNm]	W _{plz} [cm ³]	M _{Rd-z} [kNm]	0.91
	131.67	673.4	V _{Ed-y,max} < V _{Rd-y}	V _{Ed-y,max} < 0.5 · V _{Rd-y}	0	355	65.84	1096	370.55	
	V _{Ed-z,max} [kN]	V _{Rd-z} [kN]	Verifica	Condizione	ρ	f _y ^{t+k} [Mpa]	M _{Ed-y,max} [kNm]	W _{ply} [cm ³]	M _{Rd-y} [kNm]	
	226.93	673.4	V _{Ed-z,max} < V _{Rd-z}	V _{Ed-y,max} < 0.5 · V _{Rd-y}	0.0	355	113.46	456	154.17	

Tabella 7-31: Verifiche strutturali Travi di ripartizione – Sbalzo laterale L=1.00m

7.2.8 Verifiche SLU di tipo geotecnico

Con i parametri del terreno ridotti con i coefficienti parziali M2 si è avuto la convergenza dei modelli Plaxis a conferma del soddisfacimento delle verifiche nei confronti della rotazione dell'opera (vedasi il paragrafo 7.2.6.1)

7.2.9 Verifiche dei tiranti di ancoraggio

7.2.9.1 Resistenza a sfilamento del bulbo di ancoraggio

La verifica a sfilamento dei tiranti è soddisfatta se:

$$E_d < R_{ad}$$

Essendo:

$$R_{ad} = R_{ak} / \gamma_R,$$

dove:

- E_d = trazione di progetto;
- R_{ad} = resistenza a sfilamento progetto;
- R_{ak} = valore caratteristico della resistenza a sfilamento.

In particolare le verifiche a sfilamento dei tiranti di ancoraggio agli stati limite ultimi statici (SLU) vengono condotte con riferimento alla combinazione A1+M1+R3.

Il valore di progetto R_d della resistenza si ottiene a partire dal valore caratteristico R_k applicando il coefficiente parziale γ_R che per gli ancoraggi definitivi che vale in accordo alle NTC 2008:

$$\gamma_R = 1.2.$$

Inoltre se la resistenza caratteristica R_k dell'ancoraggio viene ricavata attraverso correlazioni empiriche che prevedono l'utilizzo di parametri geotecnici o risultati di prove in sito, il valore caratteristico della resistenza $R_{a,k}$ sarà dato dal minore dei valori ottenuti applicando alle resistenze calcolate $R_{a,cal}$ i fattori di correzione (ξ) riportati nella seguente tabella in funzione del numero di verticali d'indagine.

Nel caso in esame, si è assunto cautelativamente un valore del fattore di correzione (ξ_3) pari a 1.80, che considera che il numero di verticali di indagini presenti lungo la tratta è adottate ai fini della caratterizzazione sia unitario.

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

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

Tabella 7-32 - Fattori di correlazione ξ per la determinazione della resistenza caratteristica in funzione del numero di verticali d'indagine

La resistenza a sfilamento di progetto " R_{ad} " può essere espressa dalla seguente relazione:

$$R_{ad} = Q_{sl} / FS$$

dove:

- Q_{sl} = portata laterale limite
- FS = fattore di sicurezza per la portata laterale

Resistenza	γ_R (R3)	ξ_3 (n° indagini = 5)	FS
Laterale in trazione	1.2	1.8	2.16

Tabella 7-33 - Coefficienti parziali da applicare alle resistenze caratteristiche

La portata laterale limite è calcolata considerando il diametro nominale di perforazione e le tensioni di progetto di adesione laterale limite tirante-terreno $\alpha\tau_{lim}$ riferite al diametro di perforazione; si ottiene quindi:

$$Q_{sl} = \pi \alpha D_p \sum_i \tau_{LIM} h_i$$

La tensione limite di ancoraggio " τ_{lim} " rappresenta la tensione limite che si viene ad avere fra interfaccia terreno – boiaccia cementizia ed è direttamente dipendente dalla tecnologia con cui verrà eseguito il tirante e dalla natura dei terreni.

Per determinare il valore della " τ_{lim} " si fa riferimento a quanto indicato da Bustamante e Doix [1985] che richiedono come parametri caratterizzanti il terreno, la pressione limite p_{lim} determinata con il pressimetro di Ménard o il valore (N_{SPT}) determinato da risultati di prove SPT.

Nella Tabella 7-34 vengono indicati i valori di α che rappresenta un coefficiente moltiplicativo che dipende dalle modalità di iniezione e natura dei terreni. Nel caso in esame si è considerato cautelativamente pari a 1.0.

Terreno	Valori di α		Quantità minima di miscela consigliata
	IRS	IGU	
Ghiaia	1,8	1,3 - 1,4	1,5 V_s
Ghiaia sabbiosa	1,6 - 1,8	1,2 - 1,4	1,5 V_s
Sabbia ghiaiosa	1,5 - 1,6	1,2 - 1,3	1,5 V_s
Sabbia grossa	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	1,5 V_s
Sabbia media	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	1,5 V_s
Sabbia fine	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	1,5 V_s
Sabbia limosa	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	IRS: (1,5 - 2) V_s ; IGU: 1,5 V_s
Limo	1,4 - 1,6	1,1 - 1,2	IRS: 2 V_s ; IGU: 1,5 V_s
Argilla	1,8 - 2,0	1,2	IRS: (2,5 - 3) V_s ; IGU: (1,5-2) V_s
Marne	1,8	1,1 - 1,2	(1,5 - 2) V_s per strati compatti
Calcarei marnosi	1,8	1,1 - 1,2	(2 - 6) V_s o più per strati fratturati
Calcarei alterati o fratturati	1,8	1,1 - 1,2	
Roccia alterata e/o fratturata	1,2	1,1	(1,1-1,5) V_s per strati poco fratturati 2 V_s o più per strati fratturati

Tabella 7-34 - Coefficiente moltiplicativo α

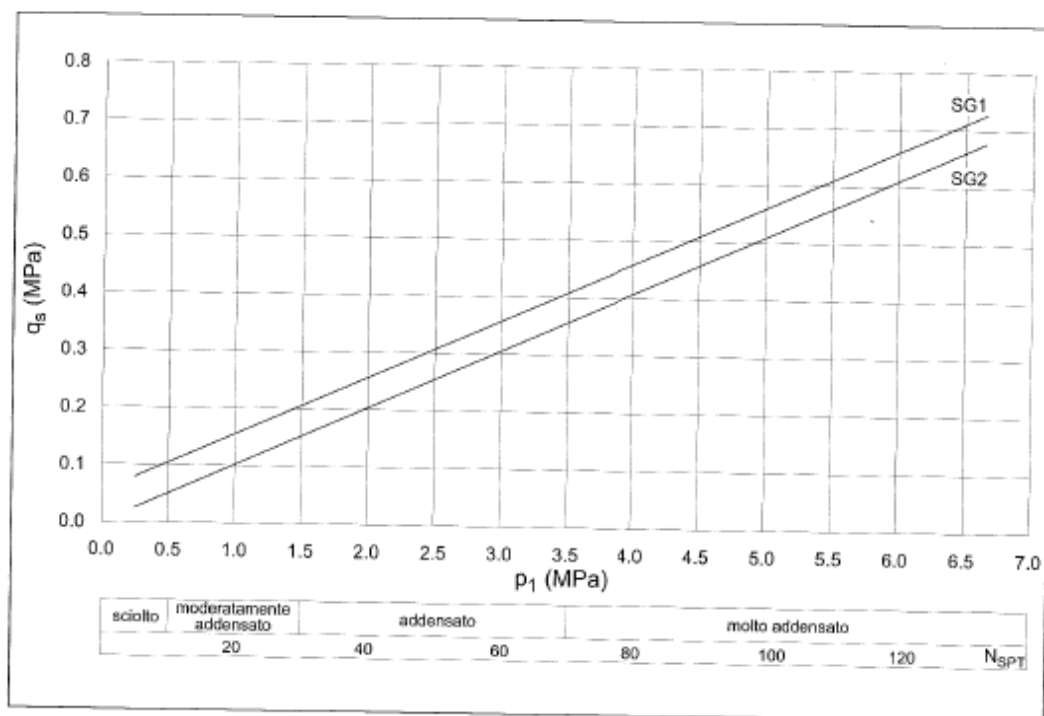
Nella Tabella 7-35 vengono invece stabilite le curve a cui fare riferimento per le differenti tipologie di terreno e del tipo di iniezione.

