

VARIANTE ALLA S.S.1 AURELIA (AURELIA BIS)  
 VIABILITA' DI ACCESSO ALL' HUB PORTUALE DI LA SPEZIA  
 INTERCONNESSIONE TRA I CASELLI DELLA A-12 E IL PORTO DI LA SPEZIA  
 3° LOTTO TRA FELETTINO E IL RACCORDO AUTOSTRADALE

PROGETTO ESECUTIVO DI STRALCIO E COMPLETAMENTO C - 3° TRATTO

PROGETTO ESECUTIVO

GE265



VISTO: IL RESPONSABILE  
DEL PROCEDIMENTO

RESPONSABILE  
DELL'INTEGRAZIONE DELLE  
PRESTAZIONI SPECIALISTICHE

PROGETTISTA SPECIALISTA

IL COORDINATORE DELLA  
SICUREZZA IN FASE DI  
PROGETTAZIONE

Ing. Fabrizio CARDONE

Ing. Alessandro RODINO

Ing. Alessandro RODINO

Dott. Domenico TRIMBOLI

OPERE MAGGIORI

GALLERIE NATURALI  
 GALLERIA NATURALE FELETTINO III  
 GALLERIA NATURALE  
 RELAZIONE TECNICA E DI CALCOLO

CODICE PROGETTO

NOME FILE

0000\_P00GN03STRRE03\_B

REVISIONE

SCALA:

PROGETTO

LIV. PROG. N. PROG.

CODICE  
ELAB.

P00GN03STRRE03

B

-

DPGE0265 E 20

B	REVISIONE A SEGUITO ISTRUTTORIA ANAS	Ottobre 2021	M. Barale	E. Giraudò	A. Rodino
A	EMISSIONE	Marzo 2021	M. Barale	E. Giraudò	A. Rodino
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO



INDICE	pag.
1. INTRODUZIONE .....	1
2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....	3
3. INQUADRAMENTO GENERALE .....	5
4. INQUADRAMENTO SISMICO .....	5
5. PROFILO GEOMECCANICO .....	8
6. MODALITÀ REALIZZATIVE PER IL COMPLETAMENTO .....	10
6.1 Sezioni tipo di avanzamento .....	11
6.1.1 Modalità esecutive delle iniezioni .....	16
6.2 Interventi propedeutici alla ripartenza da sud .....	20
6.3 Interventi di ripristino sagoma del tratto realizzato .....	24
6.3.1 Misure di convergenza .....	30
7. BACK ANALYSIS .....	33
7.1 Analisi numeriche .....	35
7.1.1 Codice di calcolo utilizzato .....	35
7.1.2 Geometrie dei modelli .....	36
7.1.3 Leggi di comportamento del materiale .....	38
7.1.4 Stato di sforzo iniziale .....	40
7.1.5 Scavo della galleria .....	40
7.1.6 Prerivestimento .....	41
7.1.7 Fasi di calcolo .....	42
7.2 Sintesi dei risultati .....	43
8. ANALISI DELLE STRUTTURE DI COMPLETAMENTO .....	47
8.1 Premessa .....	47
8.2 Classi di comportamento del fronte di scavo .....	47
8.3 Metodo delle linee caratteristiche .....	50
8.3.1 Metodo di calcolo .....	50
8.3.2 Curva caratteristica della cavità .....	52
8.3.3 Curva caratteristica del rivestimento .....	53
8.3.4 Procedimento .....	54

8.3.5	Valutazione della resistenza a taglio .....	57
8.3.6	Valutazione dell'incremento di rigidità.....	58
8.4	Metodo di Tamez .....	61
8.5	Analisi alle differenze finite.....	65
8.5.1	Analisi numeriche.....	65
8.5.2	Geometrie dei modelli .....	66
8.5.3	Leggi di comportamento del materiale.....	66
8.5.4	Stato di sforzo iniziale .....	67
8.5.5	Carichi idraulici .....	67
8.5.6	Azioni sismiche .....	68
8.5.7	Scavo della galleria.....	68
8.5.8	Prerivestimento e rivestimento definitivo .....	70
8.5.9	Criteri di verifica dei rivestimenti .....	72
8.5.10	Fasi di calcolo.....	74
8.6	Verifiche strutturali .....	77
8.6.1	Verifiche del prerivestimento .....	77
8.6.2	Verifiche SLU dei rivestimenti definitivi.....	78
8.6.3	Verifiche SLE dei rivestimenti definitivi .....	85
9.	ANALISI DI INTERFERENZA SCAVO-EDIFICIO N°8.....	89
9.1	Categorie di danno .....	92
9.1.1	Spostamenti e distorsioni limite .....	92
9.1.2	Stima delle deformazioni e definizione delle categorie di danno.....	93
9.1.3	Fasi di calcolo.....	97
9.1.4	Sintesi dei risultati .....	98
9.2	Interventi di stabilizzazione del versante .....	102
10.	MONITORAGGIO IN CORSO D'OPERA.....	108

**Allegati:**

1 | OUTPUT ANALISI FLAC

## 1. Introduzione

La presente Relazione viene redatta nell'ambito della redazione del Progetto Esecutivo di Completamento dello "Stralcio C" dei "Lavori di costruzione della variante alla S.S. 1 Aurelia (Aurelia bis), viabilità di accesso all'HUB portuale di La Spezia, interconnessione tra i caselli della A 12 e il porto di La Spezia – 3° Lotto tra Felettino ed il raccordo autostradale".

In particolare, vengono analizzate le problematiche relative ai lavori di completamento della galleria naturale Felettino III della lunghezza complessiva di 198.00 m.

Come risulta dagli elaborati di As-Built il fronte di scavo si trova alla pk. 3+312,07 e pertanto il tratto realizzato presenta una lunghezza di circa 105.21 m a partire dall'imbocco Sud posto alla pk. 3+417,28.

Negli atti amministrativi e progettuali disponibili viene evidenziato come la realizzazione della galleria abbia avuto notevoli difficoltà a causa della presenza di un ammasso di scadenti caratteristiche geomeccaniche. Si è altresì generata un'estesa situazione di dissesto caratterizzata da movimenti di versante profondi, che hanno coinvolto un edificio (indicato negli atti progettuali come Edificio n° 8) ubicato nel tratto centrale della galleria a breve distanza dal tracciato.

In sede realizzativa sono stati pertanto effettuati monitoraggi, indagini geognostiche integrative e studi mirati alla comprensione del fenomeno di dissesto.

A seguito delle indagini e degli studi effettuati era stata rianalizzata la condizione statica del versante e definite le modalità di intervento che vengono sostanzialmente condivise.

I risultati dell'analisi del dissesto, riportati nella relazione redatta dalla società Geoequipe St. Ass., sono riportati nella Relazione illustrativa (P01GN03GENRE01\_A). Vengono riportate nel Capitolo 7 "Analisi di interferenza scavo-edificio n°8" le conseguenti analisi effettuate in sede della Progettazione Costruttiva (Infra engineering e Rocksoil S.p.A., 2017).

Nel seguito vengono descritte le modalità realizzative da adottarsi per il completamento della Galleria previste nella presente sede progettuale e presentate le verifiche strutturali.

Come già evidenziato nella Relazione Tecnico Illustrativa (P00GN03GENRE01\_A) è da sottolineare che vista la delicatezza della situazione di dissesto quiescente, essendo i risultati dei monitoraggi aggiornati a ottobre 2016 e non conoscendo pertanto l'evoluzione del dissesto nei circa cinque anni trascorsi, vista altresì la complessità della situazione geomeccanica dell'ammasso roccioso e di quella idrogeologica geotecnica dei terreni di copertura e della parte più tettonizzata del basamento, si ritiene che sia oggettivamente non possibile una previsione certa del grado di ulteriore aggravamento del quadro fessurativo e più in generale della condizione statica dell'edificio n° 8, che

possa verificarsi nel corso dei lavori di costruzione della galleria.

Ne consegue che sussiste la possibilità che a fine lavori possa essere non economicamente sostenibile il recupero funzionale dell'edificio.

Per quanto sopra parrebbe consigliabile l'espropriazione dell'edificio e delle relative pertinenze.

## 2. Normativa di riferimento

Con riferimento al quadro normativo di riferimento progettuale per le strutture, si evidenzia che, il D.M. 17/01/2018 “Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»”, prevede, all’Art. 2 “Ambito di applicazione e disposizioni transitorie”, che *“per le opere pubbliche o di pubblica utilità in corso di esecuzione, per i contratti pubblici di lavori già affidati, nonché per i progetti definitivi o esecutivi già affidati prima della data di entrata in vigore delle norme tecniche per le costruzioni, si possono continuare ad applicare le previgenti norme tecniche per le costruzioni fino all’ultimazione dei lavori ed al collaudo statico degli stessi”*.

Pertanto, essendo l’attività da svolgere il progetto di completamento di opere già parzialmente realizzate il riferimento normativo di riferimento restano le Norme tecniche per le costruzioni» di cui al Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008.

Per quanto sopra la normativa di riferimento per il calcolo e la verifica delle strutture risulta essere la seguente:

- Decreto 14 gennaio 2008 "Norme tecniche per le costruzioni".
- Circolare Ministero Infrastrutture e Trasporti n. 617 del 2 Febbraio 2009 - “Istruzioni per l’applicazione delle Nuove Norme Tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 14 Gennaio 2008”.
- Legge 5 novembre 1971, n. 1086 - Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio armato normale e precompresso ed a struttura metallica.
- Circolare Ministero dei Lavori pubblici 14 febbraio 1974, n.11951 – Applicazione delle norme sul cemento armato.
- Eurocodici UNI EN 1990:2006; UNI EN 1991; UNI EN 1992; UNI EN 1993; UNI EN 1994; UNI EN 1997; UNI EN 1998
- Calcestruzzo - specificazione, prestazione, produzione e conformità (UNI EN 206-1:2006);
- UNI EN 1992-1-1:2005 - EC 2: PROGETTAZIONE DELLE STRUTTURE DI CALCESTRUZZO;
- D.M. LL. PP. 11 marzo 1988 “Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l’esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione” e le relative istruzioni (Circolare Ministero Lavori Pubblici 24 settembre 1988, N. 30483 - Circolare Ministero Lavori Pubblici 9 gennaio 1996, N. 218/24/3).
- D.M. LL. PP. 14 febbraio 1992 “Norme tecniche per l’esecuzione delle opere in

cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche” e le relative istruzioni (Circolare Ministero Lavori Pubblici 24 giugno 1993, N. 37406/STC).

- D.M. LL. PP. 9 gennaio 1996 “Norme tecniche per il calcolo, l’ecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche” e le relative istruzioni (Circolare Ministero Lavori Pubblici 15 ottobre 1996, N. 252).
- D.M. LL. PP. 16 gennaio 1996 “Norme tecniche relative ai «Criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e dei sovraccarichi»” e le relative istruzioni (Circolare Ministero Lavori Pubblici 4 luglio 1996, N. 156AA.GG./STC).
- Legge 2 Febbraio 1974 n° 64 - “Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche”.
- D.M. LL. PP. 16 gennaio 1996 “Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche” e le relative istruzioni (Circolare Ministero Lavori Pubblici 10 aprile 1997, N. 65/AA.GG.).
- Ordinanza n. 3274 20 marzo 2003 della Presidenza del Consiglio dei Ministri “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche per le costruzioni in zona sismica” e s.m.i.
- Presidenza del Consiglio dei Ministri – Ordinanza n. 3519 del 28 Aprile 2006 - “Criteri generali per l’individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l’aggiornamento degli elenchi delle medesime zone”.



### 3. Inquadramento Generale

Ai fini delle analisi e delle verifiche riportate nella presente relazione, nel seguito si evidenziano le principali caratteristiche di Ubicazione e Classificazione dell'opera necessarie per la più corretta definizione delle azioni di calcolo, in accordo a quanto previsto dal D.M.17/01/2018.

- Latitudine: 44.1212°
- Longitudine: 9.8573°
- Tipo di costruzione: 2 (costruzioni con livelli di prestazione ordinari);
- Vita nominale:  $V_N \geq 50$  anni
- Classe d'uso: III (Reti viarie extraurbane).
- Coefficiente d'uso:  $C_u = 1,5$
- Periodo di riferimento per le azioni sismiche:  $V_R = V_N \cdot C_u = 75$  anni

### 4. Inquadramento Sismico

La definizione delle azioni sismiche di progetto viene effettuata in funzione della "pericolosità sismica di base" del sito mediante i seguenti parametri:

- Accelerazione sismica al sito:  $a_g$  [m/s<sup>2</sup>]
- Fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione:  $F_0$
- Periodo del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione:  $T_c^*$  [ s ]

variabili in funzione delle coordinate geografiche di localizzazione dell'opera (latitudine e longitudine) ed in relazione alla probabilità di superamento nel periodo di riferimento adottata e, pertanto, in relazione al particolare stato limite considerato.

Tali valori sono definiti secondo quanto indicato nell'Allegato B al D.M. Infr. del 14/01/2008<sup>(\*)</sup>.

(\*) Per la definizione dei parametri sismici di cui sopra, il D.M. 17/01/18, al cap. 3.2, rimanda agli Allegati A e B del D.M. 14/01/08).

Nella tabella che segue sono riassunti, per i quattro vertici del reticolo di riferimento che racchiudono il sito in esame, i valori identificativi in termine di numero ed ubicazione geografica e le rispettive distanze dal sito di costruzione.

<p>Posizione del sito</p> <p>Comune: <input type="text" value="La Spezia - (SP)"/></p> <p> <input type="radio"/> Longitudine <input type="text" value="9.8625"/>  <input checked="" type="radio"/> Latitudine <input type="text" value="44.1173"/> </p> <p style="text-align: center;"><input type="button" value="Cerca con Google Map"/></p> <p> <input type="radio"/> Isola: <input type="text" value="Sardegna"/> </p>	<p>Nodi intorno al sito</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>ID</th> <th>Longitudine</th> <th>Latitudine</th> <th>Dist. sito (Km)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>18263</td> <td>9.8683</td> <td>44.1290</td> <td>1.3822</td> </tr> <tr> <td>18262</td> <td>9.7987</td> <td>44.1270</td> <td>5.2105</td> </tr> <tr> <td>18484</td> <td>9.8018</td> <td>44.0770</td> <td>6.6075</td> </tr> <tr> <td>18485</td> <td>9.8712</td> <td>44.0790</td> <td>4.3191</td> </tr> </tbody> </table>	ID	Longitudine	Latitudine	Dist. sito (Km)	18263	9.8683	44.1290	1.3822	18262	9.7987	44.1270	5.2105	18484	9.8018	44.0770	6.6075	18485	9.8712	44.0790	4.3191
ID	Longitudine	Latitudine	Dist. sito (Km)																		
18263	9.8683	44.1290	1.3822																		
18262	9.7987	44.1270	5.2105																		
18484	9.8018	44.0770	6.6075																		
18485	9.8712	44.0790	4.3191																		

I parametri sismici per il sito di costruzione vengono quindi determinati come media ponderata tra i quattro vertici di cui sopra adottando come "peso" l'inverso delle relative distanze:

$$p = \frac{\sum_1^4 \frac{p_i}{d_i}}{\sum_1^4 \frac{1}{d_i}}$$

dove:

p = valore del parametro di interesse;

pi = valori del parametro relativi ai quattro vertici del reticolo;

di = distanze dei quattro vertici dal punto in esame.

In relazione alla classe d'uso e al periodo di riferimento per le azioni sismiche adottati (75 anni), nel seguito sono rappresentati i valori dei parametri sismici del sito di costruzione per ciascuno stato limite di riferimento.

<input type="button" value="Ricalcola &gt;"/>	Parametri di pericolosità sismica			<input type="button" value="Ok e avanti &gt;"/> <input type="button" value="Annulla e avanti &gt;"/> <input type="button" value="?"/>	
		ag (g/10)	F0 (adim)		TC*(sec)
	SLO	0.48736672	2.51723142		0.23675919
	SLD	0.59465566	2.53684531		0.26021703
	SLV	1.44131862	2.38856595		0.29558683
SLC	1.82890208	2.37984153	0.30430861		
N.B. Dal valore tabellato, per ottenere ag in (g), dividerlo per 10; per ottenerlo in m/sec <sup>2</sup> , moltiplicarlo per 0.9806					

La risposta sismica locale deve poi essere corretta in relazione alla "Categoria del Suolo" e alle "Condizioni Topografiche" proprie del sito di costruzione mediante i relativi coefficienti di amplificazione.

Relativamente alla categoria topografica, data la collocazione dell'opera in profondità, si assume un coefficiente di amplificazione topografica pari a:

$$S_T = 1.00$$

Per quanto riguarda la categoria del suolo si può ascrivere il sottosuolo alla categoria C (cfr. tabella seguente).

A tale tipologia di sottosuolo si associa il seguente valore del coefficiente di Amplificazione Stratigrafica delle azioni sismiche:

$$S_S = 1.50$$

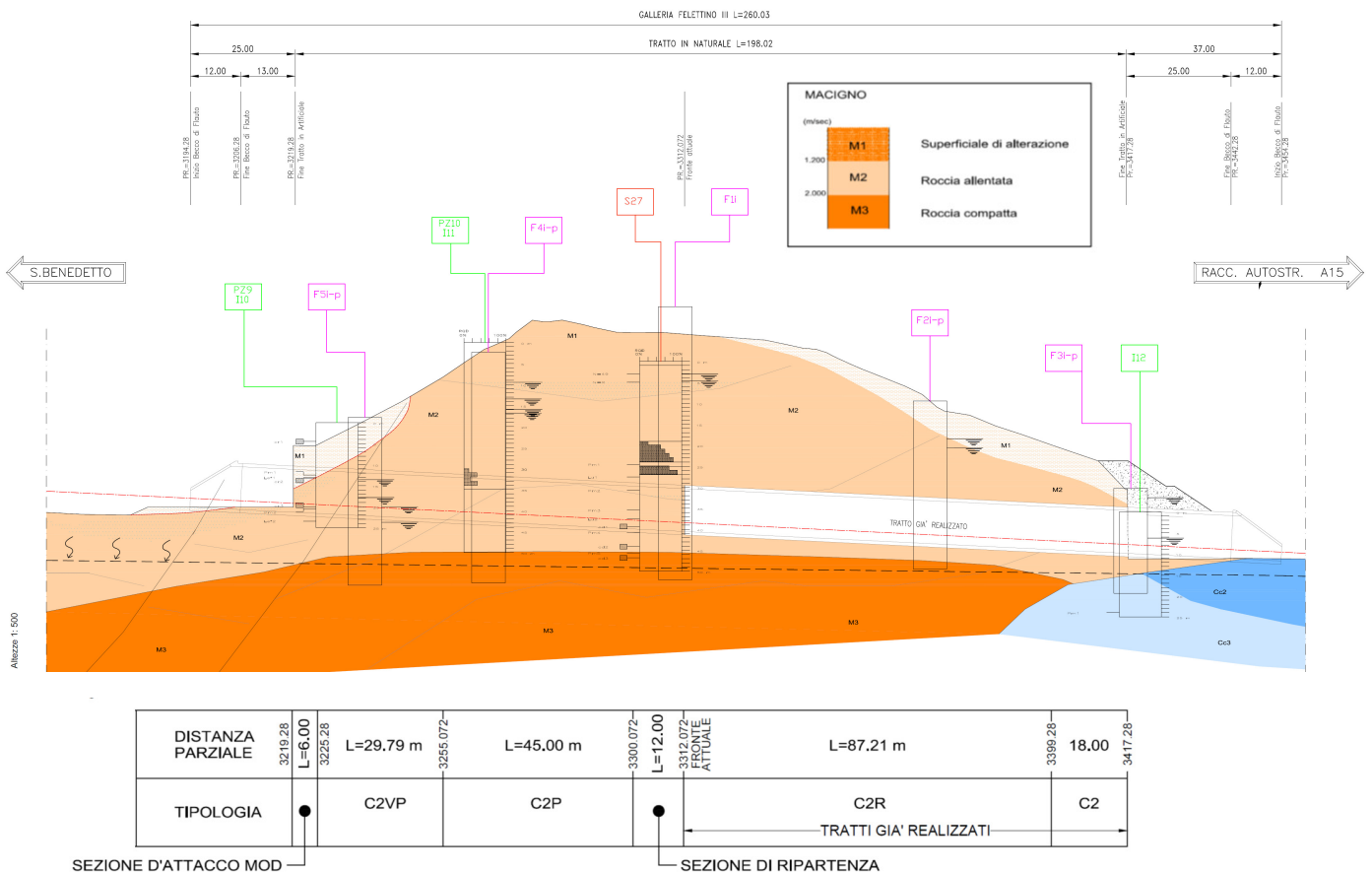
**Tab. 3.2.II** – *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.

## 5. Profilo geomeccanico

Alla luce delle indagini, dei rilievi geologico-geomeccanici effettuati al fronte di avanzamento dello scavo e del complesso di studi svolti, era stato elaborato un profilo geomeccanico che viene riportato nell'immagine seguente. Per approfondimenti si rimanda agli specifici elaborati.

Nel seguito viene riportato con l'indicazione delle sezioni tipo di intervento che verranno successivamente descritte.



**Figura 1 – Profilo geomeccanico**

In particolare, nel tratto in oggetto l'ammasso roccioso risulta costituito alternanze decimetriche arenacee e pelitiche con prevalenza di quest'ultima litologia.

La successione ricostruita dalle indagini effettuate, ed in particolare dalle risultanze delle analisi sismiche, si suddivide in tre facies:

- M1 – Superficiale di alterazione;
- M2 – Roccia allentata;
- M3 – Roccia compatta.

## 6. Modalità realizzative per il completamento

Sulla base dei risultati della back-analysis, riportati in dettaglio in un capitolo specifico a seguire, e della generale compressione del fenomeno di dissesto, in sede della Progettazione Costruttiva erano state definite nuove sezioni tipo di intervento per il completamento della galleria.

Sulla base delle valutazioni in merito alla stabilità del fronte eseguite sia con il metodo delle linee caratteristiche che con il metodo di Tamez, riportate successivamente nella presente relazione, nel caso in esame il fronte è certamente classificabile come instabile nel breve termine e ricade quindi nella categoria C, e richiede specifici interventi per assicurarne la stabilità.

Tale obiettivo è ottenuto mediante il contenimento del nucleo-fronte, mediante l'incremento del numero dei consolidamenti VTR.

Inoltre è indispensabile l'utilizzo di una centina chiusa in arco rovescio con puntone metallico, che, oltre a contrastare le convergenze, permetterà di ripartire i carichi gravitativi su una maggiore superficie d'appoggio, contenendo i fenomeni di cedimento per punzonamento al piede centina.

Per prevenire da un lato fenomeni di instabilità al contorno del cavo dettati dall'intensa tettonizzazione dei materiali presenti e, dall'altro, per consentire l'artificiale creazione di un effetto arco e ridistribuire così i sovraccarichi tensionali, è necessario realizzare una efficace coronella di materiale consolidato al contorno (Sezione tipo C2P).

Per raggiungere l'effetto richiesto tramite iniezioni selettive in pressione con VTR valvolati, sono introdotte modifiche operative mediante una specifica procedura per ottenere adeguati assorbimenti nell'ammasso (riduzione della portata d'iniezione fino a 5 l/min, pressioni d'iniezione non superiori a 10-15 bar, incremento rapporto a/c fino a 1).

Cionondimeno, nelle zone a più ridotta copertura a partire dall'imbocco Nord alla coronella consolidata al contorno verrà integrato un intervento di presostegno metallico (Sezione tipo C2VP).

## 6.1 Sezioni tipo di avanzamento

Nel seguito vengono descritti gli interventi per le due sezioni tipo previste, la sezione C2P e la sezione C2VP.

### Caratteristiche della Sezione tipo C2P

La sezione tipo in fase costruttiva è costituita da:

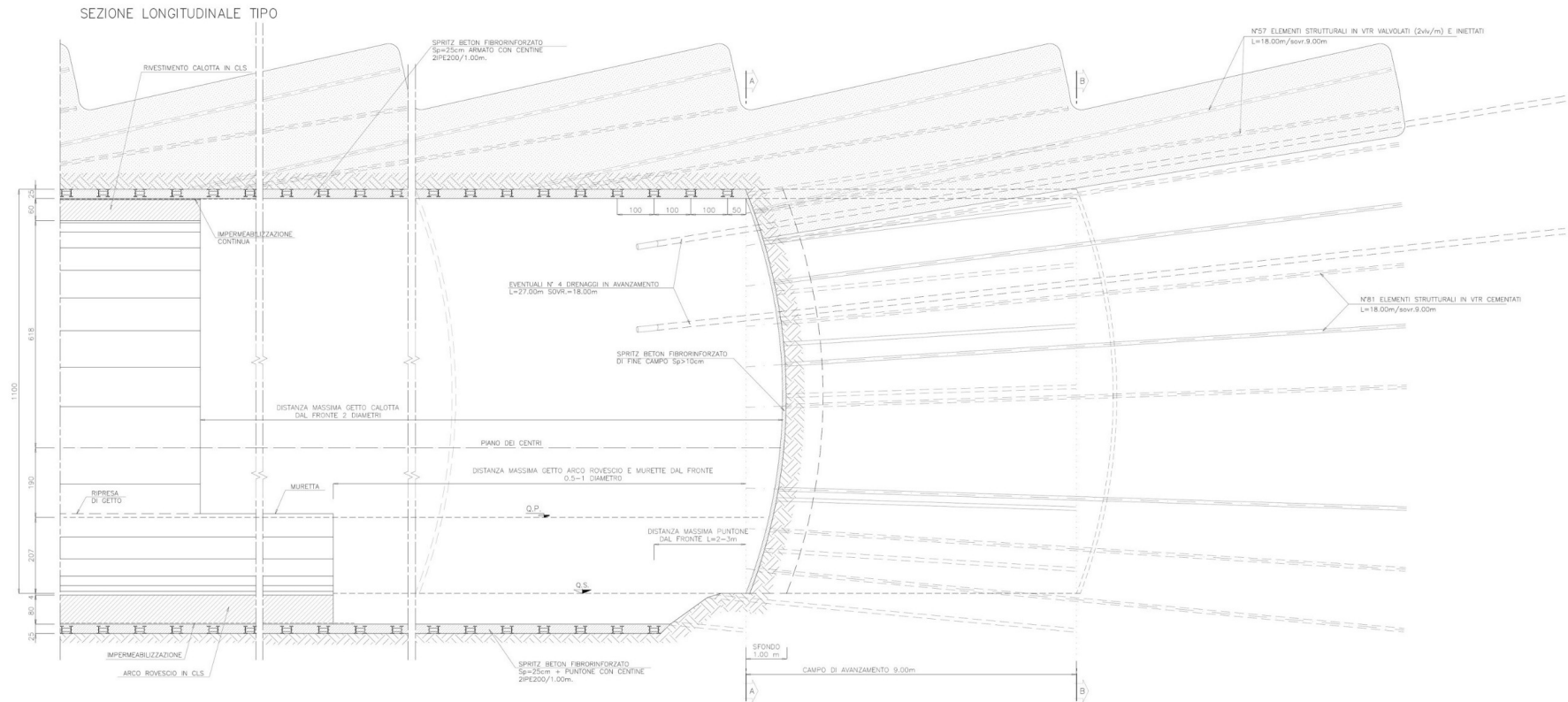
- spritz-beton fibrorinforzato al contorno ed in arco rovescio  $sp = 25$  cm;
- centine 2IPE200/1.00 m;
- n° 81 elementi strutturali in VTR cementati al fronte,  $L=18$  m, sovr.= 9m;
- n° 57 elementi strutturali in VTR valvolati (2vlv/m) iniettati al contorno,  $L=18$  m, sovr.=9m;
- n° 4 drenaggi eventuali, di lunghezza  $L = 27.00$  m e sovr.=18.00m.
- murette e A.R. in C.A.. di spessore minimo 0.80 m, gettato ad una distanza  $< 0.5-1 \phi$  dal fronte;
- impermeabilizzazione full-round;
- calotta in C.A. di spessore in chiave di 0.60 m, gettata ad una distanza  $\leq 2 \phi$  dal fronte.

### Caratteristiche della Sezione tipo C2VP

La sezione tipo in fase costruttiva è costituita da:

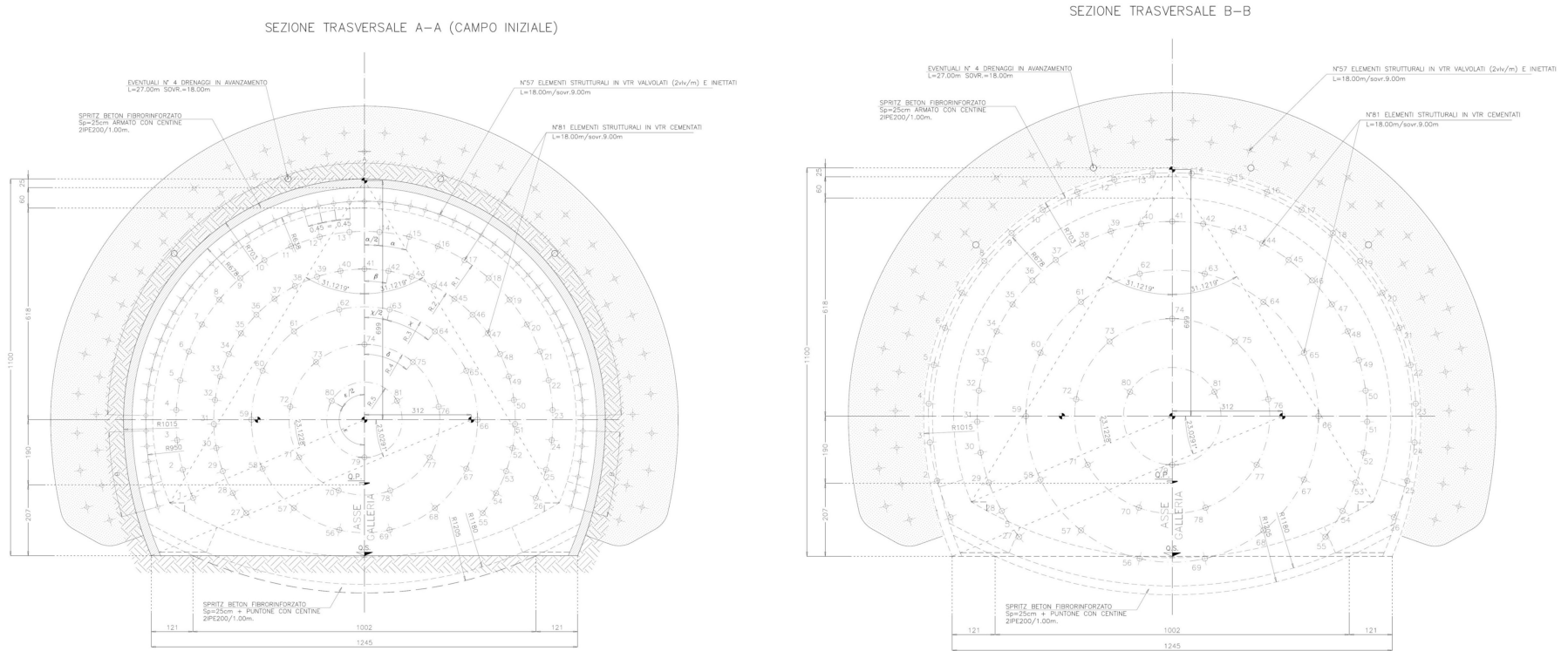
- spritz-beton fibrorinforzato al contorno ed in arco rovescio  $sp = 25$  cm;
- centine 2IPE200/1.00 m + puntone in arco rovescio;
- n° 81 elementi strutturali in VTR cementati al fronte,  $L=18$  m, sovr.= 9m;
- n° 61 elementi strutturali in VTR valvolati (2vlv/m) iniettati al contorno,  $L=18$  m, sovr.=9m;
- n° 36 tubi in metallici  $\phi 114.3$  sp 8 mm in calotta,  $L=15$  m, sovr.= 6 m;
- n° 4 drenaggi eventuali, di lunghezza  $L = 27.00$  m e sovr.=18.00m.
- murette e A.R. in C.A. di spessore minimo 0.80 m, gettato ad una distanza  $< 0.5-1 \phi$  dal fronte;
- impermeabilizzazione full-round;
- calotta in C.A. di spessore variabile in chiave, da un minimo di 0.60 m ad un massimo di 1.25 m, gettata ad una distanza  $\leq 2 \phi$  dal fronte.

Nelle immagini seguenti si riportano i dettagli delle sezioni tipo.

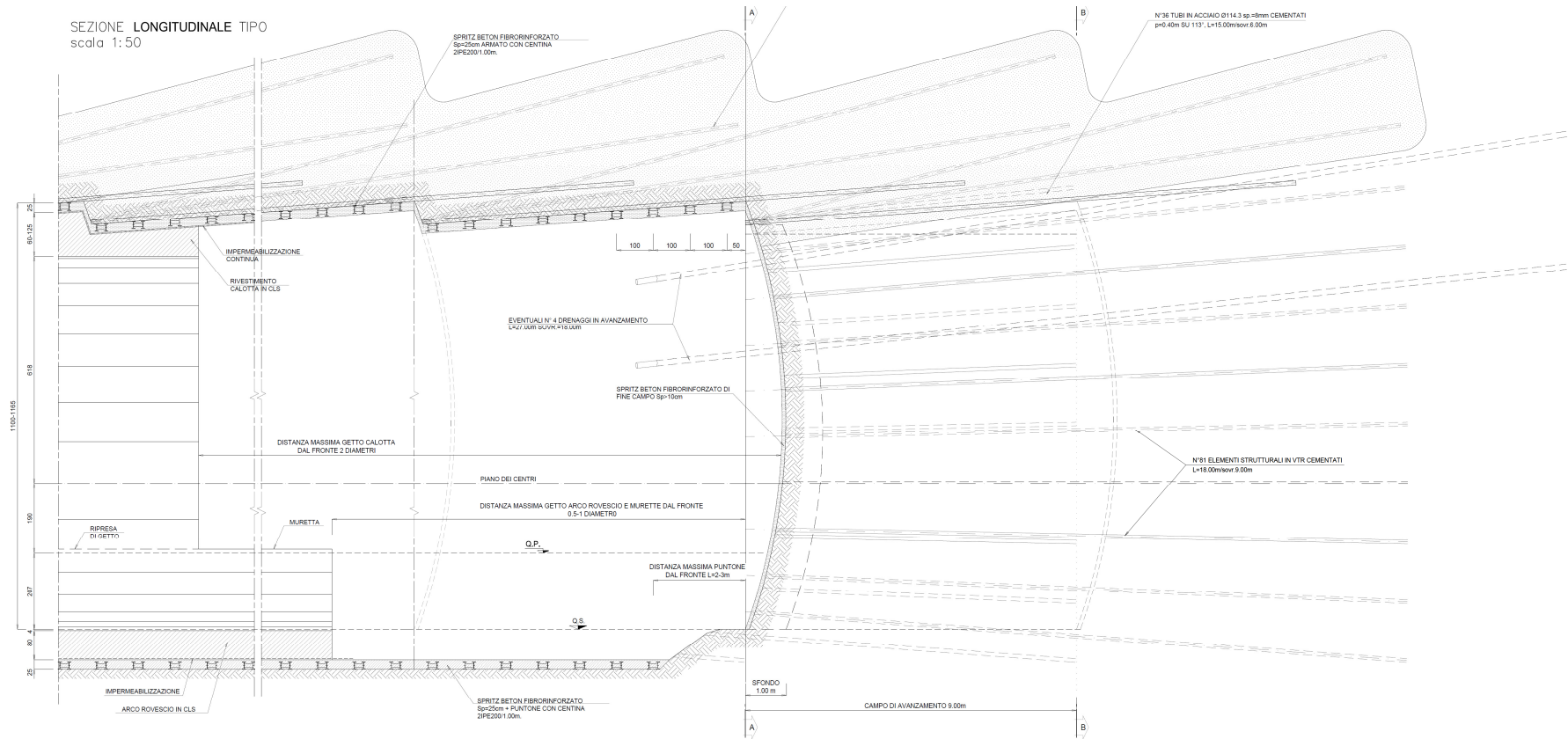


**Figura 2 – Sezione C2P – Sezione longitudinale**





**Figura 3 – Sezione C2P – Sezioni trasversali**



**Figura 4 – Sezione C2VP – Sezione longitudinale**

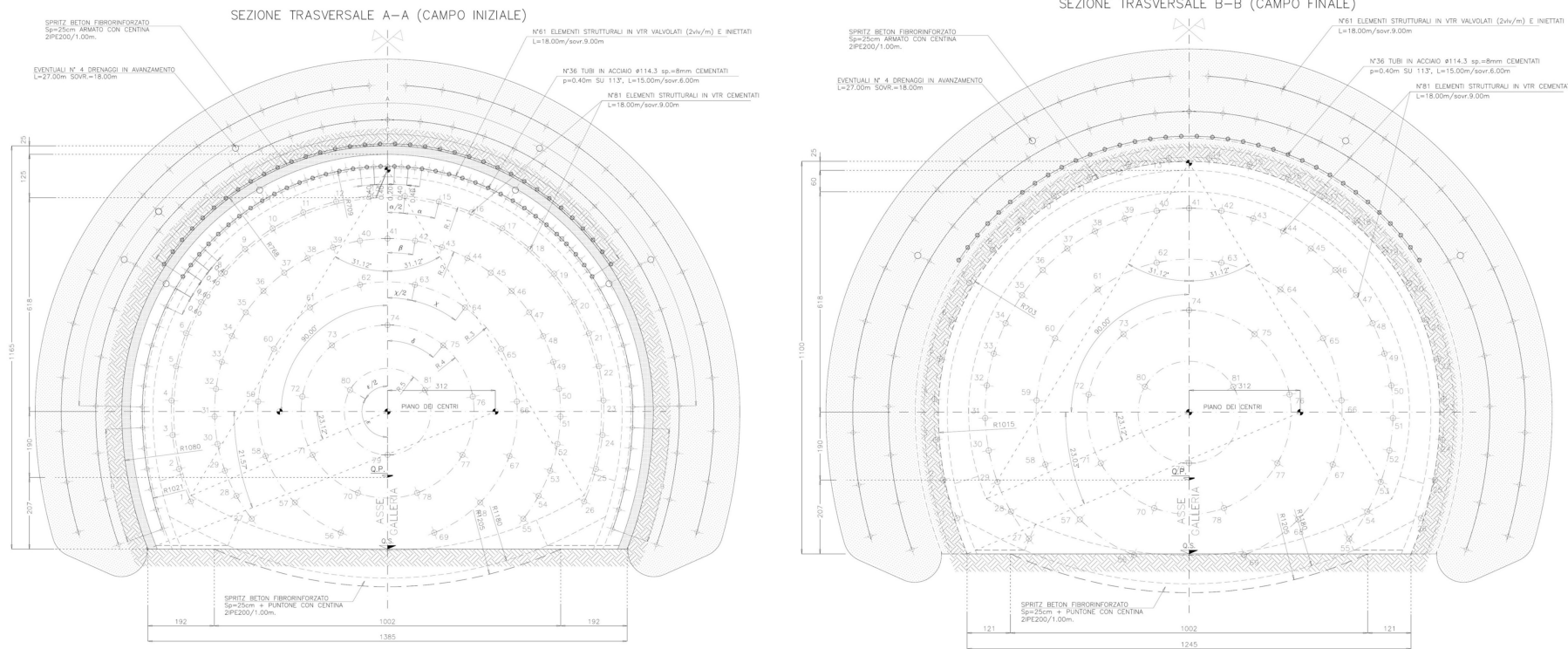


Figura 5 – Sezione C2VP – Sezioni trasversali

### 6.1.1 Modalità esecutive delle iniezioni

Come per il tratto già realizzato e come era previsto nel Progetto costruttivo, le sezioni tipo C2P e C2VP, tra le altre cose, prevedono la realizzazione di un intervento di consolidamento al contorno mediante iniezioni cementizie selettive in pressione attraverso VTR valvolati (2valv./m).

La presenza di un ammasso fortemente tettonizzato motiva, infatti, il requisito progettuale imprescindibile di ottenere un'adeguata coronella di materiale consolidato al contorno, per garantire le condizioni di stabilità in fase di scavo.

Nonostante il grado di fratturazione dell'ammasso risulti essere elevato, le prove di permeabilità eseguite hanno indicato per la formazione del Macigno valori di permeabilità MEDI ( $K = 10^{-5} - 10^{-6}$  m/sec), come indicato nel profilo geomeccanico della galleria in oggetto. Trattasi prevalentemente di permeabilità secondaria "per fratturazione", che risulta essere ridotta a causa, con ogni probabilità, del riempimento pelitico di parte delle fratture presenti. I valori di permeabilità potrebbero essere anche inferiori di quelli previsti in sede di PE, come si evince dall'analisi dei rilievi geologici dell'ammasso fino ad ora interessato dagli scavi.

Così come per la sezione tipo C2 di PE, anche le sezioni tipo C2P e C2VP prevedono che venga realizzata una fascia di materiale consolidato su tutto lo sviluppo del cavo di spessore minimo pari a 2 m ca (Fig. 1).

Considerata la maglia di VTR (2 valv./m) prevista ed associando ai valori di permeabilità previsti e prevedibili i valori corrispondenti di porosità efficace stimata, è possibile stimare i volumi controllati da iniettare per ogni singola valvola (vedi tabella 3).

Volume d'iniezione V (l/valv.)	Pressione d'iniezione P (bar)	Portata d'iniezione Q (l/min.)	Pressione residua Pr (bar)
60-80	≤10-15	10 l/min	≥3÷5 (per 1 min. ca.)

Tab. 3: parametri d'iniezione al contorno in funzione della permeabilità d'ammasso

La pressione d'iniezione dovrà mantenersi preferibilmente entro i 10-15 bar allo scopo di evitare significativi fenomeni di idrofratturazione del materiale. A tale scopo la portata d'iniezione dovrà essere adeguatamente ridotta al ridursi della permeabilità, al fine di consentire il raggiungimento dei volumi d'iniezione richiesti senza portare anticipatamente "a rifiuto" il materiale. Al raggiungimento del volume controllato, a verifica della avvenuta saturazione del materiale, si dovrà registrare su ogni valvola il mantenimento per almeno un minuto di una pressione residua pari a 3-5 bar. Diversamente, attesa opportuna maturazione, si dovrà procedere ad una seconda passata d'iniezione.

### ***Sequenza di perforazione ed iniezione***

Si procederà a eseguire le perforazioni a secco su fori non adiacenti, inserendo i tubi in VTR dotati di 2 vlv/m dopo ogni singolo foro ed effettuando l'iniezione di guaina dopo 10/15 fori, al fine di evitare fenomeni di franamento dei fori stessi.

La fase di iniezione avverrà a partire da fondo foro di ogni singolo VTR e completando prima la corona più esterna in modo da cercare di confinare l'intervento e limitare eventuali fuoriuscite di boiaccia dalla zona voluta dal progetto.

### ***Iniezione di guaina***

La miscela da adottare per la cementazione di guaina avrà le seguenti caratteristiche:

- rapporto acqua/cemento  $\approx 1.5$
- bentonite  $\approx 4 \%$

In alternativa, in luogo dell'utilizzo della bentonite, potrà essere incrementato il rapporto acqua cemento, avendo cura comunque di completare la fase di iniezione selettiva nelle valvole del singolo tubo entro le 12 ore circa dalla realizzazione della guaina del tubo stesso, al fine di evitare un eccessivo indurimento della guaina tale da non consentire l'apertura delle valvole per rottura della stessa mediante le usuali massime pressioni utilizzate (30-40 bar).

Diversamente dai VTR normalmente cementati, per quelli valvolati occorre un tappo di fondo opportunamente bloccato, al fine di evitare il riempimento del tubo in fase di creazione della guaina.

Essendo le perforazioni inclinate verso l'alto, l'iniezione di guaina verrà eseguita da bocca foro attraverso un'apposita cannetta "corta", mentre l'avvenuto riempimento del foro verrà verificato attraverso la fuoriuscita della boiaccia da una cannetta spia posizionata fino a fondo foro.

Prima della messa in opera dei VTR sarà opportuno nastrare le valvole per isolarle, minimizzando così il pericolo di dannose infiltrazioni di miscela cementizia all'interno del tubolare in fase di creazione della guaina. Terminata la realizzazione delle guaine con modalità identiche a quelle sopra riportate è opportuno procedere al ripetuto lavaggio dell'interno del tubolare.

### ***Iniezione valvole***

Dopo un tempo, da tararsi in corso d'opera (generalmente pari a 12÷18 ore), necessario al raggiungimento di un adeguato indurimento della miscela di guaina, si procederà alla fase di iniezione attraverso le valvole.

La fase di iniezione dovrà essere eseguita valvola per valvola (iniezione selettiva) a partire da fondo foro. Il packer, spinto all'interno del tubolare fino alla prima valvola posta in prossimità del fondo dovrà essere provvisto di apposita strumentazione

necessaria per posizionarlo nella corretta posizione d'iniezione (ugello d'iniezione in corrispondenza della valvola); quindi andrà pompata una necessaria pressione (generalmente circa 10 bar) per isolare l'ugello dal resto della tubazione (operazione particolarmente importante).

La miscela da adottare per l'iniezione selettiva attraverso le valvole avrà le seguenti caratteristiche:

- cemento tipo 42,5R
- rapporto acqua/cemento  $\approx 0.5-0.7$
- additivo fluidificante  $\approx 4 \%$

La fase di iniezione dovrà avvenire in condizione di pressione e volumi controllati mediante l'utilizzo di adeguati manometri e contaltri.

