progetto
project

ADEGUAMENTO DELLA PROGETTAZIONE DEFINITIVA PER LA REALIZZAZIONE DELLA SEZIONE DI IMBOCCO DEL CANALE SCOLMATORE PRESSO IL TORRENTE SAN SIRO IN COMUNE DI SANTA MARGHERITA LIGURE (GE).

committente
client

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
PROVVEDITORATO PER LE OPERE PUBBLICHE
PIEMONTE VALLE D'AOSTA LIGURIA

COMUNE DI SANTA MARGHERITA LIGURE

Montaldo Engineering S.r.l.
Via Renata Bianchi 38 – 16152 Genova
Tel. +39.010.59.43.97 Fax +39.010.60.12.654
Coc. Fisc. – P.I. 01910270998
e-mail montaldo@montaldoengineering.com
Azienda certificata ISO 9001:2008

00	09/05/2016	Prima emissione	Pomeri	Merlanti	Mansueto
revisione *revision*	data *date*	descrizione *kind of revision*	redazione *editing*	controllo *check*	approvazione *approval*

titolo
title

RELAZIONE DI CALCOLO DELLE OPERE DI IMBOCCO

numero doc.
doc. number
001

Identificativo / *id number:* 1523-008-RG-001-00-FMN

formato *size*	scala *scale*	codice commessa *job code*	progressivo doc. *doc. progressive*	revisione *revision*	tipo doc. *doc. type*	redezione *editing*
		1523	008	01	SP	FMN

Indice

Premessa 3
1. Documenti di riferimento 4
1.1. Normativa e standard di riferimento 4
1.2. Riferimenti bibliografici 4
1.3. Software 4
2. Descrizione dell'opera 5
3. Scopo del lavoro 7
4. Problematiche geotecniche e strutturali. 9
4.1. Stati Ultimi di natura Geotecnica 9
4.2. Stati Limite Ultimi di natura Strutturale 9
5. Verifiche della soluzione adottata 10
5.1. Definizione e scelta dell'approccio di progetto 10
5.2. Definizione dei coefficienti parziali 10
6. Caratterizzazione geomeccanica 12
6.1. Caratteristiche dell'ammasso roccioso 12
6.1.1. Valori di progetto 12
6.1.2. Stratigrafia della sezione di imbocco 13
7. Analisi agli elementi finiti 14
7.1. Descrizione generale 14
7.2. Descrizione del programma 14
7.3. Calcolo del fattore di sicurezza 15
8. Descrizione dell'analisi 17
8.1. Fasi di calcolo 17
8.2. Geometria della sezione 18
8.3. Proprietà dei materiali 19
8.4. Stato tensionale a riposo 20
8.5. Realizzazione terre rinforzate 21
8.6. Prima fase di scavo 21
8.7. Seconda fase di scavo. 22
8.8. Terza fase di scavo 22
8.9. Fondo scavo 23
8.10. Phi/c reduction 24
8.11. Stato tenso-deformativo sulla paratia di pali 25
9. Verifiche geotecniche e strutturali 28
9.1. Fattore di sicurezza 28
9.2. Verifica allo sfilamento degli ancoraggi. 29
9.3. Verifica di resistenza a trazione dei trefoli 31
9.4. Verifiche strutturali sui pali 32
9.4.1. Verifica a taglio 32
9.4.2. Verifica a presso-flessione 32
10. Conclusioni 33

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

Premessa

La presente relazione affronta le problematiche progettuali relative all'opera di imbocco della galleria scolmatrice dei Torrenti San Siro e Magistrato e, più precisamente, dell'imbocco presso il Torrente San Siro.

L'opera di imbocco ricade al piede di un'estesa area codificata negli Strumenti di Pianificazione (PdB 2014 e P.U.C. 2012) come DGPV, i cui studi e gli approfondimenti progettuali sono stati recepiti all'interno della revisione progettuale ed i risultati sono riportati nel set documentale codificato come "OI" all'interno del corpo progettuale.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

1. Documenti di riferimento

1.1. *Normativa e standard di riferimento*

- Ministero delle Infrastrutture, 2008, Decreto Ministeriale del 14 gennaio 2008: "Approvazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni", G.U. n.29 del 04.2.2008, Supplemento Ordinario n.30;
- Circolare 2 febbraio 2009, n. 617 - Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008;
- UNI EN 1997-1 : Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali;

1.2. *Riferimenti bibliografici*

- R. Frank et. Al., 2004, "Designer's guide to EN 1997-1, Eurocode 7: Geotechnical Design – General Rules" ;
- Associazione Geotecnica Italiana, 2005, "Aspetti geotecnici della progettazione in zone sismiche", Patron Editore;
- L. I. Gonzalez de Vallejo, 2005, "Geoingegneria", Pearson Education Italia;
- Pereira C., Caldeira L., 2013, Influence of ground water level on shallow foundation design. Application of EC7 probabilistic and deterministic methods, Modern Geotechnical Design Codes of Practice, P. Arnold et. Al. (Eds.), IOS Press 2013;
- Z. T. Bieniawski, 1989, "Engineering Rock Mass Classification", John Wiley & Soon, New York;;;
- Lancellotta, R., 1993, "Geotecnica, II Ed.", Zanichelli, Milano;
- Cestari, F., 2009, "Prove Geotecniche in sito", Edizioni Geo-Impianti, Segrate;
- Tanzini, M., 2002, " L'indagine geotecnica", Dario Flaccovio Editore;
- Nosengo S., Pedemonte S., Sarigu S. Tixi L.,1995, "Applicazioni statistiche ai valori di resistenza a compressione monoassiale di alcuni litotipi liguri", Professione Geologo – ORG Liguria, n° 1-2 – 1995.

1.3. *Software*

- Plaxis 2D, Tutorial Manual, 2D Finite Element, Plaxis BV.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

2. Descrizione dell'opera

L'opera di imbocco prevede la realizzazione di una robusta paratia di micropali coadiuvati da più ordini di tiranti attivi provvisionali, necessari alla realizzazione degli scavi in condizioni di sicurezza sia nei confronti del cantiere della galleria che nei confronti dell'area in frana.

Una volta raggiunto il piano di lavoro, sarà realizzata la dima di attacco e si provvederà al consolidamento del fronte di scavo mediante iniezioni di consolidamento del fronte di scavo attraverso pali in vetroresina valvolati o cementati con miscele espansive.

Per l'analisi delle opere provvisionali descritte nel presente documento e negli elaborati grafici si sono svolte opportune analisi agli elementii finiti attraverso il software Plaxis v.8., prodotto dalla Plaxis B.V., The Nederland.

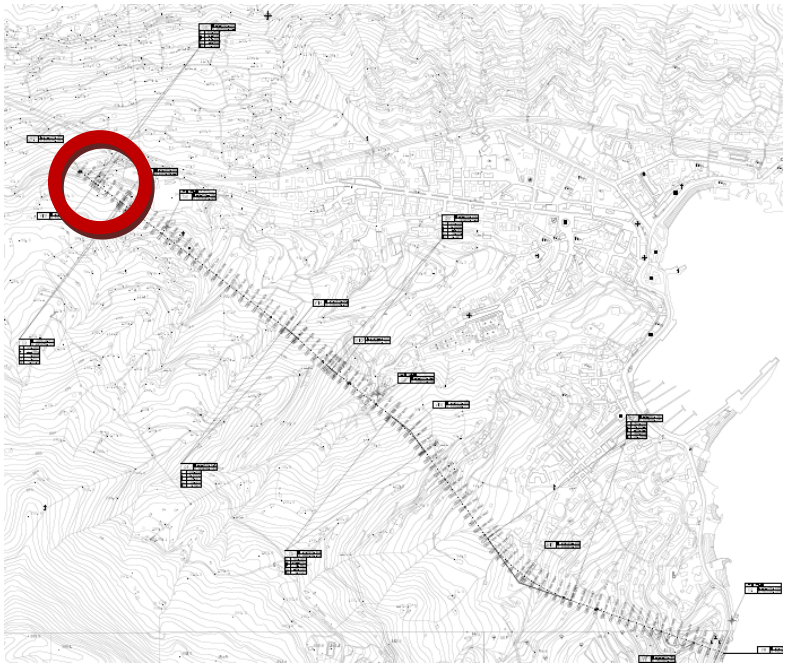


Figura 2-1: Tracciato della galleria scolmatrice.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

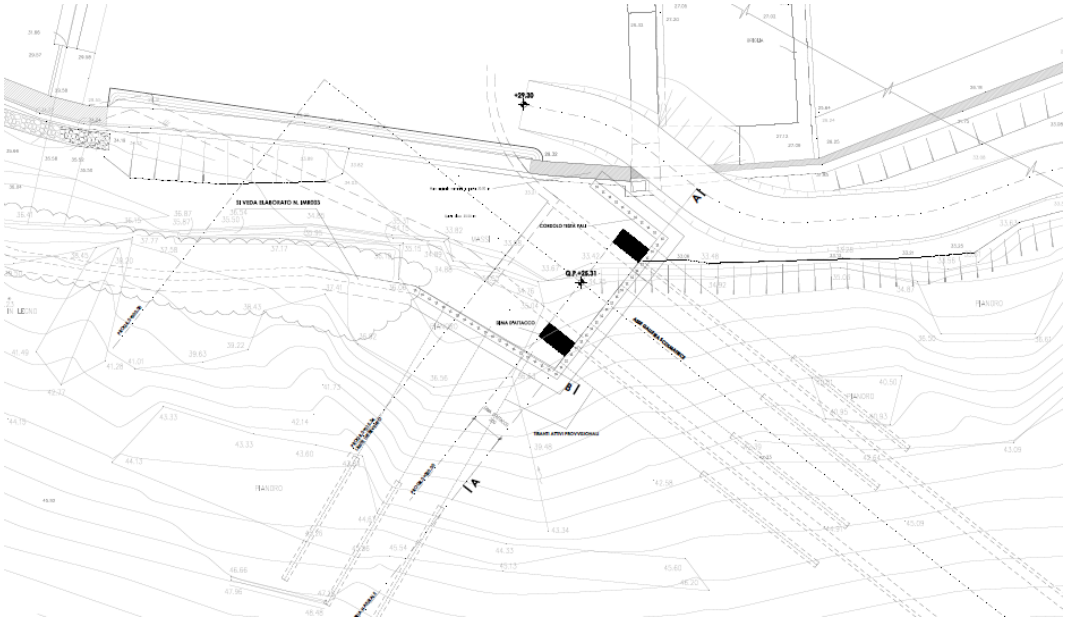


Figura 2-2: Imbocco presso il Torrente San Siro.

