

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP: J41C09000000005

U.O. COORDINAMENTO NO CAPTIVE E INGEGNERIA DI SISTEMA

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA

ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA

LOTTO 3A: CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO

OPERE CIVILI

Trincea TR03: Relazione tecnico descrittiva e di predimensionamento

SCALA:


-

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

I B 0 Q 3 A R 1 0 R H T R 0 3 0 0 0 0 1 B

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	P. Quadrino	Gen 2021	G. Scasserra	Gen 2021	C. Mazzocchi	Gen 2021	L. Berardi Giu 2021
B	Aggiornamento a seguito richiesta RFI	P. Quadrino	Giu 2021	L. Cosciotti	Giu 2021	C. Mazzocchi	Giu 2021	

File: IB0Q3AR10RHTR0300001B

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: PROJECT REVIEW CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	Trincea TR03: Relazione tecnico descrittiva e di predimensionamento	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	IBOQ	3A R 10	RH	TR 03 00 001	B	2 DI 41

Sommario

1	PREMESSA	4
1.1	DESCRIZIONE DELL'OPERA.....	5
2	NORMATIVA E DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO	8
2.1	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	8
2.2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	8
3	CARATTERISTICHE DEI MATERIALI	9
3.1	CALCESTRUZZO	9
3.1.1	Calcestruzzo per diaframmi.....	9
3.1.2	Calcestruzzo fodera interna.....	9
3.2	ACCIAIO	10
3.2.1	Acciaio per cemento armato.....	10
3.2.1	Acciaio per tubolari e carpenteria metallica.....	10
4	INQUADRAMENTO GEOTECNICO	11
5	CRITERI DI VERIFICA DEI DIAFRAMMI	12
5.1	VERIFICHE SLV	12
5.2	VERIFICHE GEOTECNICHE SLE	12
6	ANALISI DEI CARICHI	13
6.1	SPINTA DEL TERRENO	13
6.2	CARICHI PERMANENTI	14
6.3	CARICHI ACCIDENTALI	14
6.4	CARICHI MOBILI DA TRAFFICO FERROVIARIO.....	14
6.5	VALUTAZIONE DELL'AZIONE SISMICA.....	15
7	COMBINAZIONI DI CARICO	16
8	PROGETTO E VERIFICA: TRATTA 11+522.00 km– 11+665.00 km (sez a-a)	17
8.1	DATI DI INPUT	17
8.2	FASI DI CALCOLO	19
8.3	RISULTATI.....	23
8.3.1	Diaframmi	26
8.3.2	Puntoni.....	26
8.4	VERIFICHE AL SOLLEVAMENTO.....	26
8.4.1	Tappo di fondo.....	26



ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA
ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO
QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA
LOTTO 3A: PROJECT REVIEW CIRCONVALLAZIONE DI
TRENTO

Trincea TR03: Relazione tecnico
descrittiva e di predimensionamento

PROGETTO	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IB0Q	3A R 10	RH	TR 03 00 001	B	3 DI 41

8.4.2	Soletta di fondo.....	27
8.4.3	Struttura definitiva.....	27
9	PROGETTO E VERIFICA: TRATTA 11+665.00 km – 12+059.00 km (sez c-c)	29
9.1	DATI DI INPUT	29
9.2	FASI DI CALCOLO	31
9.3	RISULTATI.....	36
9.3.1	Diaframmi	39
9.3.2	Puntoni.....	39
9.4	VERIFICHE AL SOLLEVAMENTO.....	39
9.4.1	Tappo di fondo.....	39
9.4.2	Soletta di base	39
9.4.3	Struttura definitiva.....	39

	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: PROJECT REVIEW CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	Trincea TR03: Relazione tecnico descrittiva e di predimensionamento	PROGETTO IBOQ	LOTTO 3A R 10	CODIFICA RH	DOCUMENTO TR 03 00 001	REV. B

1 PREMESSA

Il Lotto 3 “Circonvallazione di Trento e Rovereto” fa parte dei quattro lotti prioritari del progetto di Quadruplicamento della linea Fortezza – Verona, tratta di Accesso sud alla galleria di Base del Brennero, che ricade nel Corridoio della rete centrale europea denominato “Scandinavia – Mediterraneo”.

Il presente progetto sviluppa la sola circonvallazione ferroviaria della Città di Trento, denominata lotto 3A, ricadente interamente nel Comune di Trento, come parte integrante dei progetti di riqualificazione urbana e potenziamento della mobilità all’interno della città di Trento.

Gli interventi in progetto mirano al raggiungimento di importanti obiettivi in termini di incremento di capacità del corridoio e canalizzazione dei flussi, con il massimo beneficio per il territorio, dato dall’eliminazione del transito dei treni merci all’interno dell’abitato.

Il nuovo tracciato ferroviario si sviluppa per circa 13 km sulla sinistra orografica della Val d’Adige, tra i confini della Val Lagarina fino al tessuto insediativo della città di Trento, tra le località Acquaviva a sud e Roncafort a Nord. L’opera è costituita principalmente da una galleria naturale di linea, a doppia canna a singolo binario per uno sviluppo circa 10.5 km.



Figura 1 – Inquadramento generale dell’area d’intervento.

Nel seguente elaborato è riportato il dimensionamento delle opere necessarie per la realizzazione della trincea TR03.

1.1 DESCRIZIONE DELL'OPERA

La trincea TR03 si estende dalla progressiva 11+522 km alla 12+059 km circa, per uno sviluppo complessivo di circa 536 m, con altezze di scavo praticamente costanti pari a 13.50 m (intesi come valori massimi in fase provvisoria). Sono previsti diaframmi con sezione a "T" (Figura 5) di lunghezza 21 m, l'esecuzione di un tappo di fondo con *jet-grouting*, lo scavo fino alla quota necessaria per la successiva realizzazione della soletta di fondo ($h_{\text{soletta}}=1.5\text{m}$) e delle pareti interne di spessore 1.20 m, per la configurazione definitiva. Dove necessario sono stati inseriti puntoni provvisori e/o definitivi, come dettagliato nel seguito.

Si riportano di seguito la pianta, il profilo, e le sezioni rappresentative dell'opera, come stralci grafici estratti dallo specifico elaborato IBOQ 3A R 10 PZ TR 03 00 001 - IBOQ 3A R 10 PZ TR 03 00 002:

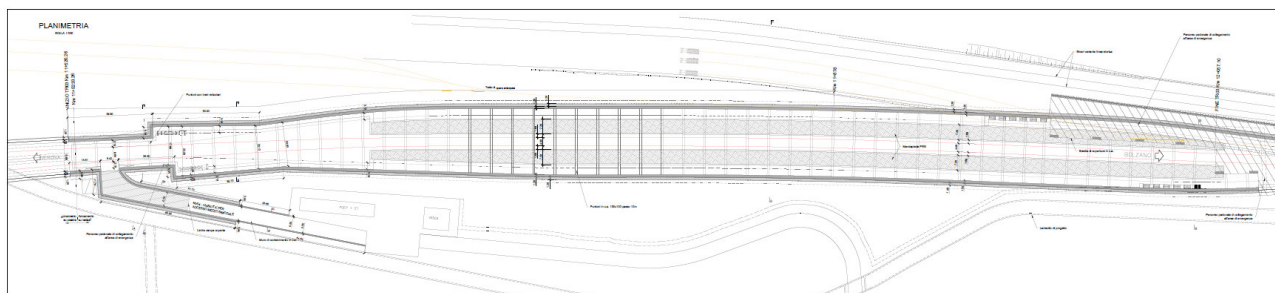
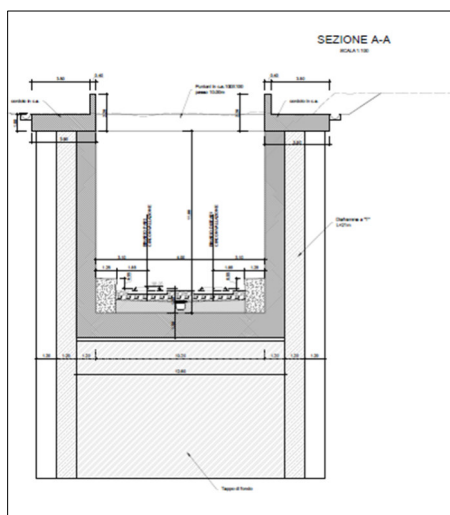


Figura 2 - Pianta TR03.



Figura 3 - Profilo TR03.



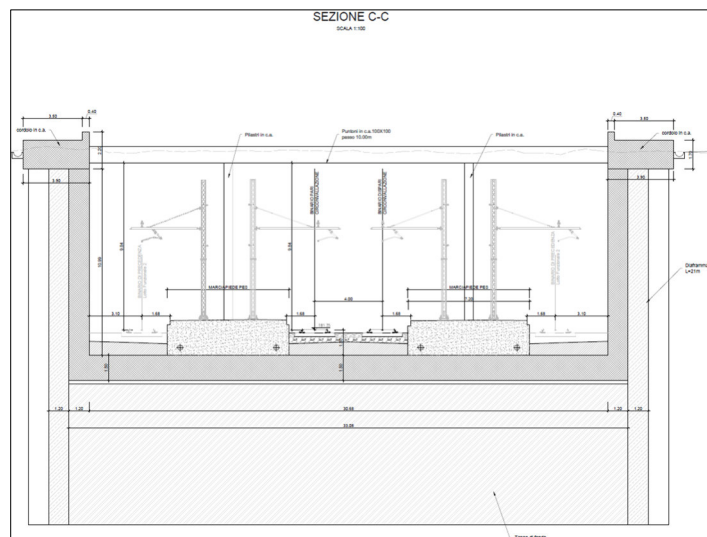
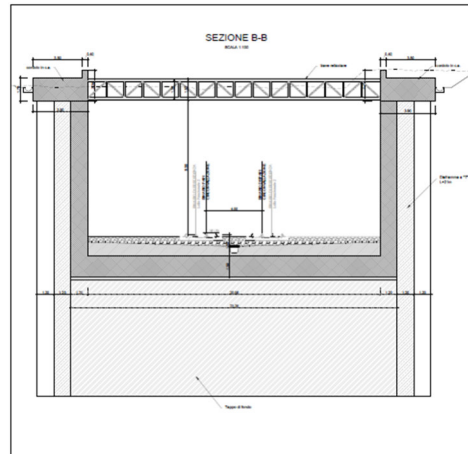


Figura 4 - Sezioni TR03.

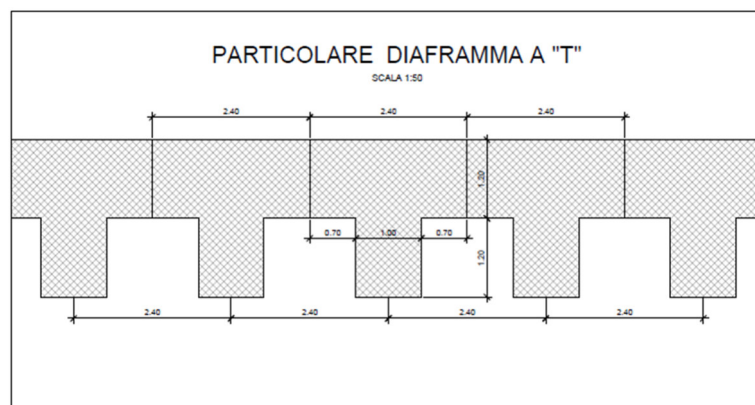



Figura 5 - Sezioni diaframma a "T".

	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: PROJECT REVIEW CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	Trincea TR03: Relazione tecnico descrittiva e di predimensionamento	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	IB0Q	3A R 10	RH	TR 03 00 001	B	7 DI 41

La TR03, compresa tra la km 11+520 e la km 11+878, verrà realizzata come opera anticipata col fine di avviare quanto prima lo scavo meccanizzato della GN01 anche dall'imbocco nord. La restante parte di opera, compresa tra la km 11+878 e la km 12+057, verrà costruita secondo le macrofasi realizzative previste nel presente progetto.

Per la realizzazione della TR03 si prevedono tre soluzioni progettuali differenziate in base alla configurazione di progetto:

- nel primo tratto, dalla progressiva 11+520.26 km alla 11+559.76 km (per uno sviluppo di circa 40 m), le altezze di scavo sono di 13.50 m e la larghezza di scavo è di 13.60 m circa. La soluzione progettuale è caratterizzata da diaframmi a "T" vincolati da un puntone in calcestruzzo armato in testa, sia in configurazione provvisoria, sia definitiva (vedi Sez A-A Figura 4);
- nel secondo tratto, dalla progressiva 11+559.76 km alla 11+661.36 km (per uno sviluppo di circa 101 m), le altezze di scavo sono di 13.50 m e la larghezza di scavo è di 26 m circa. La soluzione progettuale è caratterizzata da diaframmi a "T" che lavorano con una trave reticolare in testa, sia in configurazione provvisoria, sia definitiva (vedi Sez B-B Figura 4);
- nell'ultimo tratto, dalla progressiva 11+661.36 km alla 12+057.00 km (per uno sviluppo di circa 396 m), le altezze di scavo sono di 13.50 m e la larghezza di scavo è di 33 m circa. La soluzione progettuale è caratterizzata da diaframmi a "T" vincolati con un puntone in calcestruzzo armato in testa, sia in configurazione provvisoria, sia definitiva (vedi Sez C-C Figura 4). Essendo in questo caso la luce del puntone molto estesa, si prevede la realizzazione di pilastri (*king post*) in corrispondenza dei marciapiedi con lo scopo di ridurre la lunghezza libera del puntone.

Per le prime due tratte è stato utilizzato un unico modello di calcolo, mentre nel caso dell'ultimo tratto è stato considerato un modello che tenesse conto della presenza del sovraccarico ferroviario agente sull'opera dovuto alla vicinanza dei binari in esercizio.

	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: PROJECT REVIEW CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	Trincea TR03: Relazione tecnico descrittiva e di predimensionamento	PROGETTO IB0Q	LOTTO 3A R 10	CODIFICA RH	DOCUMENTO TR 03 00 001	REV. B

2 NORMATIVA E DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO

2.1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO


L'interpretazione dei risultati e la redazione della presente relazione sono stati effettuati nel rispetto della Normativa in vigore e delle Raccomandazioni di seguito elencate.

I principali riferimenti normativi sono i seguenti:

- Norme Tecniche per le Costruzioni - D.M. 17-01-18 (NTC-2018);
- Circolare n. 7 del 21 gennaio 2019 - Istruzioni per l'Applicazione dell'aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018;
- RFI DTC SI MA IFS 001 C del 21-12-18 - Manuale di Progettazione delle Opere Civili;
- Regolamento (UE) N° 1299/2014 della Commissione del 18 novembre 2014 relativo alle specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema "infrastruttura" del sistema ferroviario dell'Unione europea, modificata dal Regolamento (UE) N° 776/2019.

2.2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

- [1]. Geotecnica – Relazione geotecnica generale – IB0Q 3A R 10 RH GE 00 06 001;
- [2]. Geotecnica - Profilo geotecnico lato nord – IB0Q 3A R 10 F5 GE 00 06 002;
- [3]. Opere civili – TR03: pianta, prospetto e sezioni – Tavola 1 – IB0Q 3A R 10 PZ TR 03 00 001;
- [4]. Opere civili – TR03: pianta, prospetto e sezioni – Tavola 2 – IB0Q 3A R 10 PZ TR 03 00 002.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: PROJECT REVIEW CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	Trincea TR03: Relazione tecnico descrittiva e di predimensionamento	PROGETTO IBOQ	LOTTO 3A R 10	CODIFICA RH	DOCUMENTO TR 03 00 001	REV. B

3 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

Nel presente capitolo vengono riportate le principali caratteristiche dei materiali utilizzati per la realizzazione delle strutture.