In fase di iniezione si potranno evidenziare le seguenti condizioni:

- nel caso in cui, al raggiungimento del volume controllato nella singola valvola, si registri, dopo avere interrotto l'iniezione, a circuito chiuso, il mantenimento, per almeno un minuto circa, di una pressione residua pari o superiore ai valori richiesti, l'iniezione in quella valvola potrà considerarsi conclusa;
- nel caso in cui, al raggiungimento del volume controllato nella singola valvola, si registri, dopo avere interrotto l'iniezione, a circuito chiuso, una pressione residua nulla, inferiore ai valori richiesti o che si riduce rapidamente, sarà necessario eseguire una o ulteriori più passate in quella valvola, dopo aver atteso un adeguato tempo di maturazione (si consiglia nel frattempo di passare ad un'altra valvola dello stesso tubo od a tubi successivi), previo adeguato lavaggio;
- nel caso in cui, prima del raggiungimento del volume controllato nella singola valvola in fase di iniezione si noti, a parità di portata, una tendenza all'incremento delle pressioni di iniezione e, dopo avere interrotto l'iniezione si registri, a circuito chiuso, il mantenimento, per almeno un minuto circa, di una pressione residua pari o superiore ai valori indicati, l'iniezione in quella valvola potrà considerarsi conclusa;
- nel caso in cui, prima del raggiungimento del volume controllato nella singola valvola, si riscontri un incrementino delle pressioni di iniezione a parità di portata, ma a circuito chiuso le pressioni in foro tendano velocemente ad azzerarsi senza evidenziare una pressione residua, si dovrà provvedere a riprendere l'iniezione in quella valvola riducendo la portata di iniezione.

Per ogni singola valvola e per ogni passata dovranno essere annotati i seguenti parametri:

- Pressione rottura guaina
- Pressione e Portata di iniezione
- Volume iniettato
- Pressione residua

Qualora si verificano fenomeni di fuoriuscita di boiaccia, si dovranno prima ridurre le pressioni di iniezione, intervenendo sulle portate e poi, qualora il fenomeno continui a verificarsi, sospendere l'iniezione attraverso quella valvola per riprenderla successivamente, previo adeguato lavaggio.

Al fine di evitare la fuoriuscita di boiaccia da fori adiacenti, si consiglia di iniettare VTR sfalsati.

Al fine di evitare incrementi di pressione sul fronte l'ultimo metro di terreno a ridosso della stessa potrà non essere iniettato.

## 6.2 Interventi propedeutici alla ripartenza da sud

Come già previsto dalla fase progettuale costruttiva da che il fronte di scavo è fermo da molti anni, si sono certamente verificati fenomeni di detensionamento dell'ammasso roccioso.

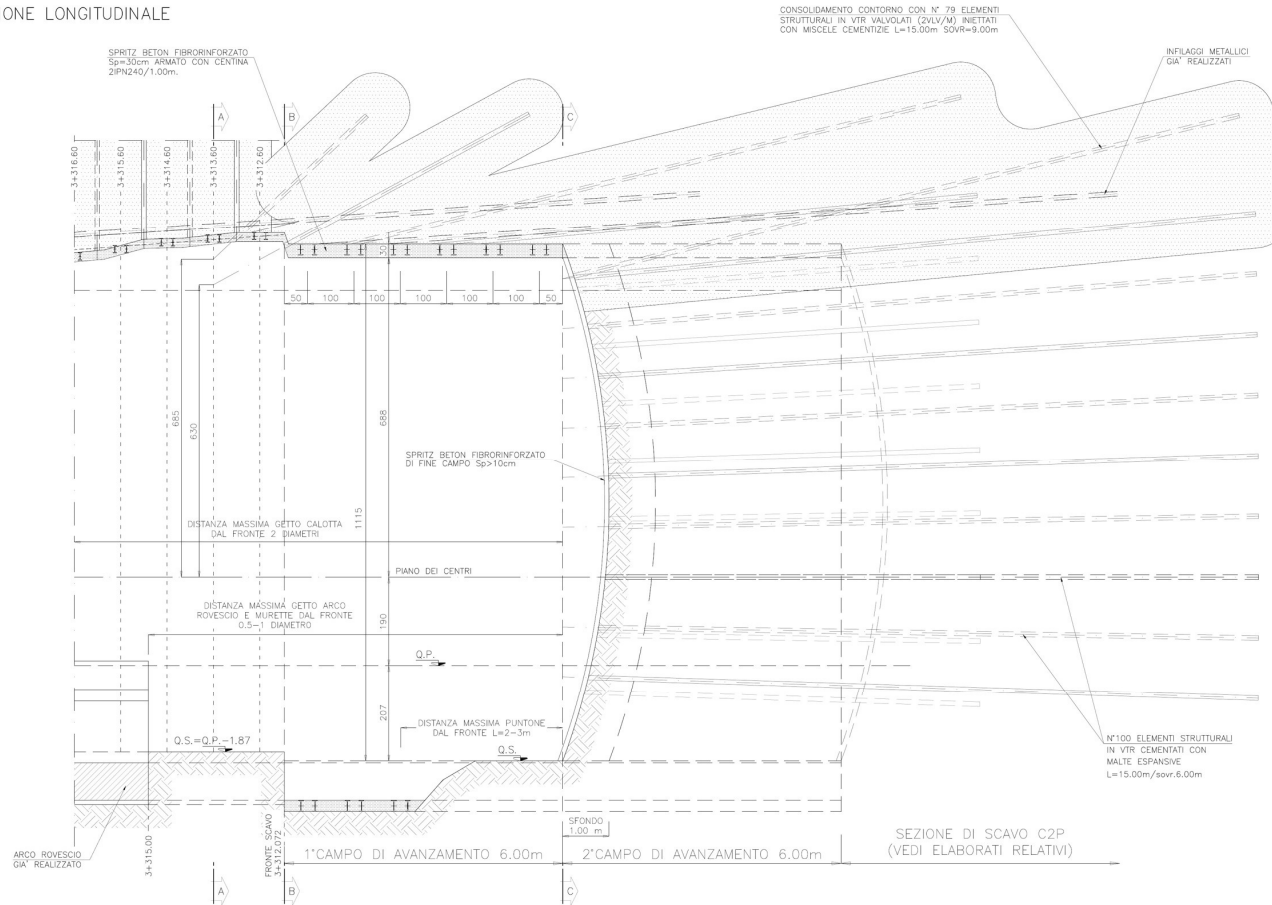
Per riprendere gli scavi, ed in particolare per i primi 2 campi di 6 m ciascuno, si prevede un potenziamento degli interventi al fronte (n° 100 VTR cementati con malte espansive) e al contorno, come di seguito:

- per primo campo, consolidamento al contorno con n° 44 elementi strutturali in VTR valvolati (2vlv/m) iniettati con miscele cementizie L=4m + n° 43 VTR L=6m.
- per secondo campo, consolidamento al contorno con n° 83 elementi strutturali in VTR valvolati (2vlv/m) iniettati con miscele cementizie L=15m e sovr.=9m + n° 79 VTR L=15m e sovr.=6m.

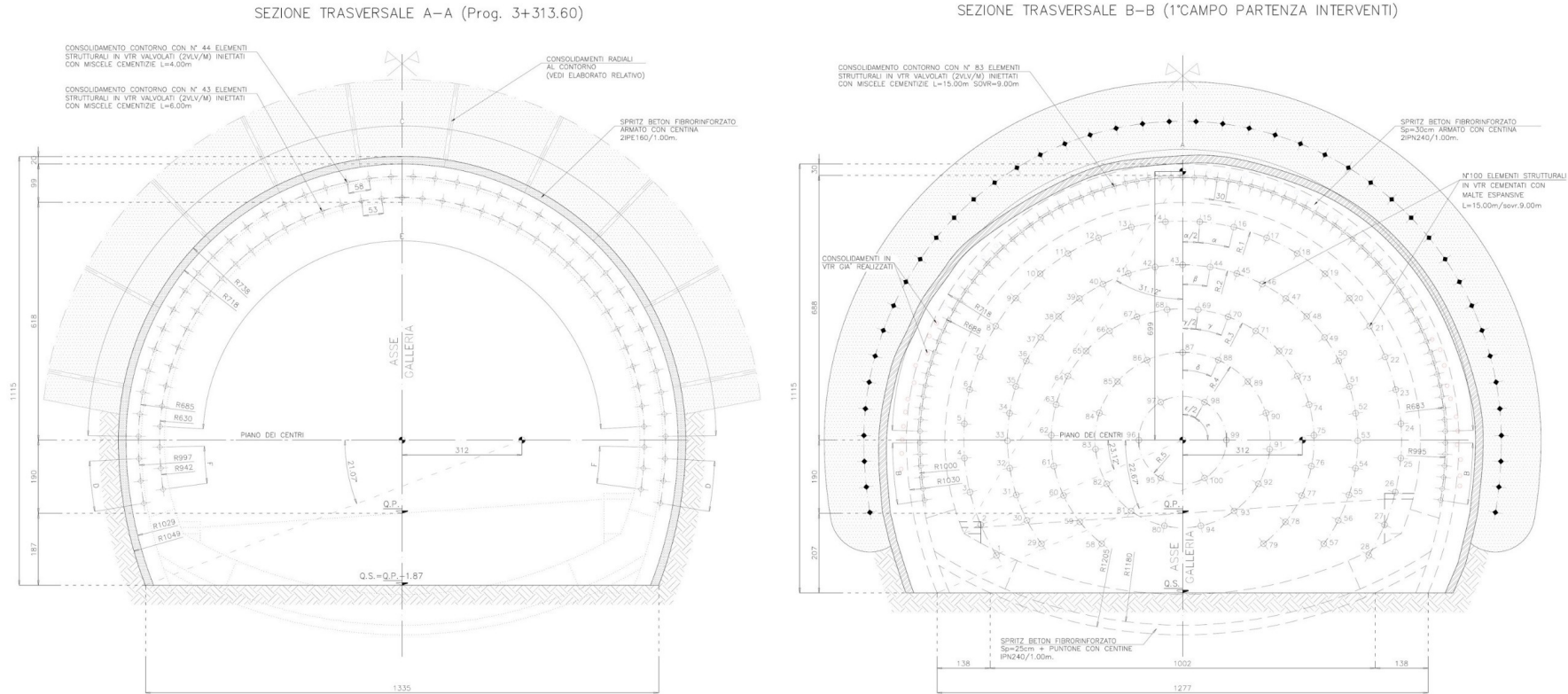
Nelle immagini seguenti si riportano i dettagli delle sezioni tipo.



SEZIONE LONGITUDINALE

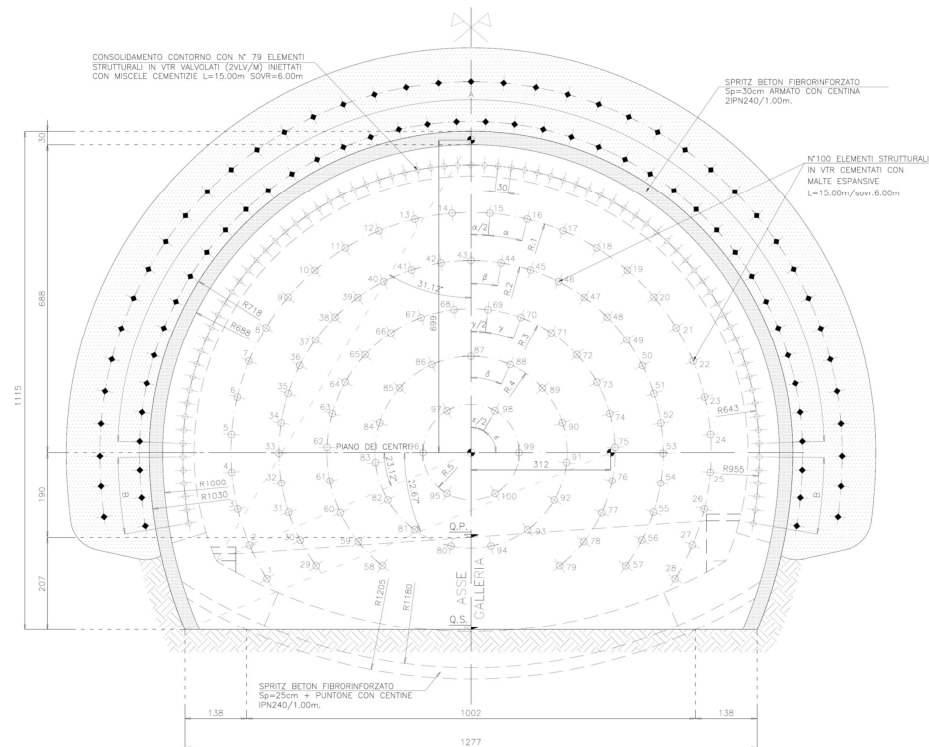


**Figura 6 – Schema consolidamenti per la ripartenza – Sezione longitudinale**



**Figura 7 – Schema consolidamenti per la ripartenza – Sezione trasversale 1 di 2**

SEZIONE TRASVERSALE C-C (2°CAMPO PARTENZA INTERVENTI)



**Figura 8 – Schema consolidamenti per la ripartenza – Sezione trasversale C-C**

### 6.3 Interventi di ripristino sagoma del tratto realizzato

Nel tratto realizzato sono presenti parti di rivestimento definitivo realizzato e parti ove è presente il solo rivestimento di prima fase in calotte che si presenta diffusamente deformato generando l'impossibilità di realizzare il rivestimento definitivo dello spessore richiesto, di minimo 60 cm. L'arco rovescio invece è realizzato sull'intero tratto scavato.

Al fine di accertare l'esatta geometria del cavo laddove è presente il solo rivestimento di prima fase è stato eseguito un rilievo con Laser-Scanner.

In fase esecutiva, nei tratti ove non presente il rivestimento definitivo, dovrà essere preventivamente rimossa l'impermeabilizzazione ed effettuato un rilievo di dettaglio della superficie di intradosso del rivestimento di prima fase.

Dovrà pertanto verificarsi la posizione e l'estensione dei tratti ove è prevista la rimozione e la sostituzione delle centine deformate e la realizzazione del rivestimento di prima fase per il ripristino della corretta geometria del rivestimento definitivo (spessore minimo 60.0 cm).

È prevista una tipologia di intervento che prevede la rimozione dei rivestimenti di prima fase deformati che non garantiscono lo spessore richiesto per il rivestimento definitivo, previa la creazione al contorno di un arco di terreno consolidato e ricompreso.

Per quanto sopra si procederà ad un consolidamento radiale al contorno con n° 9-10 elementi strutturali in VTR L=6m, valvolati (2vlv/m) iniettati con miscele cementizie, passo longitudinale pari a 1m.

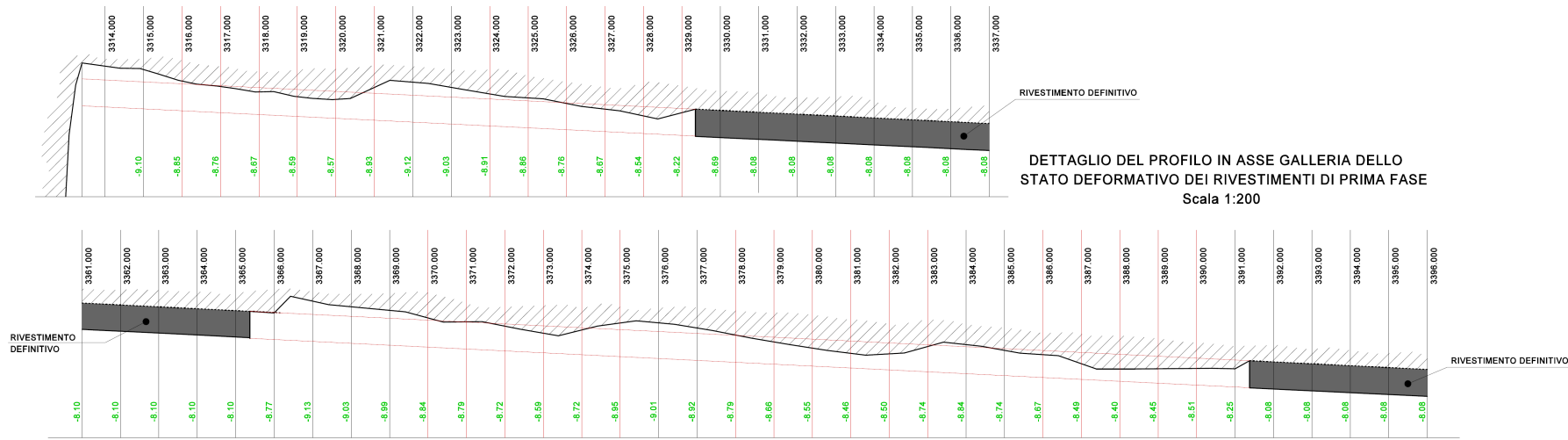
Prima di effettuare le perforazioni e i consolidamenti radiali dovrà essere effettuato un minuzioso disaggio dell'esistente rivestimento di prima fase in spritz-beton con eventuali locali ripristini ove è previsto che sia mantenuto in opera.

L'asportazione delle centine deformate, la posa delle nuove con realizzazione del relativo strato di spritz-beton, dovrà essere eseguito per campi pari all'interasse centine (1.0 m).

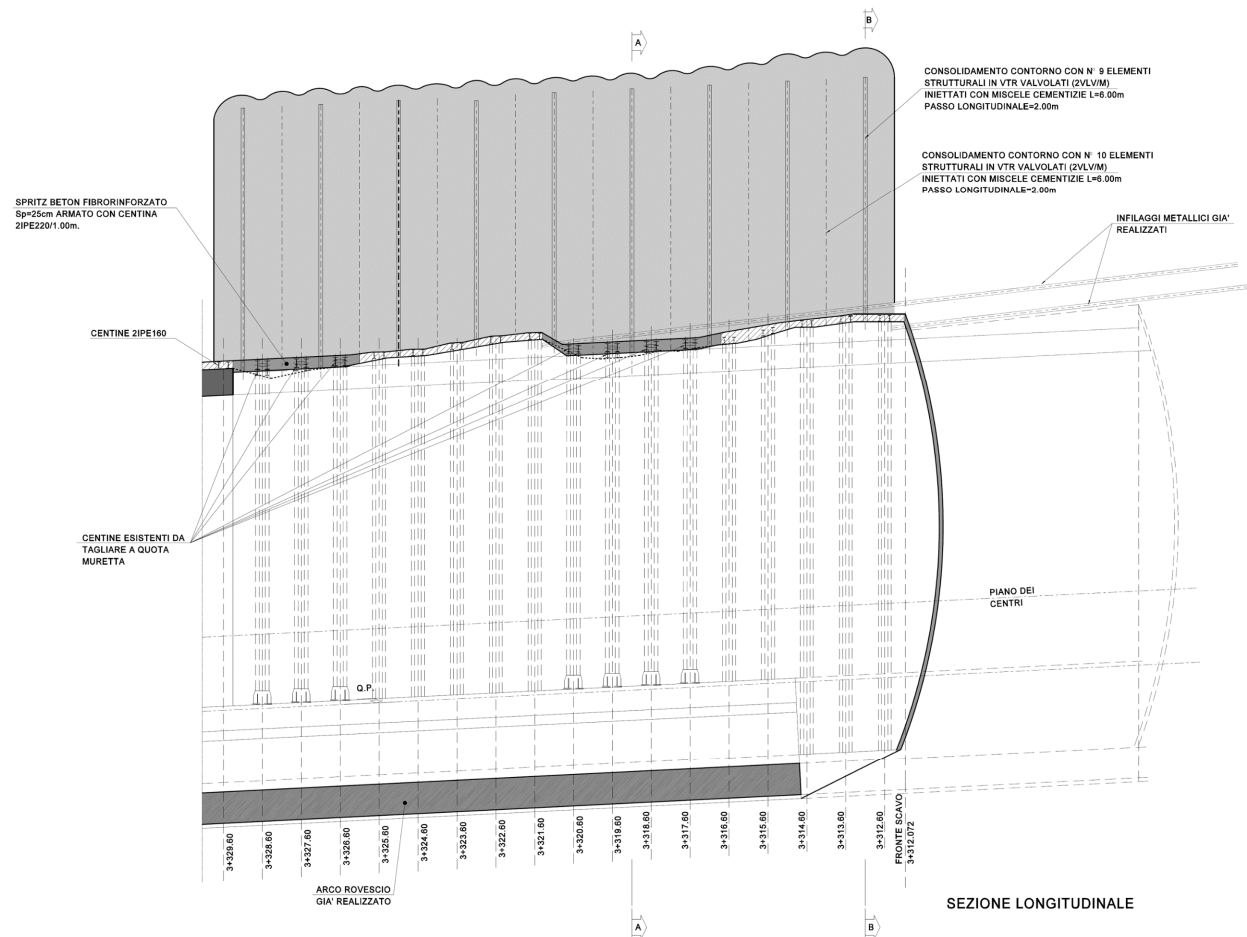
Essendo presenti a tergo delle centine gli infilaggi, questi dovranno essere sezionati e rimossi, sempre operando per campi di circa 1.0 m.

Terminate le operazioni di consolidamento e ripristino della corretta geometria dell'intradosso del rivestimento di prima fase, dovranno posarsi l'impermeabilizzazione, le armature ed effettuato il getto del rivestimento definitivo.

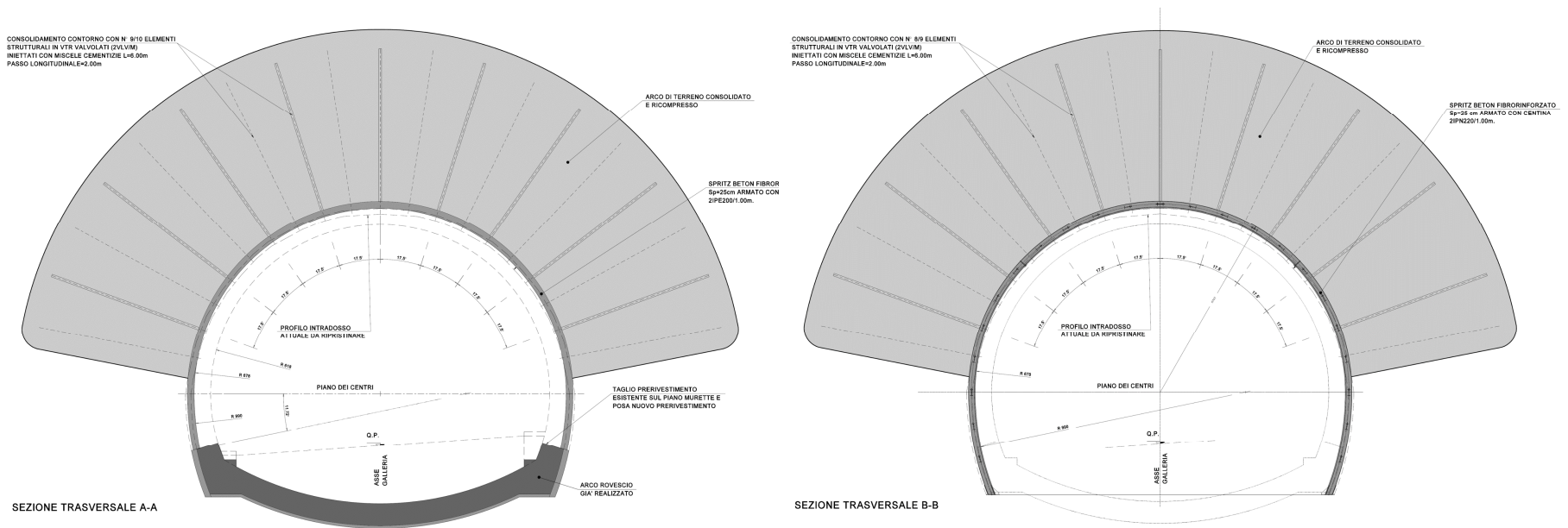
Nel seguito si presentano alcune immagini del rilievo eseguito e le sezioni tipo di intervento.



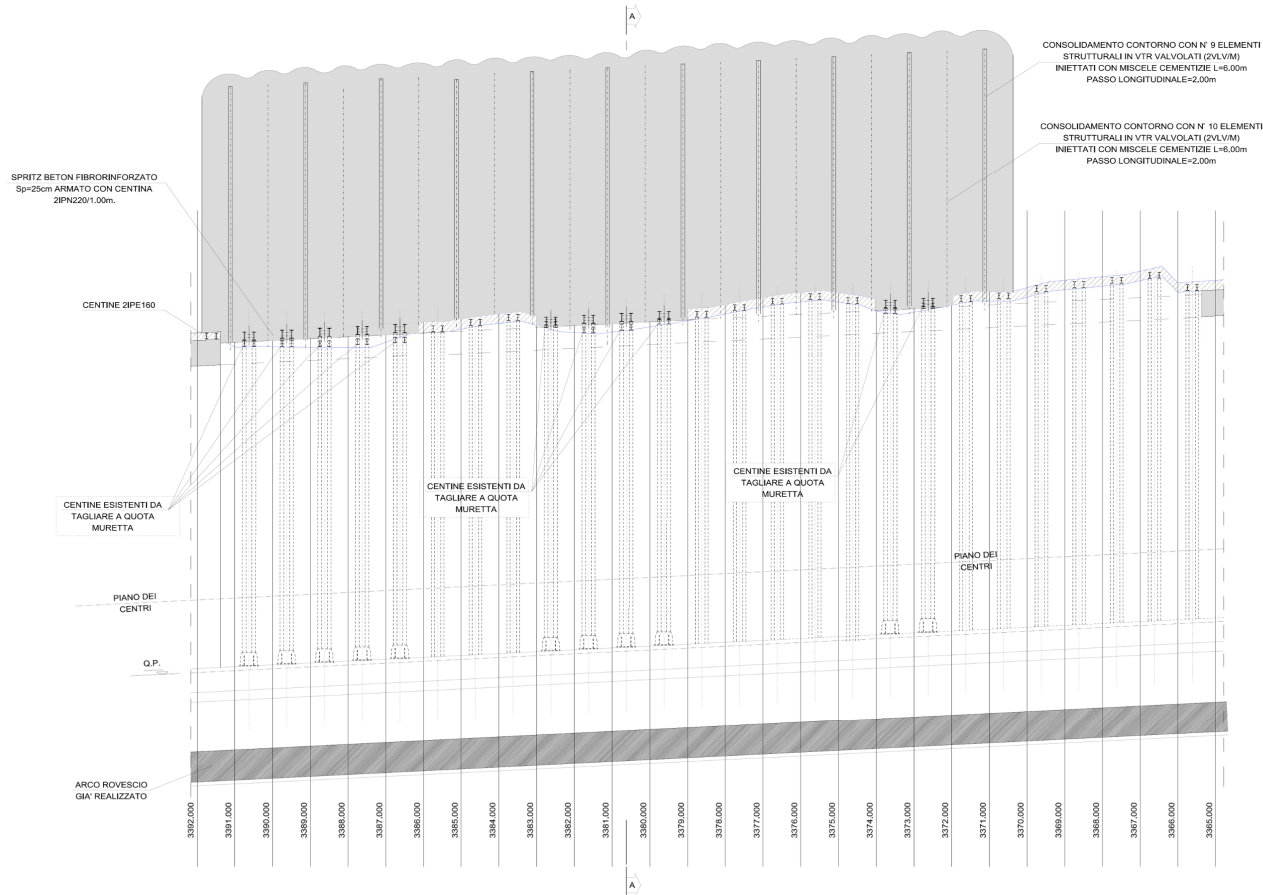
**Figura 9 – Risultati del rilievo dello stato deformativo del rivestimento di prima fase**



**Figura 10 – Riprofilatura del rivestimento di prima fase 1 di 4**



**Figura 11 – Riprifilatura del rivestimento di prima fase 2 di 4**



**Figura 12 – Riprofilatura del rivestimento di prima fase 3 di 4**



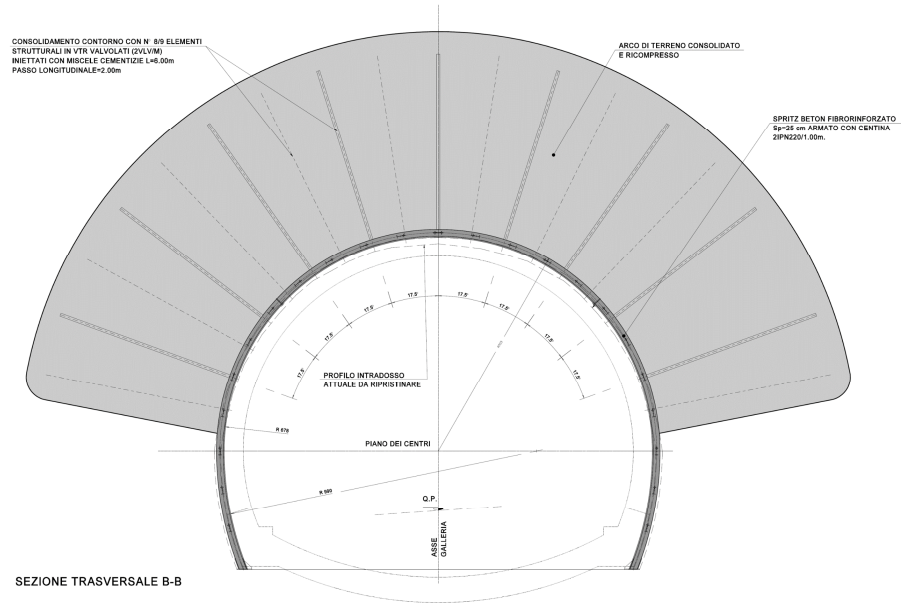
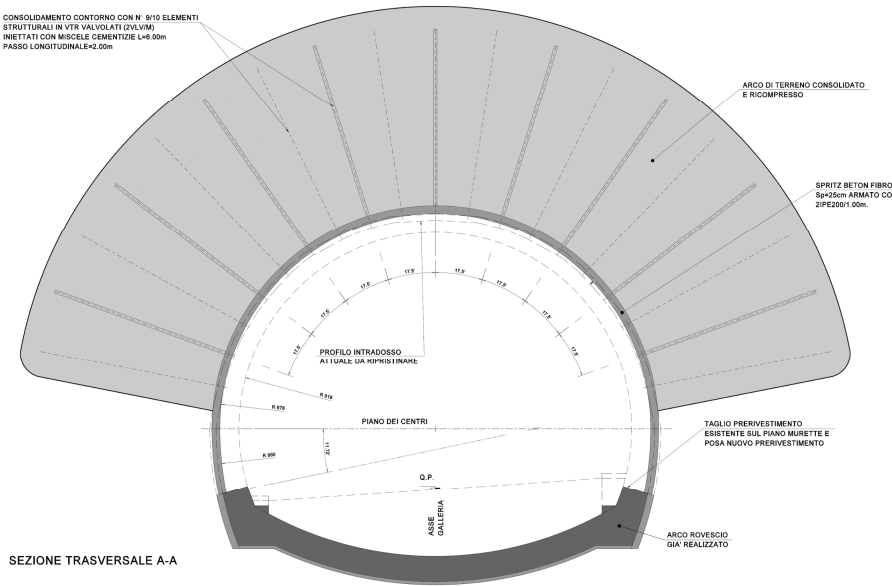


Figura 13 – Riprofilatura del rivestimento di prima fase 4 di 4

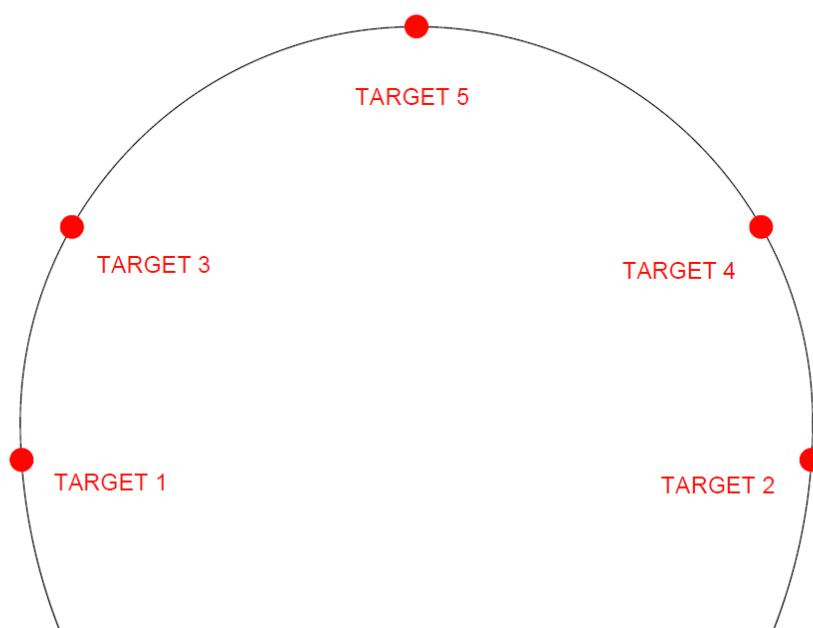
### 6.3.1 Misure di convergenza

In tale paragrafo, al fine di individuare i parametri di resistenza e deformabilità dell'ammasso tramite analisi a ritroso, si restituiscono, in relazione alle deformazioni del cavo riscontrate, i risultati delle misure di convergenza utili alla taratura del processo di back-analysis.

In particolare le misure di convergenza eseguite in galleria hanno permesso l'analisi della sezione di convergenza ritenuta più rappresentativa, in cui la posa dell'arco rovescio è avvenuta lontano dal fronte di scavo e per la quale si sono registrati i valori massimi di convergenza.

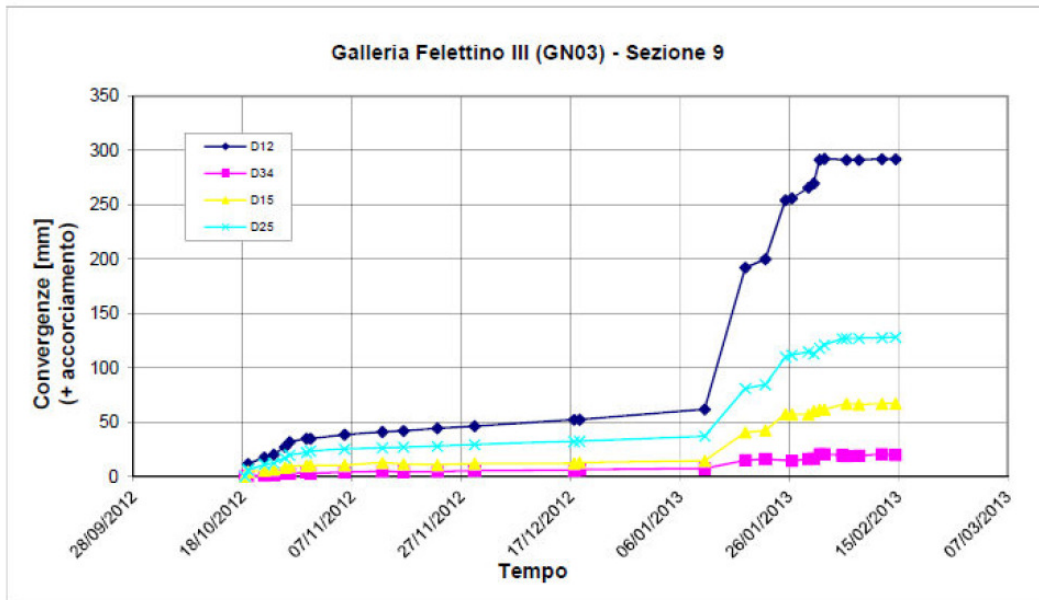
La sezione di monitoraggio rappresentativa di questa situazione è la sezione 9 (prog. 3+351). Per tale sezione le misure di convergenza eseguite in galleria durante le fasi di avanzamento dello scavo hanno restituito deformazioni dell'ammasso rilevanti, che si sono manifestate con una chiusura complessiva del cavo di poco inferiore a 300 mm sull'allineamento dei target 1-2.

Nelle seguenti figure sono riportate l'immagine rappresentativa del posizionamento dei target per le misure di convergenza ed il grafico riassuntivo di tali misure, con i dati operativi salienti.



**Figura 14 –Target misure di convergenza**

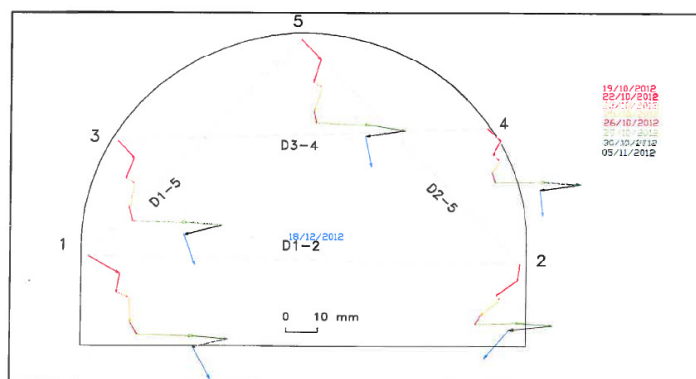
**GALLERIA NATURALE FELETTINO III (GN03)**  
**Misure di convergenza - Sezione 9**  
**Progressiva assoluta: km 3+351**  
**Avanzamento in naturale da imbocco SUD: 70 m**



**Figura 15 – Misure di convergenza – Sezione 9**

Parallelamente alle convergenze del cavo, sono stati riscontrati abbassamenti massimi del piede delle centine stimabili in circa 14÷18 cm, maggiori per il piedritto sinistro (lato valle).

**GALLERIA NATURALE FELETTINO III (GN03)**  
**Misure di convergenza - Sezione 9**  
**Progressiva assoluta: km 3+347.5**  
**Avanzamento in naturale da imbocco SUD: 70 m**

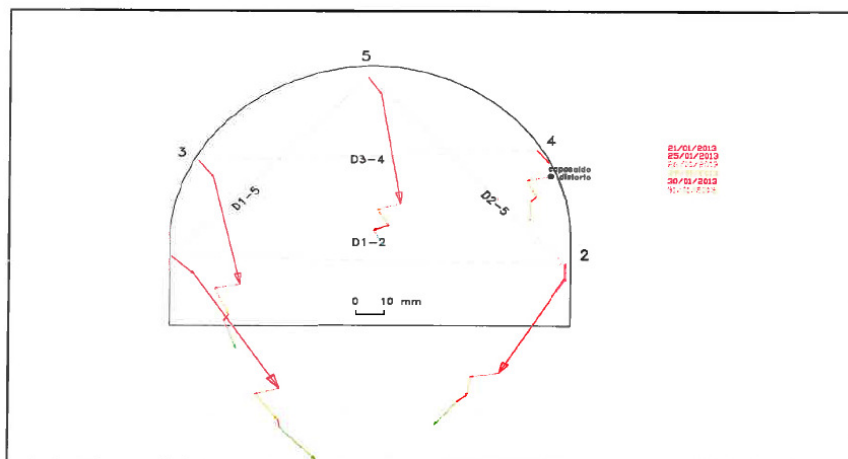


Note:  
 • 18/10/2012 lettura di zero della sezione di convergenza 9  
 • 25/10/2012 scavo arco rovescio da km 3+366 a km 3+357  
 • 29 e 30/10/2012 La misura risulta affetta da un errore di orientamento connesso con il riposizionamento di una mira di riferimento.

**Figura 16 – Misure di convergenza – Sezione 9**

**GALLERIA NATURALE FELETTINO III (GN03)**  
**Misure di convergenza - Sezione 9**  
**Progressiva assoluta: km 3+350.8**  
**Avanzamento in naturale da imbocco SUD: 66.7 m**

**Incrementi di spostamento rispetto alle misure precedenti al 18/01/2013**



Note:

- 18/10/2012 lettura di zero della sezione di convergenza 9
- 25/10/2012 scavo arco rovescio da km 3+366 a km 3+357
- 29 e 30/10/2012 La misura risulta affetta da un errore di orientamento connesso con il riposizionamento di una mira di riferimento.
- Nel periodo compreso tra il 10 ed il 18 gennaio 2013 a causa del riposizionamento del sistema di riferimento per le misure di convergenza non è stato possibile ricavare i vettori di spostamento. Il grafico soprariportato è riferito ad una misura di zero eseguita in data 18/01/2013 ed è da considerarsi come un incremento rispetto ai vettori di spostamento graficati nei precedenti report.
- I valori della convergenza complessiva riportati nel grafico seguente non risentono del riposizionamento del sistema di riferimento.
- 31/01/2013 scavo arco rovescio tra pk 3+350 a pk 3356.5. Fronte al km 3+329.

**Figura 17 – Letture di convergenza – Sezione 9**

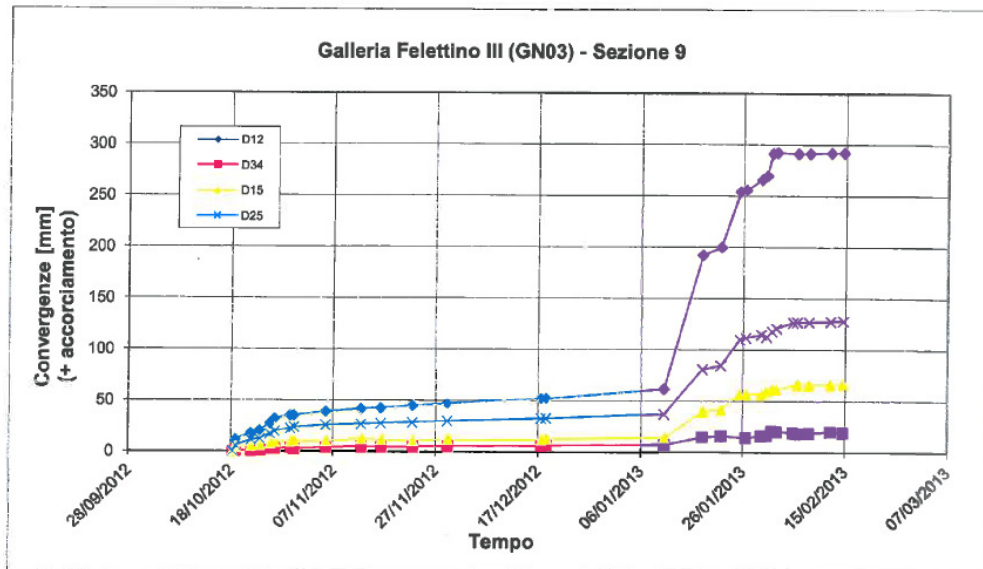
## 7. Back analysis

Considerate le evidenze riscontrate durante gli scavi con spostamenti del cavo ed in superficie di entità non coerente con le deformazioni prevedibili in presenza di una qualità dell'ammasso ipotizzata in progetto esecutivo, si è resa necessaria la rideterminazione delle effettive caratteristiche di resistenza e deformabilità del terreno attraversato dallo scavo, tramite una modellazione numerica di back-analysis basata sulle misure di convergenza eseguite al fine di ottenere una simulazione quanto più possibile affidabile delle effettive condizioni riscontrate in sito.

Questo processo di back-analysis, sviluppato con riferimento alla sezione di monitoraggio 9 posta alla progressiva 3+351, ha permesso di verificare che con determinati valori del modulo di deformazione, della coesione e dell'angolo d'attrito, con la copertura presente in corrispondenza della sezione di studio e con gli interventi previsti in PE, che in corrispondenza della sezione 9 prevedevano la posa dell'arco rovescio lontano dal fronte di scavo, sono giustificate le deformazioni del cavo misurate. Per quanto riguarda i cedimenti indotti a piano campagna va tenuto conto del fatto che la sezione considerata, dista dall'edificio sito in via Gavatro 26-28 oltre 60 m; pertanto, se le convergenze riscontrate in corrispondenza di questa sezione hanno un significato preciso e sono state impiegate per la taratura del modello e la determinazione dei parametri geomeccanici, i relativi assestamenti in superficie non sono direttamente correlabili con quelli dell'edificio suddetto e pertanto non saranno tenuti in conto nella taratura.

Nella seguente figura si riportano nuovamente le misure di convergenza registrate per i target 1-2 che si attestano a circa 30 cm; si ricorda che il monitoraggio ha inoltre rilevato abbassamenti massimi del piede delle centine stimabili in circa 14÷18 cm.

**GALLERIA NATURALE FELETTINO III (GN03)**  
**Misure di convergenza - Sezione 9**  
**Progressiva assoluta: km 3+351**  
**Avanzamento in naturale da imbocco SUD: 70 m**



**Figura 18 – Spostamenti massimi canna Nord**

## 7.1 Analisi numeriche

Nel seguito si riportano gli esiti della back-analysis condotta con riferimento agli scenari descritti precedentemente.

Le analisi sono state condotte mediante il programma alle differenze finite FLAC 7.0, che ha permesso di considerare il regime deformativo, nelle principali fasi esecutive di realizzazione dell'opera.

### 7.1.1 Codice di calcolo utilizzato

I calcoli sono eseguiti mediante il seguente codice di calcolo:

Codice:	FLAC-2D
Versione	7.00
N. di Serie	213-039-0053-13918
Produttore	Itasca Consulting Group inc.
Distributore	HarpaCeas S.r.l. – Milano

#### *Grado di affidabilità del codice*

L'affidabilità del codice di calcolo é garantita dall'esistenza di un'ampia documentazione di supporto, comprendente una esaustiva casistica di esempi applicativi (verification problem) a documentazione e validazione della affidabilità dei risultati prodotti dal software.

#### *Motivazione della scelta del codice*

Il FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) è un software di calcolo alle differenze finite (FDM) specificatamente progettato per la modellazione di problemi di tipo geotecnico, con particolare riguardo alla simulazione delle fasi di scavo e messa in opera dei supporti di prima fase e definitivi nella costruzione delle gallerie.

Il FLAC è un codice di calcolo esplicito bidimensionale alle differenze finite che consente di simulare il comportamento di strutture costituite da materiali, quali le rocce, i terreni o altri, che possono diventare sede di un flusso plastico quando raggiungono il limite di snervamento. Il FLAC prevede la creazione di una griglia la cui forma coincide con quella dell'oggetto che deve essere modellato. La griglia viene suddivisa in elementi, o zone, ciascuna delle quali si comporta secondo una prescritta legge sforzi/deformazioni e secondo un determinato criterio di resistenza in risposta alle forze applicate o ai vincoli imposti sul contorno del modello.

Le leggi costitutive ed i criteri di resistenza previsti dal FLAC sono particolarmente adatti a simulare il comportamento di materiali geologici o simili, che possono andare incontro a deformazioni di notevole entità e a fenomeni di plasticizzazione con decadimento dei parametri meccanici. Inoltre il FLAC è basato su una descrizione "Lagrangiana" delle deformazioni, che consente di modellare facilmente ampie distorsioni.

