

COMMITTENTE:



ALTA SORVEGLIANZA:



GENERAL CONTRACTOR:



**INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE  
OBIETTIVO N. 443/01**

**LINEA AV/AC TORINO – VENEZIA Tratta VERONA – PADOVA**

**Lotto funzionale Verona – Bivio Vicenza**

**PROGETTO ESECUTIVO**

**GA – GALLERIE ARTIFICIALI**

**GA01 – GALLERIA ARTIFICIALE S. MARTINO**

**GA01A dal km 4+942,53 al Km 5+336,53**

**Validazione del dimensionamento strutturale e geotecnico mediante analisi numeriche bidimensionali**

GENERAL CONTRACTOR		DIRETTORE LAVORI		SCALA -
IL PROGETTISTA INTEGRATORE	Consorzio Iricav Due	Valido per costruzione		
 Ing. Giovanni MALAVENDA Iscritto all'ordine degli Ingegneri di Venezia n. 4289 Data:	ing. Paolo Carmona Data:			

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

I	N	1	7	1	1	E	I	2	C	L	G	A	0	1	A	4	0	0	1	A	-	-	-	P	-	-	-
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

	VISTO CONSORZIO IRICAV DUE	
	Firma	Data
	 ing. Luca Randolfi	

Progettazione:

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	IL PROGETTISTA  Data: 30/04/21
A	EMISSIONE	R. CONFORTI	30/04/21	L. ALFIERI	30/04/21	P. GALVANIN	30/04/21	

CIG. 8377957CD1	CUP: J41E91000000009	File: IN1711E12RHGA0100002A.DOCX
		Cod. origine:



Progetto cofinanziato dalla Unione Europea

<b>GENERAL CONTRACTOR</b> 	<b>ALTA SORVEGLIANZA</b> 				
<b>GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI</b>	<b>Progetto</b> IN17	<b>Lotto</b> 11	<b>Codifica Documento</b> EI2 CL GA 01 0 0 004	<b>Rev.</b> A	<b>Foglio</b> 2 di 90

## INDICE

1	INTRODUZIONE .....	4
2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....	6
2.1	Riferimenti Normativi.....	6
2.2	Documenti di progetto esecutivo .....	6
2.3	Riferimenti bibliografici.....	7
2.4	Software di calcolo.....	7
3	MATERIALI.....	8
4	DESCRIZIONE DELLE OPERE E DELLE SEZIONI DI CALCOLO.....	10
4.1	Aspetti generali .....	10
4.2	Geometria delle opere di sostegno.....	12
4.3	Schemi di calcolo .....	13
4.3.1	Criteri di identificazione delle sezioni di calcolo.....	13
4.3.2	Fasi costruttive considerate .....	13
5	ANALISI CARICHI E CRITERI DI VERIFICA.....	14
5.1	Riferimenti normativi .....	14
5.2	Condizioni di vincolo nodo diaframma-solettone di copertura e interazione tra diaframmi e strutture interne 14	
5.3	Spinta dell'acqua.....	16
5.4	Sovraccarico permanente ed accidentale in copertura .....	16
5.5	Azione sismica .....	17
5.6	Combinazioni per la verifica agli SLU .....	18
5.6.1	Modellazione FLAC della combinazione A1+M1 .....	18
5.6.2	Modellazione FLAC della combinazione A2+M2 .....	18
5.7	Combinazioni per la verifica agli SLE .....	19
6	SEZIONE DI CALCOLO TS1 .....	20
6.1	Geometria, dati di ingresso del modello ed ipotesi .....	20
6.2	Fasi di calcolo .....	24
6.3	Analisi preliminari e di validazione.....	29
6.4	Determinazione delle sollecitazioni agenti nei diaframmi.....	32
6.4.1	Sollecitazioni agli SLE ed SLU .....	32
6.4.2	Sollecitazioni dovute all'azione sismica .....	38
6.4.3	Valutazione dell'interazione tra diaframmi e struttura interna a lungo termine.....	41
6.5	Verifiche geotecniche .....	45
6.5.1	Spostamenti e stabilità del fondo scavo .....	45
6.5.2	Verifiche deformazioni/cedimenti attesi .....	47
6.5.3	Verifiche di stabilità globale .....	48
6.5.4	Verifiche di stabilità del fondo scavo al galleggiamento .....	49
6.5.5	Stima delle portate entranti al variare dei coefficienti di permeabilità del tampone di fondo.....	56

<b>GENERAL CONTRACTOR</b> 	<b>ALTA SORVEGLIANZA</b> 				
<b>GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI</b>	<b>Progetto</b> IN17	<b>Lotto</b> 11	<b>Codifica Documento</b> EI2 RH GA 01 0 0 002	<b>Rev.</b> A	<b>Foglio</b> 3 di 90

<b>7</b>	<b>VERIFICHE SEZIONE TA</b> .....	<b>58</b>
7.1	Geometria, dati di ingresso del modello ed ipotesi.....	58
7.2	Fasi di calcolo .....	61
7.3	Determinazione delle sollecitazioni agenti nei diaframmi.....	65
7.3.1	Sollecitazioni agli SLE ed SLU .....	65
7.3.2	Sollecitazioni dovute all'azione sismica .....	71
7.3.3	Valutazione dell'interazione tra diaframmi e struttura interna a lungo termine.....	74
7.4	Verifiche geotecniche .....	78
7.4.1	Spostamenti e stabilità del fondo scavo .....	78
7.4.2	Verifiche deformazioni/cedimenti attesi .....	80
7.4.3	Verifiche di stabilità globale .....	81
7.4.4	Verifiche di stabilità del fondo scavo al galleggiamento .....	82
7.4.5	Stima delle portate entranti al variare dei coefficienti di permeabilità del tampone di fondo.....	88
<b>8</b>	<b>CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE</b> .....	<b>89</b>

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 4 di 90

## 1 INTRODUZIONE

La presente relazione riporta la validazione del dimensionamento strutturale e geotecnico delle opere di sostegno degli scavi e consolidamento, eseguita mediante analisi numeriche bidimensionali con codice di calcolo alle differenze finite, con riferimento ai tratti della galleria S.Martino Buonalbergo ricadenti nelle WBS GA01-A/B/C ed E.

Considerato il livello di affinamento della soluzione progettuale rispetto a quanto previsto in progetto definitivo – affinamento richiesto al fine di traguardare la semplificazione gestionale del cantiere e l’ottimizzazione complessiva dei tempi di costruzione – gli schemi proposti per la realizzazione del tampone di fondo sono stati analizzati anche attraverso analisi numeriche atte a indagare i complessi meccanismi di interazione terreno-struttura in fase di scavo. Tale attività di verifica supplementare è intesa, appunto, quale validazione delle scelte progettuali e delle modalità di calcolo semplificate assunte nelle relazioni di dimensionamento strutturale delle varie tratte (cfr. § 2.2).

A tal fine sono state considerate due sezioni della galleria artificiale rappresentative degli schemi di intervento proposti, una con soluzione tampone tipo “sandwich” e una con soluzione di tipo compensato, interventi meglio descritti nei paragrafi successivi. Esse sono state sottoposte ad indagine parametrica facendo variare:

- il livello di falda (fase di costruzione/breve termine);
- i parametri geotecnici del trattamento;
- i parametri di permeabilità del terreno trattato.

I principali obiettivi di tali analisi sono:

- verificare le sollecitazioni ottenute nei diaframmi con l’approccio semplificato con il codice Paratie Plus;
- definire il coefficiente “r” di ripartizione, utilizzato nelle analisi semplificate, per tenere in conto dell’accoppiamento della controparete (o fodera) della struttura interna nel lungo termine in condizioni statiche e sismiche;
- valutare le condizioni di vincolo tra soletta di copertura e diaframmi e la loro influenza sulle sollecitazioni e sulla stabilità del fondo tampone di fondo in relazione al livello di spinta mobilitata al piede dei diaframmi;
- valutare gli effetti sulla stabilità del tampone al variare del confinamento laterale dei diaframmi imposto dalla profondità dello scavo rispetto al piano campagna originario;
- validare la procedura semplificata descritta nelle relazioni di calcolo strutturali per le singole WBS, sia nei confronti della rottura del fondo scavo, sia nei confronti del sollevamento;
- eseguire ulteriori verifiche nei confronti delle deformazioni e dei cedimenti in esercizio.

Nel seguito, quindi, dopo una prima parte introduttiva generale relativa ad un breve inquadramento dell’opera all’analisi dei carichi e ad una descrizione delle modalità di sviluppo dei modelli numerici e delle verifiche saranno sviluppate le analisi delle sezioni, denominate nel modo seguente:



GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 5 di 90

- Sezione TS1 con massimo battente di falda per questa tipologia di scavo, per la quale è prevista la realizzazione del tampone “sandwich”;
- Sezione TA nella quale sarà realizzato il tampone “compensato”, considerando sempre il massimo battente di falda per questa tipologia.

L’analisi della risposta del tampone tipo “sandwich” o “compensato” al variare delle quote di falda attese ha consentito di confrontare i fattori di sicurezza della soluzione di PE con quelli assunti in sede di PD per la soluzione massiva prevista nel progetto originario, in modo da stabilirne l’equi-prestazione in termini di sicurezza nei confronti delle possibili incertezze legate alle escursioni anche improvvise della quota di falda, fino alla quota di riferimento di breve termine, in assenza di specifici sistemi di controllo della falda (pozzi drenanti) nei transitori caratterizzati dal raggiungimento dei minimi valori di soggiacenza previsti dagli studi idrogeologici nella tratta in esame.

<b>GENERAL CONTRACTOR</b> 		<b>ALTA SORVEGLIANZA</b> 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 6 di 90	

## 2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

### 2.1 Riferimenti Normativi

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] UNI 9614 – “Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo e successive revisioni”.
- [4] UNI 9916 – “Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici”.
- [5] ISO 4866 – “Vibrazioni meccaniche ed urti - Vibrazioni di edifici - Guida per la misura di vibrazioni e valutazioni dei loro effetti sugli edifici”.
- [6] DIN 4150/3 – “Eschütterungen im Bauwesen. Entwirklungen auf bauliche Anlagen”.

### 2.2 Documenti di progetto esecutivo

IN1711EI2ROGA0100001	Relazione generale
IN1711EI2ROGA0100002	Opere sostegno degli scavi e tampone di fondo - Relazione di confronto PD/PE
IN1711EI2RBGA0100001	Relazione geotecnica
IN1711EI2SPGA0102001	Specifiche tecniche campo prova jet grouting
IN1711EI2RHGA0100001	Relazione sui criteri di dimensionamento opere di sostegno degli scavi e impermeabilizzazione degli scavi
IN1711EI2RHGA0100003	Opere di sostegno e scavo - Monitoraggio in corso d'opera GA01A, GA01B, GA01E - Relazione e specifica tecnica
IN1711EI2L6GA0100001	Planimetria di ubicazione delle indagini geognostiche e profilo geotecnico
IN1711EI2P8GA0100001	Planimetria generale di inquadramento diaframmi e tampone di fondo
IN1711EI2P7GA0100001	Planimetria generale di scavo: Macrofase 1
IN1711EI2P7GA0100002	Planimetria generale di scavo: Macrofase 2
IN1711EI2P7GA0100003	Planimetria generale di scavo: Macrofase 3
IN1711EI2P7GA0100004	Planimetria generale di scavo: Macrofase 4
IN1711EI2P7GA0100005	Planimetria generale di scavo: Macrofase 5
IN1711EI2P7GA0100006	Planimetria generale di scavo: Macrofase 6
IN1711EI2P7GA0100007	Planimetria generale di scavo: Macrofase 7
IN1711EI2P7GA0100008	Planimetria generale di scavo: Macrofase 8
IN1711EI2PZGA0101001	Monitoraggio GA01A e GA01B - Planimetria e sezioni tipo
IN1711EI2PZGA0101002	Monitoraggio GA01E - Planimetria e sezioni tipo
IN1711EI2WAGA0101001	Sezioni tipo di scavo e riporto provvisorio - Dettagli esecutivi
IN1711EI24TGA0100015A	Tabella materiali
IN1711EI2RHGA0100002A	Validazione del dimensionamento strutturale e geotecnico mediante analisi numeriche bidimensionali
IN1711EI2CLGA01A4001A	Opere sostegno degli scavi e tampone di fondo - Relazione di calcolo
IN1711EI2CLGA01A4002A	Relazione di calcolo soletta di copertura
IN1711EI2CLGA01A4003A	Relazione di calcolo strutture interne

<b>GENERAL CONTRACTOR</b> 	<b>ALTA SORVEGLIANZA</b> 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 7 di 90

IN1711EI2CLGA01B4001A	Opere sostegno degli scavi e tampone di fondo - Relazione di calcolo
IN1711EI2CLGA01B4002A	Relazione di calcolo soletta di copertura
IN1711EI2CLGA01B4003A	Relazione di calcolo strutture interne
IN1711EI2CLGA01E4001A	Opere sostegno degli scavi e tampone di fondo - Relazione di calcolo
IN1711EI2CLGA01E4002A	Relazione di calcolo soletta di copertura
IN1711EI2CLGA01E4003A	Relazione di calcolo strutture interne
IN1711EI2WAGA01A0001	Fasi esecutive da pk 4+942,53 a pk 5+214,00
IN1711EI2WAGA01A0002	Fasi esecutive da pk 5+214,00 a pk 5+336,53
IN1711EI2WAGA01B0001	Fasi esecutive
IN1711EI2WAGA01E0001	Fasi esecutive - Tratto con tampone di fondo da PK. 6+279,43 a PK. 6+647,73
IN1711EI2WAGA01E0002	Fasi esecutive - Tratto senza tampone di fondo da PK. 6+647,73 a PK. 6+842,53
IN1711EI2WAGA01E0003	Fasi esecutive - Camera di arrivo

### 2.3 Riferimenti bibliografici

- [1] Bilotta E et al (2007), "Pseudostatic and dynamic analyses of tunnels in transversal and longitudinal directions", 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, June 2007.
- [2] Iwasaki T., Tatsuoka F., Tokida K., Yasuda S., 1978. A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan, Proc. II Int. Conf. on Microzonation, San Francisco.
- [3] Pescara M., Gaspari G. M., Repetto L., 2011. Design of underground structures under seismic conditions: a long deep tunnel and a metro tunnel. ETH Zurich – 15 dec. 2011 Colloquium on seismic design of tunnels.
- [4] Power M.S., Rosidi D., Kaneshiro J., 1996. Vol.III Strawman: screening, evaluation and retrofit design of tunnels, Report Draft, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York.

### 2.4 Software di calcolo

Per eseguire le analisi numeriche riportate nella presente relazione è stato impiegato il software di calcolo FLAC (Versione 8.0) della ITASCA: codice alle differenze finite per il calcolo geotecnico.

<b>GENERAL CONTRACTOR</b> 		<b>ALTA SORVEGLIANZA</b> 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 8 di 90	

### 3 MATERIALI

Si riportano di seguito le principali caratteristiche dei diversi materiali impiegati nell'opera in progetto, con l'indicazione dei valori di resistenza e deformabilità adottati nelle verifiche, nel rispetto delle indicazioni del DM 14/01/2008 e di quanto prescritto dal Capitolato Generale d'Appalto delle Opere Civili di RF1.

#### Diaframmi/Pali

-	Classe di esposizione ambientale (UNI EN 206)	XC2
-	Rapporto A/C max	0.60
-	Classe di resistenza	C25/30
-	Classe di consistenza	S4/S5
-	Copriferro	60 mm
-	Diametro massimo aggregati	32 mm

#### Solette di fondazione

-	Classe di esposizione ambientale (UNI EN 206)	XC2
-	Rapporto A/C max	0.60
-	Classe di resistenza	C30/37
-	Classe di consistenza	S4
-	Copriferro	40 mm
-	Diametro massimo aggregati	25 mm

#### Pareti di rifodera

-	Classe di esposizione ambientale (UNI EN 206)	XC3
-	Rapporto A/C max	0.55
-	Classe di resistenza	C30/37
-	Classe di consistenza	S4/S5
-	Copriferro	40 mm
-	Diametro massimo aggregati	25 mm

#### Trave di coronamento e soletta superiore

-	Classe di esposizione ambientale (UNI EN 206)	XC3
-	Rapporto A/C max	0.55
-	Classe di resistenza	C30/37
-	Classe di consistenza	S4/S5
-	Copriferro	40 mm
-	Diametro massimo aggregati	25 mm

#### Travi prefabbricate

-	Classe di esposizione ambientale (UNI EN 206)	XC3
-	Rapporto A/C max	0.45
-	Classe di resistenza	C35/45
-	Classe di consistenza	S5
-	Copriferro	40 mm
-	Diametro massimo aggregati	20 mm

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 9 di 90

**Acciaio**

- Armature per c.a. B450C
- Per carpenteria metallica opere provvisionali S355J0
- Per palancole provvisionali S355GP

<b>GENERAL CONTRACTOR</b> 		<b>ALTA SORVEGLIANZA</b> 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI		Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 10 di 90

## 4 DESCRIZIONE DELLE OPERE E DELLE SEZIONI DI CALCOLO

### 4.1 Aspetti generali

La galleria artificiale S. Martino è lunga 1900m ed è suddivisa in 5 differenti WBS riassunte nella successiva tabella.

Tabella 1 WBS GA01

WBS	Progressiva inizio (m)	Progressiva fine (m)	Lunghezza (m)
GA01-A	4+942.53	5+336.53	393.91
GA01-B	5+336.53	5+856.53	549.50
GA01-C	5+856.53	6+184.03	297.43
GA01-D	6+184.03	6+241.33	57.36
GA01-E	6+241.33	6+842.53	602.24

Come indicato nella Relazione generale dell'opera, il sistema di opere di sostegno necessarie all'esecuzione degli scavi per la realizzazione della galleria artificiale (la cui disposizione planimetrica generale è rappresentata in Figura 1) è costituito principalmente da diaframmi in c.a di spessore 1.0m. Lo scavo dei diaframmi è realizzato in presenza di fango stabilizzante con benna mordente e con una sequenza primari/secondari tale da minimizzare il numero dei giunti, così come rappresentato negli elaborati grafici di progetto. Considerato il battente della falda, per tutti i giunti è previsto l'impiego di palancole di spalla e giunto water stop tra un pannello e l'altro.

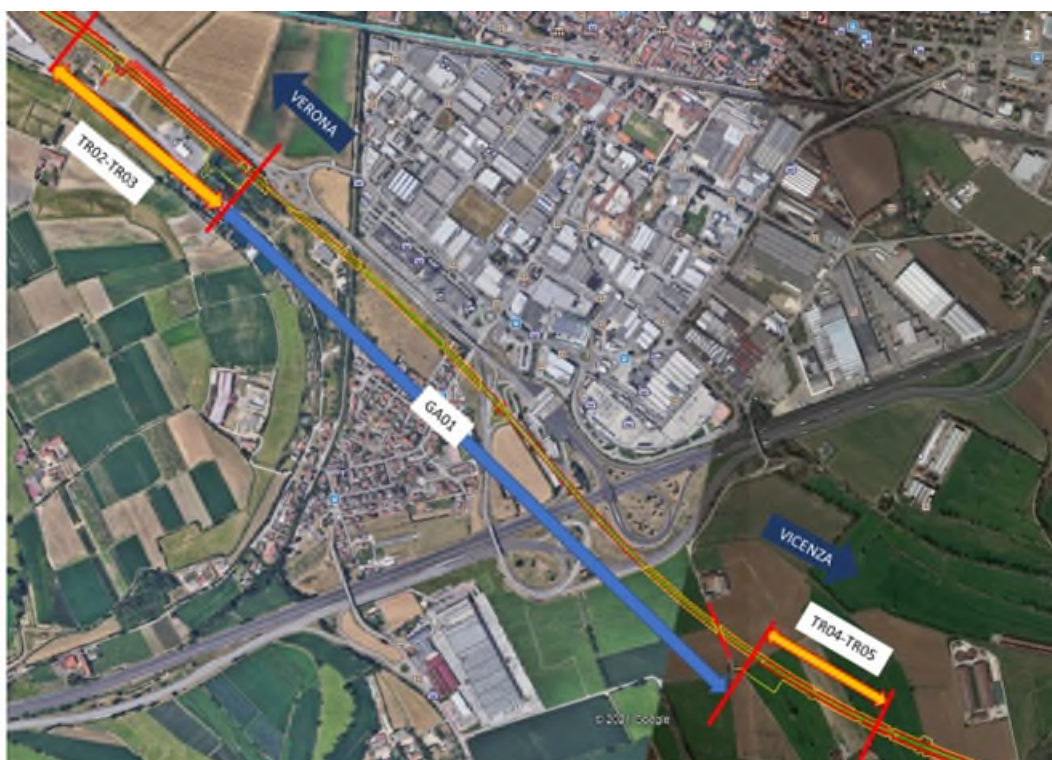


Figura 1: Planimetria di inquadramento galleria artificiale GA01 e trincee



La galleria artificiale è costituita da una struttura scatolare di luce interna 10.4 m avente un ricoprimento variabile tra 1.0 e 4.0m. La copertura a travi prefabbricate di altezza 1.3m e soletta di completamento di spessore 0.25m realizzata in opera con armatura lenta appoggia su diaframmi in c.a. realizzati con l'ausilio di benna mordente e fanghi bentonitici. In corrispondenza delle nicchie tecnologiche, considerata la maggiore luce, l'altezza delle travi è pari a 1.50 m. La connessione tra diaframma e solaio di copertura è realizzata con una trave di coronamento di larghezza 2.05 ed altezza complessiva di 1 m in cui sono posizionati i ferri di attesa sia per il collegamento con la copertura, sia per il collegamento con le contropareti.

Le contropareti interne hanno uno spessore nominale di 0.8m, altezza 8.40m e spiccano dal solettone di fondo avente spessore di 1.0m.

Le figure seguenti mostrano una sezione trasversale esplicitiva dell'opera nella quale si possono apprezzare i livelli di falda di costruzione, di breve e lungo termine. Inoltre, si possono osservare i diversi trattamenti jet-grouting previsti per la stabilizzazione del fondo scavo della galleria per le due sezioni tipiche considerate nelle analisi (sezione tipo TS1 e sezione tipo TA).

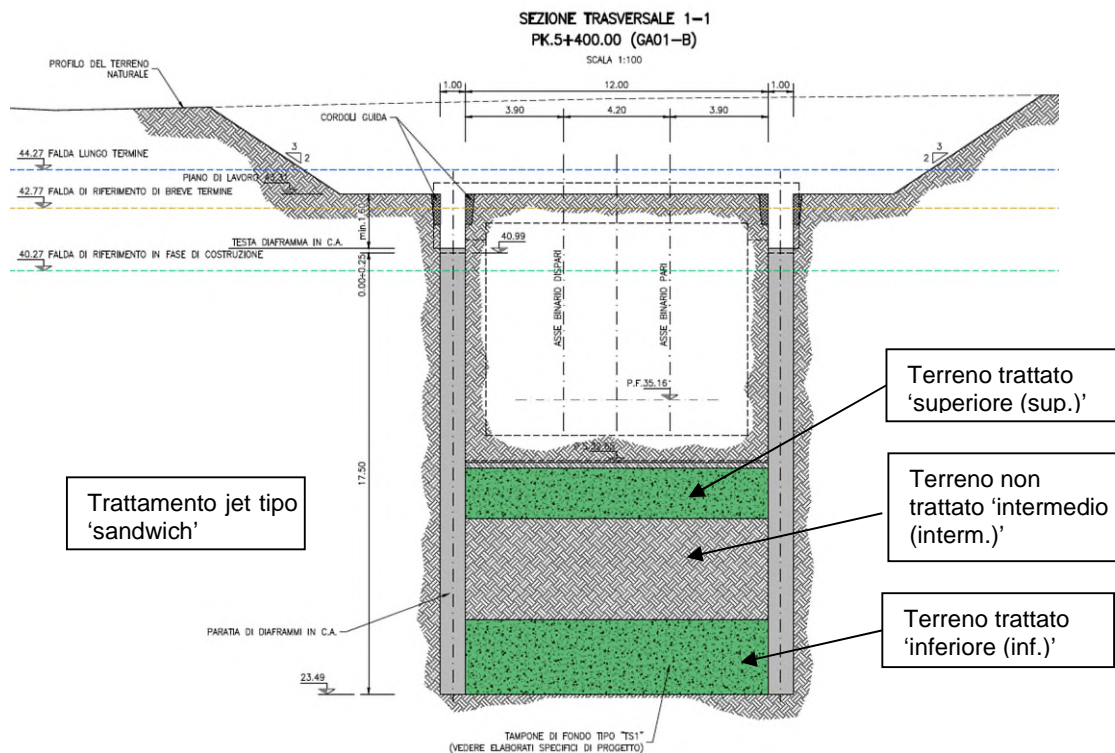


Figura 2 Sezione tipologica con trattamento jet tipo 'sandwich' con doppio strato

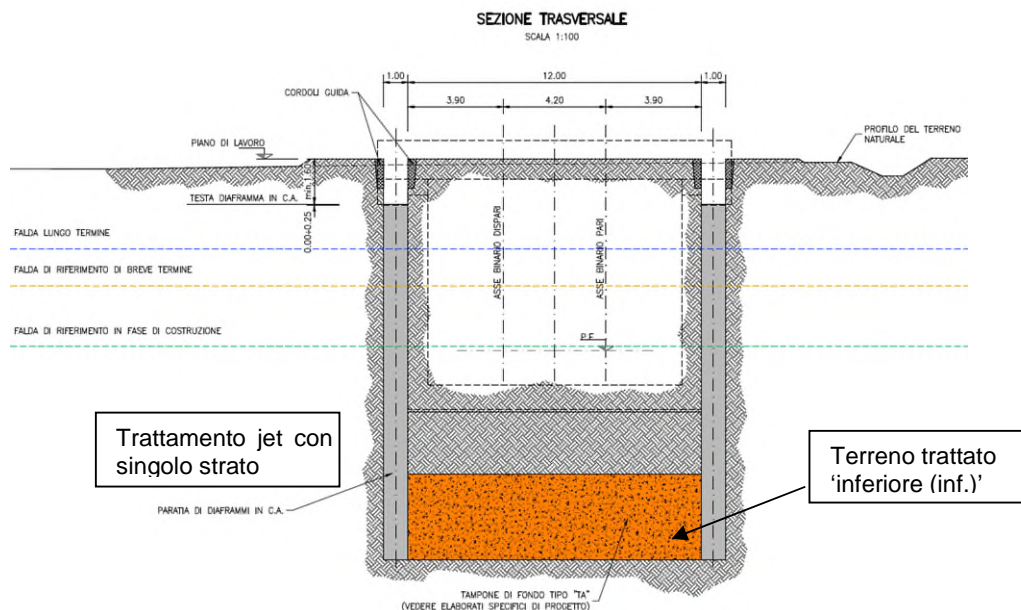


Figura 3 Sezione tipologica con trattamento jet compensato con singolo strato al piede dell'opera di sostegno

Le caratteristiche dei singoli schemi di sostegno proposti per la GA01-A sono descritte nel successivo paragrafo.

## 4.2 Geometria delle opere di sostegno

Le sezioni ritenute più rappresentative - per effettuare i confronti numerici con i valori di dimensionamento statico ottenuti nelle relazioni di calcolo strutturali presentano le seguenti caratteristiche:

- Diaframmi Sezione di calcolo TS-1: sono i pannelli di spessore 1.00 m, lunghezza max 17.80 m, trave di coronamento di altezza 1.00 m, eseguiti per il tratto in top-down e contrastati, sia in fase provvisoria sia in fase definitiva, dalla soletta di copertura. Al di sotto della quota di fondo scavo, tali diaframmi sono caratterizzati dalla presenza dell'intervento jet-grouting 'sandwich' con doppio strato.
- Diaframmi Sezione di calcolo TA: sono i pannelli di spessore 1.00 m, lunghezza max 14.80 m, trave di coronamento di altezza 1.00 m, eseguiti per il tratto in top-down e contrastati, sia in fase provvisoria sia in fase definitiva, dalla soletta di copertura. Al di sotto della quota di fondo scavo, tali diaframmi sono caratterizzati dalla presenza dell'intervento jet-grouting compensato con singolo strato.



GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 13 di 90

### 4.3 Schemi di calcolo

Il metodo di realizzazione previsto per il tratto GA01-A della galleria San Martino Buon Albergo è di tipo Top-Down nel quale lo scavo in sotterraneo della galleria avverrà dopo la realizzazione del solettone di copertura.

Per lasciare la massima flessibilità in fase di costruzione il ritombamento della soletta potrà essere effettuato prima o dopo lo scavo sotto copertura. Le condizioni più gravose per i diaframmi in fase di scavo si hanno quando il ritombamento è effettuato prima dello scavo e quindi i diaframmi sono soggetti alla massima spinta delle terre e dell'acqua.

#### 4.3.1 Criteri di identificazione delle sezioni di calcolo

Le sezioni di calcolo rappresentative del comportamento geotecnico e strutturale dal tratto di galleria in esame, per gli aspetti oggetto della validazione numerica oggetto del presente elaborato sono state individuate in modo tale da:

- massimizzare il battente idraulico della galleria inteso come differenza di quota tra il livello di falda di costruzione ed il fondo scavo;
- considerare la tipologia di trattamento jet grouting necessario per la stabilità del fondo scavo;
- considerare la variabilità del ricoprimento dell'opera individuando le sezioni di massimo/minimo ricoprimento per tenere conto delle diverse condizioni di spinta e confinamento laterale dei diaframmi.

#### 4.3.2 Fasi costruttive considerate

Per la descrizione delle fasi costruttive si rimanda alle relazioni di calcolo e agli elaborati specifici di ogni singola WBS richiamata al precedente § 2.2.

Nei successivi §§ 6.2 e 7.2 sono descritte le fasi di realizzazione simulate attraverso le analisi numeriche sulla base della sequenza costruttiva tipica di ciascuna sezione analizzata.

Per le condizioni di breve termine si è assunto che il ricoprimento della galleria venga posato successivamente alla realizzazione del solettone di copertura prima dell'approfondimento dello scavo tra i diaframmi: ciò determina, come detto le condizioni di spinta massime sui diaframmi. Tuttavia, nelle analisi parametriche per la stabilità del tampone si sono considerati anche i casi di ricoprimento minimo in modo da verificare la stabilità del fondo scavo in presenza di massimo battente e minimo confinamento laterale.

Le condizioni di lungo termine della struttura sono state simulate assumendo che la falda risalga dalla quota di costruzione a quella di lungo termine. Tale condizione è stata suddivisa in due step di calcolo distinti per includere l'effetto della perdita dell'azione stabilizzante del tampone jet nel modello di calcolo (decadimento dei parametri di resistenza del jet grouting a lungo termine). In condizioni di massima spinta della quota di falda, infine, è applicata l'azione sismica sui diaframmi.

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 14 di 90

## 5 ANALISI CARICHI E CRITERI DI VERIFICA

### 5.1 Riferimenti normativi

Le verifiche sono condotte, in osservanza al D.M. del 14.01.2008 “Norme tecniche per le costruzioni”, attraverso il metodo semiprobabilistico agli Stati Limite.

Il calcolo delle paratie viene eseguito in accordo con il § 6.5.3.1.2 delle NTC, per quanto riguarda la verifica nei confronti degli Stati Limite Ultimi e degli Stati Limite di Esercizio in condizioni statiche ed il capitolo 7 per le verifiche degli stati limite previsti in condizioni sismiche.

### 5.2 Condizioni di vincolo nodo diaframma-solettone di copertura e interazione tra diaframmi e strutture interne

La descrizione completa dei criteri di modellazione utilizzati per il calcolo delle opere di sostegno dell'intera galleria artificiale San Martino Buon Albergo nelle WBS di riferimento è fornita nella relazione IN1711EI2RHGA0100001A che contiene i criteri di dimensionamento delle opere di sostegno della GA01.

Per le ragioni indicate nella relazione sopra citata, i diaframmi previsti per il tratto GA01-A della galleria sono stati progettati assumendo due diversi schemi di vincolo del nodo diaframma-solettone di copertura:

- *Vincolo cerniera*: la paratia è stata dimensionata lato scavo assumendo che ci sia un vincolo tipo ‘cerniera’ a quota asse copertura.
- *Vincolo incastro*: la struttura di copertura presenta un collegamento rigido con i diaframmi.

Nella Figura 4 è mostrato un dettaglio del modello FLAC nella fase costruttiva finale in cui si possono notare le varie strutture modellate in modo esplicito. Nella stessa figura è possibile osservare il dettaglio della connessione tra la soletta e la sommità dei diaframmi. Per simulare la condizione di vincolo cerniera si è assegnata un'interfaccia tra la sommità dei diaframmi e la base del cordolo. A tale interfaccia è stato attribuito un modello costitutivo di tipo Coulomb slip assegnando una resistenza a trazione nulla ed una resistenza coesiva pari a quella del calcestruzzo costituente i manufatti. Analogo sistema di vincolo è stato introdotto per simulare la connessione tra controparete interna del manufatto a “U” e cordolo di sommità dei diaframmi per tenere conto della presenza degli spinotti di connessione tra controparete e cordolo che forniscono un vincolo assimilabile ad una cerniera da un punto di vista della modellazione strutturale.

Nel caso del vincolo di incastro tale interfaccia è stata sostituita da un collegamento rigido tra le due parti della griglia costituenti il cordolo ed il diaframma.

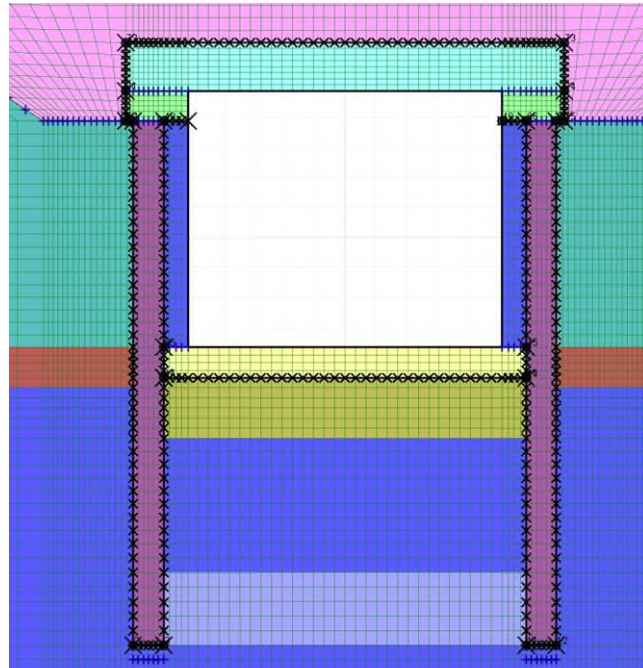


Figura 4 Particolare delle strutture modellate in modo esplicito nel modello numerico FLAC.

Nella Figura 5 è riportata la deformata del solettone di copertura sul quale è stato applicato un carico uniformemente distribuito di 20kPa. È possibile notare il diverso comportamento per le condizioni di vincolo assunte (cerniera ed incastro). È ben evidente come nel caso del vincolo a cerniera la struttura di copertura subisce una rotazione rispetto alla testa del diaframma. Modellando le strutture con gli spessori reali nella zona di appoggio, che quindi non è puntuale, si originerà un momento “negativo” o di semi-incastro anche nel caso di vincolo che tenta di simulare il comportamento a cerniera (momento ovviamente di entità inferiore rispetto a quello che si origina nel caso del vincolo incastro).

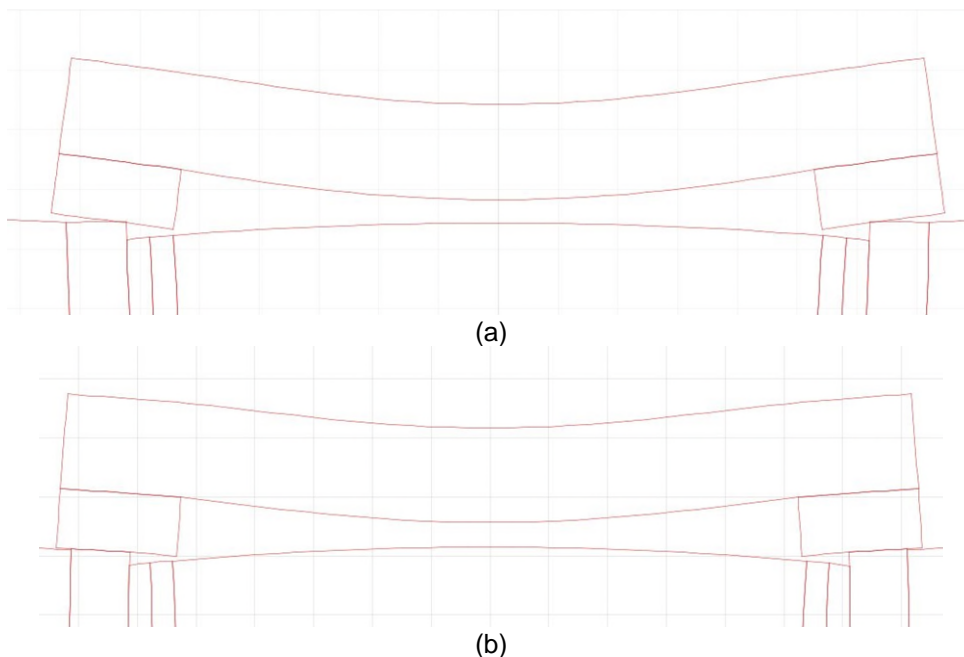


Figura 5 Modello FLAC: particolare della deformata amplificata della soletta con vincolo di cerniera (a) e vincolo di incastro (b) tra la stessa ed i diaframmi.

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 16 di 90

Come sarà descritto con maggiore dettaglio nel seguito, le sollecitazioni negli elementi strutturali sono state determinate integrando lo stato tensionale calcolato dal software nei vari elementi piani costituenti la griglia di calcolo.

A differenza di quanto fatto nelle analisi semplificate eseguite con il codice Paratie Plus, in cui per quantificare l'interazione tra diaframmi e struttura interna a lungo termine si è assunto che la spinta delle terre possa essere ripartita in ragione del rapporto  $r$  tra le rigidzze degli elementi strutturali posti a contatto, nelle analisi con il codice FLAC sono state modellate in modo esplicito le strutture tra loro interagenti. Determinate le sollecitazioni nei vari step di calcolo a breve e lungo termine nei diaframmi e nelle contropareti è stato possibile calcolare a posteriori il coefficiente "r" di ripartizione e quindi validare le assunzioni fatte tramite l'approccio semplificato utilizzato nelle analisi semplificate con il codice Paratie Plus.

### 5.3 Spinta dell'acqua

Nel modello FLAC 2D la falda è stata simulata mediante l'introduzione di una superficie piezometrica libera di variare a seconda delle condizioni idrauliche imposte al contorno, alle quote di progetto previste. L'effetto di drenaggio prodotto dall'abbassamento dello scavo è stato simulato attivando le condizioni di flusso attraverso il fondo scavo. Nell'analisi disaccoppiata non si considera l'interazione tra scheletro solido e liquido: ipotesi che può essere ritenuta accettabile per materiali con permeabilità inferiore a  $10^{-7}$  m/s. I diaframmi laterali sono considerati come frontiera impermeabile.

In questo modo è possibile ricostruire il reticolo di flusso nell'intero modello di calcolo e quindi risalire non solo ai valori efficaci delle tensioni nel terreno in ogni punto, ma anche ai gradienti di efflusso e quindi alle velocità in ogni punto sulla frontiera di efflusso. Integrando le velocità di efflusso si ottiene la portata entrante all'interno dello scavo.