Terreno	Tipo di iniezione	
	IRS	IGU
Da ghiaia a sabbia limosa	SG1	SG2
Limo e argilla	AL1	AL2
Marna, calcare marnoso, calcare tenero fratturato	MC1	MC2
Roccia alterata e/o fratturata	$\geq R1$	$\geq R2$

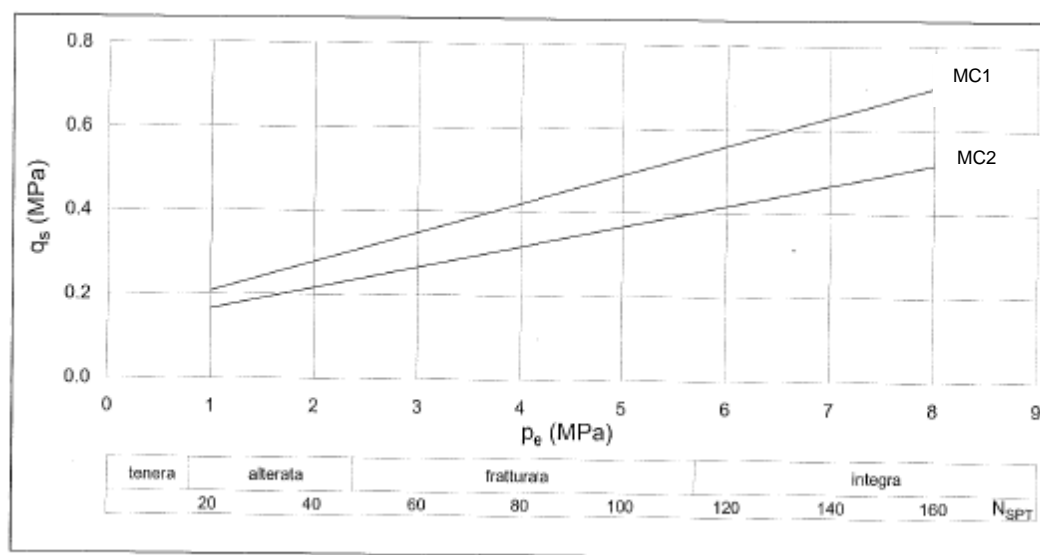
Tabella 7-35 - Curva di riferimento per le diverse tipologie di terreno

In particolare per i terreni attraversati si considerano i seguenti grafici da cui è possibile ricavare il valore della resistenza laterale unitaria (tensione tangenziale) " q_s " ($= \tau_{lim}$) a seconda delle varie tipologie di terreno.

Nel caso in esame si è fatto cautelativamente riferimento alla curva SG2 per il tratto nell'unità DAG e MC2 per il tratto di tirante nell'unità SUB alt e SUB con riferimento alla tecnica di iniezione IGU.



Resistenza unitaria limite per terreni incoerenti



Resistenza unitaria limite per le marne ed i calcari

Figura 7-52: Curve di riferimento per la determinazione di q_s Unità DAG (SG2) e Unità SUB alt e SUB (MC2)

L'adesione laterale limite fondazione-terreno τ_{LIM} sono riassunte in funzione della natura dei terreni nella seguente tabella.

In particolare, cautelativamente per l'unità DAG si è fatto riferimento a un valore di N_{spt} pari a 10 e, mentre per l'unità SUB alt e SUB si è considerato cautelativamente il valore di N_{spt} pari a 15 e 60 rispettivamente.

Unità	τ_{lim} [kPa]
DAG	50
SUB alt	100
SUB	250

Tabella 7-36: Valori di adesione laterale limite di riferimento

Nella seguente tabella è riportato il calcolo della resistenza a sfilamento di progetto del tirante considerando il diametro di perforazione nominale pari a 160 mm.

L _{bulbo-DAG} m	Q _{II-DAG} kN	L _{bulbo-SUB alt} m	Q _{II-SUB Alt} kN	L _{bulbo-SUB} m	Q _{II-SUB} kN	L _{bulbo} m	Q _{II} kN	R _{ad} kN
4.50	113.10	2.00	100.53	9.50	1193.80	16.0	1407.44	651.59

Tabella 7-37: Calcolo della resistenza a sfilamento del tirante

Nella seguente tabella sono invece riassunte le verifiche a sfilamento che risultano soddisfatte.

E _d		R _{ad}
[kN]		[kN]
471.65	<	651.59

Tabella 7-38 Verifiche a sfilamento dei tiranti A1+M1+R3

7.2.9.2 Resistenza a trazione dei trefoli

La resistenza a trazione dei trefoli componenti il tirante di ancoraggio è stata ottenuta mediante la seguente formulazione:

- Resistenza caratteristica a trazione dei trefoli:

$$P_{t,k} = F_{p(1)k} = n_{trefoli} \cdot A_{trefolo} \cdot f_{p(1)k}$$

dove:

- $n_{trefoli}$ rappresenta il numero di trefoli del tirante;
- $A_{trefolo}$ rappresenta l'area del singolo trefolo;
- $f_{p(1)k}$ rappresenta la tensione caratteristica all'1% di deformazione totale.

- Resistenza di progetto a trazione dei trefoli:

$$P_{t,d} = \frac{P_{t,k}}{\gamma_s}$$

con γ_s assunto pari a 1.15 (in accordo al § 4.1.2.1.1.3 del D.M. 14/01/2008).

7.2.9.3 Sintesi delle verifiche sui tiranti

Si è verificato il soddisfacimento della condizione:

$$E_d \leq R_d$$

dove:

- E_d rappresenta la massima sollecitazione di trazione agente nel tirante, determinata agli SLU/SLV
- R_d rappresenta la resistenza di progetto del tirante determinata come la minima tra la resistenza di progetto a sfilamento del bulbo e la resistenza di progetto a trazione dell'armatura ovvero: $R_d = R_{d,min} = \min(F_{td}, P_{td})$.

Il D.M. 14/01/2008 prescrive inoltre, nel rispetto della gerarchia delle resistenze, che si debba verificare che "la resistenza caratteristica al limite di snervamento del tratto libero sia sempre maggiore della resistenza a sfilamento della fondazione dell'ancoraggio", ovvero:

$$P_{t,k} \geq R_{t,k}$$

Nel prospetto seguente si riassumono le verifiche effettuate.

Caratteristiche tirante				Sollecitazioni di calcolo			
n_{trefoli}	=	4	$N_{\text{pret} \times \text{trefolo}}$	=	75 kN	$N_{\text{PLX, SLU}}$	= 362.81 kN
A_{trefolo}	=	150 mm ²	N_{pret}	=	300 kN	$N_{\text{PLX, SLV}}$	= 367.25 kN
E	=	196000 MPa					
interasse	=	1.8 m				$N_{\text{Ed, SLU}}$	= 471.65 kN
EA	=	117600 kN				$N_{\text{Ed, SLV}}$	= 367.25 kN
EA/i	=	65333.3 kN/m					
Resistenza a sfilamento bulbo				Resistenza tirante		Verifica di resistenza	
τ_{DAG}	=	0.05 MPa	f_{ptk}	=	1860 MPa	E_d	= 471.65 kN
$\tau_{\text{SUB ALT}}$	=	0.10 MPa	$f_{\text{p}(1)k}$	=	1670 MPa	R_d	= 651.59 kN
τ_{SUB}	=	0.25 MPa	γ_s	=	1.15	$E_d \leq R_d$	ok
α	=	1 -	P_{tk}	=	1002.0 kN		
ϕ_{perf}	=	0.16 m				Verifica gerarchia	
ξ	=	1.8 -				$P_{tk} \geq R_{tk}$	ok
L_{DAG}	=	4.50 m					
$L_{\text{SUB ALT}}$	=	2.00 m					
L_{SUB}	=	9.50 m					
Q_{II}	=	1407.4 kN					
R_{tk}	=	781.9	P_{td}	=	871.3 kN		
γ_R	=	1.2					
R_{td}	=	651.6 kN					

Tabella 7-39: Sintesi verifiche tiranti di ancoraggio

7.3 Pila 3

Le opere provvisionali previste in corrispondenza della pila 3 sono state dimensionate sulla base del modello sviluppato e dei risultati ottenuti per le opere provvisionali della pila 2.

In corrispondenza della pila 3 infatti si presenta una stratigrafia simile a quella della pila 2 (s elaborato APE 0003 – Profilo e Sezioni Geotecniche – Viadotto Rastignano) e identica altezza di scavo pari a 3.05 m.

Si rimanda pertanto al precedente paragrafo 7.2 per il calcolo di dettaglio.

7.4 Pila 4

7.4.1 Modello Plaxis

Per il calcolo delle opere provvisionali previste in corrispondenza della pila 4 è stato sviluppato cautelativamente il modello di calcolo piano riportato nella seguente figura, rappresentativo della sezione trasversale al viadotto in asse alla pila con altezza di scavo tra le quote +98.00 m÷96.00 m (piano campagna variabile) e +90.00 (presunto tetto dell'Unità SUB) ovvero variabile tra 6.00 m e 8.00 m.

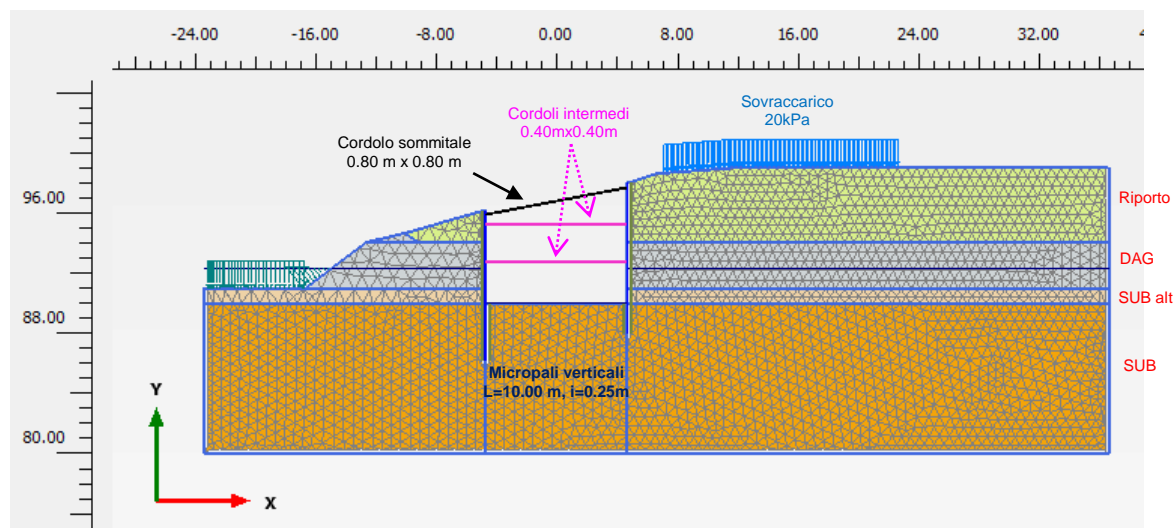



Figura 7-53: Modello di calcolo Plaxis - Opere provvisionali Pila 4

Si è adottata la stratigrafia riportata nella seguente tabella con riferimento alle quote in asse pila.