### ***Esame dei risultati e controlli***

#### Valutazione della correttezza dei modelli

I modelli di calcolo predisposti sono da ritenersi appropriati per le situazioni analizzate; non sono state riscontrate labilità né incongruenze nelle reazioni e nelle forze scambiate all'interfaccia tra le varie sottozone in cui sono stati suddivisi i modelli di calcolo.

Gli stati tensionali calcolati rispecchiano fedelmente quanto valutabile anche con calcoli di larga massima, nel rispetto delle configurazioni geometriche e dei vincoli assegnati.

#### Giudizio motivato di accettabilità dei risultati

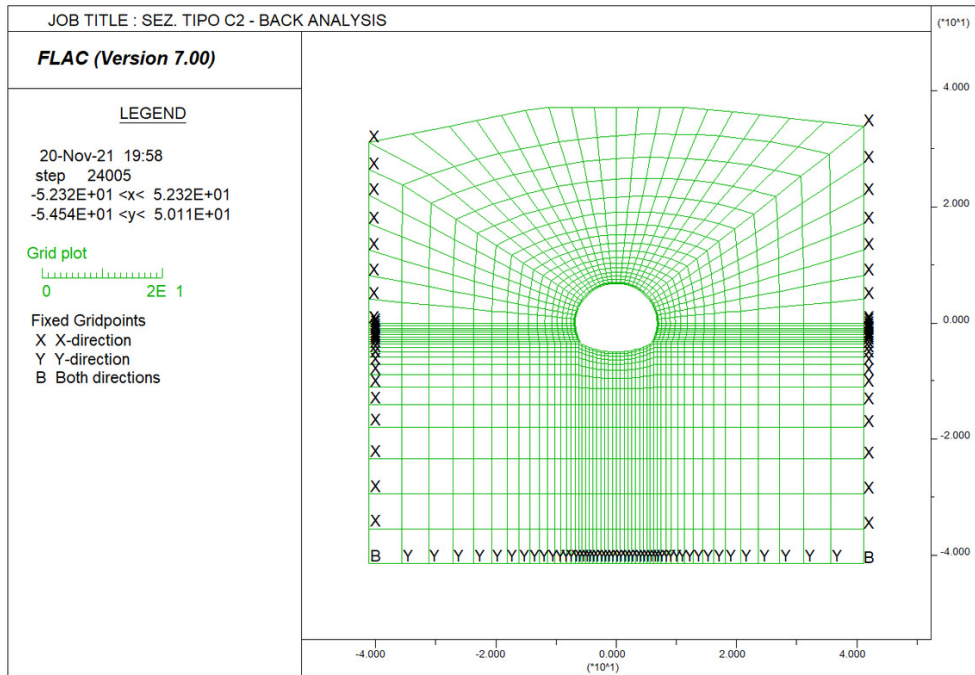
L'analisi critica dei risultati e dei parametri di controllo nonché il confronto con valutazioni di massima eseguite con metodi di calcolo semplificati portano a confermare la validità dei risultati ottenuti.

### **7.1.2 Geometrie dei modelli**

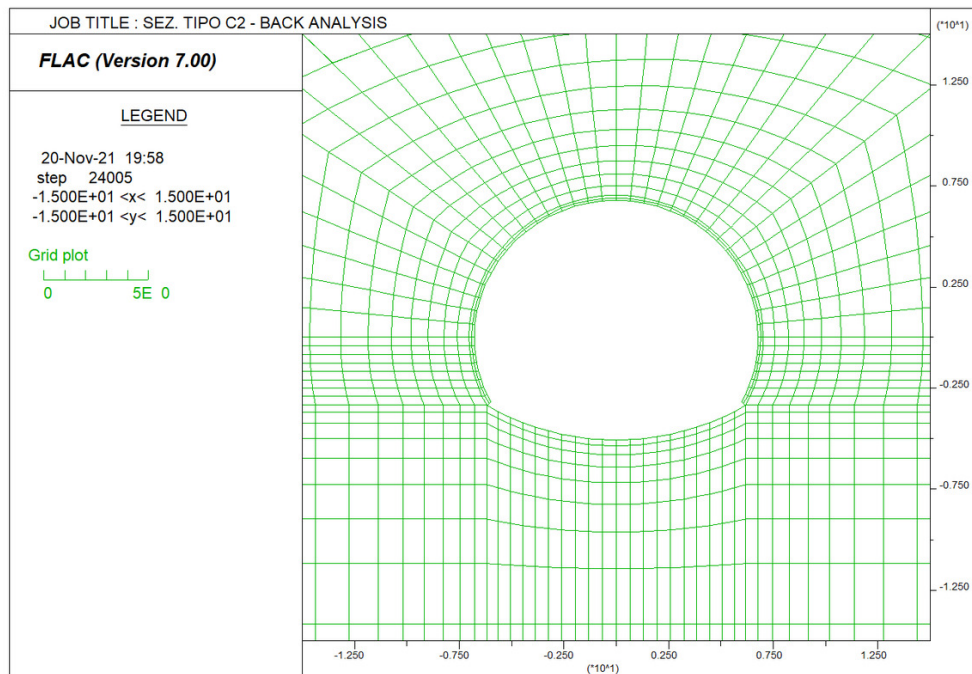
La back-analysis è stata condotta considerando dei reticoli aventi dimensioni e grado di infittimento al contorno del cavo tali da garantire una soluzione numerica accurata e rappresentativa della situazione in sito. Le dimensioni della griglia e le distanze dalla galleria ai limiti esterni della griglia stessa sono tali da evitare eventuali effetti di bordo sull'area di interesse del reticolo.

Il contorno dei modelli è stato vincolato lateralmente ed inferiormente mediante opportuni vincoli.





**Figura 19 – Mesh di calcolo**



**Figura 20 – Mesh di calcolo – Intorno galleria**

### 7.1.3 Leggi di comportamento del materiale

Il codice di calcolo consente di adottare un modello di comportamento del terreno elastico-perfettamente plastico.

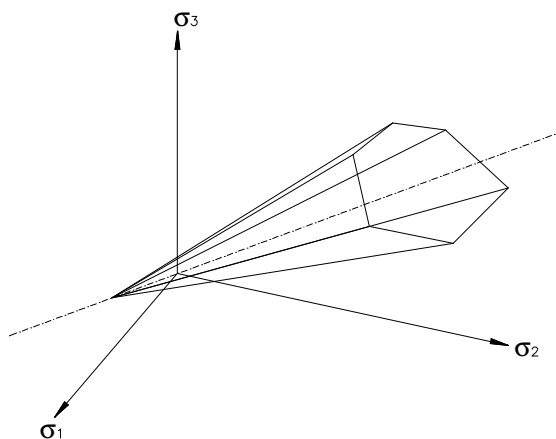
Il criterio di rottura adottato è quello di Mohr-Coulomb: in condizioni di strain-softening, i parametri di resistenza (coesione e angolo d'attrito interno) vengono gradualmente ridotti in funzione della deformazioni plastica sviluppata, secondo una legge di tipo lineare.

La funzione di plasticizzazione F definita dal criterio di rottura consente di individuare quelle zone di terreno in cui lo stato tensionale ha superato il limite al di sotto del quale il materiale mantiene un comportamento elastico e che sono quindi soggette a sollecitazioni tali da comportare deformazioni irreversibili nell'ammasso.

Per un generico stato di sforzo, individuato dalle tensioni principali  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ , il criterio di rottura di Mohr-Coulomb, è rappresentato dalle seguenti equazioni lineari:

$$\begin{aligned} \sigma_1 - \sigma_2 &= \pm 2 \cdot \left( c' \cdot \cos(\phi') + \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} \cdot \sin(\phi') \right) \\ \sigma_2 - \sigma_3 &= \pm 2 \cdot \left( c' \cdot \cos(\phi') + \frac{(\sigma_2 + \sigma_3)}{2} \cdot \sin(\phi') \right) \\ \sigma_3 - \sigma_1 &= \pm 2 \cdot \left( c' \cdot \cos(\phi') + \frac{(\sigma_3 + \sigma_1)}{2} \cdot \sin(\phi') \right) \end{aligned}$$

Il criterio di Mohr-Coulomb è rappresentato, nello spazio delle tensioni principali, da una piramide a base esagonale non regolare con la trisettatrice nel primo ottante:



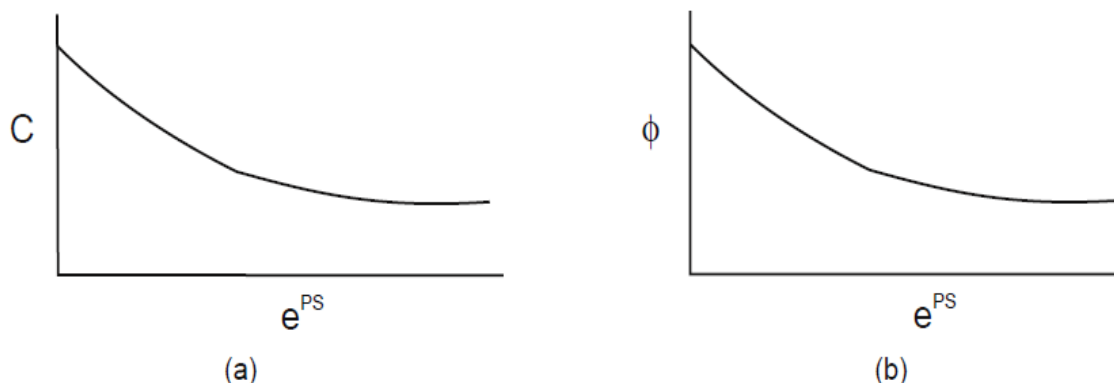
**Figura 21 – Dominio di rottura di Mohr-Coulomb**

Nel criterio di rottura di Mohr-Coulomb la resistenza al taglio non è influenzata dallo sforzo principale avente intensità intermedia; la resistenza del materiale è variabile in funzione dello stato di sforzo esistente.

Il decadimento dei parametri geomeccanici dell'ammasso è conseguenza diretta dello

sviluppo di deformazioni plastiche e della progressiva evoluzione della zona plasticizzata al contorno dello scavo, a fronte del progredire delle deformazioni.

Le legge di decadimento dei parametri geotecnici può quindi essere rappresentata come in figura, in funzione della deformazione plastica sviluppata dall'ammasso.



**Figura 22 – Legge di decadimento dei parametri geotecnici**

La procedura di back-analysis, finalizzata ad identificare attendibili valori di resistenza e deformabilità del materiale costituente l'ammasso, è stata condotta in modo tale da garantire la congruenza fra gli spostamenti misurati in galleria (chiusura ed abbassamento del cavo) e quelli derivanti dall'analisi numerica.

Sulla base delle precedenti assunzioni è stata condotta una back-analysis da cui sono stati desunti i valori dei sopracitati parametri ai quali corrispondono degli spostamenti del modello congruenti con quelli misurati in galleria.

Le caratteristiche fisiche, di deformabilità e di resistenza dei materiali adottati nel modello numerico vengono riportate di seguito mentre le fasi di avanzamento e le percentuali delle forze di scavo applicate all'ammasso saranno descritte nei paragrafi seguenti.

Unità	$\gamma$	$c'_p - c'_r$	$\phi_p - \phi_r$	E	$\nu$
[-]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kPa]	[°]	[MPa]	[-]
Back-Analysis	23	65 - 52	30 - 24	250	0.3

**Tabella 1 – Parametri geomeccanici**

Si sottolinea che, in considerazione dell'inefficienza dei consolidamenti al contorno del cavo dettata dagli esigui assorbimenti, nelle analisi non è stata modellata la presenza della coronella mantenendo quindi il terreno non trattato.

### 7.1.4 Stato di sforzo iniziale

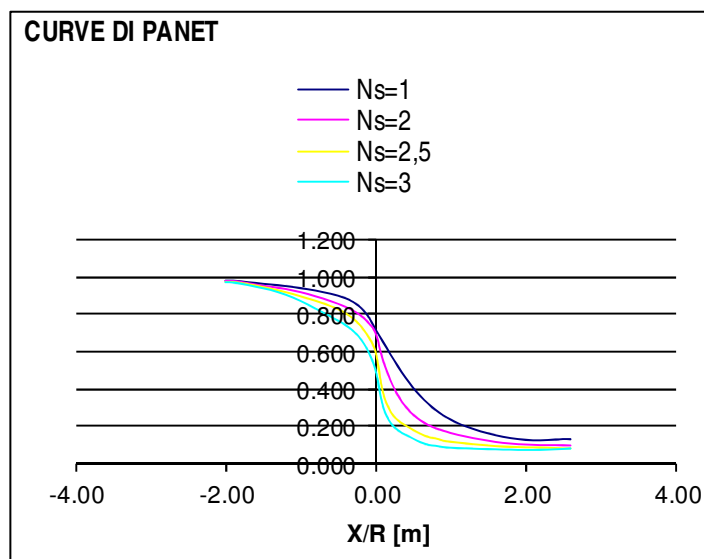
Nella prima fase dell'analisi numerica viene ricostruita in termini di sforzi e di deformazioni la situazione iniziale preesistente allo scavo della galleria.

Il carico applicato in direzione verticale corrisponde al carico geostatico alle varie quote del modello.

Il carico applicato in direzione orizzontale è stato determinato per back-analysis al fine di ottenere spostamenti in linea con quanto rilevato dal sistema di monitoraggio e risulta pari a:  $K_0 = 0.7$ .

### 7.1.5 Scavo della galleria

La simulazione dello scavo avviene mediante il progressivo annullamento delle forze interne al profilo di scavo, fino al loro completo rilassamento; gli step di rilassamento vengono operati in funzione della distanza dal fronte della sezione considerata nell'analisi, mediante l'impiego delle curve di Panet. La scelta della curva di Panet da utilizzare è stata condotta considerando il numero di stabilità  $N_s=1$ .



**Figura 23 – Curve di Panet**

L'adozione della sola curva di Panet non produce tuttavia i dovuti risultati tenso-deformativi, né per confronto con quanto ottenuto in base alla teoria delle Linee Caratteristiche, né per confronto con quanto effettivamente rilevato in analoghe gallerie in corso d'opera. Un ruolo fondamentale per una corretta definizione dei rilassamenti da adottare nelle analisi è il valore di rilassamento da impiegare in corrispondenza del fronte di scavo. Al fine di adattare il valore di rilassamento alle caratteristiche geomeccaniche del materiale, dello stato tensionale in sito e del criterio di rottura del materiale si è

proceduto ad impiegare al fronte un valore di rilassamento tale da determinare una risposta deformativa, in termini di convergenza al fronte, paragonabile a quella ottenuta dalle analisi precedentemente condotte mediante il Metodo delle Linee Caratteristiche; è questo un procedimento di “taratura” della curva di Panet.

Una volta determinata la riduzione iniziale, in corrispondenza del fronte di scavo, le riduzioni alle fasi successive sono determinate proporzionalmente all’andamento della curva di Panet in funzione della distanza dal fronte, secondo la seguente formula:

$$R_{forze} = R_{forze, fronte} + \beta \cdot (R_{PANET} - R_{PANET, fronte})$$

in cui il termine  $\beta = (100\% - Rid. \%) / (100\% - R_{PANET, fronte}\%)$  tiene conto delle percentuali di riduzione residue, dopo il rilassamento del fronte.

Si riporta nella seguente tabella il rilassamento prima della posa del prerivestimento utilizzato nell’analisi al fine di ottenere una convergenza dello stesso ordine di quanto ottenuto tramite le linee caratteristiche.

Rilassamento	Convergenza [cm]
30%	2

**Tabella 2 – Rilassamento prima della posa del prerivestimento**

### 7.1.6 Prerivestimento

Nelle analisi la messa in opera del prerivestimento è stata simulata introducendo nel modello zone con caratteristiche strutturali assimilabili a quelle dello spritz-beton e centine, e legge costitutiva elastico lineare.

In tutte le sezioni tipo, il prerivestimento è costituito da spritz-beton  $R_{ck} \geq 37$  MPa e da centine S275, aventi le seguenti caratteristiche meccaniche:

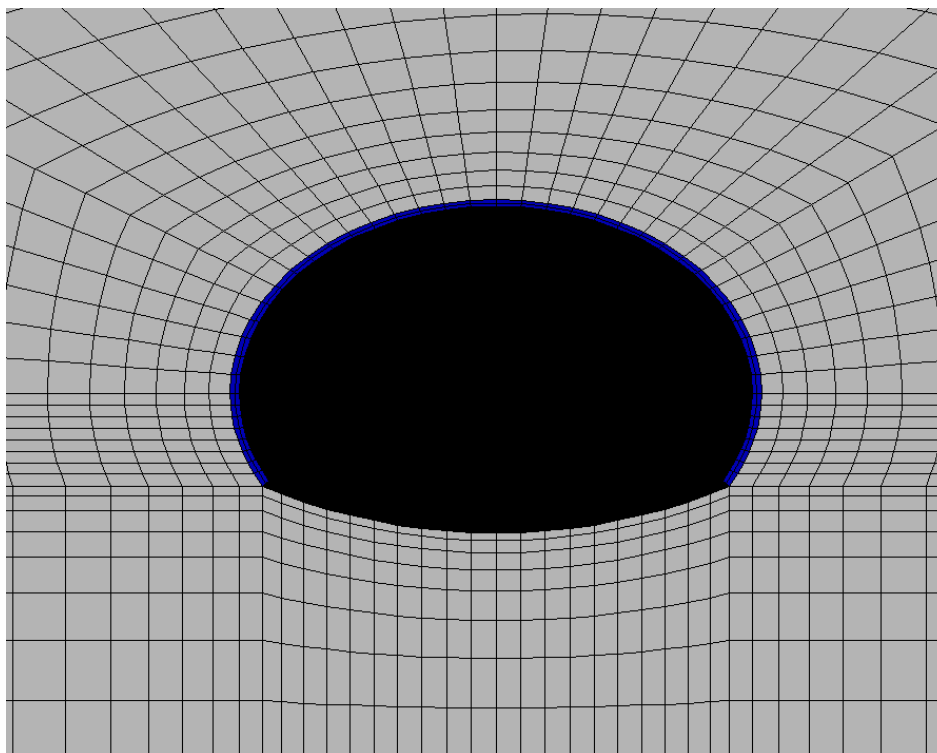
spritz-beton  $R_{ck} \geq 37$  MPa:

E = 32840 MPa a 28gg;

centine S275:

E = 210000 MPa.

Nella modellazione numerica il prerivestimento è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico-lineare e isotropo, il cui modulo di deformabilità è stato determinato attraverso l’omogeneizzazione delle centine al calcestruzzo.



**Figura 24 – Simulazione prerivestimento – Mesh di calcolo**

### 7.1.7 Fasi di calcolo

Il calcolo è stato condotto per fasi successive, secondo lo schema di seguito descritto:

#### TIME 1 – Geostatico

In questa prima fase di calcolo vengono applicati il peso proprio del terreno e le caratteristiche di resistenza e deformabilità delle formazioni in sito, in modo tale da ricostruire la situazione tensionale preesistente alla costruzione della galleria.

#### TIME 2 – Taratura e scavo – Relax 30%

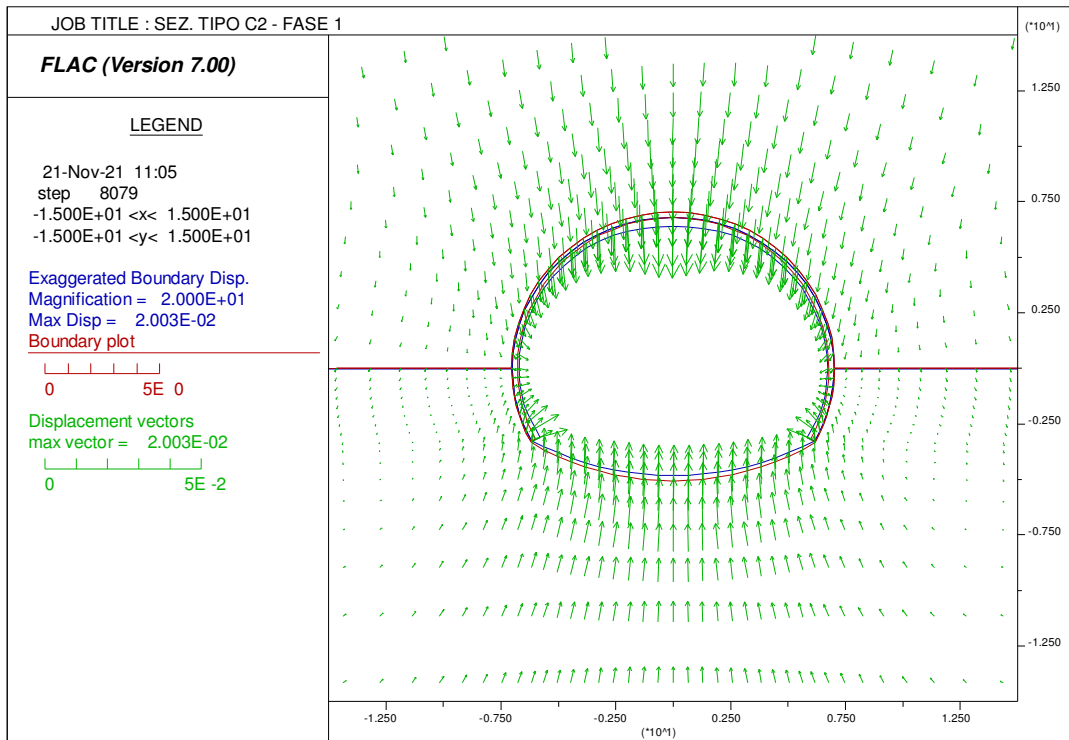
In questa time di calcolo viene simulata la situazione al fronte prima della posa del prerivestimento.

#### TIME 3 – Posa in opera del prerivestimento e avanzamento dello scavo – Relax 100%

Viene simulata la posa del prerivestimento e si procede con l'avanzamenti dello scavo fino ad un rilascio tensionale pari al 100% delle forze di scavo.

## 7.2 Sintesi dei risultati

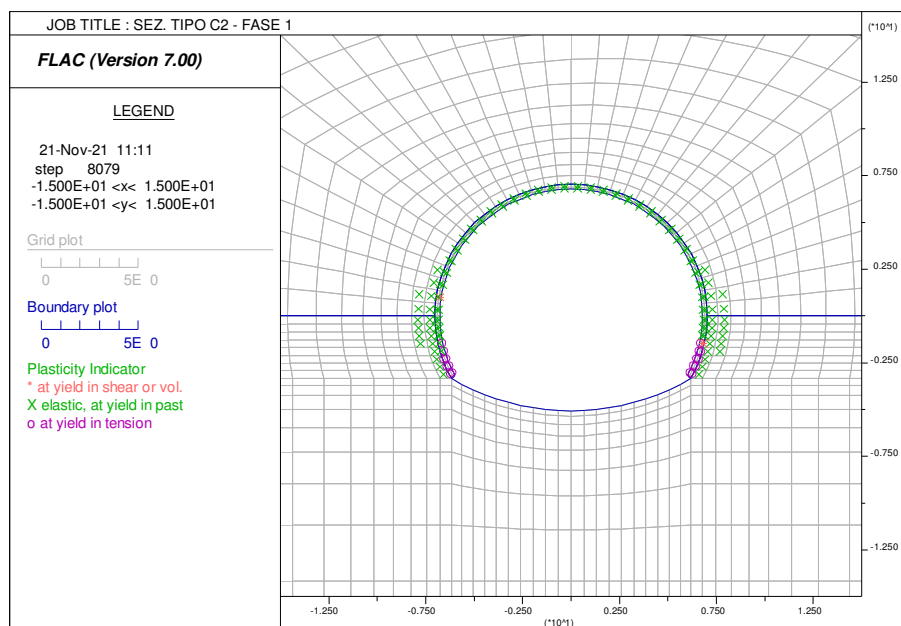
L'analisi condotta ha evidenziato un valore di convergenza del cavo, prima della posa in opera del priverivestimento pari a circa 2 cm.



**Figura 25 – Convergenza prima della posa del priverivestimento**

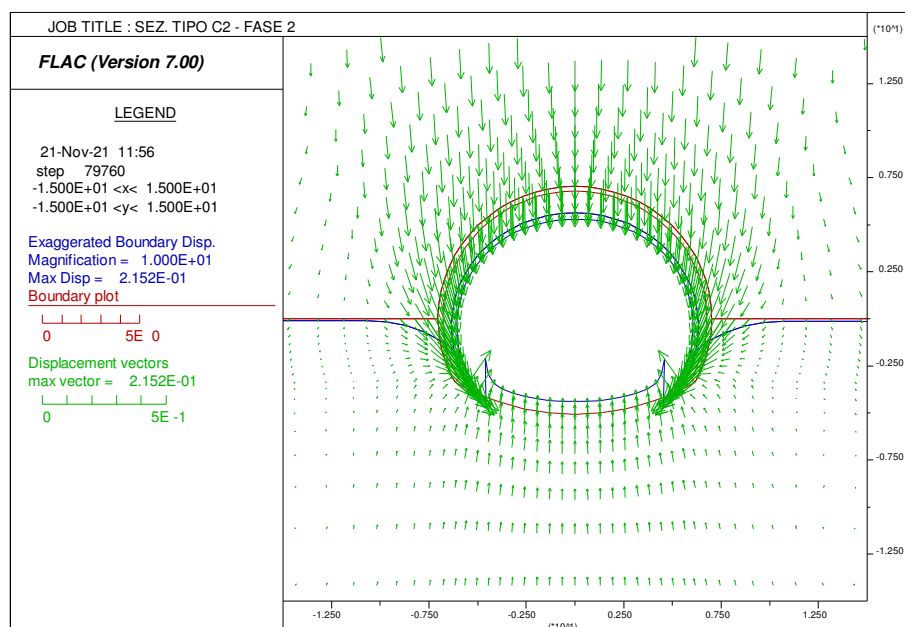
Prima della posa del priverivestimento il materiale al contorno dello scavo non evidenzia fenomeni di plasticizzazione.

E' possibile comunque osservare che vi sono stati punti che risultano essere plasticizzati durante la simulazione per poi rientrare in campo elastico sempre all'interno della stessa fase di calcolo.



**Figura 26 – Time 1 – Plasticizzazioni**

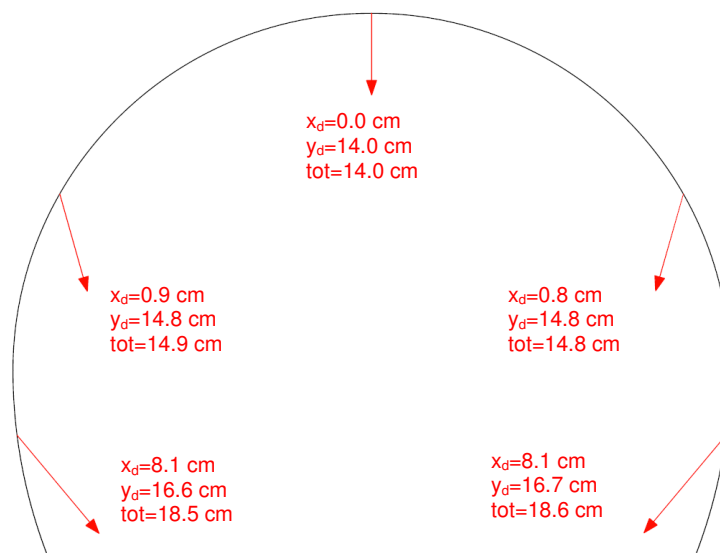
A seguito della posa del privervestimento, l'analisi viene condotta a termine tramite il rilascio completo delle forze di scavo al fine di simulare la posa dell'arco rovescio lontana dal fronte come avvenuto durante gli scavi. I risultati ottenuti mostrano spostamenti rilevanti in corrispondenza del cavo con massimi sul piede centina.



**Figura 27 – Time 2 – Spostamenti**



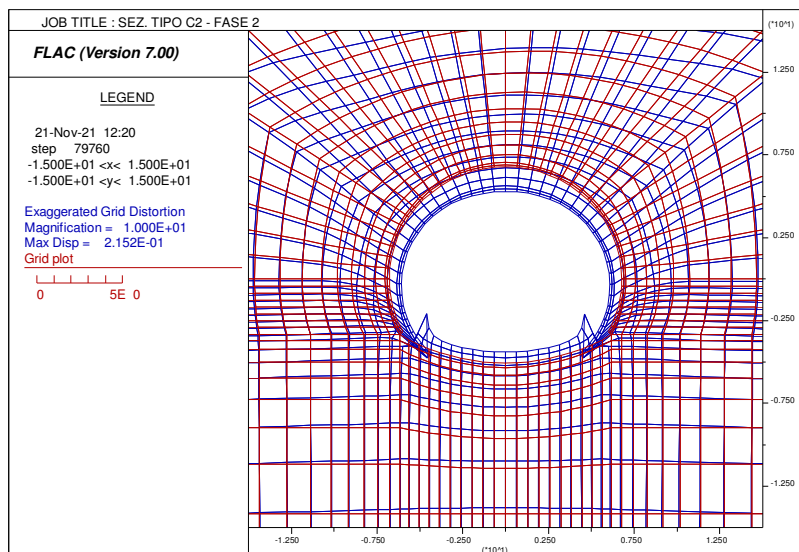
Osservando i valori di questi spostamenti in corrispondenza dei target per le misure di convergenza, è possibile osservare un'ottima corrispondenza con le misure rilevate in sito.



**Figura 28 – Back-analysis - Spostamenti**

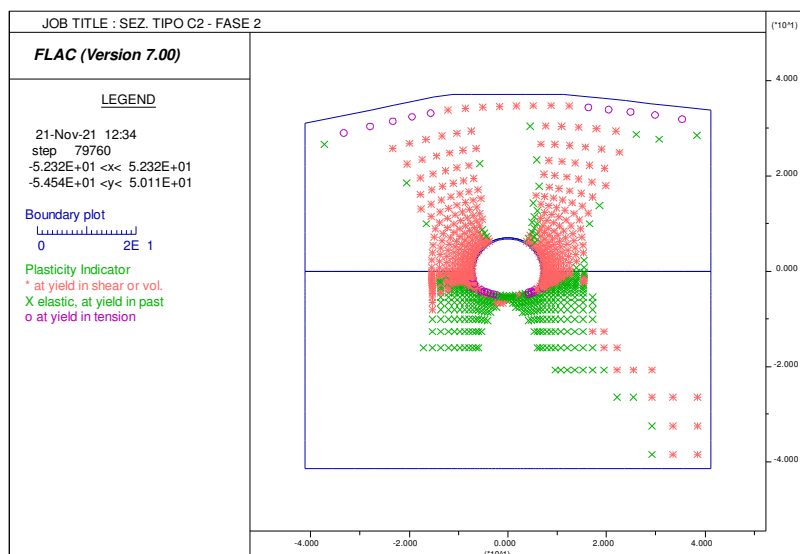
Si ottiene infatti, per i target 1- 2, una convergenza prossima ai 20 cm ed abbassamenti verticali dell'ordine dei 17 cm. Come avvenuto in sito dove il comportamento del privervestimento ha mostrato abbassamenti pressoché costanti delle centine (sinonimo di punzonamento delle stesse) associati a chiusure in corrispondenza dei target 1-2 e solo parzialmente in corrispondenza dei target 3-4, si ha un'ulteriore conferma della bontà dell'analisi condotta, dalle misure di convergenza per i target 3-4 in corrispondenza dei quali le convergenze sono limitate a pochi cm sull'orizzontale.

Il fenomeno di punzonamento del piede centina è facilmente visibile nell'analisi, oltre che dal controllo degli spostamenti ottenuti, anche dall'osservazione della deformata. Come mostrato nell'immagine sottostante, dove in rosso è indicata la griglia indeformata ed in blu la deformata, si può chiaramente osservare il fenomeno sopra descritto.



**Figura 29 – Time 2 - Deformata**

Osservando infine i fenomeni di plasticizzazione, si osservano importanti fasce di plasticizzazione in corrispondenza del piano dei centri che si propagano fino in superficie in conformità con le attese.



**Figura 30 – Time 2 - Plasticizzazioni**

I risultati ottenuti hanno quindi mostrato un'ottima corrispondenza tra gli spostamenti calcolati con quelli misurati, pertanto i parametri geomeccanici trovati si possono con buona approssimazione assimilare a quelli realmente presenti in sito.

## 8. Analisi delle strutture di completamento

### 8.1 Premessa

Nel presente capitolo sono riportati i risultati delle analisi numeriche che hanno permesso di investigare il regime tenso-deformativo nei rivestimenti strutturali previsti in progetto. Questo è stato raggiunto tramite due approcci differenti:

- Analisi di stabilità del fronte (metodo delle linee caratteristiche);
- Analisi di stabilità del fronte (metodo di Tamez);
- Analisi alle differenze finite (FLAC).

Le analisi di stabilità del fronte hanno consentito di cogliere le caratteristiche deformative del fronte in funzione della copertura e del materiale di scavo e quindi di predimensionare, qualora le analisi ne avessero evidenziato la necessità, gli interventi di preconsolidamento del fronte.

L'analisi alle differenze finite ha permesso invece di indagare più dettagliatamente - per le condizioni più rappresentative - il regime tensionale e deformativo nelle strutture e nell'ammasso circostante, nelle principali fasi esecutive fino alla completa realizzazione dell'opera, consentendo quindi di valutare l'evoluzione del comportamento dell'opera nel breve, medio e lungo termine.

### 8.2 Classi di comportamento del fronte di scavo

La valutazione dell'evoluzione dello stato tensionale nel terreno a seguito della realizzazione di una galleria viene condotta attraverso l'analisi dei fenomeni deformativi del mezzo attraversato, che forniscono informazioni sul comportamento della cavità nei riguardi della stabilità a breve e a lungo termine.

Il comportamento del fronte di scavo, al quale è legato quello della cavità, può essere sostanzialmente ricondotto alle seguenti tre categorie di comportamento:

- Categoria A: Galleria a fronte stabile:

Se il fronte di scavo è stabile, lo stato tensionale al contorno della cavità in prossimità del fronte si mantiene in campo prevalentemente elastico e i fenomeni deformativi osservabili sono di piccola entità e tendono ad esaurirsi rapidamente. In questo caso anche il comportamento del cavo sarà stabile, mantenendosi prevalentemente in campo elastico, e quindi non si rendono necessari interventi preventivi di consolidamento, se non localizzati e in misura molto ridotta. Il rivestimento definitivo costituirà allora il margine di sicurezza per la stabilità a lungo termine.

- **Categoria B: Galleria a fronte stabile a breve termine:**

Questa condizione si verifica quando lo stato tensionale indotto dall'apertura della cavità supera la resistenza geomeccanica del materiale al fronte, che si allontana progressivamente da un comportamento di tipo elastico, per passare ad un comportamento di tipo elasto-plastico. I fenomeni deformativi connessi con la redistribuzione delle tensioni risultano più accentuati che nel caso precedente, e producono nell'ammasso al fronte una riduzione delle caratteristiche di resistenza con decadimento verso i parametri plastici residui. La decompressione indotta dallo scavo può essere opportunamente controllata e regimata con adeguati interventi di preconsolidamento del fronte e/o di consolidamento al contorno del cavo.

In tal modo si fornisce l'opportuno contenimento all'ammasso, che manterrà un comportamento stabile.

Nel caso non si prevedano opportuni interventi, lo stato tensio-deformativo potrà evolvere verso situazioni di instabilità del cavo in via di realizzazione. Il rivestimento definitivo costituirà il margine di sicurezza a lungo termine.

- **Categoria C: Galleria a fronte instabile:**

L'instabilità progressiva del fronte di scavo è attribuibile ad una accentuazione dei fenomeni deformativi in campo plastico, che risultano immediati e più rilevanti, manifestandosi prima ancora che avvenga lo scavo, oltre il fronte stesso. Tali deformazioni producono un incremento dell'estensione della zona dell'ammasso decompressa in corrispondenza del fronte, dove si sviluppa un progressivo e rapido decadimento delle caratteristiche geomeccaniche del materiale. L'espansione della fascia di materiale decompresso al contorno del cavo deve essere contenuta prima dell'arrivo del fronte di scavo, e richiede pertanto interventi di preconsolidamento sistematici in avanzamento che consentano di creare artificialmente l'effetto arco capace di far evolvere la situazione verso configurazioni di equilibrio stabile.

Per definire il tipo di comportamento del fronte di scavo e la risposta complessiva della galleria durante l'avanzamento si è proceduto all'analisi di alcune grandezze "indice" che consentono una valutazione immediata della categoria di riferimento in cui può essere inserita ciascuna tratta omogenea identificata nel profilo geomeccanico.

Si è proceduto ad una analisi quantitativa dei fenomeni in gioco mediante il metodo delle curve caratteristiche, i cui principi teorici sono brevemente richiamati nel seguito, effettuando una serie di analisi specifiche.

L'attribuzione delle classi di comportamento viene effettuata secondo quanto riportato nella tabella seguente tenendo conto che:

- se il rapporto percentuale tra lo spostamento radiale al fronte ed il raggio equivalente di scavo è minore di 0,2 il comportamento è di tipo A, così come quando il rapporto tra il raggio plastico al fronte ed il raggio equivalente è inferiore a 1,2;
- se il rapporto percentuale tra lo spostamento radiale al fronte ed il raggio equivalente di scavo è compreso tra 0,2 e 0,5 il comportamento è di tipo B, così come quando il rapporto tra il raggio plastico al fronte ed il raggio equivalente è compreso tra 1,2 e 1,5;
- se il rapporto percentuale tra lo spostamento radiale al fronte ed il raggio equivalente di scavo è maggiore di 0,5 il comportamento è di tipo C, così come quando il rapporto tra il raggio plastico al fronte ed il raggio equivalente è superiore a 1,5.

$u_{cavo}/R_{eq}$	$R_{pl}/R_{eq}$	Classe di comportamento
< 0,2%	< 1,2	A
0,2 - 0,5 %	1,2 - 1,5	B
> 0,5 %	> 1,5	C

### 8.3 Metodo delle linee caratteristiche

Il metodo delle linee caratteristiche permette di valutare l'andamento delle deformazioni radiali dei diversi elementi della galleria (fronte, cavità, nucleo di terreno al fronte) al variare delle pressioni di contenimento sul contorno del cavo, le quali, per effetto dello scavo, dal valore di tensione naturale all'interno dell'ammasso, diminuiscono fino ad annullarsi oltre il raggio di azione del fronte di scavo.

Con tale metodo di calcolo è possibile stimare con buona approssimazione il valore della pressione di contatto tra il rivestimento della galleria e l'ammasso roccioso circostante ed il corrispondente valore della deformazione radiale del contorno della cavità ("convergenza"). Nel caso di comportamento elasto-plastico del mezzo, risulta inoltre possibile valutare l'eventuale estensione dell'ammasso roccioso circostante il cavo in cui viene superato il criterio di rottura stabilito ("fascia plastica").

Le principali ipotesi semplificative adottate dal metodo sono le seguenti:

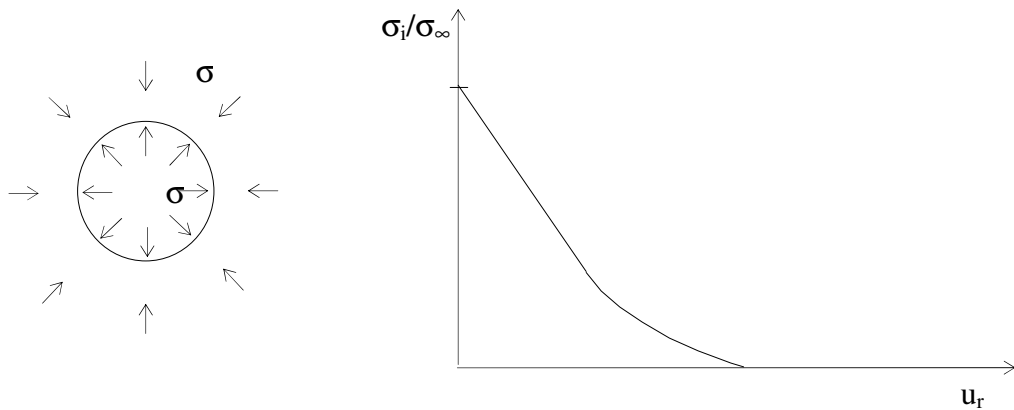
- Lo stato tensionale originario, in corrispondenza della galleria è supposto "idrostatico";
- Il profilo di scavo ed il rivestimento sono circolari;
- L'ammasso roccioso viene assunto come mezzo omogeneo ed isotropo a comportamento elastico-perfettamente plastico (elastico fino al raggiungimento del criterio di rottura stabilito);
- Il criterio di rottura dell'ammasso roccioso è generalmente quello di Mohr-Coulomb ( $\tau=c+\sigma \text{tg } \varphi$ );
- Il rivestimento della galleria è costituito da materiale a comportamento elastico lineare fino al raggiungimento del limite massimo di resistenza (dipendente dalla resistenza propria a compressione del materiale).

L'applicazione del metodo risulta pertanto condizionata dalle suddette ipotesi; per tale motivo il metodo risulta essere particolarmente indicato soltanto per sezioni di galleria sufficientemente profonde (ossia con copertura in chiave calotta  $> 2.5 \div 3$  volte il diametro della galleria) dove lo stato tensionale geostatico meglio approssima la condizione di carico idrostatico.

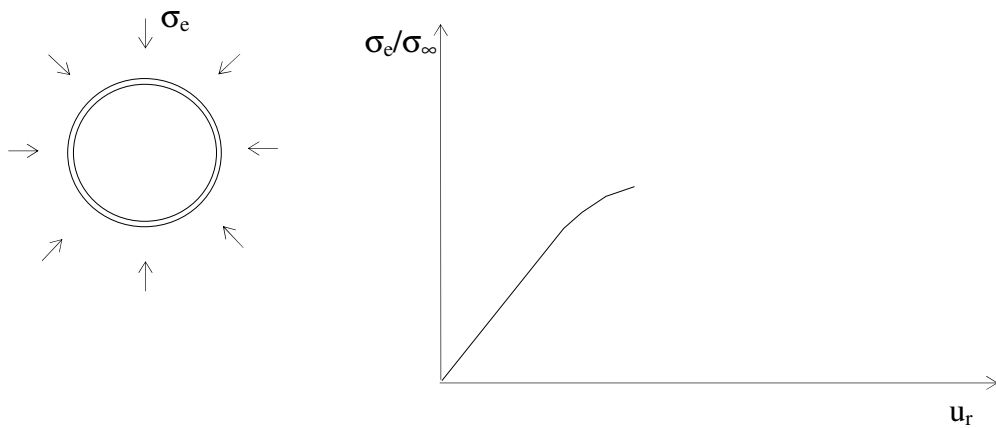
#### 8.3.1 Metodo di calcolo

Lo studio dell'interazione terreno-struttura viene effettuato tramite l'analisi del comportamento deformativo sia del contorno di scavo, al variare della pressione radiale interna applicata allo stesso, sia del rivestimento, al variare della pressione radiale esterna applicata sull'estradosso. La rappresentazione grafica del comportamento deformativo del contorno di scavo (sul piano "pressione applicata  $\sigma_i$ " / spostamento radiale del contorno " $u_r$ ") determina una curva denominata convenzionalmente "curva caratteristica

della cavità” mentre la rappresentazione grafica, sullo stesso piano, del comportamento deformativo del rivestimento determina la curva denominata “curva caratteristica del rivestimento”. Con una adeguata composizione delle due curve caratteristiche sullo stesso piano di rappresentazione è possibile risalire al punto di intersezione tra le due curve (“punto di equilibrio”) al quale corrisponde un determinato valore di pressione agente all’interfaccia tra il rivestimento e l’ammasso ed il relativo valore della deformazione radiale.



Curva caratteristica della cavità



Curva caratteristica del rivestimento

### 8.3.2 Curva caratteristica della cavità

Le equazioni risolutive adottate per la determinazione della linea caratteristica della cavità sono quelle relative ad un mezzo omogeneo ed isotropo a comportamento elastico-lineare, nelle zone in cui lo stato tensionale non supera il limite massimo di plasticizzazione dettato dal criterio di rottura, e sono quelle di un mezzo a comportamento perfettamente plastico, nelle zone in cui tale criterio viene superato.

Allorquando lo stato tensionale al contorno della cavità non comporti il superamento del criterio di rottura (comportamento elastico-lineare), gli spostamenti del contorno, in accordo alla teoria dell'elasticità, sono determinati dalla seguente relazione:

$$u_r = \frac{1+\nu_t}{E_t} \cdot (\sigma_\infty - \sigma_i) \cdot R$$

dove:

- R = raggio della cavità;
- $\sigma_\infty$  = tensione idrostatica iniziale;
- $\sigma_i$  = tensione idrostatica interna alla cavità;
- $E_t$  = Modulo elastico della roccia;
- $\nu_t$  = coefficiente di Poisson.