3.1 CALCESTRUZZO

3.1.1 Calcestruzzo per diaframmi

- Classe di resistenza C25/30:
- Copriferro 60 mm
- $R_{ck} = 30 \text{ MPa}$ Resistenza cubica caratteristica a compressione
- $f_{ck} = 0.83 \cdot R_{ck} = 24.9 \text{ N/mm}^2$ Resistenza caratteristica a compressione;
- $f_{cd} = f_{ck} \cdot \alpha_{cd} / \gamma_c = 14.11 \text{ N/mm}^2$ Resistenza di calcolo a compressione del cls;
- $f_{ctm} = 0.30 f_{ck}^{(2/3)} = 2.55 \text{ N/mm}^2$ Resistenza media a trazione del cls;
- $f_{ctk} = 0.7 \cdot f_{ctm} = 1.79 \text{ N/mm}^2$ Resistenza caratteristica a trazione del cls;
- $f_{ctd} = f_{ctk} / \gamma_c = 1.19 \text{ N/mm}^2$ Resistenza di calcolo a trazione del cls.
- $f_{bk} = 2.25 \eta \cdot f_{ctk} = 4.00 \text{ N/mm}^2$ Resistenza caratteristica tangenziale di aderenza del cls.
- $f_{bd} = f_{bk} / \gamma_c = 2.68 \text{ N/mm}^2$ Resistenza di calcolo di aderenza del cls.
- $f_{cm} = f_{ck} + 8 = 32.9 \text{ N/mm}^2$ Resistenza media cilindrica a compressione del cls;
- $E_{cm} = 22000 \cdot [f_{cm} / 10]^{0.3} = 31447.16 \text{ N/mm}^2$ Modulo elastico del calcestruzzo
- $\sigma_c < 0.55 \cdot f_{ck} = 13.69 \text{ N/mm}^2$ Tensione massima di eserc. per il cls con comb. rara;
- $\sigma_c < 0.40 \cdot f_{ck} = 9.96 \text{ N/mm}^2$ Tensione massima di eserc. per il cls con comb. quasi perm

3.1.2 Calcestruzzo fodera interna

- Classe di resistenza C32/40:
- Copriferro 40 mm
- $R_{ck} = 40 \text{ MPa}$ Resistenza cubica caratteristica a compressione
- $f_{ck} = 0.83 \cdot R_{ck} = 33.2 \text{ N/mm}^2$ Resistenza caratteristica a compressione;

Trincea TR03: Relazione tecnico descrittiva e di predimensionamento

PROGETTO	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IBOQ	3A R 10	RH	TR 03 00 001	B	10 DI 41

- $f_{cd} = f_{ck} \cdot \alpha_{cc} / \gamma_c = 18.81 \text{ N/mm}^2$ Resistenza di calcolo a compressione del cls;
- $f_{ctm} = 0.30 f_{ck}^{(2/3)} = 3.10 \text{ N/mm}^2$ Resistenza media a trazione del cls;
- $f_{ctk} = 0.7 \cdot f_{ctm} = 2.17 \text{ N/mm}^2$ Resistenza caratteristica a trazione del cls;
- $f_{ctd} = f_{ctk} / \gamma_c = 1.44 \text{ N/mm}^2$ Resistenza di calcolo a trazione del cls.
- $f_{bk} = 2.25 \eta \cdot f_{ctk} = 4.88 \text{ N/mm}^2$ Resistenza caratteristica tangenziale di aderenza del cls.
- $f_{bd} = f_{bk} / \gamma_c = 3.25 \text{ N/mm}^2$ Resistenza di calcolo di aderenza del cls.
- $f_{cm} = f_{ck} + 8 = 41.20 \text{ N/mm}^2$ Resistenza media cilindrica a compressione del cls;
- $E_{cm} = 22000 \cdot [f_{cm}/10]^{0.3} = 33642.78 \text{ N/mm}^2$ Modulo elastico del calcestruzzo
- $\sigma_c < 0.55 \cdot f_{ck} = 18.26 \text{ N/mm}^2$ Tensione massima di eserc. per il cls con comb. rara;
- $\sigma_c < 0.40 \cdot f_{ck} = 13.28 \text{ N/mm}^2$ Tensione massima di eserc. per il cls con comb. quasi perm

3.2 ACCIAIO

3.2.1 Acciaio per cemento armato

Si utilizzano barre ad aderenza migliorata in acciaio con le seguenti caratteristiche meccaniche:

- acciaio B450C
- tensione caratteristica di snervamento $f_{yk} = 450 \text{ N/mm}^2$;
- tensione caratteristica di rottura $f_{tk} = 540 \text{ N/mm}^2$;
- resistenza di calcolo a trazione $f_{yd} = 391,30 \text{ N/mm}^2$;
- modulo elastico $E_s = 206.000 \text{ N/mm}^2$;
- tensione massima di esercizio per l'acciai $\sigma_s < 0,75 f_{yk} = 337,50 \text{ N/mm}^2$.

3.2.1 Acciaio per tubolari e carpenteria metallica

- Acciaio S355
- Tensione di snervamento $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$
- Tensione ultima a rottura $f_u = 510 \text{ N/mm}^2$

4 INQUADRAMENTO GEOTECNICO

Il modello geotecnico di calcolo è stato definito sulla base di quanto riportato nella Relazione Geotecnica [1] e nel Profilo Geotecnico [2], allegati al presente progetto e ai quali si rimanda per le trattazioni di dettaglio. Si riporta a seguire uno stralcio del citato profilo in cui ricade l'opera qui esaminata e la tabella che riassume i parametri geotecnici caratteristici assunti nel calcolo.

Unità	Prof. da p.c. (m) da - a	Descrizione	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	φ' (°)	E' (MPa)
L	0 - 5	Limo argilloso	19	0	25	10
S	5 - 22÷25	Sabbia	20	0	33	20
L	22÷25 - 30	Limo argilloso	19	0	25	10

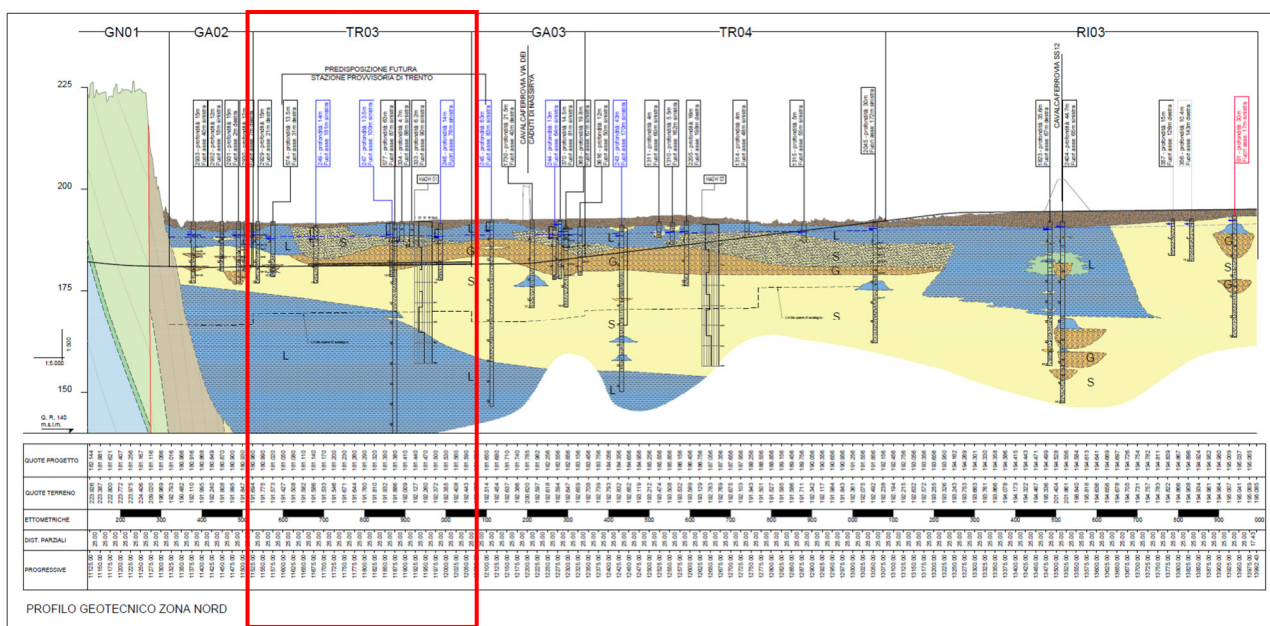


Figura 6 – Profilo geotecnico.

Nei diversi modelli di calcolo si terrà conto dell'aumento di spessore dello strato sabbioso all'aumentare della progressiva chilometrica: il primo modello è caratterizzato da uno strato di sabbia di spessore 17 m, mentre nel secondo modello lo spessore aumenta fino a 20 m.

La falda è stata assunta nel profilo geotecnico a circa 3 metri da piano campagna, tuttavia è stata cautelativamente assunta nei calcoli una soggiacenza della stessa di circa 2.5m per tener conto di innalzamenti della stessa, anche se locali e limitati nel tempo, dovuti a particolari condizioni meteorologiche, considerata anche la permeabilità dei terreni interessati.

A favore di sicurezza è stata trascurata la lingua di ghiaia le cui caratteristiche geotecniche risultano migliori rispetto a quelle delle altre due unità.

	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: PROJECT REVIEW CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	Trincea TR03: Relazione tecnico descrittiva e di predimensionamento	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	IB0Q	3A R 10	RH	TR 03 00 001	B	12 DI 41

5 CRITERI DI VERIFICA DEI DIAFRAMMI

5.1 VERIFICHE SLV

Le verifiche delle paratie sono state condotte nei riguardi dei seguenti stati limite ultimi (SLU):

- collasso del complesso opera-terreno;
- raggiungimento della resistenza degli elementi strutturali.

Il dimensionamento geotecnico dell'opera, per il caso statico, è stato condotto applicando la Combinazione 2 (A2+M2+R1), mentre per le verifiche strutturali l'analisi è stata condotta con la combinazione 1 (A1+M1+R1). È stata altresì stato considerato anche il caso sismico.

Le verifiche sono state condotte mediante l'ausilio del codice di calcolo Paratie Plus 20.1, un codice agli elementi finiti che simula il problema di uno scavo sostenuto da una paratia e permette di valutare il comportamento delle pareti durante tutte le fasi intermedie e nella configurazione finale.

La verifica strutturali sono state condotte in maniera speditiva e conservativa (trascurando lo sforzo assiale nella sezione ed il contributo delle pareti della fodera interna) per assicurarsi il corretto funzionamento dell'elemento strutturale. Nelle successive fasi progettuali, analisi più accurate consentiranno di ottimizzare le strutture e le quantità di materiali.

5.2 VERIFICHE GEOTECNICHE SLE

Per ciascun stato limite di esercizio deve essere rispettata la condizione [6.2.7] delle NTC 2018:

$$E_d \leq C_d$$

essendo E_d e C_d rispettivamente il valore di progetto dell'effetto delle azioni e il prescritto valore limite dell'effetto delle azioni (spostamenti, rotazioni, distorsioni, ecc.).

In particolare, dovranno essere valutati gli spostamenti delle opere di sostegno e del terreno circostante per verificarne la compatibilità con la funzionalità delle opere stesse e con la sicurezza e funzionalità dei manufatti adiacenti, anche a seguito di modifiche indotte sul regime delle pressioni interstiziali.

Nel presene progetto è stata posta particolare attenzione, per le sezioni che lo richiedessero, alla valutazione dei cedimenti indotti sui binari in esercizio, verificando che il valore massimo degli stessi non fosse superiore ad 1 cm.

In particolare, tali cedimenti sono valutati applicando la correlazione di Kung et al. (2007), implementata nel codice di calcolo Paratie Plus, che consente di stimare i cedimenti verticali per diverse configurazioni di opera di sostegno con una serie di equazioni in forma chiusa.

Nota δv_{max} , il massimo cedimento verticale, il profilo dei cedimenti a monte dello scavo è valutato sulla base del seguente schema trilineare:

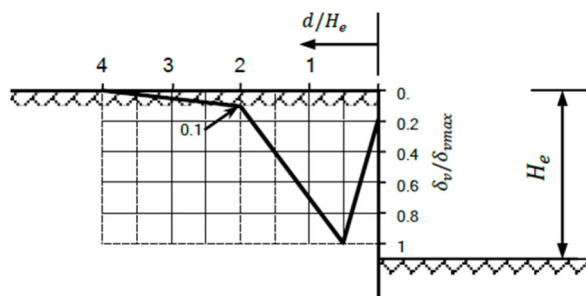


Figura 7 – Schematizzazione del Metodo di Kung et al. (2007) Implementato in Paratie Plus.

6 ANALISI DEI CARICHI

Nel seguente paragrafo si descrivono i carichi elementari che agiscono sulla struttura in oggetto. Tali azioni sono definite secondo le normative e sono utilizzate per la generazione delle combinazioni di carico nell'ambito delle verifiche di resistenza, in esercizio ed in presenza dell'evento sismico.

Tutti i carichi elementari si riferiscono all'unità di sviluppo dell'opera, pertanto sono tutti definiti rispetto all'unità di lunghezza.

6.1 SPINTA DEL TERRENO

Nel modello di calcolo impiegato dal software di calcolo Paratie Plus, la spinta del terreno viene determinata investigando l'interazione statica tra il terreno e la struttura deformabile, a partire da uno stato di spinta a riposo del terreno sulla paratia.

I parametri che identificano il tipo di legge costitutiva possono essere distinti in due sottoclassi: parametri di spinta e parametri di deformabilità del terreno.

I parametri di spinta sono il coefficiente di spinta a riposo K_0 , il coefficiente di spinta attiva K_a e il coefficiente di spinta passiva K_p .

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

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

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

$$K_0 = K_{0,NC} \cdot (\text{OCR})^m$$

Dove

- $K_{0,NC} = 1 - \text{sen } \varphi'$ è il coefficiente di spinta a riposo per un terreno normalconsolidato ($\text{OCR}=1$),

- OCR è il grado di sovraconsolidazione e m è un parametro empirico, di solito compreso tra 0.4 e 0.7.

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

$$K_a = \tan^2(45 - \varphi'/2)$$

$$K_p = \tan^2(45 + \varphi'/2)$$

6.2 CARICHI PERMANENTI

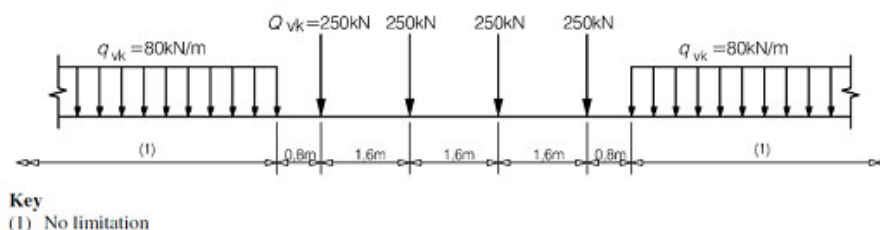
Si considerano carichi permanenti agenti solamente nel modello relativo alla sezione C-C (terza tratta), in cui agisce a monte dell'opera un carico permanente pari a 14.40 kPa, rappresentante il carico esercitato dalla presenza di 0.8 m di spessore di ballast ($\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$).

6.3 CARICHI ACCIDENTALI

Si considera un carico di 10 kPa generato dai macchinari di cantiere presenti in fase di realizzazione.

6.4 CARICHI MOBILI DA TRAFFICO FERROVIARIO

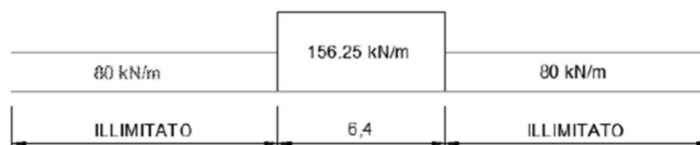
Nel già citato modello della sezione C-C si tiene conto della presenza della linea ferroviaria in esercizio. A favore di sicurezza si considera il modello di carico LM71.



Il carico equivalente si ricava dalla ripartizione trasversale e longitudinale dei carichi per effetto delle traverse e del ballast.