### 5.4 Sovraccarico permanente ed accidentale in copertura

Il sovraccarico permanente in copertura dovuto al rinterro è stato rappresentato nel modello in modo esplicito (a differenza di quanto fatto nell'analisi semplificata) andando ad attivare gli elementi piani corrispondenti, successivamente alla realizzazione (e quindi all'attivazione nel modello) della soletta di copertura. Sulla copertura sono stati quindi applicati tutti i carichi permanenti e variabili, al netto del peso proprio, le cui sollecitazioni sono affidate alle travi di copertura nella fase iniziale di getto in auto-portanza.

Si è poi considerato anche un sovraccarico accidentale di 20 kPa al di sopra del piano campagna da considerarsi sia nel breve che nel lungo termine.

Prima di realizzare la soletta di copertura è stato applicato a monte dei diaframmi un carico accidentale pari a 20kPa in modo da considerare i carichi di cantiere (nelle fasi di breve termine).

E' stato, infine, considerato un caso di ricoprimento minimo, per simulare le condizioni di minimo confinamento dei diaframmi.

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 17 di 90

## 5.5 Azione sismica

Con riferimento alla relazione IN1711EI2RHGA0100001A, per l'opera in esame si è fatto riferimento ai seguenti valori di accelerazione di progetto:

- per la combinazione SLV:  $a_{max} = 0.339 a_g$
- per la combinazione SLD:  $a_{max} = 0.162 a_g$

Nelle relazioni di calcolo strutturali l'azione sismica è applicata facendo riferimento alla teoria di Wood, la cui applicazione alle strutture in esame presenta comunque margini di discrezionalità elevate, sia nella scelta della profondità effettiva a cui applicare la spinta, sia nella determinazione delle masse inerziali in copertura effettivamente sollecitanti i diaframmi di sostegno.

Potendo disporre di un modello completo per simulare l'interazione terreno struttura in fase sismica, sia pure in modo semplificato, ma più rispondente al reale meccanismo di sollecitazione dell'opera per effetto delle deformazioni taglianti imposte dal terreno all'opera stessa, l'analisi sismica è stata eseguita applicando un'azione di tipo pseudostatico, in accordo con quanto indicato da Bilotta et Al. 2007 (cfr-§ 2.3).

La deformazione tangenziale massima del terreno alla profondità  $z$  è stata calcolata con l'espressione, ricavata dall'equilibrio dinamico di una colonna di terreno:

$$\tau_{max}(z) = r_d(z) \frac{a_{max,s}}{g} \sigma_v(z)$$

dove:

-  $\sigma_v(z)$  è la tensione verticale totale;

-  $r_d(z)$  è un fattore di riduzione che tiene conto della deformabilità della colonna di terreno. Questo coefficiente può essere considerato una funzione della profondità  $z$  e può essere ricavato da espressioni presenti in letteratura, come ad esempio quelle fornite da Iwasaki et al. (1978):

$$r_d(z) = 1 - 0.015z$$

Inoltre i valori di  $r_d(z)$  possono anche essere derivati dal fattore di riduzione di  $a_{max,s}$  con la profondità, fornito da Power et al. (1996).

La deformazione tangenziale massima del terreno alla profondità  $z$  viene calcolata dividendo la tensione massima,  $\tau_{max}(z)$ , per la rigidità a taglio,  $G(z)$ , alla stessa profondità:

$$\gamma_{max}(z) = \frac{\tau_{max}(z)}{G(z)}$$

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 18 di 90

dalla quale è possibile ricavare la deformazione di taglio da applicare al modello in funzione dell'altezza dello stesso.

Per il calcolo delle deformazioni di taglio da applicare al modello si è fatto riferimento ai moduli di taglio a piccole deformazioni indicati nella relazione geotecnica. Nei capitoli dedicati alla descrizione delle analisi condotte sulle due sezioni prese come riferimento si riportano i valori di spostamento (ottenuti con l'approccio sopra indicato) applicati ai bordi del modello al fine di generare la deformazione di taglio voluta.

Nella Figura 6 è mostrata la deformazione di taglio del modello FLAC in seguito all'applicazione dell'azione sismica (maggiori dettagli sono forniti nei paragrafi descrittivi dei risultati delle analisi eseguite).

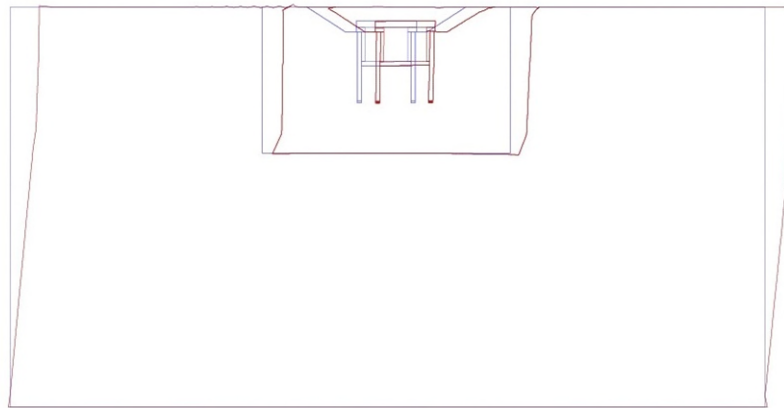


Figura 6 Deformazione di taglio in seguito all'applicazione dell'azione sismica al modello numerico FLAC.

## 5.6 Combinazioni per la verifica agli SLU

Le combinazioni di carico agli stati limite considerate ai fini delle verifiche sono stabilite in modo da garantire la sicurezza in conformità a quanto prescritto nel Cap. 2 delle NTC 2008.

Per i criteri generali di applicazione dei coefficienti di sicurezza e delle combinazioni di calcolo definiti nei vari modelli si rimanda alla relazione IN1711EI2RHGA0100001A.

### 5.6.1 Modellazione FLAC della combinazione A1+M1

L'analisi FLAC per la combinazione A1+M1 prevede per il terreno l'utilizzo dei parametri caratteristici (M1) e le azioni variabili amplificate mediante il coefficiente parziale  $\gamma_Q / \gamma_{G1}$  (con  $\gamma_{G1} = 1.3$ ); i risultati dell'analisi FLAC in termini di azioni interne sui vari elementi strutturali sono poi amplificati per il fattore moltiplicativo  $\gamma_{G1} = 1.3$ .

### 5.6.2 Modellazione FLAC della combinazione A2+M2

L'analisi FLAC per la combinazione A2+M2 prevede per il terreno l'utilizzo dei parametri caratteristici (M2) e le azioni variabili amplificate mediante il coefficiente parziale  $\gamma_Q / \gamma_{G1}$  (con  $\gamma_{G1} = 1.0$ ); i risultati dell'analisi FLAC in termini di azioni interne sui vari elementi strutturali sono poi amplificati per il fattore moltiplicativo  $\gamma_{G1} = 1.0$ .

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento E12 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 19 di 90

## 5.7 Combinazioni per la verifica agli SLE

Le combinazioni di carico agli stati limite di esercizio considerate ai fini delle verifiche sono stabilite in modo da garantire la sicurezza in conformità a quanto prescritto nel Cap. 2 delle NTC 2008.

Per i criteri generali di applicazione dei coefficienti di sicurezza e delle combinazioni di calcolo definiti nei vari modelli si rimanda alla relazione IN1711E12RHGA0100001A.



GENERAL CONTRACTOR 		ALTA SORVEGLIANZA 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI		Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 20 di 90

## 6 SEZIONE DI CALCOLO TS1

I diaframmi dimensionati con tale sezione sono nelle WBS GA01-B e C nelle quali si raggiungono le massime profondità della livelletta ferroviaria e quindi del battente di falda sopra lo scavo. I diaframmi sono lunghi 17.8m. I parametri geotecnici caratteristici adottati per il dimensionamento dell'opera di sostegno, la stratigrafia di progetto e le ipotesi di falda sono state esposte nel seguito.

### 6.1 Geometria, dati di ingresso del modello ed ipotesi

Si è fatto riferimento alla successione stratigrafica ed ai parametri geotecnici riportati negli elaborati specialistici di progetto. I parametri di resistenza e deformabilità delle unità sono riassunti nella Tabella 2.

Tabella 2: Parametri geotecnici caratteristici assunti nella modellazione FLAC.

Unità	Descrizione	$\gamma$	$c'$	$\varphi'$	$k$	$E_{vc}$	$E_{ur}/E_{vc}$	$\nu$
		[kN/m <sup>3</sup> ]	[kPa]	[°]	[m/sec]	[kPa]	[-]	[-]
1	Riporto	19	0	29	$2.0 \cdot 10^{-4}$	20	1.0	0.2
6	Ghiaie con sabbia	19	0	41	$2.0 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^5 \left(\frac{\sigma_h'}{p_a}\right)^{0.5}$	2.0	0.2
4	Sabbie	19	0	38	$2.0 \cdot 10^{-4}$	$1.8 \cdot 10^5 \left(\frac{\sigma_h'}{p_a}\right)^{0.6}$	2.0	0.2
2	Limi argillosi	19	10	27	$2.0 \cdot 10^{-6}$	20	1.0	0.2

$\gamma$ : Peso di volume;  $c'$ : coesione efficace;  $\varphi'$ : Angolo di resistenza al taglio;  $k$ : Permeabilità;  $E_{vc}$ : Modulo di Young di primo carico;  $E_{ur}$ : Modulo di Young di scarico/ricarico;  $\nu$ : rapporto di Poisson.

La stratigrafia assunta è riportata nella Figura 7 mentre la vista di insieme del modello FLAC ed il particolare in corrispondenza delle opere oggetto della presente relazione sono illustrate nella Figura 8 e nella Figura 9.



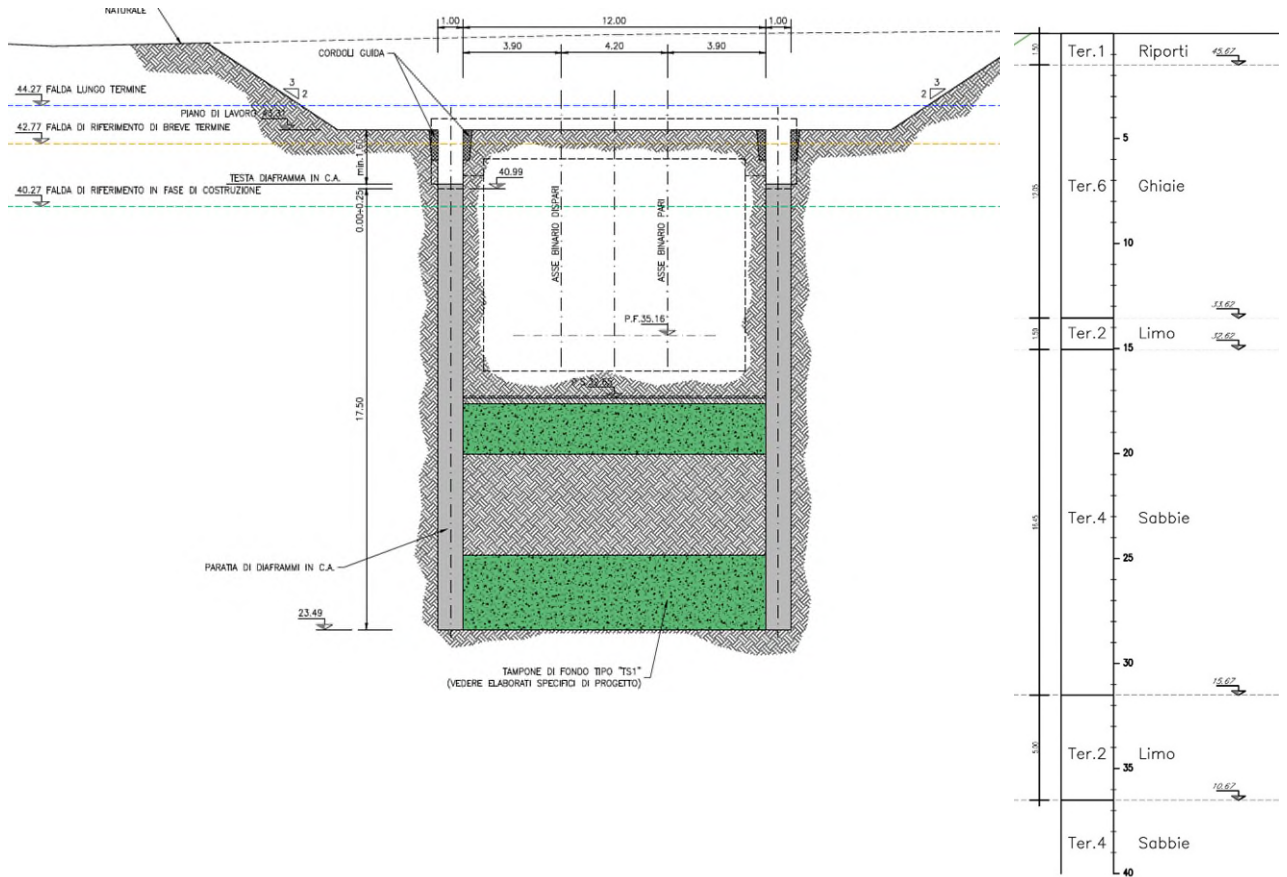


Figura 7 Sezione TS1: stratigrafia di riferimento per la modellazione numerica.

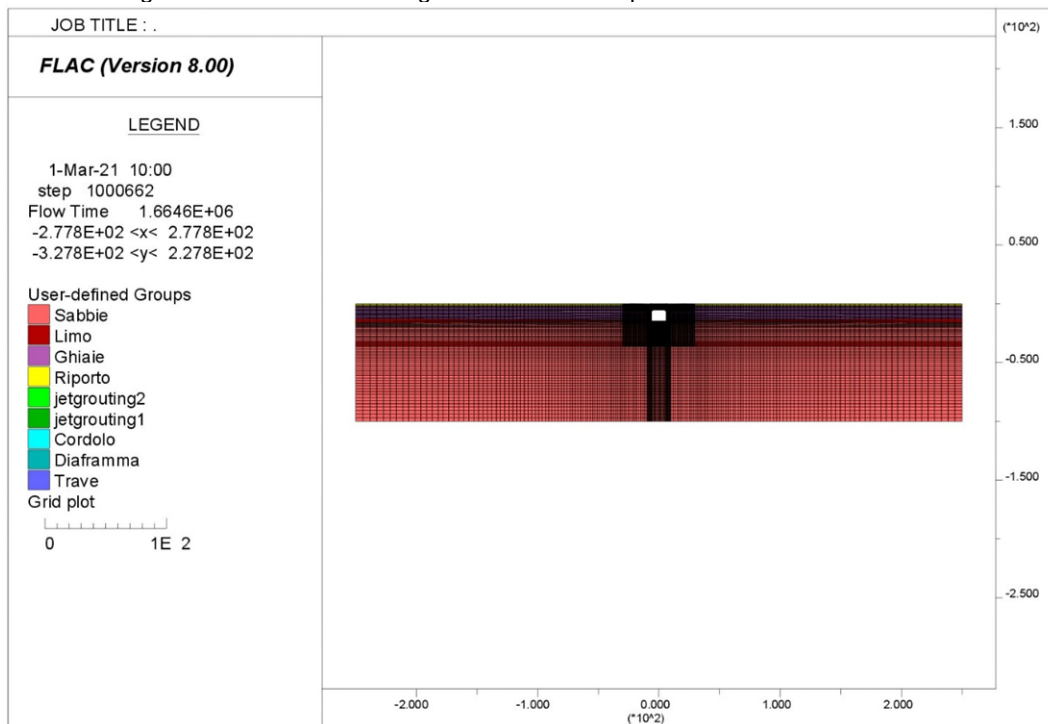


Figura 8 Sezione TS1: vista di insieme del modello FLAC.

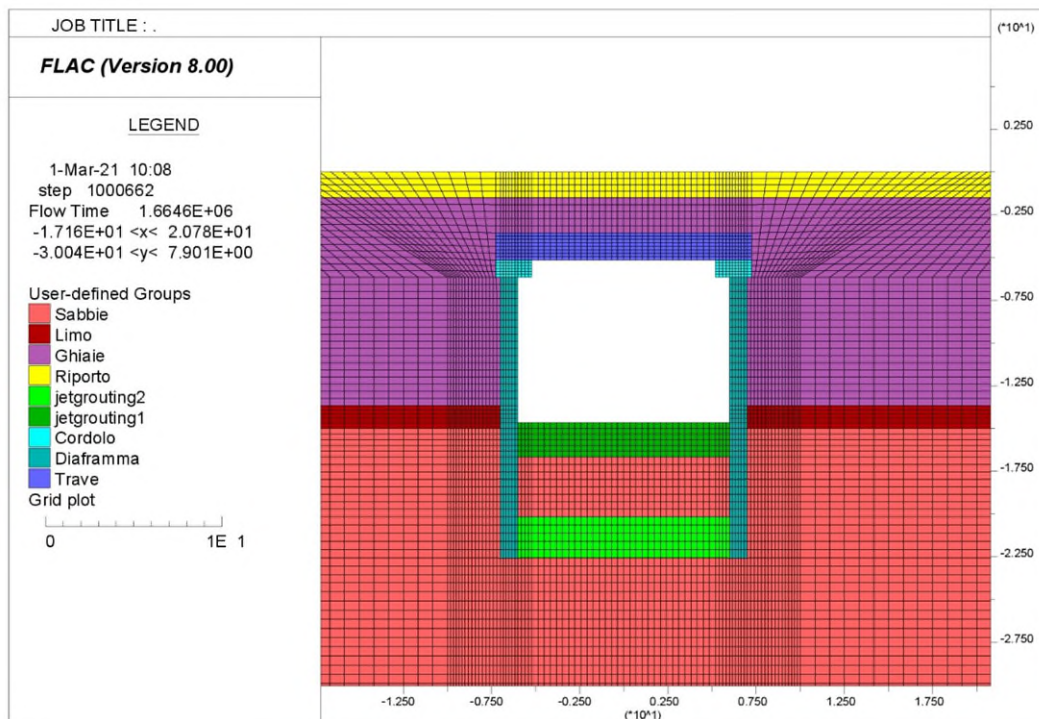


Figura 9 Sezione TS1: particolare del modello FLAC con indicazione della stratigrafia e delle zone trattate con jet-grouting.

Nelle analisi FLAC è stato attribuito alle unità 1 e 2 un modello costitutivo di tipo elasto-plastico perfetto con criterio di rottura di Mohr-Coulomb mentre alle unità 4 e 6 (sabbie e ghiaie) è stato assegnato il Plastic Hardening model (modello elastoplastico incrudente). In particolare, questo ultimo legame costitutivo, come indicato nella Tabella 2, consente di tenere in conto i differenti moduli di deformabilità che si hanno nella fase di primo carico ed in quelle di scarico/ricarico. Il modello elastoplastico incrudente riproduce in condizioni di primo carico triassiale un legame tensioni deformazioni di tipo iperbolico. Inoltre, l'incrudimento è funzione sia delle deformazioni distorsionali plastiche sia delle deformazioni volumetriche plastiche. Il modello è quindi in grado di simulare, tra l'altro, la riduzione irreversibile di volume di un terreno sottoposto a compressione lungo percorsi di carico proporzionali (carico isotropo, edometrico) a partire da una condizione di normal-consolidazione.

I principali parametri del modello Plastic Hardening sono:

- $c'$ : coesione efficace da caratterizzazione geotecnica;
- $\phi'$ : angolo di attrito da caratterizzazione geotecnica;
- $E_{50}^{ref}$ : modulo di rigidezza secante alla pressione di riferimento ( $p_a$  = pressione atmosferica);
- $E_{oed}^{ref}$ : modulo di rigidezza edometrico alla pressione di riferimento ( $p_a$  = pressione atmosferica). Si assume pari al modulo  $E_{50}^{ref}$ ;
- $E_{ur}^{ref}$ : modulo di rigidezza secante di scarico e ricarico alla pressione di riferimento. Si assume pari a 2 volte il corrispondente modulo di carico;
- $m$  coefficiente esponenziale che regola la dipendenza della rigidezza dallo stato tensionale;

<b>GENERAL CONTRACTOR</b> 	<b>ALTA SORVEGLIANZA</b> 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 23 di 90

- R<sub>f</sub> : failure ratio assunto in genere pari a 0.9.

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva dei parametri di ingresso del modello Plastic Hardening per le due unità geotecniche alle quali è stato attribuito.

Tabella 3: Parametri geotecnici di ingresso del modello Plastic Hardening di FLAC.

Unità	Descrizione	$\gamma$	$c'$	$\varphi'$	$E_{50}^{ref}$	$E_{oed}^{ref}$	$E_{ur}^{ref}$	$m$
		[kN/m <sup>3</sup> ]	[kPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]
6	Ghiaie con sabbia	19	0	41	200	200	400	0.5
4	Sabbie	19	0	38	180	180	360	0.6

In base alle informazioni disponibili si è assunto un grado di sovraconsolidazione OCR pari a 1 per le unità considerate e conseguentemente è stato determinato il coefficiente di spinta a riposo  $K_0$  dalla seguente formulazione proposta da Mayne and Kulhawy (1982):

$$K_0 = K_0^{NC} \cdot OCR^{(\sin \varphi')}$$

dove  $K_0^{NC}$  è il coefficiente di spinta a riposo del terreno in condizioni normal consolidate determinato con l'espressione proposta da Jaky (1944):  $K_0^{NC} = 1 - \sin \varphi'$ .

Per quanto riguarda le zone trattate con jet-grouting si sono adottate le proprietà meccaniche e deformative illustrate nella Tabella 4.

Tabella 4: Parametri di resistenza e deformabilità della zona migliorata.

Unità	Descrizione	$\gamma$	$c'$	$\varphi'$	E	$\nu$
		[kN/m <sup>3</sup> ]	[kPa]	[°]	[MPa]	[-]
4	Valori minimi	19	400	27	750	0.2
4	Valori ottimali	19	1000	38	2500	0.2

Le strutture presenti sono state modellate in modo esplicito andando a considerare il loro reale spessore. Ogni struttura è stata discretizzata con una griglia e le tensioni calcolate in ogni elemento dal software sono state integrate in modo da determinare le sollecitazioni di momento, taglio e sforzo assiale. A tutte le strutture è stato attribuito un legame costitutivo di tipo elastico ideale le cui proprietà sono riassunte nella

Tabella 5.

Tabella 5: Proprietà degli elementi strutturali assunte nella modellazione FLAC.

Struttura	Descrizione	Valore
Diaframmi	Spessore	1.0 m

<b>GENERAL CONTRACTOR</b> 	<b>ALTA SORVEGLIANZA</b> 
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17    Lotto 11    Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002    Rev. A    Foglio 24 di 90

	Modulo elastico (C25/30)	31447 MPa
	Rapporto di poisson	0.2
	Dimensioni	2.05 x 1.0 m
Cordolo	Modulo elastico (C25/30)	31447 MPa
	Rapporto di poisson	0.2
Copertura	Altezza	1.6 m
	Modulo elastico (parametri equivalenti)	10956 MPa
	Rapporto di poisson	0.2
Solaio di fondo	Spessore	1.0 m
	Modulo elastico (C30/37)	33019 MPa
	Rapporto di poisson	0.2
Contropareti / fodere	Spessore	0.8 m
	Modulo elastico (C30/37)	33019 MPa
	Rapporto di poisson	0.2

Come già descritto in precedenza nel paragrafo relativo alla descrizione delle condizioni di vincolo, sono state considerate due condizioni differenti di vincolo tra la sommità dei diaframmi e la copertura: cerniera e incastro. Nella Figura 4 è riportato il particolare del modello in corrispondenza delle strutture. È possibile notare la presenza delle interfacce tra le strutture ed il terreno e tra le fodere ed i diaframmi.

Per le interfacce è stato adottato un legame costitutivo del tipo coulomb slip con coesione nulla e con angolo di attrito pari a 0.5 volte l'angolo di resistenza al taglio del terreno.

A seconda della fase di calcolo (vedasi paragrafo seguente) sono stati considerati tre diversi livelli di falda (vedasi Figura 7):

1. livello di costruzione → 40.34 s.l.m.;
2. livello di breve termine → 42.84 s.l.m.;
3. livello di lungo termine → 44.34 s.l.m.

Come descritto in precedenza le analisi meccaniche e di flusso sono state condotte in modo disaccoppiato.

## 6.2 Fasi di calcolo

Le fasi di calcolo prese in considerazione nel modello sono di seguito elencate.

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 25 di 90

Esse sono state studiate e suddivise in diverse *branches* utili per le analisi di tipo strutturale e geotecnico.

In particolare le analisi con e senza fodera interna sono state utilizzate per la verifica della ripartizione del carico tra diaframmi e controparete a lungo termine, mentre le fasi di verifica tampone sono state utilizzate per le verifiche di breve termine a scavi aperti per la valutazione della stabilità del fondo scavo:

### **FASI INIZIALI COMUNI**

- Fase 0: start – nihil;
- Fase 1: condizione geostatica (falda a livello di costruzione, quota 40.34 m s.l.m.);
- Fase 2: Modellazione scavo 2V:3H da 47.17 a intradosso cordolo;
- Fase 3: Realizzazione diaframmi e realizzazione Jet grouting;
- Fase 4: Applicazione carico accidentale di cantiere 20kPa ai lati dei diaframmi;
- Fase 5: Installazione soletta di copertura;
- Fase 6: Applicazione carico accidentale di 20kPa sulla soletta;
- Fase 7: Ricoprimento fino a quota piano campagna 47.17 (eliminazione del carico precedente);
- Fase 8: Applicazione carico accidentale di 20kPa su piano campagna;
- Fase 9: Abbassamento falda a quota fondo scavo tra i diaframmi e falda a livello di costruzione;
- Fase 10: Scavo q.ta fondo scavo 32.52m;
- Fase 11a: Innalzamento falda al livello di breve termine (quota 42.84 m s.l.m.);
- Fase 11b: Abbassamento falda al livello di costruzione (quota 40.34 m s.l.m.);
- Fase 12a: Costruzione solaio di fondo;

**MODELLO SENZA CONTROPARETE INTERNA** (a partire dalla precedente fase 12a – branch introdotta per lo studio dei coefficienti di ripartizione delle sollecitazioni tra diaframma e controparete):

- Fase 13: Annullamento parametri jet-grouting (non si apprezza più azione irrigidente del tampone in termini di permeabilità e rigidità);
- Fase 14: Risalita falda fino al livello di lungo termine (quota 44.34 m s.l.m.);
- Fase 15: Riduzione moduli calcestruzzo per il lungo termine (si è assunta una riduzione del 20% dei valori di breve termine del calcestruzzo,  $E_{LT}=0.8 \cdot E_{BT}$ );

**MODELLO CON CONTROPARETE INTERNA** (a partire dalla precedente fase 12a branch introdotta per lo studio dei coefficienti di ripartizione delle sollecitazioni tra diaframma e controparete):

- Fase 12b: costruzione fodera;
- Fase 13: Annullamento parametri jet-grouting (non si apprezza più azione irrigidente del tampone in termini di permeabilità e rigidità);
- Fase 14: Risalita falda fino al livello di lungo termine (quota 44.34 m s.l.m.);

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 26 di 90

- Fase 15: Riduzione moduli calcestruzzo per il lungo termine (si è assunta una riduzione del 20% dei valori di breve termine del calcestruzzo,  $E_{LT}=0.8 \cdot E_{BT}$ );
- Fase 16: Applicazione dell'azione sismica.

**FASI PER VERIFICHE TAMPONE** (a partire dalla precedente fase 10 branch introdotta per lo studio della stabilità del fondo scavo):

- Fase 11: Riduzione peso di volume del terreno di 0.9 ed incremento peso di volume acqua a 11 kN/m<sup>3</sup>, incremento della falda al livello di breve termine;
- Fase 12: Riduzione parametri A2+M2 e modifica interfaccia angolo di attrito.

Ogni analisi è stata ripetuta per le due condizioni di vincolo tra diaframmi e solettone di copertura ipotizzate e per le seguenti configurazioni di permeabilità e di resistenza relative alle due zone migliorate:

1. Jet-grouting avente le migliori caratteristiche meccaniche ipotizzate ( $c'=1000\text{kPa}$ ,  $\phi'=38^\circ$ ,  $E'=2500\text{MPa}$ ) e permeabilità pari a  $k=5\text{e-}7\text{ m/s}$  per la zona migliorata inferiore e  $k=1\text{e-}6\text{ m/s}$  per la zona migliorata superiore;
2. Jet-grouting avente le peggiori caratteristiche meccaniche ipotizzate ( $c'=400\text{kPa}$ ,  $\phi'=27^\circ$ ,  $E'=750\text{MPa}$ ) e permeabilità pari a  $k=1\text{e-}6\text{ m/s}$  per entrambi le zone.

La presente numerazione delle analisi è quella a cui si farà riferimento nel seguito. A titolo di esempio con "Analisi 1" si farà riferimento all'analisi eseguita attribuendo alla zona migliorata inferiore un valore di permeabilità minore (pari a  $k=5\text{e-}7\text{ m/s}$ ) rispetto a quello della zona migliorata superiore ( $k=1\text{e-}6\text{ m/s}$ ).

Nelle figure seguenti si riportano le immagini del modello FLAC nelle fasi più significative:



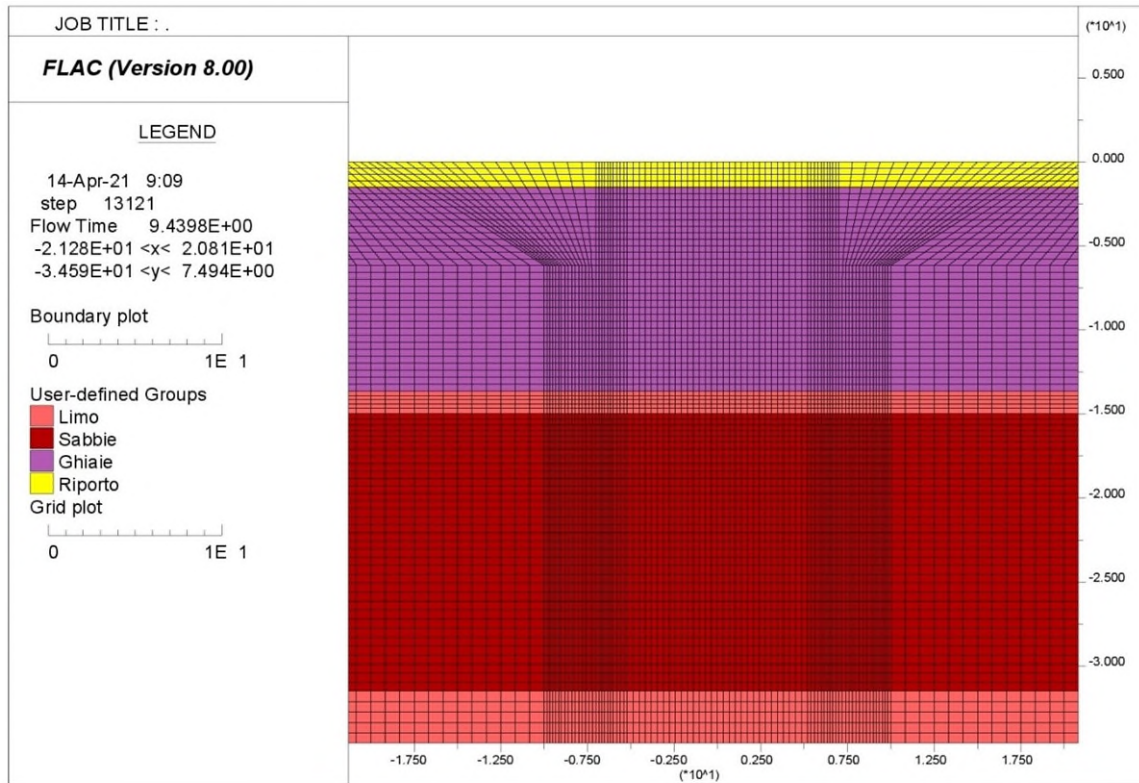


Figura 10 Fase 1: Equilibrio geostatico iniziale.

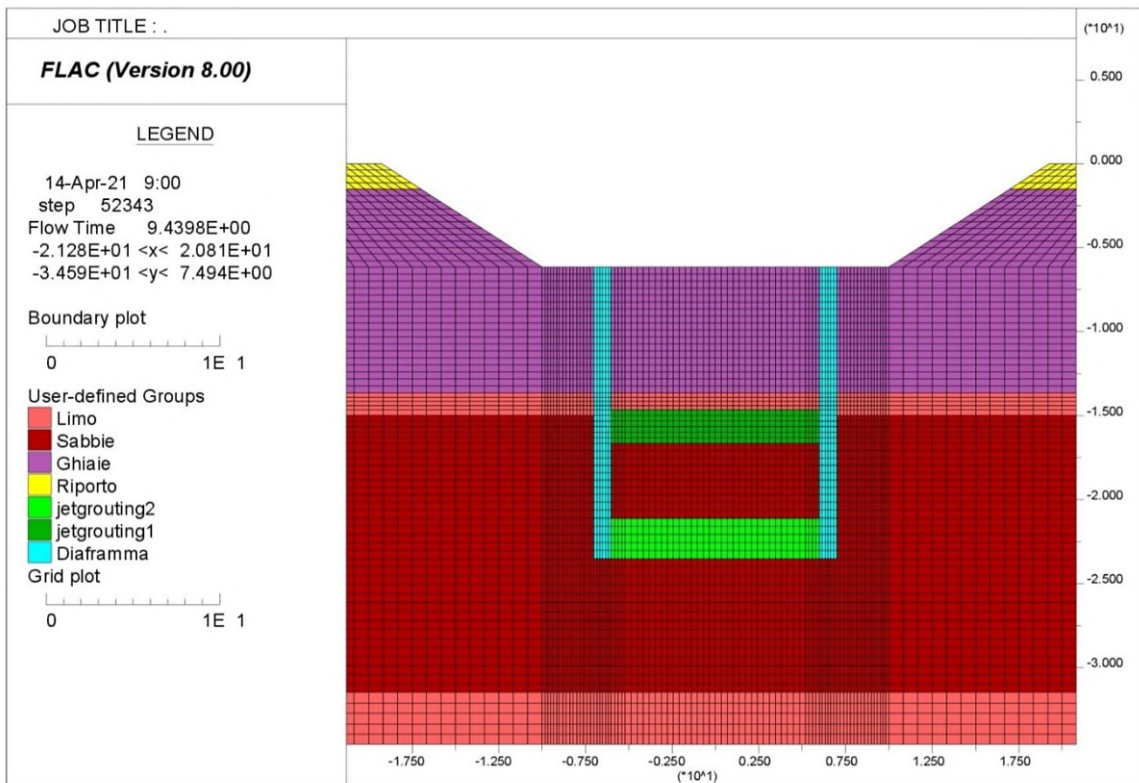


Figura 11 Fase 3: Realizzazione tampone jet tipo 'sandwich' con doppio stato.

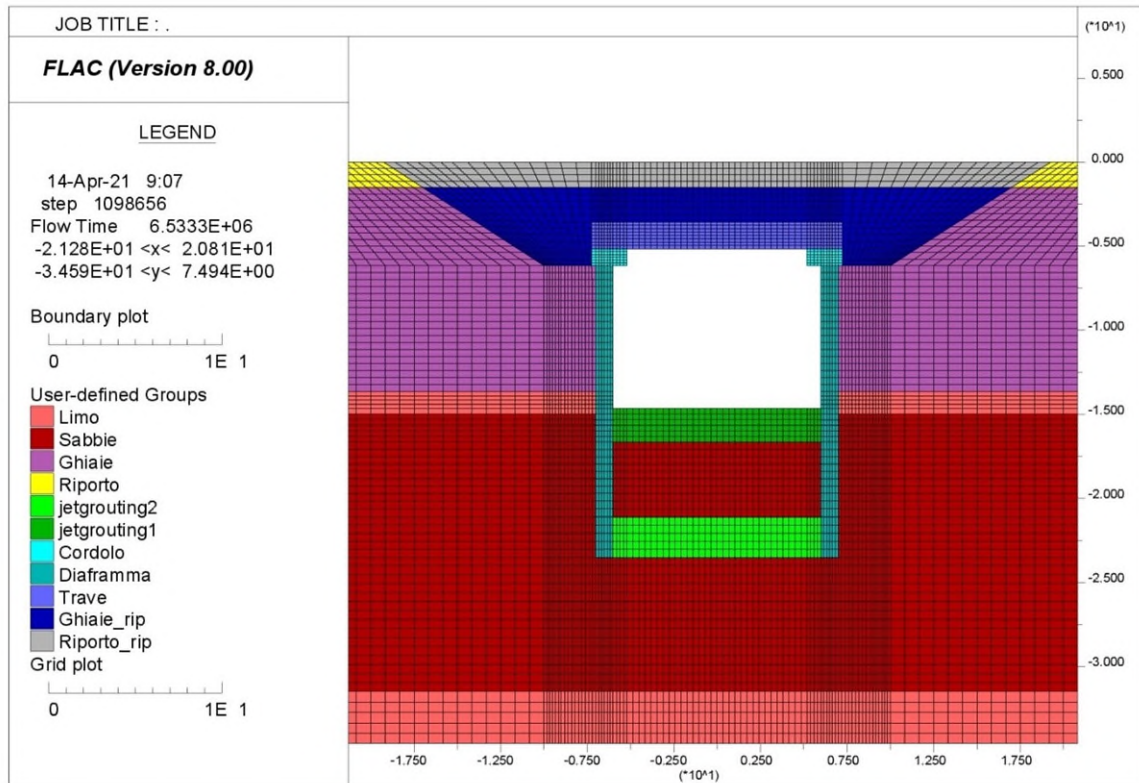


Figura 12 Fase 10: Scavo fino a quota fondo scavo 32.52m.

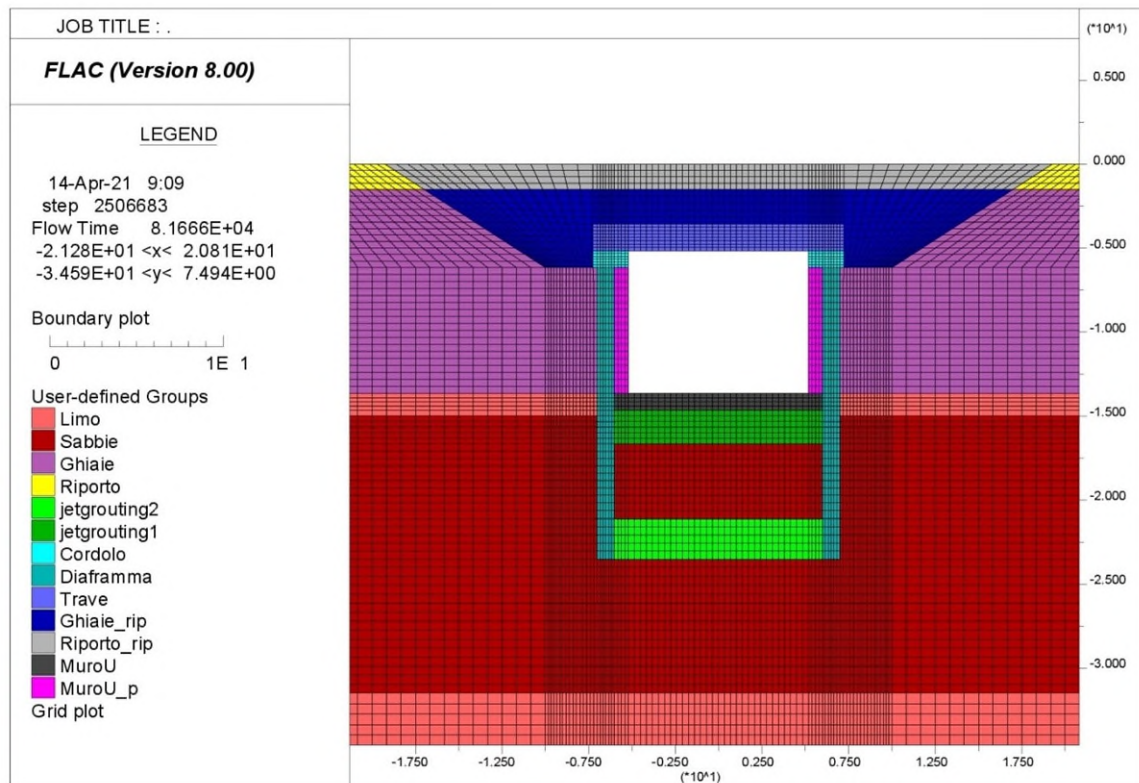


Figura 13 Fase 15: Fase lungo termine



<b>GENERAL CONTRACTOR</b> 	<b>ALTA SORVEGLIANZA</b> 				
<b>GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI</b>	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 29 di 90

### 6.3 Analisi preliminari e di validazione

Al fine di validare i modelli di calcolo sono state fatte alcune analisi di sensitività dei parametri per forzare il modello verso le condizioni di “collasso”: in particolare assegnando l’attrito nullo all’interfaccia terreno/paratia, oppure diminuendo la permeabilità degli strati trattati – senza parimenti incrementarne la resistenza – è stato possibile verificare che il modello giunge rapidamente al collasso per sollevamento del fondo scavo (non si raggiunge la convergenza), come lecito attendersi, al crescere del livello di falda.