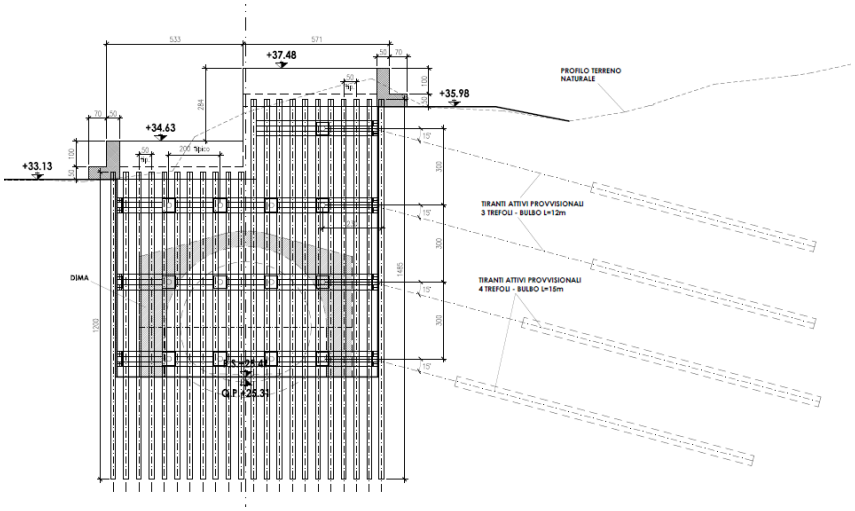


Figura 2-3: Sezione trasversale dell'imbocco della galleria.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

3. Scopo del lavoro

Lo scopo del presente lavoro consiste nell'analizzare le fasi relative alla realizzazione della paratia di micropali, coadiuvata da tiranti attivi provvisionali, necessaria per la realizzazione del piazzale di imbocco e della relativa sezione di imbocco presso il Torrente San Siro.

Le analisi condotte tengono conto anche della sistemazione definitiva prevista dal progetto.

Le opere previste dal progetto sono:

- realizzazione di una paratia di micropali di lunghezza pari a 14 m;
- realizzazione del cordolo testa pali;
- realizzazione delle berme in terra rinforzata;
- esecuzione, per fasi, degli scavi ed installazione dei tiranti attivi a trefoli, di carattersitiche a tre e quattro trefoli (con lunghezze di fondazione comprese tra 12 m e 15 m);
- consolidamento del fronte di scavo e del contorno mediante elementi strutturali in VTR valvolati o con miscele espansive.

Le problematiche principali trattate in questa relazione sono le seguenti:

- analisi della deformazione del fronte di scavo;
- valutazione delle deformazioni e sollecitazioni massime agenti sui vari elementi strutturali stabilizzanti;
- valutazione del Grado di Sicurezza del fronte di scavo.

La sezione tipo a cui si è fatto riferimento per le operazioni di consolidamento del fronte di scavo è la B1V qui di seguito riportata.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

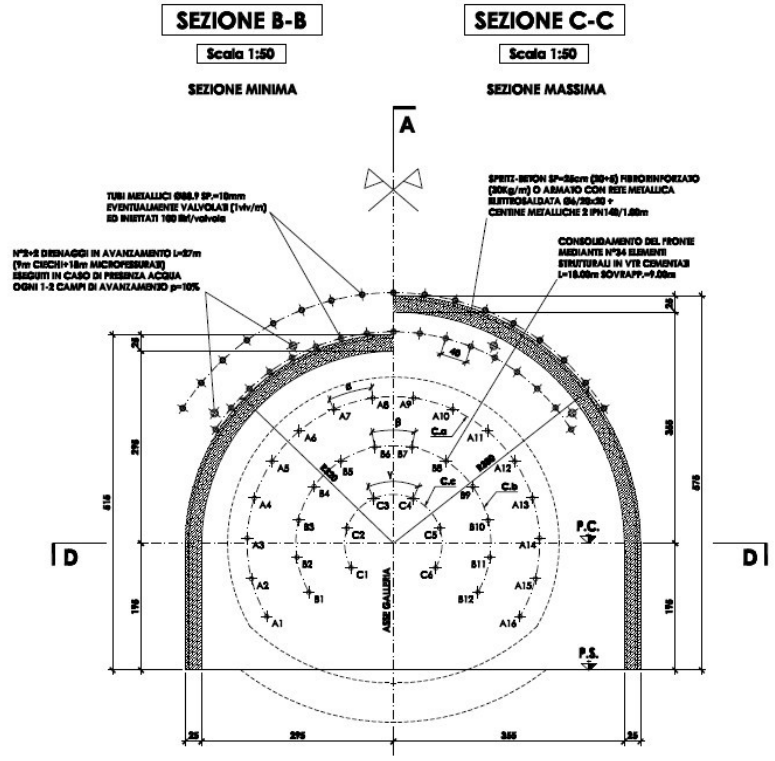


Figura 3-1: Sezione tipo B1V.

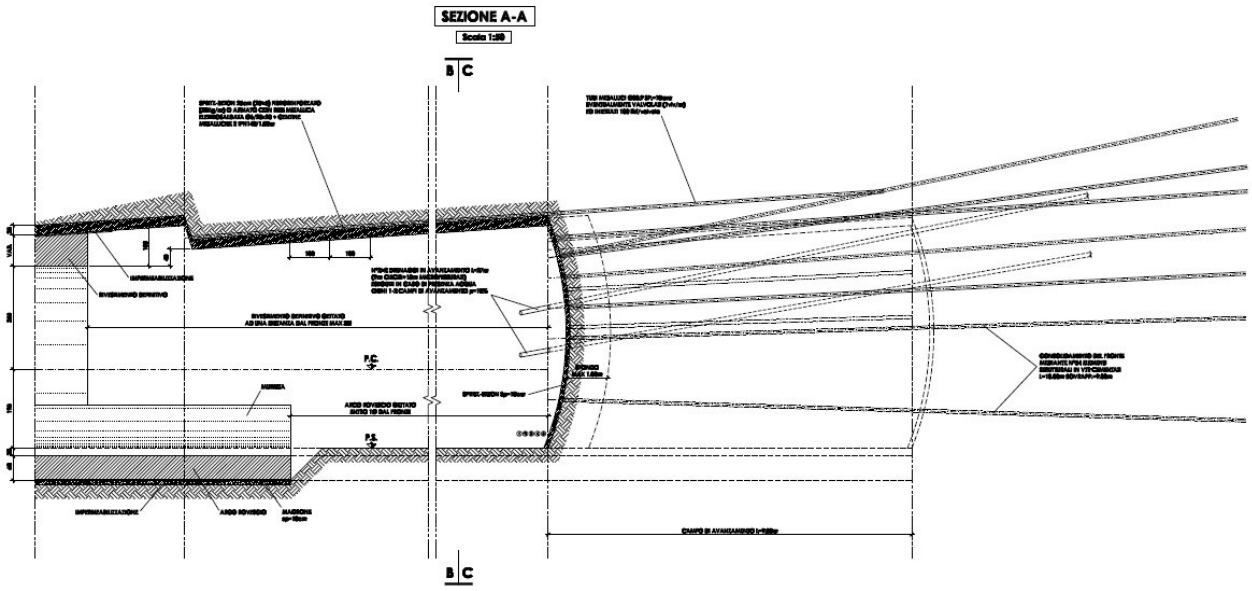


Figura 3-2: Profilo longitudinale della sezioni tipo B1V.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

4. Problematiche geotecniche e strutturali.

La conoscenza di dettaglio delle tipologie di terreno che costituiscono il Volume Significativo dell'intervento in oggetto, rappresenta il punto di partenza per un corretto approccio geotecnico del problema in esame.

Il progetto geotecnico deve, quindi, definire nel dettaglio le caratteristiche meccaniche e di stato costituenti il VS, sulla base delle indagini geognostiche eseguite, al fine di mettere a punto un Modello Geotecnico del Sottosuolo di progetto opportunamente calibrato per lo scopo.

4.1. *Stati Ultimi di natura Geotecnica*

Essi racchiudono tutti gli Stati Limite che considerano lo sviluppo di meccanismi di collasso determinati dalla mobilitazione della resistenza del terreno e, nello specifico, dal raggiungimento delle condizioni di equilibrio limite nel terreno interagente con l'opera di sostegno; in accordo con il paragrafo 6.5.3.1.2 del D.M. 14 gennaio 2008 sono analizzati gli Stati Limite di seguito indicati:

- Collasso per sfilamento di uno o più ancoraggi (GEO);
- Collasso per instabilità globale dell'insieme opera-terreno (GEO).

4.2. *Stati Limite Ultimi di natura Strutturale*

Essi racchiudono tutti gli Stati Limite che considerano lo sviluppo di meccanismi di collasso determinati dalla mobilitazione della resistenza ultima sui vari elementi strutturali che compongono l'opera di sostegno in esame.

Nel caso in esame gli Stati Limite Ultimi strutturali da considerare sono:

- Raggiungimento della resistenza di uno o più tiranti;
- Raggiungimento della resistenza strutturle della paratia di pali per sollecitazione a taglio o a presso- flessione.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

5. Verifiche della soluzione adottata

Con riferimento alle verifiche geotecniche e strutturali elencate nel paragrafo precedente, si riportano di seguito gli Approcci utilizzati, con i relativi coefficienti parziali , in accordo con quanto è espresso nel D.M. 14 gennaio 2008.

5.1. *Definizione e scelta dell'approccio di progetto*

Con riferimento al paragrafo 6.5.3.1.2. del D.M. 14 gennaio 2008, l'approccio di progetto prescelto per lo sviluppo delle verifiche (Strutturali e Geotecniche) delle opere previste dal progetto è l'Approccio1.