Considerando i 4 carichi assiali da 250 kN e la relativa distribuzione longitudinale, il carico verticale equivalente a metro lineare agente alla quota della piattaforma ferroviaria (convenzionalmente a 70 cm dal piano del ferro) risulta pari a:

$$p = \frac{4 \times 250}{4 \times 1.60} = 156.25 \text{ kN/m}^{\parallel}$$



 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: PROJECT REVIEW CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	Trincea TR03: Relazione tecnico descrittiva e di predimensionamento	PROGETTO IBOQ	LOTTO 3A R 10	CODIFICA RH	DOCUMENTO TR 03 00 001	REV. B

Considerando la distribuzione trasversale dei carichi su una larghezza pari alla somma della traversina (2.40 m) e la distribuzione all'interno di metà spessore di ballast ($2 \cdot 0.4 = 0.8$), si ha una larghezza di diffusione pari a di 3.20 m; si ottiene quindi:

$$156.25/3.20 = 48.83 \text{ kPa}$$

che, moltiplicato per il relativo coefficiente α , pari a 1.1, si ha

$$Q_{LM71} = 48.83 \cdot 1.1 = 53.71 \text{ kPa}$$

6.5 VALUTAZIONE DELL'AZIONE SISMICA

Per l'opera in esame si è considerata una vita nominale di 75 anni e una classe d'uso III ($C_U = 1.5$), pertanto si ottiene una vita di riferimento pari a $V_R = 112.5$ anni.

Considerando una Categoria di sottosuolo C e una categoria topografica pari a T1, si ottengono i seguenti parametri sismici:

Parametri indipendenti

STATO LIMITE	SLV
a_g	0.092 g
F_c	2.702
T_c	0.348 s
S_s	1.500
C_c	1.488
S_T	1.000
q	1.000

Tabella 1 – Parametri sismici.

quindi con $a_{max} = a_g \cdot S = 0.092 \cdot 1.5 = 0.138 \text{ g}$.

Le verifiche in condizioni sismiche sono state condotte con riferimento allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (SLV), con riferimento alla sola configurazione finale dell'opera. Per le verifiche in condizioni sismiche i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici sono pari all'unità. Si adotta il metodo pseudo-statico, calcolando il coefficiente sismico orizzontale secondo le prescrizioni della normativa (DM 17/01/2018):

$$k_h = \alpha \cdot \beta \cdot \left(\frac{a_{max}}{g} \right)$$

In cui α è un coefficiente che tiene conto della deformabilità dei terreni interagenti con l'opera e β è un coefficiente funzione della capacità dell'opera di subire spostamenti senza cadute di resistenza.

Considerando l'opera nella configurazione finale come struttura rigida che non ammette spostamenti, l'incremento di spinta del terreno dovuto all'azione sismica è stato calcolato attraverso la trattazione di Wood valida per pareti che accettano piccoli spostamenti e come una sollecitazione uniformemente distribuita:

$$\Delta F_E = S \cdot a_g / g \cdot \gamma \cdot H^2$$

È opportuno evidenziare che, in questa fase, è stato completamente trascurato l'effetto delle pareti interne della struttura nella sua configurazione definitiva. Considerando lo spessore delle stesse (1.2m), all'incirca analogo con quello dei diaframmi, tale assunzione assume un carattere molto cautelativo.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: PROJECT REVIEW CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	Trincea TR03: Relazione tecnico descrittiva e di predimensionamento	PROGETTO IBOQ	LOTTO 3A R 10	CODIFICA RH	DOCUMENTO TR 03 00 001	REV. B

7 COMBINAZIONI DI CARICO

Le combinazioni di carico prese in considerazione nelle verifiche sono state definite in base a quanto prescritto dalle NTC-2018 al par.2.5.3:

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

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$
 [2.5.1]
 - Combinazione caratteristica, cosiddetta rara, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) irreversibili:

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$
 [2.5.2]
 - Combinazione frequente, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) reversibili:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$
 [2.5.3]
 - Combinazione quasi permanente (SLE), generalmente impiegata per gli effetti a lungo termine:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$
 [2.5.4]
 - Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E:

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$
 [2.5.5]
 - Combinazione eccezionale, impiegata per gli stati limite ultimi connessi alle azioni eccezionali A:

$$G_1 + G_2 + P + A_d + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$
 [2.5.6]
- Gli effetti dell'azione sismica saranno valutati tenendo conto delle masse associate ai seguenti carichi gravitazionali:
- $$G_1 + G_2 + \sum_j \psi_{2j} Q_{kj}$$
- [2.5.7]

Per le verifiche si deve tenere conto dei coefficienti parziali per le azioni, per i parametri geotecnici e per le resistenze.

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

⁽¹⁾ Per i carichi permanenti G_2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G1}

Tabella 2 – Coefficienti parziali di sicurezza per le combinazioni di carico agli SLU.

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_γ	1,0	1,0

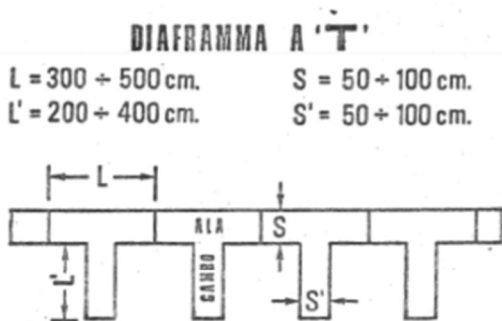
Tabella 3 - Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno.

Come da NTC18 al par 2.5.3, le combinazioni sismiche sono effettuate ponendo pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici e impiegando le resistenze di progetto con gli opportuni coefficienti parziali γ_R .

8 PROGETTO E VERIFICA: TRATTA 11+522.00 KM – 11+665.00 KM (SEZ A-A)

8.1 DATI DI INPUT

L'opera è costituita da una coppia di diaframmi di lunghezza 21 m con sezione a "T", le cui dimensioni sono riportate nella tabella Dati di Input dell'immagine seguente. Ai fini del calcolo è considerata una sezione rettangolare di rigidità equivalente avente spessore pari a 2.00 m (vedi figura seguente).



DATI di INPUT			
L (m)	S (m)	L' (m)	S' (m)
2,4	1,2	1,2	1

CALCOLI		
$I_1 \text{ (m}^4\text{)}$	$A_1 \text{ (m}^2\text{)}$	$d_1 \text{ (m)}$
0,35	2,88	0,352941
$I_2 \text{ (m}^4\text{)}$	$A_2 \text{ (m}^2\text{)}$	$d_2 \text{ (m)}$
0,14	1,20	0,847059
$Y_g \text{ (m)}$	$I \text{ (m}^4\text{)}$	$I' \text{ (m}^4\text{)}$
0,952941	1,709365	0,712235

Spessore Equivalente t (m)
2,0

In testa è presente un cordolo con sezione 3.90 m x 1 m. I due elementi strutturali sono collegati tra loro tramite un ordine di puntoni definitivi disposti in corrispondenza del cordolo.

I principali dati di input sono riassunti nella tabella seguente nella quale si evidenzia anche il valore dell'altezza di scavo di calcolo H_1 che tiene conto delle indicazioni di normativa sull'incremento da assumere secondo il par. 6.5.2.2.

Tipologia struttura di sostegno	Diaframmi sp equivalente=2.00 m
Altezza totale diaframma	$H_{tot} = 21 \text{ m} + 1\text{m cordolo} = 22 \text{ m}$
Altezza di scavo (da estradosso cordolo)	$H = 13.5 \text{ m}$
Altezza di scavo di calcolo (DM 2018 § 6.5.2.2) (da estradosso cordolo)	$H_1 = H + \min [0.5; 10\% \Delta t] = 14.00 \text{ m}$
Inclinazione del piano campagna a monte	0°
Inclinazione del piano campagna a valle	0°
Sovraccarichi permanenti destra	$g = 0$
Sovraccarichi permanenti sinistra	$g = 0 \text{ kPa}$
Sovraccarichi accidentali destra	$q = 0 \text{ kPa (cantiere)}$
Sovraccarichi accidentali sinistra	$q = 10 \text{ kPa (cantiere)}$
Contrasti	Puntone definitivo in testa

Tabella 4 – Caratteristiche generali relative all'opera.

Nel calcolo è stato considerato il miglioramento del terreno per lo spessore interessato dal *jet-grouting*, mentre è stata trascurata, con approccio conservativo, la presenza delle pareti della struttura interna nella configurazione definitiva.

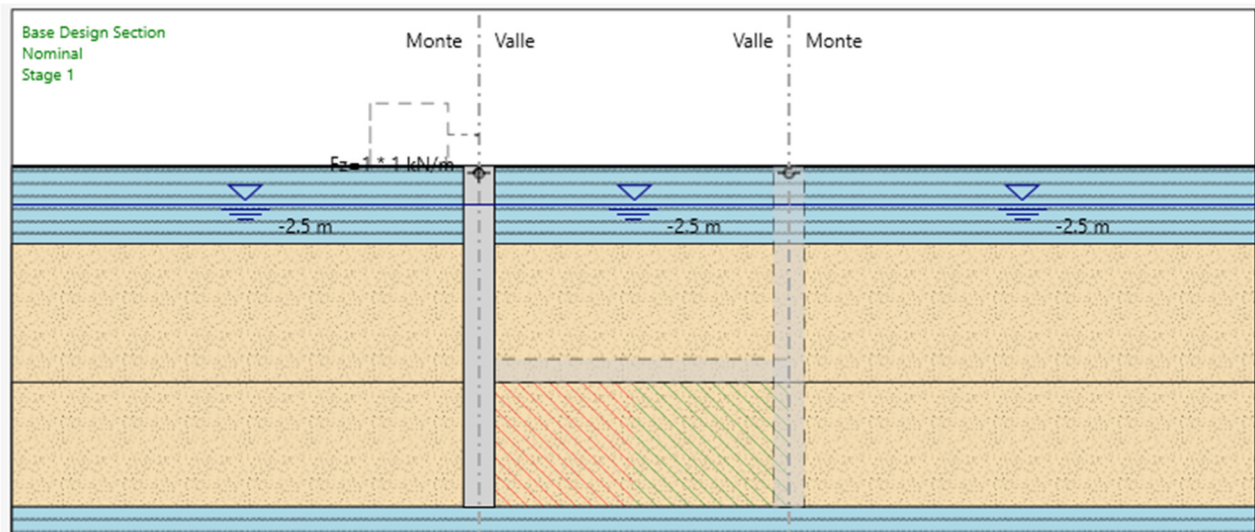
Per simulare la presenza del tappo di fondo sono state assegnate al terreno trattato a fondo scavo le seguenti caratteristiche:

- Coesione efficace: $c' = 100 \text{ kPa}$
- Angolo di resistenza al taglio: ϕ' a favore di sicurezza si assume coincidente con ϕ' del terreno non trattato
- Coefficiente di permeabilità: $k = 0.00001 \text{ m/s}$
- Coefficiente moltiplicativo del modulo di Young E: 5.

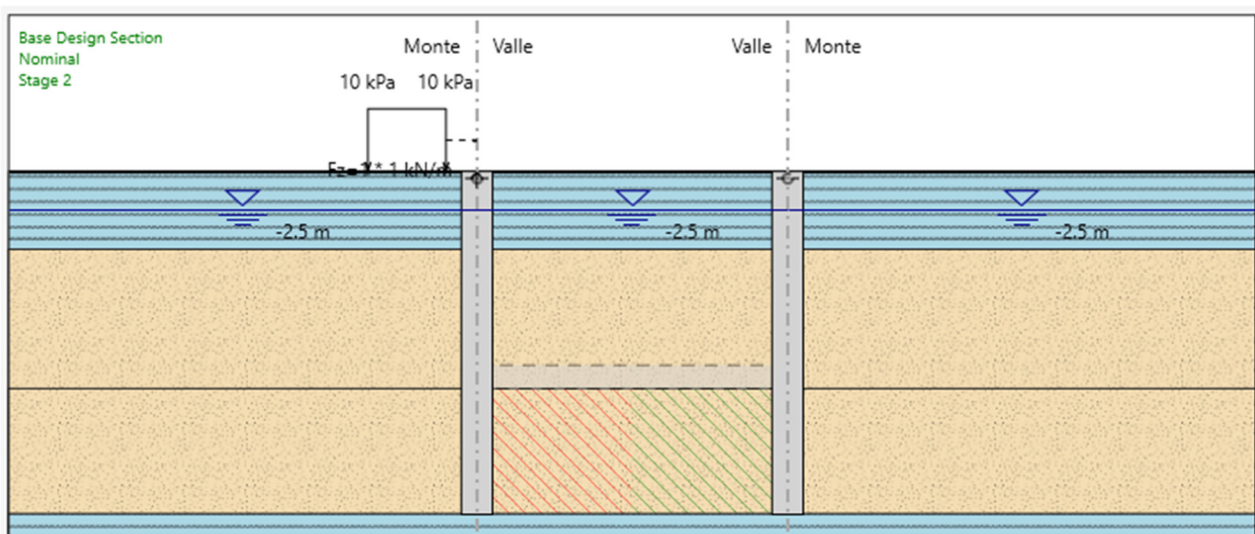
8.2 FASI DI CALCOLO

Nel presente paragrafo vengono brevemente descritte e indicate in forma grafica le fasi assunte nel calcolo, nella fattispecie gli step prevedono:

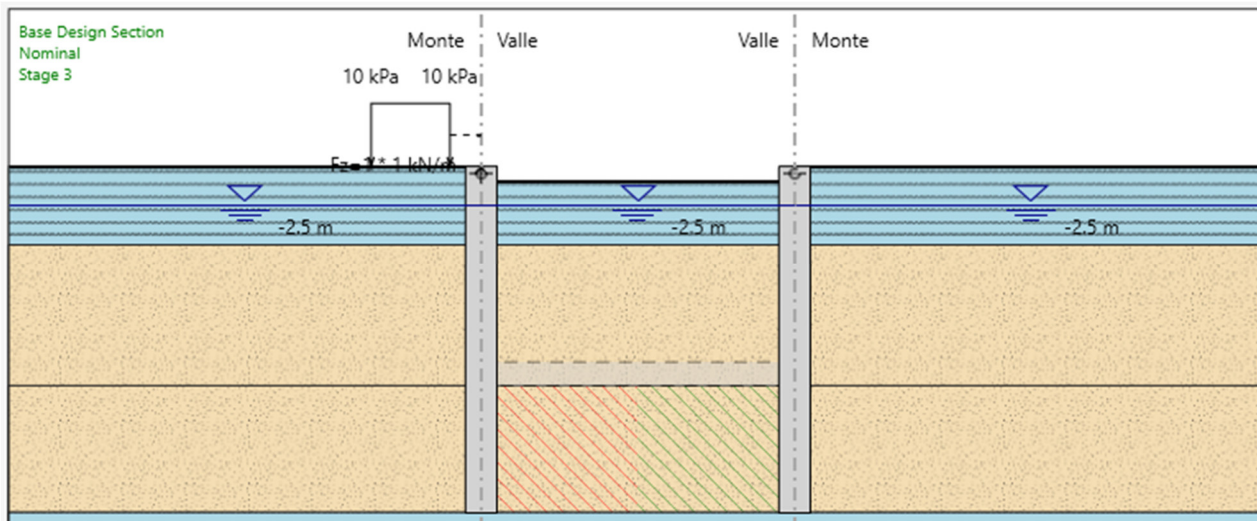
a) Realizzazione diaframmi e tappo di fondo (a cui sono state assegnate le caratteristiche come sopra descritte);