Quando invece, diminuendo la pressione interna  $\sigma_i$ , si supera la soglia stabilita dal criterio di rottura, incomincia a formarsi la fascia plastica intorno alla cavità; questa continua ad aumentare di estensione, al diminuire della pressione interna  $\sigma_i$ , secondo la seguente relazione:

$$R_p = R \cdot \left( \frac{2}{m+1} \cdot \frac{\sigma'_\infty}{\sigma'_i} \right)^{1/(m-1)}$$

dove:

- $R_p$  = raggio della fascia plastica;
- $\sigma'_\infty$  =  $\sigma_\infty + c \operatorname{ctg}\varphi$ ;
- $\sigma'_i$  =  $\sigma_i + c \operatorname{ctg}\varphi$ ;
- c = coesione della roccia;
- $\varphi$  = angolo di attrito interno;
- m =  $(1+\sin\varphi)/(1-\sin\varphi)$



Lo spostamento del contorno della cavità viene allora determinato mediante la seguente espressione:

$$u_{(R)} = u_{(R)}^e \Omega$$

dove:

$$u_{(R)}^e = [(1+\nu)/E] R \sigma'_{\infty}$$

$$\Omega = [(m-1)/(m+1)] \cdot [2/(m+1) (\sigma'_{\infty} / \sigma'_i)]^{(1+k)/(m-1)}$$

k = coefficiente di deformazione volumetrica (per k=1 si ha  $\epsilon_v=0$ )

Il criterio di rottura di Mohr-Coulomb  $\tau = c + \sigma \operatorname{tg}\varphi$  può essere espresso, in termini di tensioni principali, secondo la seguente relazione:

$$\sigma_{\theta} = m \cdot \sigma_r + \sigma_c$$

$$\text{dove } \sigma_c = (2 c \cos \varphi) / (1 - \sin \varphi)$$

al quale corrisponde il seguente valore di soglia della pressione interna " $\sigma^{cf}$ " al di sotto del quale il contorno della cavità si plasticizza:

$$\sigma^{cf} = 2/(m+1) \cdot \sigma_{\infty} - c \cos \varphi$$

ossia: se  $\sigma_i > \sigma^{cf}$  valgono le equazioni in campo elastico

se  $\sigma_i < \sigma^{cf}$  valgono le equazioni in campo plastico

### 8.3.3 Curva caratteristica del rivestimento

Per quel che riguarda il comportamento deformativo del rivestimento, supposto questo di forma anulare, lo spostamento dell'estradosso del rivestimento " $u_{(R)}$ " viene messo in relazione alla pressione idrostatica " $\sigma_e$ " agente sull'estradosso secondo la seguente relazione:

$$u_{(R)} = \sigma_e / K_t$$

dove " $K_t$ " rappresenta la rigidezza dell'anello, supposta variabile a seconda del livello tensionale, e quindi deformativo, dell'anello stesso; essa viene determinata secondo la seguente espressione:

$$K_t = K_0 (\sigma_{lim} - \sigma_e) / \sigma_{lim}$$

In base a tale espressione, la rigidezza dell'anello viene supposta variabile linearmente in modo tale che, in corrispondenza di una pressione esterna " $\sigma_e$ " nulla, essa coincida con il valore della rigidezza " $K_0$ " iniziale relativa alla condizione indeformata mentre, quando la pressione esterna " $\sigma_e$ " raggiunge il valore limite di rottura dell'anello " $\sigma_{lim}$ ", la rigidezza " $K_t$ " dell'anello si annulla ossia, si raggiunge la sua plasticizzazione.

Il valore della rigidezza iniziale " Ko ", corrispondente alla situazione indeformata dell'anello, viene determinato sulla base delle formulazioni proposte dalla Scienza delle Costruzioni come:

$$K_o = \frac{E_c \cdot (2R - t) \cdot t}{(1 + \nu)R[(1 - 2\nu)R^2 + (R - t)^2]}$$

dove :

R = raggio esterno dell' anello

t = spessore dell'anello

E<sub>c</sub> = modulo elastico

ν = coefficiente di Poisson

Per la determinazione della pressione limite di rottura dell'anello, indicando con "R<sub>c</sub>" la resistenza limite di rottura a compressione del materiale costituente il rivestimento, si può ricorrere alla nota espressione di Mariotte:

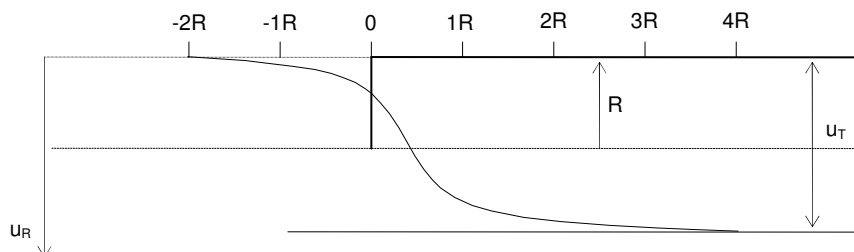
$$\sigma_{lim} = R_c (t/R)$$

### 8.3.4 Procedimento

Come noto, lo scavo della galleria determina, già per sezioni non ancora raggiunte dal fronte di scavo, una certa aliquota di "rilascio tensionale" così che, come rappresentato nella figura che segue, in corrispondenza del fronte di scavo, si è già generalmente sviluppata una aliquota di deformazione radiale (pari almeno, per un mezzo a comportamento elastico lineare, ad un terzo della convergenza totale " u<sub>T</sub> " a regime che si avrebbe per le sezioni di galleria già scavate e poste a sufficiente distanza dal fronte).

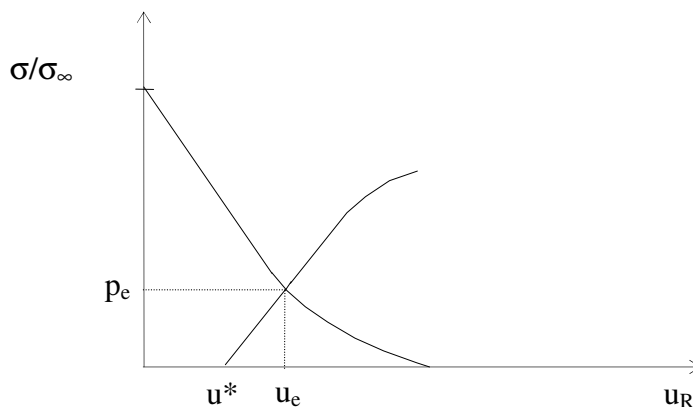
Tale comportamento viene di norma simulato mediante una graduale diminuzione della pressione radiale interna, applicata sul contorno dello scavo, a partire dal valore della pressione geostatica iniziale, fino al suo completo annullamento.

All'atto della messa in opera del rivestimento, pertanto, il contorno della cavità avrà già manifestato una determinata convergenza (questa dipenderà, oltre che dal comportamento meccanico dell'ammasso roccioso, anche dalla distanza intercorrente tra il rivestimento ed il fronte di scavo); nell'ipotesi di messa in opera del rivestimento a diretto contatto con il fronte di scavo e di un comportamento perfettamente elastico della roccia, tale convergenza risulterà, come detto, pari ad un terzo della convergenza finale.



Andamento delle deformazioni radiali lungo la galleria

La sovrapposizione delle due curve caratteristiche sullo stesso piano di rappresentazione viene pertanto effettuata tenendo conto delle deformazioni già avvenute all'atto della messa in opera del rivestimento; tale operazione può essere agevolmente effettuata adottando una opportuna traslazione orizzontale della curva caratteristica del rivestimento ( $u^*$ ), come schematizzato nella figura che segue.



Determinazione del punto di equilibrio

Ai fini della determinazione delle categorie di comportamento, le analisi sono state svolte nell'ipotesi di cavo libero, senza alcun intervento di preconsolidamento, precontenimento e contenimento.

La resistenza del nucleo di terreno situato davanti al fronte ( $R_{1/2nucleo}$ ), è definita a partire dal valore di coesione ( $c$ ) del terreno e dal suo angolo di attrito ( $\phi$ ) secondo le seguenti relazioni:

$$R_{1/2nucleo} = c \cdot k_p^{0.5}$$

$$k_p = \tan^2(45^\circ + \phi/2)$$

Nella figura seguente si riportano i risultati della elaborazione in oggetto.

Per tale valutazione si è cautelativamente fatto riferimento ai parametri geotecnici residui ottenuti dalla precedente back-analysis.

<b>SEZIONE TIPO C2P</b>				
<b>Raggio Cavità:</b>	R =	7.00	m	
Tensione iniziale al contorno	$\sigma_{\infty}$ =	900.00	kPa	
<b>AMMASSO:</b>				
Angolo attrito	$\phi$ =	24.00	°	
Coesione	c =	52.00	kPa	
Modulo elastico	$E_m$ =	250.00	MPa	
Coeff. Poisson	$\nu$ =	0.30		
Coeff. dilatazione volum.	k =	1.00		
Pressione di Plasticizzazione	$\sigma^{cr}$ =	486.43	kPa	
Resistenza al fronte:	$R_{FR}$ =	160.15	kPa	
Spostamento al fronte:	$u_f$ =	0.0470	m	
Raggio Fascia Plastica:	$R_{PIF}$ =	12.36	m	
Estensione Fascia PL.:	$E_{PL}$ =	5.36	m	
	$R_{PIF} / R$ =	1.77	<b>C</b>	Fronte Instabile
	$u_f / R$ =	0.67%	<b>C</b>	Fronte Instabile

Come rilevabile dalla figura, si osserva come la sezione presenti condizioni di instabilità del cavo secondo il metodo di classificazione ADECO-RS precedentemente descritto. Occorre pertanto ricorrere agli interventi di consolidamento del fronte così come previsti dal progetto.

L'irrigidimento del nucleo d'avanzamento, realizzato mediante gli interventi di consolidamento, viene tenuto in conto mediante la valutazione dell'incremento di resistenza al taglio del terreno e del relativo incremento di rigidità.

### 8.3.5 Valutazione della resistenza a taglio

L'incremento della resistenza al taglio viene valutato come incremento di coesione, in accordo a quanto proposto da Hoek. Si considera una zona consolidata e si imposta un processo di medie pesate con riferimento all'area ed alla resistenza di ogni singolo componente in questione (ammasso, iniezioni cementizie), ottenendo:

$$R_{\text{amm}} \cdot A_{\text{amm}} + R_{\text{miscela}} \cdot A_{\text{miscela}} = R^* \cdot A^*$$

dove:

- $R_{\text{amm}}$  resistenza dell'ammasso originario, pari alla resistenza a compressione monoassiale del materiale:  $(2 \cdot c \cdot \cos\phi)/(1-\sin\phi)$ ;
- $A_{\text{amm}}$  area dell'ammasso;
- $R_{\text{miscela}}$  resistenza della miscela cementizia, calcolata considerando una resistenza dopo 1 settimana di maturazione dal getto ( $R_{ck}=30$  MPa), e applicando un fattore di sicurezza pari a 1.3;
- $A_{\text{miscela}}$  area interessata dall'iniezione cementizia;
- $A^*$  area totale;
- $R^*$  resistenza equivalente.

A favore di sicurezza non si sono considerati gli elementi strutturali inseriti.

Ricavata dall'espressione precedente  $R^*$ , si può valutare la coesione  $c^*$  da attribuire al materiale consolidato, essendo:

$$R^* = (2 \cdot c^* \cdot \cos\phi)/(1-\sin\phi)$$

con angolo d'attrito dell'ammasso originario.

Pertanto il materiale presente nella fascia consolidata attorno al cavo viene modellato con coesione  $c^*$  ed angolo d'attrito  $\phi$ .

### 8.3.6 Valutazione dell'incremento di rigidezza

L'incremento della rigidezza del materiale consolidato viene valutato mediante omogenizzazione dei moduli elastici dei componenti coinvolti dal consolidamento (trascurando sempre, cautelativamente, gli elementi strutturali).

$$E_{amm} \cdot A_{amm} + E_{miscela} \cdot A_{miscela} = E^* \cdot A^*$$

dove:

- $E_{amm}$      modulo elastico dell'ammasso originario;
- $A_{amm}$      area dell'ammasso;
- $E_{miscela}$     modulo elastico della miscela cementizia;
- $A_{miscela}$     area interessata dall'iniezione cementizia;
- $A^*$          area totale;
- $E^*$          modulo elastico equivalente.

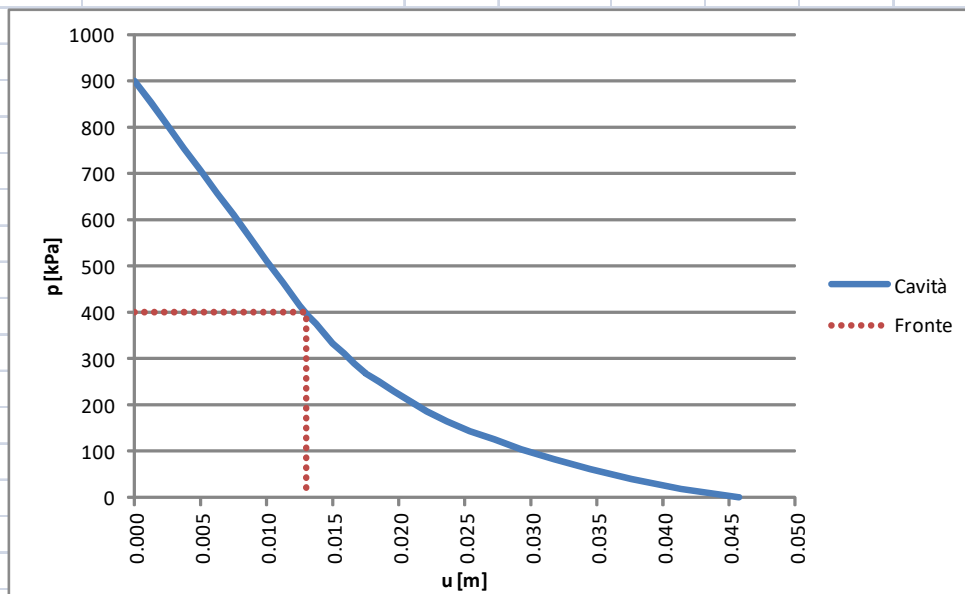
Risolvendo la precedente equazione si ricava il modulo elastico  $E^*$  che verrà attribuito al materiale consolidato.

Nella figura seguente si riportano i risultati della elaborazione effettuata con riferimento alla situazione di fronte consolidato e, quindi, adottando i parametri di resistenza e di deformabilità equivalenti precedentemente elencati.

Si osserva come il comportamento del fronte risulti di tipo "stabile" a conferma della effettiva efficacia degli interventi previsti.

### SEZIONE TIPO C2P

<b>Raggio Cavità:</b>	R =	7.00 m	
Tensione iniziale al contorno	$\sigma_{\infty}$ =	900.00 kPa	
<b>AMMASSO:</b>			
Angolo attrito	$\phi$ =	24.00 °	
Coesione	c =	129.48 kPa	
Modulo elastico	$E_m$ =	351.87 MPa	
Coeff. Poisson	$\nu$ =	0.30	
Coeff. dilatazione volum.	k =	1.00	
Pressione di Plasticizzazione	$\sigma^{cr}$ =	415.65 kPa	
Resistenza al fronte:	$R_{FR}$ =	398.78 kPa	
Spostamento al fronte:	$u_f$ =	0.0130 m	
Raggio Fascia Plastica:	$R_{Pif}$ =	7.13 m	
Estensione Fascia PL.:	$E_{PL}$ =	0.13 m	
	$R_{Pif} / R$ =	1.02	A Fronte Stabile
	$u_f / R$ =	0.19%	A Fronte Stabile



Nella figura seguente si riportano i risultati dell'elaborazione relativa alla messa in opera del rivestimento di prima fase dalla quale si possono ricavare le informazioni in merito alla convergenza del cavo all'atto della messa in opera del rivestimento e ai valori di convergenza e pressione al contatto relativi al punto di equilibrio.

Nelle predette simulazioni il rivestimento provvisorio è stato considerato nella sola componente del calcestruzzo (sprit-beton) trascurando la presenza al suo interno delle centine metalliche.

<b>SEZIONE TIPO C2P</b>	
<b>Raggio Cavità:</b>	R = 7.00 m
Tensione iniziale al contorno	$\sigma_{\infty}$ = 900.00 kPa
<b>AMMASSO:</b>	
Angolo attrito	$\phi$ = 24.00 °
Coesione	c = 129.48 kPa
Modulo elastico	$E_m$ = 351.87 MPa
Coeff. Poisson	$\nu$ = 0.30
Coeff. dilatazione volum.	k = 1.00
Pressione di Plasticizzazione	$\sigma^{cr}$ = 415.65 kPa
Resistenza al fronte:	$R_{FR}$ = 398.78 kPa
<b>RIVESTIMENTO:</b>	
Spessore	s = 0.25 m
Modulo elastico	$E_c$ = 25000.00 MPa
Coeff. Poisson	$\nu$ = 0.20
Resist. caratt. di rottura	$R_c$ = 13.33 MPa
Spostamento Iniziale	$u^*$ = 0.0221 m
<b>PUNTO INTERAZIONE TERRENO/RIVESTIMENTO</b>	
Pressione al contatto:	p = 160.68 kPa
Spostamento finale:	u = 0.0241 m
Raggio Fascia Plastica:	$R_{pl}$ = 9.70 m
Estensione Fascia PL.:	$E_{pl}$ = 2.70 m

u [m]	p [kPa] (Cavità)	p [kPa] (Rivestimento)
0.000	900.00	-
0.005	650.00	-
0.010	450.00	-
0.015	300.00	-
0.020	200.00	-
0.0221	160.68	160.68
0.0241	140.00	160.68
0.030	100.00	-
0.040	50.00	-
0.050	20.00	-



## 8.4 Metodo di Tamez

In questa fase viene valutata l'efficacia dei consolidamenti al fronte di scavo, mediante le formulazioni empiriche proposte da Tamez e descritte nel seguito.

La valutazione della stabilità del fronte di scavo può essere condotta mediante l'impiego di metodi analitici semplificati all'equilibrio limite. In particolare si fa riferimento alle teorie di Tamez e Cornejo che ipotizzano che esistano dei prismi di terreno in distacco secondo sezioni longitudinali, giungendo a definire un coefficiente di sicurezza FSF nei confronti della stabilità del fronte di scavo.

Il metodo dell'equilibrio limite proposto da Tamez tiene conto della riduzione dello stato di confinamento triassiale del nucleo di terreno oltre il fronte per mezzo di un meccanismo di rottura del tipo effetto volta, con il quale il volume di terreno gravante sulla corona della galleria è definito da un paraboloide, approssimato mediante tre solidi prismatici, come illustrato nelle figure seguenti.

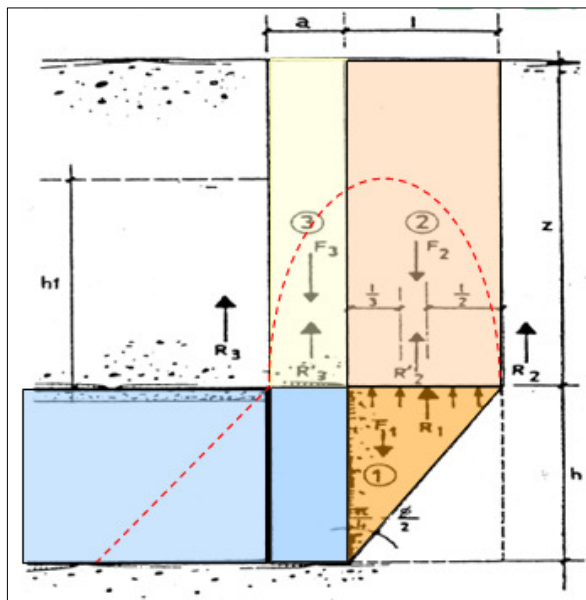


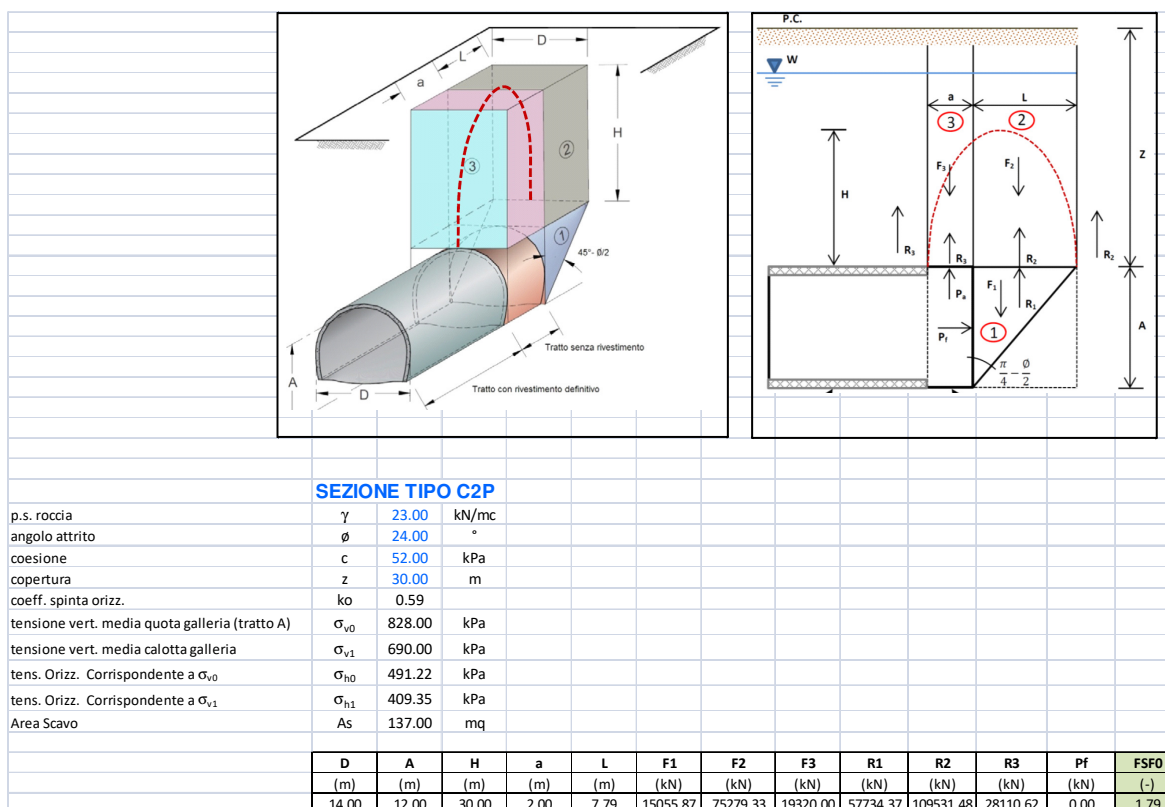
Figura 31 - Schema proposto da Tamez.

In questo modo si determinano le massime tensioni tangenziali che si possono sviluppare sulle facce di ogni prisma senza che avvengano scorrimenti (forze resistenti) e le forze di massa di ogni prisma (forze agenti). Il rapporto tra i momenti delle forze resistenti e delle forze agenti fornisce un coefficiente di sicurezza, denominato FSF (face security factor). Al valore di FS definito dall'equilibrio limite è associato un tipo di comportamento del fronte di scavo secondo quanto descritto nella tabella esposta nel seguito.

FS	Comportamento del fronte di scavo
>2	Comportamento elastico
1.5 - 2	Comportamento elasto - plastico: cedimenti normalmente ammissibili
1.3 - 1.5	Comportamento elasto - plastico: cedimenti importanti
1 - 1.3	Incipiente rottura
<1	Rottura

**Tabella 3 – Categorie di comportamento del fronte – FS secondo Tamez**

Nella scheda seguente si riportano i risultati delle valutazioni effettuate nell'ipotesi di assenza di interventi di consolidamento del fronte.

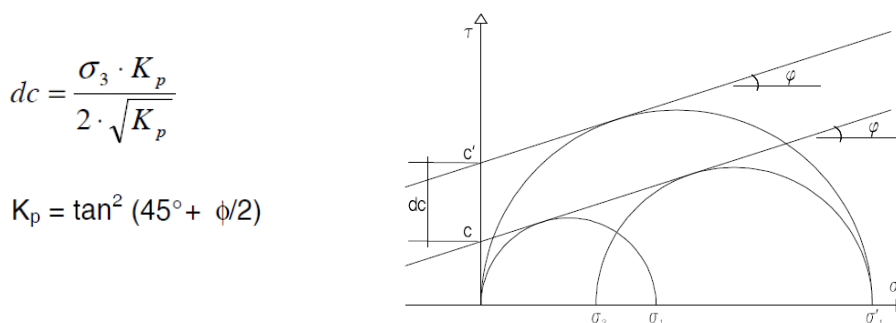


In assenza di consolidamenti del fronte si ottiene un fattore di sicurezza FSF pari a 1.79. In base a tale risultato il fronte sarebbe classificabile come stabile con comportamento elasto-plastico e cedimenti comunque ammissibili. Tuttavia è da evidenziare che il metodo in oggetto è più propriamente indicato per

gallerie a limitata profondità e quindi i risultati ottenuti sono da considerarsi solo indicativi, specie se raffrontati con quanto ricavato con il metodo delle linee caratteristiche.

Con il metodo di Tamez si può tenere conto della presenza degli elementi di consolidamento al fronte mediante il metodo della “coesione equivalente”, ovvero valutando la pressione di confinamento sul fronte esercitata dagli elementi in vetroresina.

L'incremento di coesione è stato calcolato secondo lo schema riportato nella seguente figura:



**Figura 32 – Contributo dei VTR**

Si è calcolato il valore di  $\sigma_3$  (= pressione di confinamento sul fronte) relativo ai due possibili meccanismi di rottura (rottura del VTR e sfilamento dell'elemento), considerando per la valutazione di  $dc$  il minore tra i due.

Per le verifiche si è considerata la sezione C2P in corrispondenza della massima copertura pari a circa 30 m da chiave calotta.

Rottura VTR       $\sigma_3 = N \frac{A_c \cdot \sigma_s}{A_s}$

con:

- |                                 |                             |
|---------------------------------|-----------------------------|
| $A_c = 1570 \text{ mm}^2$       | area VTR                    |
| $\sigma_s = 600 \text{ N/mm}^2$ | tensione di snervamento VTR |
| $N = 81$                        | numero di elementi in VTR   |
| $A_s = 137 \text{ m}^2$         | area di scavo               |

risulta  $\sigma_3 = 556 \text{ kPa}$



## 8.5 Analisi alle differenze finite

### 8.5.1 Analisi numeriche

Le analisi numeriche, volte a valutare lo stato tenso-deformativo nel rivestimento e nell'ammasso al contorno del cavo, sono state condotte in condizioni di deformazioni piane (plane-strain); queste sono rappresentative delle sezioni tipologiche correnti della galleria naturale analizzata in questa sede.

Con l'ausilio del codice di calcolo alle differenze finite FLAC 7.0 è stata condotta un'analisi numerica per la condizione ritenuta più significativa in corrispondenza dell'edificio di Via Gavatro n°26-28 in presenza delle massime coperture pari a circa 30 m considerando quale sezione tipo di avanzamento la sezione C2P. Attraverso tali analisi è stato possibile simulare le principali fasi esecutive, fino alla completa realizzazione dell'opera e verificare l'idoneità delle sezioni previste in fase progettuale.

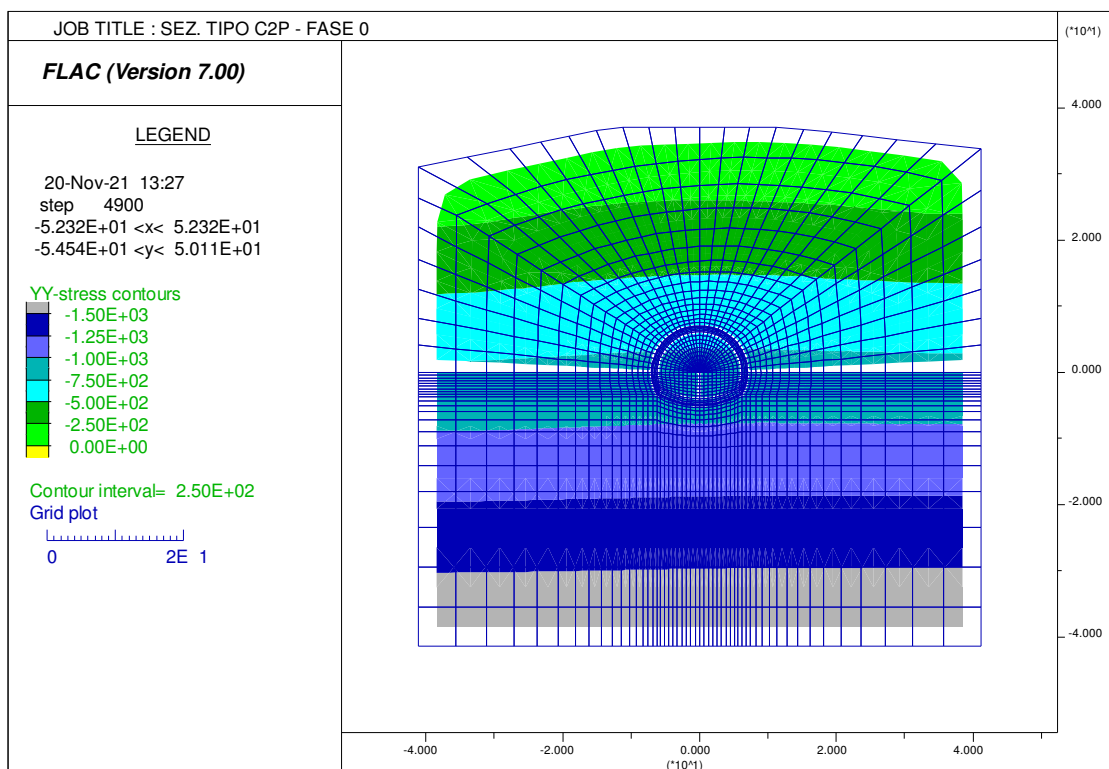
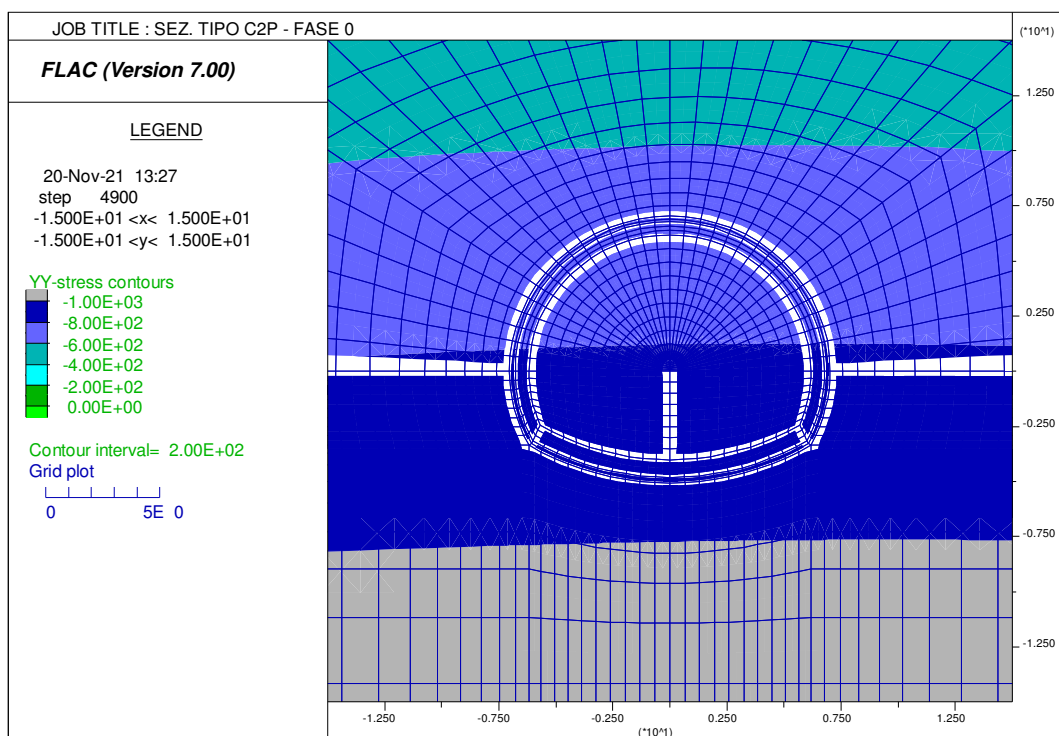


Figura 33 – Mesh di calcolo con tensione geostatica iniziale



**Figura 34 – Intorno galleria**

### 8.5.2 Geometrie dei modelli

Le analisi numeriche sono state condotte considerando un reticolo avente dimensioni e grado di infittimento al contorno del cavo tali da garantire una soluzione numerica accurata e rappresentativa della situazione in sito. Le dimensioni della griglia e le distanze dalla galleria ai limiti esterni della griglia stessa sono tali da evitare eventuali effetti di bordo sull'area di interesse del reticolo. Il contorno dei modelli è stato vincolato lateralmente ed inferiormente mediante opportuni vincoli.

### 8.5.3 Leggi di comportamento del materiale

Il criterio di rottura adottato nelle analisi è quello di Mohr-Coulomb in condizioni di strain-softening descritto in precedenza.

I parametri geomeccanici utilizzati nell'analisi sono stati determinati, come ampiamente descritto in precedenza, tramite il processo di back-analysis che ha condotto alla rideterminazione dei parametri dell'ammasso in funzione delle evidenze riscontrate nel tratto di galleria già scavato.

Nella seguente tabella vengono nuovamente riportati i parametri così ottenuti:

Unità	$\gamma$	$c'_p - c'_r$	$\phi_p - \phi_r$	E	$\nu$
[-]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kPa]	[°]	[MPa]	[-]
Back-Analysis	23	65 - 52	30 - 24	250	0.3

**Tabella 4 – Parametri geomeccanici**

Si osserva che i parametri geomeccanici ottenuti sono inferiori non solo ai valori previsti da PE in corrispondenza delle alte coperture ma anche dei parametri geomeccanici previsti in corrispondenza delle basse coperture in zona imbocco nord.

Le Verifiche della sezione tipo C2P ad alta copertura risultano pertanto valide e cautelative anche per la sezione tipo C2VP, prevista per le basse coperture, non essendoci differenze in termini di carpenterie minime ed armature oltre che di consolidamenti tra le due sezioni.

Per la definizione delle caratteristiche geotecniche della fascia di materiale consolidato al contorno del cavo, si è adottato il criterio empirico (basato sulla osservazione di dati sperimentali di gallerie, scavate in contesti geotecnici analoghi e su cui si è operato con simili interventi di preconsolidamento) di amplificare il valore del modulo di deformabilità di 2-3 volte rispetto a quello naturale.

#### 8.5.4 Stato di sforzo iniziale

Nella prima fase dell'analisi numerica viene ricostruita in termini di sforzi e di deformazioni la situazione iniziale preesistente allo scavo della galleria.

Il carico applicato in direzione verticale corrisponde al carico geostatico alle varie quote del modello.

Il carico applicato in direzione orizzontale è stato determinato per back-analysis al fine di ottenere spostamenti in linea con quanto rilevato dal sistema di monitoraggio e risulta pari a:  $K_0 = 0.7$ .

#### 8.5.5 Carichi idraulici

Nonostante gli interventi in progetto prevedano la posa di tubi drenanti all'esterno del rivestimento definitivo della galleria, in via cautelativa si è tenuto conto di un eventuale localizzato mal funzionamento del sistema di drenaggio considerando, nella fase di lungo termine, un carico idrostatico agente sul rivestimento definitivo, con un battente piezometrico proporzionato alla copertura considerata nel calcolo pari a 15 m sopra la chiave calotta della galleria.

### 8.5.6 Azioni sismiche

Le sollecitazioni sismiche sono definite in funzione dei parametri di accelerazione precedentemente definiti.

In particolare, con riferimento allo stato di SLV, si ha:

$$a_g/g = 0.144$$

$$S_s = 1.50$$

$$S_t = 1.00$$

Le componenti sismiche di accelerazione orizzontale e verticale sono pertanto:

$$k_h = a_g/g \cdot S_s \cdot S_t = 0.22$$

$$k_v = \pm 1/2 k_h = \pm 0.11$$

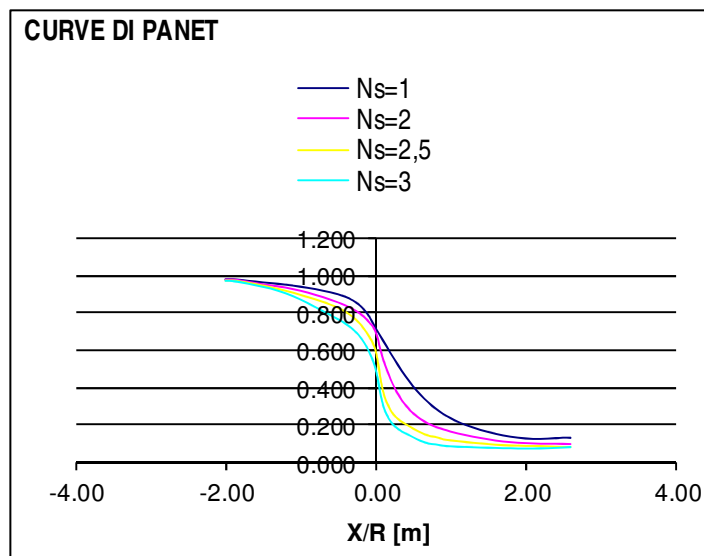
Le azioni sismiche vengono rappresentate mediante forze statiche equivalenti pari al prodotto delle forze di gravità per un opportuno coefficiente sismico.

Nel caso specifico, essendo la struttura completamente interrata, essa si muove solidalmente con il terreno e le accelerazioni sismiche non subiscono amplificazioni; ciò viene tenuto in conto adottando un fattore di comportamento "q" pari a 1.0. In questo modo la struttura viene considerata sempre in campo elastico e verificata come struttura di tipo "non dissipativo".

### 8.5.7 Scavo della galleria

La simulazione dello scavo avviene mediante il progressivo annullamento delle forze interne al profilo di scavo, fino al loro completo rilassamento; gli step di rilassamento vengono operati in funzione della distanza dal fronte della sezione considerata nell'analisi, mediante l'impiego delle curve di Panet. La scelta della curva di Panet da utilizzare è stata condotta considerando il numero di stabilità  $N_s=1$ .





**Figura 35 – Curve di Panet**

L'adozione della sola curva di Panet non produce tuttavia i dovuti risultati tenso-deformativi, né per confronto con quanto ottenuto in base alla teoria delle Linee Caratteristiche, né per confronto con quanto effettivamente rilevato in analoghe gallerie in corso d'opera. Un ruolo fondamentale per una corretta definizione dei rilassamenti da adottare nelle analisi è il valore di rilassamento da impiegare in corrispondenza del fronte di scavo. Al fine di adattare il valore di rilassamento alle caratteristiche geomeccaniche del materiale, dello stato tensionale in sito e del criterio di rottura del materiale si è proceduto ad impiegare al fronte un valore di rilassamento tale da determinare una risposta deformativa, in termini di convergenza al fronte, paragonabile a quella ottenuta dalle analisi precedentemente condotte mediante il Metodo delle Linee Caratteristiche; è questo un procedimento di “taratura” della curva di Panet.

Una volta determinata la riduzione iniziale, in corrispondenza del fronte di scavo, le riduzioni alle fasi successive verranno determinate proporzionalmente all’andamento della curva di Panet in funzione della distanza dal fronte, secondo la seguente formula:

$$R_{forze} = R_{forze, fronte} + \beta \cdot (R_{PANET} - R_{PANET, fronte})$$

in cui il termine  $\beta = (100\% - Rid. \%) / (100\% - R_{PANET, fronte} \%)$  tiene conto delle percentuali di riduzione residue, dopo il rilassamento del fronte.

Si riporta nella seguente tabella il rilassamento teorico al fronte utilizzato nell’analisi al fine di ottenere una convergenza dello stesso dell’ordine di quanto ottenuto tramite le linee caratteristiche.

Dallo studio delle linee caratteristiche riportato in precedenza si evidenzia infatti che all'atto della posa in opera del rivestimento di prima fase, la convergenza teorica della cavità è pari a 2.2 cm con una pressione residua al contorno di 187 kPa, pari a circa il 20% della pressione litostatica iniziale (cfr scheda di calcolo delle linee caratteristiche riportata in precedenza).

Rilassamento	Convergenza [cm]
80%	2.2

**Tabella 5 – Rilassamento al fronte**

### 8.5.8 Prerivestimento e rivestimento definitivo

Il prerivestimento ed il rivestimento definitivo sono stati modellati attraverso una successione di aste rettilinee, elementi tipo “beam”, collegate con continuità tra loro ed ai nodi della mesh. In questo modo si sono determinate le sollecitazioni agenti sul rivestimento stesso in termini di azioni interne.

#### Prerivestimenti - Caratteristiche dei materiali

Il prerivestimento è stato simulato con elementi tipo "beam" con caratteristiche strutturali assimilabili a quelle dello spritz-beton e centine, e legge costitutiva elastico lineare.

In tutte le sezioni tipo, il prerivestimento è costituito da spritz-beton  $R_{ck} \geq 30$  MPa e da centine S275, aventi le seguenti caratteristiche meccaniche:

spritz-beton  $R_{ck} \geq 30$  MPa:

$E = 31480$  MPa a 28gg;

centine S275:

$E = 210000$  MPa.

Nella modellazione numerica il pririvestimento è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico-lineare e isotropo, il cui modulo di deformabilità è stato determinato attraverso l'omogeneizzazione delle centine al calcestruzzo.

Nella tabella seguente sono indicate le principali caratteristiche geometriche e meccaniche relative ai rivestimenti di prima fase considerati nell'analisi numerica.

<b>CENTINE</b>	<b>SPRITZ BETON</b> <b>Spessore [cm]</b>	<b>SPRITZ BETON</b> <b>Rck [MPa] 28 gg</b>
2IPE 200/1.0 m	25 20+5)	30

**Tabella 6 – Sintesi delle caratteristiche del pririvestimento**

Rivestimenti definitivi - Caratteristiche dei materiali

Il rivestimento definitivo è costituito da calcestruzzo C30/37; a tale materiale corrispondono le seguenti caratteristiche meccaniche:

$E = 32840\text{MPa}$       a 28 gg;  
 $\nu = 0.20$ .

Il rivestimento definitivo è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico-lineare. Per la sezione tipo analizzata, si riporta una sintesi delle principali caratteristiche geometriche relative ai rivestimenti definitivi considerati nelle elaborazioni numeriche.

<b>CALOTTA</b> <b>Spessore [cm]</b>	<b>ARCO ROVESCIO</b> <b>Spessore [cm]</b>
60	80

**Tabella 7 – Caratteristiche geometriche dei rivestimenti definitivi**

## 8.5.9 Criteri di verifica dei rivestimenti

### Verifica del rivestimento di prima fase

#### Verifiche allo stato limite ultimo

Per la verifica allo stato limite ultimo viene utilizzata la seguente combinazione di azioni:

$$E_d = \gamma_G G_k$$

in quanto le azioni prese in conto (peso proprio struttura, sovrastruttura, forze indotte dalla pressione del terreno o dell'acqua) risultano classificate come permanenti (G).

La verifica allo stato limite ultimo viene condotta attraverso la definizione delle seguenti azioni di progetto:

$$N_d = 1.3 \cdot N$$

$$M_d = 1.3 \cdot M$$

dove N ed M sono le sollecitazioni derivanti dalle analisi numeriche.

La resistenza di calcolo del calcestruzzo è definita attraverso la relazione:

$$f_{cd} = 0.83 \cdot 0.85 \cdot R_{ck} / \gamma_c$$

dove il coefficiente parziale di sicurezza del conglomerato cementizio ( $\gamma_c$ ) è pari a 1.5.

Individuata quindi la sezione tipo analizzata e le sollecitazioni agenti si è proceduto alla verifica a presso flessione mediante i domini di resistenza.

Verrà quindi riportato il diagramma di interazione M-N, il cui contorno individua i limiti della resistenza di calcolo  $R_d$ . La verifica risulta soddisfatta quando  $R_d < E_d$ , ovvero quando i punti rappresentativi delle coppie di sollecitazioni sul rivestimento risultano all'interno del diagramma.

Il diagramma relativo al pririvestimento viene costruito considerando una sezione in calcestruzzo armato di spessore pari allo spessore di spritz beton e un armatura pari all'area delle ali delle centine (AFTES "Recommendations for the DESIGN OF SPRAYED CONCRETE FOR UNDERGROUND SUPPORT" – 09/11/2000).

#### Verifiche allo stato limite di esercizio

Trattandosi di strutture a carattere provvisorio, le verifiche allo stato limite di esercizio non sono ritenute significative.

### Verifica del rivestimento definitivo

#### Verifiche allo stato limite ultimo

Per la verifica allo stato limite ultimo viene utilizzata la seguente combinazione di azioni:

$$E_d = \gamma_G G_k$$

La verifica allo stato limite ultimo viene condotta attraverso la definizione delle seguenti azioni di progetto:

$$N_d = 1.3 \cdot N$$

$$M_d = 1.3 \cdot M$$

dove N ed M sono le sollecitazioni derivanti dalle analisi numeriche.

Verrà riportato il diagramma di interazione M-N, i cui confini rappresentano i limiti della resistenza di calcolo  $R_d$ . La verifica risulta soddisfatta allorquando  $R_d < E_d$ , ovvero quando i punti rappresentativi delle coppie di sollecitazioni sul rivestimento risultano all'interno al diagramma.

#### Calcestruzzo

Le resistenze di calcolo, da utilizzare nelle verifiche allo stato limite ultimo, si ricavano dividendo le resistenze caratteristiche per opportuni coefficienti:

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{0.85 f_{ck}}{\gamma_c} = 17 \text{ MPa} \Rightarrow \text{per C30/37};$$

con  $\gamma_c = 1.5$ .

#### Acciaio armatura

Le resistenze di calcolo, da utilizzare nelle verifiche allo stato limite ultimo, si ricavano dividendo le resistenze caratteristiche per opportuni coefficienti:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 391.3 \text{ MPa}$$

con:  $f_{yk} = 450 \text{ MPa}$   
 $\gamma_s = 1.15$ .

### Verifiche allo stato limite di esercizio

La verifica allo stato limite di esercizio viene condotta calcolando le tensioni massime sul rivestimento a partire dai valori nominali ottenuti dall'analisi e confrontando queste con quelle ammissibili definite attraverso le relazioni:

$$\sigma_c < f_{ck} \times 0.45$$

$$\sigma_s < f_{yk} \times 0.8$$

Le verifiche a presso flessione sono state condotte per le combinazioni di sollecitazione ritenute più significative.

### **8.5.10 Fasi di calcolo**

Il calcolo è stato condotto per fasi successive, secondo lo schema di seguito descritto:

#### TIME 0 – Geostatico

In questa prima fase di calcolo vengono applicati il peso proprio del terreno e le caratteristiche di resistenza e deformabilità delle formazioni in sito, in modo tale da ricostruire la situazione tensionale preesistente alla costruzione della galleria.