Quote assolute [m s.l.m.]		Unità
da	A	
p.c	94.06	RIP
94.06	90.90	DAG
90.90	90.00	SUB alt
<90.00		SUB

Tabella 7-40: - Stratigrafia di riferimento Pila 4

	<p style="text-align: right;">VARIANTE ALLA SP65 "DELLA FUTA NODO DI RASTIGNANO – 2° LOTTO DI COMPLETAMENTO Tratto compreso tra svincolo di Rastignano e Ponte Delle Oche nei comuni di San Lazzaro di Savena, Bologna e Pianoro Progetto Definitivo</p> <p style="text-align: center;">RELAZIONE DI CALCOLO OPERE PROVVISORIALI DEL VIADOTTO RASTIGNANO</p>
---	---

La falda è stata assunta con livello iniziale a quota +91.86 m in asse pila, mentre durante le fasi di scavo essendo i micropali tangenti si è adottato il livello di falda internamente allo scavo coincidente con il fondo scavo stesso, mentre esternamente coincidente con il livello iniziale.

A tergo della paratia (lato monte) si è applicato un sovraccarico pari a 20 kPa per una striscia di larghezza 15.50 m agente sul piano campagna ad una distanza dalla paratia pari a 2.43 m al fine di simulare la presenza della casa cantoniera, del sovraccarico stradale o di un eventuale sovraccarico di cantiere.

7.4.2 Dati di input dei materiali

Per i principali parametri geotecnici adottati nelle elaborazioni Plaxis per i diversi materiali si rimanda al §5.

I micropali verticali sono stati modellati mediante elementi "Plate" le cui caratteristiche sono indicate nella tabella seguente.

Parameter	Name	Unit	
Micropali verticali			
ϕ_{perf} 240 mm – Armatura ϕ 168.3 mm sp. 8 mm - i=0.25m			
Type of behaviour			Elastic; Isotropic
Normal stiffness	EA	kN/m	7 505 189
Flexural rigidity	EI	kNm ² /m	25 892
Unit weight	w	kN/m/m	5.22
Poisson's ratio	ν	-	0.0

Tabella 7-41: - Dati di input elementi strutturali schematizzati come "plate".

In particolare i valori finalizzati al calcolo della rigidezza assiale e flessionale sono stati calcolati considerando il solo contributo del tubolare.

Il cordolo sommitale e i cordoli intermedi in c.a. sono stati modellati mediante degli elementi "Node to Node Anchor" resistenti a solo sforzo assiale le cui caratteristiche sono riassunte nella seguente tabella analogamente a quanto fatto per la pila 1 (§7.1.2).

Parameter	Name	Unit	
Cordolo sommitale 0.80m x 0.80m			
Material type			Elastic; Isotropic
Normal stiffness	EA	kN/m	120 000
L_{spacing}	-	m	1.00
$F_{\text{max, comp}}$	-	kN	1889
Cordoli intermedi 0.50m x 0.50m			
Material type			Elastic; Isotropic
Normal stiffness	EA	kN/m	18 076
L_{spacing}	-	m	1.00
$F_{\text{max, comp}}$	-	kN	753

Tabella 7-42: - Dati di input elementi strutturali schematizzati come "node to node anchor".

7.4.3 Descrizione fasi di calcolo

Le analisi eseguite sono di tipo sequenziale e riproducono in successione tutte le principali fasi operative previste per la realizzazione dell'opera e condizioni di verifica. La messa in opera degli elementi strutturali (paratie) viene simulata attivando i relativi elementi strutturali, mentre la fase di scavo viene simulata mediante la disattivazione attivazione dei cluster di terreno corrispondenti.

Le fasi di calcolo considerate sono riportate nel seguito:

- Fase 0. Fase geostatica iniziale (Figura 7-54);
- Fase 1. Applicazione sovraccarico 20 kPa (Figura 7-55)
- Fase 2. Realizzazione micropali (Figura 7-56);
- Fase 3. Scavo per realizzazione cordolo sommitale (Figura 7-57)
- Fase 4. SLE/Realizzazione cordolo sommitale e scavo a quota +95.00m (Figura 7-58);
- Fase 5. SLU/STR A1+M1+R1 Realizzazione cordolo sommitale e scavo a quota +95.00m;
- Fase 6. SLU/GEO A2+M2+R1 Realizzazione cordolo sommitale e scavo a quota +95.00m;
- Fase 7. SLE/Realizzazione trave a quota+95.25 m (quota asse) e scavo a quota +92.50m (a partire dalla Fase 4) (Figura 7-59);
- Fase 8. SLU/STR A1+M1+R1 Realizzazione trave a quota+95.25 m (quota asse) e scavo a quota +92.50m;
- Fase 9. SLU/GEO A2+M2+R1 Realizzazione trave a quota+95.25 m (quota asse) e scavo a quota +92.50m;
- Fase 10. SLE/Realizzazione trave a quota +92.75 m (quota asse) e scavo a quota +90.00m (a partire dalla Fase 7) (Figura 7-60);
- Fase 11. SLU/STR A1+M1+R1 Realizzazione trave a quota +92.75 m (quota asse) e scavo a quota +90.00m;
- Fase 12. SLU/GEO A2+M2+R1 Realizzazione trave a quota +92.75 m (quota asse) e scavo a quota +90.00m;
- Fase 13. SLU/GEO_stab A2+M2+R2.

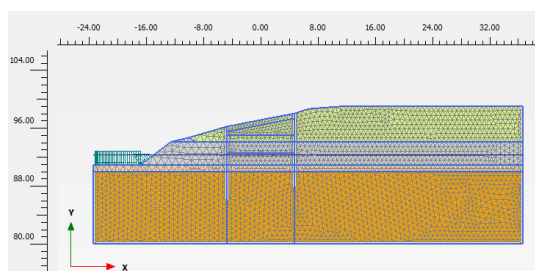


Figura 7-54: Fase 0 - Fase geostatica iniziale

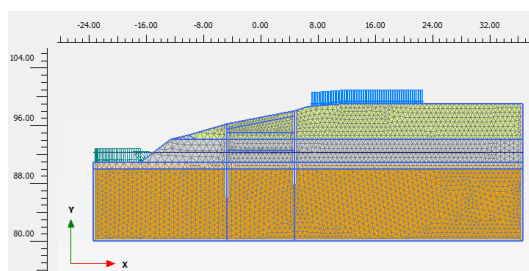


Figura 7-55: Fase 1 – Applicazione sovraccarico 20 kPa

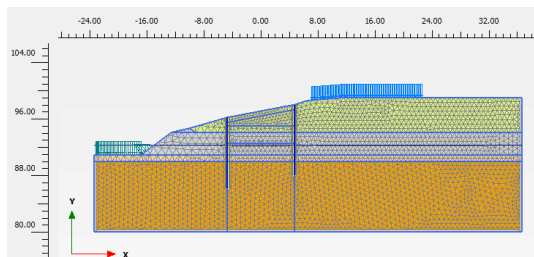


Figura 7-56: Fase 2 – Realizzazione micropali

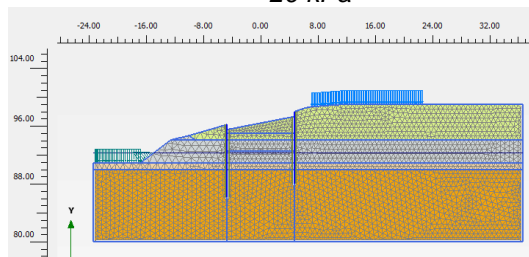


Figura 7-57: Fase 3 – Scavo per realizzazione cordolo

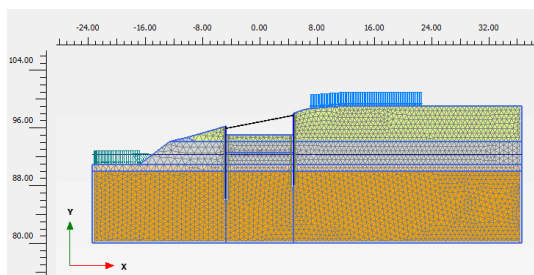


Figura 7-58: Fasi 4, 5, 6 - Realizzazione cordolo sommitale e scavo a quota +95.00m

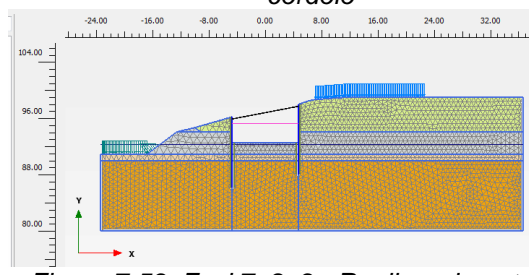


Figura 7-59: Fasi 7, 8, 9 - Realizzazione trave a quota +95.25 m e scavo a quota +92.50m

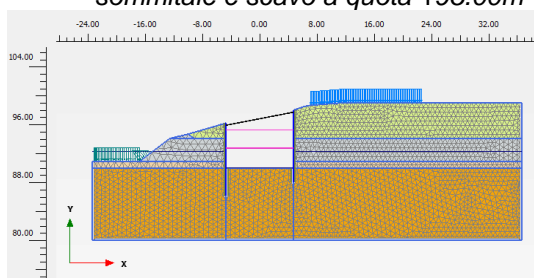


Figura 7-60: Fasi 10, 11, 12 - Realizzazione trave a quota +92.75 m e scavo a quota +90.00m

7.4.4 Sintesi dei risultati per gli Stati Limite di Esercizio (SLE)

Nel seguito è riportata una sintesi dei risultati in termini di:

- spostamenti;
- sollecitazioni sugli elementi strutturali.