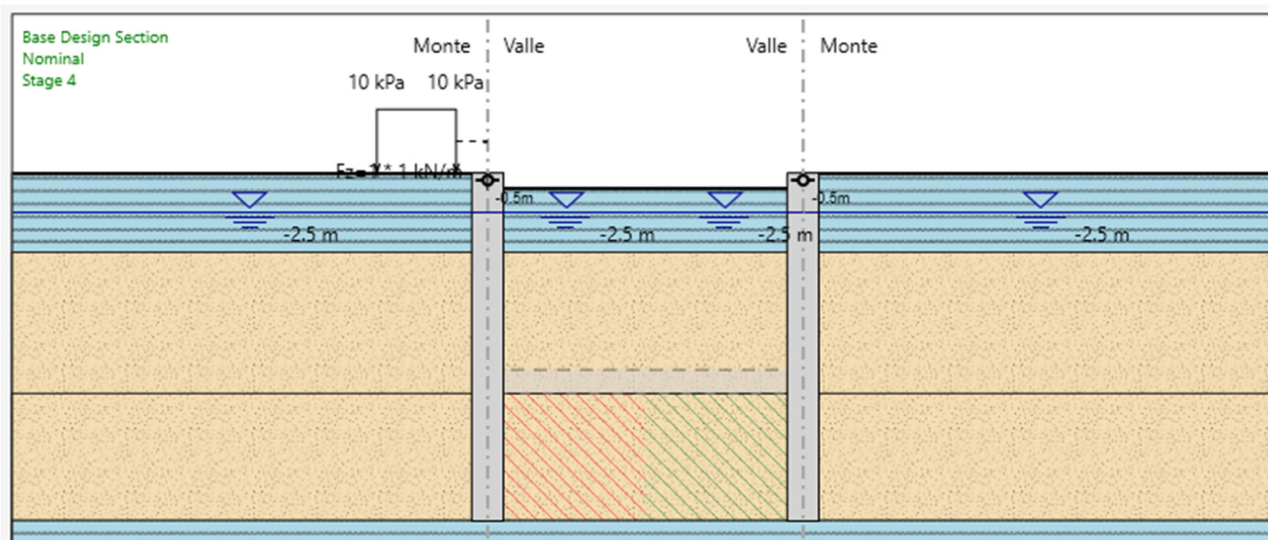
b) Applicazione del sovraccarico accidentale a monte relativo ai macchinari da cantiere (10 kPa);



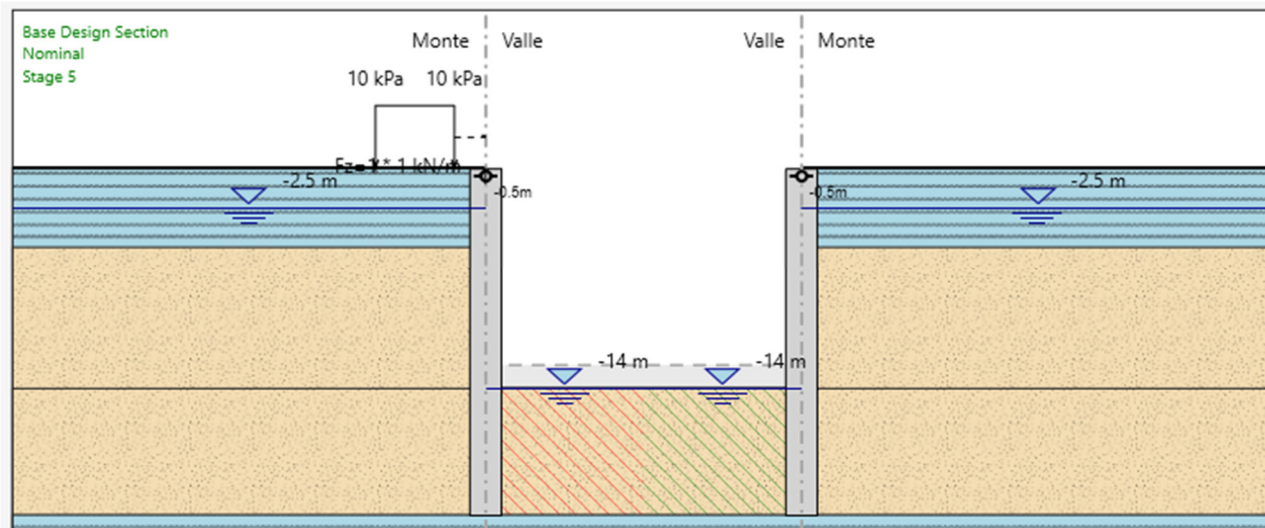
c) Scavo fino a quota -1 m da p.c.;



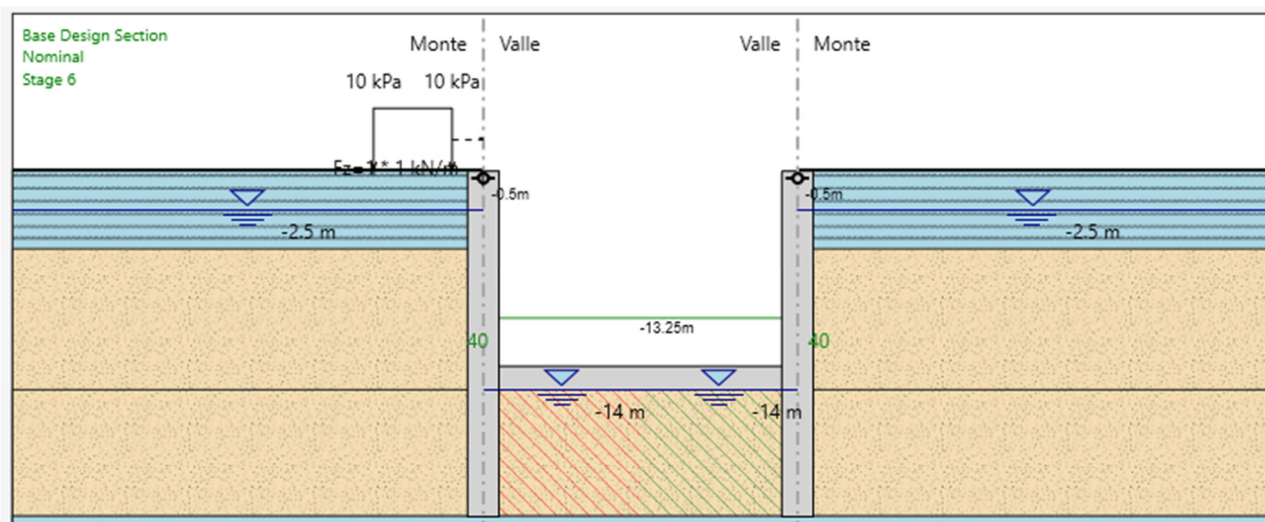
d) Realizzazione puntone definitivo a quota -0.50 m da p.c.;



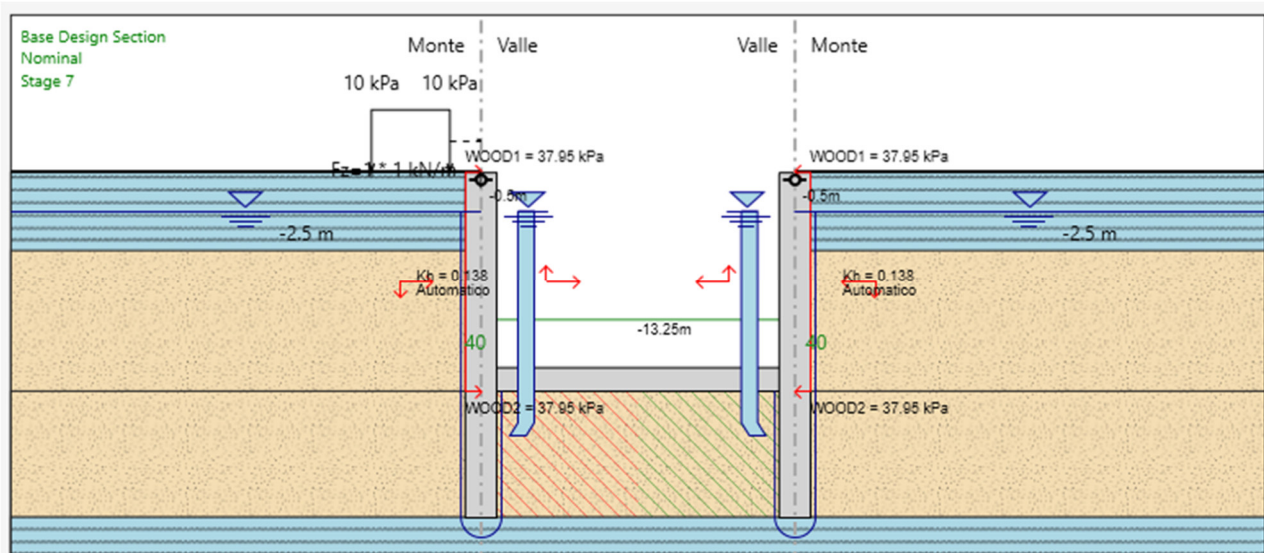
e) Scavo fino a quota fondo scavo ($H_1 = 14.00$ m da p.c.) e abbassamento della falda;



f) Realizzazione della soletta di fondo (spessore 1.50 m) e applicazione del carico sulla stessa derivante dall'armamento ferroviario;



g) Applicazione azione sismica, in cui si tiene conto dell'incremento della pressione idrostatica al di sotto della soletta di fondo.



8.3 RISULTATI

Nelle figure che seguono si riportano i grafici delle sollecitazioni di maggior interesse ottenuti nelle fasi di calcolo più significative.

Quanto ottenuto per la sezione A-A qui discussa, considerata la similitudine di condizioni a meno della larghezza dello scavo, può essere considerato applicabile anche alla sezione B-B.

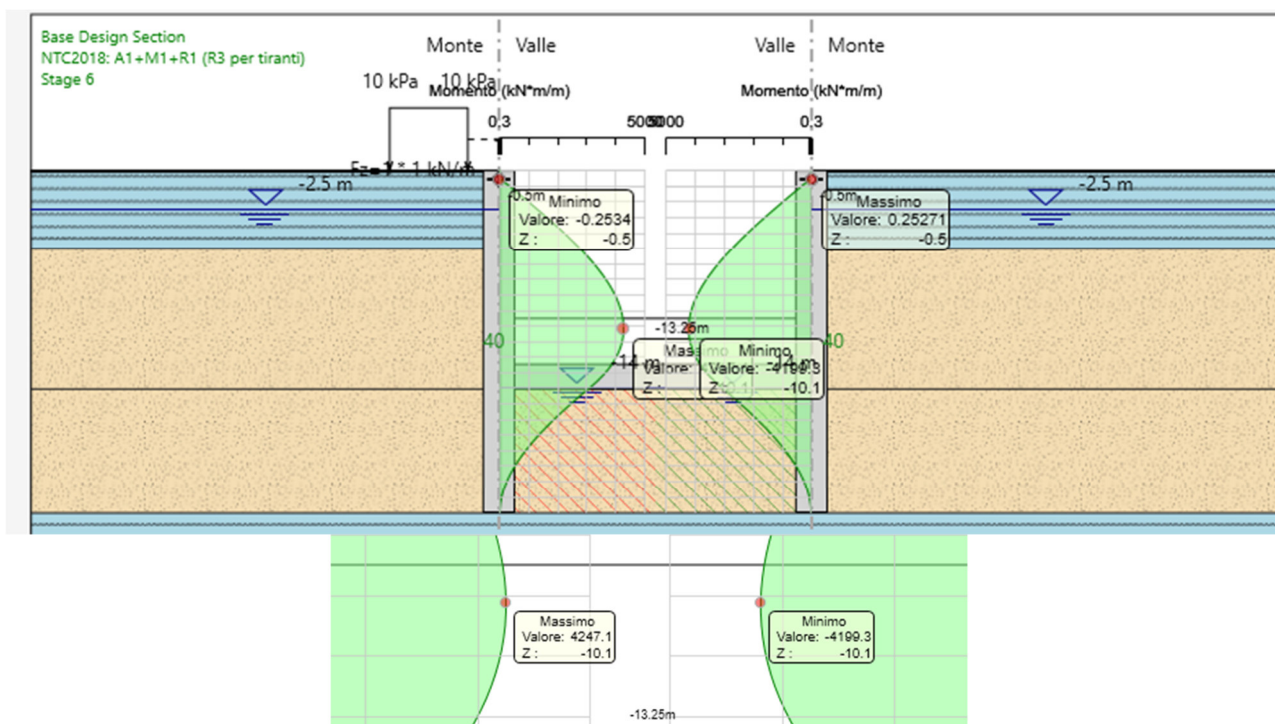


Figura 8 – Momento SLU – Stage f.

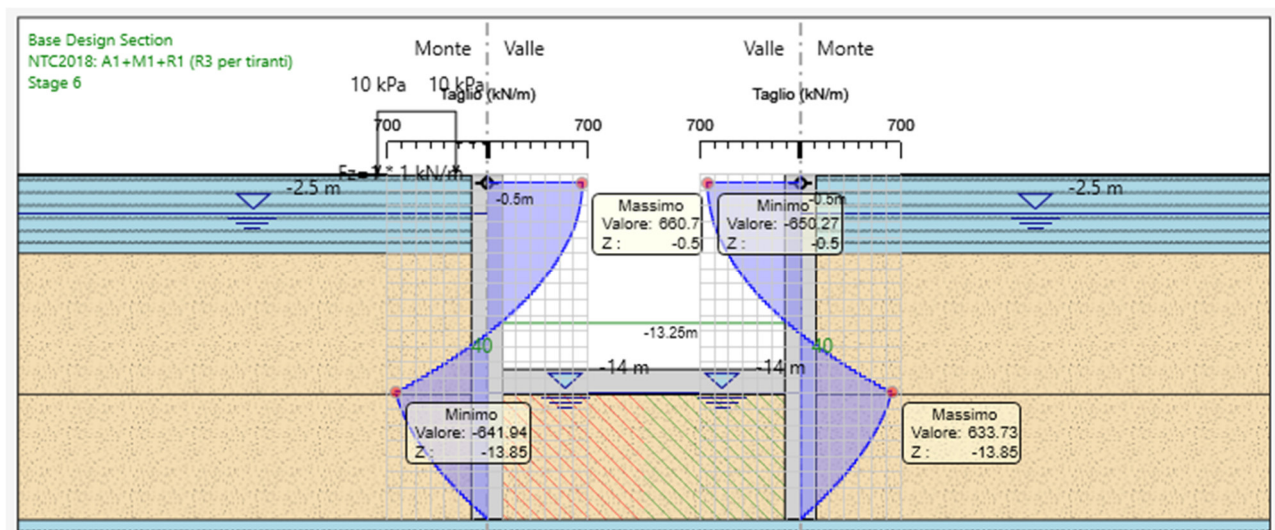


Figura 9 – Taglio SLU – Stage f.

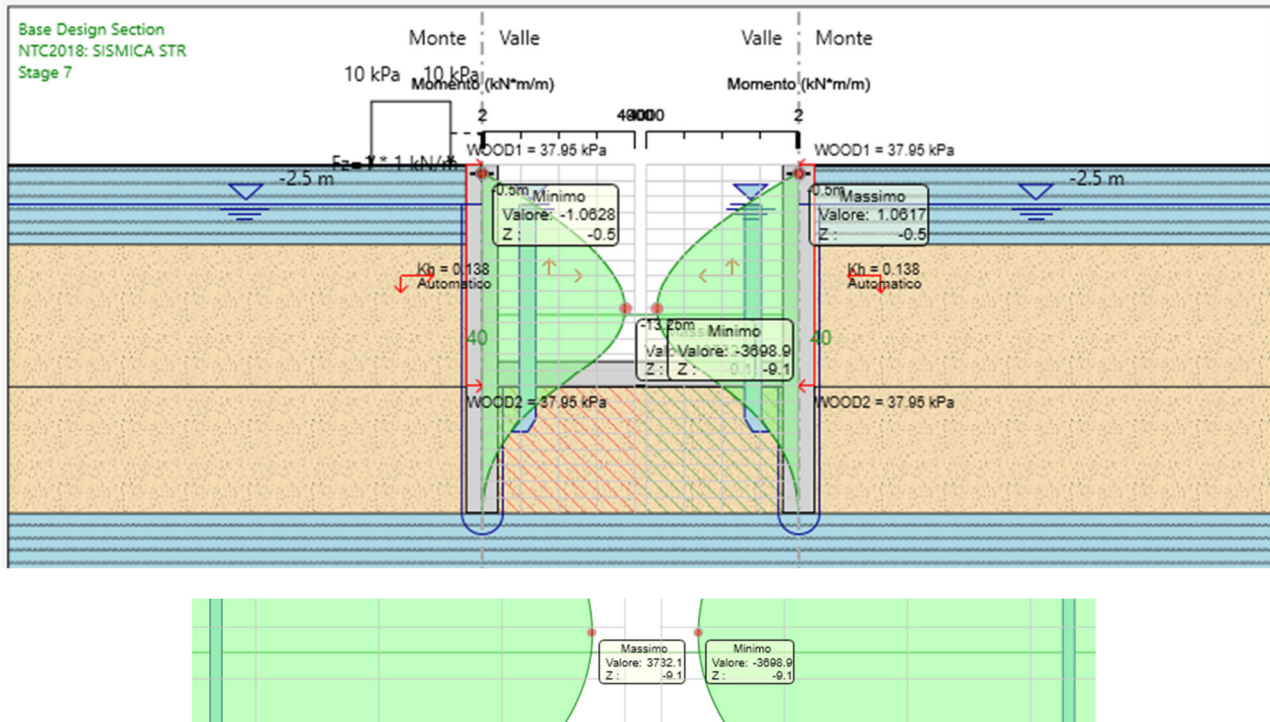


Figura 10 – Momento SLV – Stage g.