#### TIME 1 – Taratura e scavo – Relax 80%

In questa time di calcolo viene simulata l'apertura del fronte attraverso un'opportuna riduzione delle forze di scavo.

#### TIME 2a – Posa prerivestimento di calotta a 1 m dal fronte – Relax 85%

Viene simulata la posa del prerivestimento in prossimità del fronte di scavo.

#### TIME 2b – Posa del puntone a 2 m dal fronte – Relax 90%

Viene simulata la posa del puntone e l'avanzamento dello scavo.

#### TIME 3 – Getto dell'arco rovescio – Relax 95%

Viene simulato il getto dell'arco rovescio e l'ulteriore avanzamento dello scavo.

#### TIME 4 – Getto del rivestimento di calotta – Relax 98%

Viene simulata la realizzazione del rivestimento di calotta, a completamento del rivestimento definitivo e ulteriore avanzamento.

#### TIME 5 – Scarico totale delle tensioni - Relax 100%

Viene completato lo scarico delle tensioni al contorno.

### TIME 5a – Simulazione falda di progetto

Viene modellata la condizione a lungo termine applicando una pressione idrostatica sul rivestimento definitivo che simula la falda di progetto.

### TIME 6 – Applicazione delle accelerazioni sismiche di progetto

In questa fase si simula l'azione sismica mediante una rotazione del vettore gravità definita in funzione delle componenti di accelerazione orizzontale e verticale precedentemente calcolate.

### ***Esame dei risultati***

I risultati più significativi ottenuti dalla presente analisi sono riassunti in allegato.

Gli output dell'elaborazione FLAC, di tipo grafico, sono riportati anch'essi in allegato; le dimensioni geometriche e gli spostamenti sono espressi in metri, mentre le tensioni in kPa.

Nel corso della simulazione delle fasi esecutive della galleria naturale, i fenomeni di plasticizzazione nel terreno al contorno della cavità interessano una fascia di pochi metri in prossimità del piano dei centri della galleria e dei reni della stessa.

In termini deformativi la convergenza diametrale ed i cedimenti medi risultano da calcolo pari a 5 cm circa. Tali deformazioni si esauriscono in gran parte prima della messa in opera della centina/puntone, che risulta essere determinante, assieme al consolidamento al contorno, nell'impedire che le fasce di plasticizzazione al contorno si propaghino fino a raggiungere il piano campagna. I valori residui di convergenza diametrale e cedimento successivi alla messa in opera della centina/puntone risultano infatti inferiori al centimetro.

Tale stato deformativo induce risentimenti superficiali che raggiungono nel lungo termine valori dell'ordine dei 2.0 cm in asse galleria e 1.6 cm in corrispondenza dell'edificio n°8.

Visto il contributo risolutivo dell'utilizzo di un priverestimento chiuso in arco rovescio tramite puntone di contrasto e del miglioramento delle caratteristiche dell'ammasso al contorno fornito dai consolidamenti, il getto della calotta non risulterebbe necessario da calcolo ad una distanza dal fronte pari ai 2 diametri previsti da PE per il controllo dei fenomeni deformativi. Si ritiene pertanto che tale distanza potrà essere incrementata in corso d'opera qualora il monitoraggio in galleria ed in superficie confermino le previsioni progettuali ed il quadro fessurativo dell'edificio n°8 non subisca significative evoluzioni.

I valori di spostamento in galleria ed in superficie derivati dal calcolo sono da intendersi quale indicazione qualitativa dei livelli di deformazione attesi, generalmente sottostimati, non potendo tenere conto, per la valutazione e l'interpretazione delle misure stesse, di

fattori difficilmente schematizzabili e modellabili numericamente, quali anisotropie nel comportamento deformativo del cavo, condizioni geomeccaniche particolari e localizzate, fasi esecutive e cadenze d'avanzamento.

Nella seguente tabella riepilogativa, tenendo conto, sia di quanto emerso dalle analisi di calcolo, sia di quanto emerso dal monitoraggio in corso d'opera, nonché dall'esperienza acquisita in contesti analoghi, si riportano le convergenze diametrali ed i cedimenti da assumere come riferimento per il monitoraggio in corso d'opera.

Risposta deformativa in galleria			Risposta deformativa in superficie	
Convergenza diametrale (cm)	Cedimento (cm)	Estrusione(*) (cm)	Cedimenti in asse galleria (cm)	Cedimenti max in corrispondenza edificio 8 (cm)
min/max 1/2	min/max 1/2	min/max 5/8	min/max 2/3	min/max 1/2

(\*): valori desunti dalle pre-convergenze delle analisi numeriche



## 8.6 Verifiche strutturali

I risultati delle analisi numeriche in termini di sollecitazioni agenti sul rivestimento di prima fase e definitivo sono allegati alla presente relazione.

### 8.6.1 Verifiche del prerivestimento

Nella tabella che segue si riportano i valori delle massime caratteristiche di sollecitazione agenti negli elementi costituenti i rivestimenti di prima fase e le relative verifiche strutturali.

Le sollecitazioni utilizzate nelle verifiche sono quelle ottenute dal calcolo amplificate del coefficiente di combinazione SLU pari a 1.3.

Il rivestimento di prima fase è costituito da centine 2IPE200/100 e spritz-beton  $s=25$  cm.

Il momento resistente della sezione è definito a flessione semplice con riferimento alla sezione mista acciaio-calcestruzzo. Per la resistenza a taglio, cautelativamente, si è trascurato il contributo del calcestruzzo assegnando tutta l'azione di taglio alle sole centine metalliche.

$$N_{Rd} = (A_c - A_s) \cdot f_{cd} + A_s \cdot f_{yd}$$

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot (y_{sup} + h_c - y_n / 2)$$

$$V_{Rd} = A_v \cdot f_{yd} / \sqrt{3}$$

$A_c$  = Area sezione in calcestruzzo  
 $A_s$  = Area centine metalliche  
 $A_v$  = Sezione resistente a taglio delle centine  
 $y_{sup}$  = semi altezza sezione centine  
 $y_n$  = posizione asse neutro  
 $y_n = h_c + (A_s \cdot f_{yd} - A_c \cdot f_{cd}) / (2 \cdot b_f \cdot f_{yd})$   
 $h_c$  = ricoprimento  
 $b_f$  = larghezza ala singola centina

Ad esso si associano le seguenti resistenze di progetto:

$$N_{Rd} = 5645 \text{ kN}$$

$$M_{Rd} = 206 \text{ kNm}$$

$$V_{Rd} = 423 \text{ kN}$$

Coeff.		Calcolo FLAC											Valori SLU				
SEZ. TIPO	Fase	N (kN)	M (kNm)	V (kN)	Ned (kN)	Med (kNm)	Ved (kN)	Spess. (cm)	Armatura	NEd/NRd	MEd/MRd	NEd/NRd+MEd/MRd	chk MN	Ved/VRd	chk V		
<b>C2P</b>	Fase 2	396.70	62.43	102.40	515.71	81.16	133.12	25.00	2 IPE200/100	0.09	0.39	0.49	ok	0.31	ok	Nrd	5645.00
	Fase 3	643.70	93.36	141.40	836.81	121.37	183.82	25.00	2 IPE200/100	0.15	0.59	0.74	ok	0.43	ok	Mrd	206.00
	Fase 4	796.10	122.70	182.10	1034.93	159.51	236.73	25.00	2 IPE200/100	0.18	0.77	0.96	ok	0.56	ok	Vrd	423.00

**Tabella 8 – Verifiche SLU – Prerivestimento**

Tutte le verifiche sono soddisfatte.

### 8.6.2 Verifiche SLU dei rivestimenti definitivi

Con riferimento ai rivestimenti definitivi (Arco Rovescio e Calotta) si riportano le analoghe verifiche strutturali sia in riferimento alle condizioni statiche di lungo termine sia per le condizioni sismiche.

Nelle condizioni statiche le verifiche allo SLU sono effettuate moltiplicando le sollecitazioni ottenute dal calcolo per il coefficiente parziale A1 di combinazione allo SLU pari a 1.3. Nelle condizioni sismiche si sono invece assunte le sollecitazioni del calcolo senza amplificazione.

Le caratteristiche di resistenza delle sezioni sono state definite nel dominio di interazione M-N in funzione dell'armatura prevista per ciascuna di esse.

La resistenza a taglio é valutata con le formulazioni per sezioni sprovviste di armatura specifica a taglio, calcolando la resistenza offerta dal solo contributo del calcestruzzo e dell'armatura longitudinale presente al lembo compresso.

$$V_{Rd} = \max \left\{ \left[ 0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} / \gamma_c + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right] b_w \cdot d; (v_{\min} + 0,15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \right\} \quad [4.1.23]$$

$$k = 1 + (200/d)^{1/2} \leq 2$$

$$v_{\min} = 0,035k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$$

Le tabelle riportate nel seguito riassumono i risultati ottenuti.

Tutte le verifiche sono risultate positive.

RIVESTIMENTI DEFINITIVI															
VERIFICHE CONDIZIONI STATICHE SLU															
Coeff.		1.3													
Calcolo FLAC						Valori SLU									
SEZ. TIPO	sez. Verif.	N (kN)	M (kNm)	V (kN)	Ned (kN)	Med (kNm)	Ved (kN)	MRd (kNm)	Med/MRd	chk M	VRd (kN)	Ved/VRd	chkV	spessore (cm)	armatura
<b>C2P</b>	AR	382.50	380.70	150.30	497.25	494.91	195.39	538.70	0.92	ok	338.40	0.58	ok	80	ø20/25
	Calotta	366.00	237.40	97.03	475.80	308.62	126.14	385.30	0.80	ok	279.42	0.45	ok	60	ø20/25

**Tabella 9 – Rivestimento definitivo – Verifiche in condizioni Statiche**

RIVESTIMENTI DEFINITIVI															
VERIFICHE CONDIZIONI SISMICHE SLV															
Coeff.		1													
Calcolo FLAC						Valori SLU									
SEZ. TIPO	sez. Verif.	N (kN)	M (kNm)	V (kN)	Ned (kN)	Med (kNm)	Ved (kN)	MRd (kNm)	Med/MRd	chk M	VRd (kN)	Ved/VRd	chkV	spessore (cm)	armatura
<b>C2P</b>	AR	558.90	401.40	194.10	558.90	401.40	194.10	560.20	0.72	ok	347.07	0.56	ok	80	ø20/25
	Calotta	114.80	233.30	78.42	114.80	233.30	78.42	294.20	0.79	ok	229.78	0.34	ok	60	ø20/25

**Tabella 10 – Rivestimento definitivo – Verifiche in condizioni Sismiche**

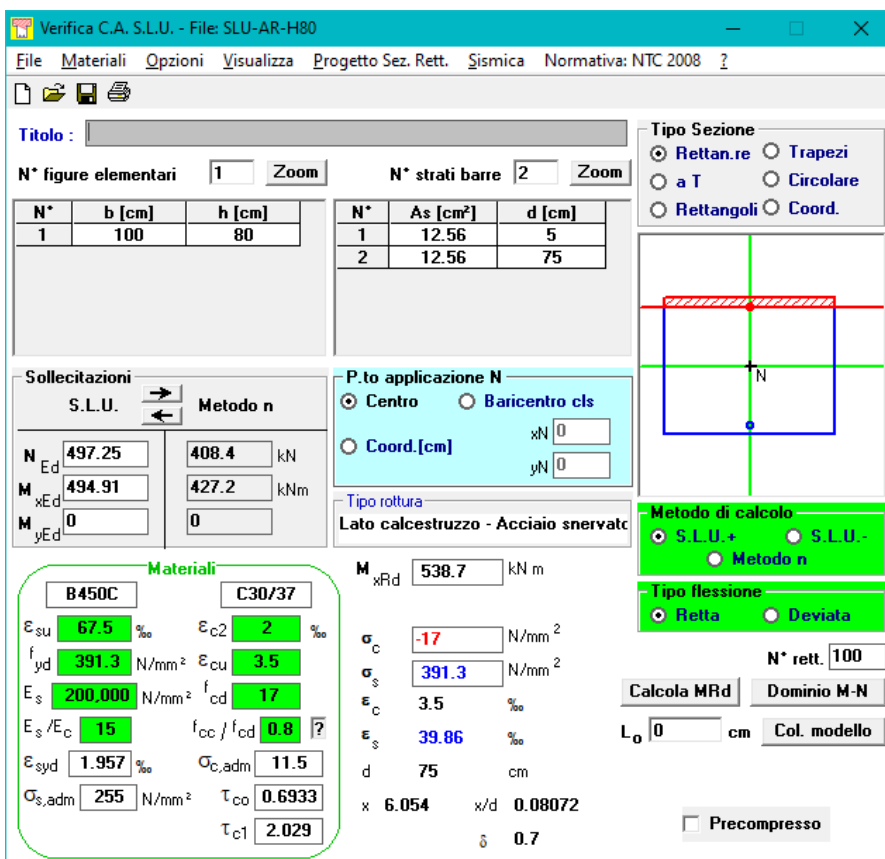


Figura 36 – Calcolo Momento resistente – condizioni statiche – Arco rovescio

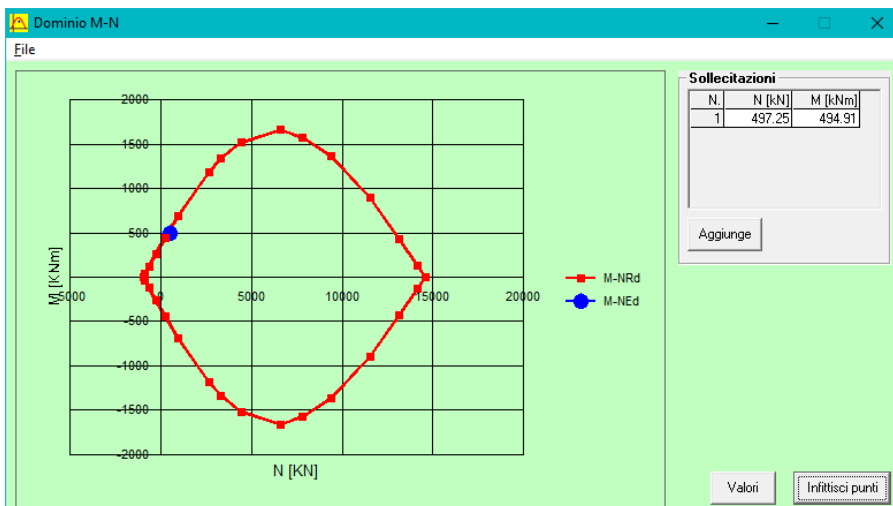


Figura 37 - Dominio M-N – condizioni statiche – Arco rovescio

**Verifica C.A. S.L.U. - File: SLU-CALOTTA-H60**

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

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari 1 Zoom N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	60	1	12.56	5
			2	12.56	55

Sollecitazioni: S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 475.8 408.4 kN  
 M<sub>xEd</sub> 308.62 427.2 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

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

Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

Metodo di calcolo: S.L.U.+ Metodo n  
 Tipo flessione: Retta Deviata

Materiali: B450C C30/37

ε<sub>su</sub> 67.5 ‰ ε<sub>c2</sub> 2 ‰  
 f<sub>yd</sub> 391.3 N/mm² ε<sub>cu</sub> 3.5 ‰  
 E<sub>s</sub> 200,000 N/mm² f<sub>cd</sub> 17 N/mm²  
 E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub> 15 f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub> 0.8  
 ε<sub>syd</sub> 1.957 ‰ σ<sub>c,adm</sub> 11.5 N/mm²  
 σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm² τ<sub>co</sub> 0.6933  
 τ<sub>c1</sub> 2.029

M<sub>xRd</sub> 385.3 kNm  
 σ<sub>c</sub> -17 N/mm²  
 σ<sub>s</sub> 391.3 N/mm²  
 ε<sub>c</sub> 3.5 ‰  
 ε<sub>s</sub> 28.72 ‰  
 d 55 cm  
 x 5.975 x/d 0.1086  
 δ 0.7

N° rett. 100  
 Calcola MRd Dominio M-N  
 L<sub>0</sub> 0 cm Col. modello  
 Precompresso

Figura 38 – Calcolo Momento resistente – condizioni statiche – Calotta

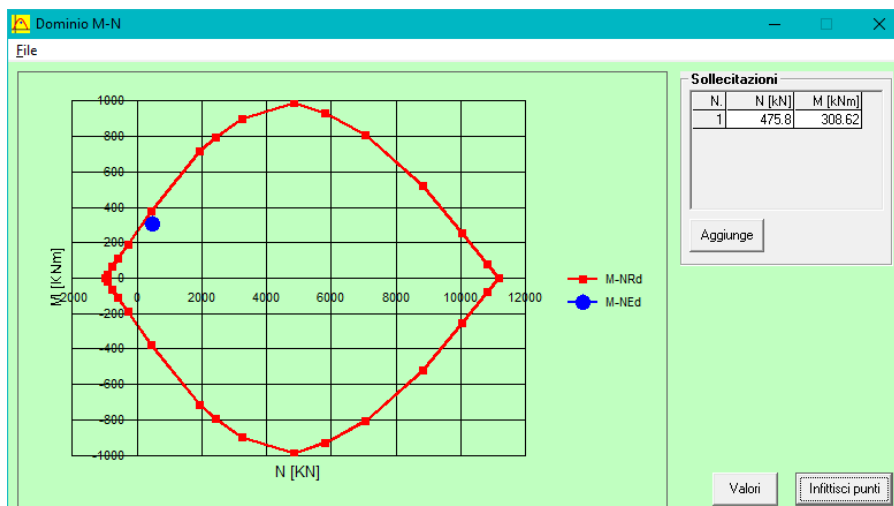


Figura 39 - Dominio M-N – condizioni statiche - Calotta

Figura 40 – Calcolo Momento resistente – condizioni sismiche – Arco rovescio

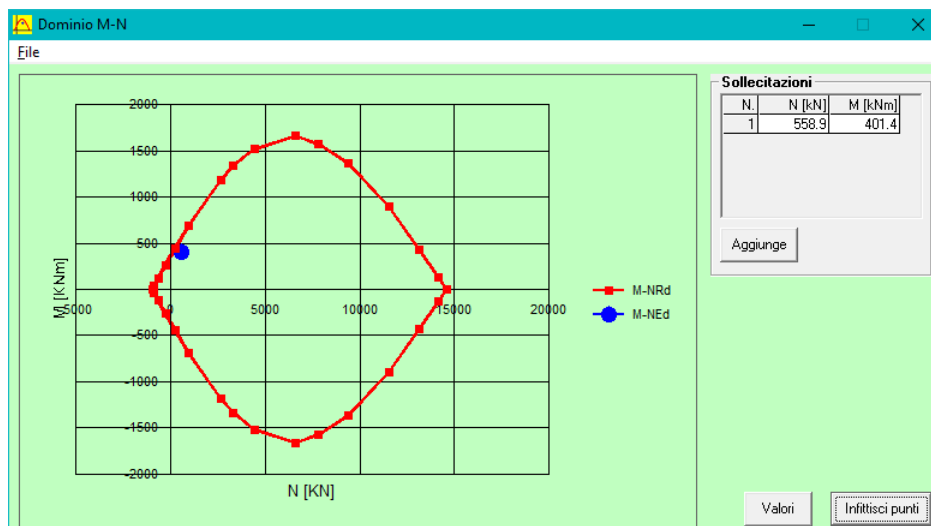


Figura 41 - Dominio M-N – condizioni sismiche – Arco rovescio

Verifica C.A. S.L.U. - File: SLV-CALOTTA-H60

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

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	12.56	5
2	12.56	55

Sollecitazioni S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 114.8 408.4 kN  
 M<sub>xEd</sub> 233.3 427.2 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

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

Tipo rottura Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

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

Tipo flessione  Retta  Deviata

N° rett. 100

Calcola MRd Dominio M-N

L<sub>0</sub> 0 cm Col. modello

Precompresso

Materiali

Proprietà	B450C	C30/37
$\epsilon_{su}$	67.5 ‰	$\epsilon_{c2}$ 2 ‰
$f_{yd}$	391.3 N/mm²	$\epsilon_{cu}$ 3.5 ‰
$E_s$	200.000 N/mm²	$f_{cd}$ 17
$E_s/E_c$	15	$f_{cc}/f_{cd}$ 0.8 ?
$\epsilon_{syd}$	1.957 ‰	$\sigma_{c,adm}$ 11.5
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm²	$\tau_{co}$ 0.6933
		$\tau_{c1}$ 2.029

M<sub>xRd</sub> 294.2 kN m

$\sigma_c$  -17 N/mm²  
 $\sigma_s$  391.3 N/mm²  
 $\epsilon_c$  3.5 ‰  
 $\epsilon_s$  37.1 ‰  
 d 55 cm  
 x 4.741 x/d 0.0862  
 $\delta$  0.7

Figura 42 - Calcolo Momento resistente – condizioni sismiche – Calotta

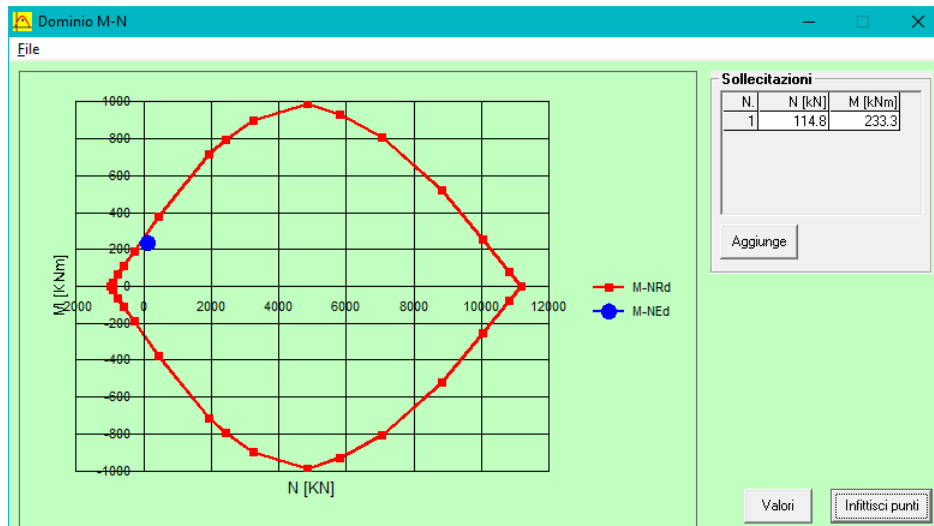


Figura 43 - Dominio M-N – condizioni sismiche – Calotta

Di seguito si riportano delle tabelle di dettaglio di calcolo delle resistenze a taglio delle sezioni verificate.

			<b>Calcolo Taglio resist. minim</b>	
b =	100	cm	k =	1.516
h =	80	cm	v <sub>min</sub> =	0.3580
d =	75	cm	0,2*f <sub>cd</sub> =	3.40
d' =	5	cm	σ <sub>cp</sub> =	0.622
A <sub>s</sub> =	12.56	cm <sup>2</sup>	V <sub>Rmin1</sub> =	338.40
A's =	12.56	cm <sup>2</sup>		
<b>N<sub>sd</sub> =</b>	<b>497.25</b>	kN	ρ <sub>l</sub> =	0.0017
<b>M<sub>sd</sub> =</b>	<b>494.91</b>	kN·m	v <sub>min2</sub> =	0.405
			V <sub>Rmin2</sub> =	303.67
			<b>V<sub>Rmin</sub> =</b>	<b>338.40</b>

**Tabella 11 – Taglio resistente Arco rovescio – Condizione statica**

			<b>Calcolo Taglio resist. minim</b>	
b =	100	cm	k =	1.603
h =	60	cm	v <sub>min</sub> =	0.3891
d =	55	cm	0,2*f <sub>cd</sub> =	3.40
d' =	5	cm	σ <sub>cp</sub> =	0.793
A <sub>s</sub> =	12.56	cm <sup>2</sup>	V <sub>Rmin1</sub> =	279.42
A's =	12.56	cm <sup>2</sup>		
<b>N<sub>sd</sub> =</b>	<b>475.80</b>	kN	ρ <sub>l</sub> =	0.0023
<b>M<sub>sd</sub> =</b>	<b>308.62</b>	kN·m	v <sub>min2</sub> =	0.484
			V <sub>Rmin2</sub> =	266.36
			<b>V<sub>Rmin</sub> =</b>	<b>279.42</b>

**Tabella 12 – Taglio resistente Calotta – Condizione statica**

			<b>Calcolo Taglio resist. minim</b>	
b =	100	cm	k =	1.516
h =	80	cm	v <sub>min</sub> =	0.3580
d =	75	cm	0,2*f <sub>cd</sub> =	3.40
d' =	5	cm	σ <sub>cp</sub> =	0.699
A <sub>s</sub> =	12.56	cm <sup>2</sup>	V <sub>Rmin1</sub> =	347.07
A's =	12.56	cm <sup>2</sup>		
<b>N<sub>sd</sub> =</b>	<b>558.90</b>	kN	ρ <sub>l</sub> =	0.0017
<b>M<sub>sd</sub> =</b>	<b>401.40</b>	kN· m	v <sub>min2</sub> =	0.416
			V <sub>Rmin2</sub> =	312.34
			<b>V<sub>Rmin</sub> =</b>	<b>347.07</b>

**Tabella 13 – Taglio resistente Arco rovescio – Condizione sismica**

			<b>Calcolo Taglio resist. minim</b>	
b =	100	cm	k =	1.603
h =	60	cm	v <sub>min</sub> =	0.3891
d =	55	cm	0,2*f <sub>cd</sub> =	3.40
d' =	5	cm	σ <sub>cp</sub> =	0.191
A <sub>s</sub> =	12.56	cm <sup>2</sup>	V <sub>Rmin1</sub> =	229.78
A's =	12.56	cm <sup>2</sup>		
<b>N<sub>sd</sub> =</b>	<b>114.80</b>	kN	ρ <sub>l</sub> =	0.0023
<b>M<sub>sd</sub> =</b>	<b>233.30</b>	kN· m	v <sub>min2</sub> =	0.394
			V <sub>Rmin2</sub> =	216.72
			<b>V<sub>Rmin</sub> =</b>	<b>229.78</b>

**Tabella 14 – Taglio resistente Calotta – Condizione sismica**



### 8.6.3 Verifiche SLE dei rivestimenti definitivi

Per le verifiche agli stati limite di esercizio si fa generalmente riferimento alle seguenti combinazioni di carico (§ 2.5.3):

combinazione rara:	$E_d = G + Q_{k1} + \Sigma(\psi_{0i} \cdot Q_{ki})$
combinazione frequente:	$E_d = G + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \Sigma(\psi_{2i} \cdot Q_{ki})$
combinazione quasi permanente:	$E_d = G + \Sigma(\psi_{2i} \cdot Q_{ki})$

dove:

- $\psi_{1i}$  = coefficiente atto a definire i valori delle azioni variabili ai frattili di ordine 0,95 delle distribuzioni dei valori istantanei;
- $\psi_{2i}$  = coefficiente atto a definire i valori quasi permanenti delle azioni variabili ai valori medi delle distribuzioni dei valori istantanei.

Nel caso in esame, essendo presenti solo azioni di tipo permanente, le tre espressioni precedenti si riducono ad una sola:

$$E_d = 1.0 \cdot G$$

Le verifiche allo SLE sono pertanto effettuate sulla base delle sollecitazioni ottenute dal calcolo senza ulteriori amplificazioni.

#### Verifiche a fessurazione:

Per la struttura in oggetto si prevede una Classe di esposizione XS1.

Le condizioni ambientali, ai fini della protezione contro la corrosione delle armature metalliche, possono essere considerate come "aggressive".

**Tab. 4.1.III** – *Descrizione delle condizioni ambientali*

Condizioni ambientali	Classe di esposizione
Ordinarie	X0, XC1, XC2, XC3, XF1
Aggressive	XC4, XD1, XS1, XA1, XA2, XF2, XF3
Molto aggressive	XD2, XD3, XS2, XS3, XA3, XF4

Le armature adottate, essendo costituite da acciaio ordinario da c.a., sono da considerarsi, agli effetti della corrosione, "poco sensibili".

Con riferimento alle condizioni ambientali sopra riportate, la scelta degli stati limite a fessurazione viene effettuata secondo i criteri indicati dalla norma, riportati nella tabella seguente:

**Tab. 4.1.IV - Criteri di scelta dello stato limite di fessurazione**

Gruppi di Esigenze	Condizioni ambientali	Combinazione di azioni	Armatura			
			Sensibile		Poco sensibile	
			Stato limite	$w_k$	Stato limite	$w_k$
A	Ordinarie	frequente	apertura fessure	$\leq w_2$	apertura fessure	$\leq w_3$
		quasi permanente	apertura fessure	$\leq w_1$	apertura fessure	$\leq w_2$
B	Aggressive	frequente	apertura fessure	$\leq w_1$	apertura fessure	$\leq w_2$
		quasi permanente	decompressione	-	apertura fessure	$\leq w_1$
C	Molto aggressive	frequente	formazione fessure	-	apertura fessure	$\leq w_1$
		quasi permanente	decompressione	-	apertura fessure	$\leq w_1$

Combinazione frequente: S.L. di apertura fessure:  $w_d \leq w_2$

Combinazione q. permanente: S.L. di apertura fessure:  $w_d \leq w_1$

Il valore di calcolo di apertura delle fessure è determinato come (§ C4.1.5):

$$w_d = 1.7 \epsilon_{sm} \delta_{sm}$$

$\epsilon_{sm}$  = deformazione media dell'acciaio;

$\delta_{sm}$  = distanza media tra le fessure.

La deformazione unitaria media dell'armatura " $\epsilon_{sm}$ " è data da (§ C4.1.6):

$$\epsilon_{sm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ctm}}{\rho_{eff}} (1 + \alpha_e \rho_{eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

$\sigma_s$  = tensione nell'acciaio calcolata nella sezione fessurata;

$\alpha_e$  =  $E_s / E_{cm}$ ;

$\rho_{eff}$  =  $A_s / A_{c,eff}$ ;

$A_{c,eff}$  = area efficace di calcestruzzo teso attorno all'armatura;

$k_t$  = 0,4 per carichi di lunga durata.

La distanza media tra le fessure " $\delta_{sm}$ " è data da (§ C4.1.7):

$$\Delta_{sm} = (k_3 c + k_1 k_2 k_4 \frac{\phi}{\rho_{eff}}) / 1,7$$

$\phi$  = diametro barre;

c = copriferro;

$k_1$  = 0.8 (barre ad aderenza migliorata);

$k_2$  = 0.5 (per stato tensionale di flessione o presso-flessione);

$k_3$  = 3.4;

$k_4$  = 0.425

### Verifiche delle tensioni in esercizio

La verifica delle tensioni in esercizio nel calcestruzzo e nell'acciaio viene effettuata in riferimento alle tensioni risultanti nei materiali per le seguenti combinazioni di carico e rispettivi limiti tensionali:

Combinazione "caratteristica" (rara):

$$\sigma_c < 0.60 f_{ck} (=18 \text{ MPa}) - \sigma_s < 0.80 f_{yk} (=360 \text{ MPa})$$

Combinazione "quasi permanente" :

$$\sigma_c < 0.45 f_{ck} (=13.50 \text{ MPa})$$

Nelle tabelle riportate nel seguito si riassumono i risultati delle predette verifiche.

Per la combinazione di carico Frequente sono assunte le sollecitazioni relative alla analisi di lungo termine con l'applicazione delle pressioni idrostatiche della falda.

La combinazione quasi permanente fa invece riferimento alla situazione di lungo termine in assenza della suddetta pressione.

Tutte le verifiche sono risultate positive

### **Legenda tabella:**

h	altezza totale della sezione
d	altezza utile della sezione
$\phi$	diametro barre di armatura
$A_s$	area acciaio teso
$\sigma_c$	tensione nel calcestruzzo
$\sigma_s$	tensione nell' acciaio
x	altezza zona compressa della sezione (0.00 = sezione non fessurata)
$h_{c,eff}$	altezza efficace di calcestruzzo teso attorno all'armatura

Combinazione Frequente																			
SEZ. TIPO	sez. Verif.	N (kN)	M (kNm)	h (cm)	d (cm)	φ (mm)	As (cm <sup>2</sup> )	σ <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	chk σ <sub>c</sub>	σ <sub>s</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	chk σ <sub>s</sub>	x (cm)	h <sub>c,eff</sub> (cm)	A <sub>c,eff</sub> (cm <sup>2</sup> )	ρ,eff	ε,sm	Δ,smax (mm)	Wd (mm)	chk w
<b>C2P</b>	AR	382.50	380.70	80.00	75.00	20	12.56	6.76	ok	291.50	ok	50.00	10.00	1000.00	0.0126	0.000967	288	0.278	ok
	Calotta	366.00	237.40	60.00	55.00	20	12.56	6.88	ok	237.40	ok	16.67	12.50	1250.00	0.0100	0.000678	355	0.241	ok

Combinazione Q.P.																			
SEZ. TIPO	sez. Verif.	N (kN)	M (kNm)	h (cm)	d (cm)	φ (mm)	As (cm <sup>2</sup> )	σ <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	chk σ <sub>c</sub>	σ <sub>s</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	chk σ <sub>s</sub>	x (cm)	h <sub>c,eff</sub> (cm)	A <sub>c,eff</sub> (cm <sup>2</sup> )	ρ,eff	ε,sm	Δ,smax (mm)	Wd (mm)	chk w
<b>C2P</b>	AR	1032.00	135.00	80.00	75.00	20	12.56	2.37	ok	0.00	ok	80.00	0.00	0.00	#####	0.000000	-	-	-
	Calotta	873.30	135.00	60.00	55.00	20	12.56	3.49	ok	8.59	ok	16.67	12.50	1250.00	0.0100	0.000025	355	0.009	ok

**Tabella 15 – Verifiche SLE rivestimenti dwfinitivi**

## 9. Analisi di interferenza scavo-edificio n°8

In considerazione del danneggiamento subito dall'edificio n°8 sito in via Gavatro 26-28 nel corso degli scavi già eseguiti, che si trova all'apice del versante interessato dallo scavo della galleria, dove la copertura è di circa 40m, è stata condotta un'analisi dei cedimenti indotti sia dallo scavo pregresso (sez tipo C2R) che da quello che deve essere ancora eseguito (sez tipo C2P e C2VP).

Relativamente a tale fabbricato, le risultanze del piano di monitoraggio di superficie hanno condotto alla valutazione dei cedimenti differenziali connessi con le operazioni di scavo della galleria. Le misure inclinometriche in prossimità dell'edificio stesso sono finalizzate alla valutazione delle componenti planimetriche di spostamento.

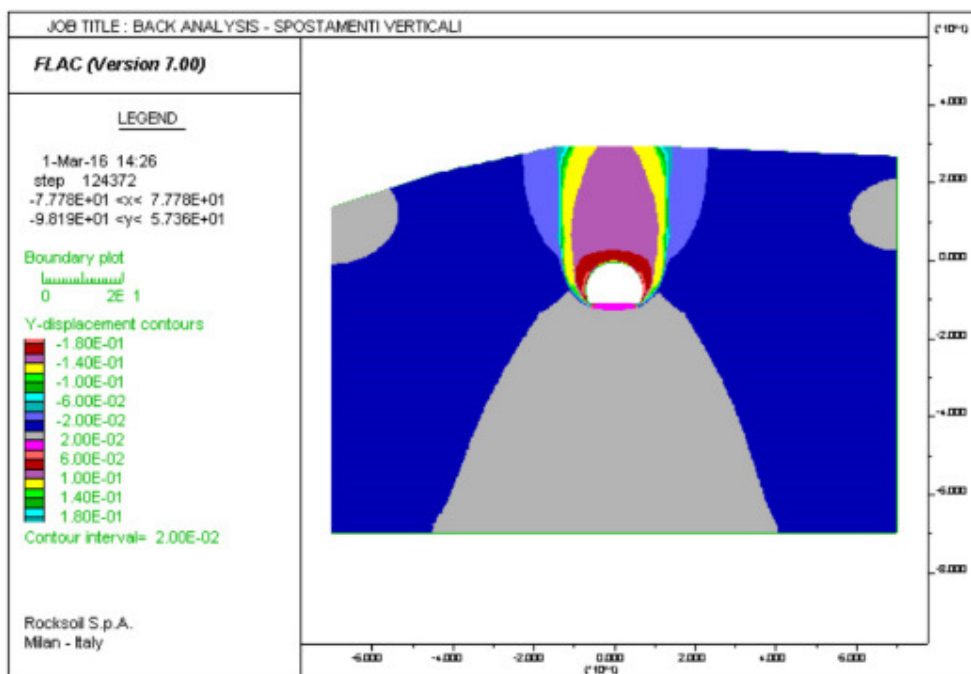
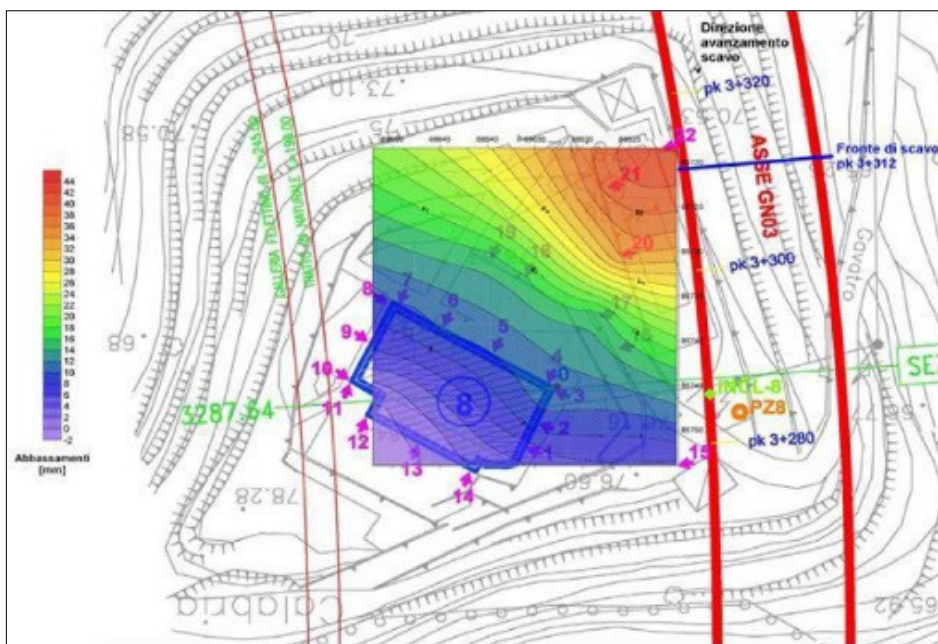


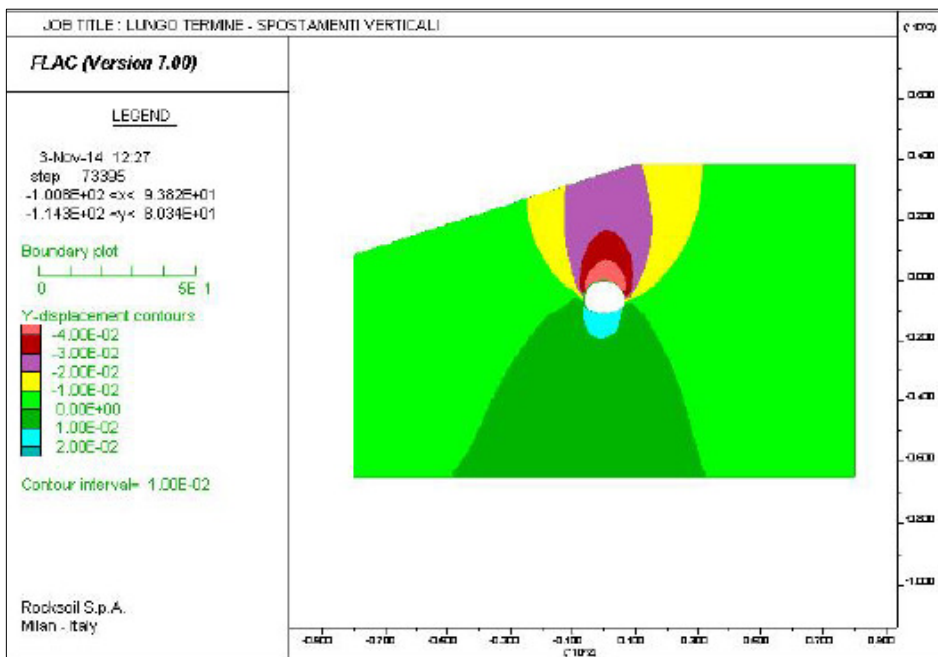
Figura 44 – Analisi dei cedimenti calcolati sezione di calcolo (Scavo pregresso Sez. tipo C2R)

Le risultanze della back-analysis condotta evidenziano un buon accordo tra i cedimenti calcolati e quelli misurati durante lo scavo pregresso. In particolare, si evince come il bacino di subsidenza indotto risulti essere molto stretto (max cedimenti in asse galleria pari a 15 cm che si riducono a 5 cm a paramento, molto prossimi a quelli massimi misurati in superficie).



**Figura 45 – Cedimenti misurati in corrispondenza dell'edificio n.8**

Adottando la sezione tipo C2P descritta nella presente proposta progettuale i cedimenti massimi in superficie si riducono significativamente, con valori max in asse galleria pari a 2 cm circa.



**Figura 46 – Analisi dei cedimenti calcolati sezione di calcolo (Scavo progressivo Sez. tipo C2P)**

La valutazione dei cedimenti indotti dagli scavi e di conseguenza del relativo bacino di subsidenza è stata utilizzata per valutare la categoria di danno dell'edificio 8.

Sia considerando gli effetti del solo scavo pregresso che la somma di quest'ultimi con quelli, molto più contenuti, dovuti ai prossimi scavi, la categoria di danno dell'edificio ricade in classe 2 (danni lievi da *Boscardin* e *Cording*).

In effetti però il reale quadro fessurativo sull'edificio sembrerebbe essere più rilevante, soprattutto per disposizione e caratteristiche delle lesioni che sembrerebbero riconducibili, piuttosto che a spostamenti prevalentemente verticali da subsidenza indotta, a spostamenti orizzontali, da attribuirsi a movimenti di versante.

## 9.1 Categorie di danno

Sulla base dello studio dei cedimenti indotti dallo scavo, unitamente alle caratteristiche geometriche, strutturali e di conservazione degli edifici, si può conseguentemente effettuare una valutazione del probabile rischio di danno in merito ai risentimenti provocati sugli edifici dallo scavo della galleria.

Nel seguito si riassumono i criteri di classificazione del danno rispettivamente basati sulla determinazione della distorsione limite e sulla stima delle deformazioni di trazione generate nelle strutture secondo le formulazioni di Mayer, Burland e Taylor.

Nel caso in esame una volta determinati i cedimenti secondo quanto specificato in precedenza, si procederà ad individuare l'effetto indotto sui fabbricati mediante il calcolo delle categorie di danno secondo quanto riportato in letteratura (Mair e Taylor e Burland, 1996). Secondo tali approcci la categoria di danno è correlata con la deformazione unitaria massima di allungamento  $\epsilon_{max}$ . Per l'edificio analizzato, sulla base della deformazione massima di trazione  $\epsilon_{max}$  e del relativo bacino di subsidenza, è stato possibile determinare un valore del parametro "categoria di danno" secondo quanto esposto nelle tabelle di sintesi riportate in letteratura (Boscardin e Cording, 1989), ottenendo così una valutazione del rischio.

### 9.1.1 Spostamenti e distorsioni limite

Al fine di stabilire le ripercussioni degli scavi sulla preesistenza in superficie, appare importante individuare i valori limite di spostamento e distorsione.

Oltre al cedimento massimo, un parametro molto significativo per la valutazione del danno ai fabbricati è la "distorsione angolare" fra due punti dell'edificio, essendo principalmente il cedimento differenziale la causa dell'insorgere di lesioni e rotture.

Al riguardo, facendo riferimento alla bibliografia esistente sull'argomento, Skempton e MacDonald (1956), basandosi sull'osservazione di 98 edifici e con riferimento anche allo studio di Ricceri e Sorazo (1985) su 25 strutture realizzate in Italia, evidenziano che non si ha comparsa di fessure sulle strutture di tamponamento fino a valori di  $\epsilon < 1/300$  e per vedere danni sulle strutture portanti in calcestruzzo è necessario arrivare a valori di  $\epsilon$  pari a 1/150.

In Polschin e Tokar (1957) si considera un approccio più conservativo, indicando valori ammissibili pari a 1/500 per strutture a telaio in calcestruzzo armato con tamponature, e pari a 1/200 per telai aperti.

Stessi valori vengono indicati anche nell'ambito dell'Eurocodice 7, appendice H, dove si indica come ammissibile una distorsione pari a 1/500, evidenziando una condizione di stato limite ultimo pari a 1/150.

Un criterio di classificazione dei rischi indotti dai cedimenti, relativamente a strutture in cemento armato, è stato proposto da Rankin (1988) secondo quanto esposto nella tabella



sottostante.

Categoria di rischio	Massima distorsione dell'edificio	Massimo cedimento dell'edificio [cm]	Descrizione del rischio
1	$\beta < 1/500$	$w < 1$	Non visibile
2	da 1/500 a 1/200	da 1 a 5	Leggero: crepe facilmente rimovibili con una tinteggiatura
3	da 1/200 a 1/50	da 5 a 7.5	Moderato: danni a porte e finestre, danni da infiltrazione di umidità
4	$\beta > 1/50$	$w > 7.5$	Alto: danni strutturali, necessità di riparazioni notevoli, pericoli di instabilità

**Tabella 16 – Criterio di classificazione del rischio di Rankin**

Il valore del cedimento assoluto, come pure il valore differenziale, dovrà essere valutato in dettaglio in funzione delle condizioni dell'edificio e delle reali geometrie delle fondazioni.