La tabella sottostante riassume le combinazioni adottate per le verifiche specifiche:

Tabella 5.1. Combinazioni prescelte per le verifiche SLU-GEO e SLU-STR

Stato Limite	Natura	Combinazione	Insieme dei coefficienti parziali
Instabilità globale opera-terreno	GEO	2	A2+M2+R2
Sfilamento degli ancoraggi	GEO	2	A2+M2+R2
Resistenza strutturale del tratto libero dei tiranti	STR	1	A1+M1+R1
Raggiungimento resistenza strutturale dei pali della paratia.	STR	1	A1+M1+R1

5.2. *Definizione dei coefficienti parziali*

Al fine di sviluppare correttamente l'approccio progettuale prescelto, sono di seguito riportati i vari coefficienti parziali da applicarsi, caso per caso, alle verifiche SLU descritte nella precedente Tabella 5.1. Combinazioni prescelte per le verifiche SLU-GEO e SLU-STRI coefficienti parziali per le azioni, i parametri del terreno e le resistenze sono quelli relativi alle Tabelle 6.2.I, 6.2.II, 6.5.I, 6.8.I del D.M.14 gennaio 2008.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

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

CARICHI	EFFETTO	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1) STR	(A2) GEO
Permanenti	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Permanenti non strutturali (1)	Favorevole	γ_{G2}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Variabili	Favorevole	γ_{Qi}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

(1) Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. i carichi permanenti portati) siano compiutamente definiti, si potranno adottare gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

Figura 5-1: Coefficienti parziali delle azioni o dell'effetto delle azioni.

Tabella 6.2.II – *Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno*

PARAMETRO	GRANDEZZA ALLA QUALE APPLICARE IL COEFFICIENTE PARZIALE	COEFFICIENTE PARZIALE γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ	γ_γ	1,0	1,0

Per le rocce, al valore caratteristico della resistenza a compressione uniassiale q_u deve essere applicato un coefficiente parziale γ_{qu}=1,6.

Figura 5-2: Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno.

Tabella 6.5.I - *Coefficienti parziali γ_R per le verifiche agli stati limite ultimi STR e GEO di muri di sostegno.*

VERIFICA	COEFFICIENTE PARZIALE (R1)	COEFFICIENTE PARZIALE (R2)	COEFFICIENTE PARZIALE (R3)
Capacità portante della fondazione	γ_R = 1,0	γ_R = 1,0	γ_R = 1,4
Scorrimento	γ_R = 1,0	γ_R = 1,0	γ_R = 1,1
Resistenza del terreno a valle	γ_R = 1,0	γ_R = 1,0	γ_R = 1,4

Figura 5-3: Coefficienti parziali per le resistenze globali dell'opera di sostegno.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

6. Caratterizzazione geomeccanica

La caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso interessato dallo scavo della galleria è stata ricavata dall'esame dei risultati dei sondaggi e delle prove di laboratorio sui campioni lapidei provenienti dai sondaggi effettuati, nonché dalla misura di stazioni di rilievo geostrutturale e geomeccanico.

Nell'elaborazione dei parametri che caratterizzano i differenti tipi di ammasso roccioso sono state prese in considerazione anche esperienze progettuali che hanno interessato le stesse litologie.

L'inquadramento geologico-strutturale è basato sull'analisi della documentazione della precedente fase progettuale (Progetto Preliminare), della bibliografia geologica disponibile, della fase progettuale del 2005 (Progetto Definitivo) e della recente campagna d'indagine messa a disposizione dal Comune di Santa Margherita Ligure.

L'area soggetta all'intervento studiato è interessata da una sola formazione geologica costituita dalla Formazione dei Calcari Marnosi del Monte Antola caratterizzata da un' alternanza ritmica di calcari marnosi, calcari arenacei e marne calcaree in strati e bancate di spessore normalmente pluridecimetrico, che possono arrivare localmente a spessori massimi di 10 – 12 metri.

6.1. *Caratteristiche dell'ammasso roccioso*

Le indagini svolte hanno permesso di individuare la stratigrafia del volume di terreno interessato dall'opera in esame.

Nel caso specifico si è fatto riferimento alla stratigrafia relativa alla sezione coincidente con l'asse della galleria nella sezione di imbocco.

Si è individuato un primo strato superficiale di depositi detritico colluviali, e diversi strati di ammasso roccioso, Calcare del Monte Antola, con differenti livelli di fratturazione.

Sono stati distinti 4 gruppi omogenei all'interno del Calcare dell'Antola in base alle caratteristiche litologiche e geomeccaniche. Dall'esame dei dati provenienti dalle prove di laboratorio sui campioni estratti, si è individuata una gamma di valori della resistenza a compressione monoassiale caratteristica per ognuno dei quattro gruppi riconosciuti nell'ammasso.

6.1.1. Valori di progetto

I valori di progetto da adottarsi per le analisi relative alla presente opera di imbocco sono riportati nella seguente Tabella 6.2 estratta dalla relazione geomeccanica**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**; con riferimento ai parametri della coltre superficiale presente in area di frana i valori di progetto sono indicati nella seguente Tabella 6.1 estratta dalla relazione geotecnica.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

Tabella 6.1: Caratteristiche geomeccaniche dei depositi detritico colluviali.

c' (kPa)	φ' (°)	E (MPa)	ν
0	22	20	0,38

Tabella 6.2: Caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso.

GRUPPO GEOMECCANICO	γ (kN/m³)	C_p (MPa)	φ_p (°)	C_r (MPa)	φ_r (°)	E (GPa)	ν
Gruppo 1	26	1,20	37	0,70	27	9,0	0,25
Gruppo 2	25	0,50	33	0,30	25	4,0	0,30
Gruppo 3	25	0,25	30	0,15	22	1,4	0,30
Gruppo 4	24	0,07	22	0,04	15	0,5	0,38

6.1.2. Stratigrafia della sezione di imbocco

L'area in cui è posizionata la sezione di imbocco è caratterizzata da un ammasso roccioso appartenete ai Gruppi geomeccanici 3 e 4; al di sopra di essi trova assetto la coltre superficiale ed il cappellaccio di alteriazione.

La seguente Figura 6-1 mostra l'assetto stratigrafico precedentemente descritto.

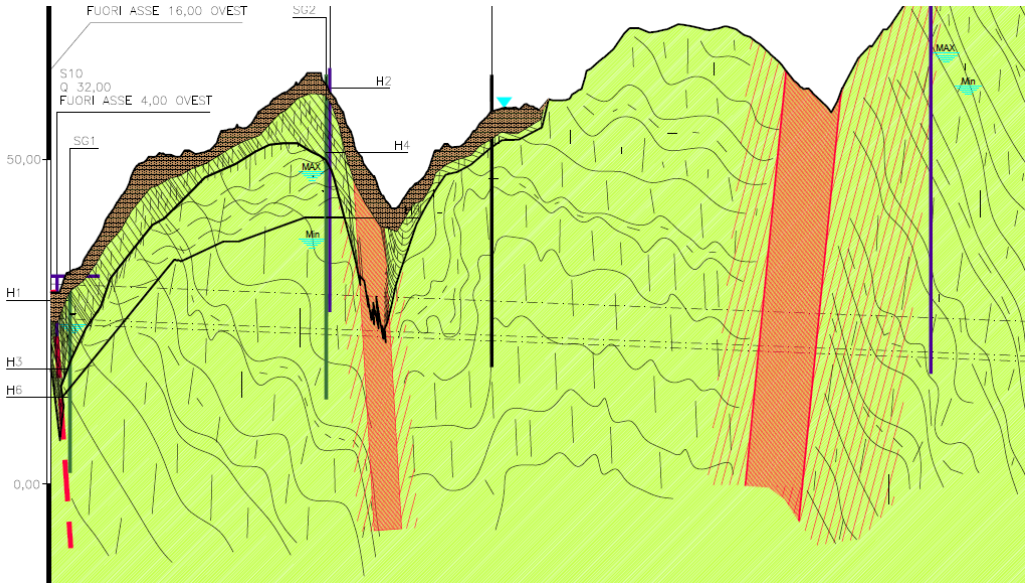


Figura 6-1: Assetto stratigrafico in prossimià dell'imbocco presso il T. San Siro.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

7. Analisi agli elementi finiti

7.1. *Descrizione generale*

Sulla base delle conoscenze dei terreni interessati dall'opera, con la presente analisi si vuole studiare lo stato tenso-deformativo instauratosi nell'ammasso al contorno dell'area interessata dalle operazioni di scavo.

Come detto nel capitolo precedente la determinazione dello stato tenso-deformativo è stata svolta avvalendosi del programma di calcolo Plaxis v.8, sviluppando la sezione del terreno in asse alla galleria scolmatrice.

Tale programma ha permesso di simulare tutte le fasi di scavo e di consolidamento del terreno, e di determinare gli spostamenti e le sollecitazioni agenti sui vari elementi strutturali previsti per il sostegno della parete di scavo.

Nei paragrafi successivi verrà illustrato il modello sviluppato per la sezione longitudinale all'asse della galleria nella sezione di imbocco, illustrando le fasi di scavo che sono state simulate e i risultati più significativi per ciascuna di esse.

Per la sezione in esame si è anche svolto il calcolo del Grado di Sicurezza dello scavo mediante la procedura Phi/c reduction, che permette di andare a ridurre i parametri di resistenza fino al raggiungimento del collasso

7.2. *Descrizione del programma*

Il programma consente di sviluppare tutta la sezione significativa, impostando la stratigrafia, la morfologia del Piano di Campagna, la presenza di opere antropiche quali, come nel nostro caso paratie e tiranti, l'eventuale falda idrica ed altro ancora.

Plaxis è un programma agli elementi finiti specificatamente compilato per le analisi di deformazione e di stabilità, necessarie nei progetti d'ingegneria geotecnica.

Un corretto progetto geotecnico richiede l'utilizzo di modelli costitutivi avanzati per una corretta simulazione del comportamento non lineare o dipendente dal tempo, che rappresenta una caratteristica peculiare del comportamento del terreno anche a bassi livelli tensionali.

È inoltre fondamentale tenere in debita considerazione anche il comportamento chiaramente multifase del terreno.

Tutto ciò, congiuntamente alla geometria del problema di volta in volta analizzato, consente una piena modellazione dell'interazione terreno-struttura e la risoluzione di numerosi aspetti geotecnici, anche complessi, d'importanza fondamentale nel campo dell'ingegneria geotecnica.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

La paratia di pali è stata simulata attraverso un elemento "beam" definito dalle seguenti caratteristiche:

- rigidezza flessionale;
- rigidezza assiale;
- momento plastico.