7.4.4.1 SLE - Spostamenti

Nel seguito è riportata una sintesi dei risultati in termini di spostamenti.

Si ottiene:

- In fase 4 uno spostamento orizzontale variabile tra circa 0.02 cm (lato alveo) a circa 0.33 cm (lato strada) (Figura 7-61);
- In fase 7 uno spostamento orizzontale variabile tra circa 0.6 cm (lato alveo) a circa 1.3 cm (lato strada) (Figura 7-62);
- In fase 10 uno spostamento orizzontale variabile tra circa 0.2 cm (lato alveo) a circa 2.6 cm (lato strada) (Figura 7-63)

Tali spostamenti risultano compatibili con la funzionalità dell'opera.

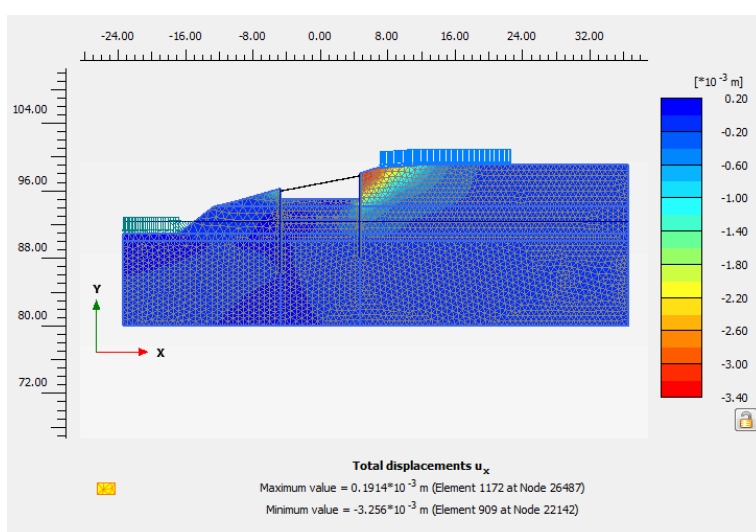


Figura 7-61: Fase 4 – SLE Combinazione Rara: Spostamenti orizzontali

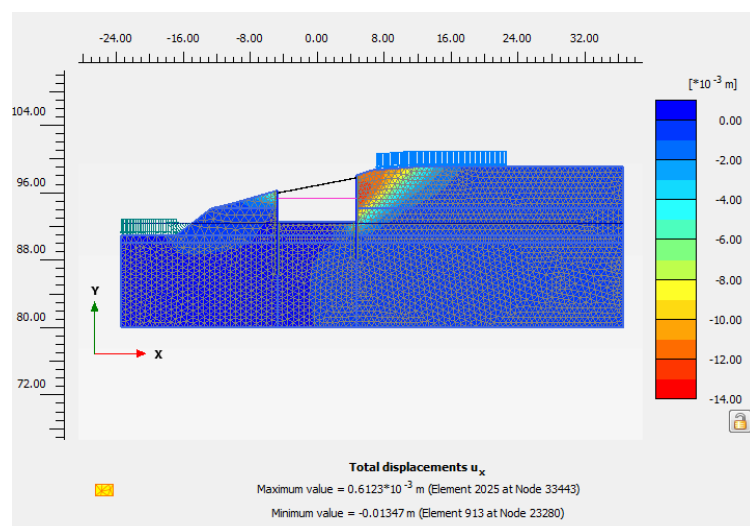


Figura 7-62: Fase 7 – SLE Combinazione Rara: Spostamenti orizzontali

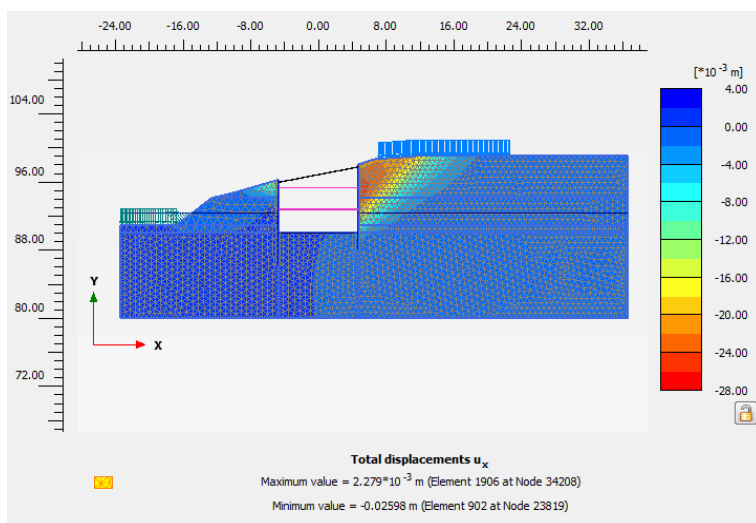


Figura 7-63: Fase 10 – SLE Combinazione Rara: Spostamenti orizzontali

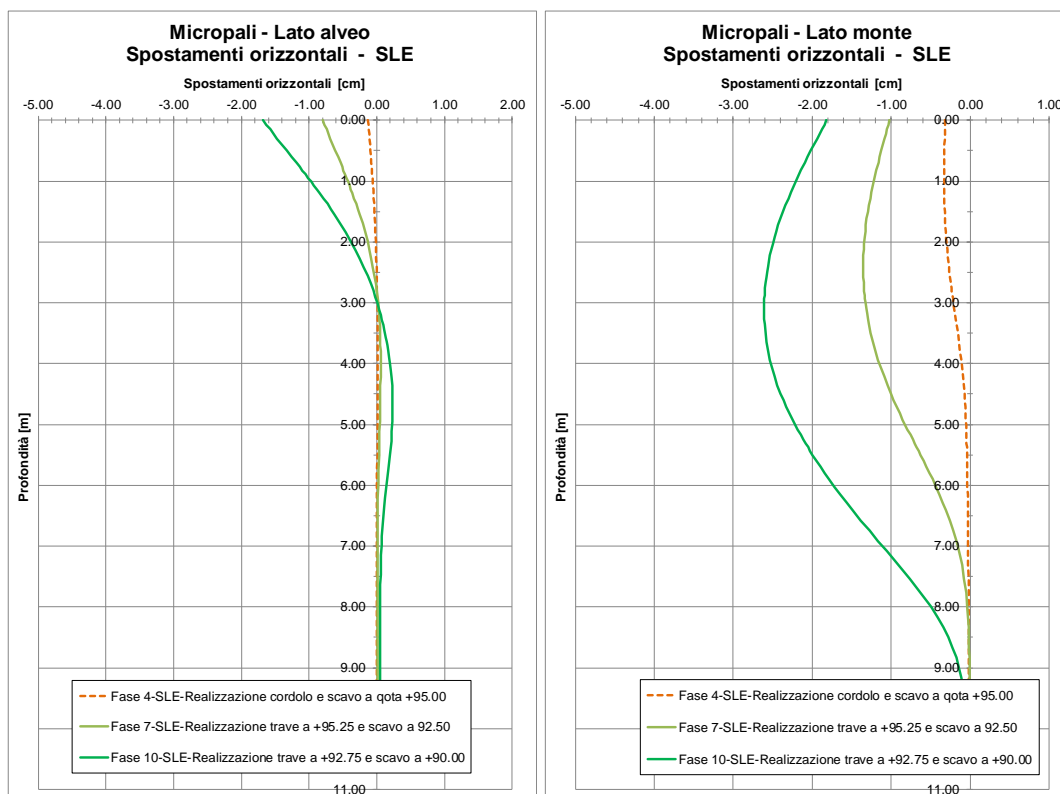


Figura 7-64: Fasi 4, 7, 10 – SLE Combinazione Rara: Spostamenti orizzontali micropali lato alveo e lato monte

7.4.4.2 SLE - Sollecitazioni nei micropali

Nel seguito è riportata una sintesi dei risultati in termini di sollecitazioni allo stato limite di esercizio.

Si intendono positivi gli sforzi assiali di compressione.

		Micropali Lato Alveo	Micropali Lato Monte
$V_{Ed,max}$	[kN]	13.71	23.63
$N_{Ed,max}$	[kN]	8.91	33.24
$N_{Ed,min}$	[kN]	-5.81	-1.71
$M_{Ed,max}$	[kNm]	15.07	22.45

Tabella 7-43: - SLE- Sintesi sollecitazioni massime.