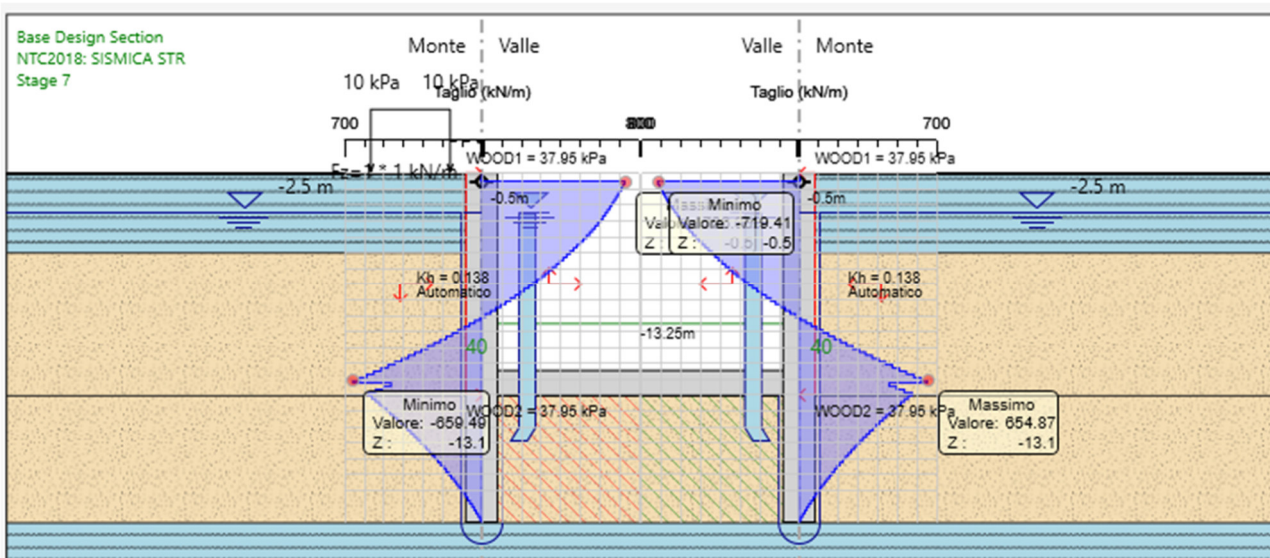


Figura 11 – Taglio SLV - Stage g.

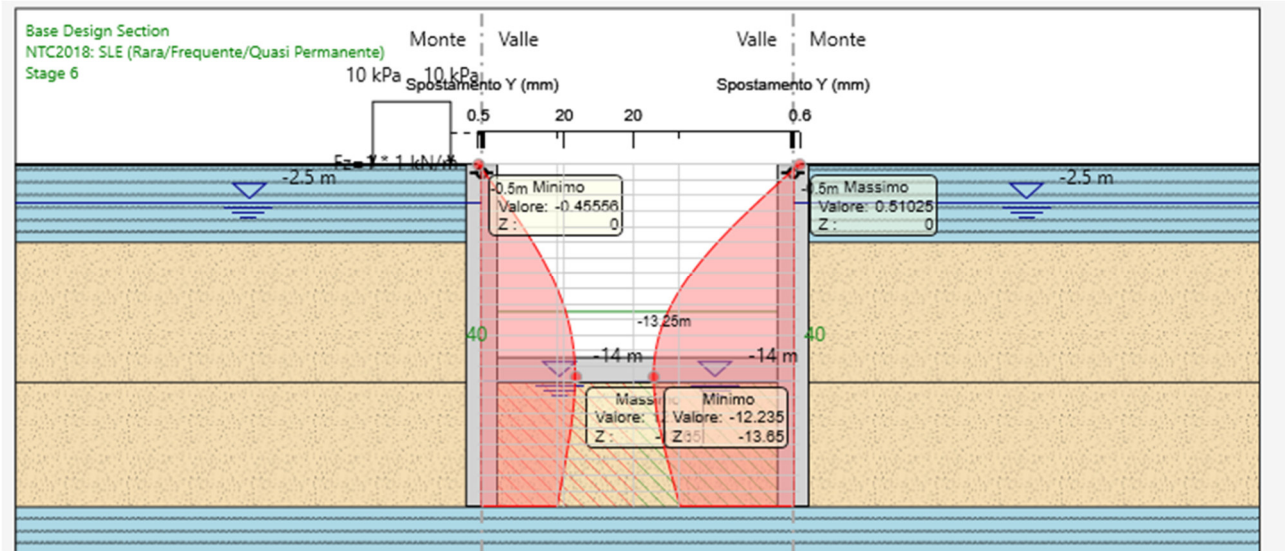


Figura 12 – Spostamento SLE – Stage f.

Lo spostamento massimo orizzontale si registra in corrispondenza della soletta di fondo, nello stage f, ed è pari a 12.2 mm circa.

Lo spostamento massimo che l'opera può subire è pari a:

$$0.005 H_{scavo} = 0.005 * 14 = 70 \text{ mm}$$

Condizione soddisfatta

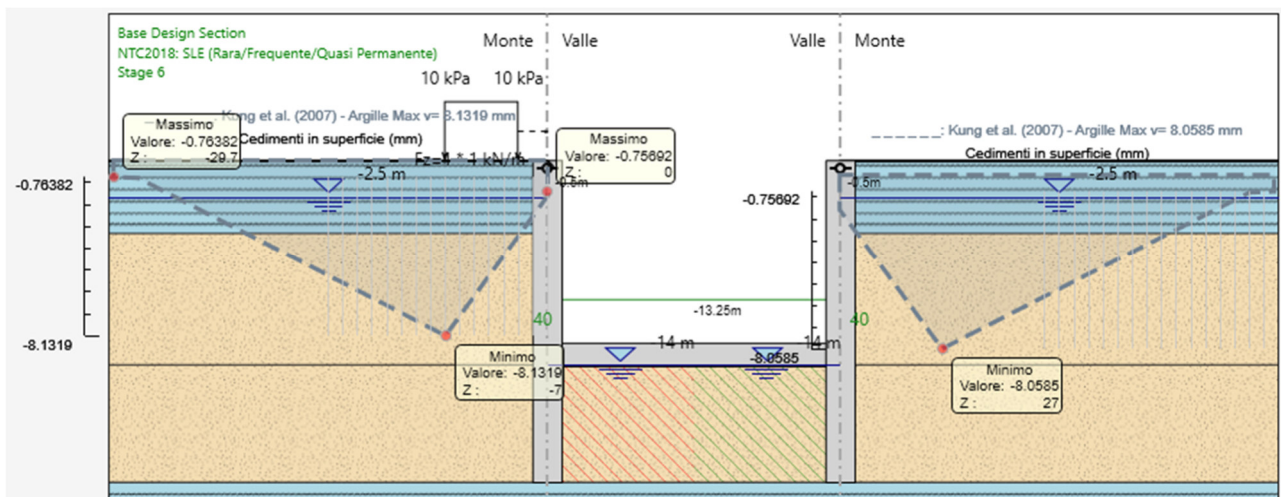


Figura 13 – Cedimento sotto al binario – Stage f.

Il cedimento massimo stimato a monte dell'opera, in corrispondenza dello Stage f, risulta inferiore a 1 cm.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: PROJECT REVIEW CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	Trincea TR03: Relazione tecnico descrittiva e di predimensionamento	PROGETTO IB0Q	LOTTO 3A R 10	CODIFICA RH	DOCUMENTO TR 03 00 001	REV. B

8.3.1 Diaframmi

Dalle sollecitazioni ricavate, la combinazione statica risulta la più gravosa. L'opera modellata è cautelativa rispetto alla condizione reale, in quanto le sollecitazioni sono state assegnate completamente al diaframma, senza tener conto dell'ausilio della fodera interna. Tuttavia, i diaframmi analizzati sono correttamente dimensionati in quanto le sollecitazioni ricavate sono compatibili con le caratteristiche inerziali e di resistenza degli stessi.

8.3.2 Puntoni

Per garantire la verifica dell'opera come esplicitato nelle fasi di calcolo sono stati inseriti in corrispondenza del cordolo delle paratie puntoni definitivi delle seguenti caratteristiche:

- dalla progressiva 11+522.00 km alla 11+588.00 km (sez. A-A) sono inseriti dei puntoni definitivi in calcestruzzo, con sezione 1m x 1m, disposti con passo pari a 10 m;
- dalla progressiva 11+588.00 km alla 11+665.00 (sez. B-B) km sono inserite delle travi reticolari metalliche poste ogni 10 m (in questo caso specifico lo spessore del cordolo è di 1.70 m per ospitare la trave). Le travi sono caratterizzate da:
 - o due correnti superiori e inferiori costituiti da tubolari in acciaio di diametro 219.1 mm e spessore 12.5 mm, disposti ai vertici di un quadrato di lato di 1.30 m;
 - o diagonali costituiti da tubolari in acciaio di diametro 101.6 mm e spessore 5 mm;
 - o montanti costituiti da tubolari in acciaio di diametro 101.6 mm e spessore 5 mm, posti ad interasse di 1.30 m.

Nella seguente figura è rappresentato il puntone a trave reticolare

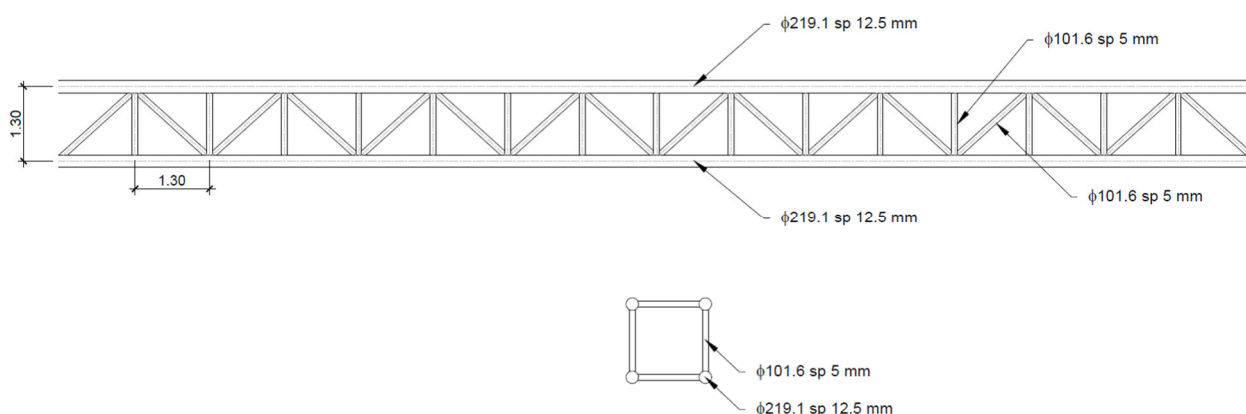


Figura 14 – Trave reticolare.

8.4 VERIFICHE AL SOLLEVAMENTO

8.4.1 Tappo di fondo

Per quanto concerne il tappo di fondo, lo spessore è stato valutato in maniera speditiva senza ricorrere a calcoli accurati, che invece dovranno essere svolti nelle successive fasi progettuali.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: PROJECT REVIEW CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	Trincea TR03: Relazione tecnico descrittiva e di predimensionamento	PROGETTO IBOQ	LOTTO 3A R 10	CODIFICA RH	DOCUMENTO TR 03 00 001	REV. B

Tuttavia è verosimile immaginare che sarà necessario un opportuno sistema di sfiati e relativo aggettamento locale dell'acqua di falda, al fine di ridurre la sottospinta idraulica e, di conseguenza, contenere lo spessore del tappo di fondo.

8.4.2 Soletta di fondo

Nelle fasi costruttive, quando ancora non sono state completate le pareti interne, per garantire la stabilità al sollevamento della soletta di fondo è necessario effettuare il drenaggio delle acque di sottospinta.

Nelle successive fasi di progettazione verrà definito nel dettaglio il sistema di drenaggio e aggettamento delle acque.

8.4.3 Struttura definitiva

Nella sua configurazione finale la struttura scatolare interna risulta verificata nei confronti del galleggiamento.

VERIFICA AL GALLEGGIAMENTO - TR03		
γ_w	10 kN/mc	peso volume acqua
γ_{cls}	25 kN/mc	peso volume cls
γ_{ric}	20 kN/mc	peso volume terreno ricoprimento
γ_{bal}	20 kN/mc	peso volume ballast e regolazzazione
$h_{w1_soletta}$	10,5 m	altezza del battente idraulico sotto soletta
$h_{w1_diaframmi}$	19 m	altezza del battente idraulico sotto diaframmi
B	25 m	Larghezza base scatolare
H_{pied}	11 m	Altezza piedritti
$S_{sol,sup}$	0 m	spessore soletta superiore
$S_{sol,inf}$	1,5 m	spessore soletta di base
S_{pied}	1,2 m	spessore piedritti
H_{ric}	0 m	altezza ricoprimento
$B_{cordolo}$	3,7 m	Larghezza cordolo
$H_{cordolo}$	1,7 m	Altezza cordolo
$B_{equ,diaframmi}$	1,7 m	Larghezza equivalente diaframmi
$L_{diaframmi}$	21 m	Lunghezza diaframmi
$B_{ballast}$	25 m	Larghezza ballast
$H_{ballast}$	1,3 m	Bpessore ballast
$P_{scatolare:U}$	1597,5 kN	Peso struttura scatolare
$P_{cordoli}$	314,5 kN	Peso cordoli sommitali
$P_{ballast}$	650 kN	Peso ballast + soletta regol
$P_{diaframmi}$	1785 kN	Peso diaframmi
$S_w_soletta$	2625 kN	Sottospinta soletta
$S_w_diaframmi$	646 kN	Sottospinta diaframmi
γ_{stab}	0,9	coefficiente azione stabilizzante
γ_{instab}	1,1	coefficiente azione destabilizzante
F_{stab}	3912,3 kN	forza stabilizzante
F_{inst}	3598,1 kN	forza destabilizzante

	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: PROJECT REVIEW CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	Trincea TR03: Relazione tecnico descrittiva e di predimensionamento	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	IBOQ	3A R 10	RH	TR 03 00 001	B	28 DI 41

- L'altezza del battente idraulico è pari a 10.50 m fino a fondo scavo e 19.0 fino al piede dei diaframmi;
- La sottospinta idraulica vale 105 kN/mq a fondo scavo e 190 kN/mq e fondo diaframmi che, moltiplicati rispettivamente per la larghezza dello scavo e lo spessore dei diaframmi, valgono 2625 kN/m e 646 kN/m;
- Il peso dello scatolare è pari alla somma della soletta inferiore, dei piedritti 1597,5 kN/m;
- Il peso dei cordoli è pari a 314,5 kN/m;
- Il peso del ballast, di spessore pari a 1.3 m, vale 650 kN/m;
- Il peso dei diaframmi, di spessore equivalente 1.7 m, è pari a 1785 kN/m.