I diversi ordini di tiranti sono stati simulati con gli elementi "Anchors", identificati da una molla elastoplastica il cui comportamento è definito mediante:

- una rigidezza normale;
- una forza (in quanto gli elemeni sono pretesi).

I bulbi di fondazione dei tiranti sono invece stati schematizzati con elementi "geotessili". Come dice il nome, questo elemento è specificatamente progettato per la simulazione del comportamento di tutta quella famiglia di elementi che interagiscono direttamente con il terreno, tenendo in opportua considerazione il legame resistente di tipo attritivo mobilitato all'interfaccia terreno-fondazione.

Infine, per i terreni in questione, si è utilizzato il modello costitutivo alla Mohr-Coulomb che è quello più utilizzato nelle applicazioni pratiche.

Questo modello permette di cogliere anche alcuni, ma non tutti, degli aspetti del comportamento non lineare del terreno e può essere efficacemente utilizzato nell'analisi preliminare a collasso utilizzando la procedura "phi-c reduction" per il calcolo del fattore di sicurezza.

Nei paragrafi successivi verranno riportati i risultati principali delle fasi più significative delle operazioni di scavo ottenuti con il modello sviluppato con il software Plaxis v.8.

7.3. *Calcolo del fattore di sicurezza*

Il calcolo del Fattore di Sicurezza del progetto è un elemento d'importanza fondamentale; esso è definito come il rapporto fra il carico di collasso ed il carico di lavoro (nel caso delle fondazioni) oppure come il rapporto fra la resistenza a taglio disponibile e le tensioni tangenziali mobilitate.

Il calcolo del fattore di sicurezza è eseguito in automatico, mediante la definizione di uno step addizionale, diminuendo iterativamente il valore dell'angolo di taglio e della coesione, fino ad arrivare alla prima configurazione di collasso ("phi-c reduction").

In estrema sintesi, la ricerca del Grado di Sicurezza dell'opera nel suo complesso è condotta mediante una procedura iterativa, denominata phi/c reduction, la quale riduce passo passo i valori delle resistenze del terreno (coesione ed angolo di taglio) arrestandosi nell'istante di nascita di una situazione di collasso (o

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

per raggiungimento del criterio di rottura negli elementi terreno o per raggiungimento delle condizioni di rottura in qualche elemento strutturale – pali, tiranti etc. –).

Ovviamente il punto di partenza dell'analisi iterativa coincide con l'ultima fase studiata (e quindi il raggiungimento del fondo di scavo).

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

8. Descrizione dell'analisi

8.1. *Fasi di calcolo*

Gli interventi previsti per la stabilizzazione della zona di scavo sono già stati descritti nei paragrafi precedenti. Seguendo la sequenza costruttiva prevedibile delle fasi di lavoro si è sviluppata una loro simulazione con il programma di calcolo Plaxis v.8.

In Tabella 8.1 viene riportata la sequenza delle fasi di calcolo che sono state sviluppate con il programma già citato per simulare le fasi di lavoro e l'avanzamento dello scavo.

Tabella 8.1 Fasi di analisi

Fase	Identificativo	Descrizione
1	Fase K0	Procedimento interno per la generazione delle pressioni litostatiche originali
2	Realizzazione dei pali	In questa fase viene simulata la realizzazione della paratia di pali
3	Realizzazione dei rilevati in terra rinforzata	In questa fase viene simulata la realizzazione dei rilevati in terra rinforzata
4	1^ fase di scavo	Fase che simula lo scavo fino 0,5 m al di sotto della quota di installazione del primo ordine di tiranti.
5	Installazione del primo tirante.	In questa fase viene simulata l'installazione del primo ordine di tiranti e loro pretensione.
6	2^ fase di scavo	Simulazione di un'uteriore scavo fino a 0,5 m al di sotto della quota di installazione del secondo ordine di tiranti.
7	Installazione del secondo ordine di tiranti	Simulazione dell'installazione del secondo ordine di tiranti e loro pretensione.
8	3^ fase di scavo	Simulazione dello scavo fino a 0,5 m al di sotto della quota di installazione del terzo ordine di tiranti
9	Installazione del terzo ordine di tiranti	Simulazione dela realizzazione del terzo ordine di tiranti e della loro pretensione
10	Fondo scavo	Simulazione della fase finale degli scavi fino alla quota di fondo scavo.
11	Installazione del quarto ordine di tiranti	In questa fase si simula l'istallazione dell'ultimo ordine di tiranti e la loro pretensione.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

12	Consolidamento del fronte di scavo	In questa fase vengono simulate tutte le operazioni di consolidamento del fronte di scavo mediante tubi in VTR valvolati.
13	Grado di Sicurezza	Fase di calcolo del Grado di Sicurezza al termine delle operazioni di scavo e di stabilizzazione.

Come ricordato in precedenza, il calcolo del Grado di Sicurezza viene svolto attraverso la procedura Phi/c reduction, la quale permette di ridurre le caratteristiche di resistenza del terreno fino ad individuare una situazione di collasso del sistema opera-terreno.

8.2. *Geometria della sezione*

La Figura 8-1 mostra la geometria del modello di calcolo e la mesh relativa, nel rispetto dell'assetto stratigrafico illustrato nei paragrafi precedenti .

La mesh qui raffigurata ha visto la generazione di 6710 elementi, 13833 nodi e 20130 stress poin interni.

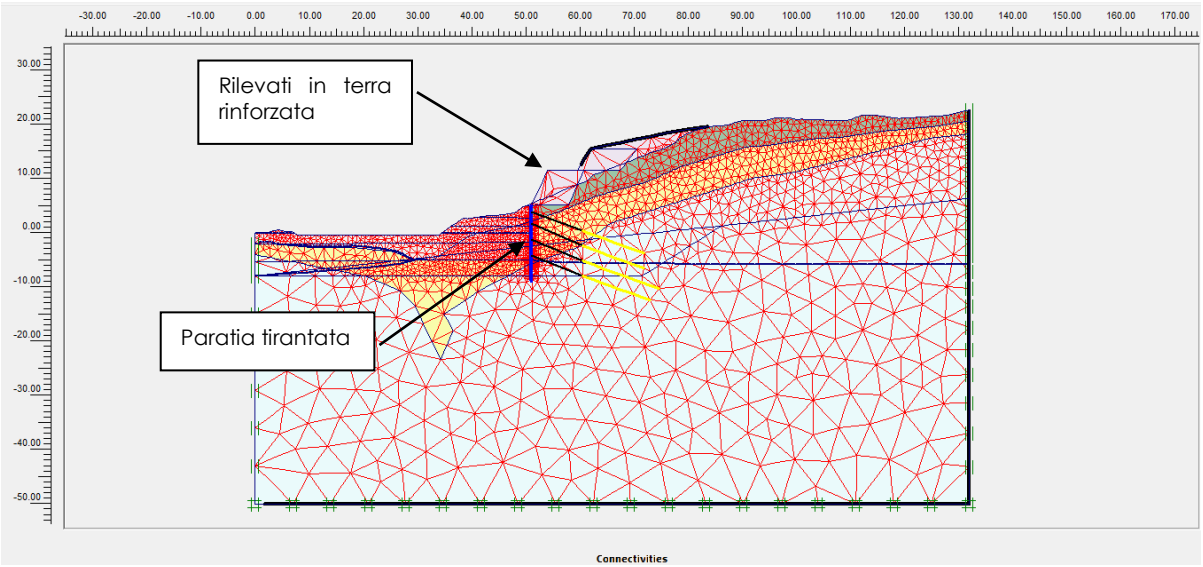


Figura 8-1: Geometria della sezione di calcolo.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

8.3. *Proprietà dei materiali*

In questo paragrafo si riportano i parametri relativi al terreno e alle opere stabilizzanti lo scavo che sono stati inseriti in Plaxis per schematizzare al meglio la situazione in esame.

Par quanto riguarda le proprietà del terreno, per tenere conto delle operazioni di consolidazione del fronte di scavo mediante i tubi valvolati, si è incrementato il valore della coesione e sono stati identificati con la dicitura "consolidato".

Tabella 8.2: Propiretà del terreno.

Name	Type	γ unsat	ν	E	c	φ
		[kN/m^3]	[-]	[kN/m^2]	[kN/m^2]	[°]
Depositi detritico colluviali	M-C	20	0.38	20000	0	22
Gruppo 4	M-C	24	0.38	500000	70	22
Gruppo 4 consolidato	M-C	24	0.38	533000	105	22
Gruppo 3	M-C	25	0.3	1400000	250	30
Gruppo 3 consolidato	M-C	25	0.3	1400000	375	30
Terre rinforzate	Elastic	20	0.3	60000	--	--

Tabella 8.3: Proprietà della paratia di pali.

Name	Type	EA	EI	w	ν
		[kN/m]	[kNm^2/m]	[kN/m^2]	[-]
Paratia di pali	Elastic	2100000	4284	0.77	0.2

Tabella 8.4: Proprietà dei tiranti.

Name	EA
	[kN/m]
Tiranti 1 (tre trefoli)	88200
Tiranti 2 (quattro trefoli)	117600

Tabella 8.5: Proprietà degli elementi geotessile.

Name	Type	EA
		[kN/m]
Bulbo tiranti primo ordine	Elastic	2512000
Bulbo tiranti secondo ordine	Elastic	4510000
Bulbo tiranti terzo ordine	Elastic	6703000
Bulbo tiranti quarto ordine	Elastic	8792000

Nei paragrafi che seguono verranno riportati i principali risultati delle fasi di analisi che sono state sviluppate con il software Plaxis per simulare i lavori necessari alla stabilizzazione dello scavo previsto per realizzare l'imbocco della galleria scolmatrice presso il Torrente San Siro.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

8.4. *Stato tensionale a riposo*

In questo paragrafo si riportano i risultati della fase K0 realizzata a monte delle fasi di scavo e dell'installazione delle opere di sostegno per ricostruire le pressioni litostatiche presenti in sito al momento dell'inizio delle lavorazioni in oggetto. La Figura 8-2 mostra le pressioni litostatiche totali che si sono ottenute.