A tale proposito nella Figura 14 e nella Figura 15 sono mostrati i due meccanismi di collasso che si vengono a creare. Come si può notare per la prima condizione di analisi il collasso interessa l’intero tampone sandwich con spostamenti maggiori per la zona trattata superiore posta in prossimità del fondo scavo, mentre la seconda condizione determina preliminarmente il sollevamento dello strato trattato superiore.

Si possono poi osservare come nel primo caso la deformata evidenzia sostanzialmente un puro scorrimento (deformata fondo scavo orizzontale) all’interfaccia paratia-terreno, mentre nel secondo caso, essendo presente l’attrito lungo l’interfaccia, il profilo di fondo scavo si deforma con concavità verso il basso.

In questo ultimo caso, avendo strati trattati con permeabilità ridotte e non accompagnati da un miglioramento delle caratteristiche di resistenza, si origina il collasso per sollevamento preliminarmente della zona trattata più prossima al fondo scavo.

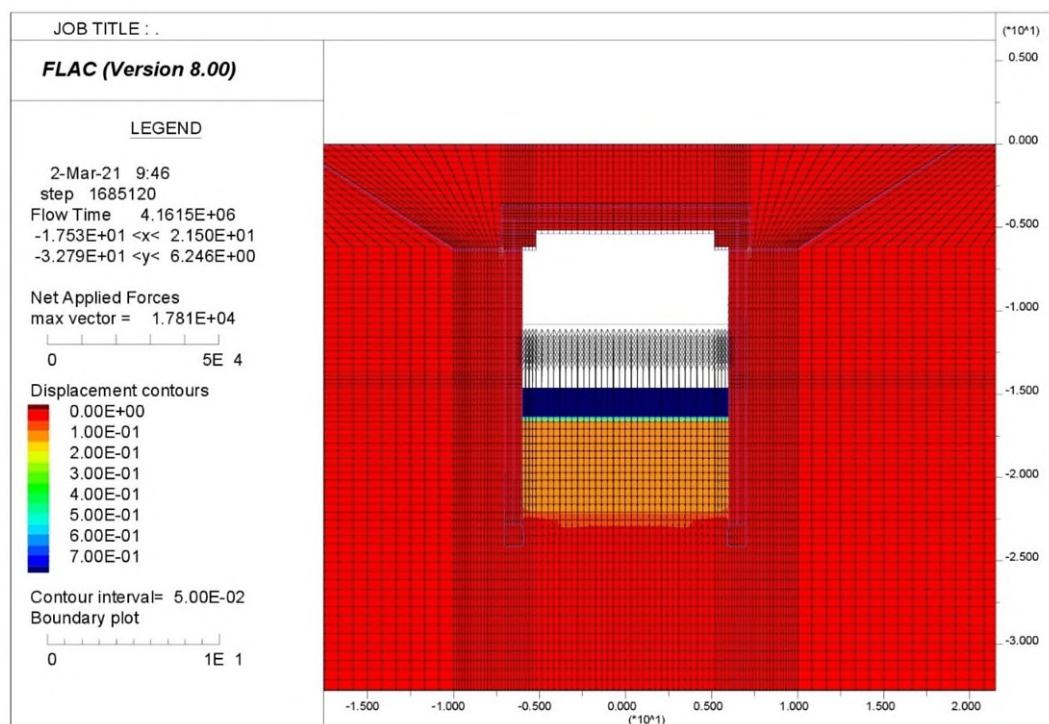


Figura 14 Collasso assegnando attrito nullo alla interfaccia terreno/paratia: spostamenti totali e deformata (linea blu).

<b>GENERAL CONTRACTOR</b> 	<b>ALTA SORVEGLIANZA</b> 				
<b>GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI</b>	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 30 di 90

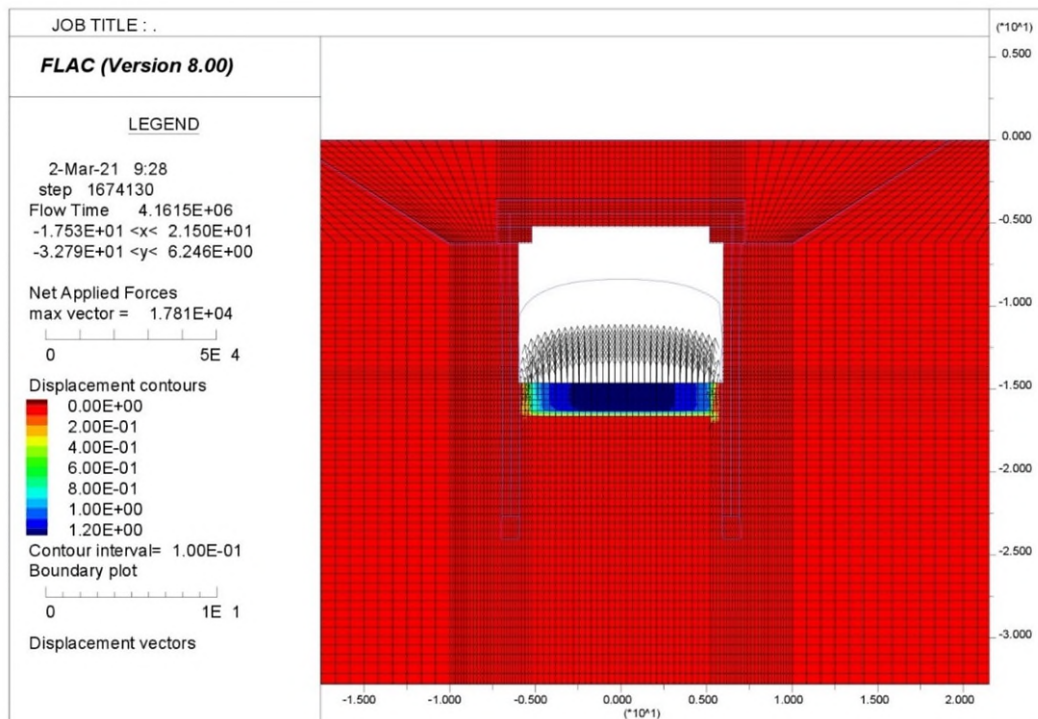


Figura 15 Collasso legato alla diminuzione della permeabilità degli strati trattati ma senza il miglioramento delle caratteristiche meccaniche: spostamenti totali e deformata (linea blu).

Ulteriori interessanti informazioni sulle due condizioni di collasso si possono desumere dalla Figura 16 e dalla Figura 17 dove vengono evidenziate le zone plastiche e la deformata. Si possono osservare rotture per trazione in corrispondenza del limite inferiore delle due zone trattate. Nella seconda condizione si nota un'estesa rottura per taglio che interessa l'intero tampone sandwich.

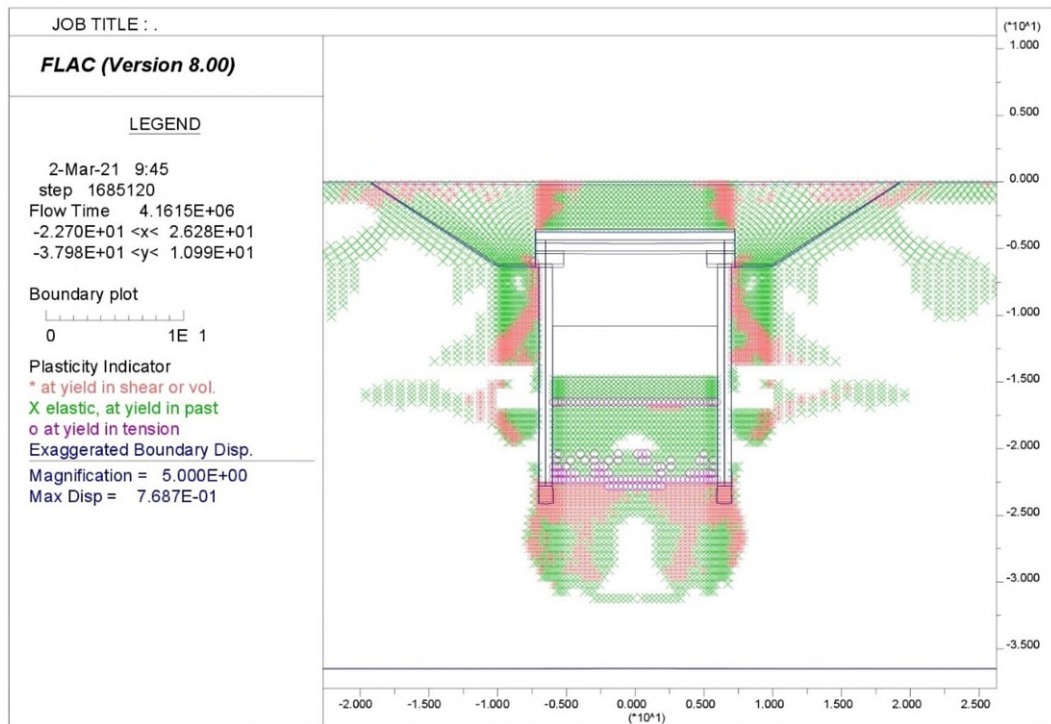


Figura 16 Collasso assegnando attrito nullo alla interfaccia terreno/paratia: zone plastiche e deformata (linea blu).

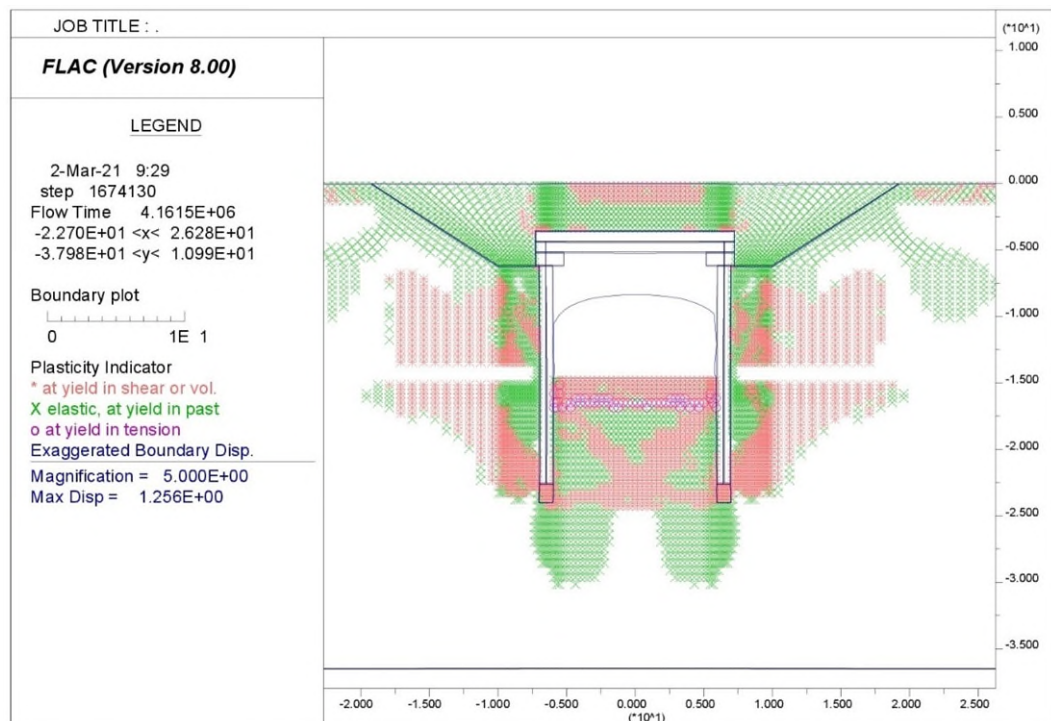


Figura 17 Collasso legato alla diminuzione della permeabilità degli strati trattati: zone plastiche e deformata (linea blu).

Per semplicità queste analisi preliminari sono state eseguite assegnando a tutte le unità geotecniche il legame costitutivo di Mohr-Coulomb a differenza delle analisi che saranno descritte nel seguito.

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 32 di 90

## 6.4 Determinazione delle sollecitazioni agenti nei diaframmi

### 6.4.1 Sollecitazioni agli SLE ed SLU

In questo paragrafo sono riassunte le sollecitazioni nei diaframmi ottenute eseguendo i gruppi di analisi descritti in precedenza.

Nella Figura 18 e nella Figura 19 sono illustrati gli andamenti di taglio e momento per lo stato limite di esercizio e per lo stato limite ultimo relativamente all'Analisi 1 per la condizione di vincolo di tipo cerniera del nodo diaframma-solettone di copertura. Sono mostrati gli andamenti delle sollecitazioni calcolate per le fasi di calcolo ritenute più significative. In ogni grafico gli andamenti delle sollecitazioni sono generati a partire dall'interfaccia cordolo-diaframma (zona in cui è simulato il vincolo incastro o cerniera) fino al piede dello stesso. Lo spessore di calcolo della sezione considerata per i diaframmi è pari a 100 cm.

Allo stesso modo sono riportati nella Figura 20 e nella Figura 21 i risultati ricavati con la condizione di vincolo di tipo incastro. Come già indicato in precedenza, nel capitolo relativo alle condizioni di vincolo, la cerniera corrisponde in realtà ad un semincastro in cui il momento negativo sull'appoggio è circa il 30-40% di quello corrispondente all'incastro. Nella Figura 22 si può osservare il confronto, per la fase di calcolo più gravosa precedente all'installazione delle strutture interne, tra gli andamenti di taglio e momento ottenuti con la condizione di vincolo incastro e quelli ricavati con la condizione cerniera.

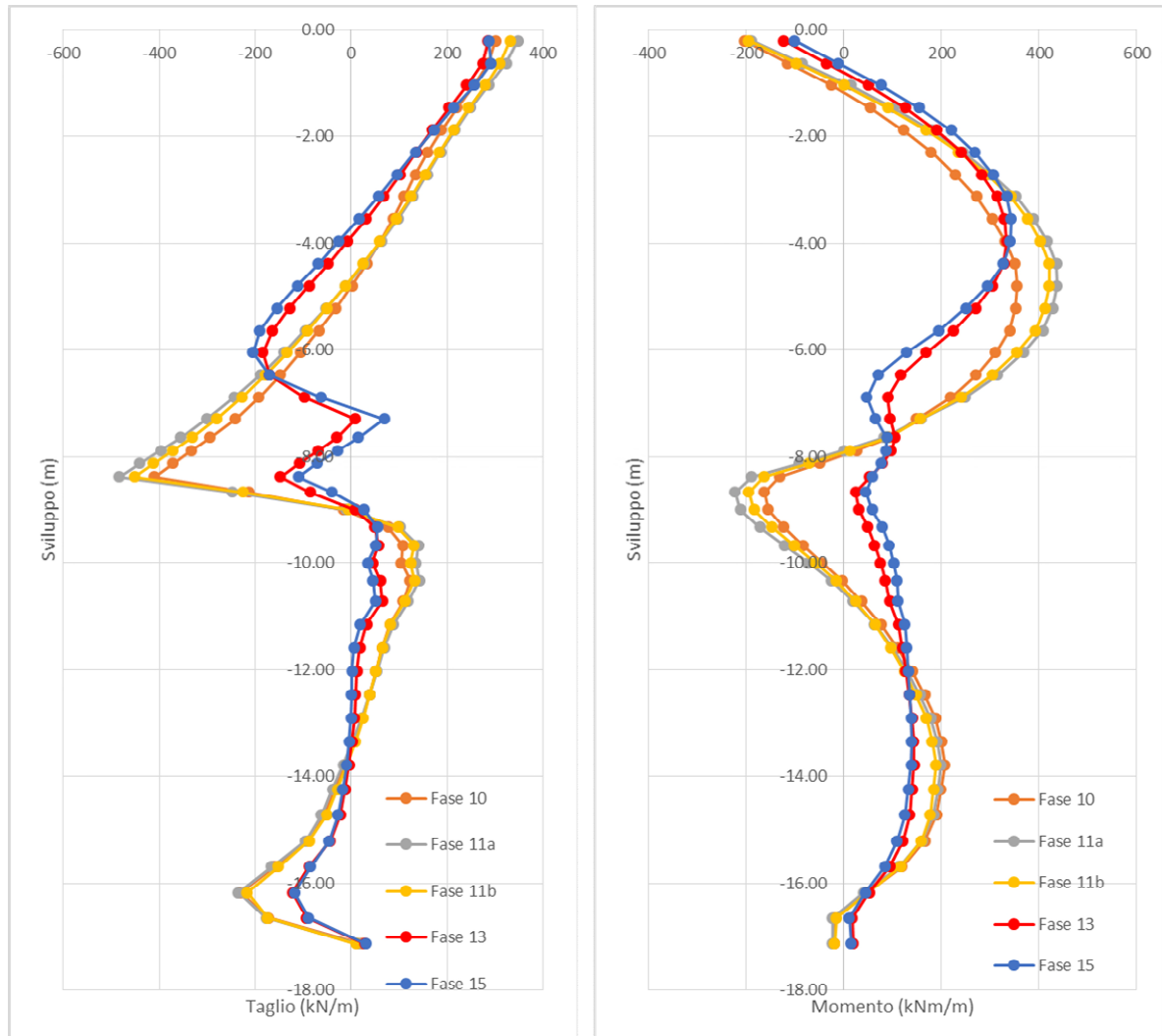


Figura 18 Analisi 1 - vincolo cerniera: SLE - Diaframmi di taglio e momento per le fasi di calcolo ritenute più significative.



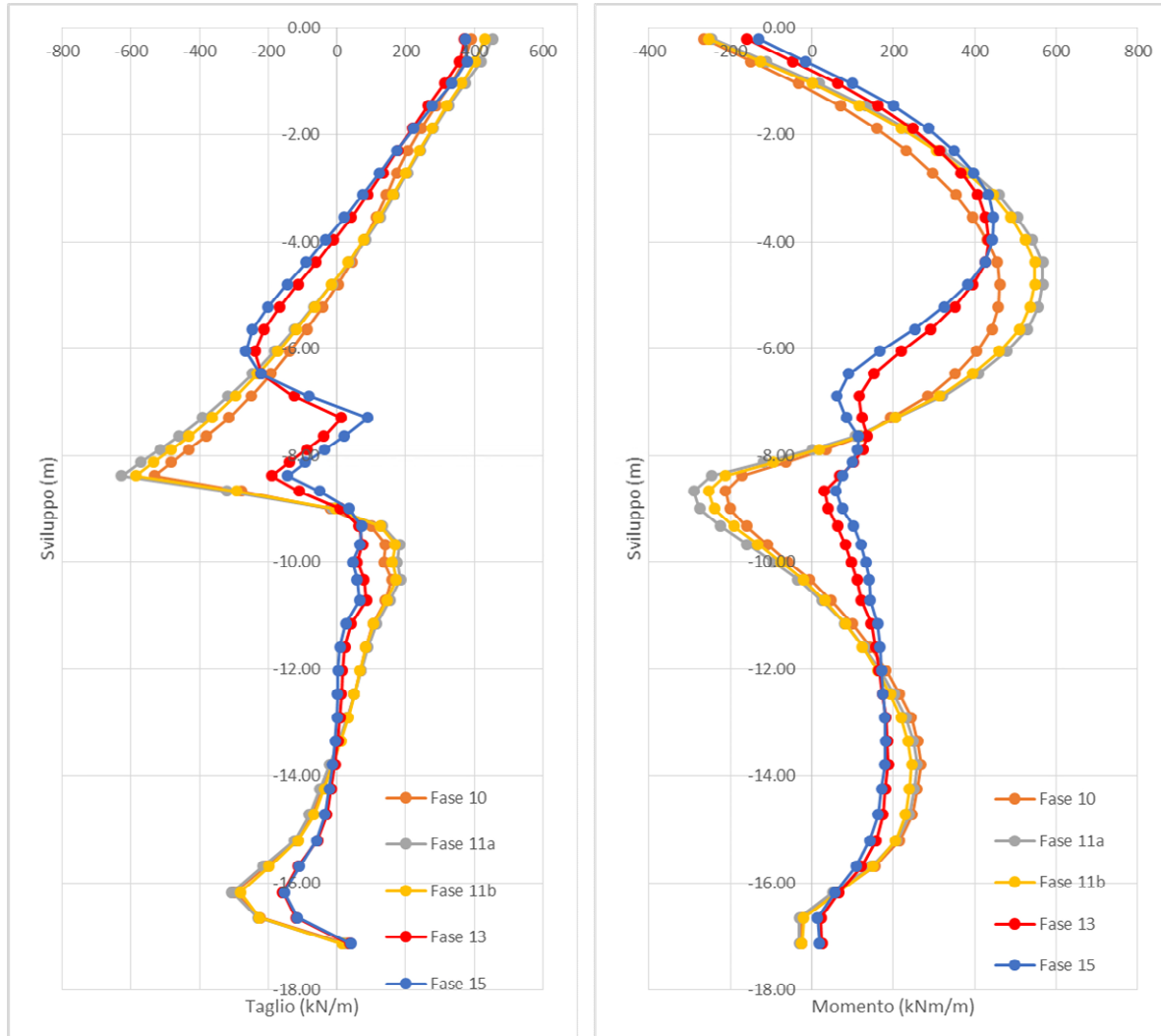


Figura 19 Analisi 1 - vincolo cerniera: SLU - Diaframmi di taglio e momento per le fasi di calcolo ritenute più significative.

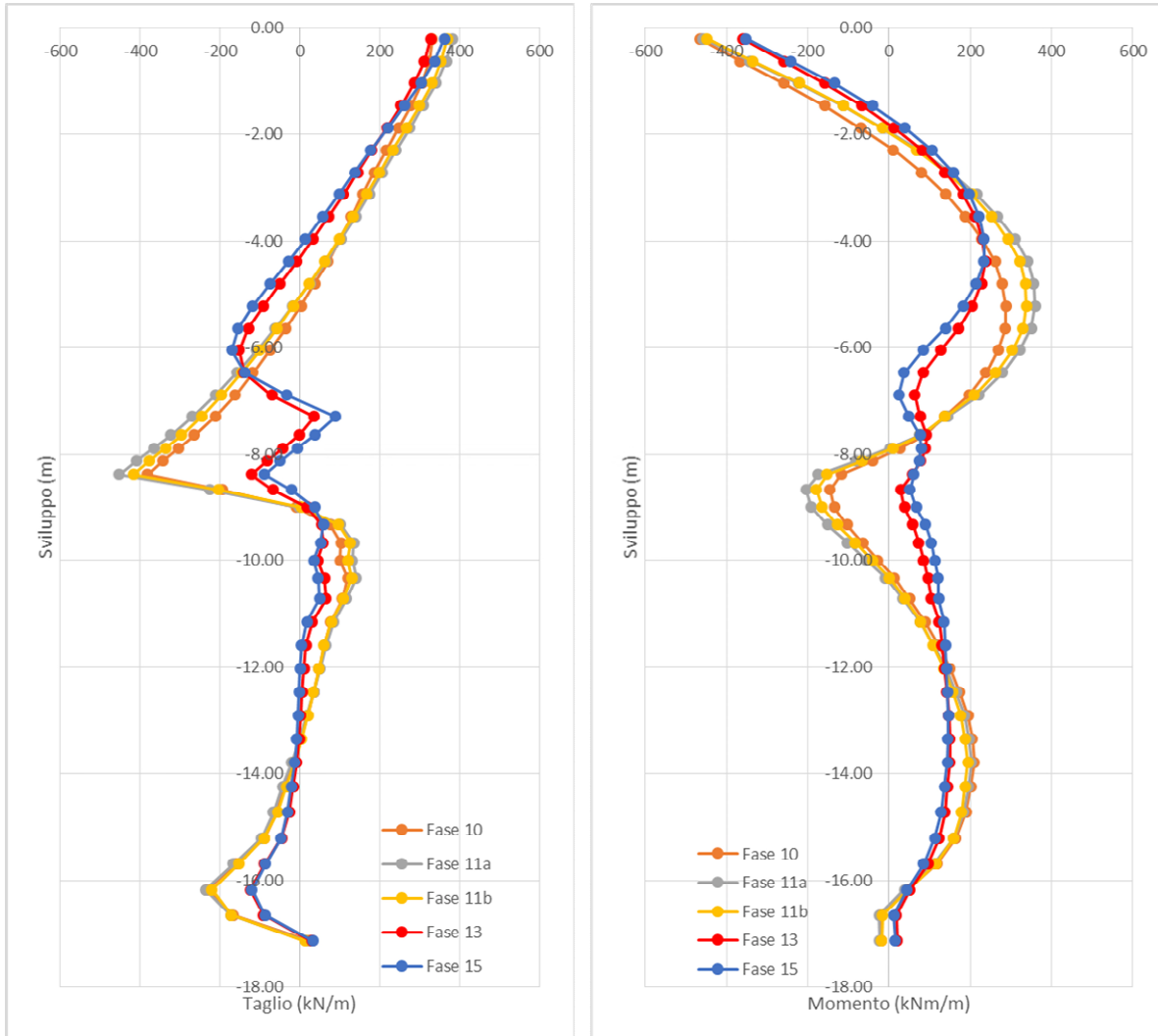


Figura 20 Analisi 1 - vincolo incastro: SLE - Diaframmi di taglio e momento per le fasi di calcolo ritenute più significative.

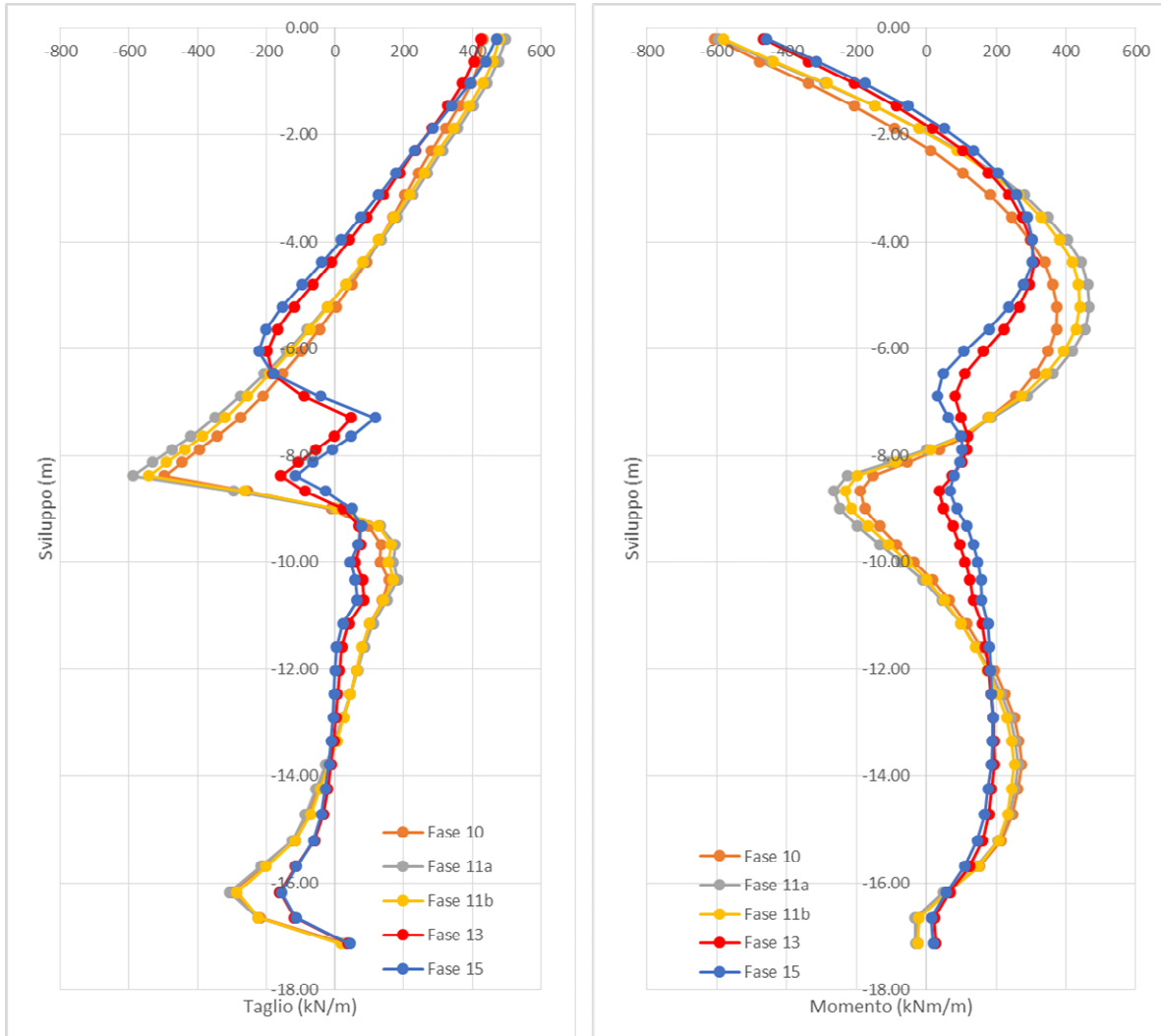


Figura 21 Analisi 1 - vincolo incastro: SLU - Diaframmi di taglio e momento per le fasi di calcolo ritenute più significative.



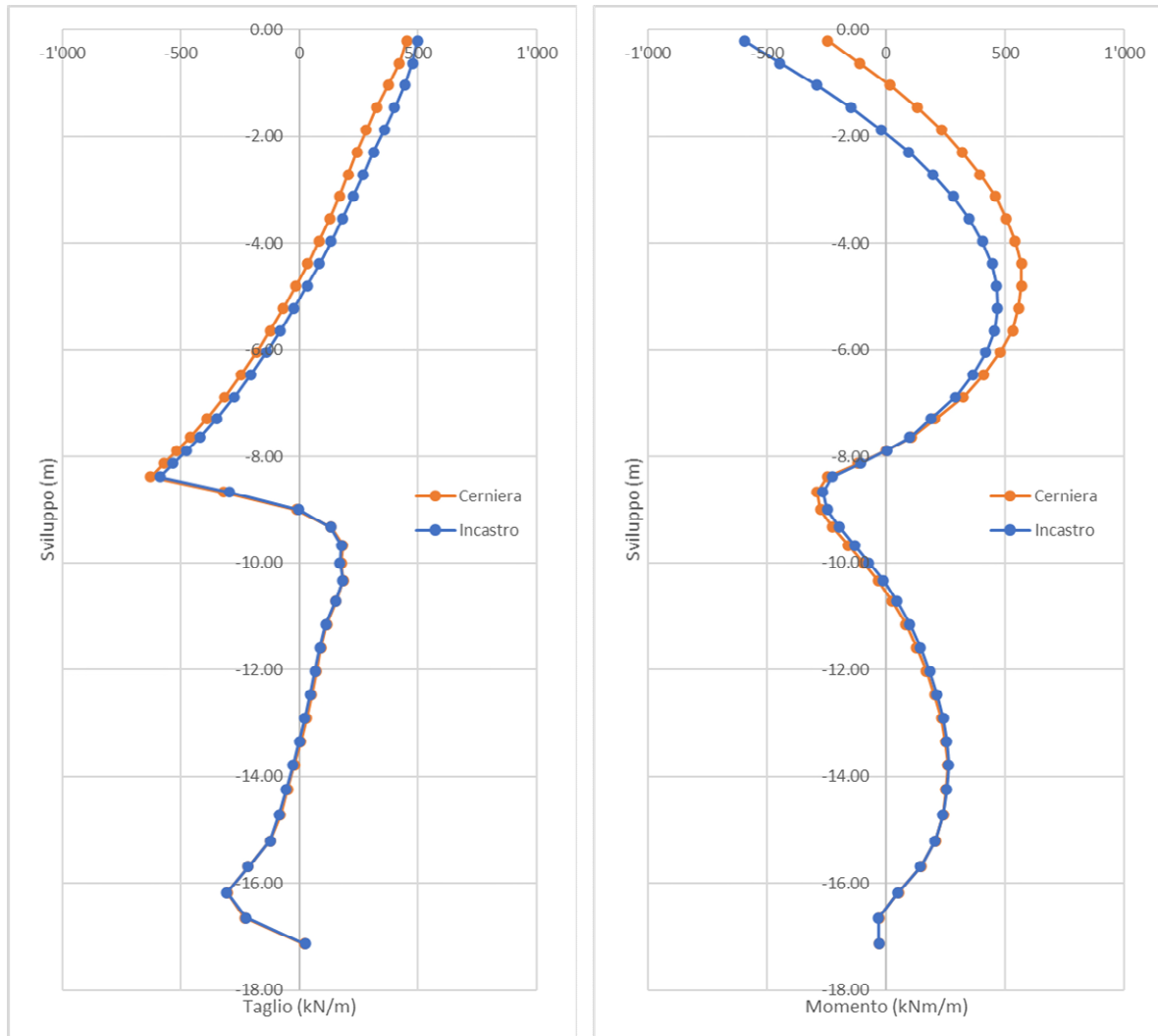


Figura 22 Analisi 1 - SLU: confronto sollecitazioni nella fase di calcolo 11a ottenuti con le due condizioni di vincolo assunte per il nodo diaframma-solettone di copertura.

Dalle valutazioni eseguite è emerso che l'Analisi 2 con vincolo cerniera determina la condizione con maggiori sollecitazioni di momento lungo il diaframma. Nella Figura 23 sono mostrate le sollecitazioni a SLU ottenute nell'Analisi 2 per la condizione di vincolo cerniera. Dal confronto tra la Figura 19 e la Figura 23 è possibile osservare per l'Analisi 2, rispetto all'Analisi 1, un incremento delle sollecitazioni di momento nella parte interessata dallo scavo ed una riduzione in corrispondenza della zona migliorata superiore posta a fondo scavo. Si può quindi affermare che le migliori caratteristiche meccaniche e deformative della zona migliorata, assunte nell'Analisi 1, consentono di dare un contributo favorevole ai diaframmi nel sostenere la spinta delle terre (effetto "puntone").

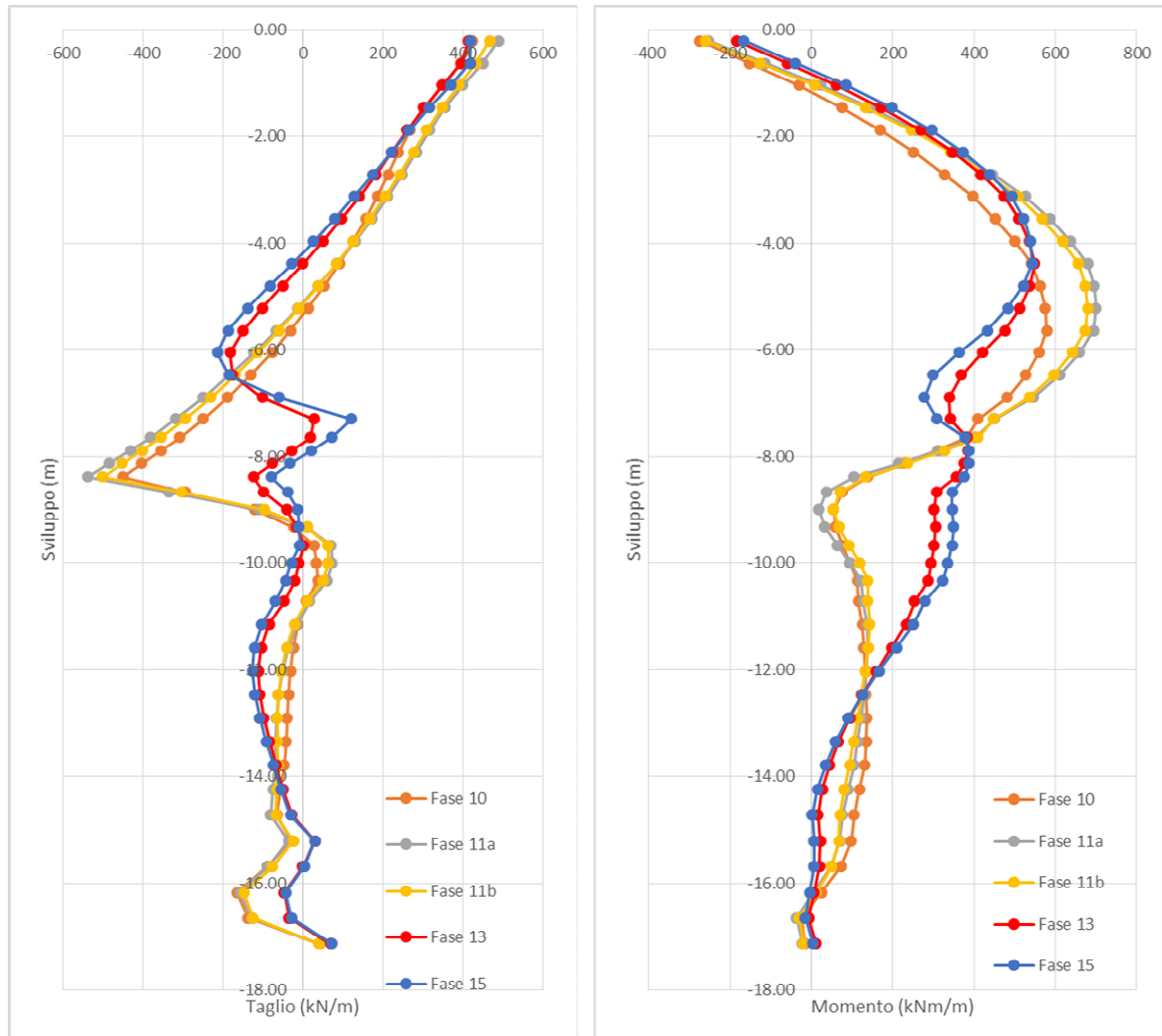


Figura 23 Analisi 2 - vincolo cerniera: SLU - Diaframmi di taglio e momento per le fasi di calcolo ritenute più significative.

#### 6.4.2 Sollecitazioni dovute all'azione sismica

Utilizzando la procedura descritta precedentemente nel paragrafo dedicato alla descrizione dell'azione sismica, si riportano in questo paragrafo i valori numerici degli spostamenti applicati come condizioni di bordo al modello necessari per la generazione della deformazione di taglio richiesta.

<b>GENERAL CONTRACTOR</b> 		<b>ALTA SORVEGLIANZA</b> 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI		Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 39 di 90

Tabella 6: Deformazioni di taglio e spostamenti applicati al modello FLAC.