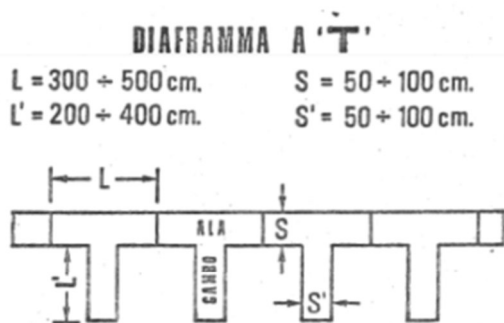
Moltiplicando le azioni instabilizzanti per il coefficiente $\gamma = 1.1$ e le azioni stabilizzanti per il coefficiente $\gamma = 0.9$, si ottiene $F_{STAB} = 3912 \text{ kN/m} > F_{INSTAB} = 3598 \text{ kN/m}$, pertanto la verifica a galleggiamento risulta soddisfatta.

Nelle fasi costruttive, come per la soletta di base, quando ancora non è stato completato lo scatolare a "U" interno, per garantire la stabilità al sollevamento della struttura è necessario effettuare il drenaggio e l'aggottamento delle acque di sottospinta.

9 PROGETTO E VERIFICA: TRATTA 11+665.00 KM – 12+059.00 KM (SEZ C-C)

9.1 DATI DI INPUT

L'opera è costituita da una coppia di diaframmi di lunghezza 21 m con sezione a "T", le cui dimensioni sono riportate nella tabella Dati di Input dell'immagine seguente. Ai fini del calcolo è considerata una sezione rettangolare di rigidezza equivalente avente spessore pari a 2.00 m (vedi figura seguente).



DATI di INPUT			
L (m)	S (m)	L' (m)	S' (m)
2,4	1,2	1,2	1

CALCOLI		
$I_1 \text{ (m}^4\text{)}$	$A_1 \text{ (m}^2\text{)}$	$d_1 \text{ (m)}$
0,35	2,88	0,352941
$I_2 \text{ (m}^4\text{)}$	$A_2 \text{ (m}^2\text{)}$	$d_2 \text{ (m)}$
0,14	1,20	0,847059
$Y_g \text{ (m)}$	$I \text{ (m}^4\text{)}$	$I' \text{ (m}^4\text{)}$
0,952941	1,709365	0,712235

Spessore Equivalente t (m)
2,0

In testa è presente un cordolo con sezione 3.90 m x 1.7 m. I due elementi strutturali sono collegati tra loro tramite un ordine di puntoni definitivi disposti in corrispondenza del cordolo.

I principali dati di input sono riassunti nella tabella seguente nella quale si evidenzia anche il valore dell'altezza di scavo di calcolo H_1 che tiene conto delle indicazioni di normativa sull'incremento da assumere secondo il par. 6.5.2.2.

Tipologia struttura di sostegno	Diaframmi sp equivalente=2.00 m
Altezza totale diaframma	$H_{tot} = 21 \text{ m} + 1.7\text{m cordolo} = 22.7 \text{ m}$
Altezza di scavo (da estradosso cordolo)	$H = 13.25 \text{ m}$
Altezza di scavo di calcolo (DM 2018 § 6.5.2.2) (da estradosso cordolo)	$H_1 = H + \min [0.5; 10\% \Delta t] = 13.75 \text{ m}$
Inclinazione del piano campagna a monte	0°
Inclinazione del piano campagna a valle	0°
Sovraccarichi permanenti destra	$g = 0 \text{ kPa}$
Sovraccarichi permanenti sinistra	$g = 14.4 \text{ kPa (ballast)}$
Sovraccarichi accidentali destra	$q = 10 \text{ kPa (cantiere)}$
Sovraccarichi accidentali sinistra	$q = 53.71 \text{ kPa (doppio binario)}$
Puntoni	Definitivo in CLS in testa

Tabella 5 – Caratteristiche generali relative all'opera.

Nel calcolo è stato considerato il miglioramento del terreno per lo spessore interessato dal *jet-grouting*, mentre è stata trascurata, con approccio conservativo, la presenza delle pareti della struttura interna nella configurazione definitiva.

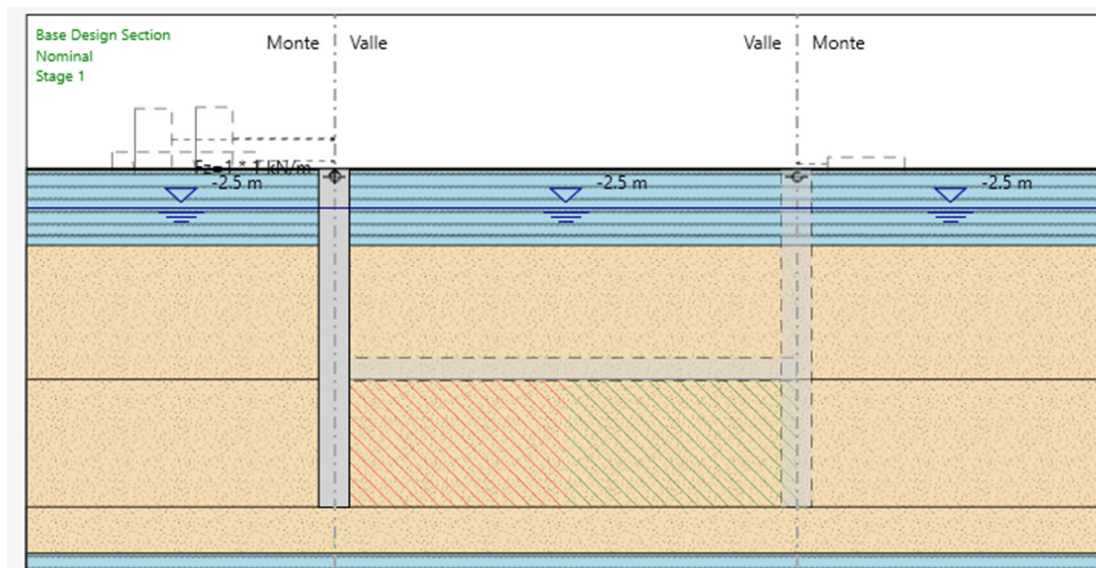
Per simulare la presenza del tappo di fondo sono state assegnate al terreno trattato a fondo scavo le seguenti caratteristiche:

- Coesione efficace: $c' = 100 \text{ kPa}$
- Angolo di resistenza al taglio: ϕ' a favore di sicurezza di assume coincidente con ϕ' del terreno non trattato
- Coefficiente di permeabilità: $k = 0.00001 \text{ m/s}$
- Coefficiente moltiplicativo del modulo di Young E: 5.

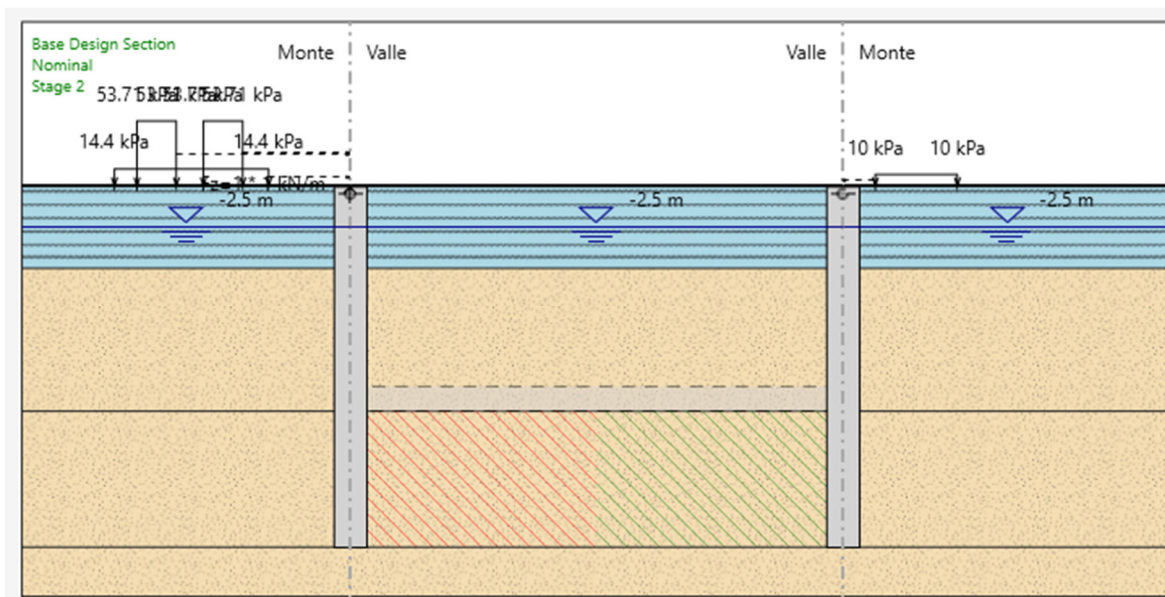
9.2 FASI DI CALCOLO

Nel presente paragrafo vengono brevemente descritte e indicate in forma grafica le fasi assunte nel calcolo, nella fattispecie gli step prevedono:

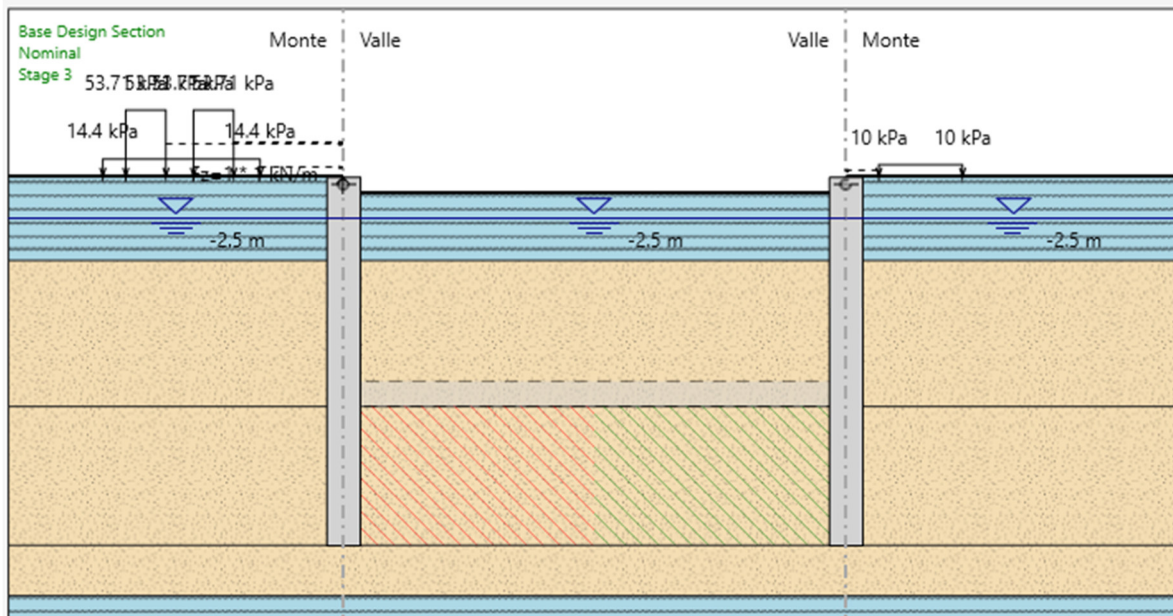
a) Realizzazione diaframmi e tappo di fondo (a cui sono state assegnate le caratteristiche sopra descritte);



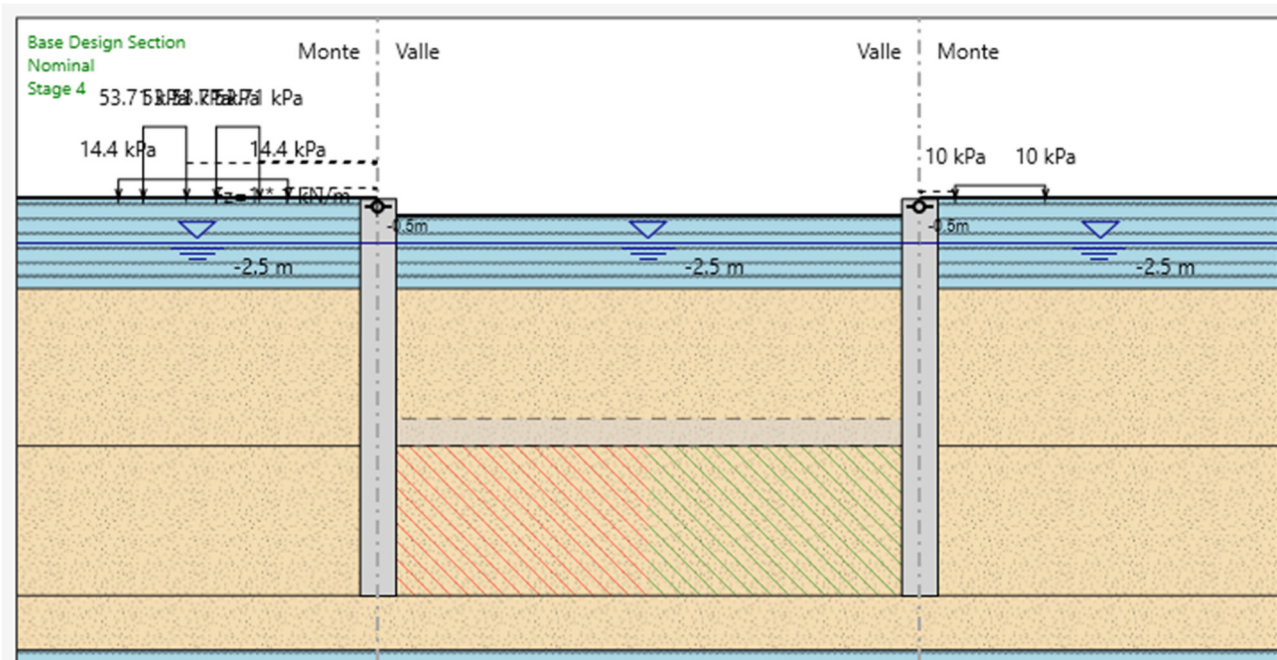
b) Applicazione del sovraccarico accidentale a monte relativo ai macchinari da cantiere (10 kPa); applicazione in sinistra del carico accidentale del sovraccarico ferroviario (53.71 kPa) e del carico permanente associato al ballast (14.4 kPa);



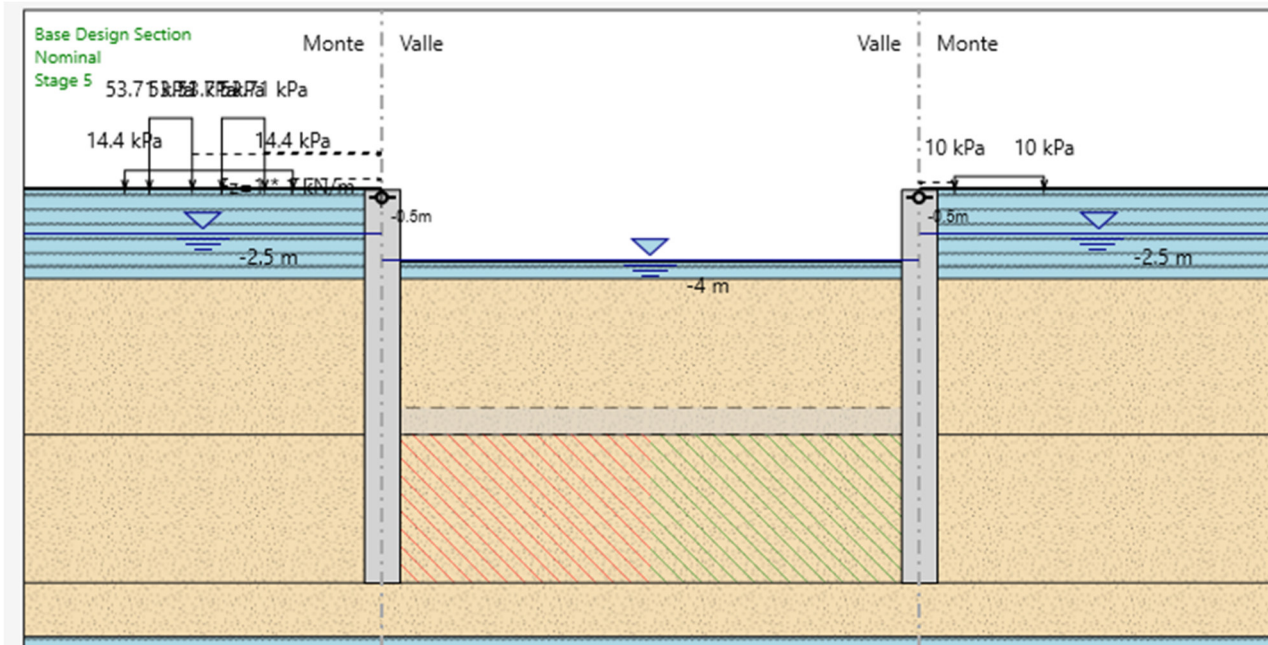
c) Scavo fino a quota -1 m da p.c.;