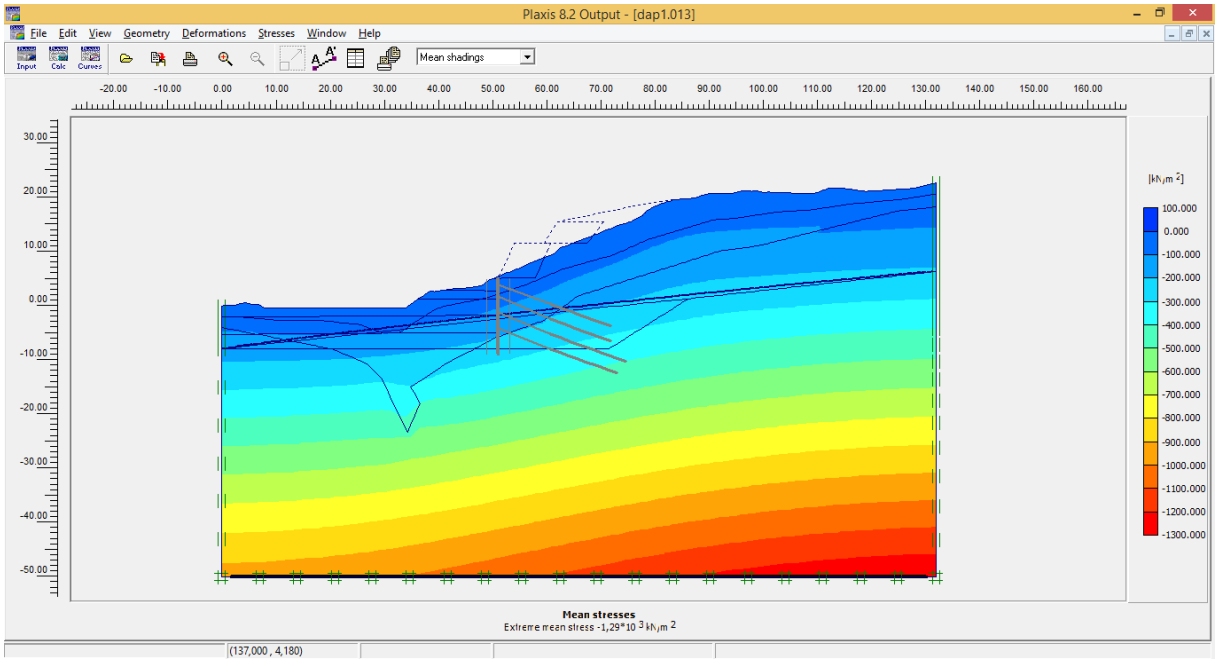


Figura 8-2: Pressioni litostatiche totali della fase k0.

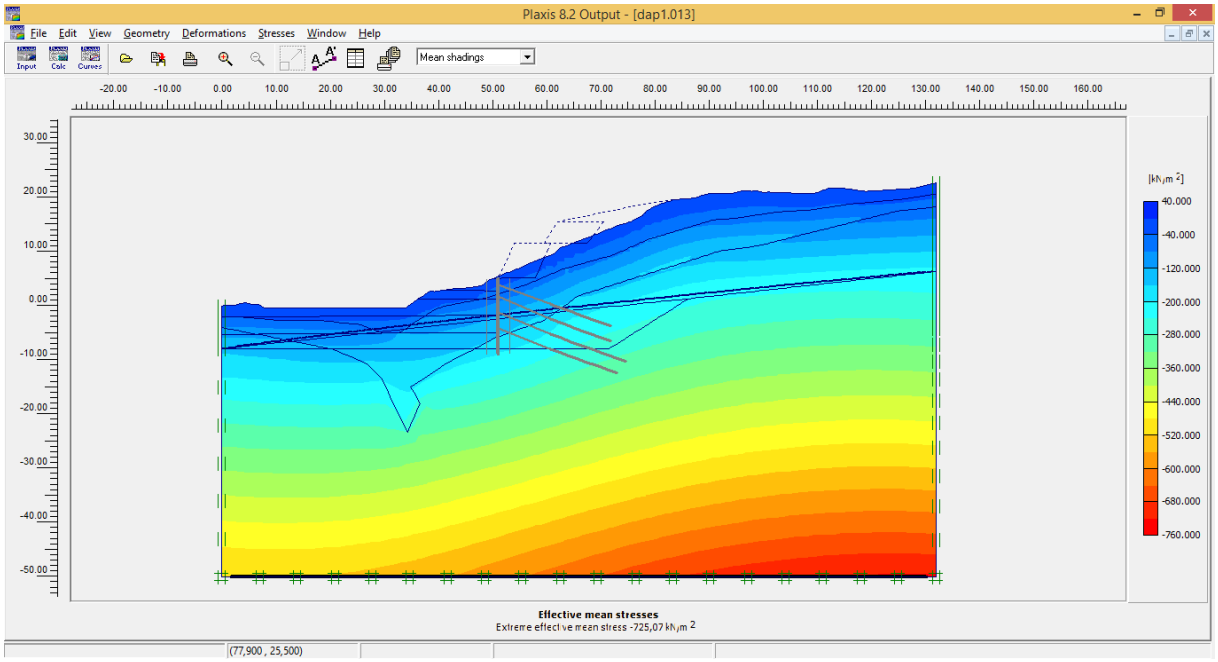


Figura 8-3: Pressioni efficaci della fase k0.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

8.5. *Realizzazione terre rinforzate*

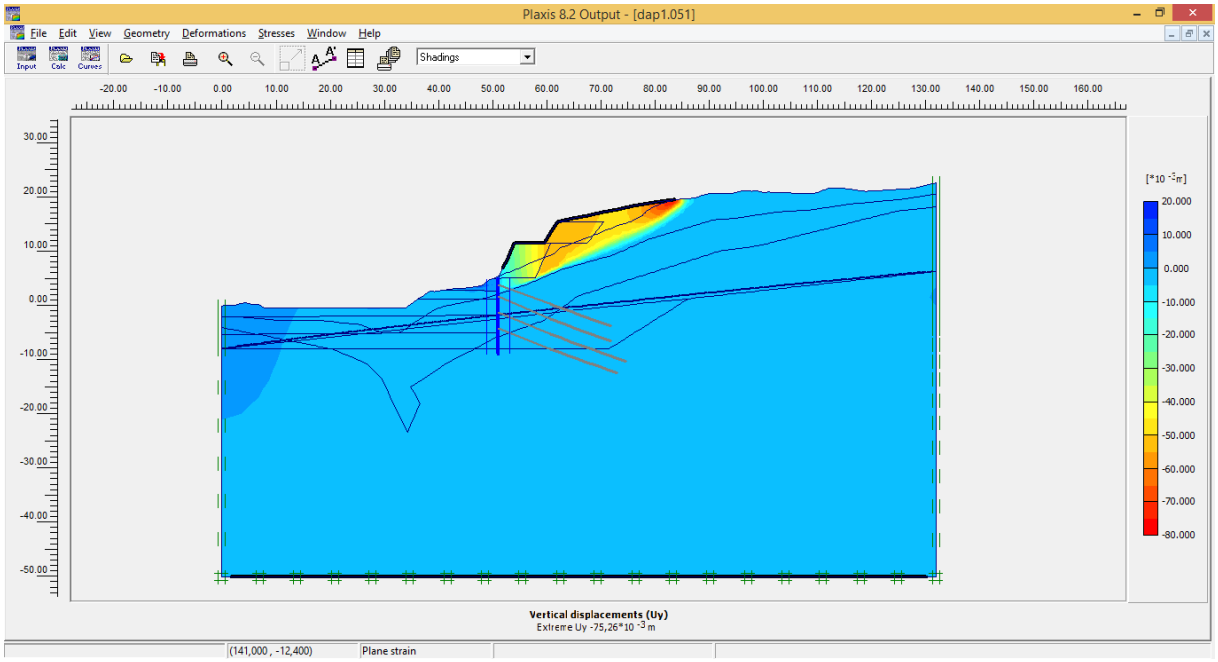


Figura 8-4: Campo di spostamento al termine della realizzazione dei rilevati.

8.6. *Prima fase di scavo*

Questa fase vuole simulare gli effetti dovuti alla prima fase di scavo nei confronti del campo di spostamento.

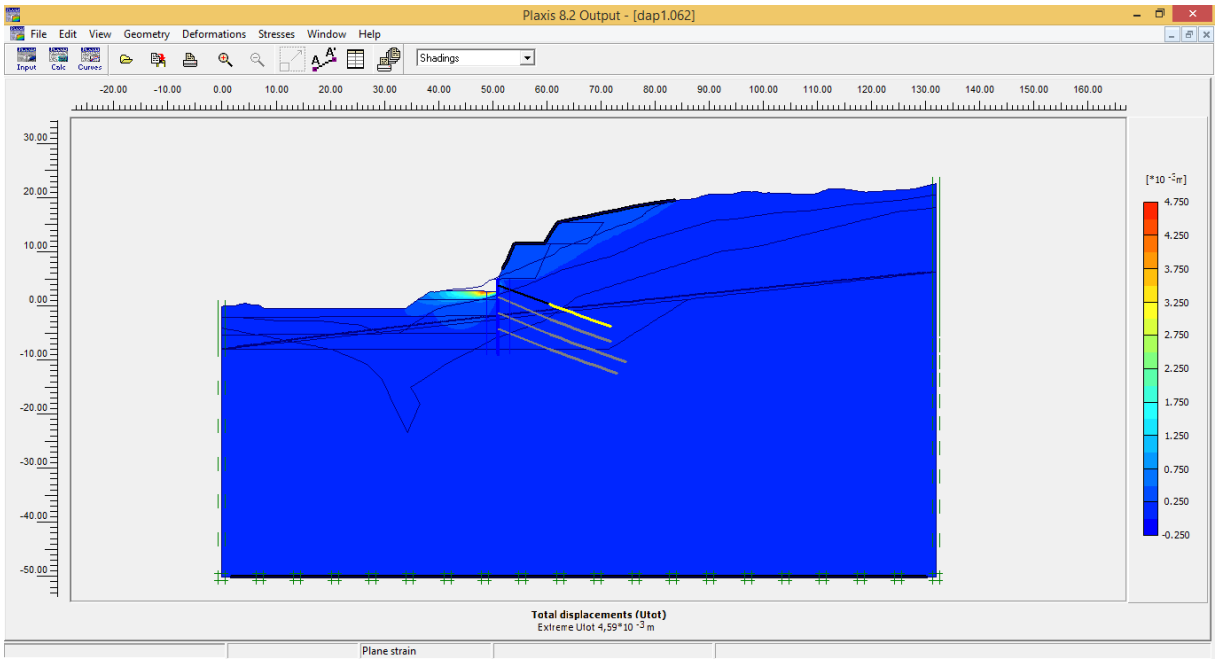


Figura 8-5: Campo di spostamento al termine della prima fase di scavo.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

8.7. *Seconda fase di scavo.*

Questa analisi vuole simulare l'avanzamento dello scavo fino al secondo ordine di tiranti per vedere gli effetti sugli spostamenti totali.