Strato	ztetto	zletto	zmedio	rd	$\sigma_v$	Go	$\tau_{max}$	$\gamma_{max}$	Spostamento locale laterale	Spostamento applicato	Spostamento applicato
(-)	(m)	(m)	(m)	(-)	(kPa)	(MPa)	(kPa)	(-)	(m)	letto (m)	tetto (m)
Riporto	0	1.5	0.8	0.99	14.3	57	4.8	0.00008	0.0001	0.1403	0.1404
Ghiaia	1.5	13.55	7.5	0.89	143.0	150	43.0	0.00029	0.0035	0.1368	0.1403
Limo	13.55	15.05	14.3	0.79	271.7	57	72.3	0.00127	0.0019	0.1349	0.1368
Sabbia	15.05	31.5	23.3	0.70	442.2	175	104.9	0.00060	0.0099	0.1251	0.1349
Limo	31.5	36.5	34.0	0.70	646.0	57	153.3	0.00268	0.0134	0.1117	0.1251
Sabbia	36.5	100	68.3	0.70	1296.8	175	307.7	0.00176	0.1117	0.0000	0.1117

Nella Figura 24 è mostrato il modello deformato a taglio in seguito all'applicazione come condizioni di bordo degli spostamenti calcolati nella Tabella 6.

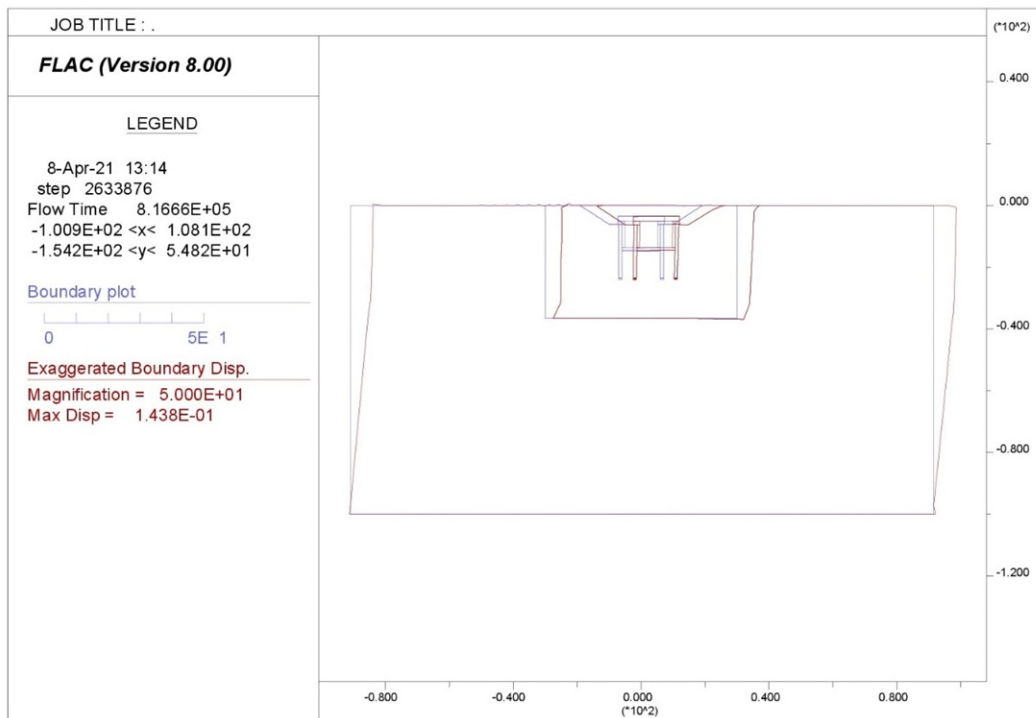


Figura 24 Analisi 1 - SLV – Modello deformato a taglio in seguito all'applicazione della azione sismica in termini di spostamenti orizzontali (vedasi Tabella 6).

Nella Figura 25 e nella Figura 26 è illustrato il confronto delle sollecitazioni ottenute per la fase statica di lungo termine (fase 15) a SLU e per quella successiva dopo l'applicazione dell'azione sismica a SLV (fase 16). Nelle due figure sono mostrate le sollecitazioni di entrambi i diaframmi per la condizione sismica.

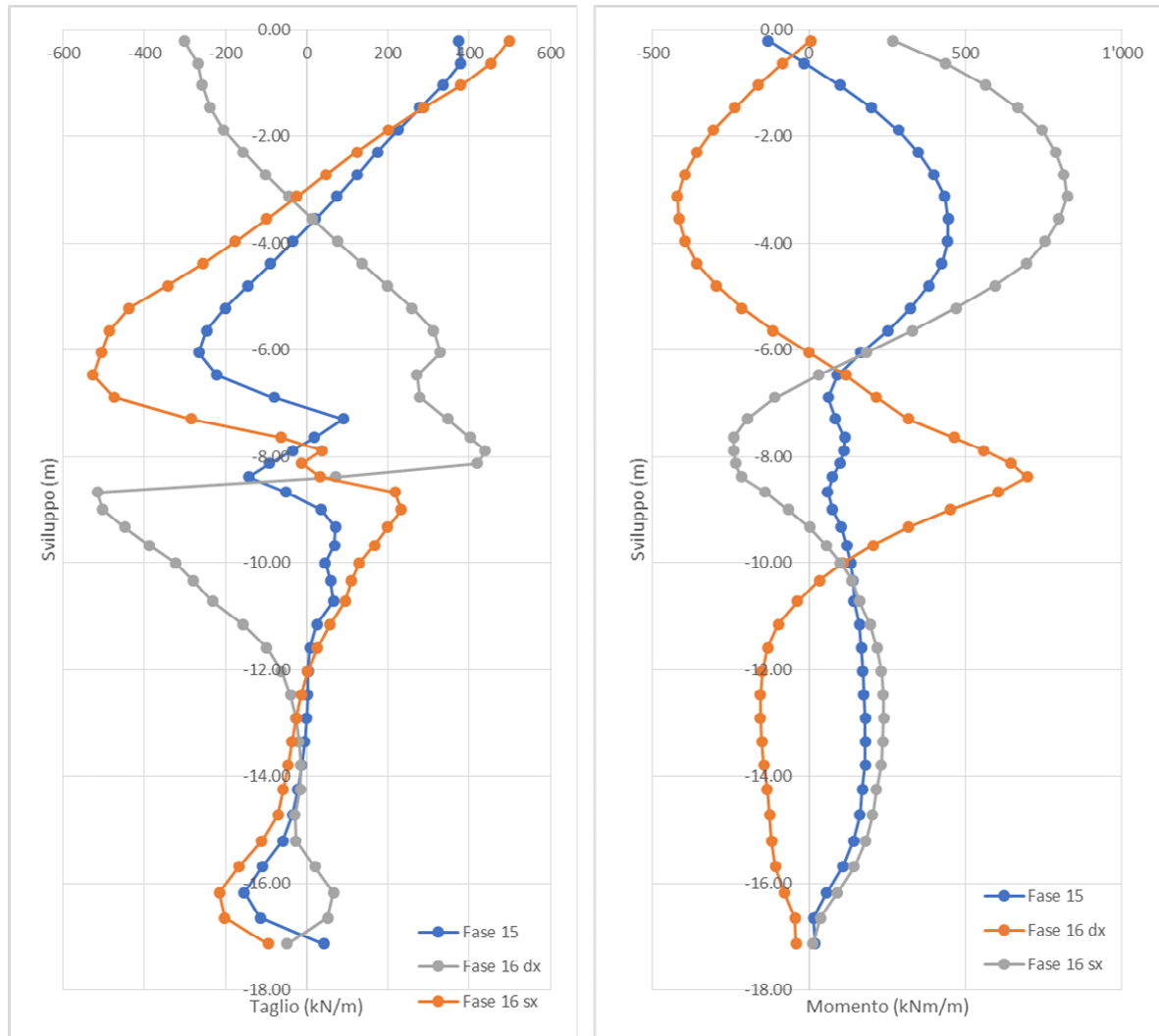


Figura 25 Analisi 1 - vincolo cerniera: SLU-SLV - Diaframmi di taglio e momento per la fase di lungo termine ed in presenza dell'azione sismica.

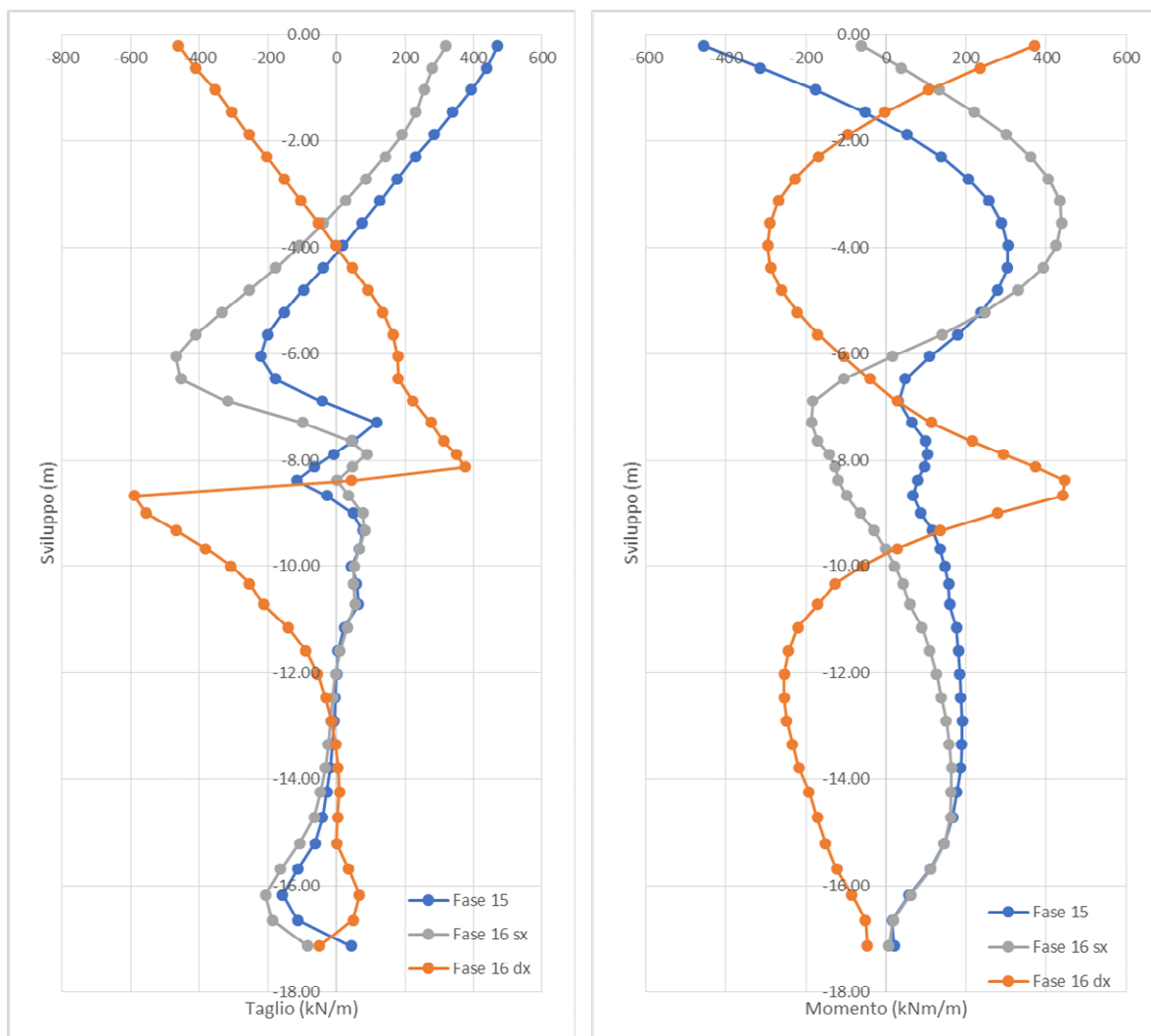


Figura 26 Analisi 1 - vincolo incastro: SLU-SLV - Diaframmi di taglio e momento per la fase di lungo termine ed in presenza dell'azione sismica.

### 6.4.3 Valutazione dell'interazione tra diaframmi e struttura interna a lungo termine

Uno degli obiettivi delle analisi descritte in questo report è la valutazione di dettaglio dell'interazione tra i diaframmi e le strutture interne. Nelle analisi semplificate, eseguite con Paratie Plus, per tenere in conto della presenza nel lungo termine della struttura interna ad U (soletta di fondazione + fodere) si è assunto che la spinta delle terre possa essere ripartita in ragione del rapporto  $r$  tra le rigidzze flessionali degli elementi strutturali posti a contatto. Prendendo come riferimento l'analisi 1, è stata eseguita un'ulteriore fase di calcolo assumendo l'assenza della fodera nel lungo termine e facendo quindi sostenere l'intera spinta delle terre di lungo termine ai soli diaframmi. In questa ultima analisi è stata considerata la sola presenza del solettone di fondazione. Il coefficiente di ripartizione  $r$  è quindi stato definito come segue:

$$S_{C-F} = S_{S-F} \cdot r$$

dove:  $S_{S-F}$  è la sollecitazione di momento o taglio che si origina nel diaframma in assenza della fodera nel lungo termine (fase 15);  $S_{C-F}$  è la sollecitazione, corrispondente alla condizione di diaframma accoppiato con la fodera, ottenuta applicando il coefficiente  $r$ .

Nella Figura 27 sono riportati gli andamenti delle sollecitazioni di taglio e momento limitati all'altezza del diaframma interessata dall'accoppiamento con la fodera per le due condizioni esaminate (con e senza fodera).

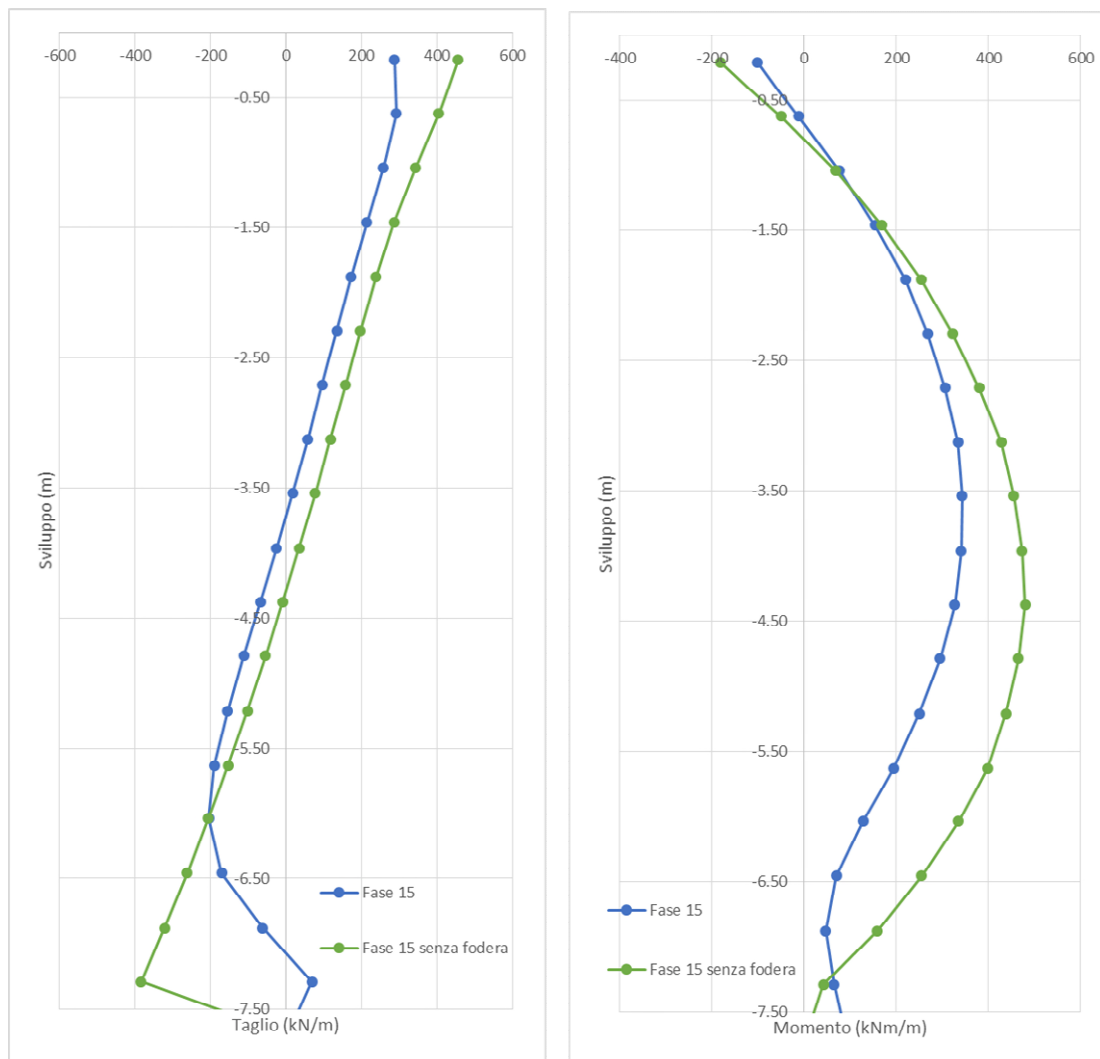


Figura 27 Analisi 1 - vincolo cerniera: SLE – Sollecitazioni nel diaframma per il tratto interessato dalla fodera: assenza e presenza di fodera nel lungo termine (fase 15).

Nella Figura 28 è infine illustrato il confronto tra il momento calcolato con FLAC, originato nel diaframma con il contributo della fodera, e quello ricavato applicando il coefficiente di ripartizione con la procedura descritta in precedenza. Ricordando che il coefficiente di ripartizione utilizzato nella analisi semplificate con Paratie Plus risulta pari a 0.75, si può quindi affermare che tale coefficiente permette di ottenere delle sollecitazioni che sono prossime o comunque superiori ai valori massimi calcolati direttamente con FLAC per il momento flettente e per il taglio.

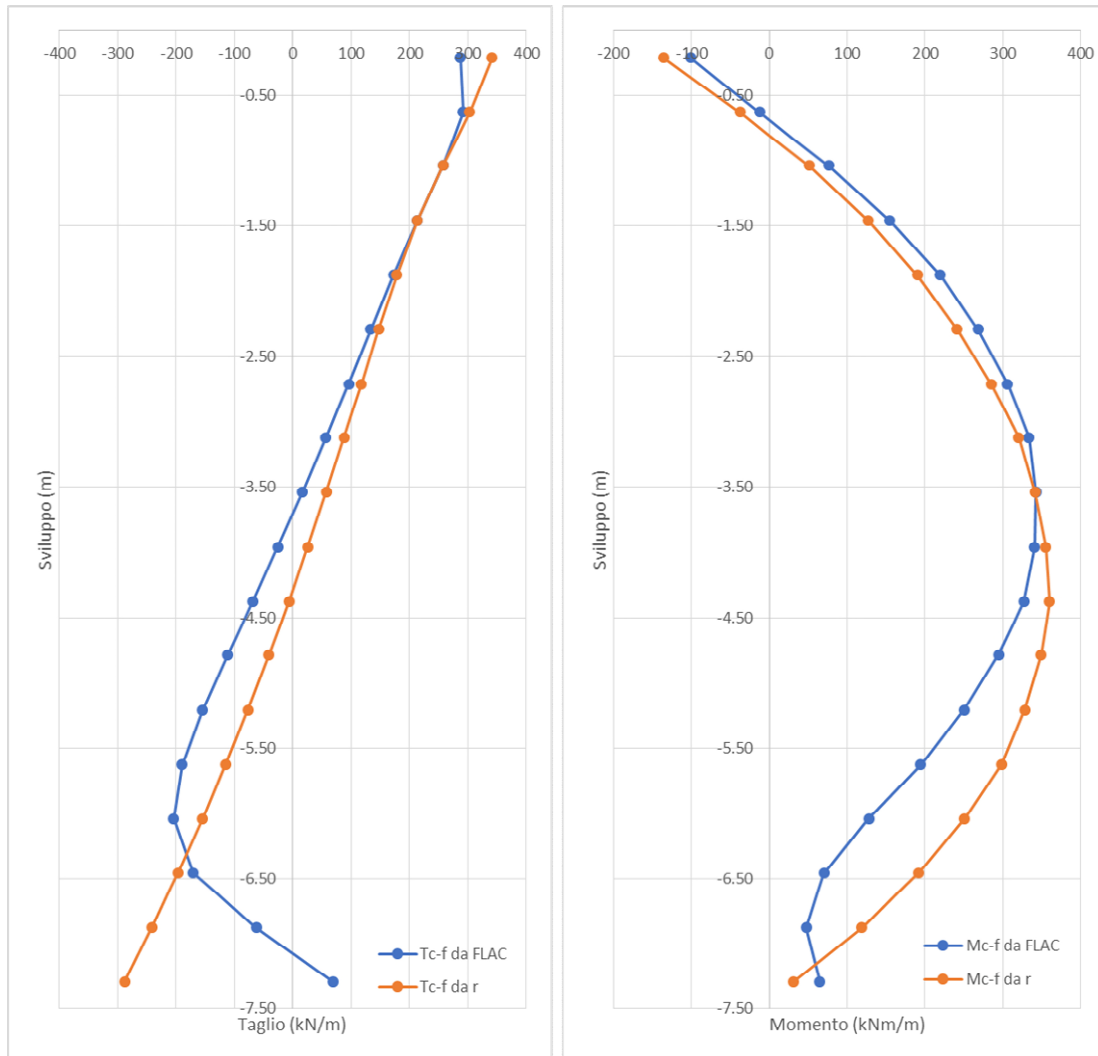


Figura 28 Analisi 1 - vincolo cerniera: SLE – Confronto sollecitazioni ottenute con FLAC e quelle calcolate applicando il coefficiente di ripartizione a partire dalla condizione priva del contributo della fodera (fase 15).

Le medesime considerazioni possono essere fatte per la condizione di vincolo di tipo incastro (Figura 29): anche in questo caso il coefficiente di ripartizione pari a 0.75 consente di rappresentare bene il problema in esame (vedasi Figura 30).



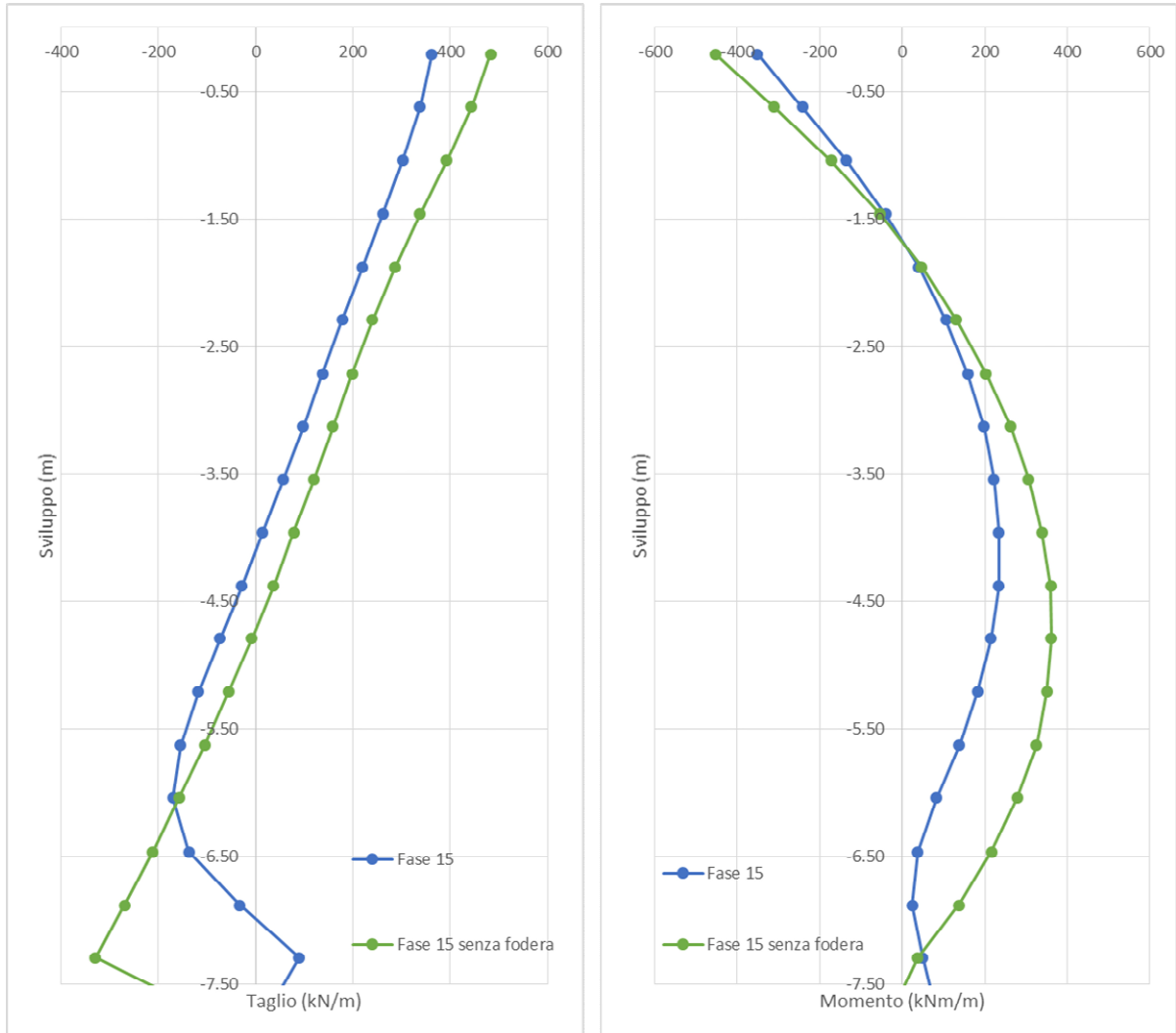


Figura 29 Analisi 1 - vincolo incastro: SLE – Sollecitazioni nel diaframma per il tratto interessato dalla fodera: assenza e presenza di fodera nel lungo termine (fase 15).

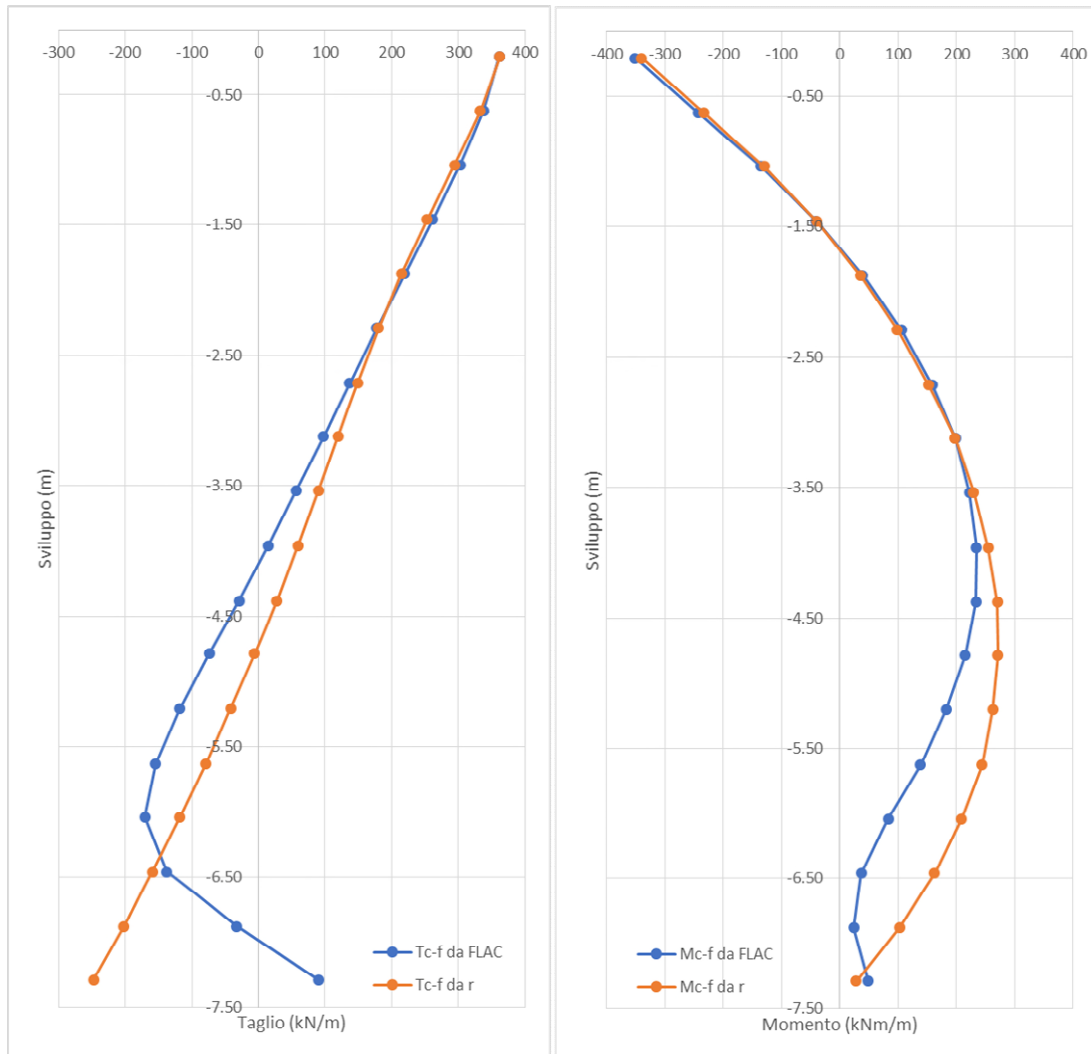


Figura 30 Analisi 1 - vincolo incastro: SLE – Confronto sollecitazioni ottenute con FLAC e quelle calcolate applicando il coefficiente di ripartizione a partire dalla condizione priva del contributo della fodera (fase 15).

## 6.5 Verifiche geotecniche

### 6.5.1 Spostamenti e stabilità del fondo scavo

Come descritto nella relazione IN1711EI2RHGA0100001A relativamente ai criteri di dimensionamento delle opere di sostegno della GA01, la valutazione del corretto comportamento del modello di calcolo è basata sull'esame dei valori di spinta passiva mobilitata al piede della paratia. Il rapporto tra la risultante della spinta passiva e della spinta effettiva nel tratto infisso consente di valutare quanto la struttura disti dalla condizione limite. In combinazione SLU GEO tale rapporto deve essere maggiore o uguale a 1 affinché non sia violato il criterio di resistenza. Nella Tabella 7 sono riassunti le percentuali di spinta passiva mobilitate per le due analisi eseguite per la condizione di incastro (nodo diaframma-solettone di copertura) che risulta la configurazione più gravosa per il problema in esame. Dai risultati si può osservare che la spinta passiva mobilitata si riduce

<b>GENERAL CONTRACTOR</b> 	<b>ALTA SORVEGLIANZA</b> 				
<b>GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI</b>	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 46 di 90

nel lungo termine rispetto alla condizione di breve termine (Fase 11a – fondo scavo con falda a livello di breve termine) grazie all’installazione della struttura ad U interna.

Tabella 7 Coefficienti di mobilitazione della spinta passiva per le due analisi eseguite.

<b>Condizione</b>	<b>Comb.</b>	<b>%Sp (Scavo a quota fondo scavo)</b>	<b>%Sp (Condizione di lungo termine)</b>
TS1 - Analisi 1 (vincolo incastro in copertura)	SLU (A2+M2+R1)	18	10
	SLU Sisma-STR	-	91
TS1 - Analisi 2 (vincolo incastro in copertura)	SLU (A2+M2+R1)	16	9
	SLU Sisma-STR	-	87

I valori degli spostamenti dell’opera di sostegno e del terreno circostante devono essere compatibili con la funzionalità della struttura da realizzare e con quella dei manufatti adiacenti. Nella Figura 31 sono illustrati gli andamenti degli spostamenti allo SLE dei diaframmi nella fase 10 (fondo scavo), nella fase 11a (fondo scavo con falda a livello di breve termine) e nella fase finale di lungo termine (fase 15) per l’analisi più gravosa. È possibile osservare che lo spostamento orizzontale massimo si ottiene nella fase 11a in cui si è ipotizzata la condizione di innalzamento della falda fino al livello di breve termine con lo scavo aperto (senza struttura ad U interna): in questa fase lo spostamento è di circa 2.7 mm. Nella fase finale invece, grazie al contributo della struttura interna, lo spostamento viene essenzialmente mantenuto pur avendo incrementato i carichi agenti.

A conclusione delle verifiche eseguite in questo paragrafo, si può affermare che la percentuale di mobilitazione della spinta passiva per le varie condizioni esaminate conferma i risultati ottenuti con l’approccio semplificato di calcolo impiegato da Paratie Plus. Stesse considerazioni possono essere fatte per gli spostamenti in esercizio.

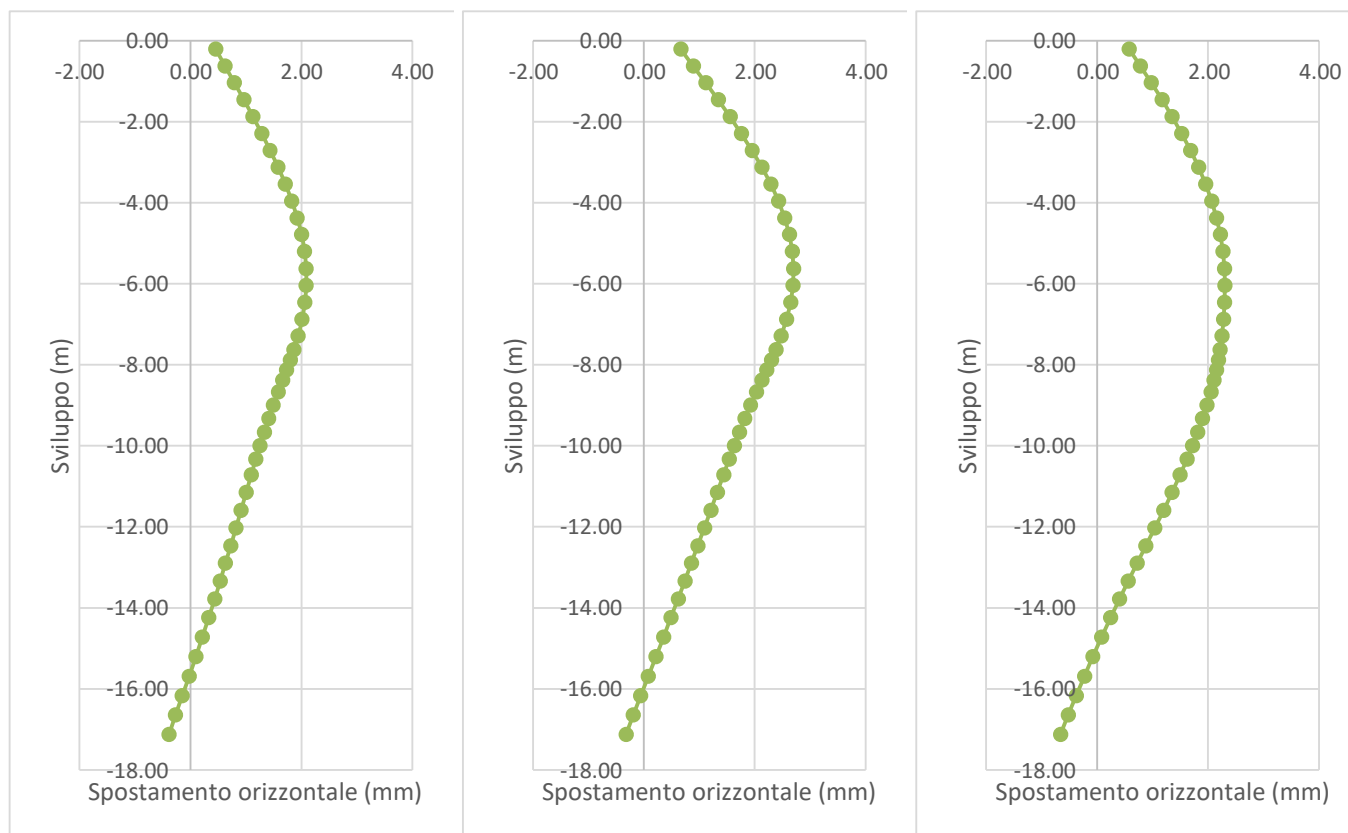


Figura 31 Analisi 2 - vincolo cerniera: SLE – Spostamenti orizzontali del diaframma: fase 10, fase 11a e fase 15 (lungo termine).

### 6.5.2 Verifiche deformazioni/cedimenti attesi

Gli spostamenti orizzontali attesi dei diaframmi sono modesti, sia con schema di cerniera che nel caso di incastro. È presumibile che lo spostamento reale sia più prossimo a quello ottenuto con vincolo cerniera in quanto, a differenza delle analisi semplificate, le strutture sono modellate con i reali spessori e questo influenza sicuramente i risultati.

Nella Figura 32 è mostrato il profilo di subsidenza del piano campagna nella condizione di scavo a quota fondo scavo a partire dal momento della realizzazione dei diaframmi.

Visti gli spostamenti orizzontali dei diaframmi modesti, i cedimenti indotti dallo scavo, risultano trascurabili a circa 30 m dal filo dello scavo. È da tenere in conto che il cedimento è influenzato nel modello anche dal cedimento del materiale costituente il rinterro che viene disposto in seguito alla realizzazione del solettone di copertura.

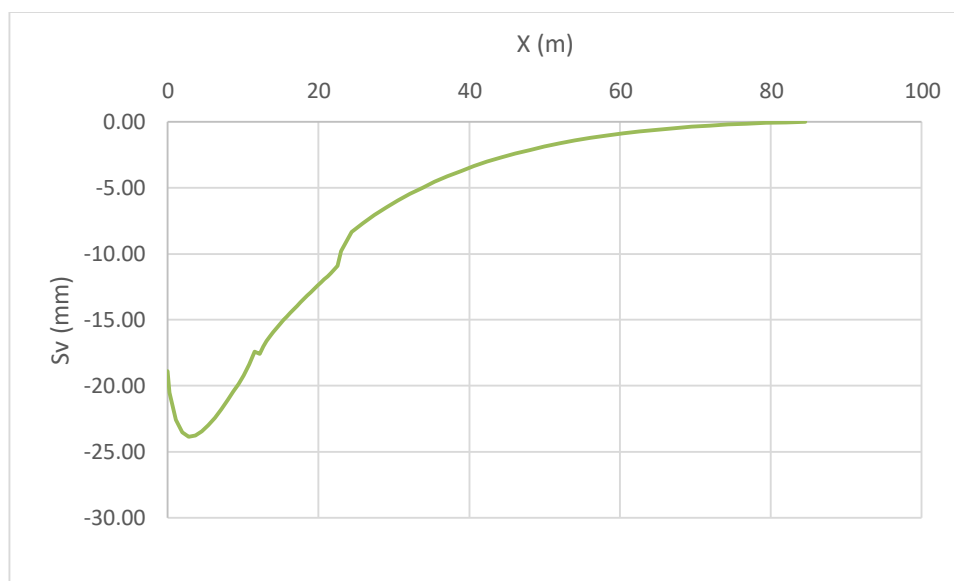


Figura 32 Spostamenti verticali attesi a piano campagna (curva di subsidenza) da filo scavo.

### 6.5.3 Verifiche di stabilità globale

Il calcolo del fattore di sicurezza è stato eseguito applicando la procedura prevista per lo Shear Strength Reduction (SSR) method. È stata quindi progressivamente ridotta la resistenza al taglio (la coesione e l'angolo di resistenza al taglio) dei vari materiali presenti nel modello (aventi legami costitutivi Plastic Hardening model e Mohr Coulomb model) fino ad ottenere la non convergenza dell'analisi. Il coefficiente riduttivo oltre al quale l'analisi non converge rappresenta il fattore di sicurezza alla stabilità globale.

Nella Tabella 8 sono mostrati i fattori di sicurezza relativi alla fase di calcolo più gravosa con falda al livello di breve termine e scavo ancora privo delle strutture interne (fase 11a). Le analisi sono state eseguite assumendo la combinazione A2+M2+R1.