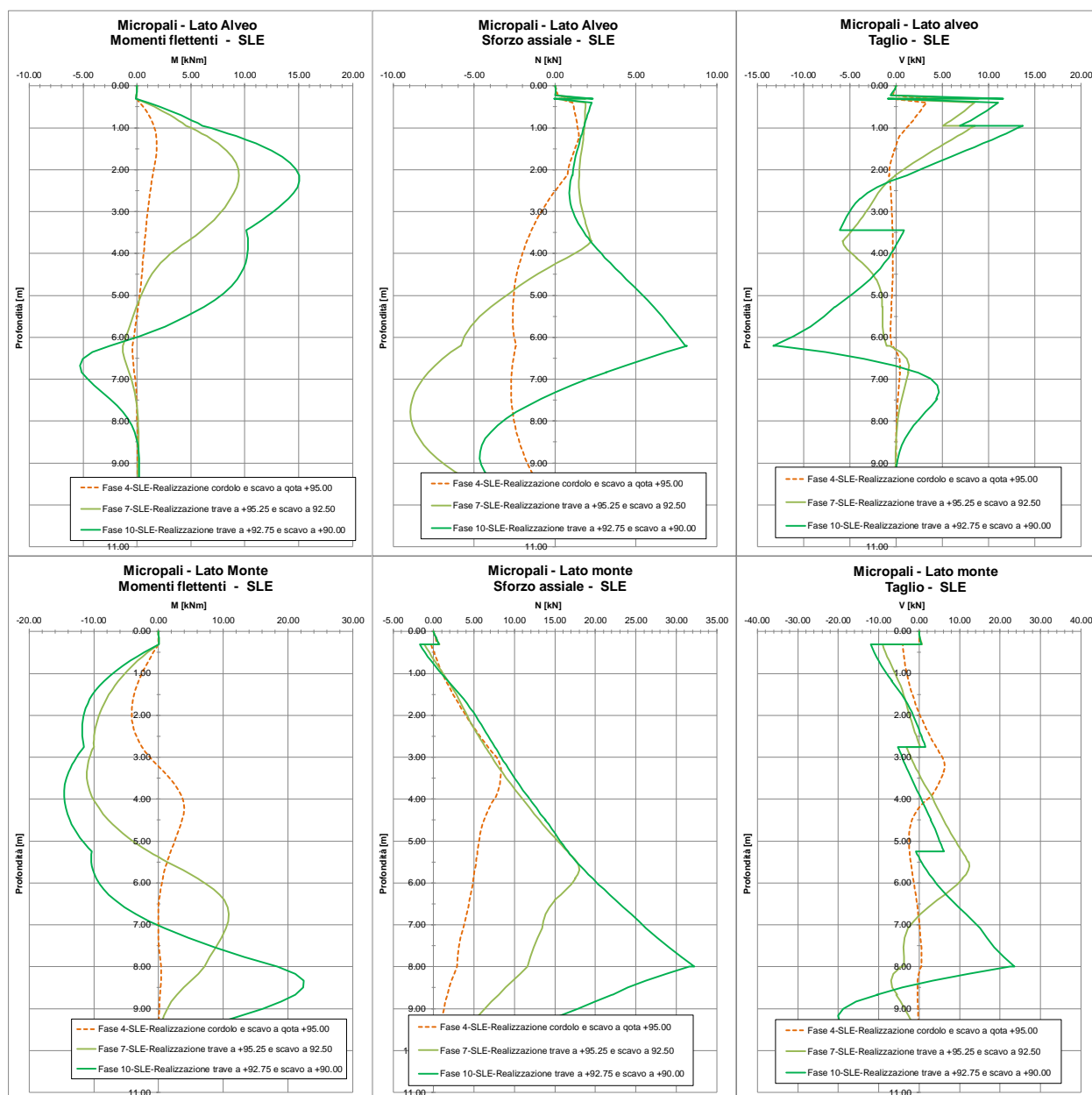



Figura 7-65: Fasi 4, 7, 10 - SLE - Diagrammi delle sollecitazioni

	<p style="text-align: right;">VARIANTE ALLA SP65 "DELLA FUTA NODO DI RASTIGNANO – 2° LOTTO DI COMPLETAMENTO Tratto compreso tra svincolo di Rastignano e Ponte Delle Oche nei comuni di San Lazzaro di Savena, Bologna e Pianoro Progetto Definitivo</p> <p style="text-align: center;">RELAZIONE DI CALCOLO OPERE PROVVISORIALI DEL VIADOTTO RASTIGNANO</p>
---	--

7.4.4.3 SLE - Sollecitazioni nei cordoli in c.a.

Nella seguente tabella si riassume la massima azione di compressione agente negli elementi "Node to Node Anchor" con interasse pari a 1m adottati per schematizzare i cordoli in c.a.

Fase	Cordolo sommitale 0.80 m x 0.80 m N_{SLE} [kN]	Cordolo intermedio +95.25 m 0.50 m x 0.50 m N_{SLE} [kN]	Cordolo intermedio +92.75 m 0.50 m x 0.50 m N_{SLE} [kN]
Fase 4 – SLE	16.69	-	-
Fase 7 – SLE	39.67	13.93	-
Fase 10 – SLE	50.96	27.10	27.86

Tabella 7-44: SLE - "Node to node anchor" Sollecitazioni

Alla luce della schematizzazione adottata il carico assiale N_{ED} ottenuto corrisponde al carico distribuito q .

Con riferimento alla formulazione riportata al §7.1.4.2, e sulla base dei risultati riportati nella precedente tabella si ottengono in corrispondenza del cordolo le sollecitazioni riportate nella seguente tabella.

Sulla base dei risultati riportati in Tabella 7-44 si ottengono in corrispondenza dei cordoli le sollecitazioni agenti allo SLE riportate nella seguente tabella.

Cordolo	$q_{max,SLE}$ [kN/m]	R [m]	$N_{Ed,SLE}$ [kN]	$M_{Ed,SLE}$ [kNm]
Cordolo sommitale 0.80 m x 0.80 m	50.96	4.80	244.61	293.53
Cordolo intermedio +95.25 m 0.50 m x 0.450 m	27.10	4.38	118.70	129.97
Cordolo intermedio +92.75 m 0.50 m x 0.450 m	27.86	4.38	122.03	133.62

Tabella 7-45: SLE – Sollecitazioni nei cordoli in c.a.

7.4.5 Sintesi dei risultati per gli Stati Limite Ultimi strutturali (STR)

7.4.5.1 SLU/STR Sollecitazioni nei micropali

Nel seguito è riportata una sintesi dei risultati in termini di sollecitazioni allo stato limite ultimo di tipo strutturale (STR). Si intendono positivi gli sforzi assiali di compressione.

	Micropali Lato alveo	Micropali Lato monte
$V_{Ed,max}$ [kN]	18.03	23.63
$N_{Ed,max}$ [kN]	2.74	32.24
$N_{Ed,min}$ [kN]	-11.75	-1.71
$M_{Ed,max}$ [kNm]	19.83	22.45

Tabella 7-46: - SLU/STR A1+M1+R1- Sintesi sollecitazioni massime.

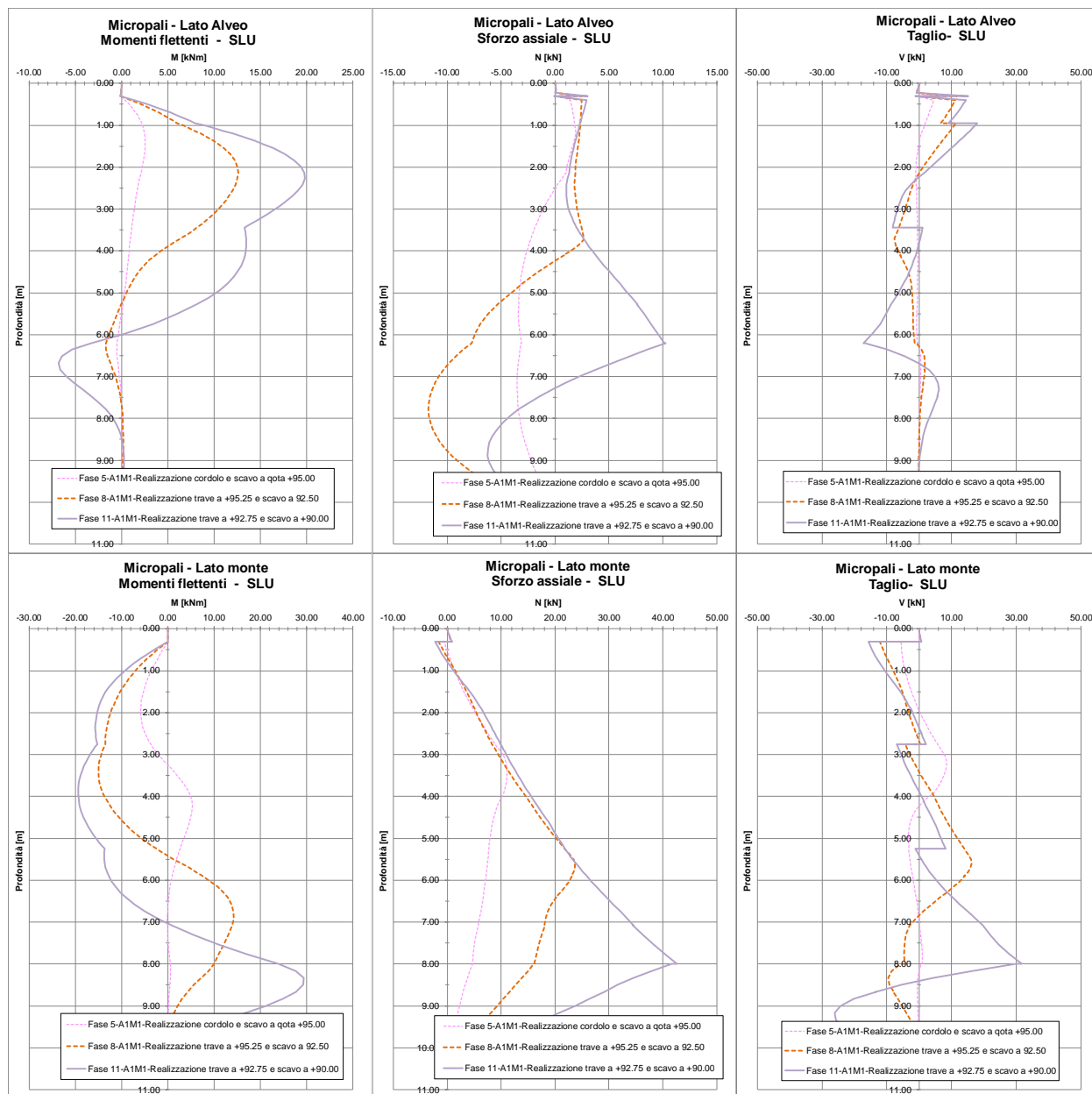


Figura 7-66: Fasi 5, 8, 11 – SLU/STR A1+M1+R1 - Diagrammi delle sollecitazioni

7.4.5.2 SLU/STR Sollecitazioni nei cordoli in c.a.

Nella seguente tabella si riassume la massima azione di compressione agente negli elementi "Node to Node Anchor" con interasse pari a 1m adottati per schematizzare i cordoli in c.a.