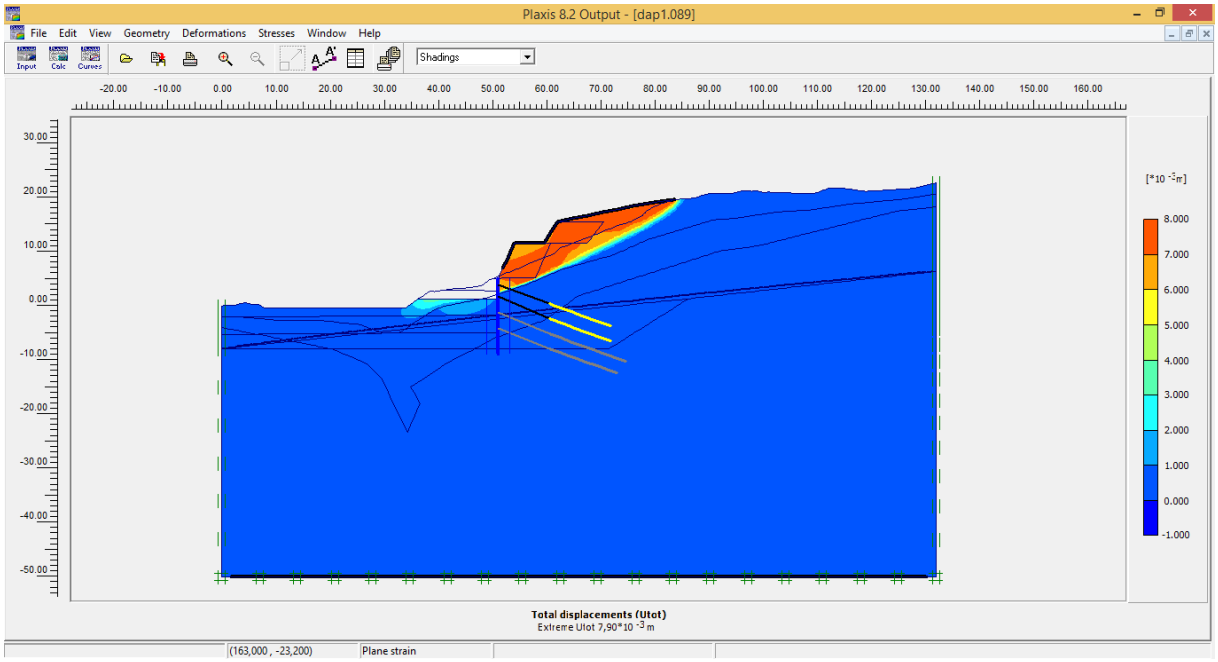


Figura 8-6: Campo di spostamento al termine della seconda fase di scavo.

8.8. *Terza fase di scavo*

Questa analisi simula la terza fase di scavo fino alla quota di installazione del terzo ordine di tiranti.

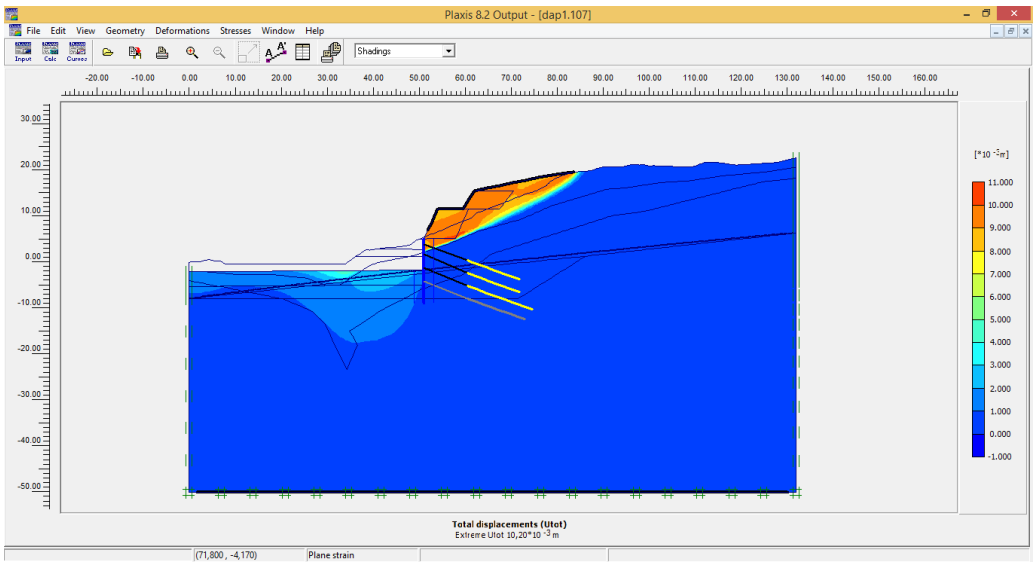


Figura 8-7. Campo di spostamento al termine della terza fase di scavo.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

8.9. *Fondo scavo*

Con questa fase si simula il raggiungimento della quota di fondo scavo e gli effetti che tali operazioni hanno sul campo di spostamento.

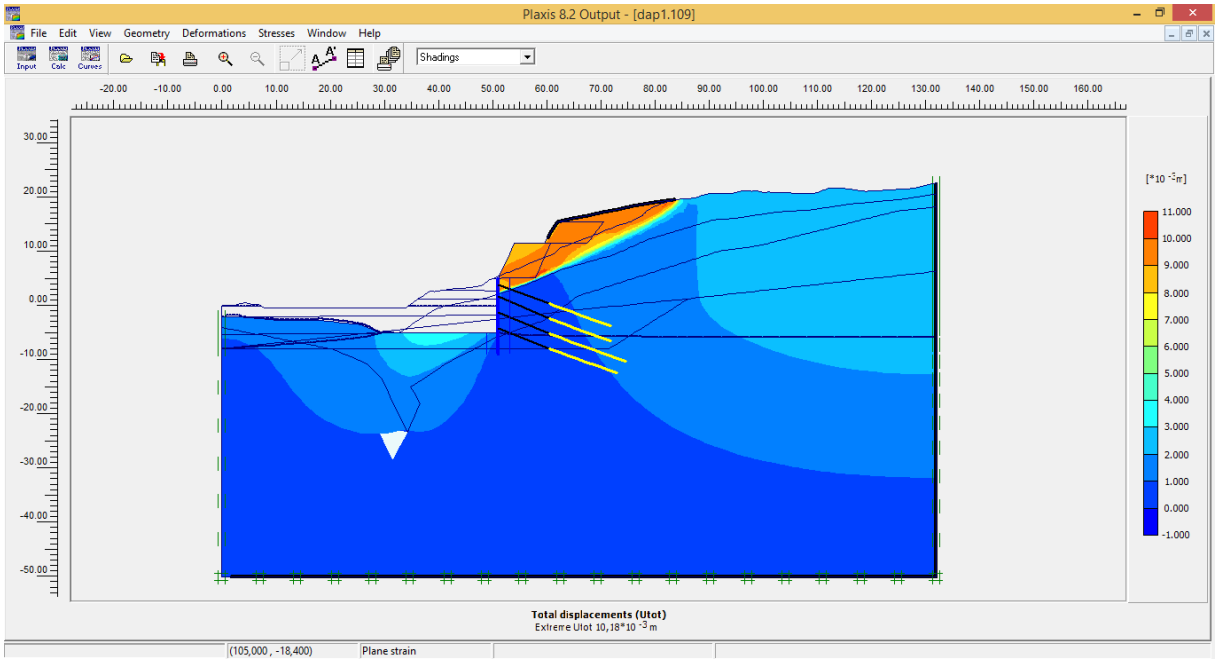


Figura 8-8: Campo di spostamento al termine delle operazioni di scavo.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

8.10. *Phi/c reduction*

Questa analisi vuole simulare l'effetto di una progressiva riduzione dei parametri di resistenza dei terreni, con lo scopo di osservare il cinematismo in fase di collasso.

Con tale procedura è possibile individuare il volume di terreno coinvolto dal collasso, e la superficie di rottura creatasi nel terreno.

Il Grado di Sicurezza associato a tale meccanismo di rottura è pari a 1,21 soddisfando il limite di 1,1 previsto dalla normativa vigente.