Nella Figura 33 sono mostrati gli spostamenti ottenuti per l'analisi 2 risultata più gravosa rispetto all'analisi 1.

Tabella 8: Fattori di sicurezza alla stabilità globale.

Analisi	Fase di calcolo	F <sub>s</sub>
1	11a (fondo scavo con falda al livello di BT)	2.5
2	11a (fondo scavo con falda al livello di BT)	1.6

<b>GENERAL CONTRACTOR</b> 	<b>ALTA SORVEGLIANZA</b> 				
<b>GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI</b>	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 49 di 90

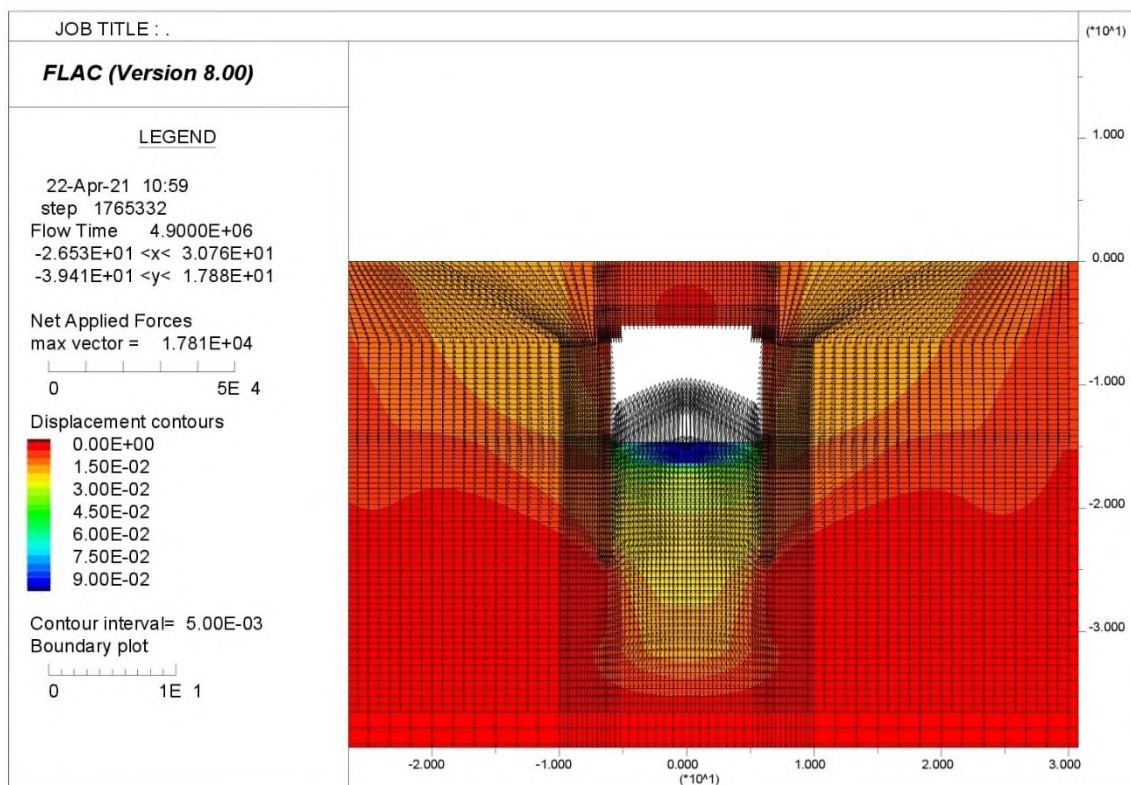


Figura 33 Analisi 2: Andamento spostamenti al termine del calcolo del fattore di sicurezza ( $F_s = 1.6$ ).

È bene evidenziare che la riduzione dei parametri di resistenza non è stata solo applicata ai materiali che rappresentano il terreno, ma anche all'interfaccia diaframma-terreno.

#### 6.5.4 Verifiche di stabilità del fondo scavo al galleggiamento

I fattori di sicurezza ottenuti applicando i modelli di calcolo semplificati - descritti nelle relazioni di calcolo delle singole WBS di riferimento considerando la sottospinta per la falda di breve termine in assenza di interventi di stabilizzazione del battente idraulico nel caso di ricarica improvvisa dell'acquifero - sono prossimi all'unità e, quindi, hanno determinato la necessità di un approfondimento delle analisi mediante modellazione numerica.

Per metodi generali di verifica si rimanda alla relazione IN1711EI2RHGA0100001A relativa ai criteri di dimensionamento delle opere di sostegno della GA01.

La quota di riferimento della falda considerata nelle analisi descritte in questo paragrafo è quella della fase di breve termine.

Secondo quanto indicato nel paragrafo §6.2.3.2 delle NTC2008 (Verifiche nei confronti degli stati limite ultimi idraulici) per la stabilità al sollevamento deve risultare che il valore di progetto dell'azione instabilizzante,  $V_{inst,d}$ , combinazione di azioni permanenti ( $G_{inst,d}$ ) e variabili ( $Q_{inst,d}$ ), sia non maggiore della combinazione dei valori di progetto delle azioni stabilizzanti ( $G_{stb,d}$ ) e delle resistenze ( $R_d$ ):

$$V_{inst,d} \leq G_{stb,d} + R_d \quad \text{dove } V_{inst,d} = G_{inst,d}$$

<b>GENERAL CONTRACTOR</b> 	<b>ALTA SORVEGLIANZA</b> 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 50 di 90

I coefficienti parziali sulle azioni sono indicati nella Tab. 6.2.III e devono essere opportunamente combinati con quelli relativi ai parametri geotecnici (M2).

Le azioni stabilizzanti (Gstb,d) sono il peso proprio del tampone e dell'eventuale terreno sovrastante mentre fanno parte delle resistenze il contributo legato all'attrito sviluppato all'interfaccia tra tampone e diaframma.

Si è proceduto quindi a calcolare il fattore di sicurezza al galleggiamento valutato rispetto alla base del tampone sandwich (-9m dal piano di fondo scavo (32.52m s.l.m.)). A tale scopo le grandezze da determinare sono le seguenti:

- Azioni stabilizzanti tramite integrazione sulla lunghezza che separa i due diaframmi delle tensioni verticali totali alla quota di -9m dal fondo scavo;
- Resistenze ottenute dall'integrazione delle azioni di taglio valutate lungo l'interfaccia diaframma-terreno;
- Azioni instabilizzanti calcolate integrando, sulla distanza tra i due diaframmi, le pressioni interstiziali.

Per valutare approfonditamente la stabilità del fondo scavo, secondo quanto indicato in precedenza, le analisi FLAC sono state eseguite con le seguenti assunzioni:

- a) falda al livello di breve termine con incremento del peso di volume dell'acqua di un coefficiente pari a 1.1, contemporanea riduzione del peso del materiale stabilizzante (jet grouting e terreno non trattato al di sopra del tampone di fondo) per un coefficiente pari a 0.9 e riduzione parametri di resistenza del terreno mediante i coefficienti M1;
- b) stesse ipotesi del punto precedente ma con riduzione dei parametri di resistenza del terreno mediante i coefficienti M2.

Ciascuna delle due precedenti condizioni è stata esaminata per le seguenti due diverse combinazioni di permeabilità delle due zone trattate con jet-grouting:

1. Jet-grouting avente le migliori caratteristiche meccaniche ipotizzate ( $c'=1000\text{kPa}$ ,  $\phi'=38^\circ$ ,  $E'=2500\text{MPa}$ ) e permeabilità pari a  $k=5\text{e-}7\text{ m/s}$  per la zona migliorata inferiore e  $k=1\text{e-}6\text{ m/s}$  per la zona migliorata superiore;
2. Jet-grouting avente le peggiori caratteristiche meccaniche ipotizzate ( $c'=400\text{kPa}$ ,  $\phi'=27^\circ$ ,  $E'=750\text{MPa}$ ) e permeabilità pari a  $k=1\text{e-}6\text{ m/s}$  per entrambi le zone.



<b>GENERAL CONTRACTOR</b> 	<b>ALTA SORVEGLIANZA</b> 				
<b>GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI</b>	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 51 di 90

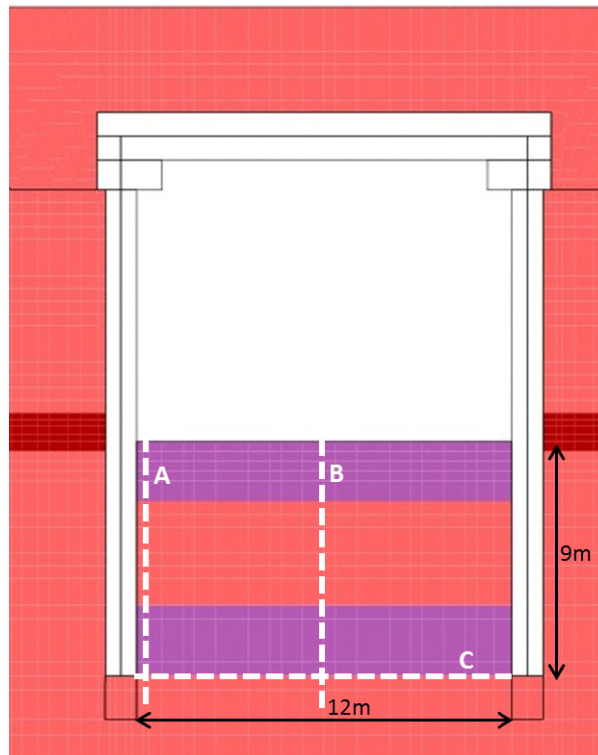
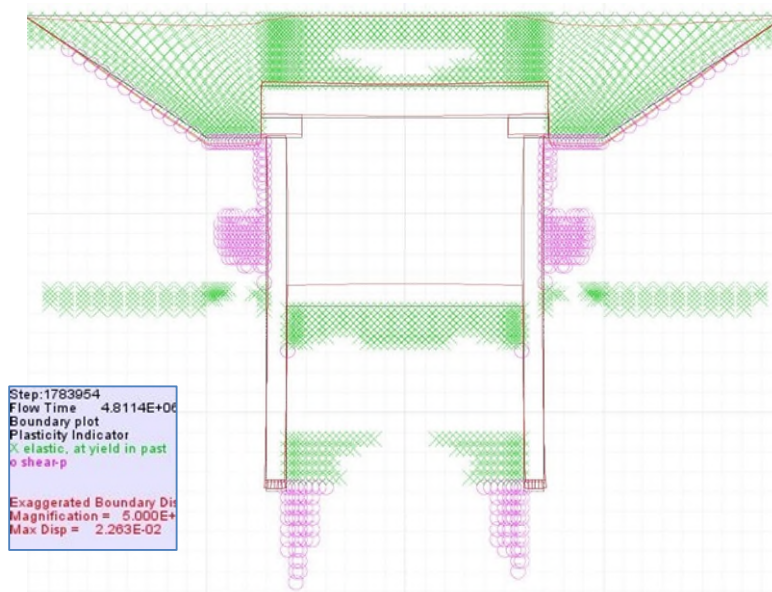


Figura 34 Sezioni prese come riferimento nelle analisi di stabilità del fondo scavo eseguite con FLAC.

Nelle figure seguenti si riportano la deformata del fondo scavo e le zone plasticizzate per le analisi 1b e 2b. È possibile osservare che in tutti i casi analizzati le modellazioni hanno mostrato il raggiungimento delle condizioni di stabilità del fondo senza mostrare sollevamenti o plasticizzazioni significative del fondo scavo.



(a)

<b>GENERAL CONTRACTOR</b> 	<b>ALTA SORVEGLIANZA</b> 				
<b>GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI</b>	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 52 di 90

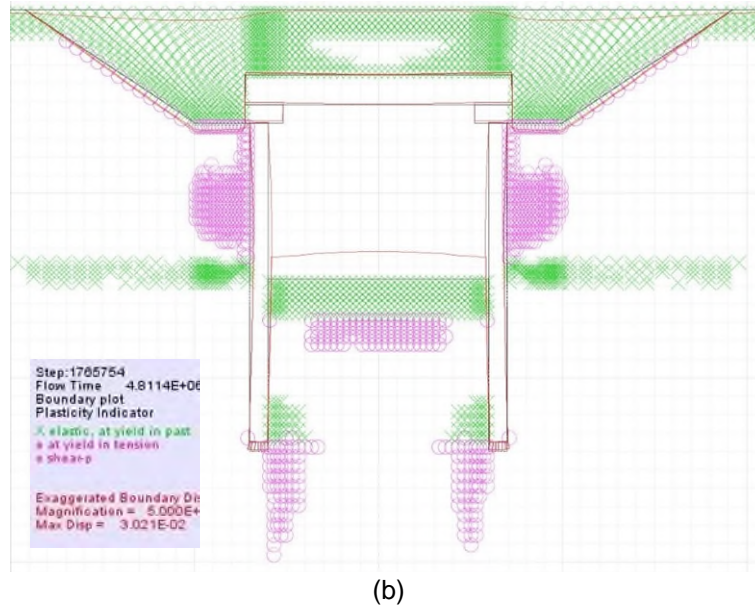


Figura 35 Zone plasticizzate e deformazioni del fondo scavo: (a) Analisi 1b (massimo sollevamento fondo scavo 2.26 cm); (b) Analisi 2b (massimo sollevamento fondo scavo 3.02 cm).

Poiché i modelli di calcolo convergono tutti senza plasticizziamone evidenti, applicando il fattore 0.9 ai pesi stabilizzanti e 1.1 ai valori di spinta idraulica, le verifiche di norma sono certamente soddisfatte e il fattore di sicurezza reale è quindi dato almeno dal rapporto  $1.1/0.9 = 1.22$ .

Nella successiva Tabella 9. sono riportati i fattori di sicurezza ottenuti per i vari scenari descritti in precedenza, calcolati convenzionalmente come rapporto tra tensione verticale stabilizzate e pressione idrostatica instabilizzante alla base del trattamento, letti dai modelli stessi. Nelle ultime due righe della tabella i fattori di sicurezza al galleggiamento sono stati ottenuti rieseguendo l'analisi più gravosa (analisi 2) e riducendo di tre metri il rinterro sul solettone di copertura (nella Figura 41 è mostrata un'immagine del modello) in modo tale da studiare gli effetti di un minor confinamento laterale dei diaframmi (indotto per esempio da una altezza di scavo minore o da un ritombamento del solettone posticipato rispetto allo scavo).

Tabella 9: Fattori di sicurezza al galleggiamento.- analisi numeriche

<b>Riferimento: base tampone sandwich -9m da fondo scavo</b>		
<b>Analisi</b>	<b>Parametri</b>	<b>F<sub>s</sub></b>
<b>1a</b>	M1	1.37
<b>1b</b>	M2	1.34
<b>2a</b>	M1	1.30
<b>2b</b>	M2	1.31
<b>2a_bis</b>	M1	1.20
<b>2b_bis</b>	M2	1.23

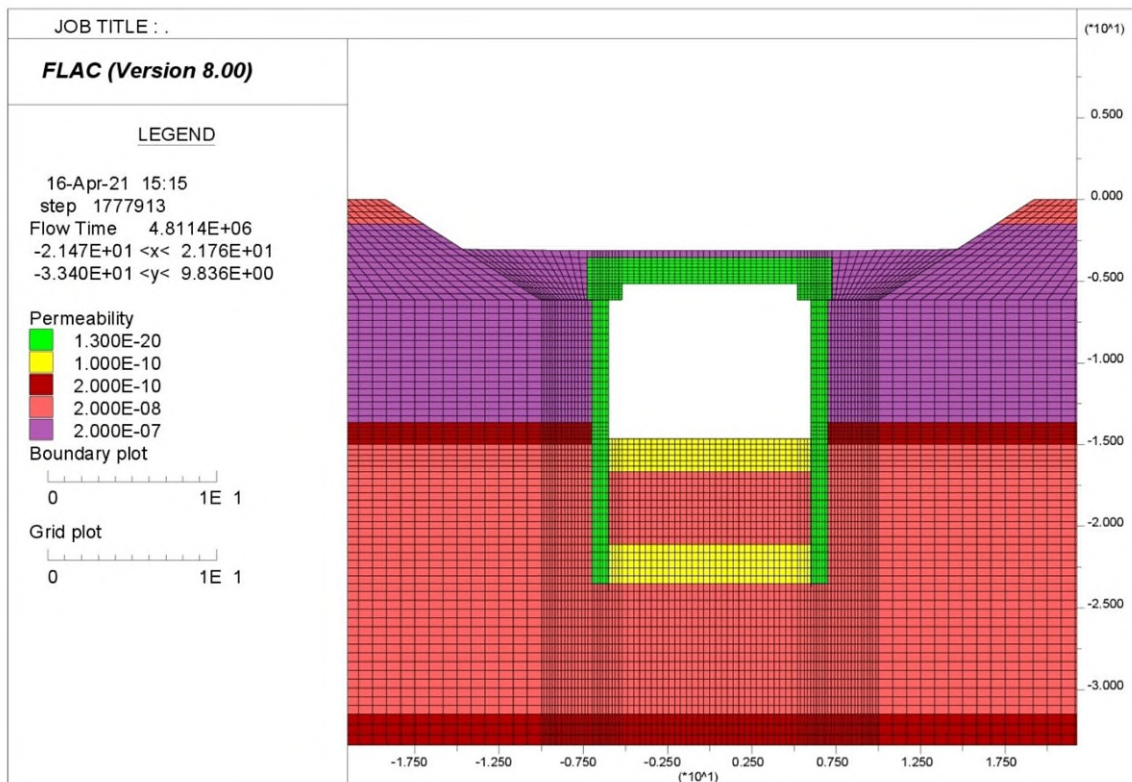


Figura 36 Modello FLAC dell'Analisi 2\_bis eseguita però con un rinterro inferiore di 3m rispetto al piano campagna.

Il fattore di sicurezza della soluzione di progetto appare quindi superiore a quello calcolabile con metodi semplificati in tutti i casi analizzati. E' sicuramente di interesse comprendere le ragioni della sovra-resistenza osservata.

Si sono svolte, quindi, una serie di analisi e considerazioni sui risultati ottenuti per comprendere le ragioni della risposta positiva del sistema ai carichi imposti, che qui di seguito si riassumono in forma sintetica.

E' utile, anzitutto, notare che nella soluzione proposta la stabilità al sollevamento in assenza di coefficienti di fattorizzazione e falda di breve termine è prossima all'equilibrio statico. Infatti, prendendo a riferimento il massimo battente idraulico (sezione TS1) si ottiene:

$$F_s = \frac{\gamma_{sat} \cdot h \cdot L}{\gamma_w \cdot h_w \cdot L} = \frac{20 \cdot 9 \cdot 12}{9.81 \cdot 19.5 \cdot 12} = 0.94$$

Il contributo stabilizzante dovuto alla formazione di un arco resistente al di sotto del fondo scavo è quindi sfruttato in larga misura per l'ottenimento del fattore di sicurezza 1.1/0.9 previsto dalla normativa. Si evidenzia che tale fattore di sicurezza è applicato ad una condizione limite, nella quale la falda si porta circa 2.5 m al di sopra del livello di riferimento il quale a sua volta corrisponde al livello medio reale di falda + 0.5 m.

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 54 di 90

Prendendo in considerazione la prima combinazione di permeabilità con parametri di resistenza ridotti M2 (analisi 1b), si riporta nel seguito il dettaglio del calcolo delle azioni stabilizzanti, resistenze ed azioni instabilizzanti:

- *Azioni stabilizzanti:* nelle analisi eseguite con il codice di calcolo FLAC si può osservare che la tensione totale alla base del tampone sandwich non è solo data dal contributo del peso proprio del tampone stesso e del terreno sovrastante ma anche da un ulteriore contributo legato all'effetto arco che si origina in seguito all'esecuzione dello scavo. Questo effetto determina la formazione di un arco compresso all'interno del tampone tale da ridurre lo scarico tensionale e quindi le tensioni totali verticali lungo la base del tampone sono superiori al contributo del solo peso, come si può osservare nella Figura 37. L'effetto arco si origina grazie all'attrito presente all'interfaccia tra diaframma e terreno e per questo motivo sono state eseguite le analisi sia con i parametri di resistenza ridotti M2 che con i parametri caratteristici. Nella Figura 38 è riportato l'andamento delle tensioni principali e delle relative direzioni in cui si può ben osservare l'effetto arco che si origina sia nella zona migliorata superiore che in quella inferiore (questa ultima interessa anche parte del terreno tra le due zone migliorate).

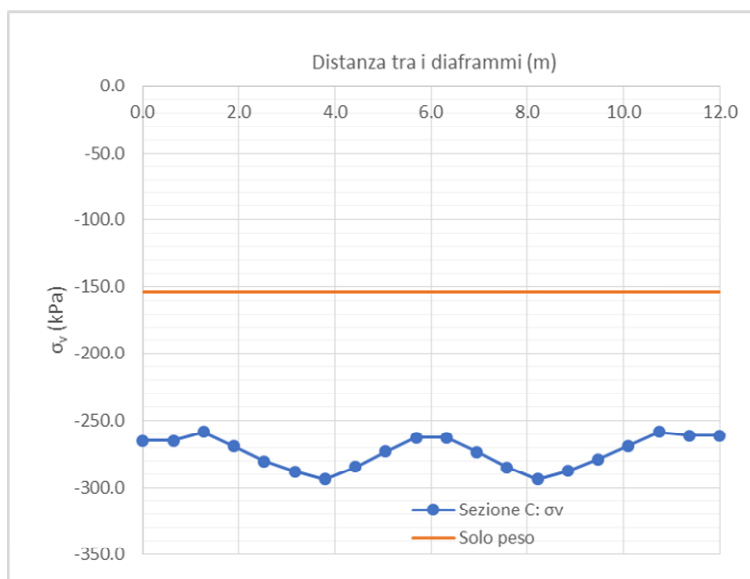


Figura 37 Analisi 1b: andamento delle tensioni verticali totali alla quota di base del tampone per tutta la sua estensione tra i due diaframmi (lungo sezione C di Figura 34).



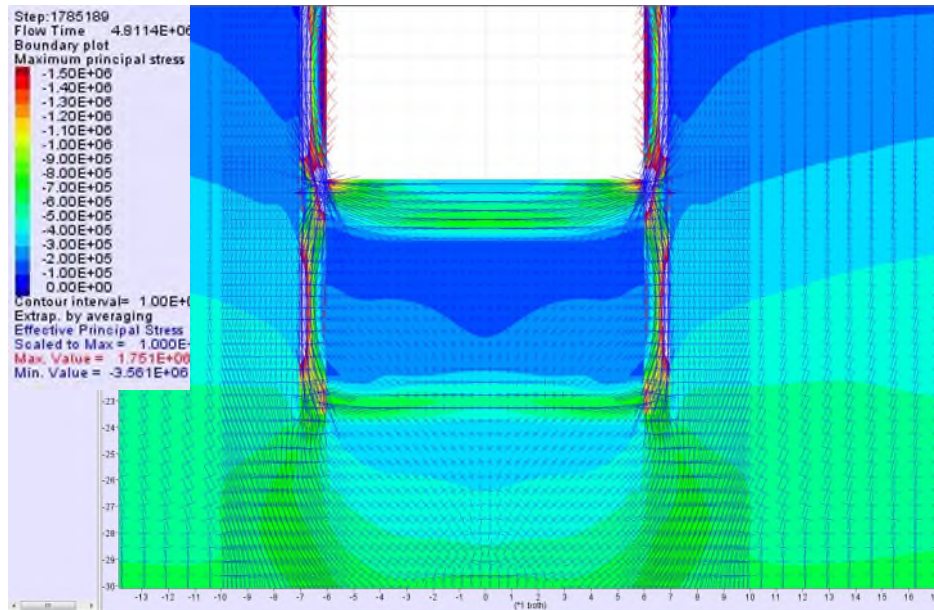


Figura 38 Analisi 1b: andamento tensioni principali nella zona del tampone sandwich.

- **Resistenze:** come indicato in precedenza la resistenza legata all'attrito all'interfaccia diaframma-terreno (Sezione A di Figura 34) è data dall'integrazione delle tensioni tangenziali lungo le due interfacce terreno-diaframma. Nella Figura 39 è illustrato per una delle due interfacce l'andamento delle tensioni tangenziali. È interessante osservare l'incremento delle tensioni tangenziali in corrispondenza delle due zone migliorate (tra 0.0-2.0 m e tra 7.5-9.0m) proprio dove si scarica l'arco compresso che si origina nelle due zone migliorate. Anche riducendo il confinamento laterale, non si raggiunge instabilità del fondo e si osserva solo una lieve riduzione del coefficiente di sicurezza, come logico attendersi.

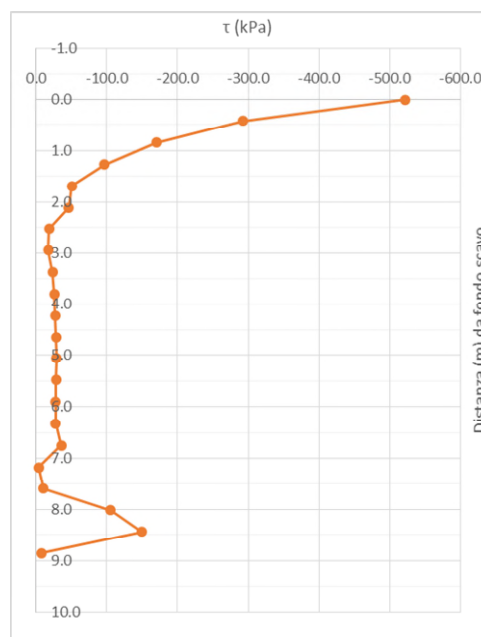


Figura 39 Analisi 1b: andamento delle tensioni tangenziali lungo una delle due interfacce diaframma-terreno (lungo sezione A di Figura 34).

<b>GENERAL CONTRACTOR</b> 		<b>ALTA SORVEGLIANZA</b> 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI		Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 56 di 90

- *Azioni instabilizzanti:* la spinta dovuta all'acqua è stata infine determinata integrando le pressioni interstiziali valutate alla base del tampone e quindi a -9.0 m da fondo scavo. Nella Figura 40 è illustrata la distribuzione delle pressioni interstiziali nel modello e lungo la sezione verticale B (vedasi Figura 34) passante per la mezzera del tampone sandwich. Si osserva una maggiore riduzione delle pressioni generate dalla filtrazione nello strato di base più impermeabile.

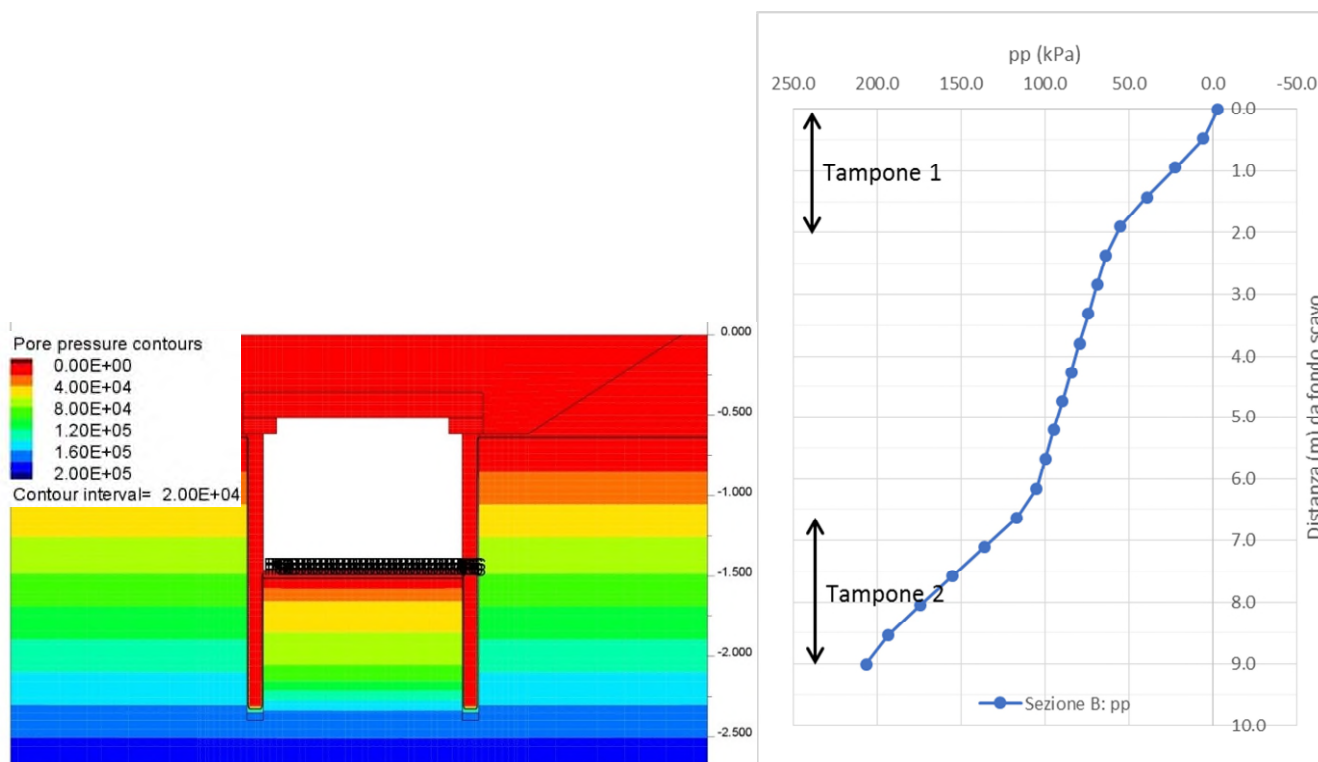


Figura 40 Analisi 1b: andamento pressioni interstiziali: vista di insieme e profilo verticale lungo sezione B (vedasi Figura 34).

Si osserva la riduzione delle pressioni generate dalla filtrazione nello strato di base più impermeabile. Le variazioni di permeabilità del trattamento - anche con parametri di resistenza del trattamento ridotti e minimo confinamento - riducono i fattori di sicurezza che appaiono comunque in tutti i casi superiori a quelli previsti con i metodi di calcolo semplificati.

### 6.5.5 Stima delle portate entranti al variare dei coefficienti di permeabilità del tampone di fondo

Nelle analisi mediante i modelli numerici completi bidimensionali sviluppati con il programma FLAC le portate sono calcolate sulla base della ricostruzione del reticolo di filtrazione.

Nel caso in esame in condizioni drenate la falda è stata simulata mediante l'introduzione di una superficie piezometrica libera, alle quote di progetto sopra indicate. L'effetto di drenaggio prodotto dall'abbassamento dello scavo (simulato attivando le condizioni di flusso attraverso il fondo scavo). I diaframmi laterali sono considerati come frontiera impermeabile.



<b>GENERAL CONTRACTOR</b> 		<b>ALTA SORVEGLIANZA</b> 				
<b>GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI</b>		Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 57 di 90

In questo modo è possibile ricostruire il reticolo di flusso nell'intera griglia di calcolo e quindi risalire non solo ai valori efficaci delle tensioni nel terreno in ogni punto, ma anche ai gradienti di efflusso e quindi alle velocità in ogni punto sulla frontiera di efflusso. Integrando le velocità di efflusso si ottiene la portata entrante all'interno dello scavo. Nella Figura 41 è mostrato un esempio della distribuzione delle pressioni interstiziali e dei vettori di flusso ottenuti nell'analisi 2.

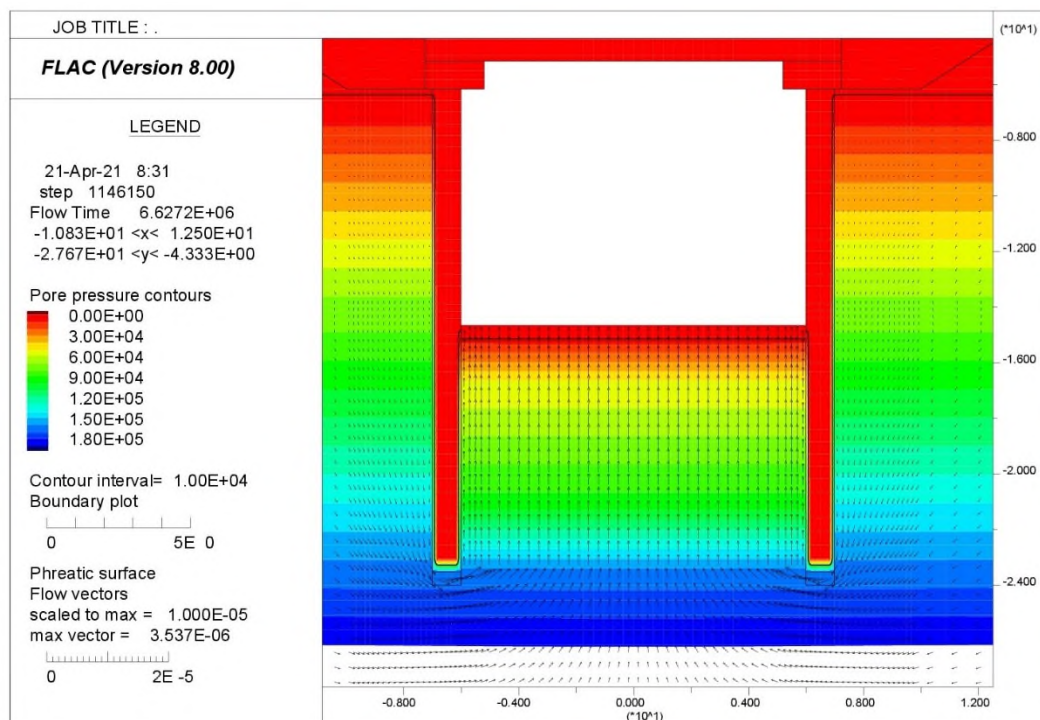


Figura 41 Analisi 2: distribuzione delle pressioni interstiziali e dei vettori di flusso.

Per le due analisi eseguite, caratterizzate da permeabilità differenti, si sono ottenuti i seguenti valori di portata  $q$  entrante nello scavo valutati per metro di estensione longitudinale:

- Analisi 1 (con permeabilità della zona migliorata inferiore di  $k = 5e-7$  m/s e permeabilità della zona superiore di  $k = 1e-6$  m/s)  $\rightarrow q = 4.875e-5$  m<sup>3</sup>/s/m = 175.5 l/h/m;
- Analisi 2 (con permeabilità di entrambi le zone migliorate pari a  $k = 1e-6$  m/s)  $\rightarrow q = 5.466e-5$  m<sup>3</sup>/s/m = 196.8 l/h/m.

La valutazione delle portate è stata fatta considerando il livello di falda al livello di costruzione. Tali risultati sono compresi nel range di portate valutato con i metodi semplificati.

<b>GENERAL CONTRACTOR</b> 	<b>ALTA SORVEGLIANZA</b> 				
<b>GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI</b>	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento E12 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 58 di 90

## 7 VERIFICHE SEZIONE TA

I diaframmi dimensionati con tale sezione sono previsti nella WBS GA01-A, per la quale si è considerata la sezione con massimo battente idraulico. I diaframmi sono lunghi 14.8m da quota testa paratia.

### 7.1 Geometria, dati di ingresso del modello ed ipotesi

I parametri geotecnici di resistenza e deformabilità delle unità sono i medesimi di quelli indicati nella Tabella 2 nel capitolo relativo all'analisi della sezione TS1.

La stratigrafia assunta è riportata nella Figura 42 mentre la vista di insieme del modello FLAC ed il particolare in corrispondenza delle opere oggetto della presente relazione sono illustrate nella Figura 43 e nella Figura 44.

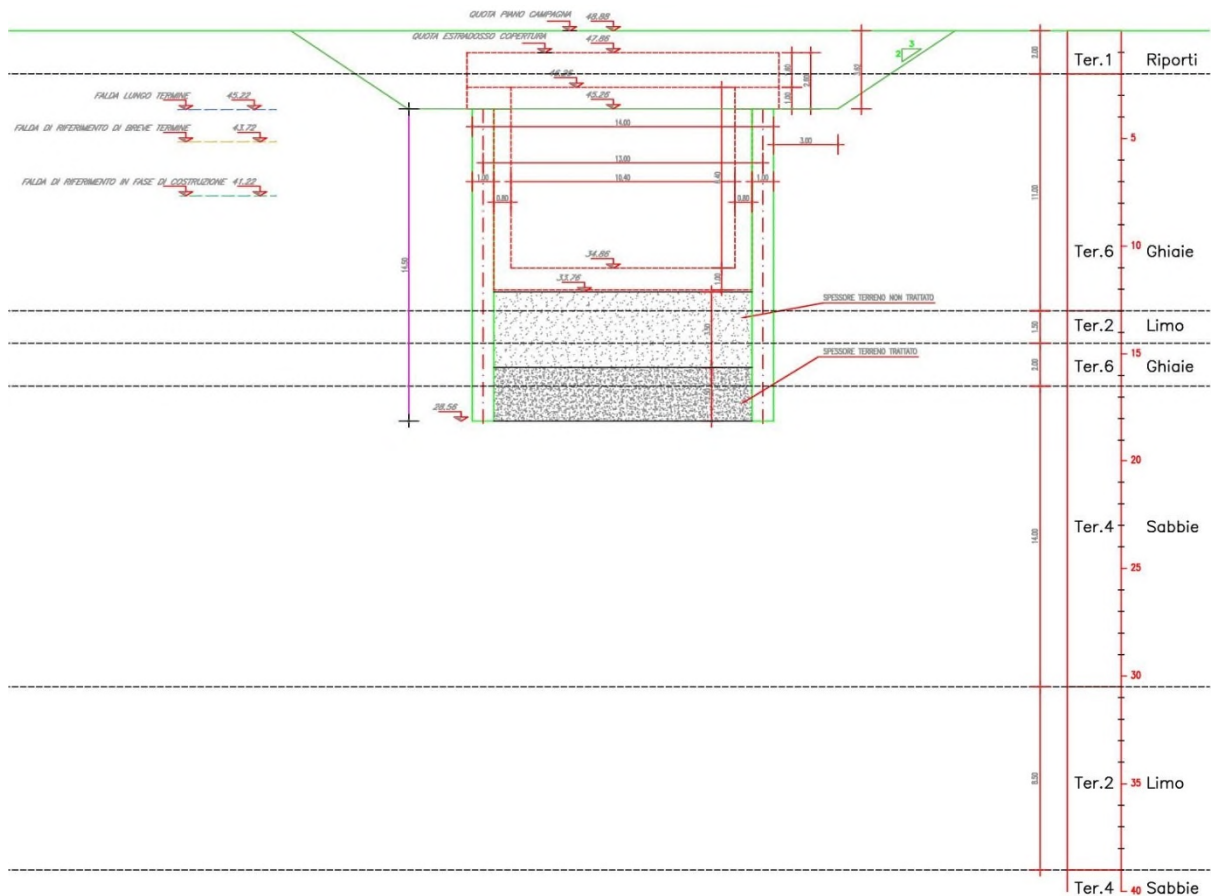


Figura 42 Sezione TA: stratigrafia di riferimento per la modellazione numerica.