Fase	Cordolo sommitale 0.80 m x 0.80 m N_{SLU} [kN]	Cordolo intermedio +95.25 m 0.50 m x 0.50 m N_{SLU} [kN]	Cordolo intermedio +92.75 m 0.50 m x 0.50 m N_{SLU} [kN]
Fase 5 – SLU/STR	22.81	-	-
Fase 8 – SLU/STR	52.26	19.04	-
Fase 11 – SLU/STR	66.66	35.96	37.34

Tabella 7-47: SLU/STR - "Node to node anchor" Sollecitazioni

Alla luce della schematizzazione adottata il carico assiale N_{ED} ottenuto corrisponde al carico distribuito q .

Con riferimento alla formulazione riportata al §7.1.4.2, e sulla base dei risultati riportati nella precedente tabella si ottengono in corrispondenza dei cordoli le sollecitazioni agenti allo SLU riportate nella seguente tabella.

Cordolo	$q_{max,SLU}$ [kN/m]	R [m]	$N_{Ed,SLU}$ [kN]	$M_{Ed,SLU}$ [kNm]
Cordolo sommitale 0.80 m x 0.80 m	66.66	4.80	319.97	383.96
Cordolo intermedio +95.25 m 0.50 m x 0.450 m	35.96	4.38	157.50	172.47
Cordolo intermedio +92.75 m 0.50 m x 0.450 m	37.34	4.38	163.55	179.09

Tabella 7-48: SLU/STR – Sollecitazioni agenti nei cordoli in c.a.

7.4.5.3 Sintesi dei risultati per gli Stati Limite Ultimi geotecnici (GEO)

Nel seguito è riportata una sintesi dei risultati per gli limiti ultimi di tipo geotecnico GEO.

7.4.5.3.1 SLU/GEO A2+M2+R1

Con i parametri del terreno ridotti con i coefficienti parziali M2 si è avuto la convergenza dei modelli Plaxis a conferma del soddisfacimento delle verifiche nei confronti della rotazione dell'opera. Nelle figure seguenti si riporta il campo di spostamenti al termine della fase di calcolo.

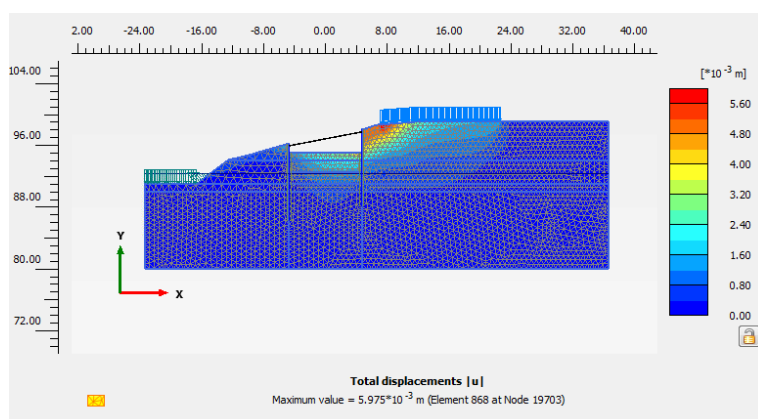


Figura 7-67: Fase 6 – A2+M2+R1 Realizzazione cordolo sommitale e scavo a quota +95.00m. Campo degli spostamenti

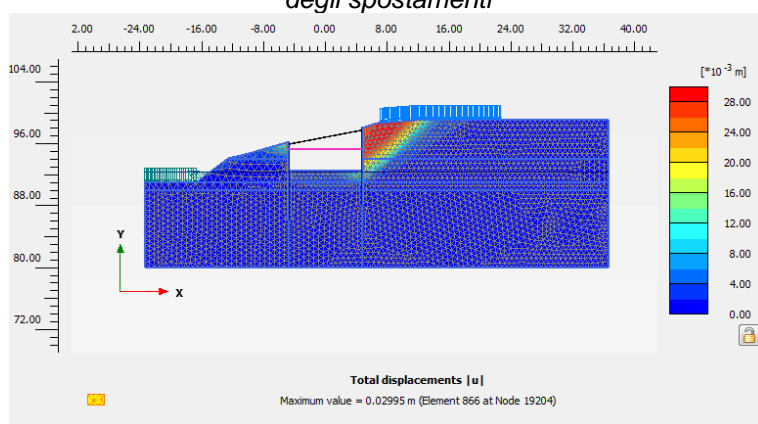


Figura 7-68: Fase 9 – A2+M2+R1 Realizzazione trave a quota +95.25 m (quota asse) e scavo a quota +92.50m. Campo degli spostamenti

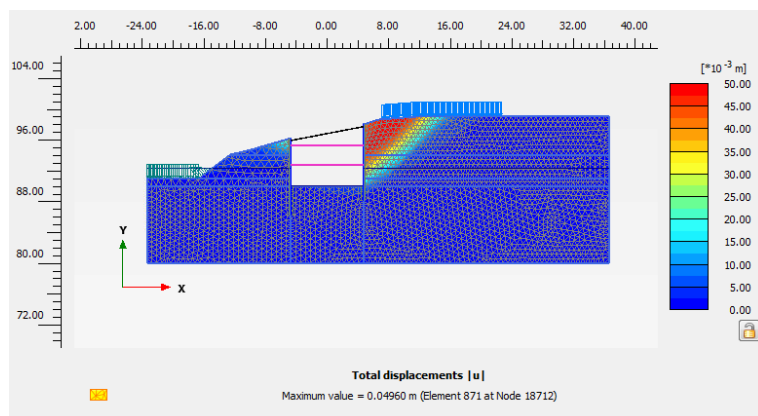


Figura 7-69: Fase 12 – A2+M2+R1 Realizzazione trave a quota +92.75 m (quota asse) e scavo a quota +90.00m. Campo degli spostamenti

7.4.5.3.2 Sintesi dei risultati per le analisi di stabilità (GEO_stab)

L'analisi di stabilità dell'insieme terreno-opera è stata effettuata secondo l'approccio 1, combinazione 2: A2+M2+R2.

Nelle figure seguenti si riportano i risultati delle analisi Plaxis (phi-c reduction) in termini di moltiplicatore totale ΣM_{sf} e di mappa a colori degli spostamenti dalla quale si evince il cinematismo critico per il quale si è ottenuto un coefficiente di sicurezza superiore al minimo richiesto da normativa.

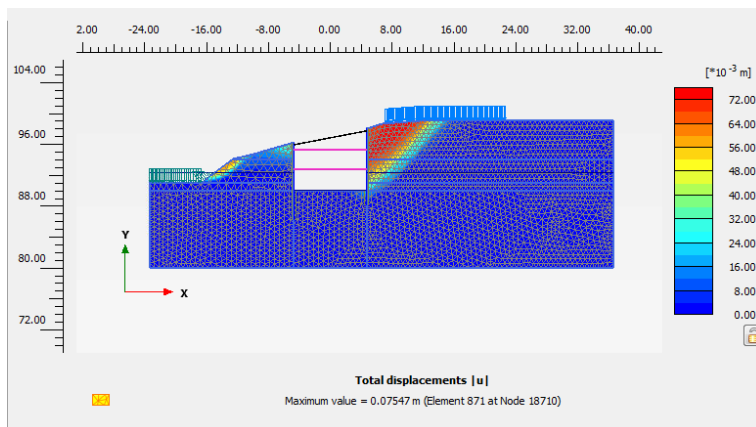


Figura 7-70: Fase 13 – SLU/GEO_stab A2+M2+R2-Combinazione fondamentale. Cinematismo critico