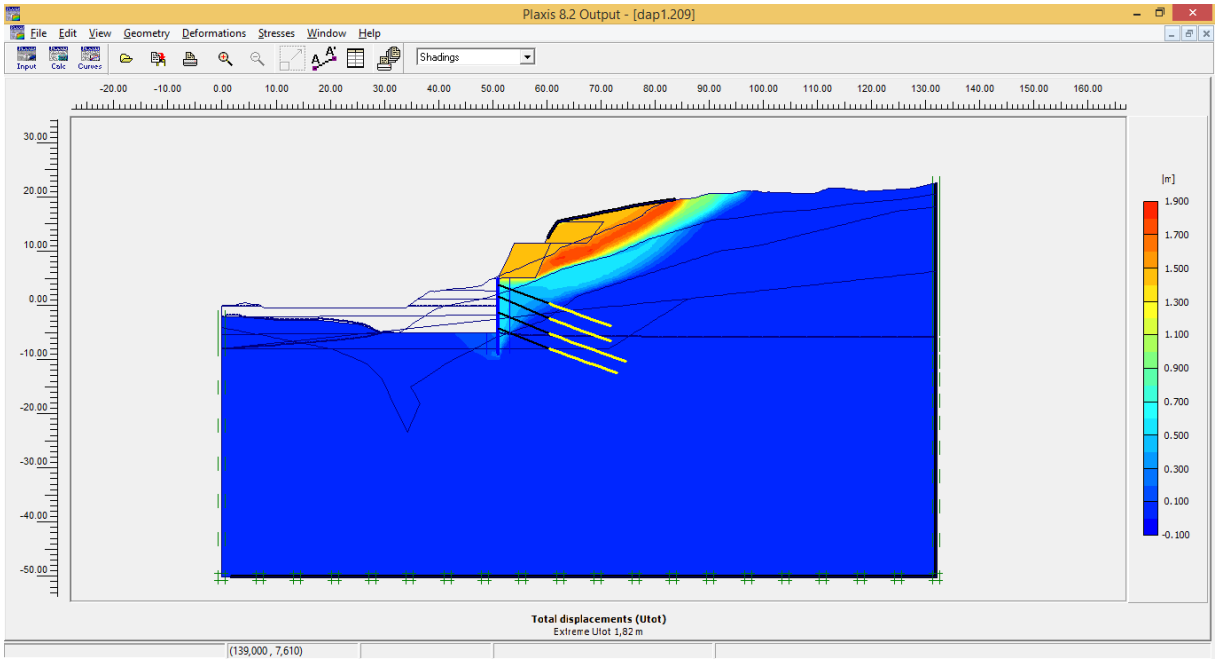


Figura 8-9: Superficie di scorrimento relativa al termine delle operazioni di stabilizzazione.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

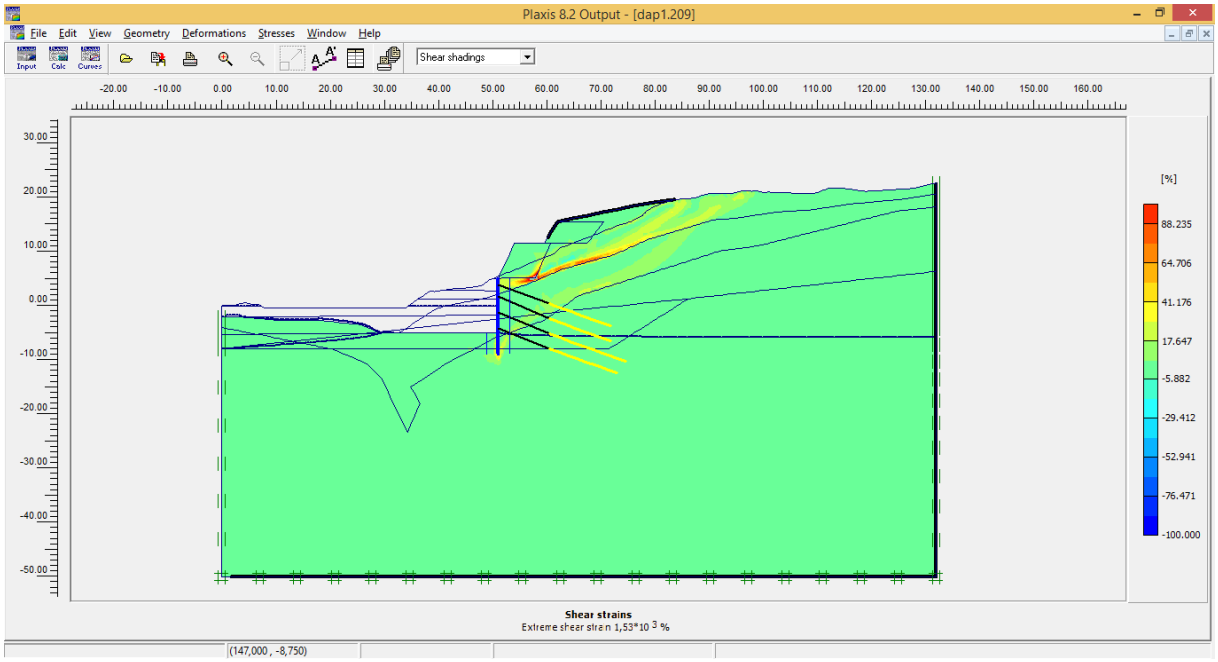


Figura 8-10: Bande di taglio al termine delle operazioni di stabilizzazione.

Come si può notare dalle figure sopra riportate la superficie di scorrimento coinvolge solo lo strato più superficiale di terreno, quindi solo i depositi detritico colluviali, nella parte a monte dell'opera di sostegno prevista; una modesta shear band si attiva anche all'interfaccia tra i gruppi geomeccanici 3 e 4.

Le bande di taglio visibili in Figura 8-10, permettono di individuare il volume coinvolto dal meccanismo di collasso.

8.11. *Stato tenso-deformativo sulla paratia di pali*

Dall'analisi agli elementi finiti è stato possibile ricavare lo stato tensionale sulla paratia di pali. Le verifiche di resistenza sui pali devono essere svolte con la combinazione STR (A1+M1+R1), per cui si sono considerati i risultati ottenuti dal modello sviluppato con tale approccio.

Per quanto riguarda gli spostamenti massimi sulla paratia, dall'analisi agli elementi finiti si evince che sulla paratia si hanno degli spostamenti di circa 3,8 mm. La distribuzione delle sollecitazioni e degli spostamenti sui pali sono riportate nelle figure sottostanti.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

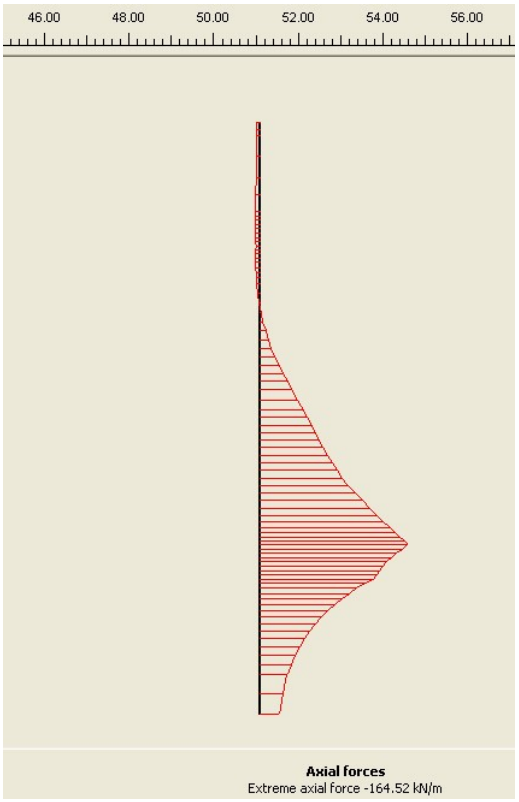


Figura 8-11: Sforzo assiale sulla paratia.

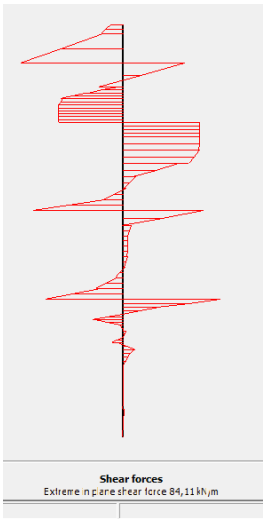


Figura 8-12: Sforzo di taglio della paratia.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

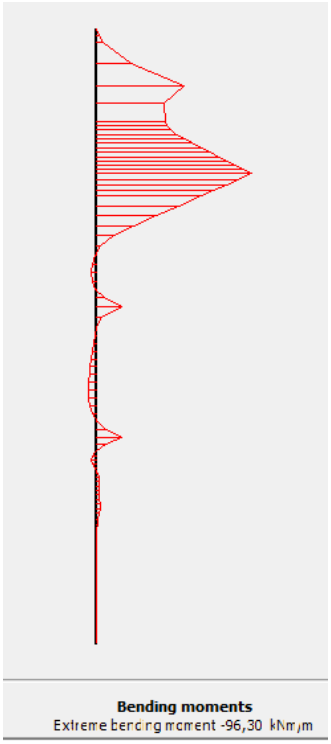


Figura 8-13: momento flettentre sulla paratia.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

9. Verifiche geotecniche e strutturali

9.1. *Fattore di sicurezza*

La valutazione del Grado di Sicurezza viene svolta attraverso l'analisi agli elementi finiti condotta tramite il codice di calcolo Plaxis v.8, seguendo la procedura nota con il nome di "Phi-c reduction".

Tale procedura ricerca il Grado di Sicurezza dell'insieme opera-terreno, mediante una procedura iterativa, la quale riduce passo passo i vaori delle resistenze del terreno, coesione ed angolo di taglio, arrestandosi nell'istante di nascita di una situazione di collasso. Il collasso può avvenire per il raggiungimento del criterio di rottura negli elementi di terreno o per raggiungimento delle condizioni di rottura in qualche elemento strutturale, che in questo caso sono i pali e i tiranti.

Il Grado di Sicurezza deve essere valutato facendo riferimento all'approccio GEO (A2+M2+R2) ed è definito formalmente dal rapporto fra la resistenza del terreno dell'analisi e la massima tensione tangenziale mobilitata al momento del collasso.

$$GS = \frac{\tau_{iniziale}}{\tau_{collasso}}$$

La Figura 9-1mostra il Grado di Sicurezza ottenuto.