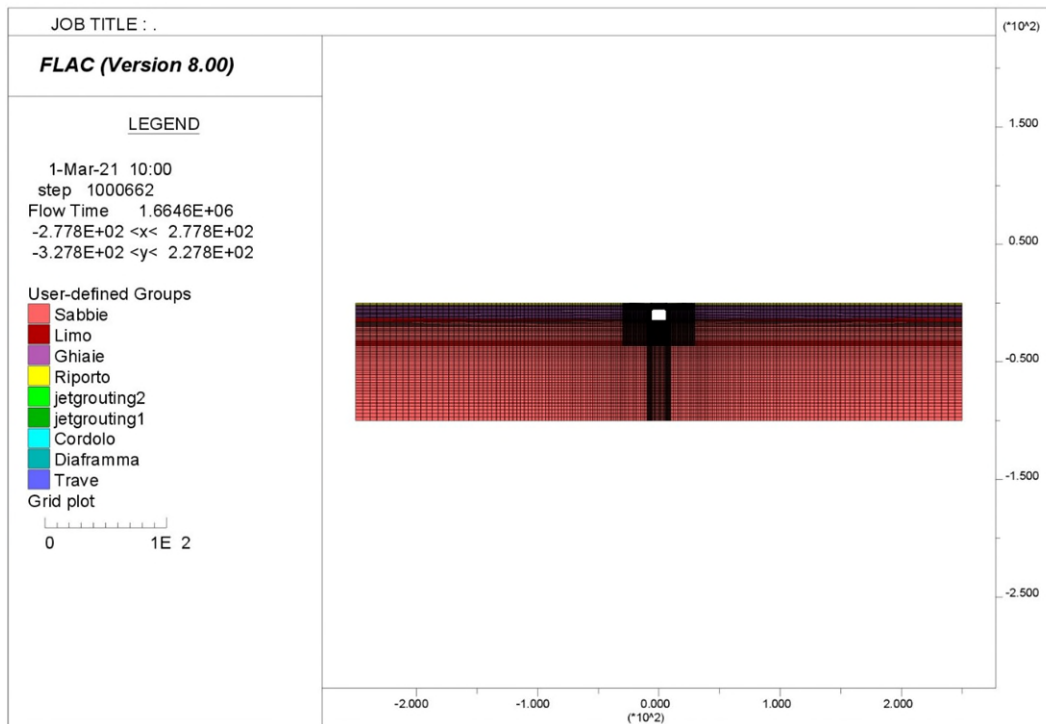


Figura 43 Sezione TA: vista di insieme del modello FLAC.

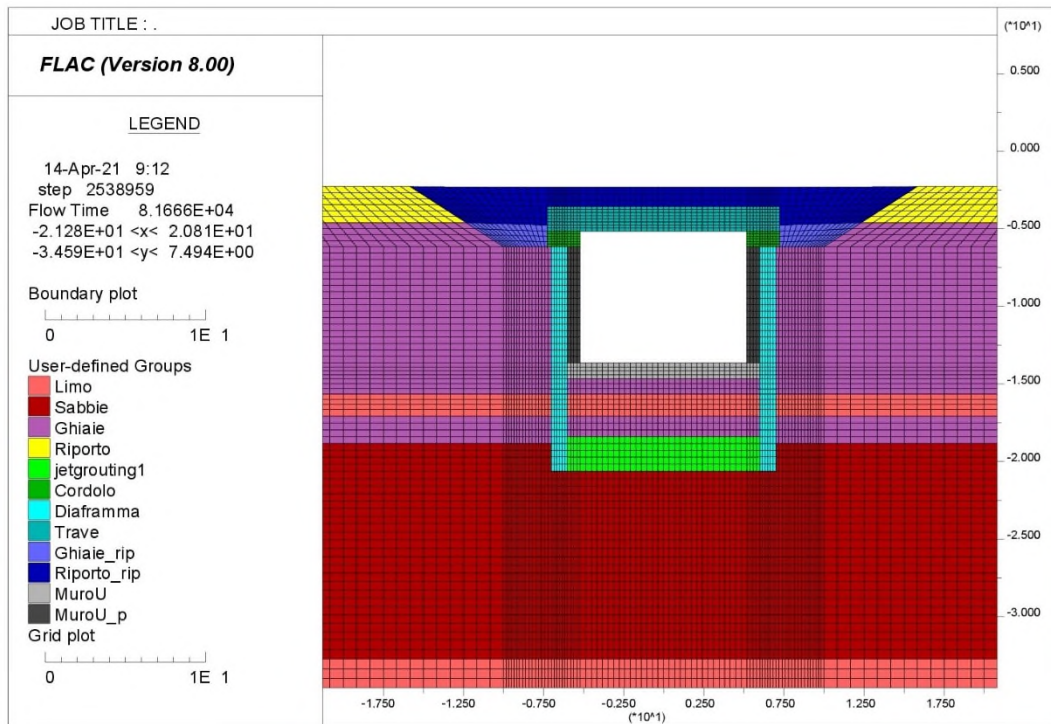


Figura 44 Sezione TA: particolare del modello FLAC con indicazione della stratigrafia e della zona trattata con jet-grouting.

In analogia a quanto fatto per la sezione TS1, nelle analisi FLAC è stato attribuito alle unità 1 e 2 un modello costitutivo di tipo elasto-plastico perfetto con criterio di rottura di Mohr-Coulomb mentre alle unità 4 e 6 (sabbie

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 60 di 90

e ghiaie) è stato assegnato il Plastic Hardening model (modello elastoplastico incrudente). Per i parametri relativi ai vari modelli si rimanda alla Tabella 2 e Tabella 3.

In base alle informazioni disponibili si è assunto un grado di sovraconsolidazione OCR pari a 1 per le unità considerate e conseguentemente è stato determinato il coefficiente di spinta a riposo  $K_0$  dalla seguente formulazione proposta da Mayne and Kulhawy (1982):

$$K_0 = K_0^{NC} \cdot OCR^{(\sin \varphi')}$$

dove  $K_0^{NC}$  è il coefficiente di spinta a riposo del terreno in condizioni normal consolidate determinato con l'espressione proposta da Jaky (1944):  $K_0^{NC} = 1 - \sin \varphi'$ .

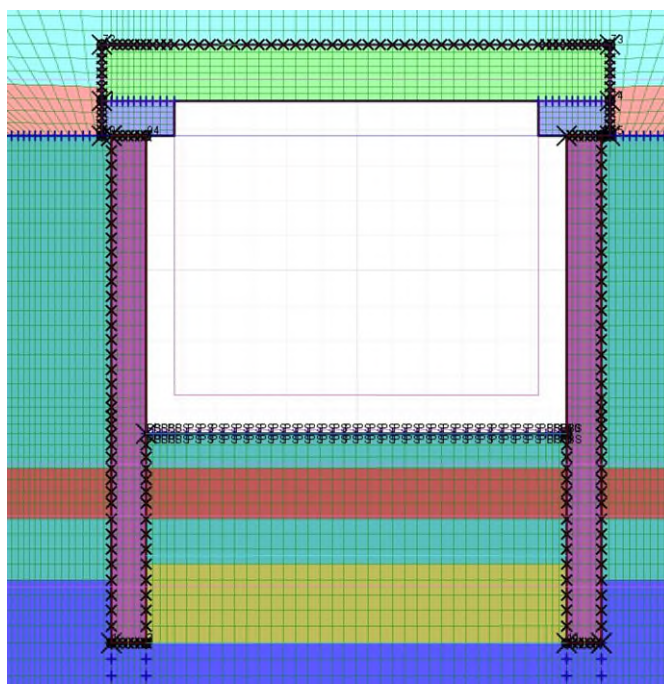
Per quanto riguarda la zona trattata con jet-grouting si sono assunte le proprietà meccaniche e deformative illustrate nella Tabella 4.

Anche gli elementi strutturali sono stati modellati adottando un legame costitutivo di tipo elastico lineare con le stesse proprietà (vedasi

Tabella 5) ed ipotesi di vincolo indicate nel capitolo in cui si è analizzata la sezione TS1 con tampone sandwich.

Nella Figura 45 è riportato il particolare del modello in corrispondenza delle strutture. È possibile notare la presenza delle interfacce tra le strutture ed il terreno e tra le fodere ed i diaframmi.

Per le interfacce è stato assunto un legame costitutivo del tipo coulomb slip con coesione nulla e con angolo di attrito pari a 0.5 volte l'angolo di resistenza al taglio del terreno.





GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 61 di 90

Figura 45 Particolare delle strutture modellate in modo esplicito nel modello numerico FLAC.

A seconda della fase di calcolo (vedasi paragrafo seguente) sono stati considerati tre diversi livelli di falda:

1. livello di costruzione → 41.22 s.l.m.;
2. livello di breve termine → 43.72 s.l.m.;
3. livello di lungo termine → 45.22 s.l.m.

Come descritto in precedenza le analisi meccaniche e di flusso sono state condotte in modo disaccoppiato.

## 7.2 Fasi di calcolo

Le fasi di calcolo prese in considerazione nel modello sono di seguito elencate; per la suddivisone nelle varie *branches* valgono le stesse considerazioni illustrate per la sezione tipo TS

### **FASI COMUNI**

- Fase 0: start – nihil;
- Fase 1: condizione geostatica (falda a livello di costruzione, quota 41.22 m s.l.m.);
- Fase 2: Modellazione scavo 2V:3H da 47.17 a intradosso cordolo q.ta 45.26;
- Fase 3: Realizzazione diaframmi e realizzazione jet-grouting;
- Fase 4: Applicazione carico accidentale di cantiere 20kPa ai lati dei diaframmi;
- Fase 5: Installazione soletta di copertura;
- Fase 6: Applicazione carico accidentale di 20kPa sulla soletta;
- Fase 7: Ricoprimento fino a quota piano campagna 48.88 (eliminazione del carico precedente);
- Fase 8: Applicazione carico accidentale di 20kPa su piano campagna;
- Fase 9: Abbassamento falda a quota fondo scavo tra i diaframmi e falda a livello di costruzione;
- Fase 10: Scavo q.ta fondo scavo 33.76 m s.l.m.;
- Fase 11a: Innalzamento falda al livello di breve termine (quota 43.72 m s.l.m.);
- Fase 11b: Abbassamento falda al livello di costruzione (quota 41.22 m s.l.m.);
- Fase 12a: Costruzione solaio di fondo;

### **MODELLO SENZA FODERA** (a partire dalla precedente fase 12a):

- Fase 13: Annullamento parametri jet-grouting (non si apprezza più azione irrigidente del tampone in termini di permeabilità e rigidità);
- Fase 14: Risalita falda fino al livello di lungo termine (quota 45.22 m s.l.m.);
- Fase 15: Riduzione moduli calcestruzzo per il lungo termine (si è assunta una riduzione del 20% dei valori di breve termine del calcestruzzo,  $E_{LT}=0.8 \cdot E_{BT}$ );

### **MODELLO CON FODERA** (a partire dalla precedente fase 12a):

- Fase 12b: costruzione fodera;

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 				
<p>GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI</p>	<p>Progetto IN17</p>	<p>Lotto 11</p>	<p>Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002</p>	<p>Rev. A</p>	<p>Foglio 62 di 90</p>

- Fase 13: Annullamento parametri jet-grouting (non si apprezza più azione irrigidente del tampone in termini di permeabilità e rigidità);
- Fase 14: Risalita falda fino al livello di lungo termine (quota 45.22 m s.l.m.);
- Fase 15: Riduzione moduli calcestruzzo per il lungo termine (si è assunta una riduzione del 20% dei valori di breve termine del calcestruzzo,  $E_{LT}=0.8 \cdot E_{BT}$ );
- Fase 16: Applicazione dell'azione sismica.

**FASI PER VERIFICHE TAMPONE** (a partire dalla precedente fase 10):

- Fase 11: Riduzione peso di volume del terreno di 0.9 ed incremento peso di volume acqua a 11 kN/m<sup>3</sup>, incremento della falda al livello di breve termine;
- Fase 12: Riduzione parametri A2+M2 e modifica interfaccia angolo di attrito.

Ogni analisi è stata ripetuta per le due condizioni di vincolo tra diaframmi e solettone di copertura ipotizzate e per le seguenti configurazioni di permeabilità e di resistenza relative alle due zone migliorate:

1. Jet-grouting avente le migliori caratteristiche meccaniche ipotizzate ( $c'=1000\text{kPa}$ ,  $\phi'=38^\circ$ ,  $E'=2500\text{MPa}$ ) e permeabilità pari a  $k=5\text{e-}7\text{ m/s}$ ;
2. Jet-grouting avente le peggiori caratteristiche meccaniche ipotizzate ( $c'=400\text{kPa}$ ,  $\phi'=27^\circ$ ,  $E'=750\text{MPa}$ ) e permeabilità pari a  $k=1\text{e-}6\text{ m/s}$ .

La presente numerazione delle analisi è quella a cui si farà riferimento nel seguito. A titolo di esempio con "Analisi 1" si farà riferimento all'analisi eseguita attribuendo alla zona migliorata un valore di permeabilità minore pari a  $k=5\text{e-}7\text{ m/s}$ .

Nelle figure seguenti si riportano le immagini del modello FLAC nelle fasi più significative:



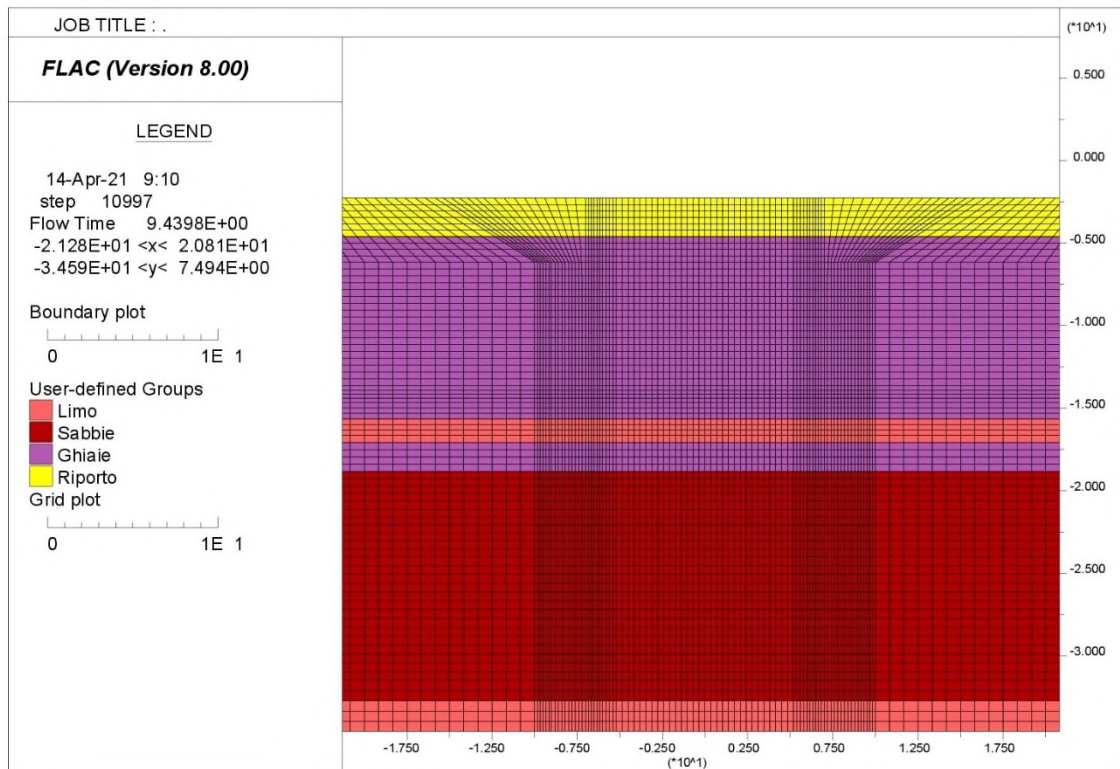


Figura 46 Fase 1: Equilibrio geostatico iniziale.

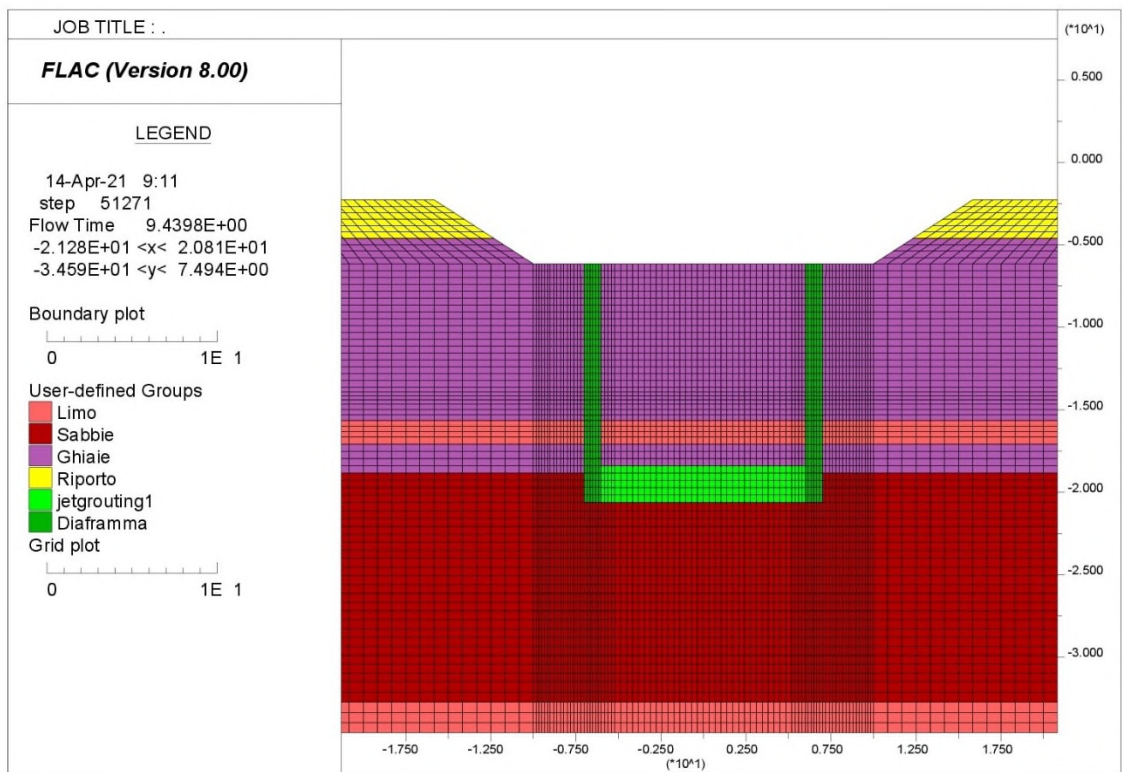


Figura 47 Fase 3: Realizzazione tampone compensato.

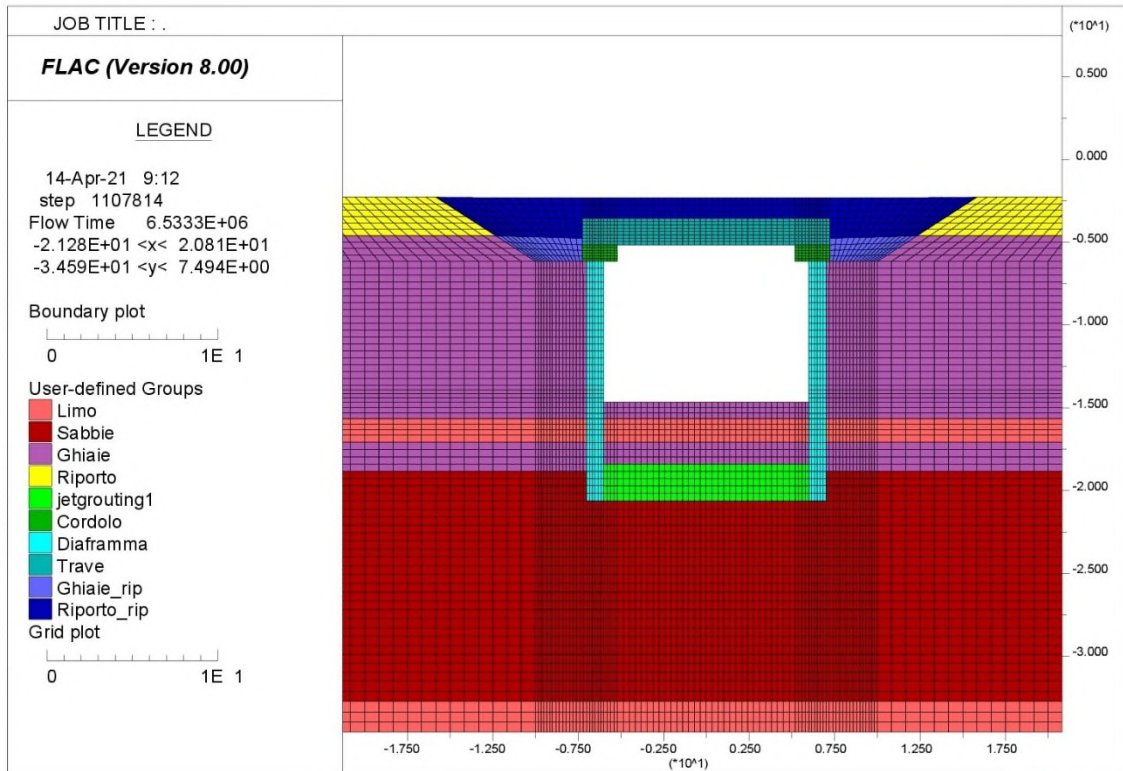


Figura 48 Fase 10: Scavo fino a quota fondo scavo 33.76m.

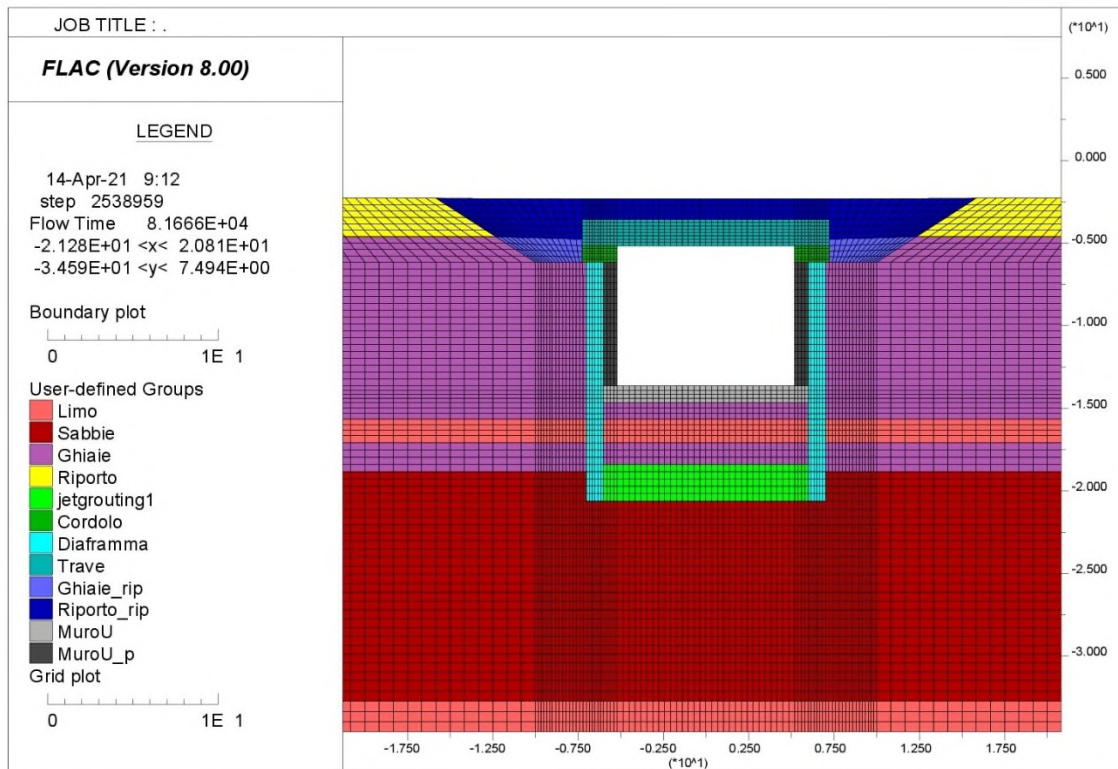


Figura 49 Fase 15: Condizione lungo termine

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 65 di 90

## 7.3 Determinazione delle sollecitazioni agenti nei diaframmi

### 7.3.1 Sollecitazioni agli SLE ed SLU

In questo paragrafo sono riassunte le sollecitazioni nei diaframmi ottenute eseguendo i gruppi di analisi descritti in precedenza.

Nella Figura 50 e nella Figura 51 sono illustrati gli andamenti di taglio e momento per lo stato limite di esercizio e per lo stato limite ultimo relativamente all'Analisi 1 per la condizione di vincolo di tipo cerniera del nodo diaframma-solettone di copertura. Sono mostrati gli andamenti delle sollecitazioni calcolate per le fasi di calcolo ritenute più significative. In ogni grafico gli andamenti delle sollecitazioni sono generati a partire dall'interfaccia cordolo-diaframma (zona in cui è simulato il vincolo incastro o cerniera) fino al piede dello stesso. Lo spessore di calcolo della sezione considerata per i diaframmi è pari a 100 cm.

Allo stesso modo sono riportate nella Figura 52 e nella Figura 53 i risultati ricavati con la condizione di vincolo di tipo incastro. La cerniera corrisponde in realtà ad un semincastro in cui il momento negativo sull'appoggio è circa il 30% di quello corrispondente all'incastro. Nella Figura 54 si può osservare il confronto, per la fase di calcolo più gravosa precedente all'installazione delle strutture interne, tra gli andamenti di taglio e momento ottenuti con la condizione di vincolo incastro e quelli ricavati con la condizione cerniera.



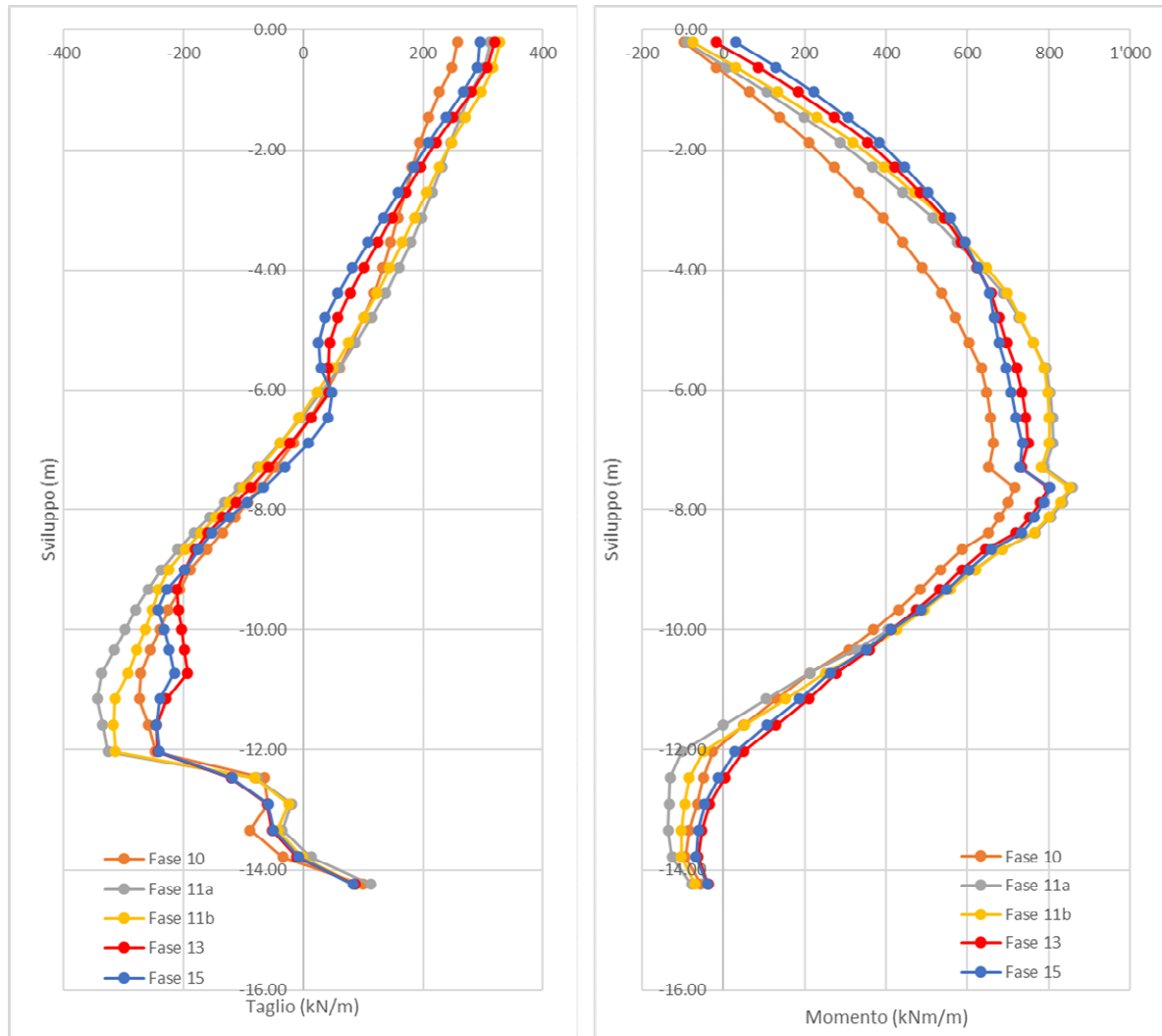


Figura 50 Analisi 1 - vincolo cerniera: SLE - Diaframmi di taglio e momento per le fasi di calcolo ritenute più significative.

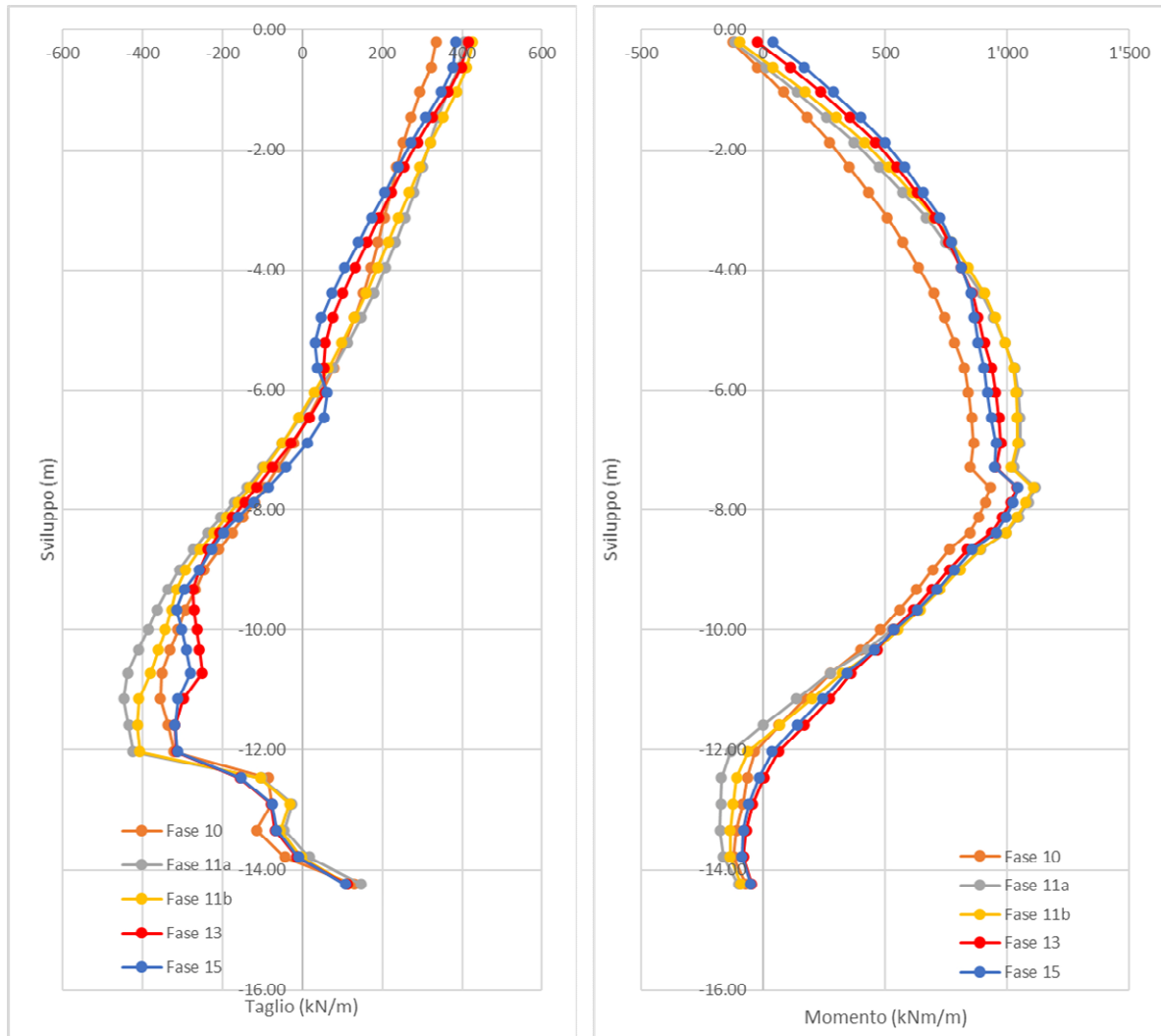


Figura 51 Analisi 1 - vincolo cerniera: SLU - Diaframmi di taglio e momento per le fasi di calcolo ritenute più significative.

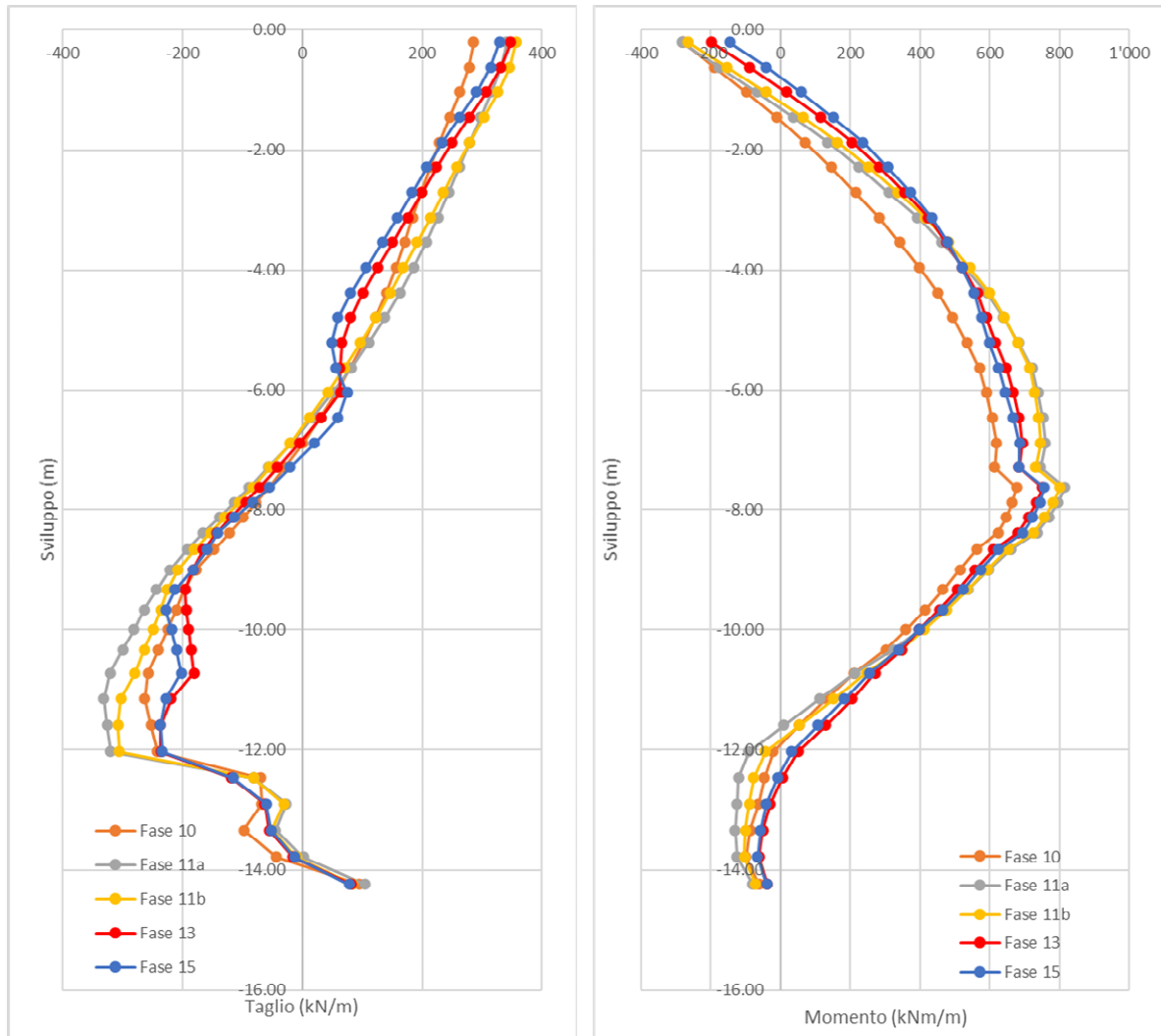


Figura 52 Analisi 1 - vincolo incastro: SLE - Diaframmi di taglio e momento per le fasi di calcolo ritenute più significative.



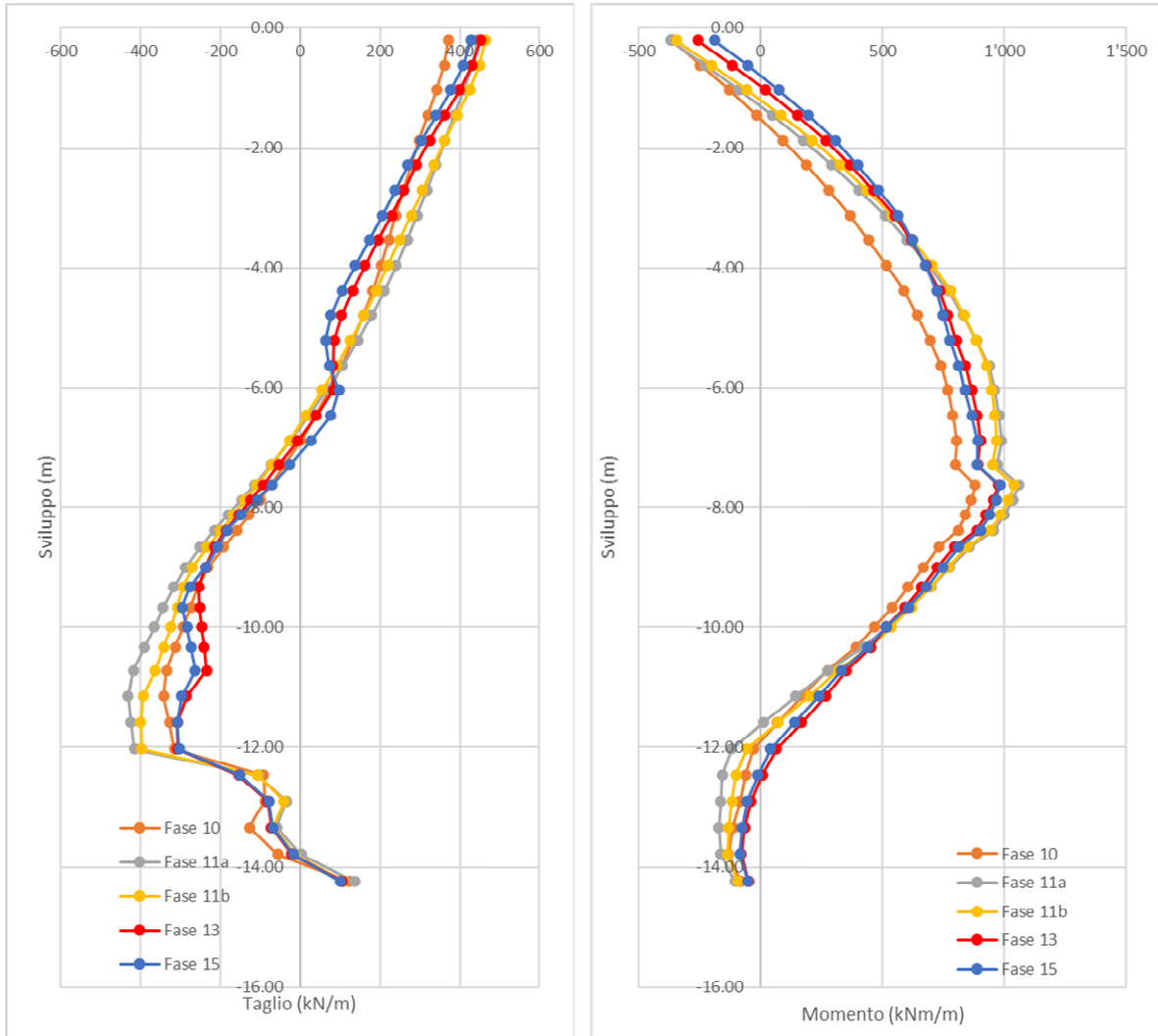


Figura 53 Analisi 1 - vincolo incastro: SLU - Diaframmi di taglio e momento per le fasi di calcolo ritenute più significative.