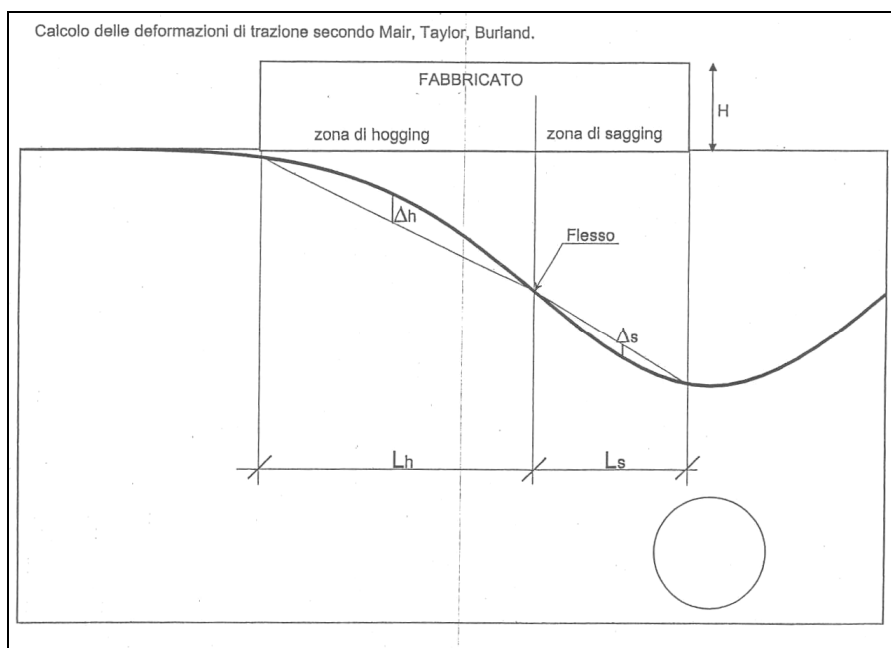
In prima battuta, in assenza informazioni puntuali sulle caratteristiche dei fabbricati, le analisi di danno sono state condotte considerando il valore degli spostamenti assoluti e tenendo conto delle deformazioni di trazione generate nelle strutture secondo le formulazioni di Mayer, Burland e Taylor, come illustrato nel seguito.

### 9.1.2 Stima delle deformazioni e definizione delle categorie di danno

Nel caso in esame si è proceduto ad individuare la categoria di danno secondo quanto suggerito dalla letteratura (Mair e Taylor e Burland – *Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunneling*). Come indicato in Mair, Taylor e Burland, la categoria di danno è correlata con la deformazione unitaria massima di allungamento  $\epsilon_{max}$ .

La determinazione di tale deformazione può essere individuata assimilando l'edificio ad un corpo elastico di altezza H, lunghezza L, momento d'inerzia I e rapporto tra moduli elastici E/G pari a 12.5 per il cemento armato e a 2.6 per la muratura.

Il bacino di subsidenza può essere suddiviso in due zone distinte in base alle modalità di deformazione del piano campagna, come rappresentato in figura.



**Figura 47 – Zona di hogging e sagging**

zona di hogging (concavità della deformata orientata verso il basso):

momento d'inerzia edificio  $\Rightarrow I=H^3/3$

distanza asse neutro dal lembo teso = H

zona di sagging (concavità della deformata rivolta verso l'alto):

momento d'inerzia edificio  $\Rightarrow I=H^3/12$

distanza asse neutro dal lembo teso = H/2

Considerando un generico edificio, posizionato come in figura, il punto di inflessione dello spostamento, (i), divide l'edificio stesso nelle due zone sopra indicate.

Nella zona di hogging ( $-i > y > i$ ) dove l'asse neutro è pari ad H, tutti gli sforzi dovuti alla flessione sono di trazione, mentre nella zona di sagging, dove l'asse neutro si assume pari ad H/2, la flessione induce sforzi sia di compressione che di trazione.

Definita l'inflessione massima  $\Delta/L$ , così come indicato dagli autori, è possibile risalire alle deformazioni unitarie massime per trazione.

Per quanto dovuto a sollecitazioni di flessione, le deformazioni si sviluppano parallelamente all'asse dell'edificio e valgono:

$$\epsilon_b = \left(\frac{\Delta}{L}\right) \times \frac{1}{\left[\left(\frac{L}{12t}\right) + \left(\frac{3EI}{2tLHG}\right)\right]}$$

dove  $t = (H; H/2)$  secondo se ci si trova in zona Hogging o Sagging.

Invece per le deformazioni dovute taglio si ha:

$$\varepsilon_d = \left(\frac{\Delta}{L}\right) \times \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{HL^2G}{18EI}\right)\right]}$$

Si considera inoltre il contributo dovuto alle deformazioni orizzontali ( $\varepsilon_h$ ) che verrà combinato con la deformazione di flessione e taglio.

$$\varepsilon_{bt} = \varepsilon_h + \varepsilon_b$$

$$\varepsilon_{dt} = 0.35\varepsilon_h + \sqrt{\left((0.65\varepsilon_h)^2 + \varepsilon_d^2\right)}$$

Si ottiene quindi la massima deformazione di trazione  $\varepsilon_{max}$  pari al valore massimo tra  $\varepsilon_{bt}$  e  $\varepsilon_{dt}$

Si riportano nel seguito le tabelle di sintesi di Boscarding e Cording (1989).

Categoria del danno	Intensità del danno	Deformazione limite di trazione $\varepsilon_{lim}$ (%)
0	Trascurabile	0÷0.05
1	Molto lieve	0.05÷0.075
2	Lieve	0.075÷0.15
3	Moderata	0.15÷0.3
4	Severa	0.3÷0.45
5	Molto severa	>0.45

**Tabella 17 – Boscardin e Cording, 1989**

Categoria del danno	Intensità del danno	Descrizione
0	Trascurabile	Fessure capillari con aperture $\leq 0.1$ mm.
1	Molto lieve	Fessure sottili cui si rimedia facilmente con lavori di pitturazione. Il danno è limitato agli intonaci delle pareti interne. Fessure alle parti esterne rilevabili con attento esame. Tipica apertura delle lesioni $\leq 1$ mm.
2	Lieve	Fessure facilmente stuccabili, ripittura necessaria. Le fessure ricorrenti possono essere mascherate con opportuni rivestimenti. Fessure anche visibili all'esterno; può essere necessaria qualche ripresa della spillatura per garantire l'impermeabilità. Possibili difficoltà nell'apertura di porte e finestre. Tipica apertura delle lesioni $\leq 5$ m.

3	Moderata	Le fessure richiedono cucì e scuci della muratura. Anche all'esterno necessari interventi sulla muratura. Possibile blocco di porte e finestre. Rottura di tubazioni. Spesso l'impermeabilità non è garantita. Tipica apertura delle lesioni $5 \div 15$ mm, oppure molte lesioni $\leq 3$ .
4	Severa	Necessarie importanti riparazioni, compresa demolizione e ricostruzione di parti di muri, specie al di sopra di porte e finestre. I telai di porte e finestre si distorcono; percepibile pendenza di pavimenti. Muri inclinati o spanciati; qualche perdita d'appoggio di travi. Tubazioni distrutte. Tipica apertura delle lesioni $15 \div 25$ mm, dipendente anche dal numero di lesioni.
5	Molto severa	Richiesti importanti lavori con parziale e totale demolizione e ricostruzione. Le travi perdono l'appoggio, i muri si inclinano fortemente e richiedono puntellatura. Pericolo di instabilità. Tipica apertura delle lesioni superiori a 25 mm, dipendente anche dal numero di lesioni.

**Tabella 18 – Boscardin e Cording, 1989**

La categoria di danno ammissibile per un fabbricato dipende dalle caratteristiche dell'edificio stesso, ovvero dalla metodologia costruttiva (strutture in c.a./acciaio o muratura), dallo stato di conservazione (stato buono o precario) e dalla destinazione d'uso.

### 9.1.3 Fasi di calcolo

La sezione di riferimento è la medesima analizzata in precedenza e di cui si riportano le fasi di calcolo.

#### TIME 1 – Geostatico

In questa prima fase di calcolo vengono applicati il peso proprio del terreno e le caratteristiche di resistenza e deformabilità delle formazioni in sito, in modo tale da ricostruire la situazione tensionale preesistente alla costruzione della galleria.

#### TIME 2 – Taratura e scavo – Relax 80%

In questa time di calcolo viene simulata l'apertura del fronte attraverso un'opportuna riduzione delle forze di scavo.

#### TIME 3 – Avanzamento pari allo sfondo di 1.00 m – Relax 83%

Viene simulato lo scavo pari allo sfondo di 1.00 m.

#### TIME 4 – Posa prerivestimento al contorno e avanzamento a 3 m dal fronte – Relax 8%

Viene simulata la posa del prerivestimento in prossimità del fronte di scavo.

#### TIME 5 – Posa del puntone e avanzamento a $1\phi$ dal fronte – Relax 96.5%

Viene simulata la posa del puntone e l'avanzamento dello scavo.

#### TIME 6 – Getto dell'arco rovescio – Relax 100%

Viene simulato il getto dell'arco rovescio e l'ulteriore avanzamento dello scavo.

#### TIME 7 – Getto del rivestimento di calotta

Viene simulata la realizzazione del rivestimento di calotta, a completamento del rivestimento definitivo.

#### TIME 8 – Decadimento del prerivestimento e simulazione falda di progetto

Viene modellata la condizione a lungo termine sul rivestimento definitivo, rimuovendo gli elementi rappresentativi del prerivestimento ed applicando una pressione al contorno del cavo che simula la falda di progetto.

### 9.1.4 Sintesi dei risultati

Vengono riportati nel seguito i risultati ottenuti dalla simulazione FLAC ed i grafici in cui si mostra l'andamento dei cedimenti in corrispondenza dell'impronta dell'edificio al livello del piano di fondazione. Sono questi, infatti, i cedimenti di maggiore interesse ai fini della valutazione della classe di danno attesa per l'edificio in esame.

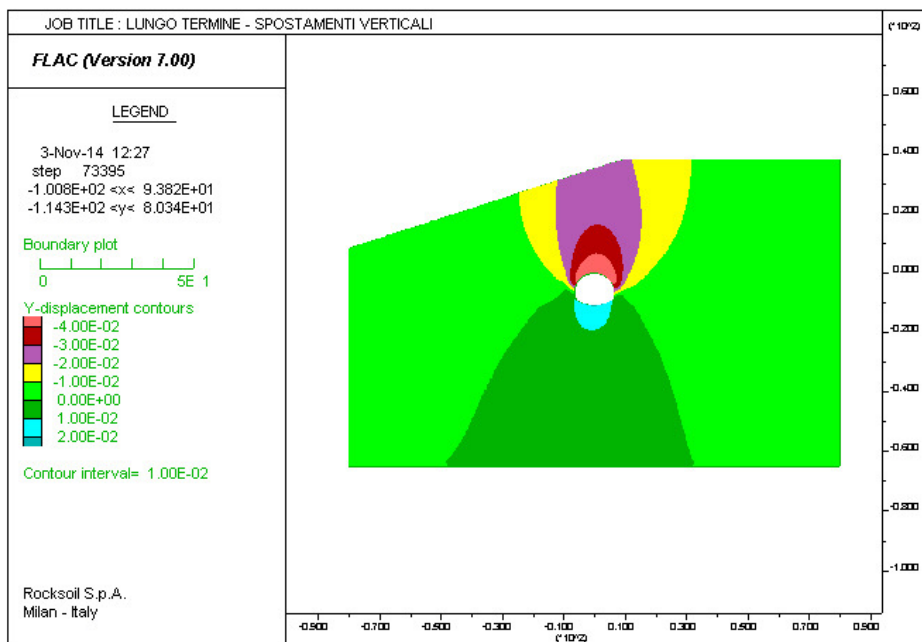
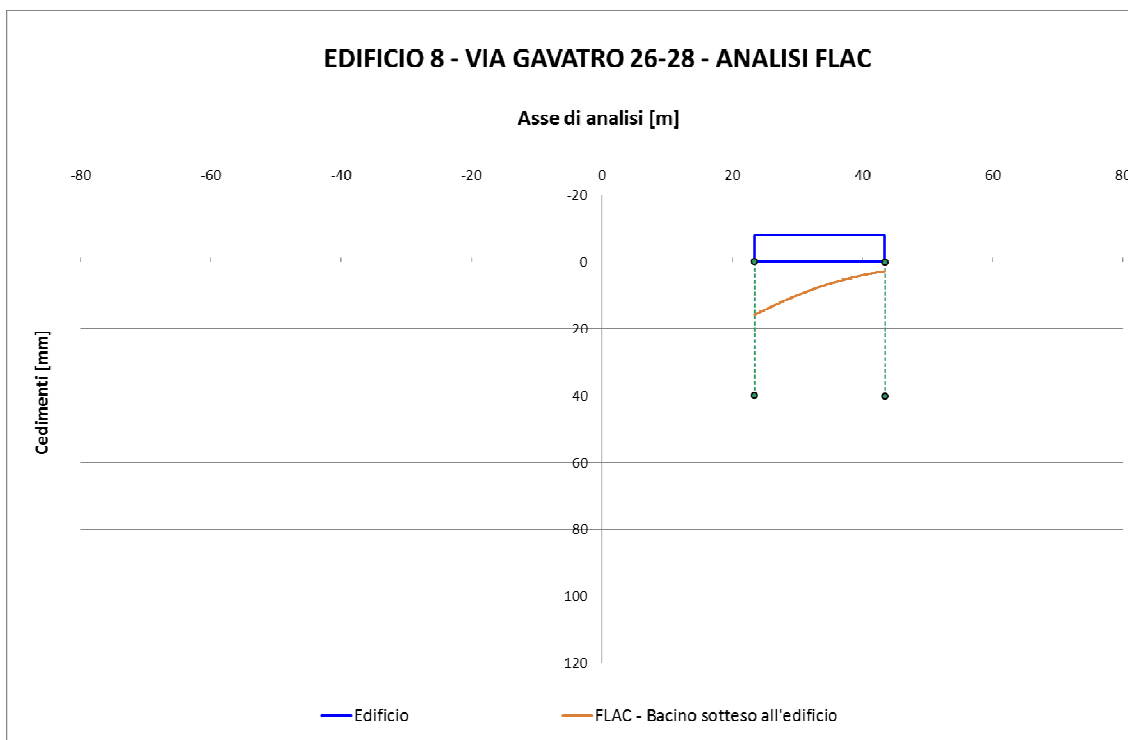


Figura 48 – Analisi FLAC – Cedimenti verticali

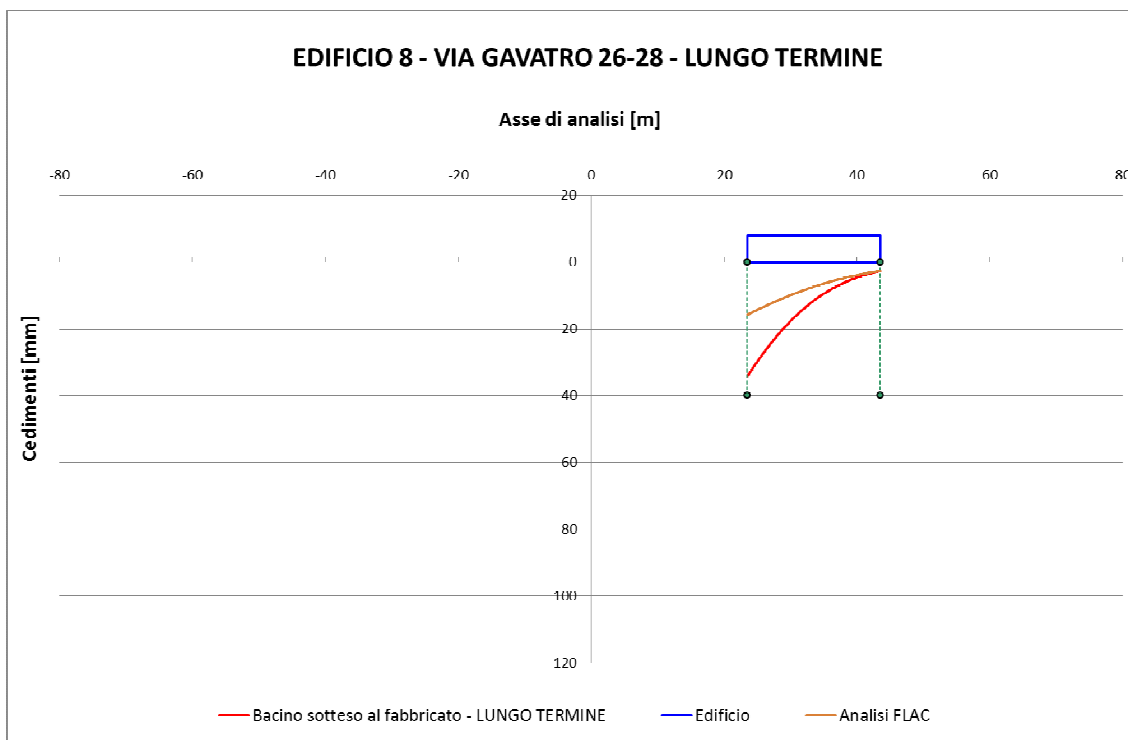


**Figura 49 – Bacino di subsidenza - FLAC**

Come si evince dal grafico sopra riportato, lo scavo eseguito tramite la sezione tipo di avanzamento C2P, induce cedimenti massimi sull’edificio pari a circa 16-17 mm con un delta di spostamento tra i vertici dello stesso pari a circa 12-13 mm.

Per la valutazione del danno indotto non è però sufficiente la conoscenza di questi cedimenti, risulta infatti necessario sommare ad essi anche i cedimenti già registrati sull’edificio tramite il monitoraggio in corso d’opera che hanno mostrato valori differenziali pari a circa 15 mm. Questo valore verrà quindi sommato al cedimento massimo ottenuto dall’analisi FLAC consentendo così di poter valutare la classe di danno indotta sull’edificio in esame.

Nel seguente grafico viene mostrato l’andamento del bacino di subsidenza sotteso all’edificio nel lungo termine dato dalla somma del cedimento calcolato tramite FLAC e del cedimento misurato in sito.



**Figura 50 – Bacino di subsidenza – Lungo termine**

Valutato il bacino di subsidenza sono state infine eseguite analisi di classificazione del danno, secondo quanto riportato in letteratura da Boscardin e Cording.

Sia considerando gli effetti del solo scavo pregresso che la somma di quest’ultimi con quelli, molto più contenuti, dovuti ai prossimi scavi, la categoria di danno dell’edificio ricade in classe 2 (danni lievi *da Boscardin e Cording*). Nella seguente tabella sono mostrati i risultati delle analisi di classificazione del danno in termini di cedimenti, deformazioni e classe di danno. Vengono inoltre riportati i valori di volume perso e parametro k che caratterizzano i profili ottenuti nelle analisi numeriche alle differenze finite.

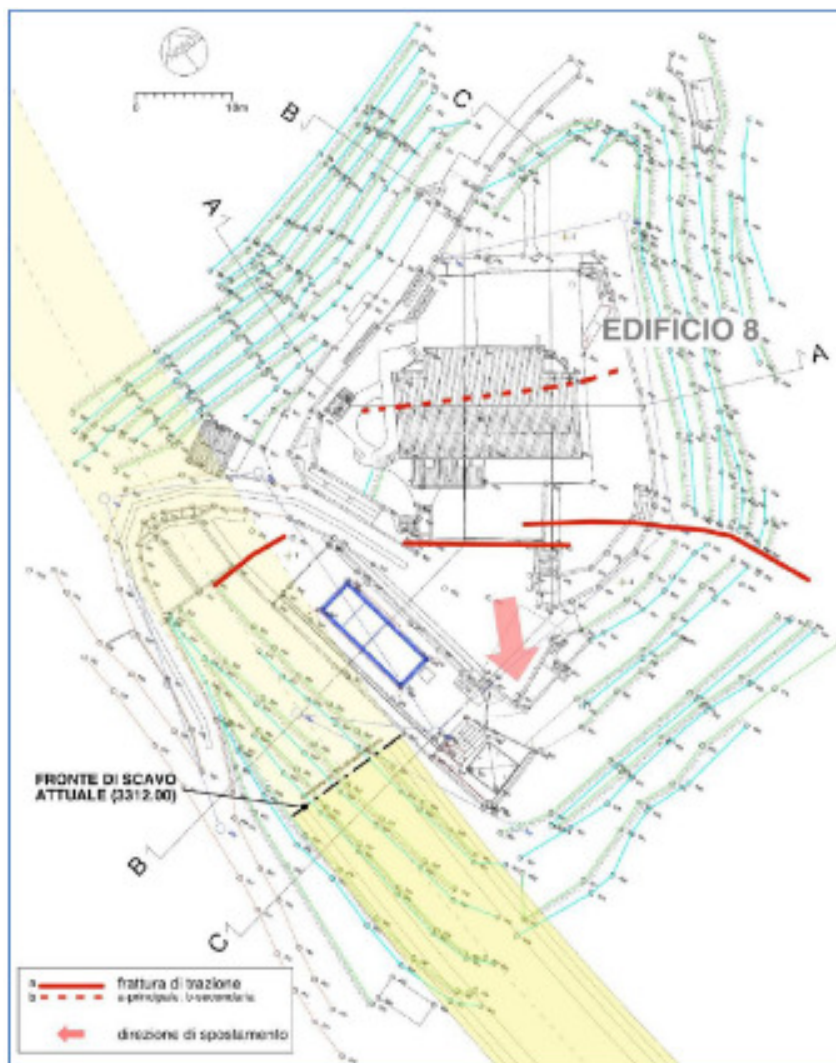
Vp	k	Cedimento max edificio [mm]	$\epsilon_{max, hogging}$ [mm]	$\epsilon_{max, sagging}$ [mm]	Classe di danno
3.0%	0.4	34	0.125%	0.000%	2

**Tabella 19 – Classificazione del danno**

Come si può osservare, k risulta essere pari a circa 0,4 in linea con le aspettative considerando il contesto geomeccanico della sezione analizzata. Il valore di volume perso si attesta invece nell’intorno del 3% risultando quindi elevato ma attendibile se si considera che tale valore è dato dalla somma dei cedimenti ottenuti tramite l’analisi numerica ed i cedimenti ottenuti dal monitoraggio.



In effetti però il reale quadro fessurativo sull'edificio 8 sembrerebbe essere più rilevante della classe di danno 2, soprattutto per disposizione e caratteristiche delle lesioni che sembrerebbero riconducibili, piuttosto che a spostamenti prevalentemente verticali da subsidenza indotta, a spostamenti orizzontali, da attribuirsi a movimenti di versante.



**Figura 51 – Fessure sull'edificio 8 e fratture di trazione sul terreno nella fase di scavo progressivo (GEOEQUIPE)**

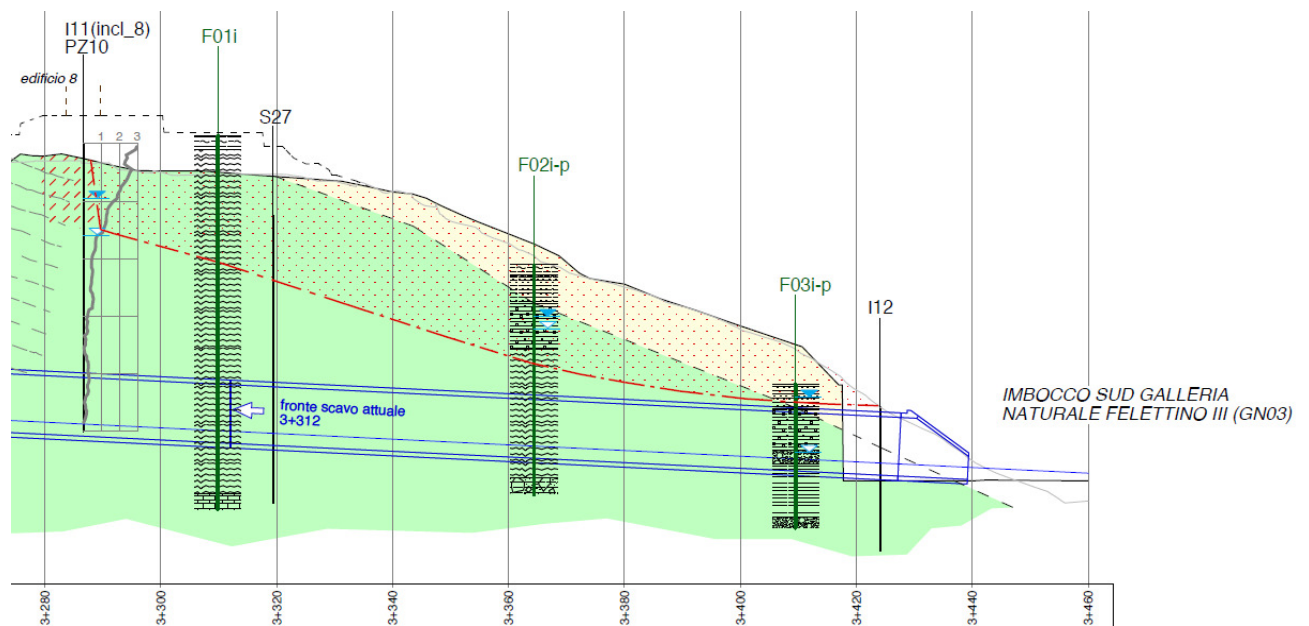
In seguito a tali evidenze sono state eseguite indagini integrative (rilievi geomorfologici di dettaglio, inclinometri e piezometri), volte ad approfondire gli aspetti di stabilità del versante. A valle di tali indagini, l'interpretazione geologica del fenomeno sviluppata da GEOEQUIPE (vedi relazione specifica) porta a sostenere l'attivazione, in fase di scavo della galleria ed in contestuale presenza di precipitazioni eccezionali, di anomali movimenti di versante profondi lungo strato, attualmente stabilizzatisi. A tali movimenti vanno pertanto principalmente imputati i danni dell'edificio 8.

In considerazione di tali elementi nell'ambito della presente proposta si è quindi anche provveduto alla definizione di un adeguato intervento migliorativo al fine permettere di incrementare il coefficiente di stabilità del versante.

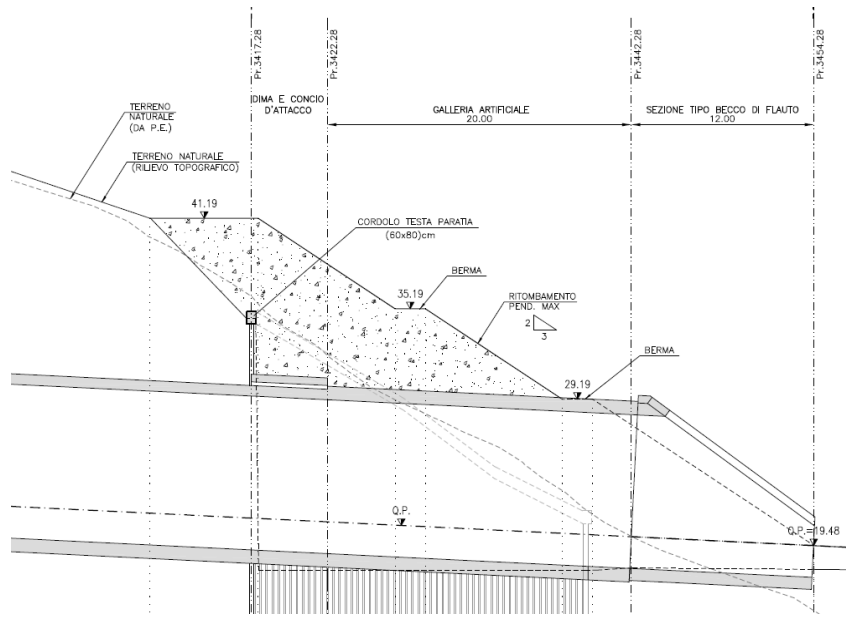
## 9.2 Interventi di stabilizzazione del versante

Dalle risultanze degli studi geomefologici sul versante e delle recenti indagini integrative risulterebbe che il movimento di versante profondo lungo strato sia passante per la testa della berlinese di imbocco (che si presenta localmente lesionata) e sia emerso in superficie con fratture di trazione individuate sulla sommità del rilievo.

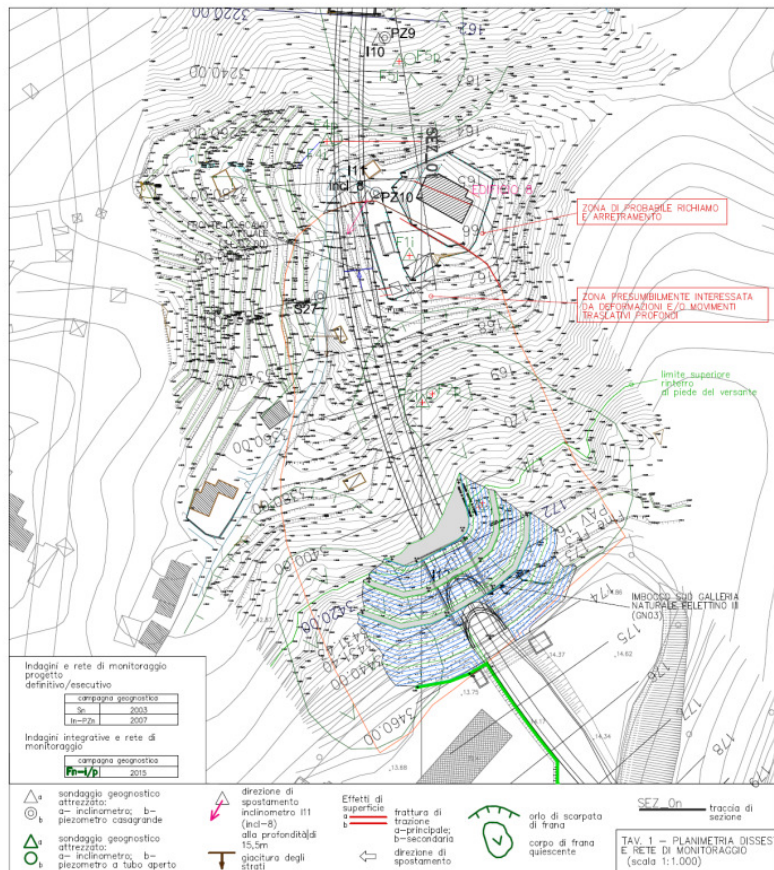
Per garantire la stabilità del versante a lungo termine, si prevede il prolungamento di 20m della galleria artificiale, prevista a PE, ed il potenziamento del suo ritombamento, a contrasto del piede del versante.



**Figura 52 – Profilo geologico e superficie di scorrimento lungo strato (GEOEQUIPE)**



**Figura 53 – Riprogettazione della sezione di imbocco**



**Figura 54 – Ritombamento previsto al piede del versante**

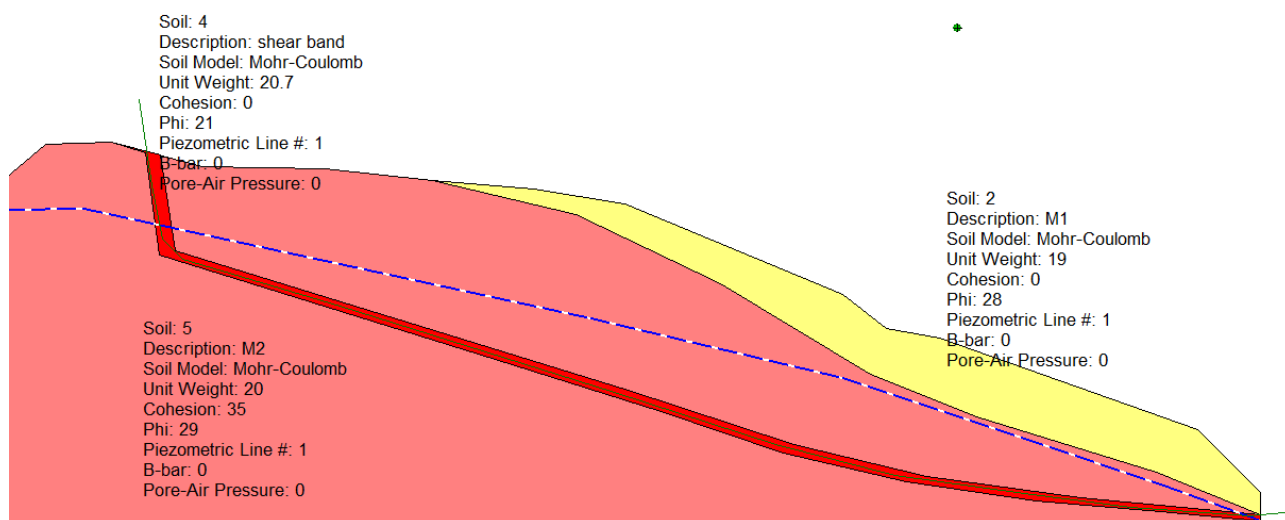
Al fine di valutare l'efficacia dell'interventi, si è provveduto inizialmente alla valutazione delle condizioni di stabilità attuali del versante.

Le analisi sono state condotte con i metodi all'equilibrio limite tenendo conto della stratigrafia reale del sito (angolo d'attrito residuo da prove torsionali) e della posizione della falda misurata dai piezometri.

L'analisi si è focalizzata sulla taratura dei parametri di resistenza della shear band, al fine di ottenere un fattore di sicurezza vicino all'unità per la superficie di scorrimento ipotizzata in base alle risultanze di monitoraggio.

In dettaglio, per il piano di scorrimento si è assunta una coesione nulla e si è ottenuto un angolo d'attrito, che si può considerare come l'angolo d'attrito residuo della formazione M2.

Il modello realizzato restituisce un fattore di sicurezza superiore all'unità (FS=1.145) che, per le necessarie schematizzazioni del modello di calcolo, viene quindi considerato rappresentativo in quanto sufficientemente prossimo all'unità.



**Figura 55 – Modello di calcolo per la back-analysis del versante**

Simulata la condizione attuale, si valuta l'efficacia della misura mitigativa proposta, che consiste nell'allungamento della galleria artificiale di 20 m per permettere un adeguato ritombamento che funziona da massa stabilizzante al piede della frana.

Inoltre, allungando l'artificiale, si fornisce maggiore protezione al traffico veicolare, allontanando la zona di ingresso in galleria dal corpo franoso.

In accordo con la normativa vigente, le nuove verifiche di stabilità sia in condizioni statiche che sismiche vengono effettuate con l'Approccio 1- Combinazione 2: A2+M2+R2 tenendo conto dei vari coefficienti parziali riportati nelle tabelle 6.2.I, 6.2.II e 6.8.I.

Per quanto riguarda la resistenza del terreno, i parametri geotecnici della shear band non vengono ridotti, essendo già parametri residui. Si introduce il ritombamento, caratterizzato da coesione nulla e angolo d'attrito caratteristico pari a 30°.

Arenarie del Macigno	$\gamma$	$\phi'_k$	$c'_k$
	[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[kPa]
ritombamento	18	24.8	0
M1	19	23	0
M2	20	23.9	28
shear band	20.7	21	0

La condizione di verifica  $E_d \leq R_d$  equivale ad avere un coefficiente di sicurezza in corrispondenza della superficie di scorrimento critica  $F_{min} \geq \gamma_R$ :

$$F = R_d / E_d \geq 1.1$$

In condizioni sismiche, la stabilità è stata analizzata mediante un approccio pseudostatico.

Gli effetti del sisma sono stati quindi rappresentati con delle forze d'inerzia orizzontali e verticali applicate alla massa instabile:

$$F_h = k_h \cdot W$$

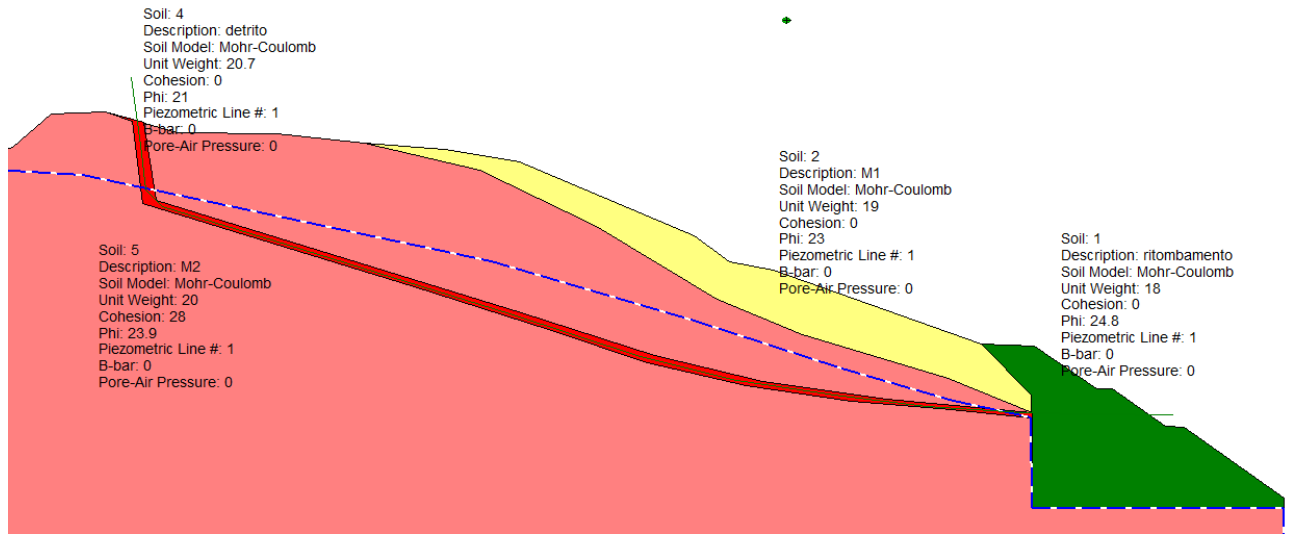
$$F_v = \pm k_v \cdot W$$

W è il peso totale della massa di terreno al disopra della superficie di scorrimento.

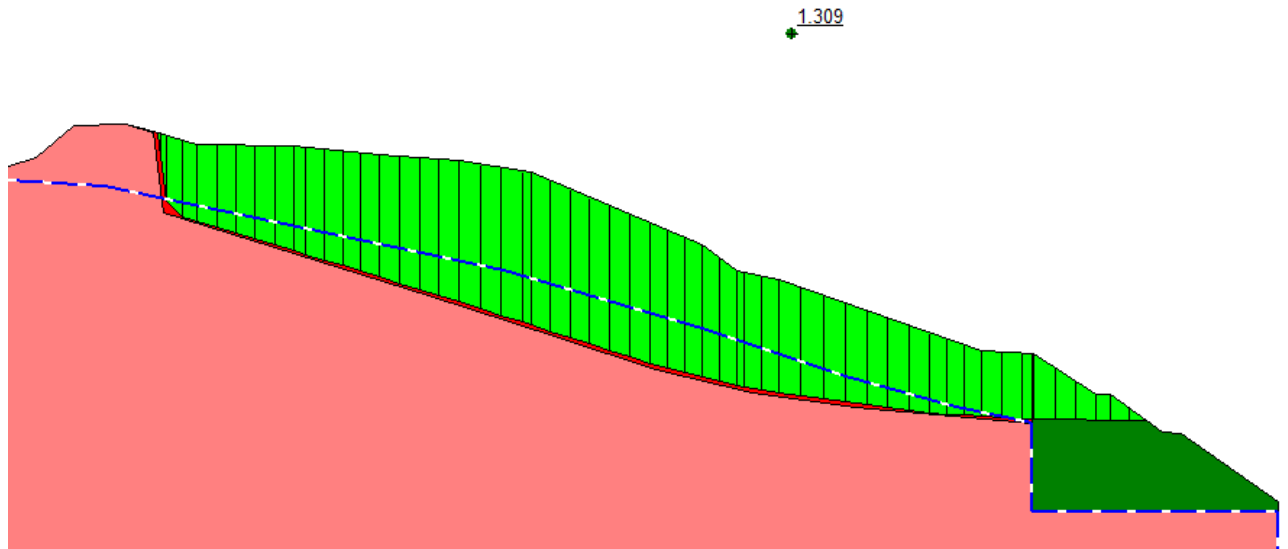
Per la stabilità del versante si assume una vita nominale  $V_N$  pari a 100 anni e si considera il periodo di riferimento per l'azione sismica  $V_R$  pari a 200 anni, prendendo il coefficiente d'uso  $c_u$  pari a 2. In corrispondenza del comune di La Spezia, in condizioni di Stato Limite Ultimo, la massima accelerazione attesa in sito vale  $a_g(g) = 0.196$ . I coefficienti sismici impiegati nella analisi sono i seguenti:

$a_g(g)$ (SLV)	0.196
Categoria di sottosuolo	B
Coefficiente di amplificazione stratigrafica $S_s$	1.2
Coefficiente di amplificazione topografica $S_t$	1.2
$a_{max}(g)$ attesa al sito	0.282
Coefficiente di riduzione dell' $a_{max}$ attesa al sito $\beta_s$	0.24
$k_h$	0.068
$k_v$	0.034

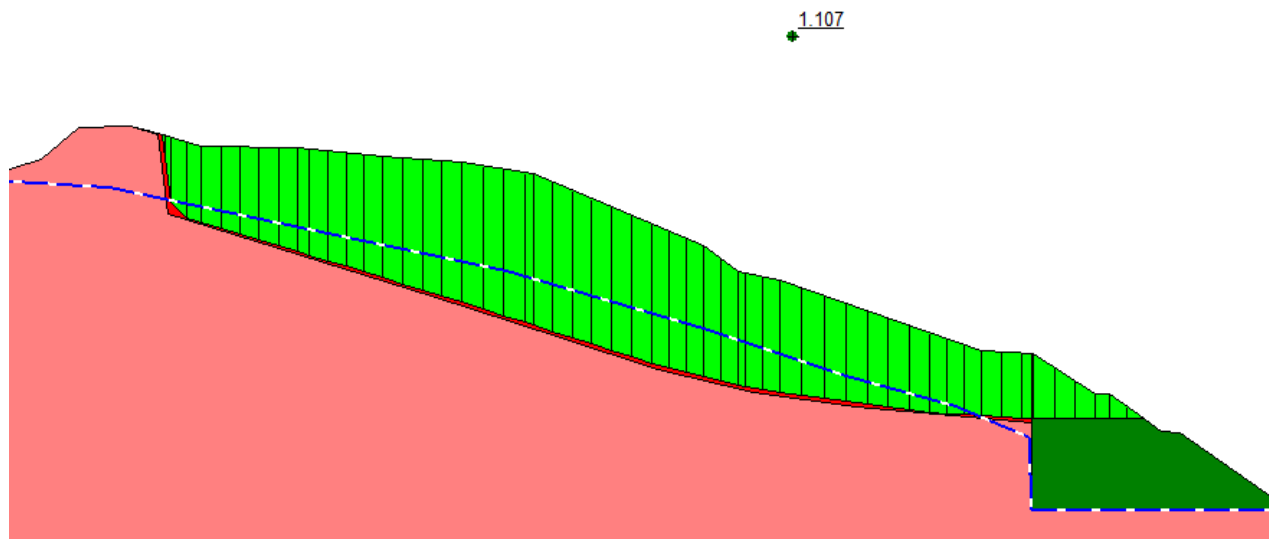
Le verifiche risultano soddisfatte, risultando il minimo FS pari a 1.309 in campo statico e pari a 1.107 in campo sismico.



**Figura 56 – Modello di calcolo per la sistemazione definitiva**



**Figura 57 –Analisi statica – Fs = 1.309**



**Figura 58 –Analisi sismica -  $F_s = 1.107$**

A completamento della modifica progettuale, il concio d'attacco in corrispondenza della dima e la galleria artificiale sono stati verificati considerando il peso del ritombamento nella nuova sistemazione definitiva.

Allo scopo di contenere quanto più possibile gli effetti dovuti dallo scavo di completamento della galleria sul versante e sull'edificio 8 le attività di scavo sia dal lato sud che da quello nord potranno essere riprese solo dopo avere gettato le rispettive gallerie artificiali e messo in opera i ritombamenti previsti.

Inoltre, nella fase di scavo di completamento della galleria in via cautelativa dovrà prevedersi il temporaneo allontanamento degli abitanti dell'edificio n° 8.

## 10. Monitoraggio in corso d'opera

Riprendendo ed integrando le prescrizioni di PE, si dovrà prevedere per ogni campo di scavo la seguente attività di monitoraggio:

- Installazione di un estrusimetro al fronte di lunghezza minima 30 m posizionato approssimativamente al centro dello stesso, per il quale dovranno essere eseguite una lettura zero prima dell'inizio degli scavi, una a metà campo ed una a fine campo. Nel corso delle misure dovranno essere garantite le condizioni di sicurezza degli operatori prevedendo un tampone di spritz al fronte fibrorinforzato di spessore pari a circa 10-20 cm e uno strato di pre-spritz fibrorinforzato al contorno di spessore pari a circa 5-10 cm. I reali spessori dello spritz-beton sopra indicati verranno decisi e definiti dal preposto al fronte sulla base delle analisi delle condizioni locali;
- Installazione (qualora non ripristinabili) di stazioni di convergenza a 5 mire ogni 10 m ca. a partire dal fronte attuale (ultima/penultima centina) fino al rivestimento definitivo, in cui dovrà essere eseguita la lettura di 0 prima della ripartenza dello scavo e letture giornaliere in fase di scavo fino al getto del rivestimento definitivo;
- Rilievo geologico del fronte di scavo da eseguirsi approssimativamente al termine del campo.
- Monitoraggio della strumentazione topografica e geotecnica presente in superficie, con cadenza giornaliera in fase di scavo e settimanale a fronte fermo.

Per quanto riguarda la restante strumentazione per il monitoraggio della superficie vedasi elaborato relativo.



## **ALLEGATO 1**

### **Output FLAC**

I parametri geomeccanici utilizzati nell'analisi sono stati determinati mediante l'esecuzione di una back-analysis di simulazione dello stato deformativo dei rivestimenti di prima fase nel tratto di galleria già scavato.