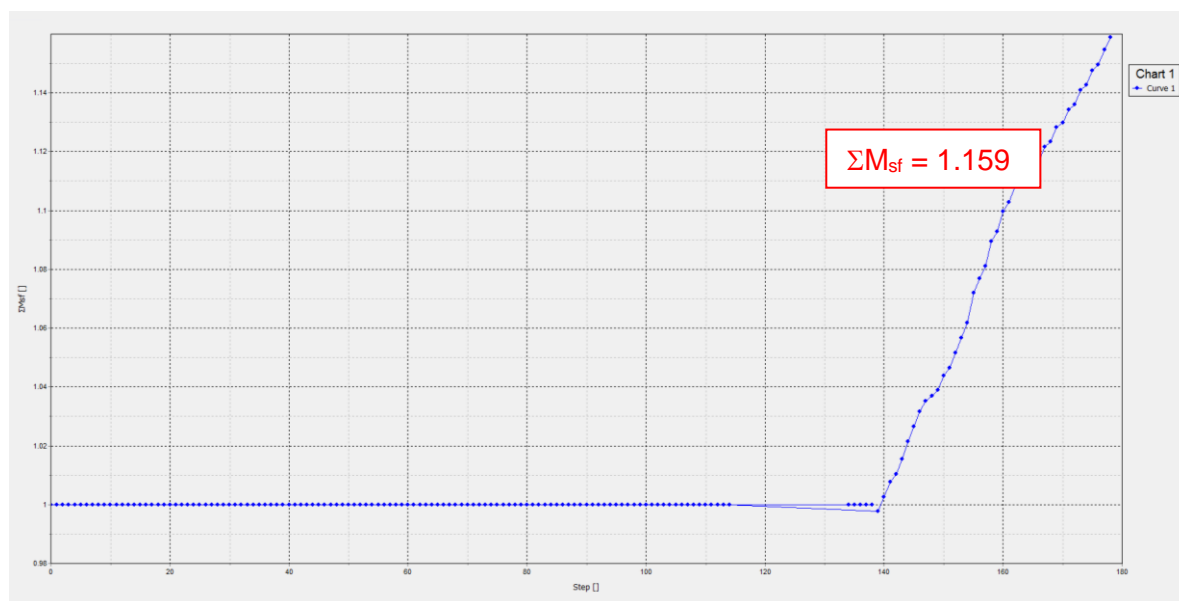


Figura 7-71: Fase 13 – SLU/GEO_stab A2+M2+R2-Combinazione fondamentale. Moltiplicatore totale ΣM_{sf}

7.4.6 Verifiche SLU di tipo strutturale

7.4.6.1 Verifiche strutturali micropali

Con riferimento alle caratteristiche dei materiali riportate al § 3, alle caratteristiche geometriche dei tubolari metallici ($\phi_{est}=168.3$ mm-sp.8 mm) e alle sollecitazioni risultanti riportate al §7.4.5.1, sono state condotte le verifiche allo SLU nei confronti del raggiungimento della resistenza strutturale dei micropali per sollecitazioni di taglio e presso-tenso flessione retta in accordo alle prescrizioni riportate al paragrafo 4.2.4.1 delle NTC 2008 e alla norma EN 1993-1-1.

Nella seguente tabella si riporta il tasso di sfruttamento massimo ottenuto per le fasi di calcolo 5 e 11 per i micropali lato alveo e per i micropali lato monte.

Tabella 7-49 : Tasso di sfruttamento massimo Micropali

Lato	Fase SLU	$N_{Ed}/N_{pl,Rd}$	$V_{Ed}/V_{ply,Rd}$	$M_{Ed}/M_{VN,pl,y,Rd}$
Alveo	Fase 5	0.00	0.02 (z=0.30m)	0.04 (z=1.46m)
	Fase 8	0.01 (z=7.94m)	0.05 (z=0.30m)	0.18 (z=2.14m)
	Fase 11	0.01 (z=6.20m)	0.07 (z=6.20m)	0.29 (z=7.77m)
Monte	Fase 5	0.01 (z=3.35m)	0.03 (z=3.26m)	0.08 (z=1.92m)
	Fase 8	0.02 (z=5.50m)	0.06 (z=5.50m)	0.22 (z=3.35m)
	Fase 11	0.03 (z=8.00m)	0.13 (z=8.00m)	0.42 (z=8.33m)

A titolo esemplificativo si riporta il calcolo condotto per la sezione per la quale è stato ottenuto tasso di sfruttamento massimo pari a **0.42**.

DATI DI INPUT	
© Dott. Ing. Simone Caffè - 25/02/2013 (macro Excel sviluppata dall'Ing. Marco Panzano)	
Tipo di acciaio utilizzato	S 355
Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di resistenza	γ_{M0} 1.05 [-]
Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di stabilità	γ_{M1} 1.05 [-]
Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di rottura	γ_{M2} 1.25 [-]
Caratteristiche del profilo	
Sezione trasversale del tubolare	Ø168.3/8
Diametro esterno del profilo tubolare (UTENTE)	d_{ext} [mm]
Spessore del profilo tubolare (UTENTE)	t [mm]
Diametro esterno del profilo tubolare utilizzato nelle verifiche	168.3 [mm]
Spessore del profilo tubolare utilizzato nelle verifiche	8 [mm]

Comb.	N_{Ed}	$V_{z,Ed}$	$V_{y,Ed}$	$M_{y,Ed}$	$M_{z,Ed}$	T_{Ed}	Verifica
[n°]	[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[-]
1	34.56	4.46			29.43		✓ 0.42

RESISTENZA E STABILITA' DEI PROFILI TUBOLARI - Metodo B - EN 1993 - 1 - 1:2010		
Materiali utilizzati © Dott. Ing. Simone Caffè - 25/02/2013		
Valore di snervamento dell'acciaio del profilo	f_{yk}	355 [N/mm ²]
Valore di rottura dell'acciaio del profilo	f_{uk}	510 [N/mm ²]
Modulo di elasticità dell'acciaio del profilo	E	210000 [N/mm ²]
Modulo di elasticità tangenziale dell'acciaio del profilo	G	80769 [N/mm ²]
Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di resistenza	γ_{M0}	1.05 [-]
Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di stabilità	γ_{M1}	1.05 [-]
Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di rottura	γ_{M2}	1.25 [-]

Caratteristiche meccaniche del profilo		
Diametro esterno del profilo tubolare	d_{ext}	168.30 [mm]
Spessore del profilo tubolare	t	8.00 [mm]
Diametro interno	d_{int}	152.30 [mm]
Raggio esterno	r_{ext}	84.15 [mm]
Raggio interno	r_{int}	76.15 [mm]
Area della sezione trasversale	A	4029 [mm ²]
Momento d'inerzia della sezione trasversale attorno all'asse forte	I_y	1.2973E+07 [mm ⁴]
Modulo di resistenza elastico attorno all'asse forte	$W_{el,y}$	1.5416E+05 [mm ³]
Modulo di resistenza plastico attorno all'asse forte	$W_{pl,y}$	2.0574E+05 [mm ³]
Area resistente a taglio nel piano dell'anima	$A_{v,z}$	2565 [mm ²]
Raggio d'inerzia attorno all'asse forte	i_y	56.75 [mm]
Momento d'inerzia della sezione trasversale attorno all'asse debole	I_z	1.2973E+07 [mm ⁴]
Modulo di resistenza elastico attorno all'asse debole	$W_{el,z}$	1.5416E+05 [mm ³]
Modulo di resistenza plastico attorno all'asse debole	$W_{pl,z}$	2.0574E+05 [mm ³]
Area resistente a taglio nel piano delle ali	$A_{v,y}$	2565 [mm ²]
Raggio d'inerzia attorno all'asse debole	i_z	56.75 [mm]
Momento d'inerzia torsionale	I_t	2.595E+07 [mm ⁴]

Caratteristiche di sollecitazione nella sezione di verifica		
Forza normale (positiva se di compressione)	N_{Ed}	34.56 [kN]
Forza di taglio agente in direzione parallela all'anima	$V_{z,Ed}$	4.46 [kN]
Forza di taglio agente in direzione parallela alle ali	$V_{y,Ed}$	[kN]
Momento flettente attorno all'asse maggiore di inerzia	$M_{y,Ed}$	[kNm]
Momento flettente attorno all'asse minore di inerzia	$M_{z,Ed}$	29.43 [kNm]
Momento torcente primario (alla Saint Venant)	T_{Ed}	[kNm]

Classificazione della sezione trasversale di verifica		
Coefficiente ε	ε	0.814 [-]
Rapporto tra diametro esterno e spessore	ρ	21.038 [-]
Rapporto limite per la classe 1	ρ_1	33.099 [-]
Rapporto limite per la classe 2	ρ_2	46.338 [-]
Rapporto limite per la classe 3	ρ_3	59.577 [-]
Classificazione della sezione trasversale	CL	1

Verifiche di resistenza della sezione trasversale		
Resistenza a trazione pura		
Resistenza plastica a trazione	$N_{t,Rd}$	1362.11 [kN]
Verifica a trazione pura	P_{Nt}	0.000 [-]
Resistenza a compressione pura		
Resistenza a compressione pura	$N_{c,Rd}$	1362.11 [kN]
Verifica a compressione pura	P_{Nc}	0.025 [-]
Resistenza a torsione e taglio		
Diametro medio della sezione trasversale	d_{med}	160.30 [mm]
Area della sezione compresa nel diametro medio	Ω	20181.66 [mm ²]
Tensioni tangenziali dovute al momento torcente	$\tau_{t,Ed}$	0.00 [N/mm ²]
Verifica tensionale per pura torsione	P_T	0.000 [-]
Resistenza plastica a taglio	$V_{pl,Rd}$	500.65 [kN]
Resistenza plastica a taglio ridotta per effetto della torsione	$V_{pl,T,Rd}$	500.65 [kN]
Verifica a taglio in direzione z - z	P_{Vz}	0.009 [-]
Verifica a taglio in direzione y - y	P_{Vy}	0.000 [-]
Resistenza a flessione		
Modulo di resistenza di calcolo per flessione attorno all'asse y - y	W_y	2.06E+05 [mm ³]
Resistenza a flessione attorno all'asse y - y	$M_{cy,Rd}$	69.56 [kNm]
Verifica flessionale attorno all'asse y - y	P_{My}	0.000 [-]
Modulo di resistenza di calcolo per flessione attorno all'asse z - z	W_z	2.06E+05 [mm ³]
Resistenza a flessione attorno all'asse z - z	$M_{cz,Rd}$	69.56 [kNm]
Verifica flessionale attorno all'asse z - z	P_{Mz}	0.423 [-]
Resistenza a flessione e taglio (per sezioni in classe 1 o 2)		
Fattore di riduzione per la presenza della forza di taglio in direzione z - z	$\rho_{Vz,red}$	1.00 [-]
Fattore di riduzione per la presenza della forza di taglio in direzione y - y	$\rho_{Vy,red}$	1.00 [-]
Resistenza a flessione ridotta, per flessione attorno all'asse y - y	$M_{Vy,Rd}$	69.56 [kNm]
Verifica flessionale attorno all'asse y - y	P_{My-Vz}	0.000 [-]
Resistenza a flessione ridotta, per flessione attorno all'asse z - z	$M_{Vz,Rd}$	69.56 [kNm]
Verifica flessionale attorno all'asse z - z	P_{Mz-Vy}	0.423 [-]

7.4.6.2 Verifiche strutturali cordoli in c.a.

Con riferimento, alle caratteristiche dei materiali di cui al §3, alla geometria dei cordoli e al valore delle sollecitazioni risultanti riportate al §7.4.4.3 e al §7.4.5.2 sono state condotte le verifiche a pressoflessione con l'ausilio del software Vca SLU.