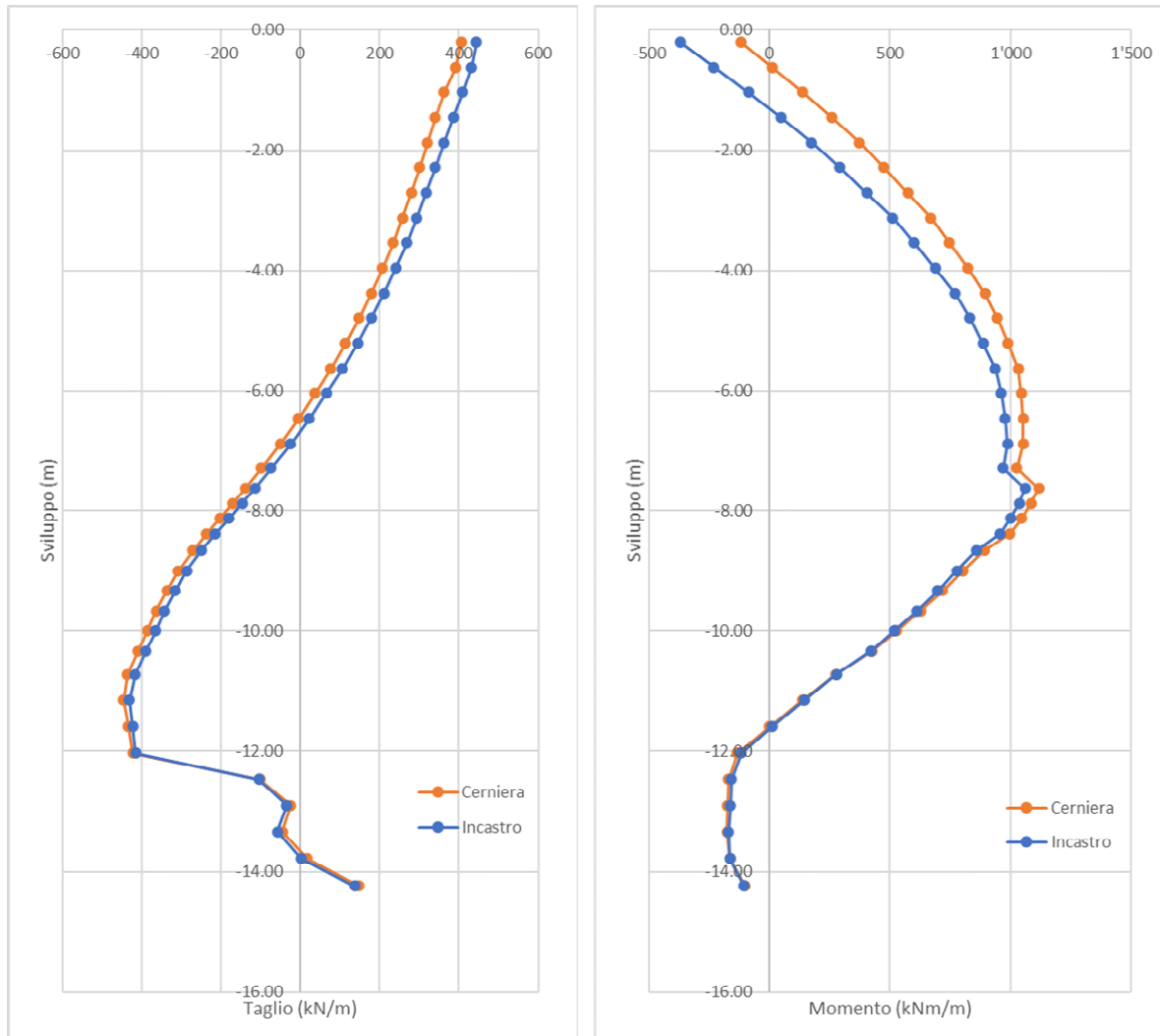


Figura 54 Analisi 1 - SLU: confronto sollecitazioni nella fase di calcolo 11a ottenuti con le due condizioni di vincolo assunte per il nodo diaframma-solettone di copertura.

L'Analisi 2 con vincolo cerniera determina delle sollecitazioni di momento lungo la parte del diaframma interessata dallo scavo leggermente superiori a quelle dell'Analisi 1. Nella parte interessata dal tampone i momenti negativi sono invece leggermente inferiori rispetto a quelli ottenuti nell'Analisi 1. Nella Figura 55 sono mostrate le sollecitazioni a SLU ottenute nell'Analisi 2 per la condizione di vincolo cerniera. Dal confronto tra la Figura 51 e la Figura 55 è possibile osservare, quanto già discusso nel caso del tampone sandwich, il contributo dato dal tampone (effetto "puntone") che questa volta risulta però sicuramente molto meno rilevante.

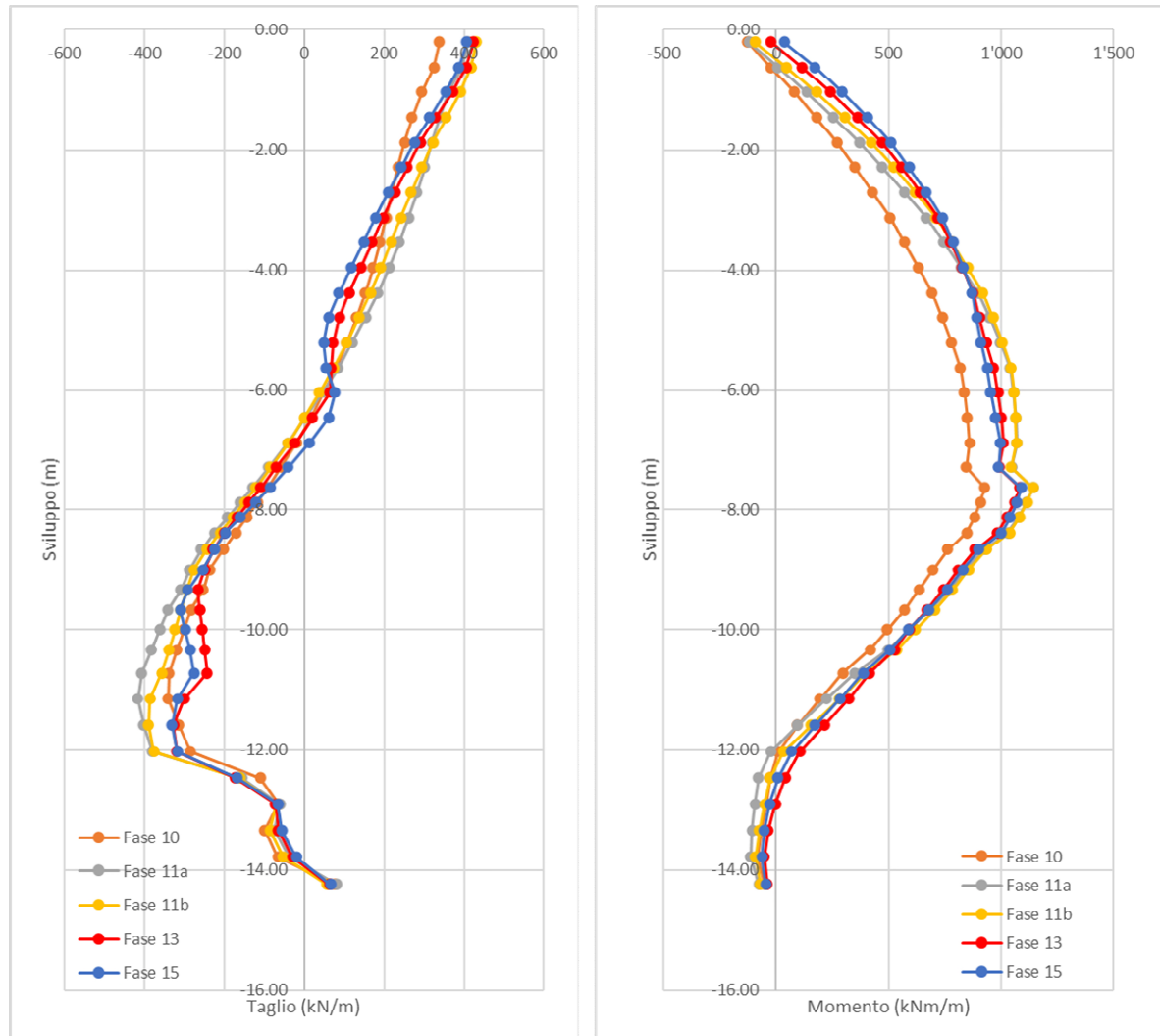


Figura 55 Analisi 2 - vincolo cerniera: SLU - Diaframmi di taglio e momento per le fasi di calcolo ritenute più significative.

### 7.3.2 Sollecitazioni dovute all'azione sismica

Utilizzando la procedura descritta precedentemente nel paragrafo dedicato alla descrizione dell'azione sismica, si riportano in questo paragrafo i valori numerici degli spostamenti applicati come condizioni di bordo al modello necessari per la generazione della deformazione di taglio richiesta.

<b>GENERAL CONTRACTOR</b> 		<b>ALTA SORVEGLIANZA</b> 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI		Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 72 di 90

Tabella 10: Deformazioni di taglio e spostamenti applicati al modello FLAC.

Strato	ztetto	zletto	zmedio	rd	$\sigma_v$	Go	$\tau_{max}$	$\gamma_{max}$	Spostamento locale laterale	Spostamento applicato	Spostamento applicato
(-)	(m)	(m)	(m)	(-)	(kPa)	(MPa)	(kPa)	(-)	(m)	letto (m)	tetto (m)
Riporto	0	2	1.0	0.99	19.0	57	6.3	0.00011	0.0002	0.1470	0.1472
Ghiaia	2	13	7.5	0.89	142.5	150	42.9	0.00029	0.0031	0.1439	0.1470
Limo	13	14.5	13.8	0.79	261.3	57	70.3	0.00123	0.0018	0.1420	0.1439
Ghiaia	14.5	16.5	15.5	0.77	294.5	150	76.6	0.00051	0.0010	0.1410	0.1420
Sabbia	16.5	30.5	23.5	0.70	446.5	175	106.0	0.00061	0.0085	0.1325	0.1410
Limo	30.5	39	34.8	0.70	660.3	57	156.7	0.00274	0.0233	0.1092	0.1325
Sabbia	39	100	69.5	0.70	1320.5	175	313.4	0.00179	0.1092	0.0000	0.1092

Nella Figura 56 è mostrato il modello deformato a taglio in seguito all'applicazione come condizioni di bordo degli spostamenti calcolati nella Tabella 10.

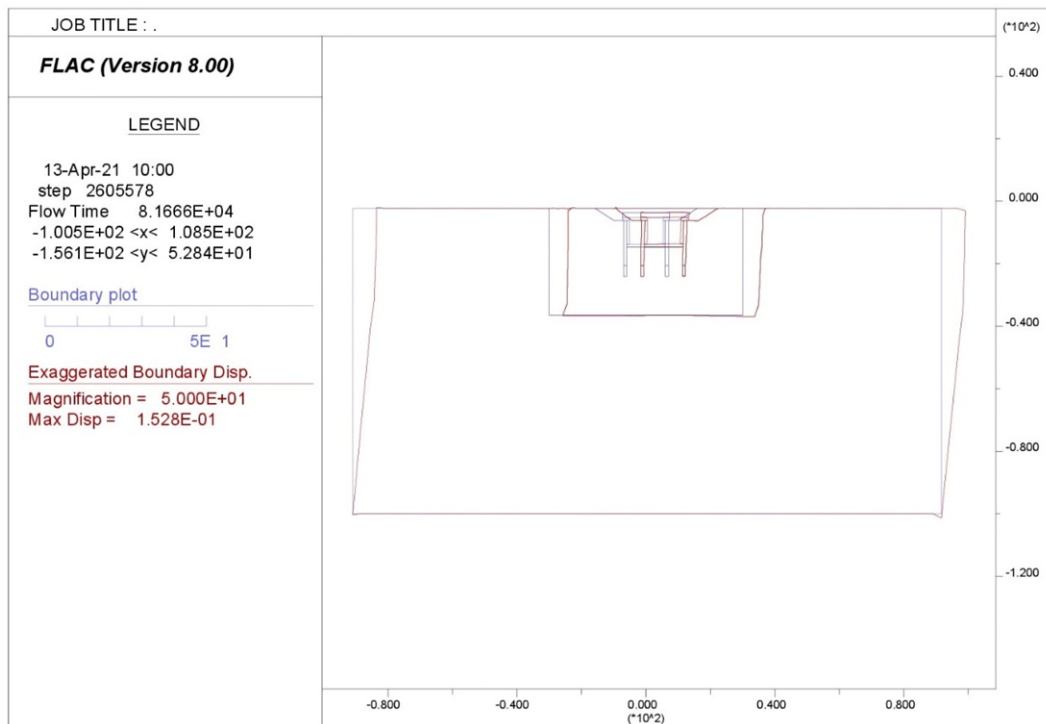


Figura 56 Analisi 1 - SLV – Modello deformato a taglio inseguito all'applicazione della azione sismica in termini di spostamenti orizzontali (vedasi Tabella 10).

Nella Figura 57 e nella Figura 58 è illustrato il confronto delle sollecitazioni ottenute per la fase statica di lungo termine (fase 15) a SLU e per quella successiva dopo l'applicazione dell'azione sismica a SLV (fase 16). Nelle due figure sono mostrate le sollecitazioni di entrambi i diaframmi per la condizione sismica.

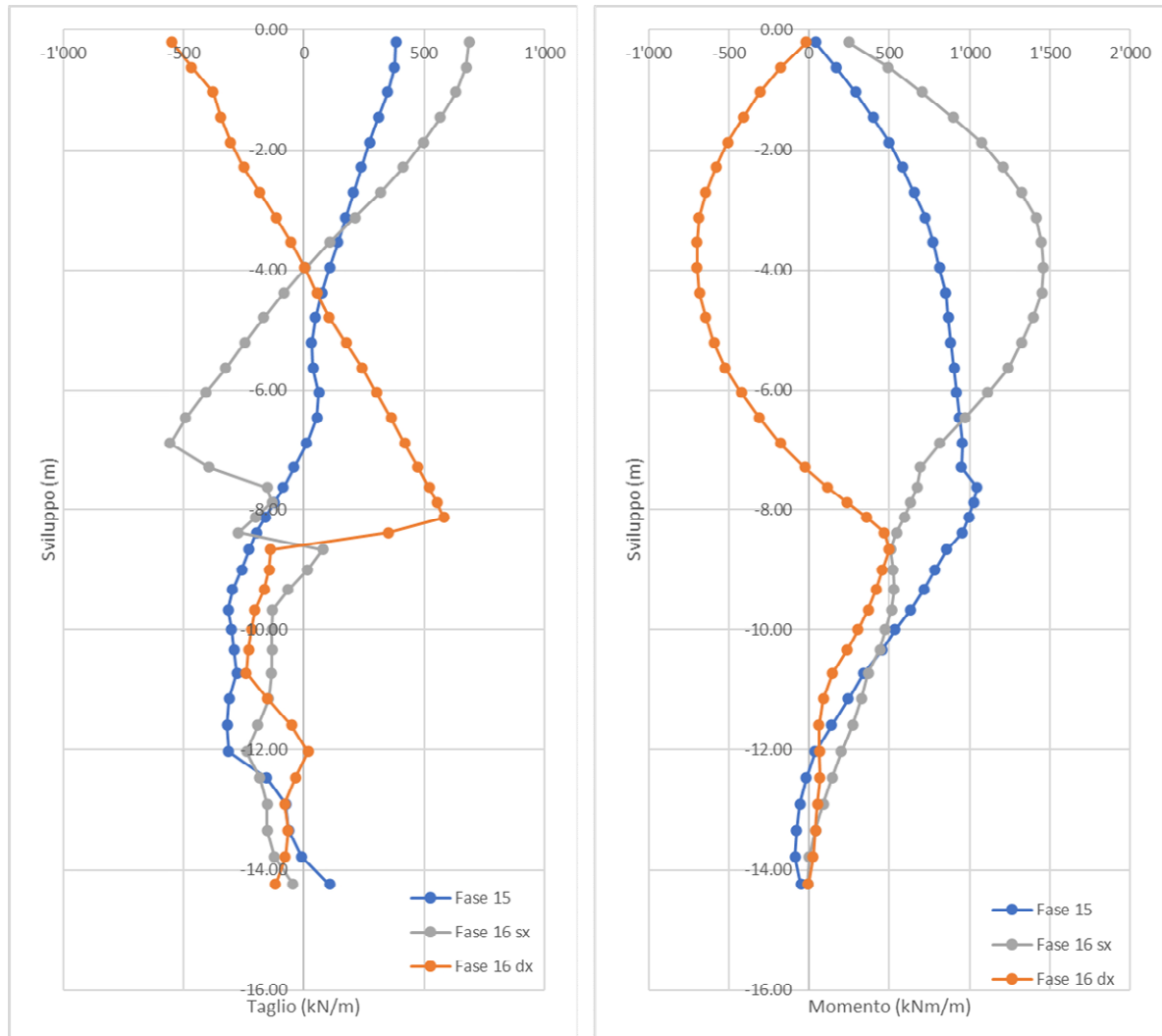


Figura 57 Analisi 1 - vincolo cerniera: SLU-SLV - Diaframmi di taglio e momento per la fase di lungo termine ed in presenza dell'azione sismica.

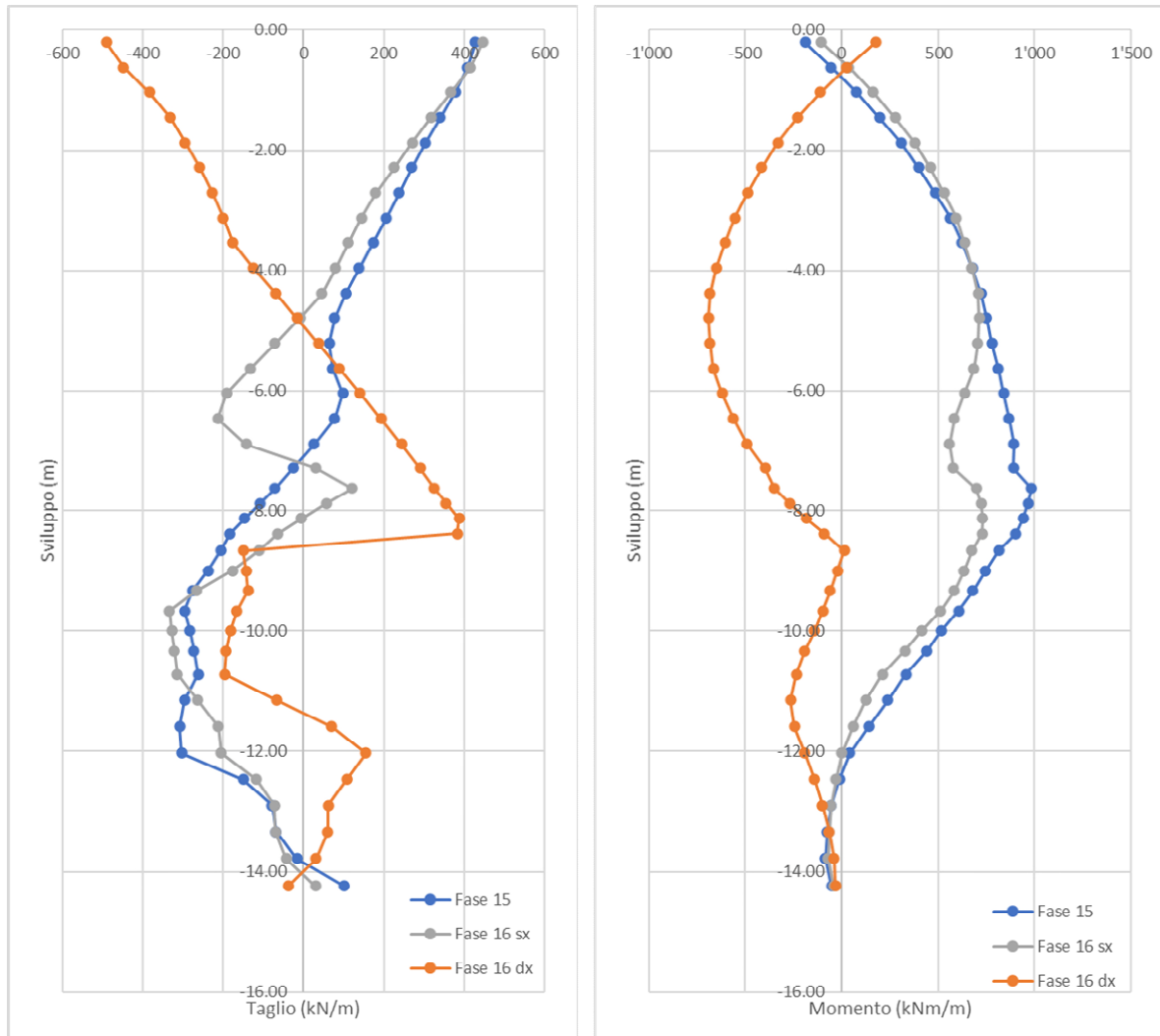


Figura 58 Analisi 1 - vincolo incastro: SLU-SLV - Diaframmi di taglio e momento per la fase di lungo termine ed in presenza dell'azione sismica.

### 7.3.3 Valutazione dell'interazione tra diaframmi e struttura interna a lungo termine

In analogia a quanto fatto per la sezione TS1 si è proceduto anche per la sezione TA a valutare l'interazione tra i diaframmi e le strutture interne. Nelle analisi semplificate, eseguite con Paratie Plus, per tenere in conto della presenza nel lungo termine della struttura interna ad U (soletta di fondazione + fodere) si è assunto che la spinta delle terre possa essere ripartita in ragione del rapporto  $r$  tra le rigidzze flessionali degli elementi strutturali posti a contatto. Prendendo come riferimento l'analisi 1, è stata eseguita un'ulteriore fase di calcolo assumendo l'assenza della fodera nel lungo termine e facendo quindi sostenere l'intera spinta delle terre di lungo termine ai soli diaframmi. In questa ultima analisi è stata considerata la sola presenza del solettone di fondazione. Il coefficiente di ripartizione  $r$  è quindi stato definito come segue:

$$S_{C-F} = S_{S-F} \cdot r$$



dove:  $S_{S-F}$  è la sollecitazione di momento o taglio che si origina nel diaframma in assenza della fodera nel lungo termine (fase 15);  $S_{C-F}$  è la sollecitazione, corrispondente alla condizione di diaframma accoppiato con la fodera, ottenuta applicando il coefficiente  $r$ .

Nella Figura 59 sono riportati gli andamenti delle sollecitazioni di taglio e momento limitati all'altezza del diaframma interessata dall'accoppiamento con la fodera per le due condizioni esaminate (con e senza fodera).

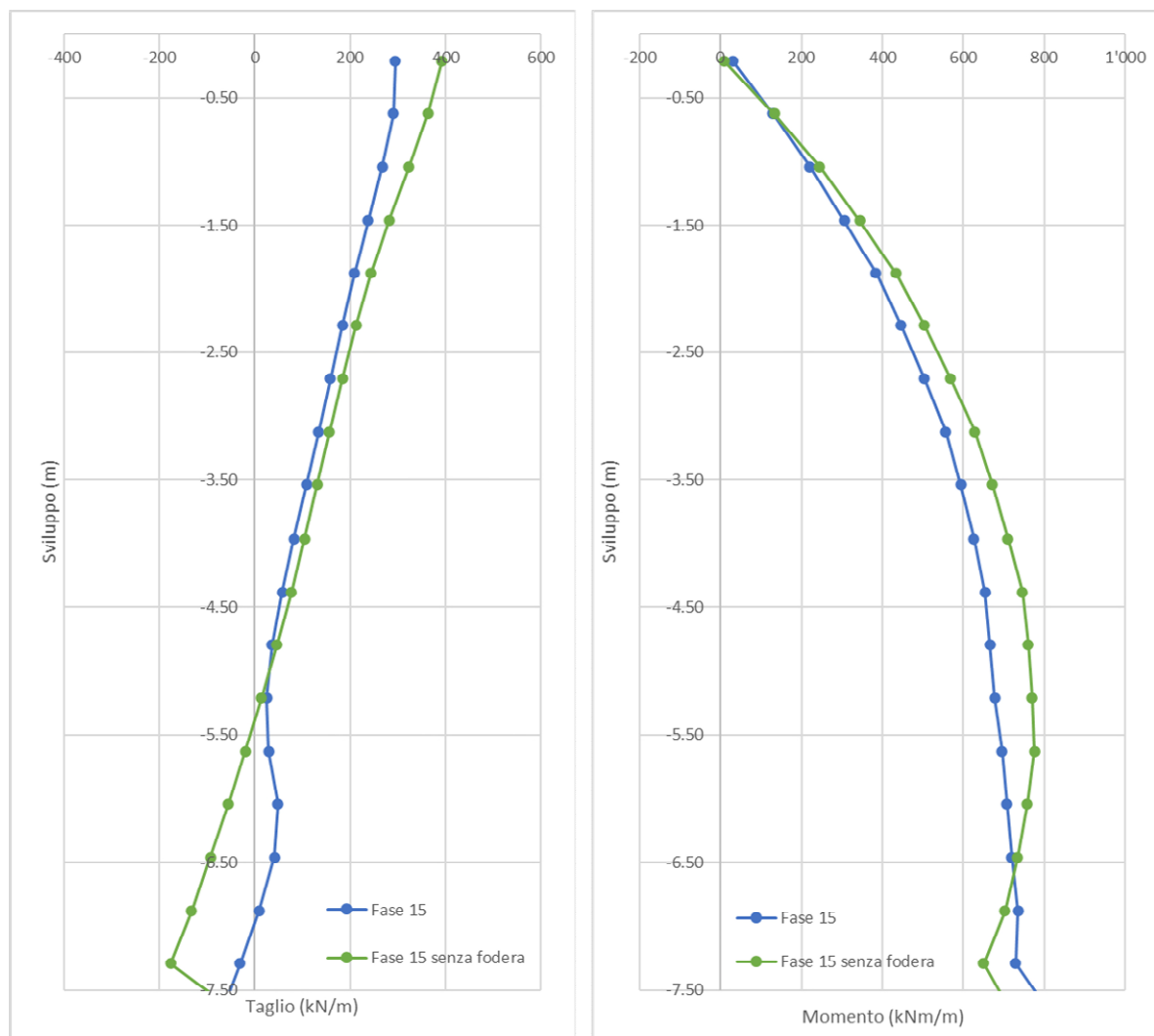


Figura 59 Analisi 1 - vincolo cerniera: SLE – Sollecitazioni nel diaframma per il tratto interessato dalla fodera: assenza e presenza di fodera nel lungo termine (fase 15).

Nella Figura 60 è infine illustrato il confronto tra il momento calcolato con FLAC, originato nel diaframma con il contributo della fodera, e quello ricavato applicando il coefficiente di ripartizione con la procedura descritta in precedenza. Il confronto mostrato è stato ottenuto adottando un coefficiente di ripartizione  $r$  pari a 0.75 corrispondente a utilizzato nelle analisi semplificate con Paratie Plus. Si può osservare che tale valore del coefficiente  $r$  sottostima un po' i valori di momento calcolati direttamente con FLAC a differenza di quanto

mostrato per il tampono sandwich. Tuttavia tale valore del coefficiente  $r$  può essere comunque accettato in quanto le sollecitazioni ottenute con l'approccio semplificato risultano superiori a quelle calcolate con FLAC.

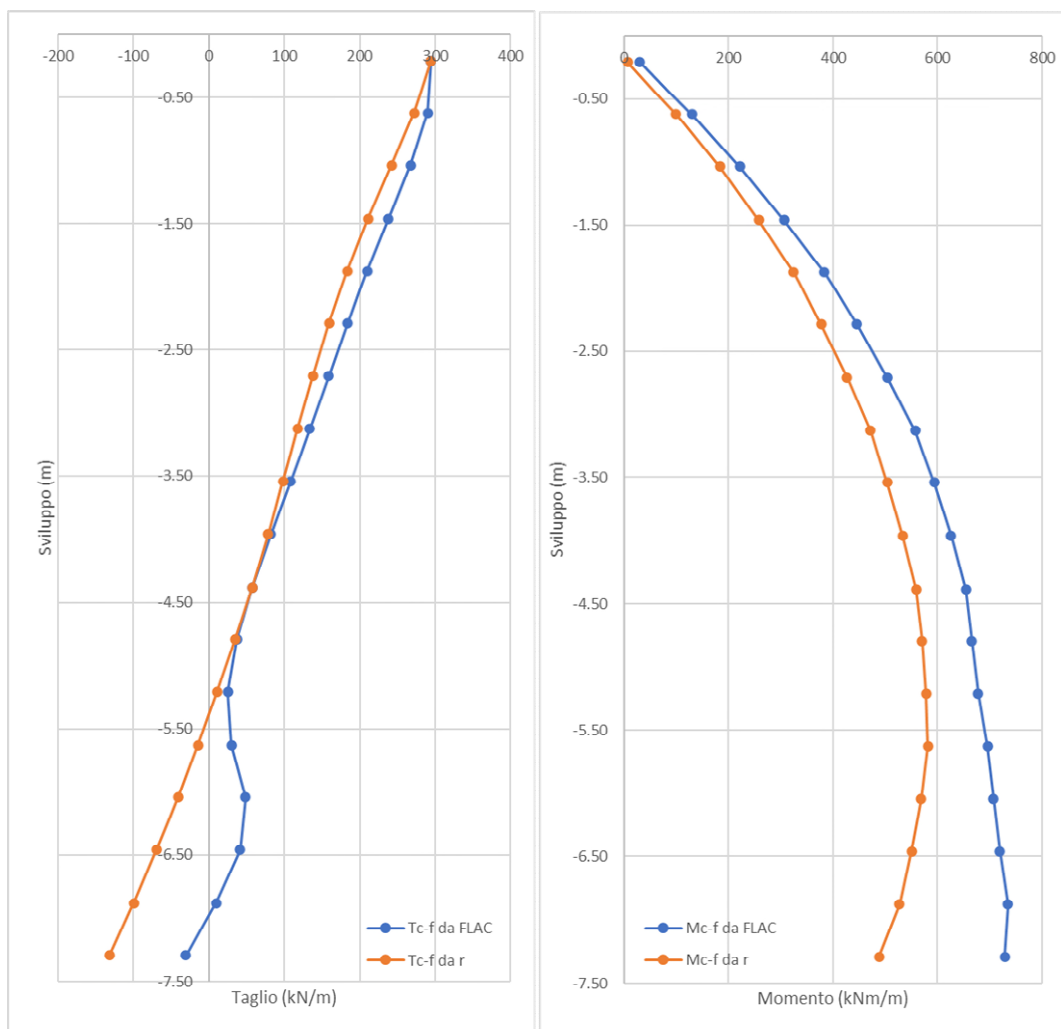


Figura 60 Analisi 1 - vincolo cerniera: SLE – Confronto sollecitazioni ottenute con FLAC e quelle calcolate applicando il coefficiente di ripartizione a partire dalla condizione priva del contributo della fodera (fase 15).

Le medesime considerazioni possono essere fatte per la condizione di vincolo di tipo incastro (Figura 61) assumendo il coefficiente di ripartizione pari a 0.75 (vedasi Figura 62).

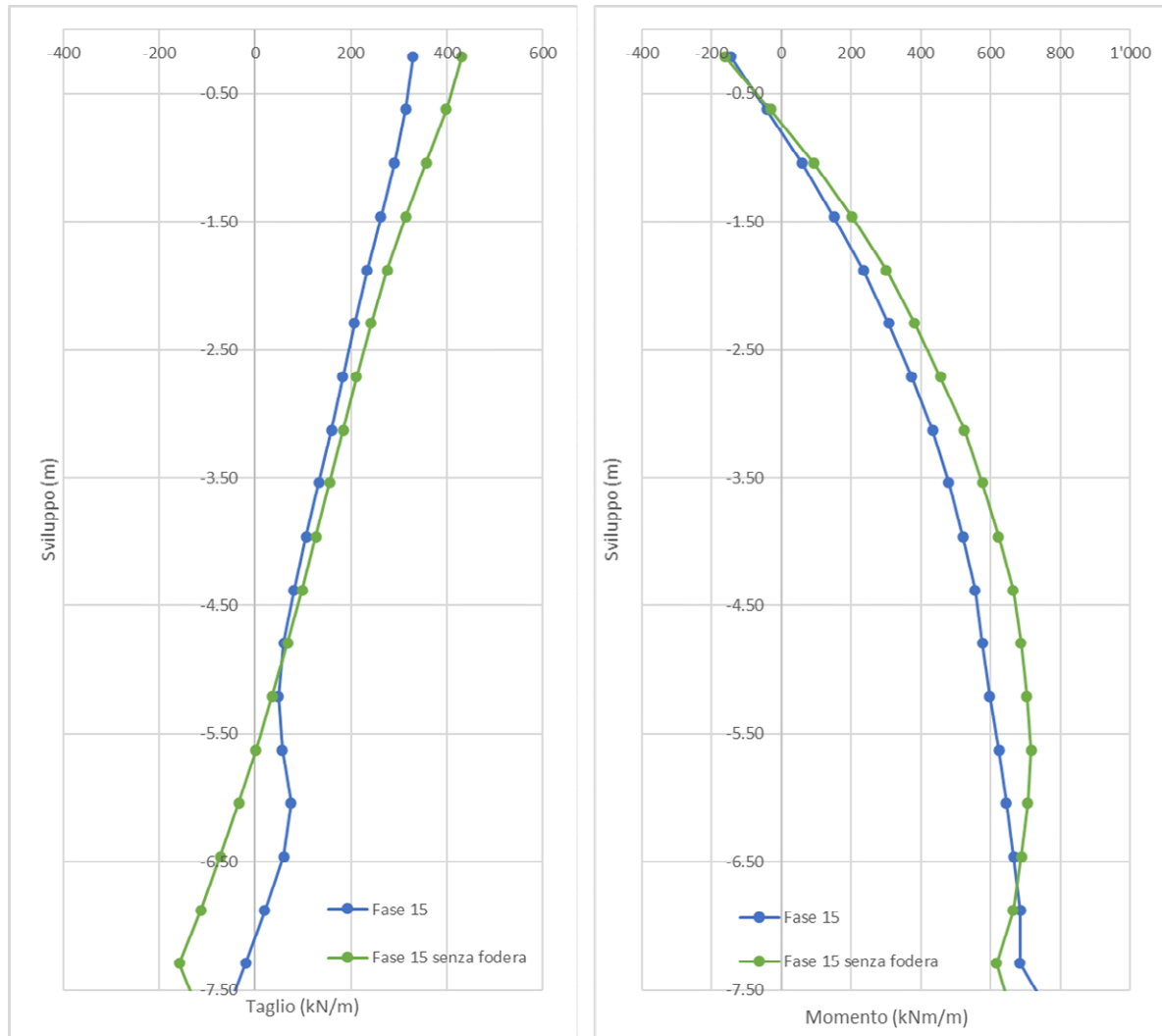


Figura 61 Analisi 1 - vincolo incastro: SLE – Sollecitazioni nel diaframma per il tratto interessato dalla fodera: assenza e presenza di fodera nel lungo termine (fase 15).

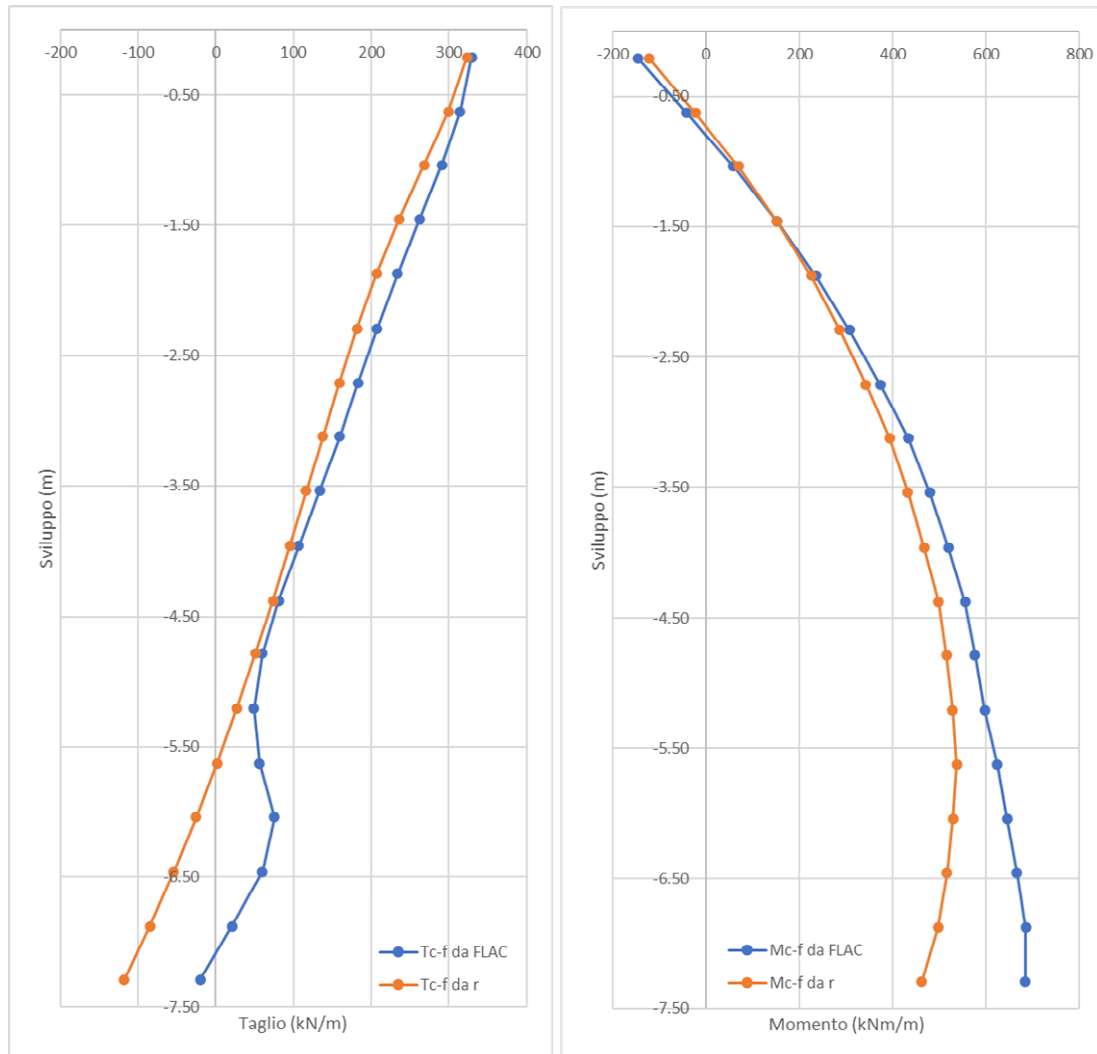


Figura 62 Analisi 1 - vincolo incastro: SLE – Confronto sollecitazioni ottenute con FLAC e quelle calcolate applicando il coefficiente di ripartizione a partire dalla condizione priva del contributo della fodera (fase 15).