Nella seguente tabella vengono riportati i parametri così ottenuti:

$\gamma$	$c'_p - c'_r$	$\phi_p - \phi_r$	E	$\nu$
[kN/m <sup>3</sup> ]	[kPa]	[°]	[MPa]	[-]
23	65 - 52	30 - 24	250	0.3

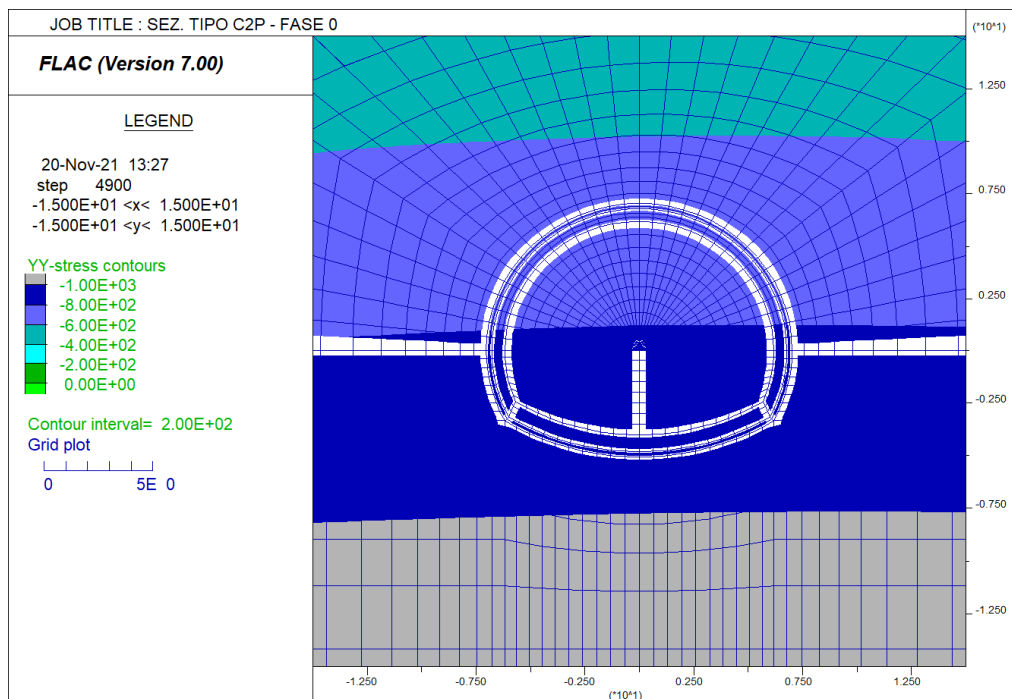
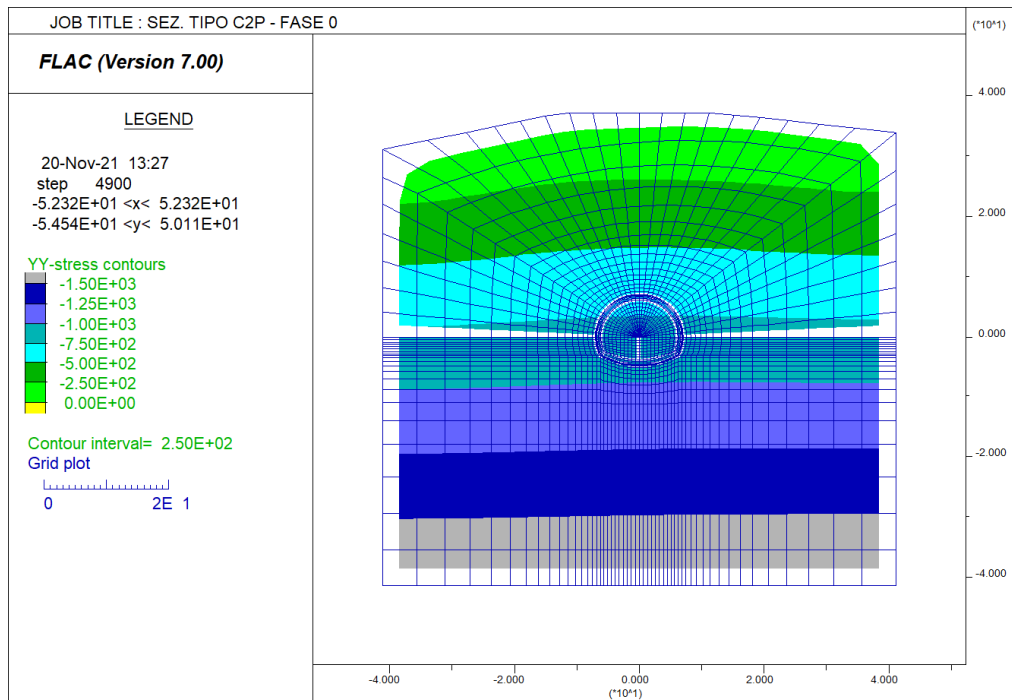
**Tabella 20 – Parametri geomeccanici**

Si osserva che i parametri geomeccanici ottenuti sono inferiori non solo ai valori previsti da PE in corrispondenza delle alte coperture ma anche dei parametri geomeccanici previsti in corrispondenza delle basse coperture in zona imbocco nord.

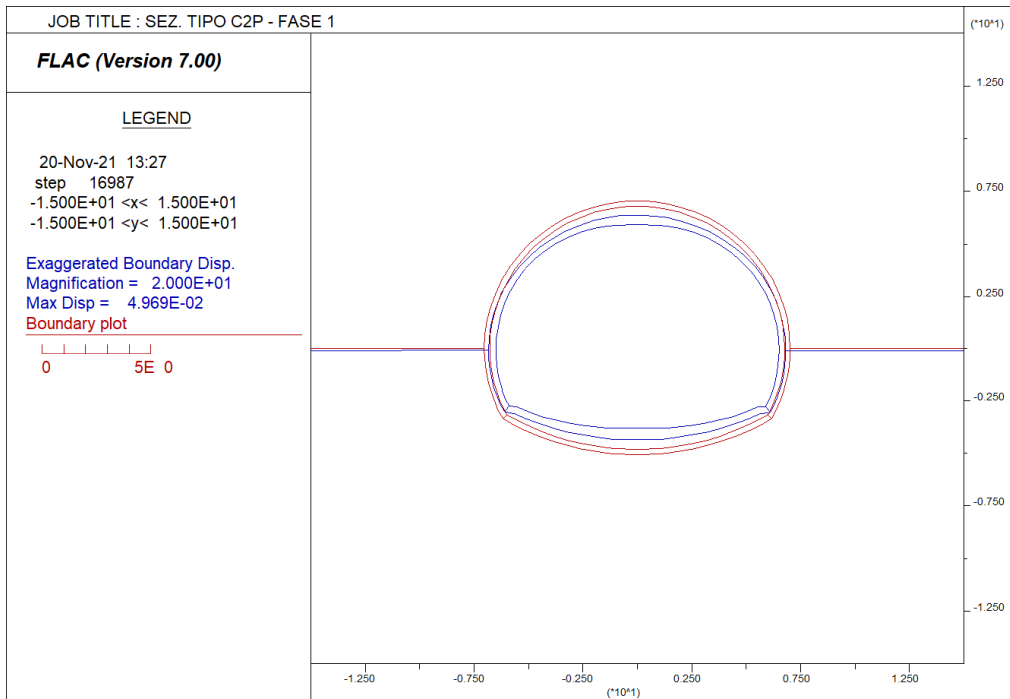
Le verifiche della sezione tipo C2P ad alta copertura, riportate nella presente relazione, risultano pertanto valide e cautelative anche per la sezione tipo C2VP, prevista per le basse coperture, non essendoci differenze in termini di carpenterie minime ed armature oltre che di consolidamenti tra le due sezioni.

Per la definizione delle caratteristiche geotecniche della fascia di materiale consolidato al contorno del cavo, si è adottato il criterio empirico (basato sulla osservazione di dati sperimentali di gallerie, scavate in contesti geotecnici analoghi e su cui si è operato con simili interventi di preconsolidamento) di amplificare il valore del modulo di deformabilità di 2-3 volte rispetto a quello naturale.

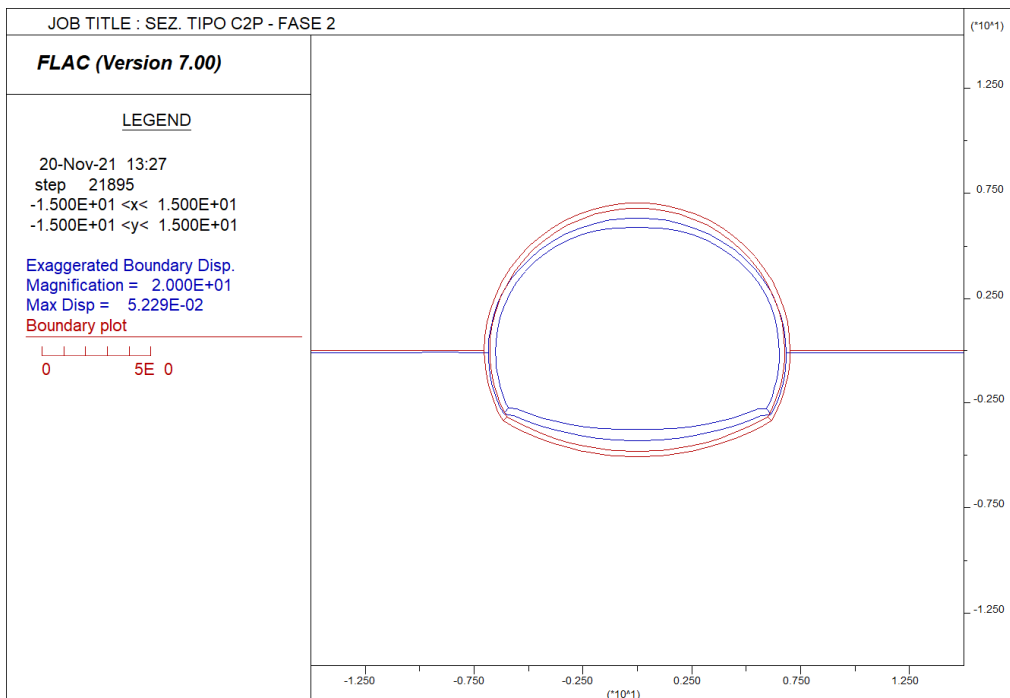
### Stato tensionale geostatico iniziale



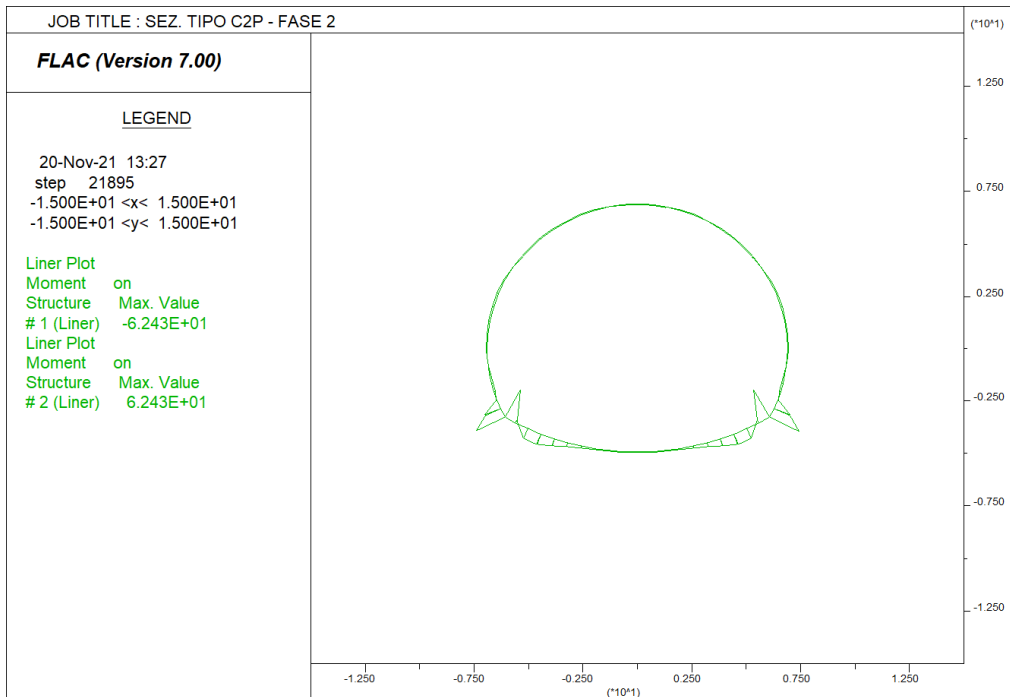
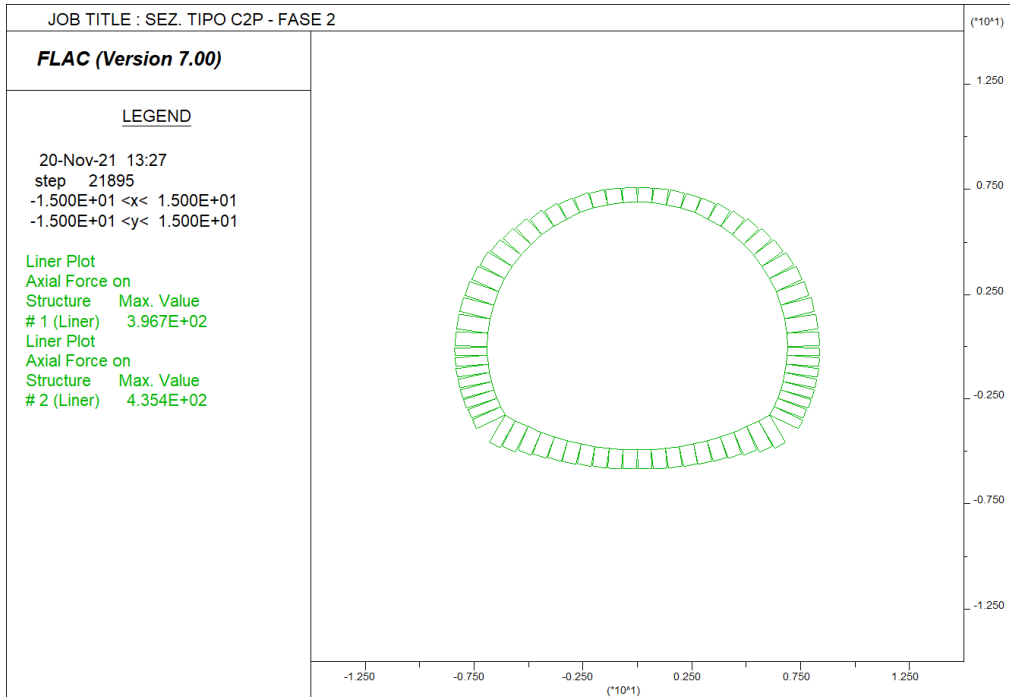
### Fase 1 – Deformata del cavo

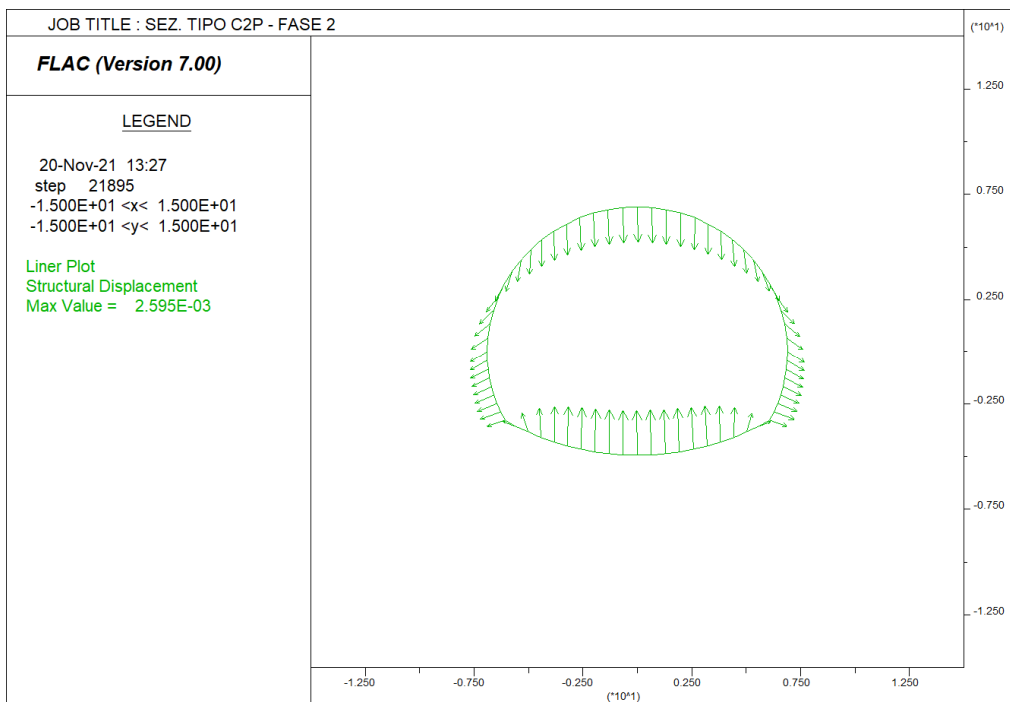
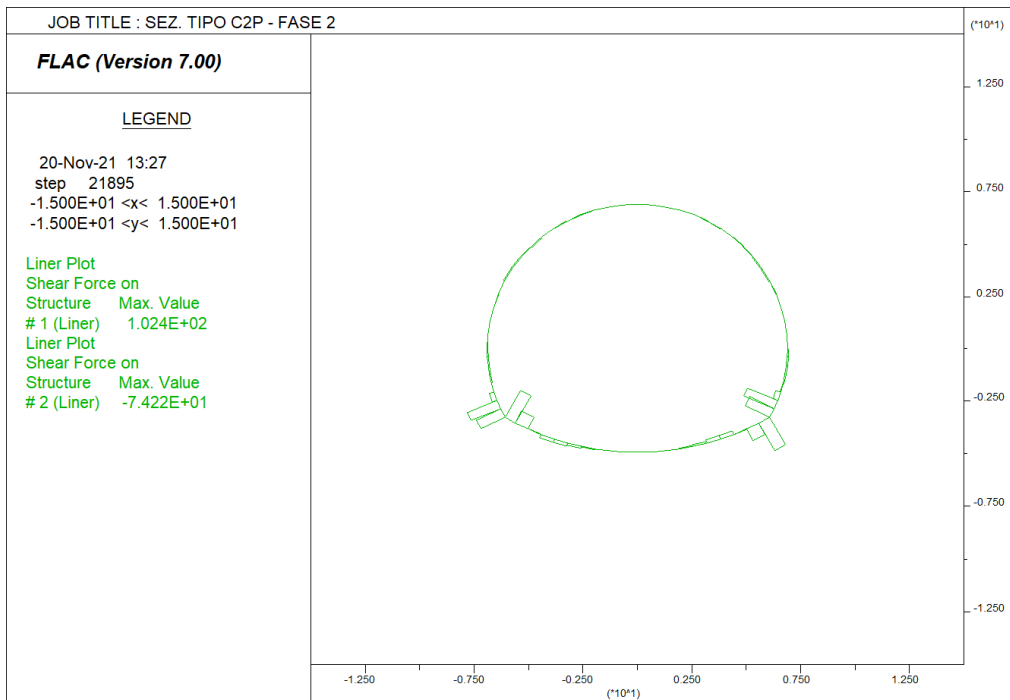


### Fase 2 – Deformata del cavo

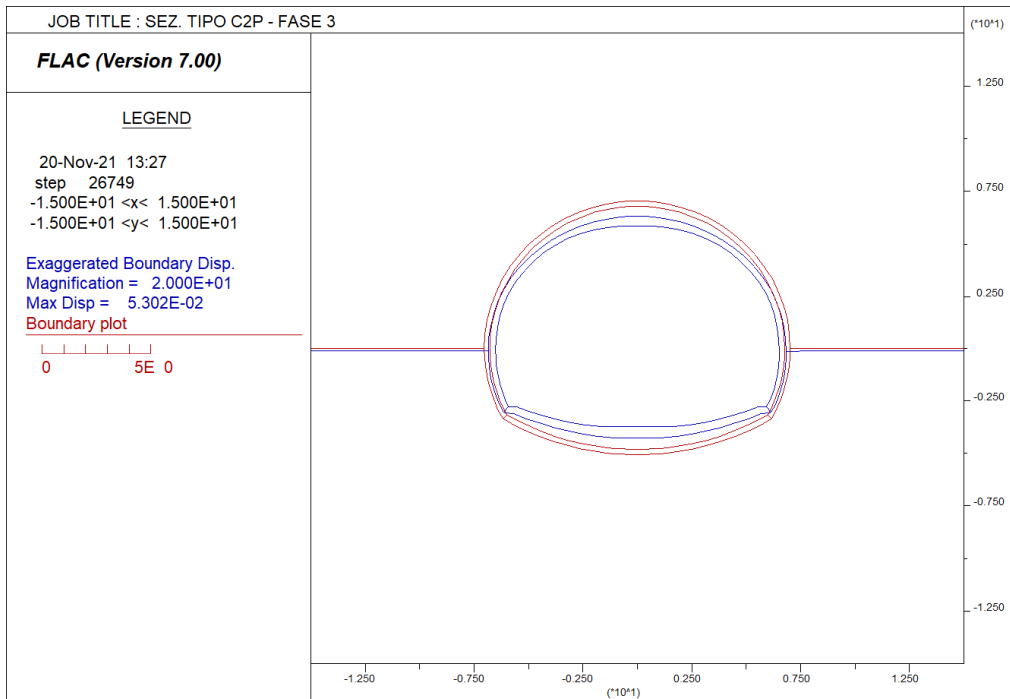


### Fase 2 – Sollecitazioni nei rivestimenti di prima fase

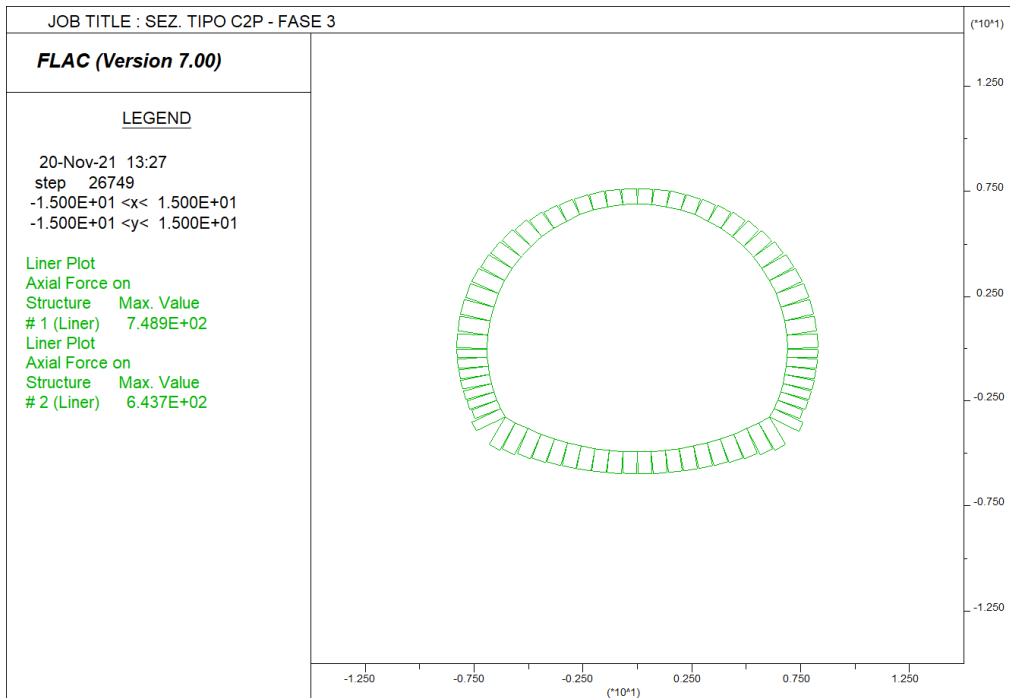


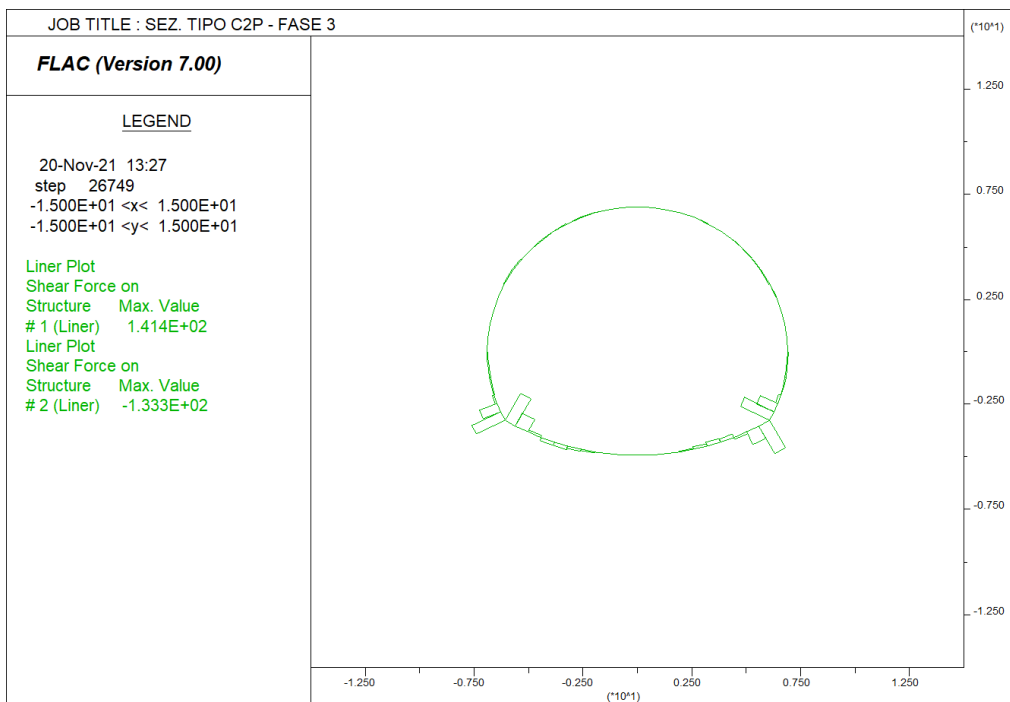
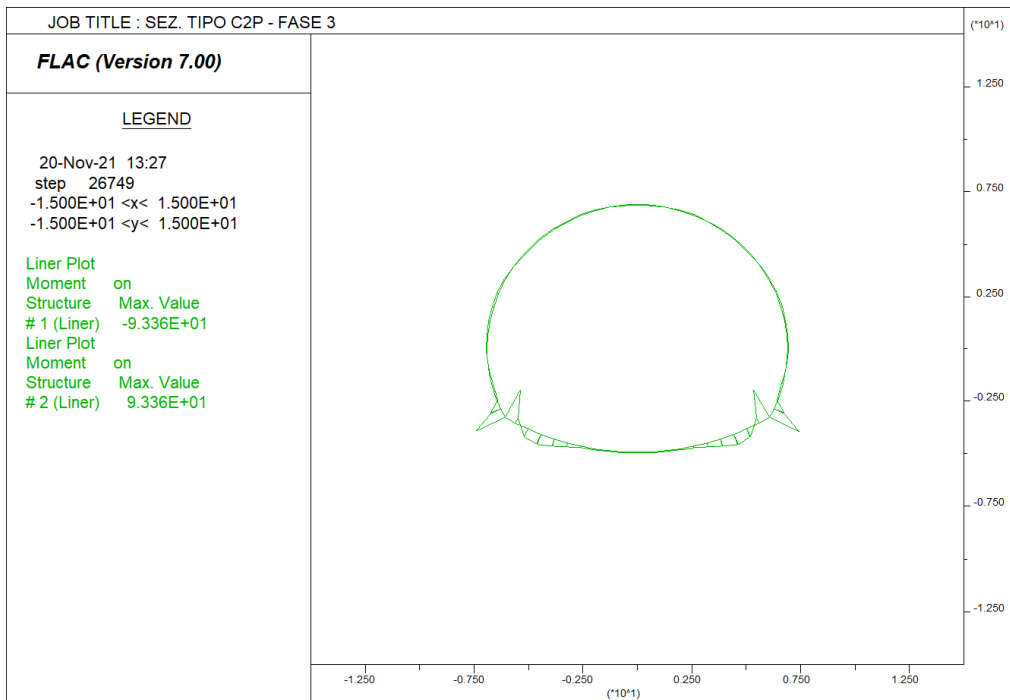


### Fase 3 – Deformata del cavo



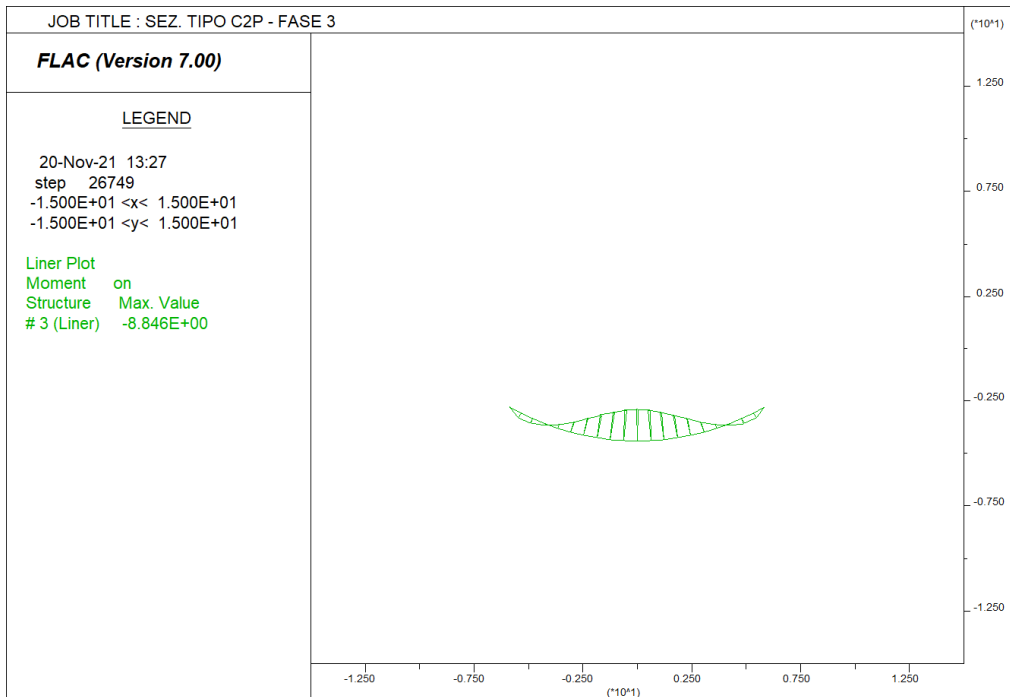
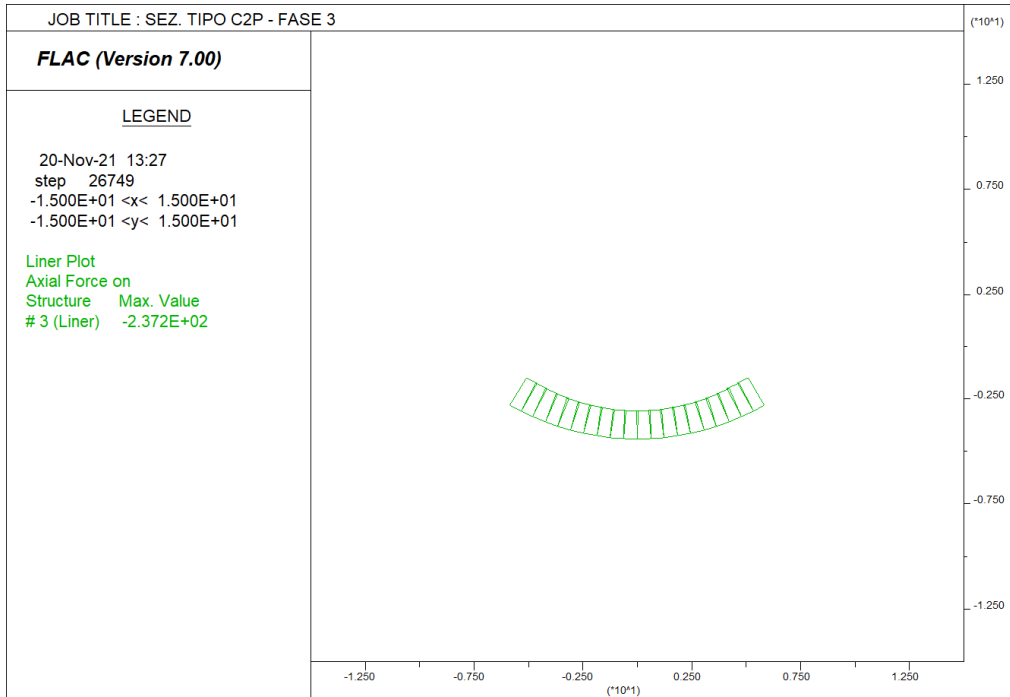
### Fase 3 – Sollecitazioni nei rivestimenti di prima fase

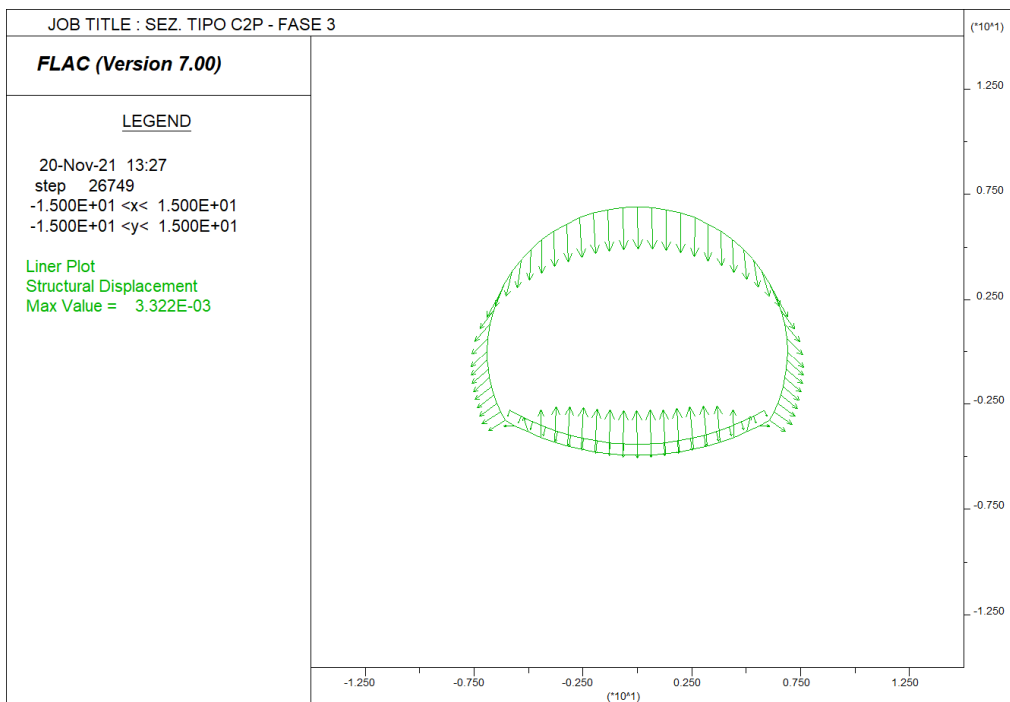
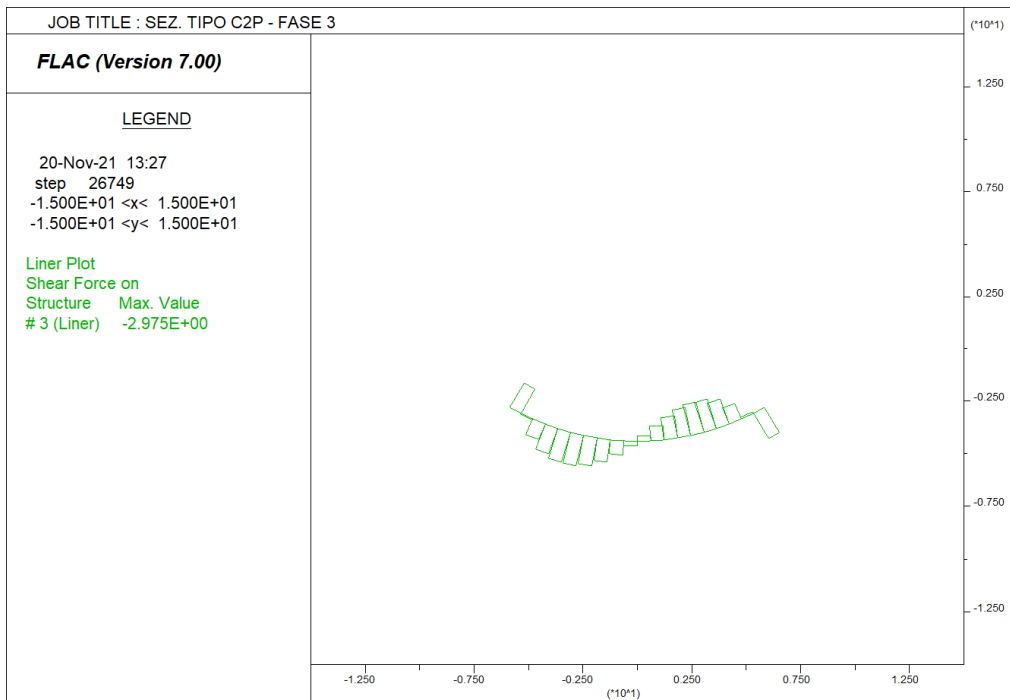




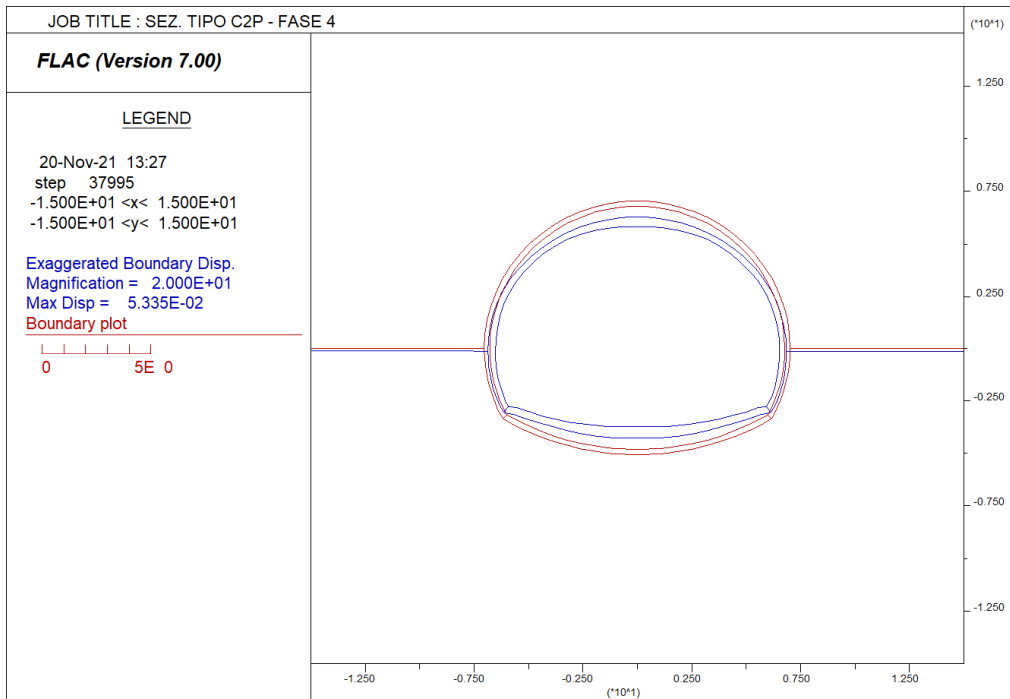


### Fase 3 – Sollecitazioni nell'Arco rovescio

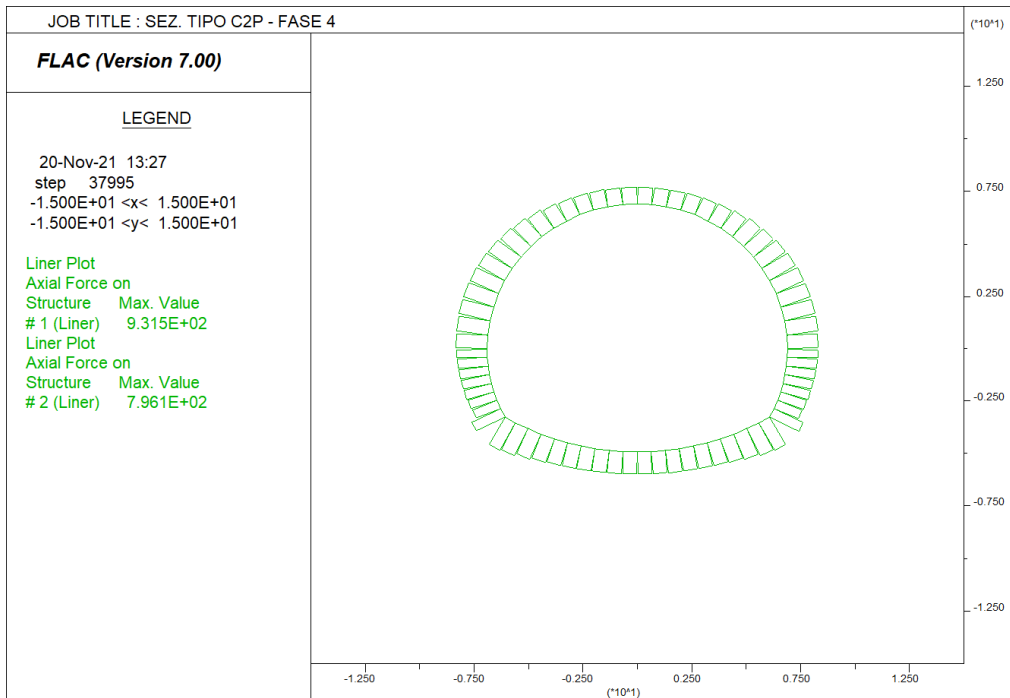


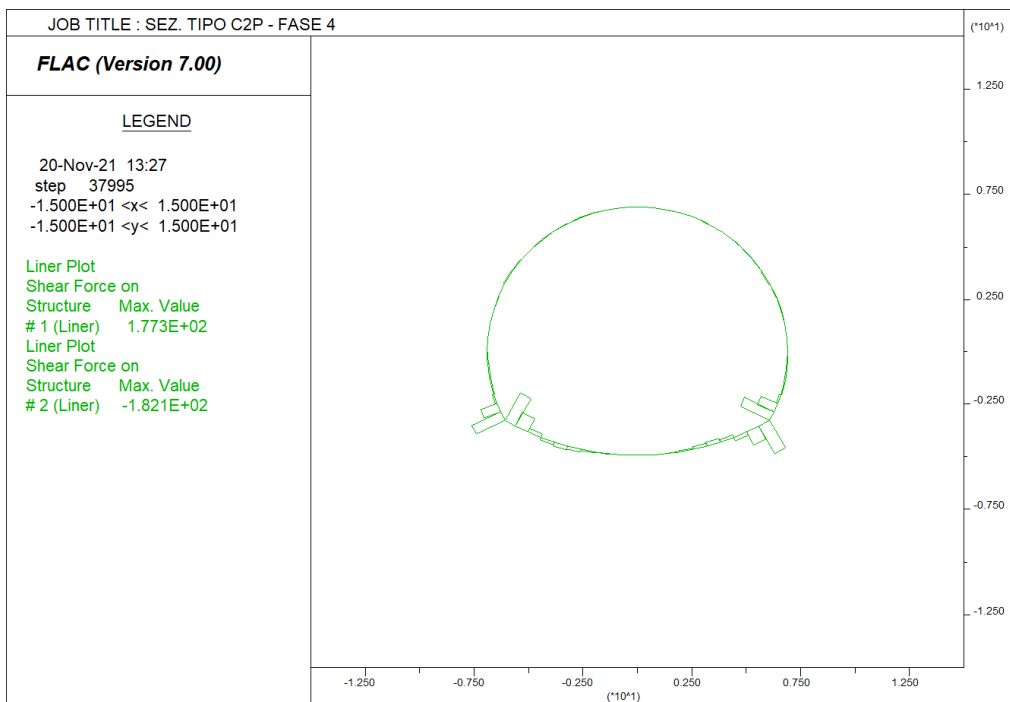
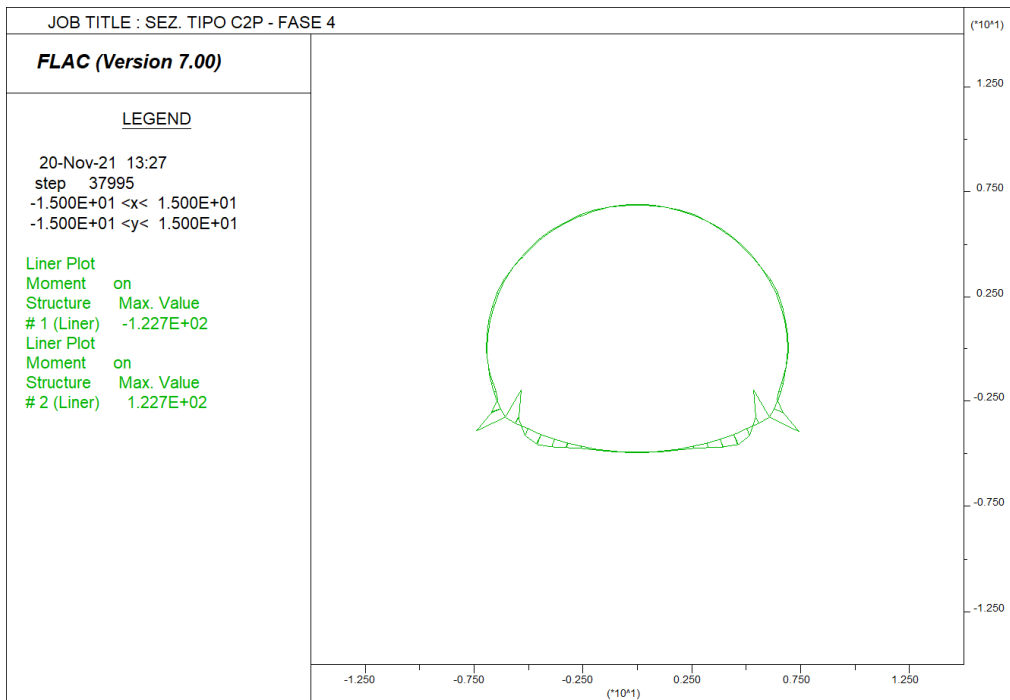