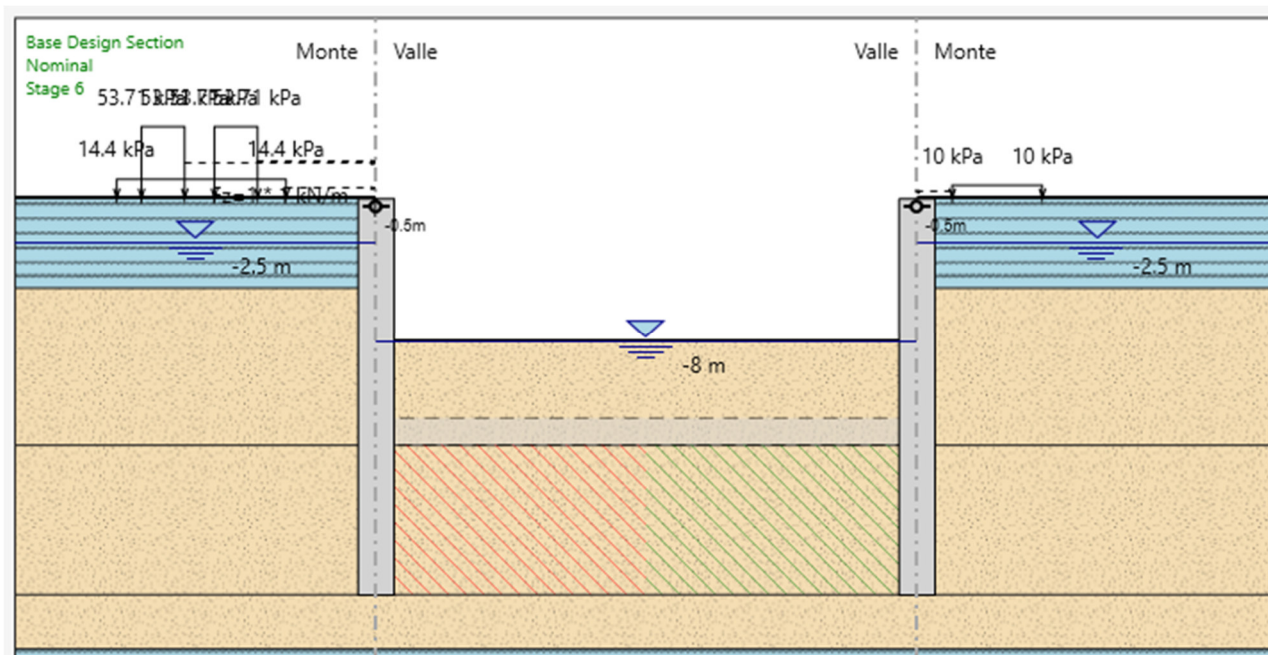
d) Realizzazione del puntone definitivo a quota -0.50 m da p.c.;



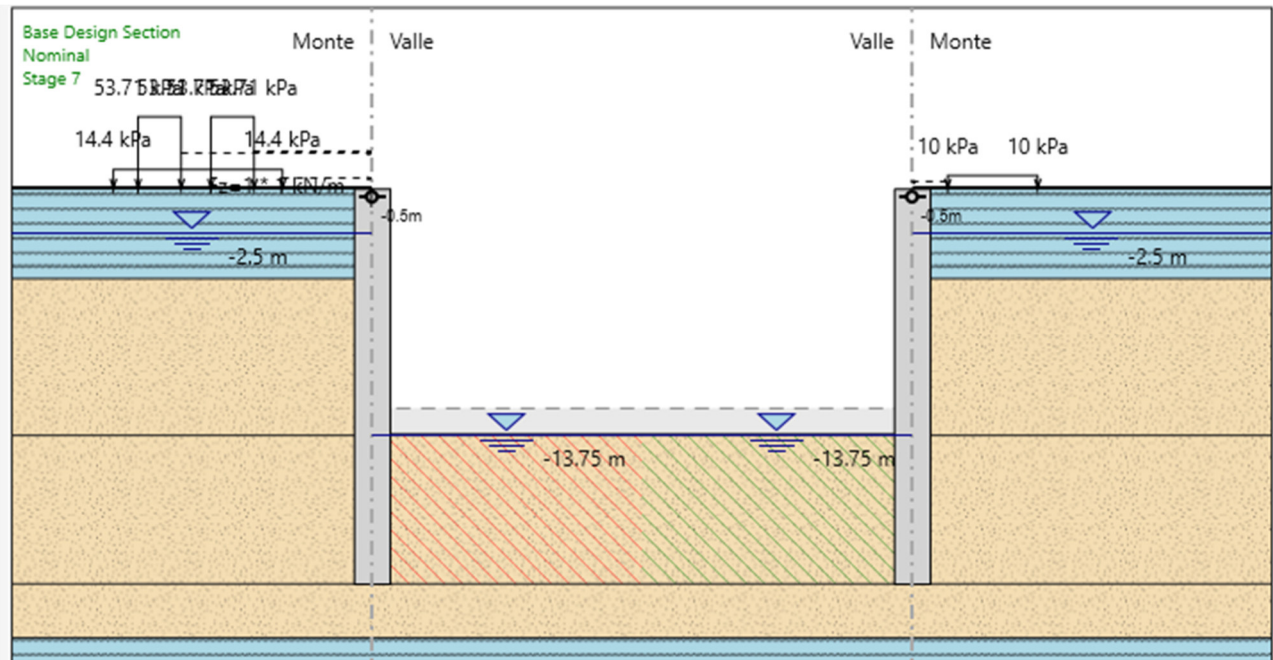
e) Scavo fino a quota -4 m da p.c. e abbassamento della falda a fondo scavo;



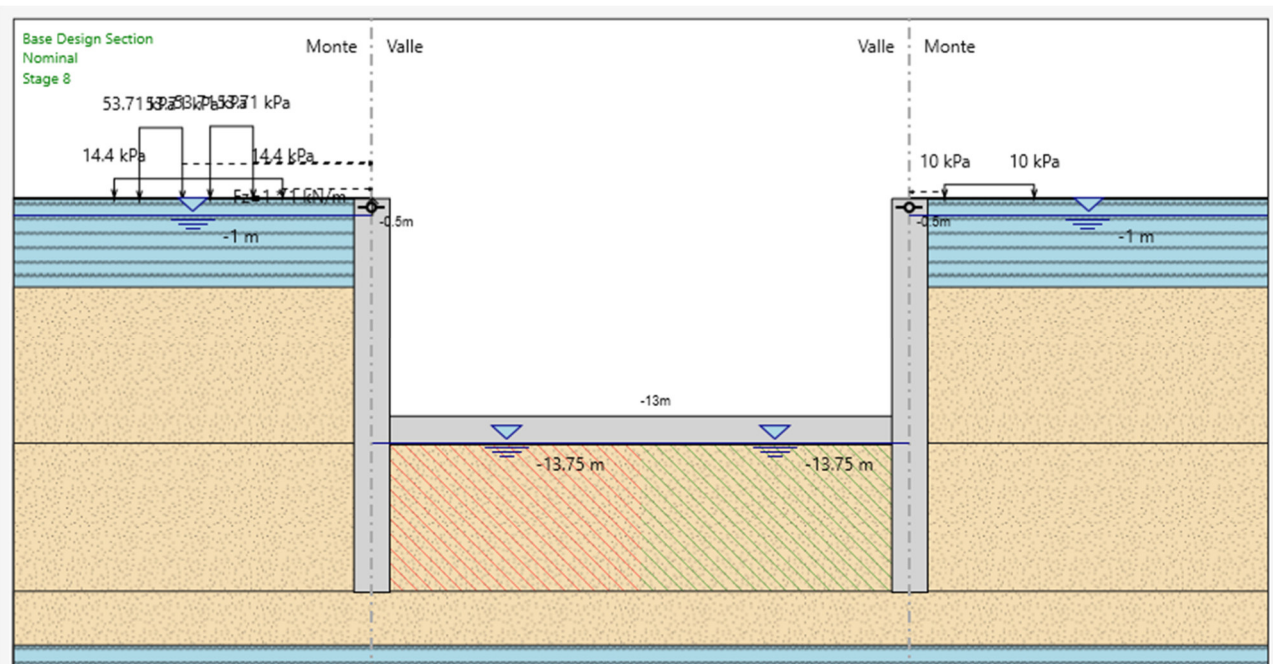
f) Scavo fino a quota -8 m da p.c. e abbassamento della falda a fondo scavo;



g) Scavo fino a quota fondo scavo ($H_1 = 13.75$ m da p.c.) e abbassamento della falda;



g) Realizzazione della soletta di fondo (spessore 1.50 m);



9.3 RISULTATI

Nelle figure che seguono si riportano i grafici delle sollecitazioni di maggior interesse ottenuti nelle fasi di calcolo più significative.

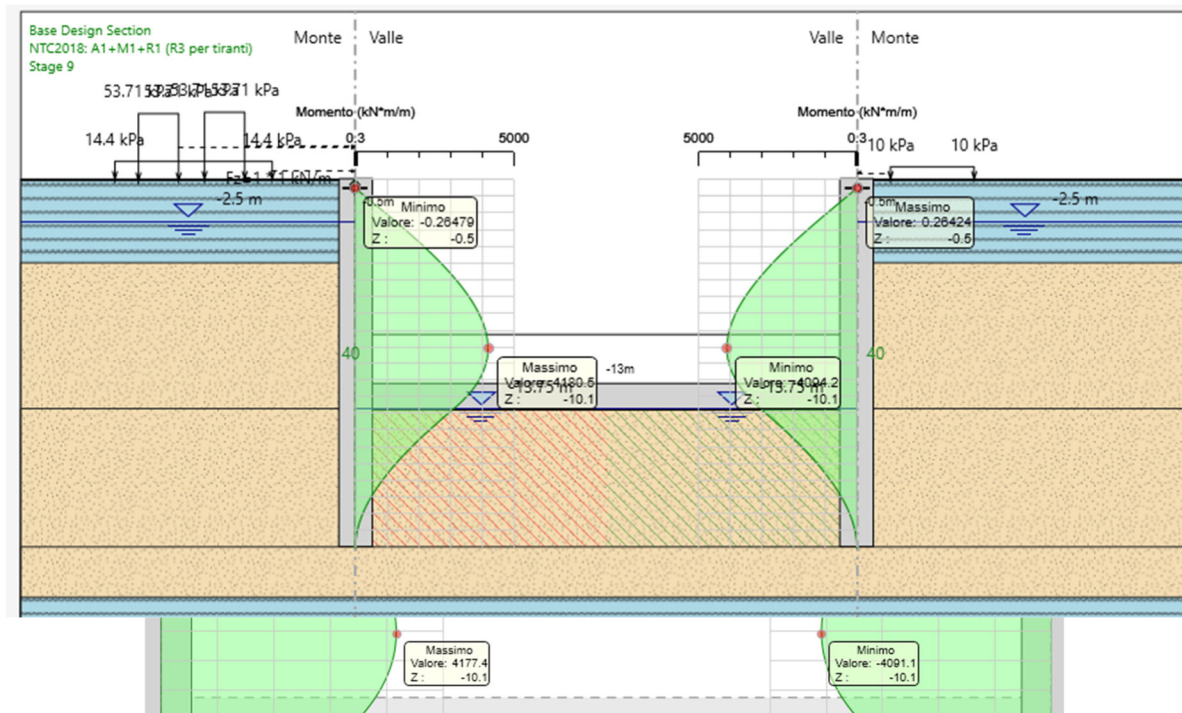


Figura 15 – Momento SLU – Stage i.

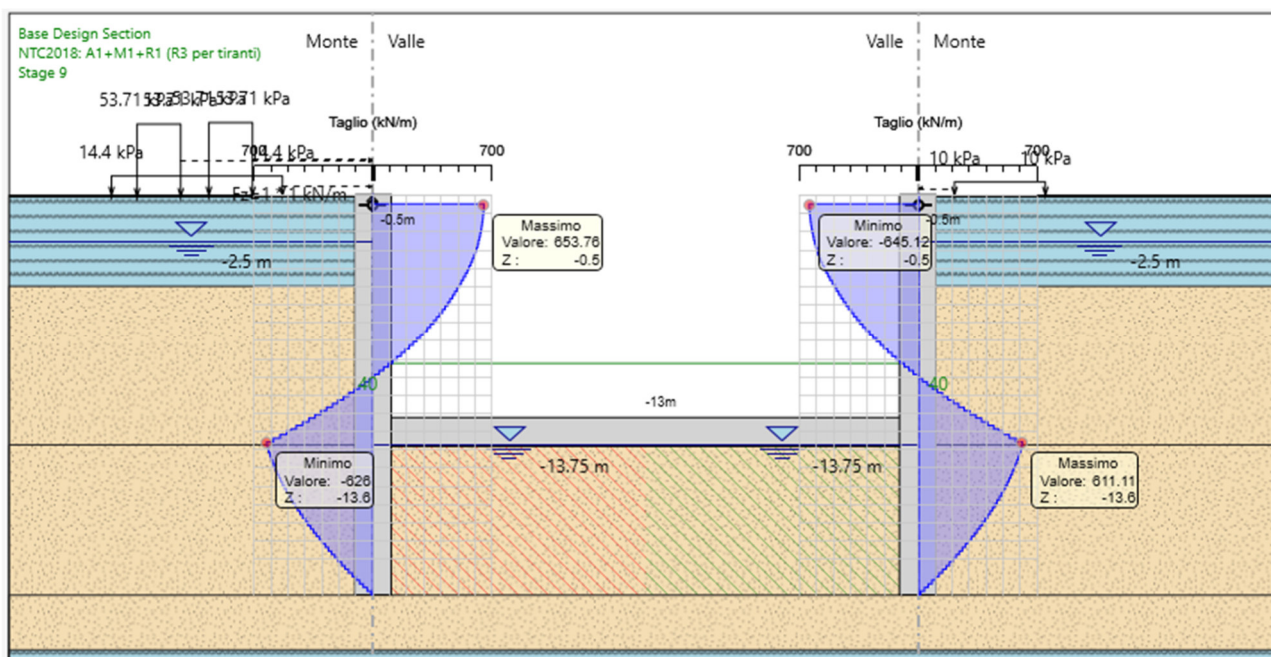


Figura 16 – Taglio SLU – Stage i.