## 7.4 Verifiche geotecniche

### 7.4.1 Spostamenti e stabilità del fondo scavo

Analogamente a quanto fatto per la sezione TS, nella Tabella 11 sono riassunti le percentuali di spinta passiva mobilitata per le due analisi eseguite per la condizione di incastro (nodo diaframma-solettone di copertura) che risulta la configurazione più gravosa per il problema in esame. Dai risultati si può osservare che la spinta passiva mobilitata si riduce nel lungo termine rispetto alla condizione di breve termine (Fase 11a – fondo scavo con falda a livello di breve termine) grazie all'installazione della struttura ad U interna.

<b>GENERAL CONTRACTOR</b> 	<b>ALTA SORVEGLIANZA</b> 				
<b>GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI</b>	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 79 di 90

Tabella 11 Coefficienti di mobilitazione della spinta passiva per le due analisi eseguite.

<b>Condizione</b>	<b>Comb.</b>	<b>%Sp (Scavo a quota fondo scavo)</b>	<b>%Sp (Condizione di lungo termine)</b>
TA - Analisi 1 (vincolo incastro in copertura)	SLU (A2+M2+R1)	15	11
	SLU Sisma-STR	-	100
TA - Analisi 2 (vincolo incastro in copertura)	SLU (A2+M2+R1)	13	10
	SLU Sisma-STR	-	100

Come si può osservare nella Tabella 11 in presenza di sisma viene mobilitata l'intera spinta passiva disponibile, tuttavia l'equilibrio è garantito grazie alla conformazione della struttura nel suo insieme e alla presenza del vincolo al piede offerto dal solettone di fondo

I valori degli spostamenti dell'opera di sostegno e del terreno circostante devono essere compatibili con la funzionalità della struttura da realizzare e con quella dei manufatti adiacenti. Nella Figura 63 sono illustrati gli andamenti degli spostamenti allo SLE dei diaframmi nella fase 10 (fondo scavo), nella fase 11a (fondo scavo con falda a livello di breve termine) e nella fase finale di lungo termine (fase 15) per l'analisi più gravosa. È possibile osservare che lo spostamento orizzontale massimo si ottiene nella fase 11a in cui si è ipotizzata la condizione di innalzamento della falda fino al livello di breve termine con lo scavo aperto (senza struttura ad U interna): in questa fase lo spostamento è di circa 5.7 mm. Nella fase finale invece, grazie al contributo della struttura interna, lo spostamento viene essenzialmente mantenuto pur avendo incrementato i carichi agenti.

A conclusione delle verifiche eseguite in questo paragrafo, si può affermare che la percentuale di mobilitazione della spinta passiva per le varie condizioni esaminate conferma i risultati ottenuti con l'approccio semplificato di calcolo impiegato da Paratie Plus. Stesse considerazioni possono essere fatte per gli spostamenti in esercizio.



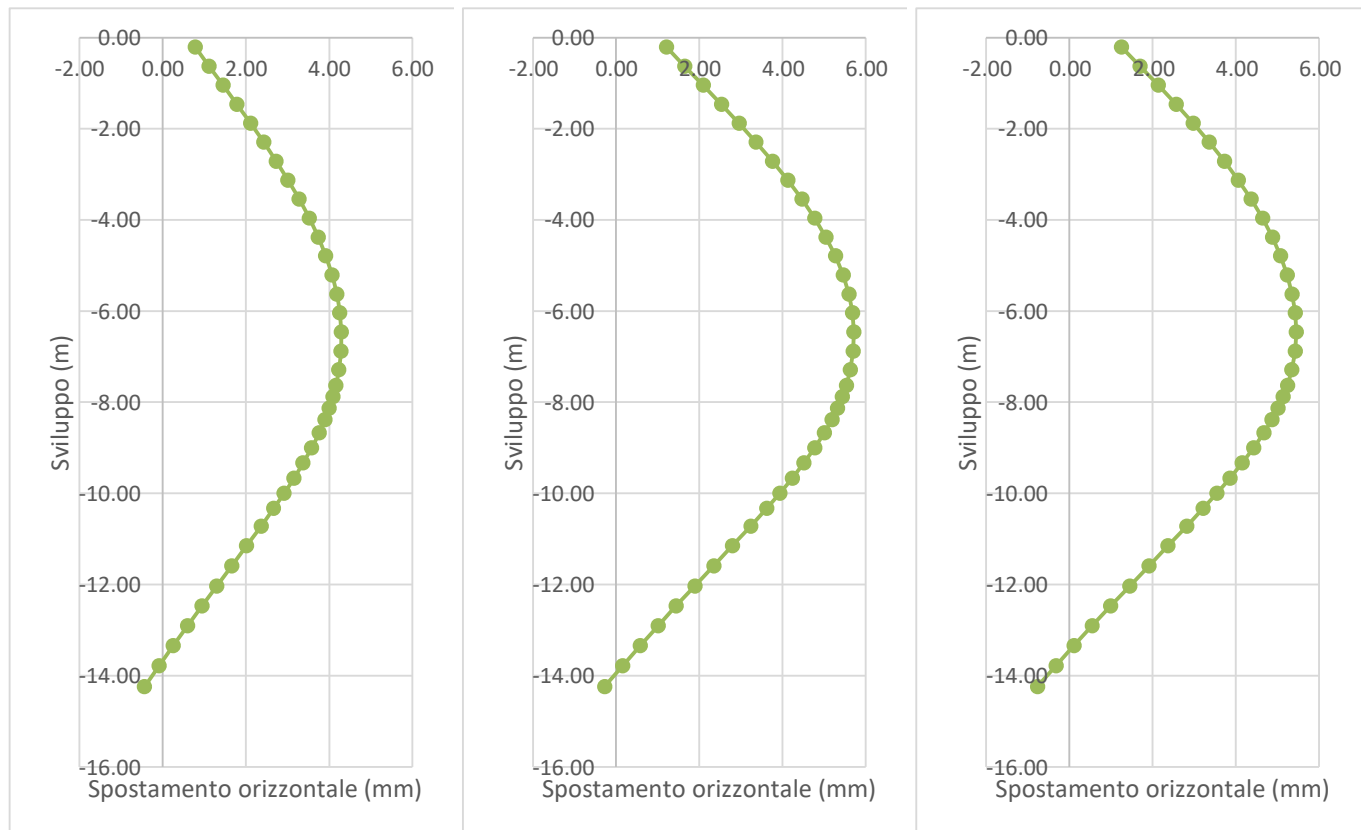


Figura 63 Analisi 2 - vincolo cerniera: SLE – Spostamenti orizzontali del diaframma: fase 10, fase 11a e fase 15 (lungo termine).

#### 7.4.2 Verifiche deformazioni/cedimenti attesi

Gli spostamenti orizzontali attesi dei diaframmi sono modesti, sia con schema di cerniera che nel caso di incastro. È presumibile che lo spostamento reale sia più prossimo a quello ottenuto con vincolo cerniera in quanto, a differenza che nelle analisi semplificate, le strutture sono modellate con i reali spessori e questo influenza sicuramente i risultati.

Nella Figura 64 è mostrato il profilo di subsidenza del piano campagna nella condizione di scavo a quota fondo scavo a partire dal momento della realizzazione dei diaframmi.

I cedimenti risultano trascurabili a circa 30 m dal profilo di scavo: è da tenere in conto che il cedimento è influenzato nel modello anche dal cedimento del materiale costituente il rinterro che viene disposto in seguito alla realizzazione del solettone di copertura.

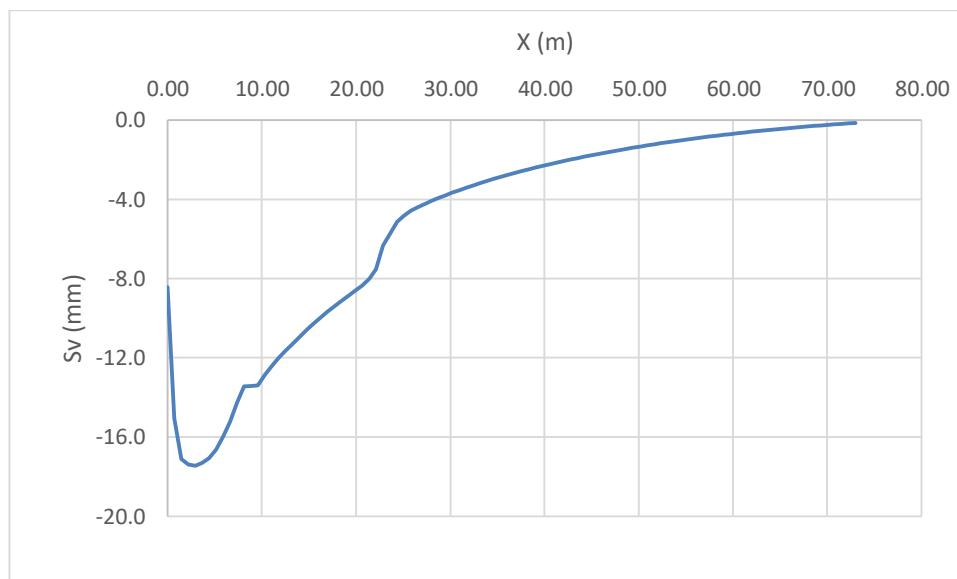


Figura 64 Spostamenti verticali attesi a piano campagna (curva di subsidenza) da filo scavo.

### 7.4.3 Verifiche di stabilità globale

Il calcolo del fattore di sicurezza è stato eseguito applicando la procedura prevista per lo Shear Strength Reduction (SSR) method. È stata quindi progressivamente ridotta la resistenza al taglio (la coesione e l'angolo di resistenza al taglio) dei vari materiali presenti nel modello (aventi legami costitutivi Plastic Hardening model e Mohr Coulomb model) fino ad ottenere la non convergenza dell'analisi. Il coefficiente riduttivo oltre al quale l'analisi non converge rappresenta il fattore di sicurezza alla stabilità globale.

Nella Tabella 12 sono mostrati i fattori di sicurezza relativi alla fase di calcolo con falda al livello di breve termine e scavo ancora privo delle strutture interne (fase 11a). Le analisi sono state eseguite assumendo la combinazione A2+M2+R1.

Tabella 12: Fattori di sicurezza alla stabilità globale.

Analisi	Fase di calcolo	F <sub>s</sub>
1	11a (fondo scavo con falda al livello di BT)	2.3
2	11a (fondo scavo con falda al livello di BT)	1.6

Nella Figura 65 sono mostrati gli spostamenti nel seguito i risultati ottenuti per l'analisi 2 ritenuta più gravosa rispetto all'analisi 1.

<b>GENERAL CONTRACTOR</b> 	<b>ALTA SORVEGLIANZA</b> 				
<b>GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI</b>	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 82 di 90

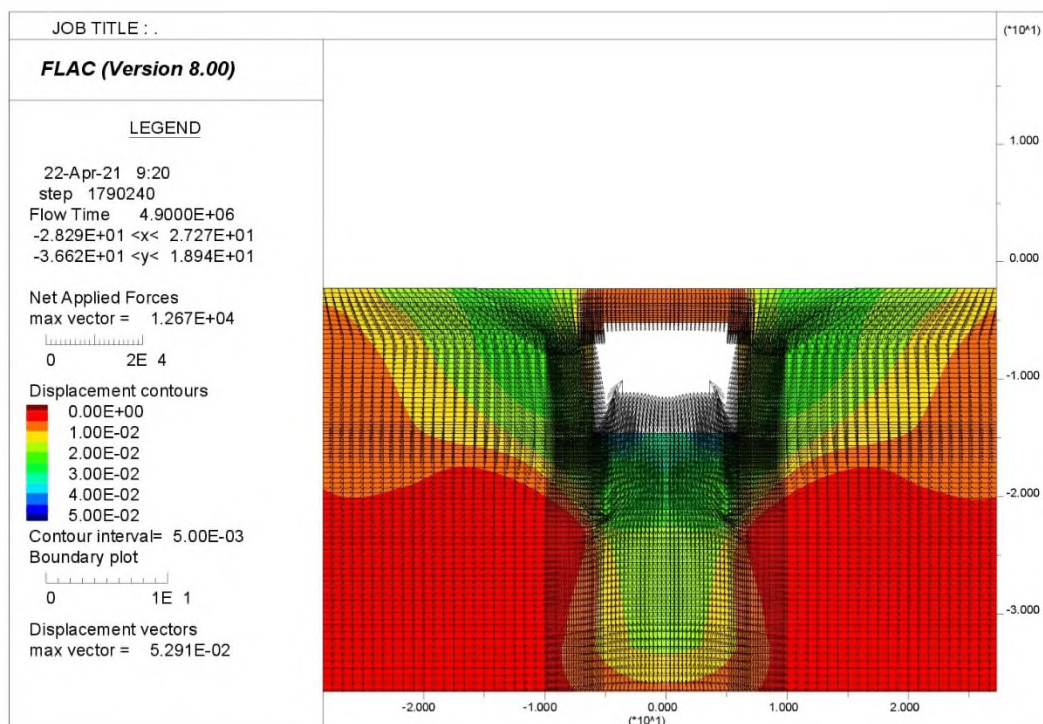


Figura 65 Analisi 2: Andamento spostamenti al termine del calcolo del fattore di sicurezza ( $F_s = 1.6$ ).

È bene evidenziare che la riduzione dei parametri di resistenza non è stata solo applicata ai materiali ma anche all'interfaccia diaframma-terreno.

#### 7.4.4 Verifiche di stabilità del fondo scavo al galleggiamento

In analogia a quanto fatto per la sezione TS1 con tampone sandwich anche per la sezione TA in esame con tampone compensato si è analizzato il problema con modellazione numerica in presenza della sottospinta idraulica relativa alla quota di breve termine della falda.

Si è proceduto quindi a calcolare il fattore di sicurezza al galleggiamento valutato rispetto alla base del tampone compensato (-6m dal piano di fondo scavo (33.76 m s.l.m.)). A tale scopo le grandezze da determinare sono le seguenti:

- Azioni stabilizzanti tramite integrazione sulla lunghezza che separa i due diaframmi delle tensioni verticali totali alla quota di -6m dal fondo scavo;
- Resistenze ottenute dall'integrazione delle azioni di taglio valutate lungo l'interfaccia diaframma-terreno;
- Azioni instabilizzanti calcolate integrando, sulla distanza tra i due diaframmi, le pressioni interstiziali.

Per valutare approfonditamente la stabilità del fondo scavo, secondo quanto indicato in precedenza, le analisi FLAC sono state eseguite con le seguenti assunzioni:

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 83 di 90

- a) falda al livello di breve termine con incremento del peso di volume dell'acqua di un coefficiente pari a 1.1, contemporanea riduzione del peso del materiale stabilizzante (jet grouting e terreno non trattato al di sopra del tampone di fondo) per un coefficiente pari a 0.9 e riduzione parametri di resistenza del terreno mediante i coefficienti M1;
- b) stesse ipotesi del punto precedente ma con riduzione dei parametri di resistenza del terreno mediante i coefficienti M2.

Ciascuna delle due precedenti condizioni è stata esaminata per le seguenti due diverse combinazioni di permeabilità della zona trattata con jet-grouting:

1. Jet-grouting avente le migliori caratteristiche meccaniche ipotizzate ( $c'=1000\text{kPa}$ ,  $\phi'=38^\circ$ ,  $E'= 2500\text{ MPa}$ ) e permeabilità pari a  $k = 5\text{e-}7\text{ m/s}$ ;
2. Jet-grouting avente le peggiori caratteristiche meccaniche ipotizzate ( $c'=400\text{kPa}$ ,  $\phi'=27^\circ$ ,  $E'= 750\text{ MPa}$ ) e permeabilità pari a  $k = 1\text{e-}6\text{ m/s}$ .

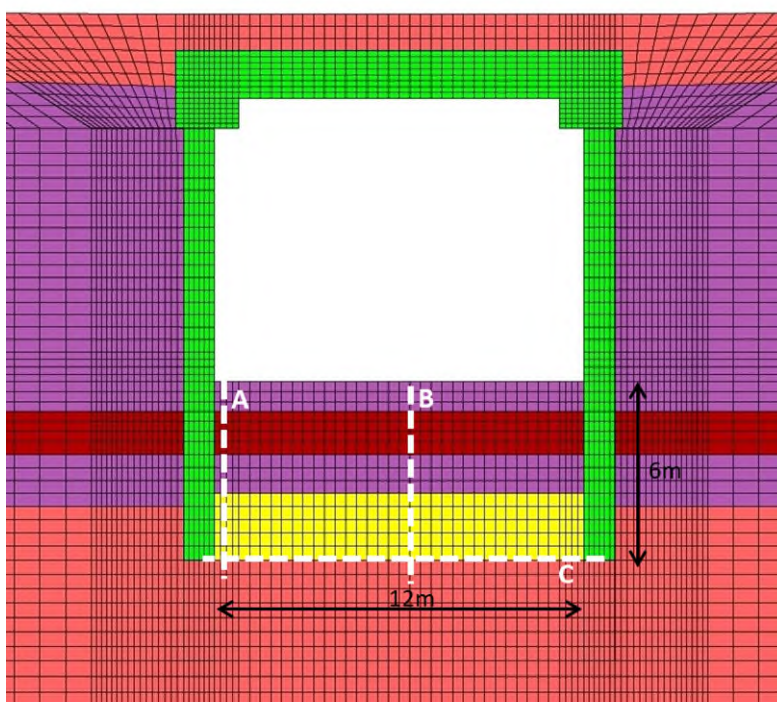


Figura 66 Sezioni prese come riferimento nelle analisi di stabilità del fondo scavo eseguite con FLAC.

Prendendo in considerazione la prima combinazione di permeabilità con parametri di resistenza ridotti M2 (analisi 1b), si riporta nel seguito il dettaglio del calcolo delle azioni stabilizzanti, resistenze ed azioni instabilizzanti:

- *Azioni stabilizzanti:* nelle analisi eseguite con il codice di calcolo FLAC si può osservare che la tensione totale alla base del tampone compensato è anche in questo caso data dal contributo del peso proprio



del tampone stesso e del terreno sovrastante ma anche da un ulteriore contributo legato all'effetto arco che si origina in seguito all'esecuzione dello scavo. Analogamente alla sezione TS si osserva la formazione di un arco compresso all'interno del tampone tale da ridurre lo scarico tensionale e quindi le tensioni totali verticali lungo la base del tampone sono superiori al contributo del solo peso come si può osservare nella Figura 67. L'effetto arco si origina grazie all'attrito presente all'interfaccia tra diaframma-terreno e per questo motivo sono state eseguite le analisi sia con i parametri di resistenza ridotti M2 che con i parametri caratteristici. Nella Figura 68 è riportato l'andamento delle tensioni principali e delle relative direzioni in cui si può ben osservare l'effetto arco che si origina nella zona migliorata.

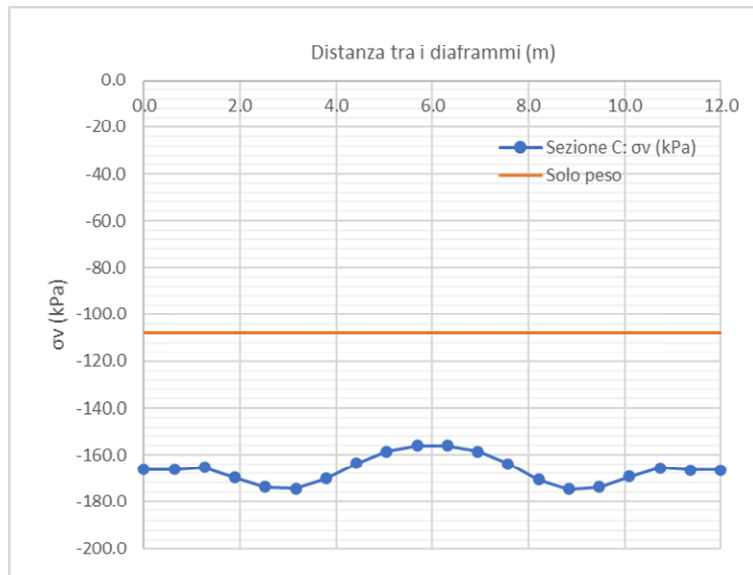


Figura 67 Analisi 1b: andamento delle tensioni verticali totali alla quota di base del tampone per tutta la sua estensione tra i due diaframmi (lungo sezione C di Figura 66).

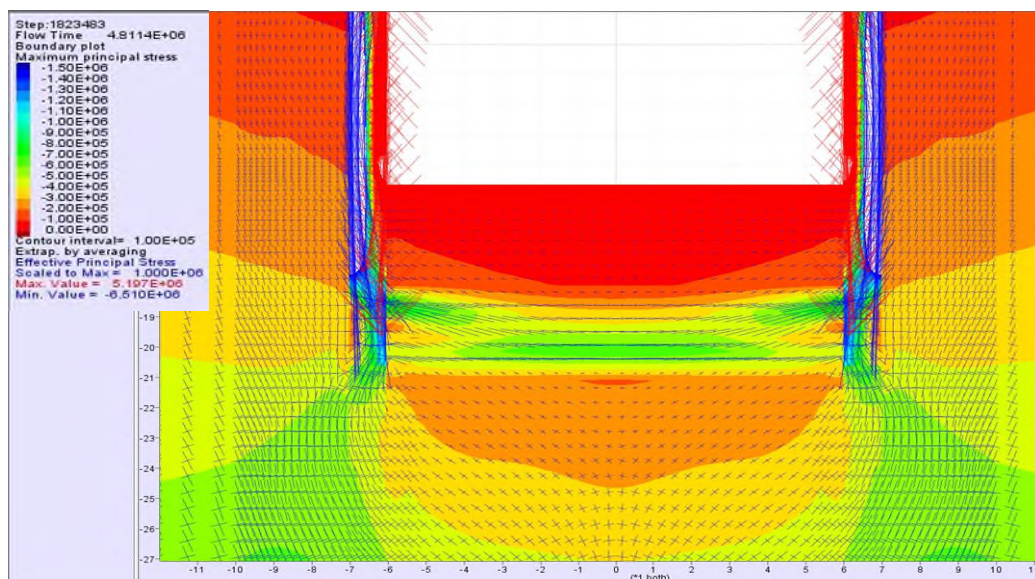


Figura 68 Analisi 1b: andamento tensioni principali nella zona del tampone compensato.

- *Resistenze*: come indicato in precedenza la resistenza legata all'attrito all'interfaccia diaframma-terreno (Sezione A di Figura 66) è data dall'integrazione delle tensioni tangenziali lungo le due interfacce terreno-diaframma. Nella Figura 69 è illustrato, per una delle due interfacce, l'andamento delle tensioni tangenziali. È interessante osservare l'incremento delle tensioni tangenziali in corrispondenza della zona migliorata (tra 3.5-6.0m) proprio dove si scarica l'arco compresso che si origina.

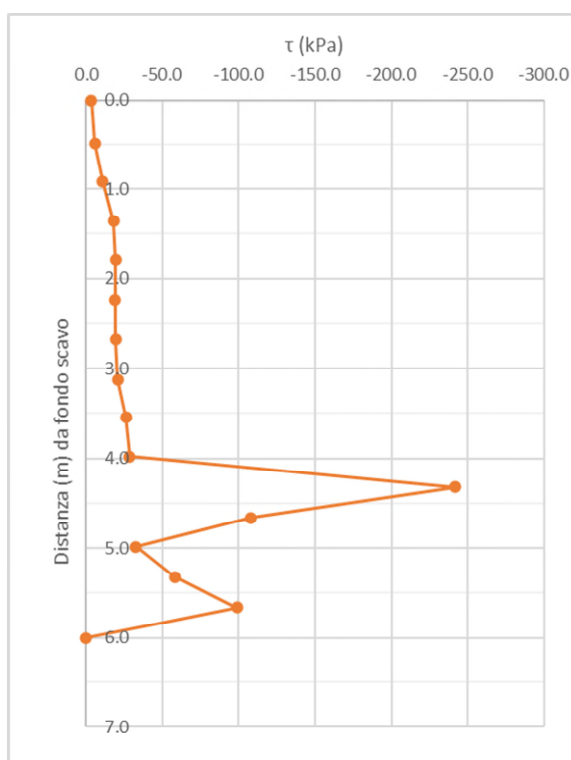


Figura 69 Analisi 1b: andamento delle tensioni tangenziali lungo una delle due interfacce diaframma-terreno (lungo sezione A di Figura 66).

- *Azioni instabilizzanti*: la spinta dovuta all'acqua è stata infine determinata integrando le pressioni interstiziali valutate alla base del tampone e quindi a -6.0 m da fondo scavo. Nella Figura 70 è illustrata la distribuzione delle pressioni interstiziali nel modello e lungo la sezione verticale B (vedasi Figura 66) passante per la mezzera del tampone. Si osserva una maggiore riduzione delle pressioni generate dalla filtrazione nello strato migliorato.



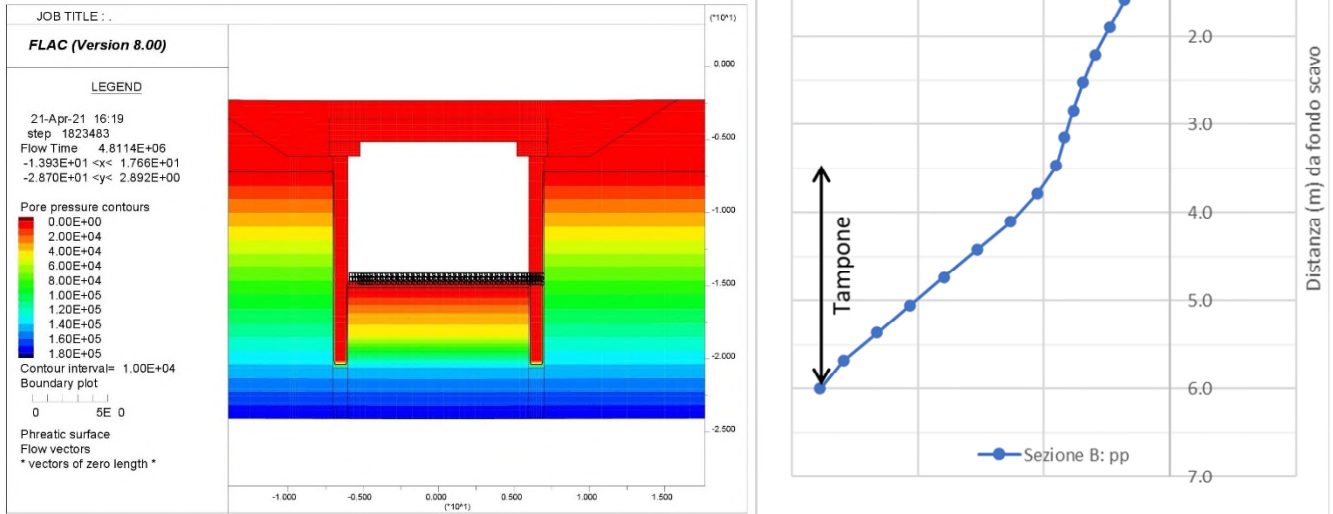


Figura 70 Analisi 1b: andamento pressioni interstiziali: vista di insieme e profilo verticale lungo sezione B (vedasi Figura 66).

Nella Tabella 13 si riportano i fattori di sicurezza ottenuti per i vari scenari descritti in precedenza, calcolati convenzionalmente come rapporto tra tensione verticale stabilizzate e pressione idrostatica instabilizzante alla base del trattamento, letti dai modelli stessi.

Per poter valutare l'importanza dell'effetto arco è utile confrontare i coefficienti di sicurezza riassunti nella Tabella 13 con il rapporto non fattorizzato, sempre rispetto alla base del tampone, tra il peso proprio del terreno saturo e la sottospinta idraulica:

$$F_s = \frac{\gamma_{sat} \cdot h \cdot L}{\gamma_w \cdot h_w \cdot L} = \frac{20 \cdot 6 \cdot 12}{9.81 \cdot 13 \cdot 12} = 0.94$$

Tabella 13: Fattori di sicurezza al galleggiamento.

Riferimento: base tampone compensato -6m da fondo scavo		
Analisi	Parametri	F <sub>s</sub>
1a	M1	1.18
1b	M2	1.20
2a	M1	1.14
2b	M2	1.16

<b>GENERAL CONTRACTOR</b> 	<b>ALTA SORVEGLIANZA</b> 				
<b>GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI</b>	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 87 di 90

Nelle figure seguenti si riportano la deformata del fondo scavo e le zone plasticizzate per le analisi 1b e 2b. È possibile quindi osservare che in tutti i casi analizzati le modellazioni hanno mostrato il raggiungimento delle condizioni di stabilità del fondo senza mostrare sollevamenti o plasticizzazioni eccessive del fondo scavo.

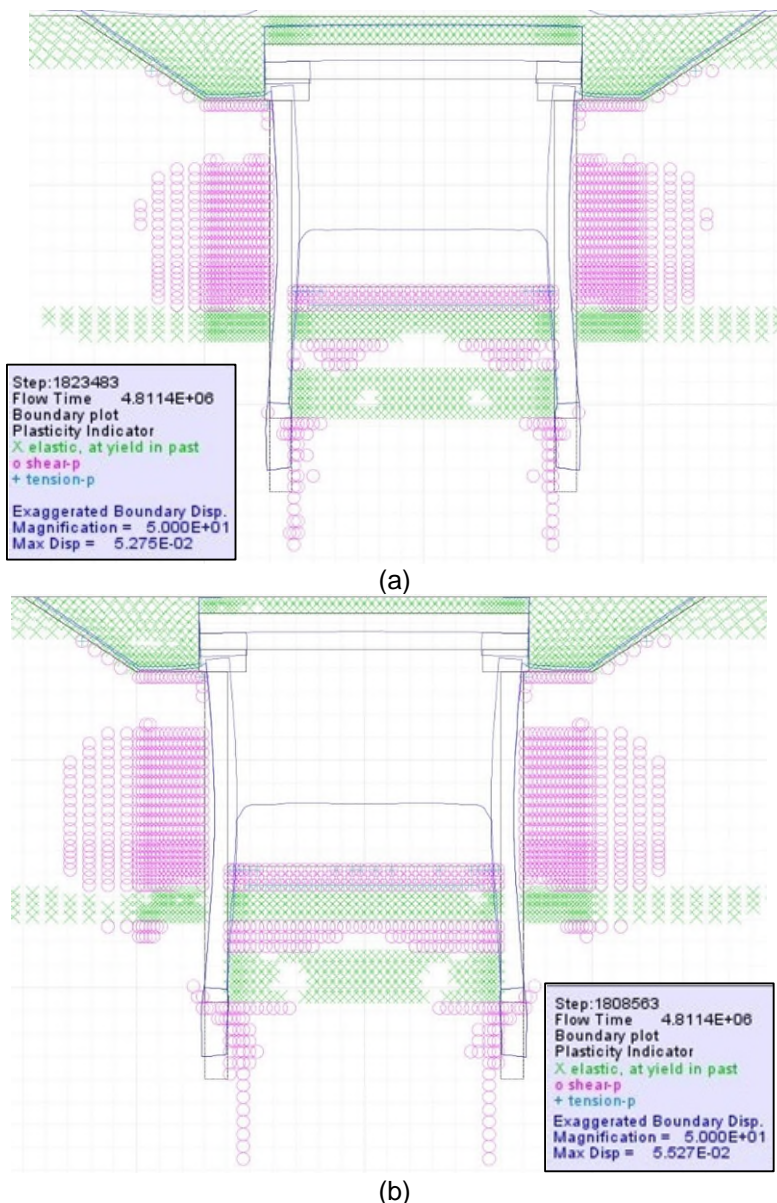


Figura 71 Zone plasticizzate e deformazioni del fondo scavo: (a) Analisi 1b (massimo sollevamento fondo scavo 5.28 cm); (b) Analisi 2b (massimo sollevamento fondo scavo 5.53 cm).

In conclusione si può affermare che anche per la sezione TA le variazioni di permeabilità e di resistenza del trattamento riducono i fattori di sicurezza che appaiono comunque in tutti i casi superiori a quelli minimi previsti con i metodi di calcolo semplificati. Il contributo stabilizzante dovuto alla formazione di un arco resistente al di sotto del fondo scavo è quindi sfruttato in larga misura per l'ottenimento del fattore di sicurezza 1.1/0.9 previsto dalla normativa. Si evidenzia che tale fattore di sicurezza è applicato ad una condizione limite, nella quale la falda si porta circa 2.5 m al di sopra del livello di riferimento il quale a sua volta corrisponde al livello medio reale di falda + 0.5 m.

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 88 di 90

### 7.4.5 Stima delle portate entranti al variare dei coefficienti di permeabilità del tampone di fondo

I criteri di modellazione analisi sono analoghi a quelli presentati per la sezione TS.

Nella Figura 41 è mostrato un esempio della distribuzione delle pressioni interstiziali e dei vettori di flusso ottenuti nell'analisi 2.

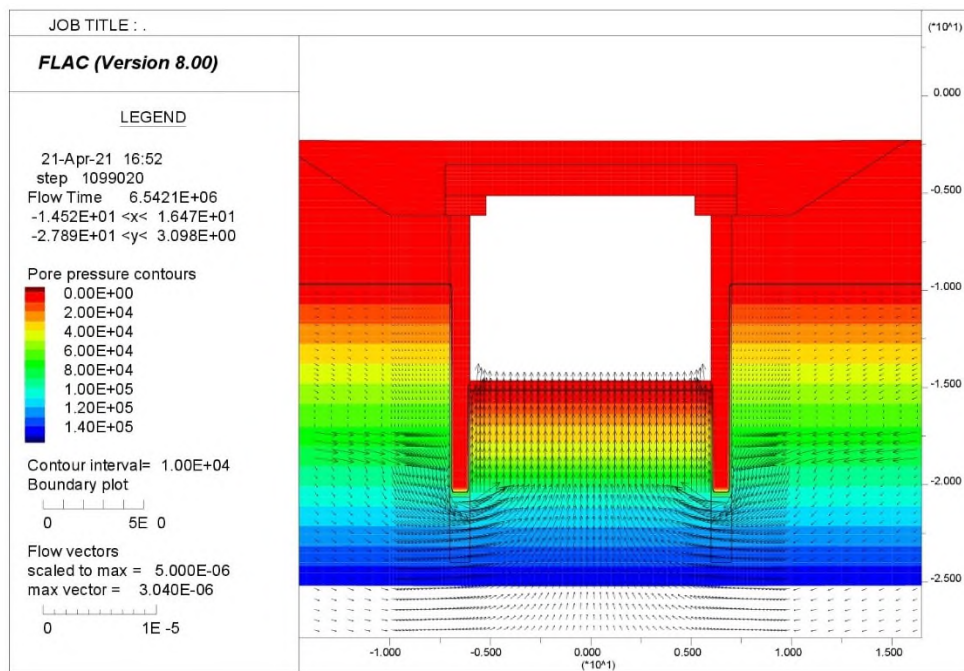


Figura 72 Analisi 2: distribuzione delle pressioni interstiziali e dei vettori di flusso.

Per le due analisi eseguite, caratterizzate da permeabilità differenti, si sono ottenuti i seguenti valori di portata  $q$  entrante nello scavo valutati per metro di estensione longitudinale:

- Analisi 1 (con permeabilità della zona migliorata inferiore di  $k = 5e-7$  m/s e permeabilità della zona superiore di  $k = 1e-6$  m/s)  $\rightarrow q = 3.355e-5$  m<sup>3</sup>/s/m = 120.8 l/h/m;
- Analisi 2 (con permeabilità di entrambi le zone migliorate pari a  $k = 1e-6$  m/s)  $\rightarrow q = 4.089e-5$  m<sup>3</sup>/s/m = 147.2 l/h/m.

La valutazione delle portate è stata fatta considerando il livello di falda al livello di costruzione. Tali risultati sono compresi nel range di portate valutato con i metodi semplificati.

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 				
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 89 di 90

## 8 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nella presente relazione sono stati sviluppati alcuni modelli numerici rappresentativi delle sezioni di consolidamento e scavo soggette ai massimi battenti idraulici lungo la galleria artificiale GA01, al fine di meglio indagare la risposta tensio-deformativa dei diaframmi e del tampone di fondo nelle seguenti condizioni di falda:

- falda a livello di breve termine incrementata per un coefficiente 1.1 (incremento di 1.1 del peso di volume dell'acqua) e contemporanea riduzione del peso del materiale stabilizzante (jet grouting e terreno non trattato al di sopra del tampone di fondo) per un coefficiente pari a 0.9, sempre applicando parametri ridotti del terreno mediante i coefficienti M1;
- medesimo livello di falda ed ipotesi del punto precedente assumendo però questa volta i parametri ridotti del terreno mediante i coefficienti M2.

Sono stati considerati, per i diversi livelli di falda, differenti schemi di vincolo e condizioni di confinamento laterale dei diaframmi imposte dalla profondità dello scavo rispetto al piano campagna originario.

I modelli analizzati hanno permesso di validare le procedure semplificate descritte nelle relazioni di calcolo di cui al § 2.2 sia nei confronti della rottura del fondo scavo, sia nei confronti del sollevamento.

Le strutture oggetto di analisi sono state modellate con elementi griglia (soletta di copertura, diaframmi, contropareti e soletta di fondo), tenendo quindi conto degli spessori geometrici reali, si è potuto simulare in modo completo l'interazione tra diaframmi e contropareti, nonché gli effetti di vincolo alla rotazione offerto dallo spessore del diaframma (anche in condizioni di vincolo cerniera) e in fase finale, dopo la costruzione della struttura interna. Determinate le sollecitazioni nei vari step di calcolo a breve e lungo termine nei diaframmi e nelle contropareti è stato quindi possibile calcolare a posteriori il coefficiente "r" di ripartizione e quindi validare le assunzioni fatte tramite l'approccio semplificato descritto nelle relazioni di calcolo.

Le analisi di stabilità condotte con differenti approcci numerici, considerando variazioni parametriche sia dei parametri di resistenza del trattamento in jet grouting, sia dei parametri di permeabilità hanno mostrato, inoltre, che è possibile – a sostanziale parità di lunghezza diaframmi rispetto a quella prevista in sede di progetto definitivo originario - raggiungere condizioni di stabilità del fondo scavo anche con falda di breve termine in assenza di ulteriori elementi di presidio, quali pozzi drenanti profondi per il controllo delle escursioni di falda.

In particolare, le analisi numeriche hanno mostrato che la soluzione progettuale appare robusta anche nei più gravosi scenari analizzati e che il metodo di calcolo semplificato, proposto nelle relazioni di calcolo strutturale di cui al § 2.2 è idoneo a effettuare il dimensionamento delle opere e quindi è uno strumento di progettazione adeguato per le sezioni intermedie tra quelle limite studiate nel dettaglio con i modelli numerici.

Da ultimo, si aggiunge che gli scavi saranno eseguiti in presenza di un monitoraggio costante delle quote di falda: sarà quindi sempre possibile - in presenza di trend particolarmente sfavorevoli per quanto riguarda la risalita delle falda in funzione dei vari eventi di pioggia - calibrare l'ultimo scavo di ribasso all'interno della

GENERAL CONTRACTOR 		ALTA SORVEGLIANZA 			
GA01 – VALIDAZIONE DEL DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE E GEOTECNICO MEDIANTE ANALISI NUMERICHE BIDIMENSIONALI	Progetto IN17	Lotto 11	Codifica Documento EI2 RH GA 01 0 0 002	Rev. A	Foglio 90 di 90

sezione in modo tale da non sottoporre il tampone ai massimi battenti di progetto, procedendo eventualmente con scavi a campioni in fondazione, qualora opportuno.