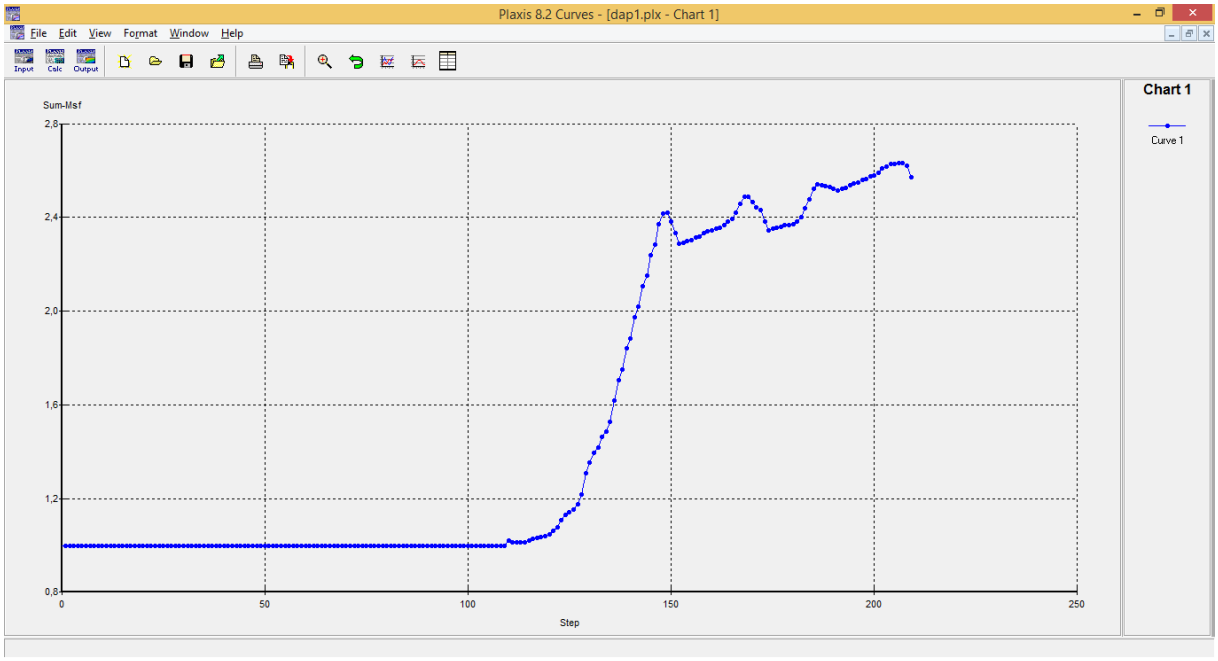


Figura 9-1. Grado di Sicurezza al termine delle lavorazioni

Come si vede dal grafico si raggiunge un Grado di Sicurezza di 2,57 soddisfando quindi il limite dettato dalla normativa di 1,1.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

9.2. *Verifica allo sfilamento degli ancoraggi.*

Gli ancoraggi sono elementi strutturali opportunamente collegati al terreno la cui caratteristica principale è quella di resistere a forze di trazione.

Nella scelta del tipo di ancoraggi si deve tenere conto delle sollecitazioni prevedibili, delle caratteristiche del sottosuolo e dell'aggressività ambientale.

Per l'opera di sostegno in esame si sono utilizzati tiranti provvisori e attivi, in quanto nell'armatura viene indotta una forza di tesatura.

Per sostenere il fronte di scavo si è pensato all'installazione di quattro ordini di tiranti, di cui i primi due sono costituiti da 3 trefoli e bulbo di fondazione di 12 m, mentre gli altri due ordini sono formati da 4 trefoli e un bulbo di fondazione di 15 m.

Il primo trefolo è sottoposto a una pretensione pari al 50% della tensione nominale, mentre gli altri ordini sono pretesi all'85% del valore nominale.

Gli stati limite ultimi dei tiranti di ancoraggio si riferiscono allo sviluppo di meccanismi di collasso determinati dalla mobilitazione della resistenza del terreno e al raggiungimento della resistenza degli elementi strutturali che li compongono.

Per il dimensionamento geotecnico deve essere rispettato lo stato limite di sfilamento della fondazione di ancoraggio.

La verifica allo sfilamento degli ancoraggi viene svolta in combinazione GEO (A2+M2+R2) e si esegue confrontando la massima azione di progetto con la resistenza di progetto R_d, determinata applicando alla resistenza caratteristica R_{ak} i fattori parziali γ_R riportati nella Tabella 6.6.I del D.M del 14 gennaio 2008.

Tabella 6.6.I – *Coefficienti parziali per la resistenza di ancoraggi*

	SIMBOLO γ_R	COEFFICIENTE PARZIALE
Temporanei	$\gamma_{Ra,t}$	1,1
Permanenti	$\gamma_{Ra,p}$	1,2

Figura 9-2. Coefficienti parziali per la reistenza degli ancoraggi.

Il valore caratteristico della resistenza allo sfilamento dell'ancoraggio R_{ak} si può determinare:

a) Dai risultati di prove di progetto su ancoraggi di prova;

b) Con metodi di calcolo analitici, dai valori caratteristici dei parametri geotecnici dedotti dai risultati di prove in sito e/o di laboratorio.

Nel caso in esame si fa riferimento a metodi di calcolo analitici e quindi il valore della resistenza caratteristica R_{ak} è il minore dei valori derivanti dall'applicazione dei fattori di correlazione ξ_{a3} e ξ_{a4} al valore ottenuto dal calcolo.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

Per la valutazione dei fattori ξ_{a3} e ξ_{a4} si deve tenere conto che i profili di indagine sono solo quelli che consentono la completa identificazione del modello geotecnico di sottosuolo per il terreno di fondazione dell'ancoraggio.

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

numero di profili di indagine	1	2	3	4	≥5
ξ_{a3}	1,80	1,75	1,70	1,65	1,60
ξ_{a4}	1,80	1,70	1,65	1,60	1,55

Figura 9-3. Fattori di correlazione per derivare la resistenza caratteristica dalle prove geotecniche.

Per il calcolo della resistenza si è fatto riferimento al Metodo di Bustamante e Doix:

$$R = \pi \cdot L \cdot D \cdot \tau_{\lim}$$

Dove:

- γ_{med} è il peso specifico medio del terreno;
- h_{med} è la profondità media del bulbo di fondazione;
- K è il coefficiente di spinta;
- Φ è l'angolo di attrito tra fondazione e terreno;
- c_a è l'adesione; $c_a = \nu\, c_u$ ($\nu = 0{,}5 \div 0.9$)

Si riportano di seguito i risultati della verifica svolta :

Tabella 9.1. Verifica a sfilamento degli ancoraggi della sezione longitudinale.

Ordine	D [m]	L [m]	h [m]	γ [kN/mc]	c [kN/mq]	γ_R	R_k [kN]	R_d [kN]	S_d [kN]	R_d/S_d	
1	0.16	12	7.6	24	56	1.1	483.2	293	136.6	2.14	VERIFICATO
	0.16	12	9.8	24	200	1.1	1040.4	630	313.2	2	VERIFICATO
2	0.16	15	11.4	25	200	1.1	1342	813	461.4	1.76	VERIFICATO
3	0.16	15	14	25	200	1.1	1765	1070	413.1	2.6	VERIFICATO

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

9.3. *Verifica di resistenza a trazione dei trefoli*

La verifica è stata svolta considerando trefoli in acciaio con area di 140 mm^2 e una resistenza allo snervamento del trefolo di 1570 N/mm^2.

Per questa verifica si è considerata una combinazione STR (A1+M1+R1) applicando la formula seguente:

$$R_d = \cdot f_{yd} \cdot A_y \cdot n$$

Dove:

- n è il numero di trefoli costituenti il tratto libero del tirante;
- A_y è sezione trasversale di un trefolo;
- f_{yd} è la resistenza allo snervamento del trefolo.

In Tabella 9.2 si riportano i risultati della verifica di resistenza a trazione dei trefoli:

Tabella 9.2. Risultati della verifica a trazione sui trefoli.

Ordine	f_{yd} [N/mm^2]	A_y [mm^2]	n	R_d [kN]	S_d [kN]	R_d/S_d	
1	1570	140	3	659	291	2.26	**VERIFICATO**
2	1570	140	3	659	499	1.32	**VERIFICATO**
3	1570	140	4	879	670	1.31	**VERIFICATO**
4	1570	140	4	879	663	1.33	**VERIFICATO**

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

9.4. *Verifiche strutturali sui pali*

Per quanto riguarda i micropali costituenti la paratia di sostegno si sono svolte le verifiche a taglio e a presso-flessione facendo riferimento alle sollecitazioni ottenute dall'analisi agli elementi finiti svolta con il software Plaxis in combinazione STR (A1+M1+R1).

Per le verifiche sui pali si è considerata un'armatura tubolare di diametro 139,7 mm e spessore 12,5 mm. Tali tubi presentano le sueguenti proprietà:

- Peso p = 39,2 kg/m;
- Area della sezione A = 50 cm^2;
- Momento d'inerzia I = 1020 cm^4;
- Raggio d'inerzia i = 4,52 cm;
- Modulo di resistenza elastico W_{el} = 146 cm^3;
- Modulo di resistenza plastico W_{pl} = 203 cm^3

9.4.1. Verifica a taglio

Per la verifica a taglio la formula alla quale si è fatto riferimento per il calcolo della resistenza strutturale è la seguente:

$$V_{rd} = \frac{2A}{\pi} \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\gamma_{M0}}$$

Avendo posto f_y pari a 35,5 KN/cm^2 e γ_{M0} uguale a 1,1 e facendo riferimento ai valori del tubolare precedentemente esposti si è ottenuto una resistenza di progetto pari a 594 kN che risulta ampiamente superiore alla sollecitazione di progetto che risulta essere pari a 56.1 kN.

9.4.2. Verifica a presso-flessione

Per la verifica a presso-flessione si è dovuto tenere in considerazione lo sforzo assiale e il momento flettente agenti sulla paratia ottenuti dall'analisi agli elementi finiti.

L'espressione utilizzata per la verifica a presso-flessione è la seguente:

$$\frac{\frac{N_{sd}}{A \cdot f_y}}{\gamma_{M0}} + \frac{\frac{M_{sd}}{W_{pl} \cdot f_y}}{\gamma_{M0}} \leq 1$$

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta

Dove:

- N_{sd} è lo sforzo assiale di progetto;
- M_{sd} è il momento flettente di progetto;
- W_{pl} è il modulo di resistenza plastico dell'armatura;

I valori delle sollecitazioni di progetto, opportunamente fattorizzate con i coefficienti parziali relativi all'approccio (A1+M1+R1) sono:

N_{sd} = 107 kN

M_{sd} = 1280 kN

Utilizzando quindi questi valori nella formula sopra spiegata si ottiene un valore di 0,3 e quindi la verifica risulta soddisfatta.

10. Conclusioni

In questo rapporto sono state presentate e risolte le problematiche connesse all'esecuzione dello scavo necessario alla realizzazione della sezione di imbocco della galleria scolmatrice presso il torrente San Siro, con particolare riferimento al comportamento tensio-deformativo delle opere di sostegno durante ogni fase di lavoro.

Il Grado di sicurezza delle opere rientra nei limiti richiesti dalla vigente normativa.

Gli elementi costituenti l'opera di sostegno superano con ampi margini di sicurezza tutte le verifiche strutturali richieste dalla vigente normativa.

È vietata la riproduzione di questo documento senza autorizzazione scritta