7.4.6.2.1 Cordolo sommitale

Sono state ipotizzate 15 barre ϕ 20 perimetrali e staffe chiuse ϕ 10/250 mm. Di seguito sono riportati i risultati delle verifiche a pressoflessione allo SLU e il calcolo delle tensioni nel calcestruzzo allo SLE (rara).

Risulta:

- Verifiche SLU a pressoflessione:
 $M_{ed} = 383.96 \text{ kNm} < M_{rd} = 760 \text{ kNm}$
- Verifiche tensioni SLE rara:
 $\sigma_c = 5.294 < 0.6 \cdot f_{ck} = 0.6 \cdot 25 = 15 \text{ MPa}$
 $\sigma_s = 167.1 < 0.8 \cdot f_{yk} = 0.8 \cdot 450 = 360 \text{ MPa}$

Verifica C.A. S.L.U. - File: SLU 80x80

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo: SLU

N° Vertici: 4 Zoom N° barre: 15 Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
1	-40	-40
2	40	-40
3	40	40
4	-40	40

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
11	3.14	-17.8	34.8
12	3.14	17.8	34.8
13	3.14	-17.8	-34.8
14	3.14	17.8	-34.8
15	3.14	0	34.8

Sollecitazioni: S.L.U. Metodo n

N Ed: 319.97 kN
M Ed: 383.96 kNm
x Ed: 0
y Ed: 0

P.to applicazione N: Centro Baricentro cls Coord.[cm] xN 0 yN 0

Tipo rottura: Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

M Rd: 760 kNm

Materiali: B450C C25/30

ϵ_{su} 67.5 ‰ ϵ_{c2} 2 ‰
 f_{yd} 391.3 N/mm² ϵ_{cu} 3.5 ‰
 E_s 200 000 N/mm² f_{cd} 14.17 N/mm²
 E_s/E_c 15 f_{cc}/f_{cd} 0.8
 ϵ_{syd} 1.957 ‰ $\sigma_{c,adm}$ 9.75 N/mm²
 $\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm² τ_{co} 0.6
 τ_{cl} 1.829

Tipo Sezione: Rettan.re Trapezi a T Circolare Rettangoli Coord.

Metodo di calcolo: S.L.U. + S.L.U. Metodo n

Tipo flessione: Retta Deviato

N° rett. 100

Calcola MRd Dominio M-N

L₀ 0 cm Col. modello

Precompresso

Figura 7-72: Cordolo Sommitale Verifiche SLU a pressoflessione

Verifica C.A. S.L.U. - File: SLE 80x80

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008

TITOLO: SLE

N° Vertici: 4 Zoom N° barre: 15 Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
1	-40	-40
2	40	-40
3	40	40
4	-40	40

Sollecitazioni: S.L.U. Metodo n

N_{Ed}: 0 244.61 kN
M_{xEd}: 0 293.53 kNm
M_{yEd}: 0 0

P.to applicazione N: Centro Baricentro cls
Coord.[cm] xN: 0 yN: 0

Tipo Sezione: Rettan.re Trapezi
a T Circolare
Rettangoli Coord.

Metodo di calcolo: S.L.U.+ S.L.U.-
Metodo n

Materiali: B450C C25/30

ε_{su}: 67.5 ‰ ε_{c2}: 2 ‰
f_{yd}: 391.3 N/mm² ε_{cu}: 3.5 ‰
E_s: 200 000 N/mm² f_{cd}: 14.17 N/mm²
E_s/E_c: 15 f_{cc}/f_{cd}: 0.8
ε_{syd}: 1.957 ‰ σ_{c,adm}: 9.75 N/mm²
σ_{s,adm}: 255 N/mm² τ_{co}: 0.6
τ_{c1}: 1.829

σ_c: -5.294 N/mm²
σ_s: 167.1 N/mm²
ε_s: 0.8356 ‰
d: 76.04 cm
x: 24.49 x/d: 0.3221
δ: 0.8426

Verifica N° iterazioni: 4

Precompresso

Figura 7-73: Cordolo Sommitale Calcolo delle tensioni SLE in combinazione rara.

7.4.6.2.2 Cordoli intermedi

Sono state ipotizzate 16 barre ϕ 20 perimetrali e staffe chiuse ϕ 10/250 mm.

Di seguito sono riportati i risultati delle verifiche a pressoflessione allo SLU e il calcolo delle tensioni nel calcestruzzo allo SLE (rara).

Risulta:

- Verifiche SLU a pressoflessione:
 $M_{ed} = 179.09 \text{ kNm} < M_{rd} = 401.7 \text{ kNm}$
- Verifiche tensioni SLE rara:
 $\sigma_c = 6.48 < 0.6 \cdot f_{ck} = 0.6 \cdot 25 = 15 \text{ MPa}$
 $\sigma_s = 148 < 0.8 \cdot f_{yk} = 0.8 \cdot 450 = 360 \text{ MPa}$

Verifica C.A. S.L.U. - File: SLU

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008

Titolo: SLU

N° Vertici 4 Zoom N° barre 16 Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
1	-25	-25
2	25	-25
3	25	25
4	-25	25

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
12	3.14	9.8	19.6
13	3.14	-9.8	-19.6
14	3.14	9.8	-19.6
15	3.14	0	19.6
16	3.14	-19.6	0

Sollecitazioni S.L.U. Metodo n

N_{Ed} 163.55 kN
M_{Ed} 179.09 kNm
M_{yEd} 0

P.to applicazione N
Centro Baricentro cls
Coord.[cm] xN 0 yN 0

Tipo rottura Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

Materiali B450C C25/30

ϵ_{su} 67.5 ‰ ϵ_{c2} 2 ‰
 f_{yd} 391.3 N/mm² ϵ_{cu} 3.5 ‰
 E_s 200 000 N/mm² f_{cd} 14.17 N/mm²
 E_s/E_c 15 f_{cc}/f_{cd} 0.8
 ϵ_{syd} 1.957 ‰ $\sigma_{c,adm}$ 9.75 N/mm²
 $\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm² τ_{co} 0.6
 τ_{c1} 1.829

M_{xRd} 401.7 kNm
 σ_c -14.17 N/mm²
 σ_s 391.3 N/mm²
 ϵ_c 3.5 ‰
 ϵ_s 8.665 ‰
d 44.6 cm
x 12.83 x/d 0.2877
 δ 0.7996

Tipo Sezione
☐ Rettan.re ☐ Trapezi
☐ a T ☐ Circolare
☐ Rettangoli ☒ Coord.

Metodo di calcolo
☒ S.L.U.+ ☐ S.L.U.-
☐ Metodo n

Tipo flessione
☒ Retta ☐ Deviata

N° rett. 100
Calcola MRd Dominio M-N
L₀ 0 cm Col. modello

☐ Precompresso

Figura 7-74: Cordolo Sommitale Verifiche SLU a pressoflessione

Verifica C.A. S.L.U. - File: SLE

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008

Titolo: SLE

N° Vertici 4 Zoom N° barre 16 Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
1	-25	-25
2	25	-25
3	25	25
4	-25	25

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
12	3.14	9.8	19.6
13	3.14	-9.8	-19.6
14	3.14	9.8	-19.6
15	3.14	0	19.6
16	3.14	-19.6	0

Sollecitazioni S.L.U. Metodo n

N_{Ed} 122.03 kN
M_{Ed} 133.62 kNm
M_{yEd} 0

P.to applicazione N
Centro Baricentro cls
Coord.[cm] xN 0 yN 0

Materiali B450C C25/30

ϵ_{su} 67.5 ‰ ϵ_{c2} 2 ‰
 f_{yd} 391.3 N/mm² ϵ_{cu} 3.5 ‰
 E_s 200 000 N/mm² f_{cd} 14.17 N/mm²
 E_s/E_c 15 f_{cc}/f_{cd} 0.8
 ϵ_{syd} 1.957 ‰ $\sigma_{c,adm}$ 9.75 N/mm²
 $\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm² τ_{co} 0.6
 τ_{c1} 1.829

σ_c -6.84 N/mm²
 σ_s 148 N/mm²
 ϵ_s 0.74 ‰
d 44.6 cm
x 18.26 x/d 0.4094
 δ 0.9518

Tipo Sezione
☐ Rettan.re ☐ Trapezi
☐ a T ☐ Circolare
☐ Rettangoli ☒ Coord.

Metodo di calcolo
☐ S.L.U.+ ☐ S.L.U.-
☒ Metodo n

Verifica N° iterazioni: 4

☐ Precompresso

Figura 7-75: Cordolo Sommitale Calcolo delle tensioni SLE in combinazione rara.