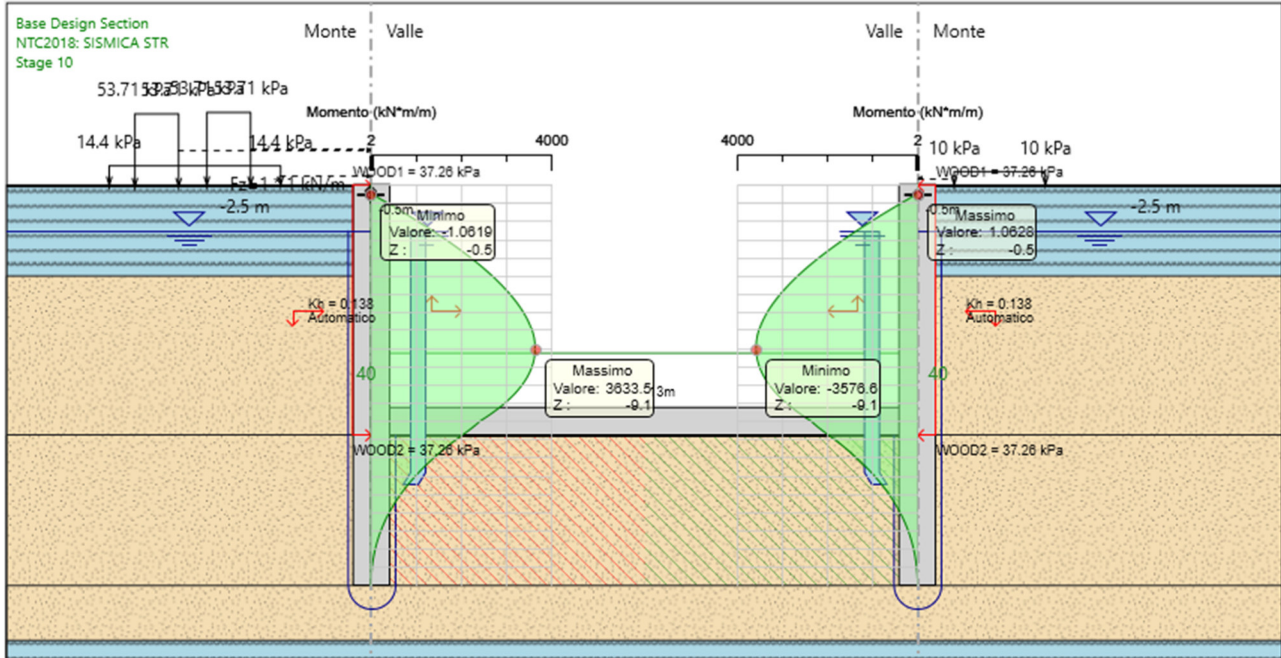


Figura 17 – Momento SLV – Stage I.

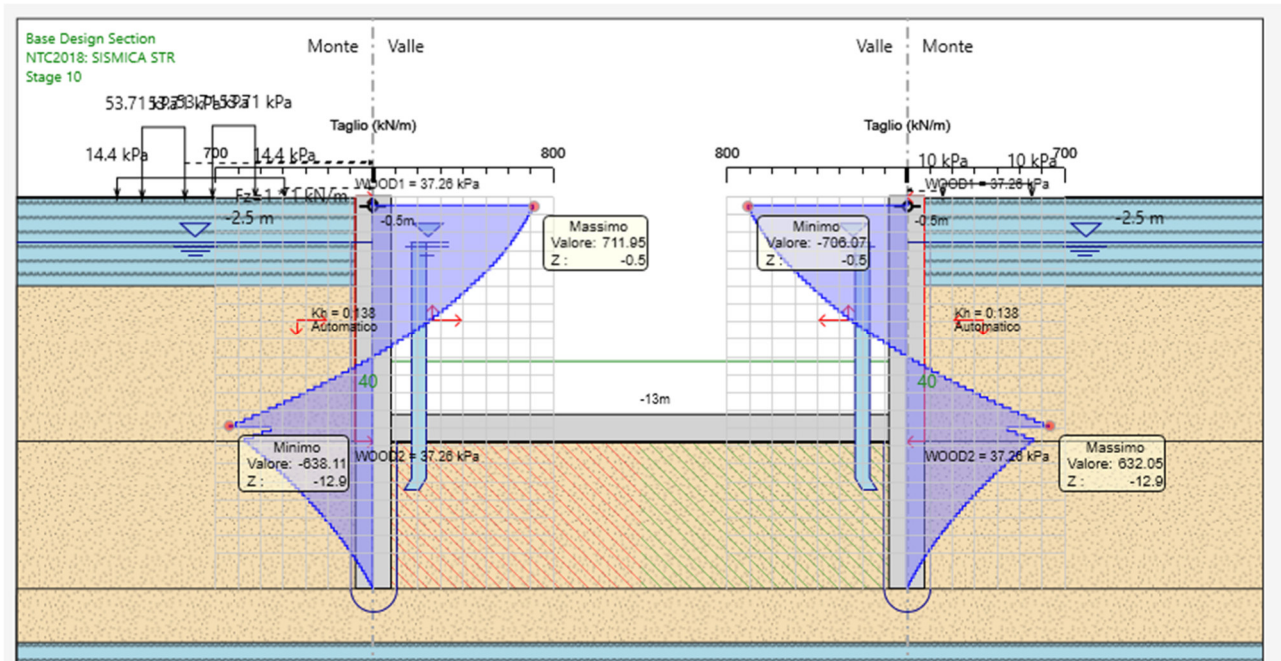


Figura 18 – Taglio SLV - Stage I.

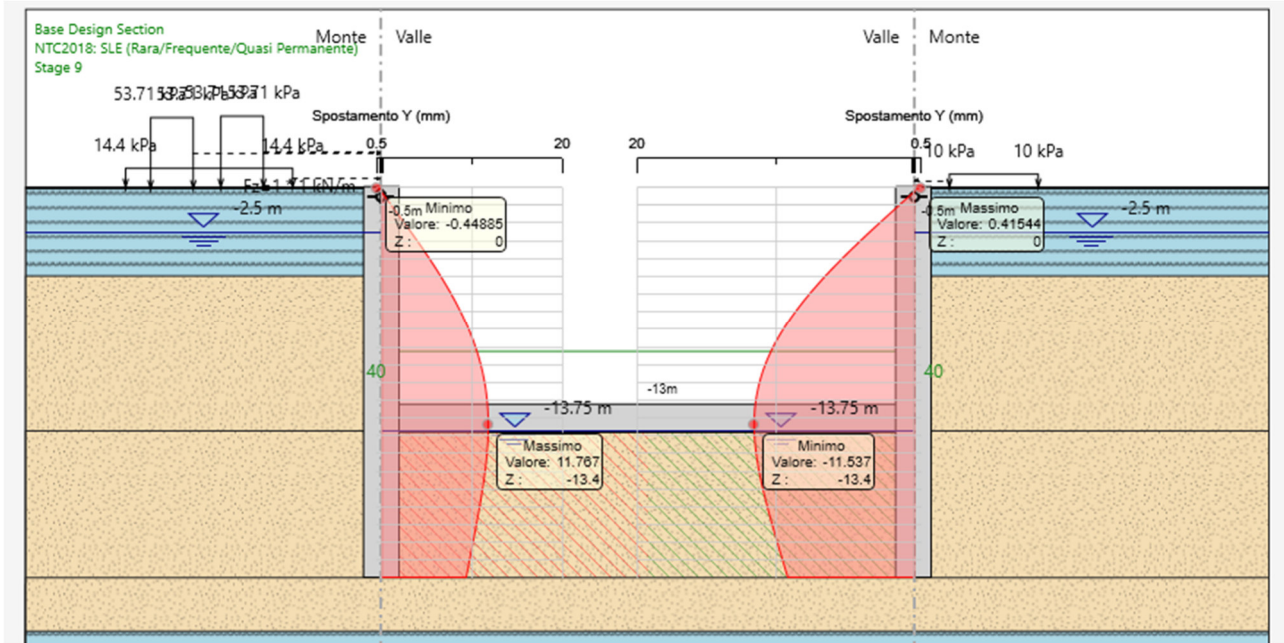


Figura 19 – Spostamento SLE – Stage i.

Lo spostamento orizzontale massimo assoluto si registra in corrispondenza della soletta di fondo, allo stage *i*, ed è pari a 11.7 mm circa.

Lo spostamento massimo che l'opera può subire è pari a:

$$0.005 H_{scavo} = 0.005 * 14 = 70 \text{ mm}$$

Condizione soddisfatta

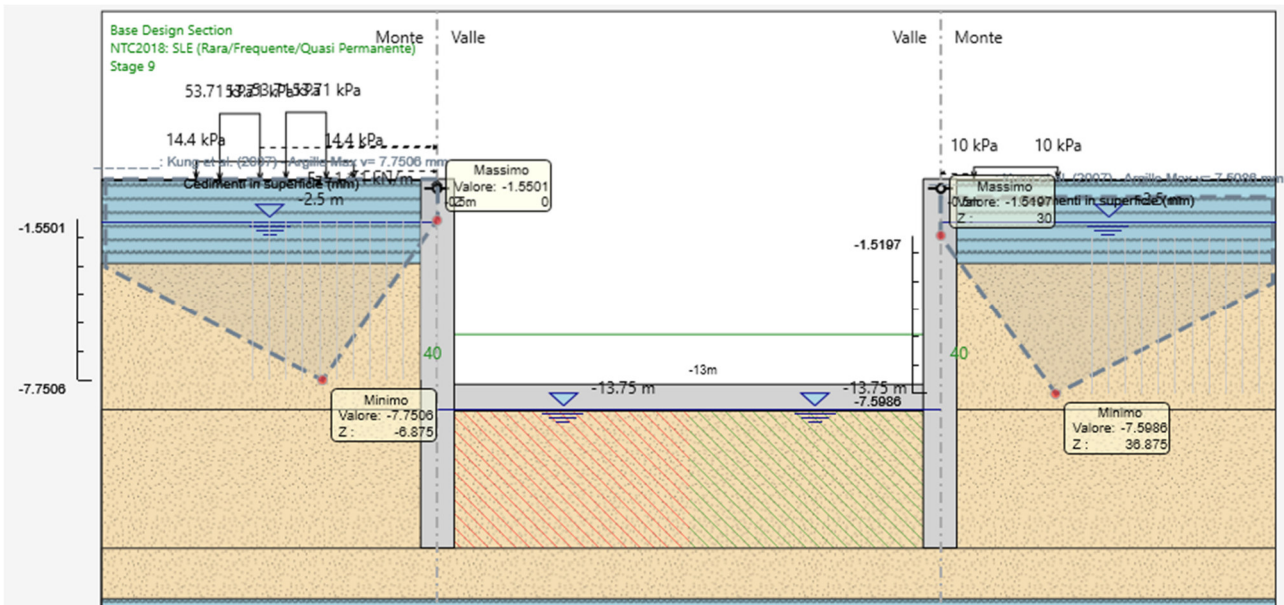


Figura 20 – Cedimento sotto al binario – Stage i.

	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: PROJECT REVIEW CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	Trincea TR03: Relazione tecnico descrittiva e di predimensionamento	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	IBOQ	3A R 10	RH	TR 03 00 001	B	39 DI 41

Il cedimento massimo stimato sotto al binario, in corrispondenza dello Stage *i*, risulta inferiore a 0.78 cm, quindi inferiore a 1 cm.

9.3.1 Diaframmi

Dalle sollecitazioni ricavate, la combinazione statica risulta la più gravosa. L'opera modellata è cautelativa rispetto alla condizione reale, in quanto le sollecitazioni sono state assegnate completamente al diaframma, senza tener conto dell'ausilio della fodera interna. Tuttavia i diaframmi analizzati sono correttamente dimensionati in quanto le sollecitazioni ricavate sono compatibili con le caratteristiche inerziali e di resistenza degli stessi.

9.3.2 Puntoni

Per garantire la verifica dell'opera, è stato inserito un ordine di puntoni definitivi in calcestruzzo di dimensioni di 1m x 1m, disposti con passo pari a 10 m, che poggiano su pilastri (*king post*) realizzati in corrispondenza dei marciapiedi con lo scopo di ridurre la lunghezza libera del puntone.

9.4 VERIFICHE AL SOLLEVAMENTO

9.4.1 Tappo di fondo

Per quanto concerne il tappo di fondo, lo spessore è stato valutato in maniera speditiva senza ricorrere a calcoli accurati, che invece dovranno essere svolti nelle successive fasi progettuali.

Tuttavia, è verosimile immaginare che sarà necessario prevedere un opportuno sistema di sfiati e relativo aggettamento locale dell'acqua di falda, al fine di ridurre la sottospinta idraulica e, di conseguenza, contenere lo spessore del tappo di fondo.

9.4.2 Soletta di base

Nelle fasi costruttive, quando ancora non sono state completate le pareti interne per garantire la stabilità al sollevamento della soletta di fondo è necessario effettuare il drenaggio delle acque di sottospinta.

Nelle successive fasi di progettazione verrà definito nel dettaglio il sistema di drenaggio e aggettamento delle acque.

9.4.3 Struttura definitiva

Nella sua configurazione finale la struttura scatolare interna risulta verificata nei confronti del galleggiamento.

VERIFICA AL GALLEGGIAMENTO - TR03		
γ_w	10 kN/mc	peso volume acqua
γ_{cls}	25 kN/mc	peso volume cls
γ_{ric}	20 kN/mc	peso volume terreno ricoprimento
γ_{bal}	20 kN/mc	peso volume ballast e regolazzazione
$h_{w1_soletta}$	10,5 m	altezza del battente idraulico sotto soletta
$h_{w1_diaframmi}$	19 m	altezza del battente idraulico sotto diaframmi
B	33 m	Larghezza base scatolare
H_{pied}	11 m	Altezza piedritti
$S_{sol,sup}$	0 m	spessore soletta superiore
$S_{sol,inf}$	1,5 m	spessore soletta di base
S_{pied}	1,2 m	spessore piedritti
H_{ric}	0 m	altezza ricoprimento
$B_{cordolo}$	3,7 m	Larghezza cordolo
$H_{cordolo}$	1,7 m	Altezza cordolo
$B_{equ,diaframmi}$	1,7 m	Larghezza equivalente diaframmi
$L_{diaframmi}$	21 m	Lunghezza diaframmi
$B_{ballast}$	16,2 m	Larghezza ballast
$H_{ballast}$	1,3 m	Bpessore ballast
$B_{marciapiedi}$	14,4 m	Larghezza marciapiedi
$H_{marciapiedi}$	2 m	Altezza marciapiedi
$P_{scatolare:U}$	1897,5 kN	Peso struttura scatolare
$P_{cordoli}$	314,5 kN	Peso cordoli sommitali
$P_{ballast}$	421,2 kN	Peso ballast + soletta regol
$P_{diaframmi}$	1785 kN	Peso diaframmi
$P_{marciapiedi}$	691,2 kN	Peso marciapiedi
$S_w_soletta$	3465 kN	Sottospinta soletta
$S_w_diaframmi$	646 kN	Sottospinta diaframmi
γ_{stab}	0,9	coefficiente azione stabilizzante
γ_{instab}	1,1	coefficiente azione destabilizzante
F_{stab}	4598,5 kN	forza stabilizzante
F_{inst}	4522,1 kN	forza destabilizzante

- L'altezza del battente idraulico è pari a 10.5 m fino a fondo scavo e 19.0 fino al piede dei diaframmi;
- La sottospinta idraulica vale 105 kN/mq a fondo scavo e 190 kN/mq e fondo diaframmi che, moltiplicati rispettivamente per la larghezza dello scavo e lo spessore dei diaframmi, valgono 3465 kN/m e 646 kN/m;
- Il peso dello scatolare ad U è pari alla somma della soletta inferiore e dei piedritti 1897.5 kN/m;
- Il peso dei cordoli è pari a 314,5 kN/m;
- Il peso del ricoprimento è dato dal ballast + soletta di regolarizzazione di spessore 1.30 m (pari a 421 kN/m), e ai marciapiedi di spessore 2 m (pari a 691 kN/m);

	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: PROJECT REVIEW CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	Trincea TR03: Relazione tecnico descrittiva e di predimensionamento	PROGETTO IB0Q	LOTTO 3A R 10	CODIFICA RH	DOCUMENTO TR 03 00 001	REV. B

- Il peso dei diaframmi, di spessore equivalente 1.7 m, è pari a 1785 kN/m.

Moltiplicando le azioni instabilizzanti per il coefficiente $\gamma = 1.1$ e le azioni stabilizzanti per il coefficiente $\gamma = 0.9$, si ottiene $F_{STAB} = 4598 \text{ kN/m} > F_{INSTAB} = 4522 \text{ kN/m}$, pertanto la verifica a galleggiamento risulta soddisfatta.

Nelle fasi costruttive, come per la soletta di base, quando ancora non è stato completato lo scatolare interno, per garantire la stabilità al sollevamento della struttura è necessario effettuare il drenaggio e l'aggottamento delle acque di sottospinta.