### Fase 4 – Deformata del cavo

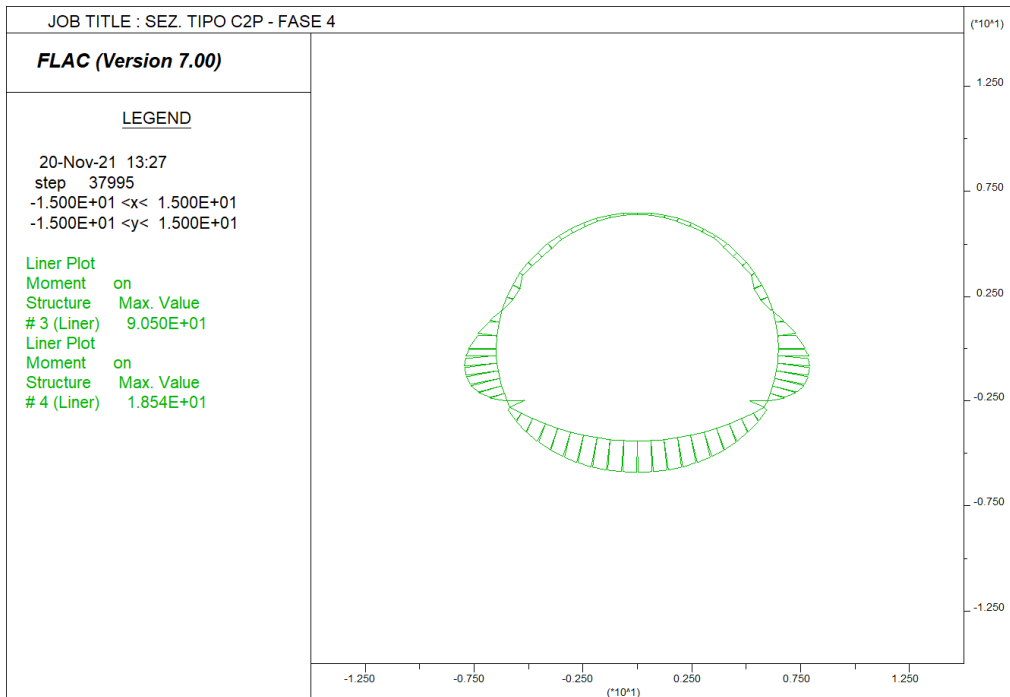
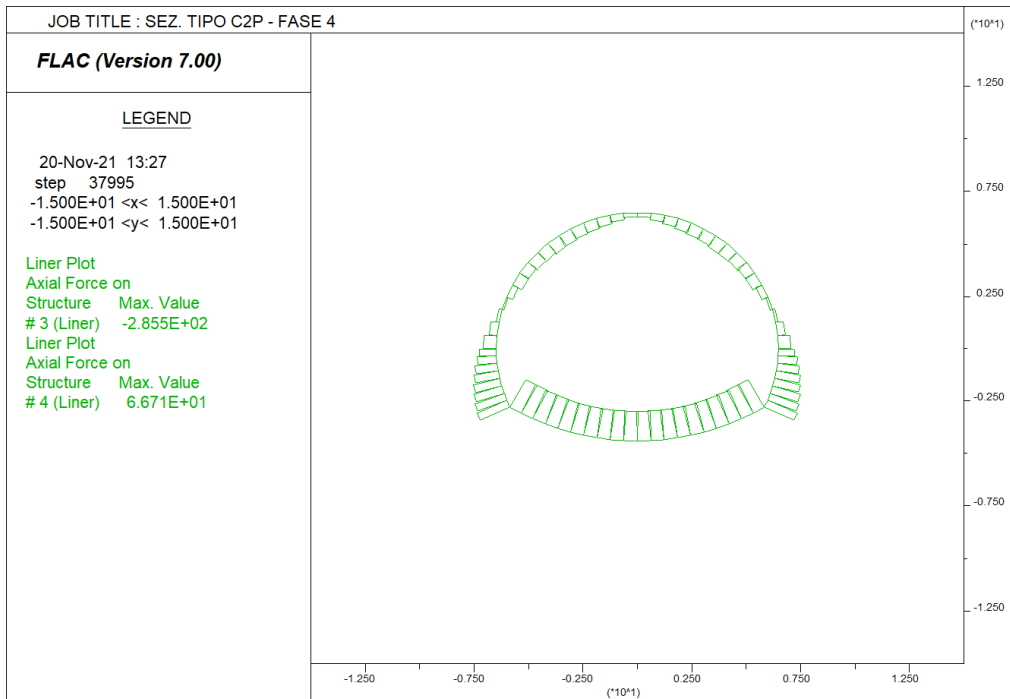


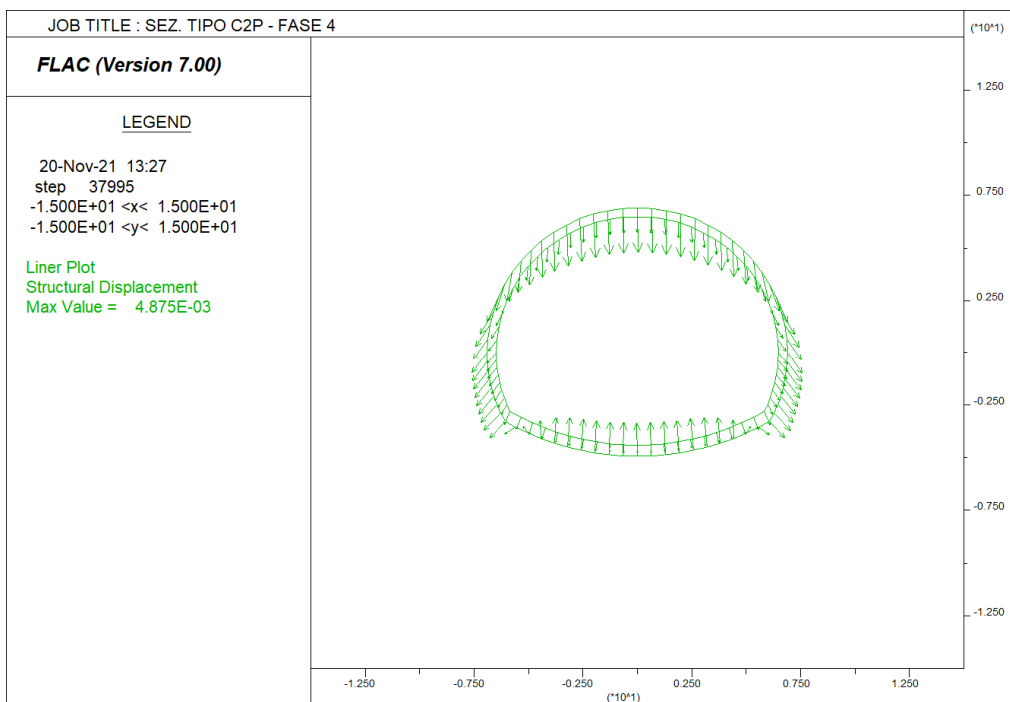
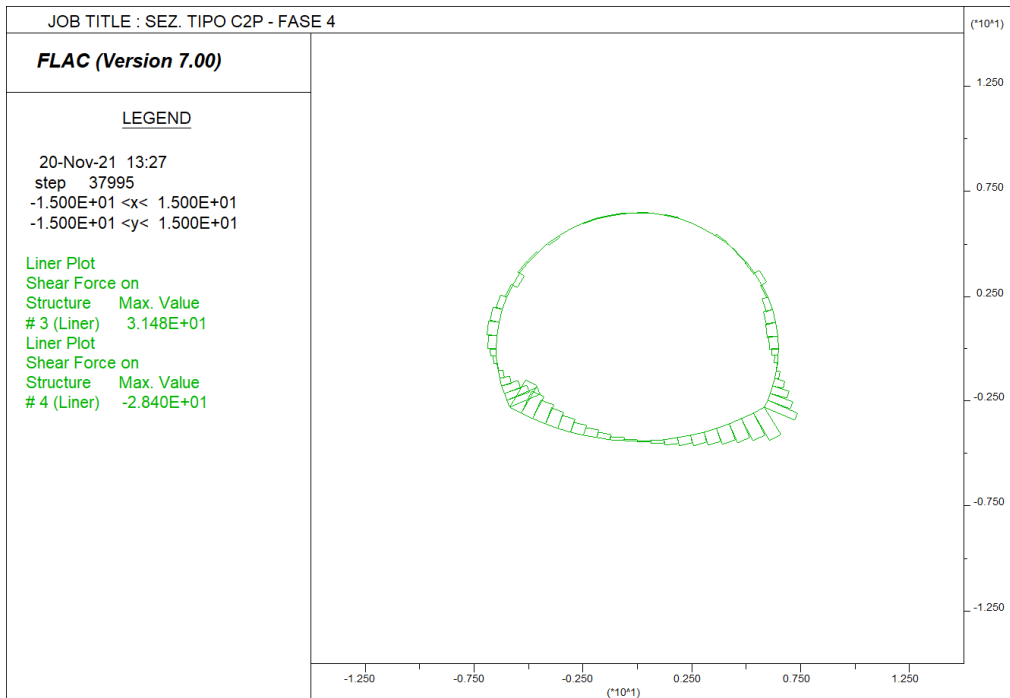
### Fase 4 – Sollecitazioni nei rivestimenti di prima fase



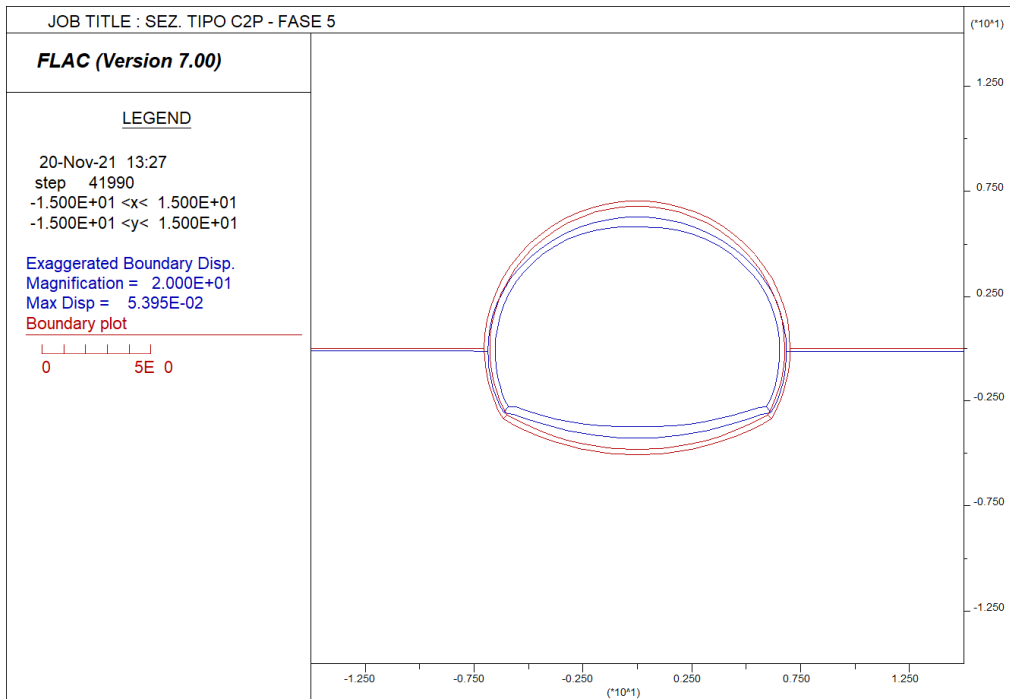


### Fase 4 – Sollecitazioni nei rivestimenti definitivi

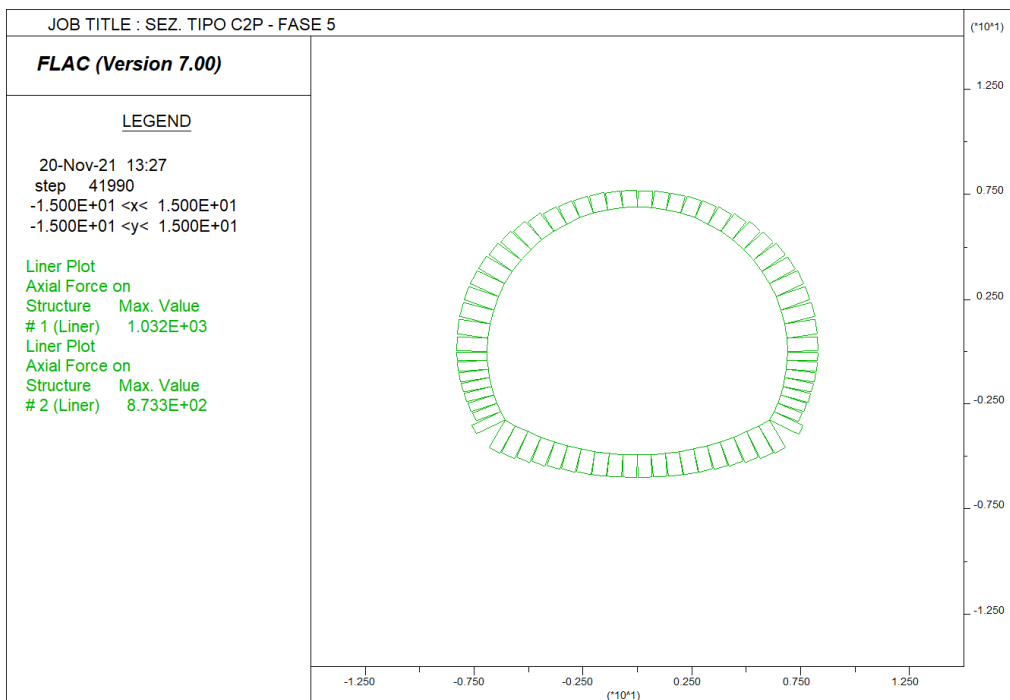


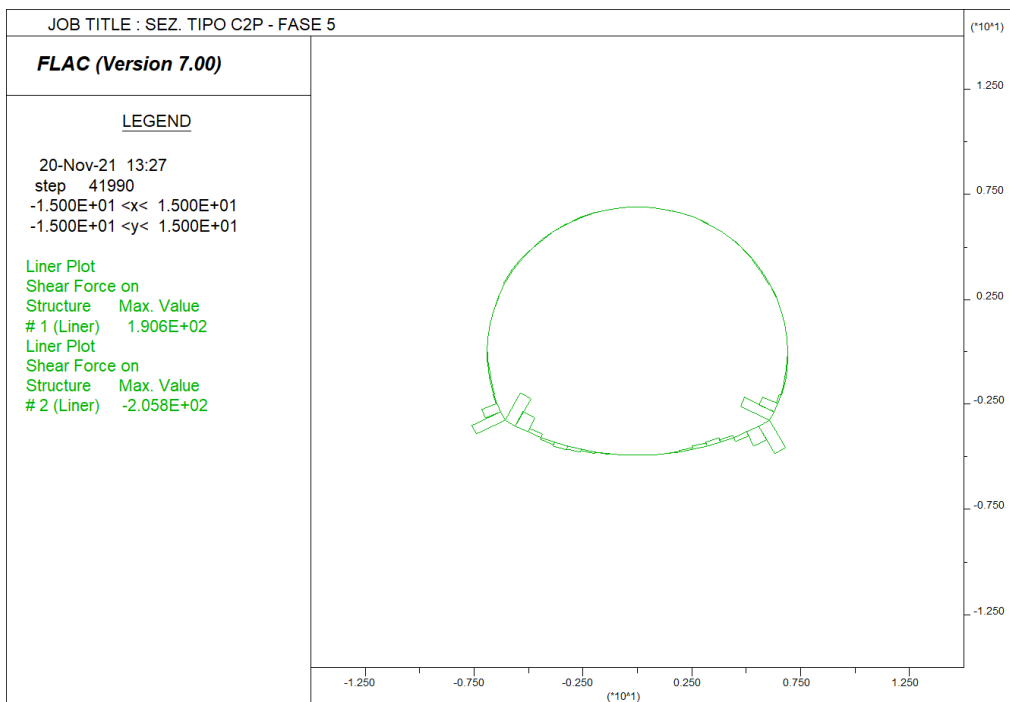
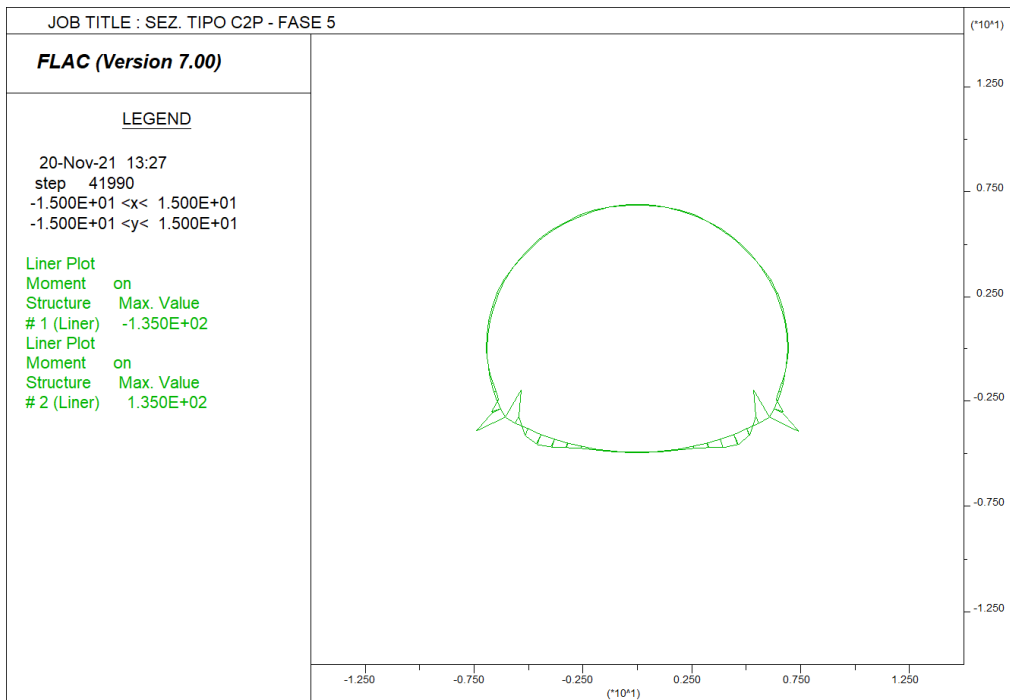


### Fase 5 – Deformata del cavo



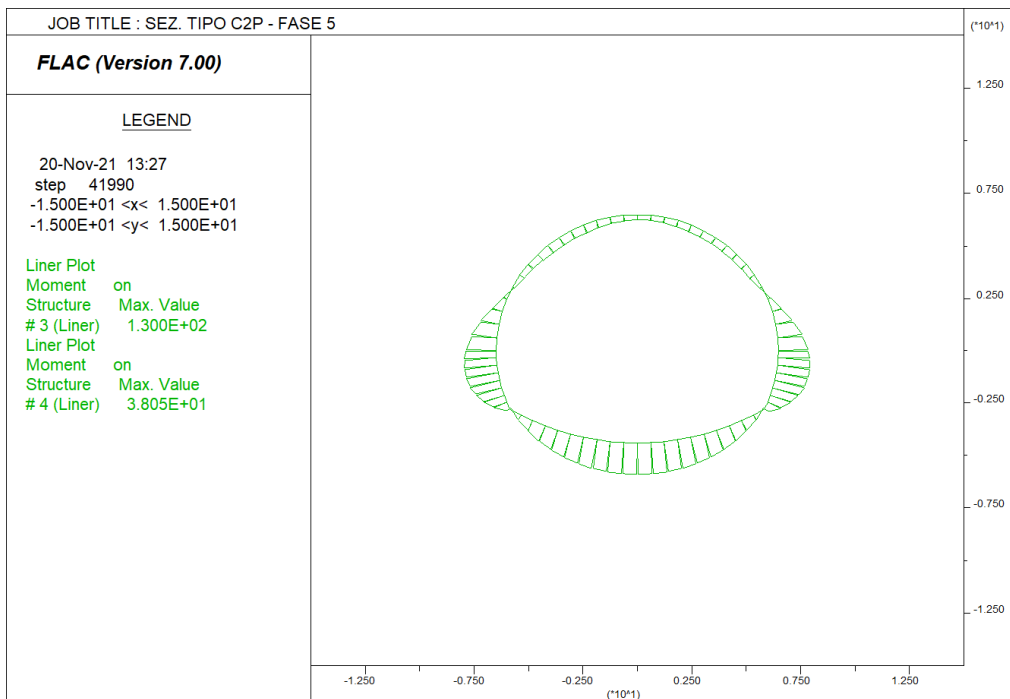
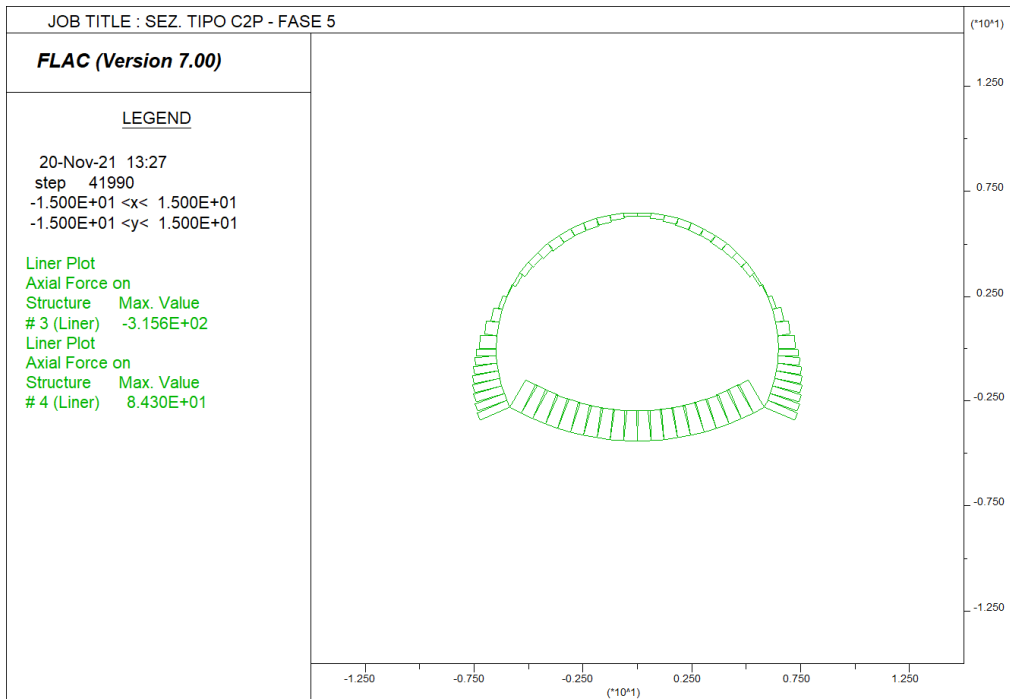
### Fase 5 – Sollecitazioni nei rivestimenti di prima fase

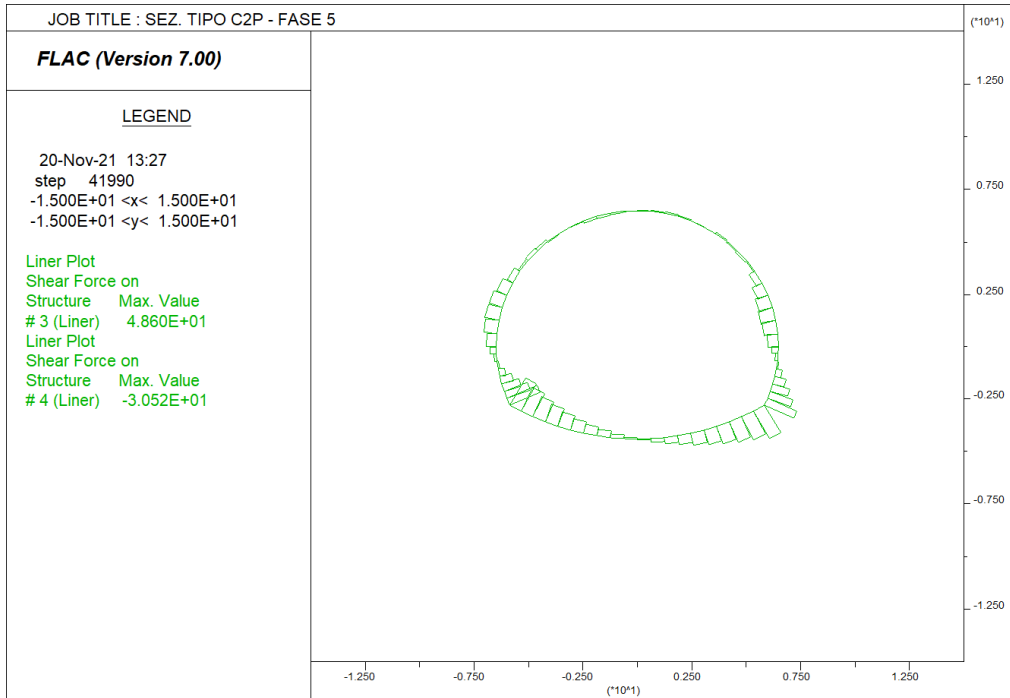




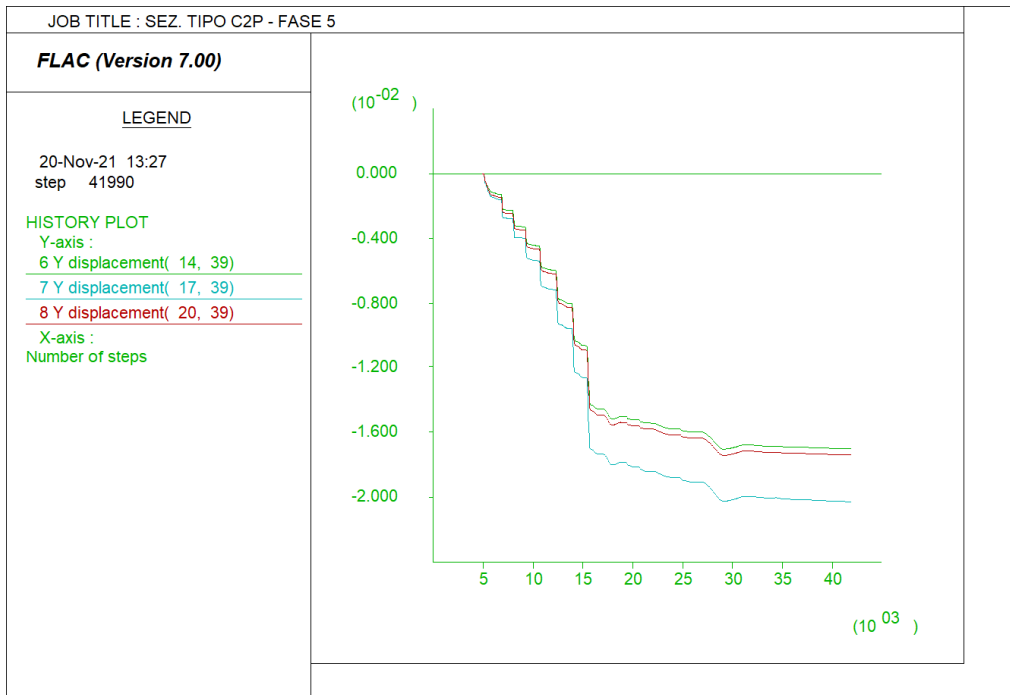


### Fase 5 – Sollecitazioni nei rivestimenti definitivi

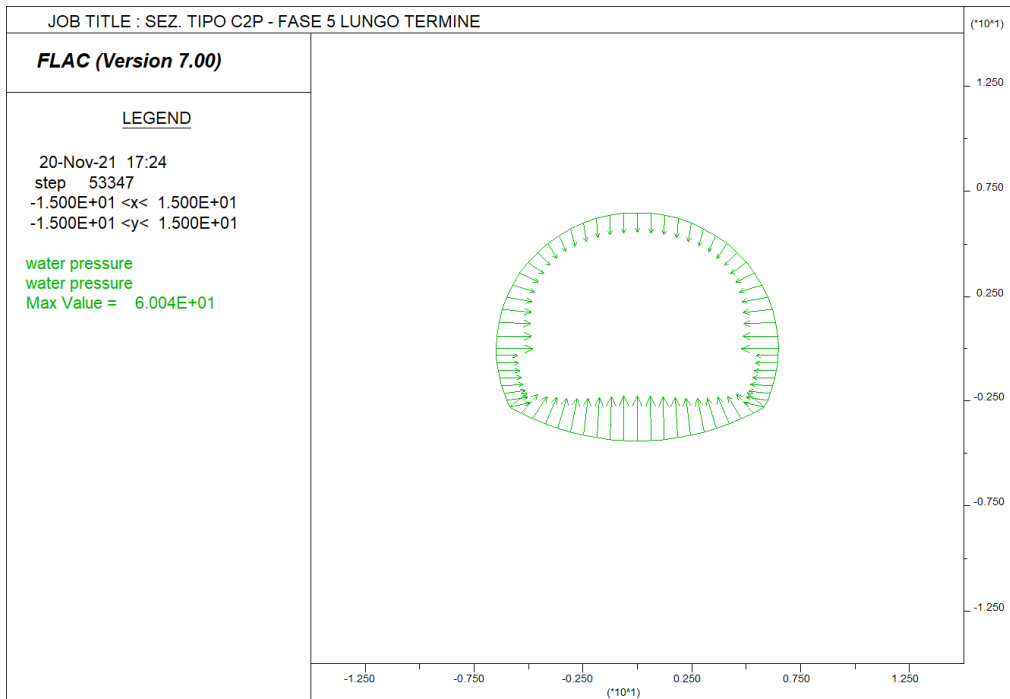




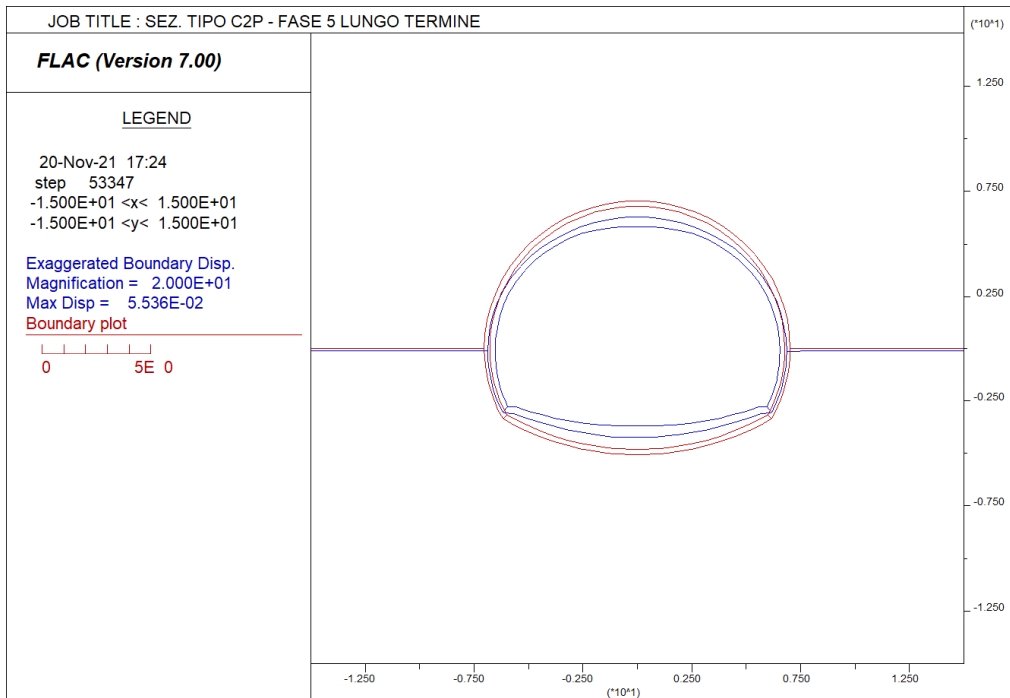
**Fase 5 – Cedimenti in superficie**  
 punto 7 in asse galleria  
 punti 6,8 laterali



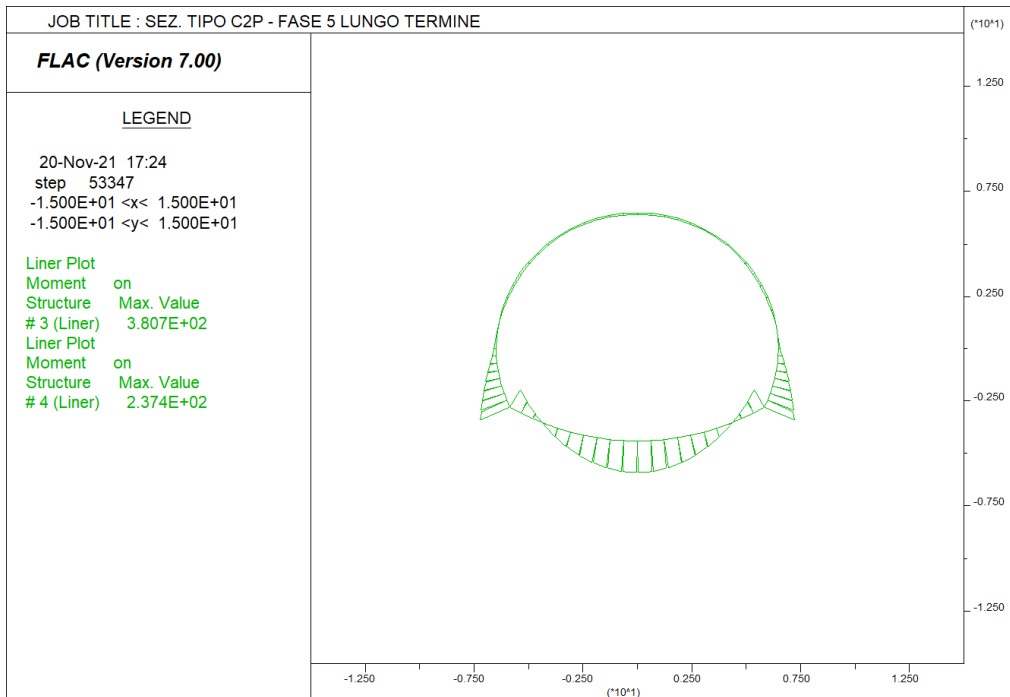
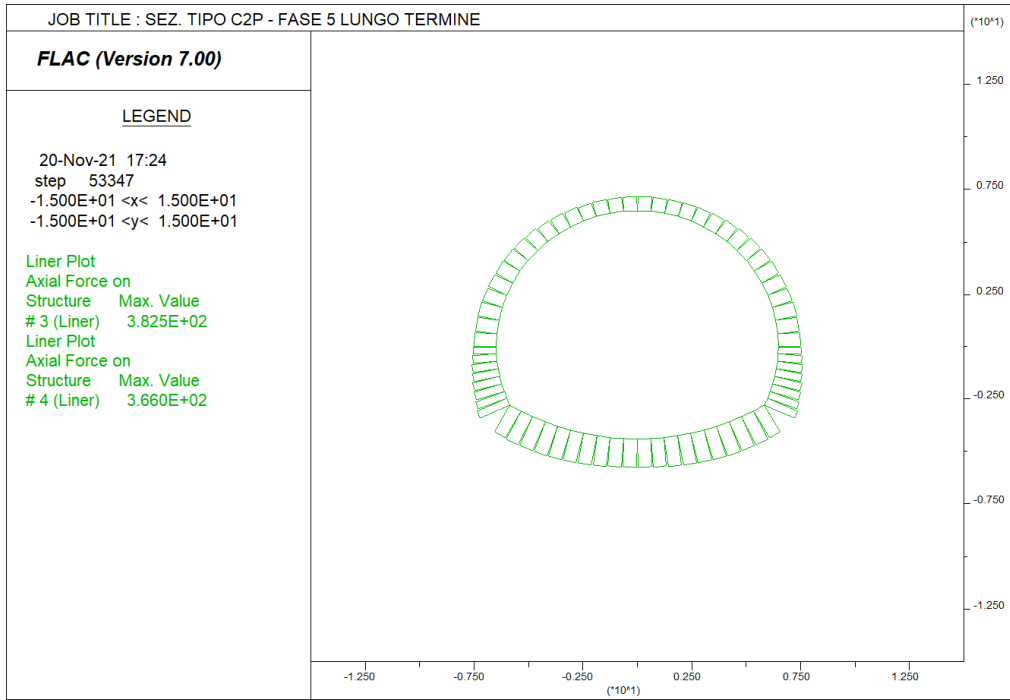
### Fase 5a – Pressioni idrostatiche applicate

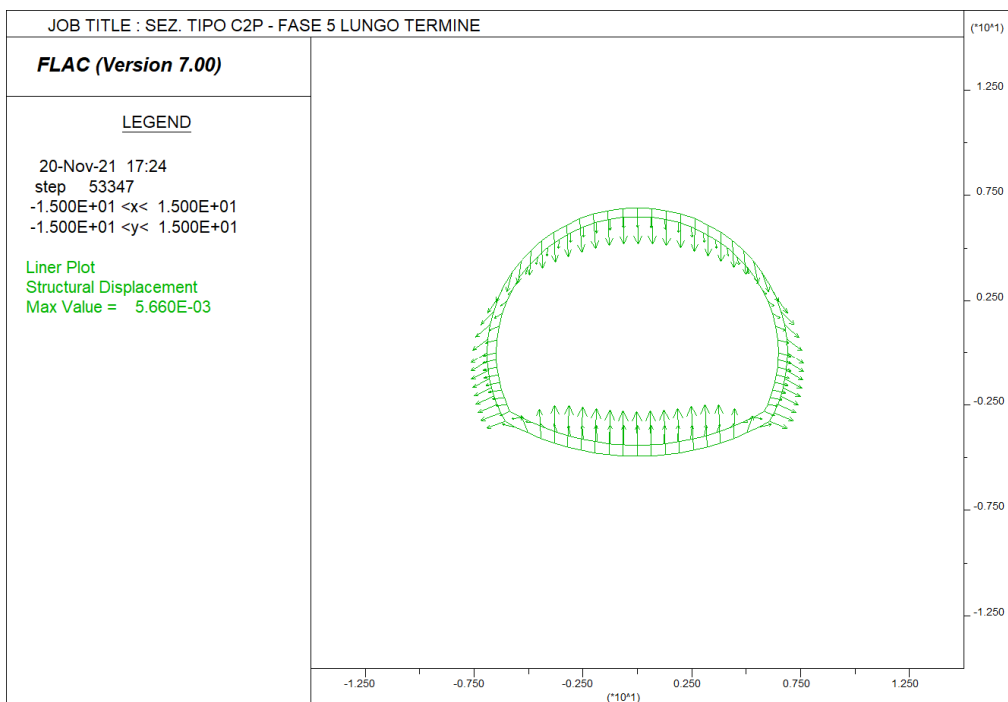
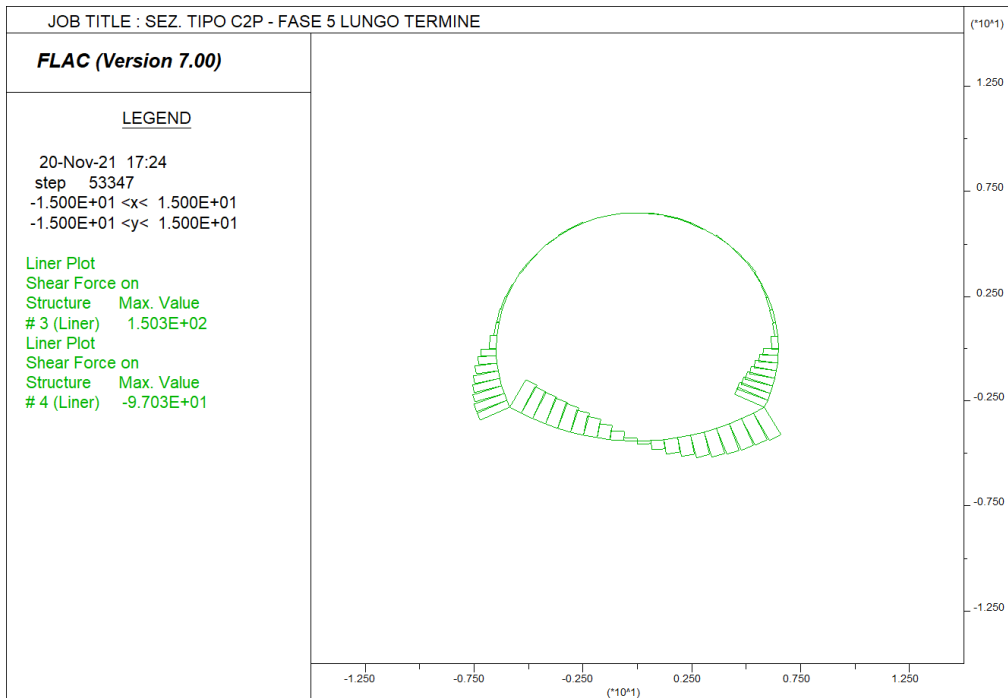


### Fase 5a – Deformata del cavo

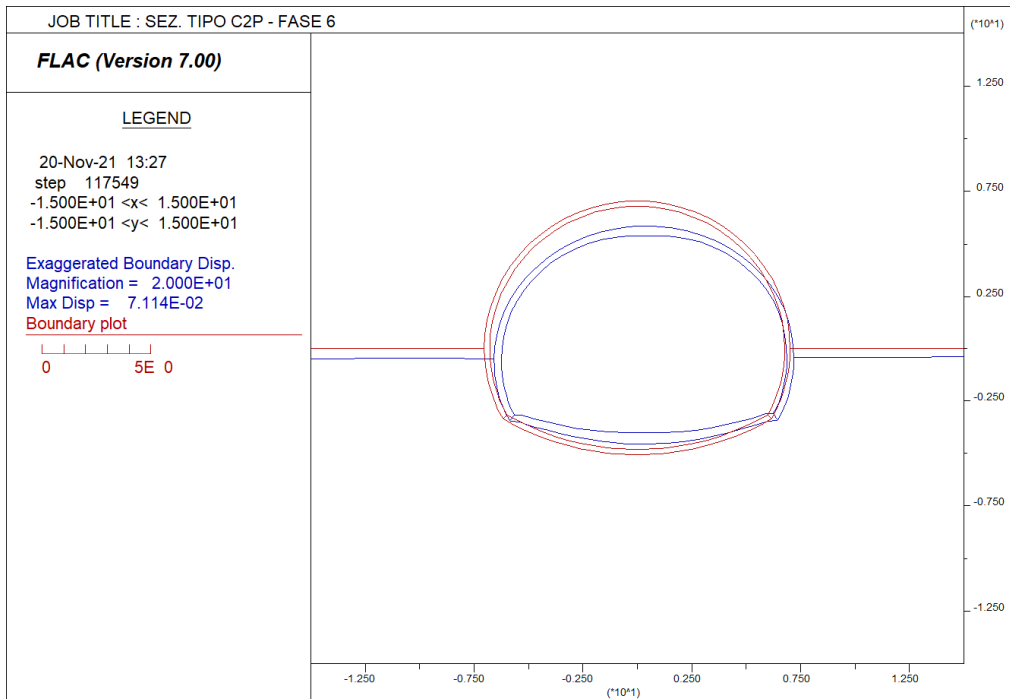


### Fase 5a – Sollecitazioni nei rivestimenti definitivi

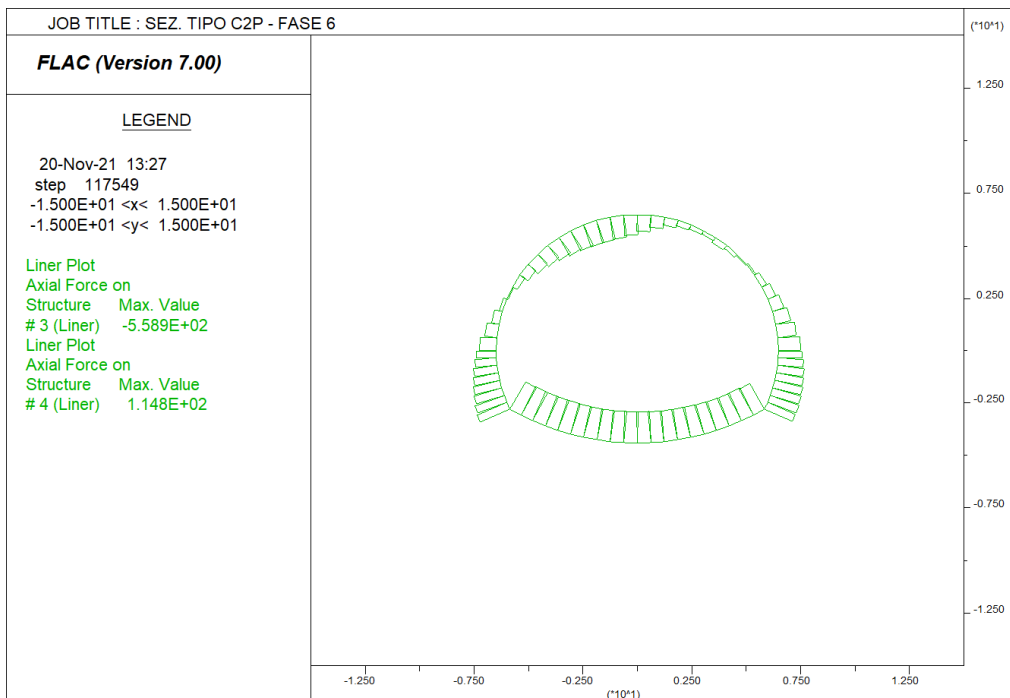


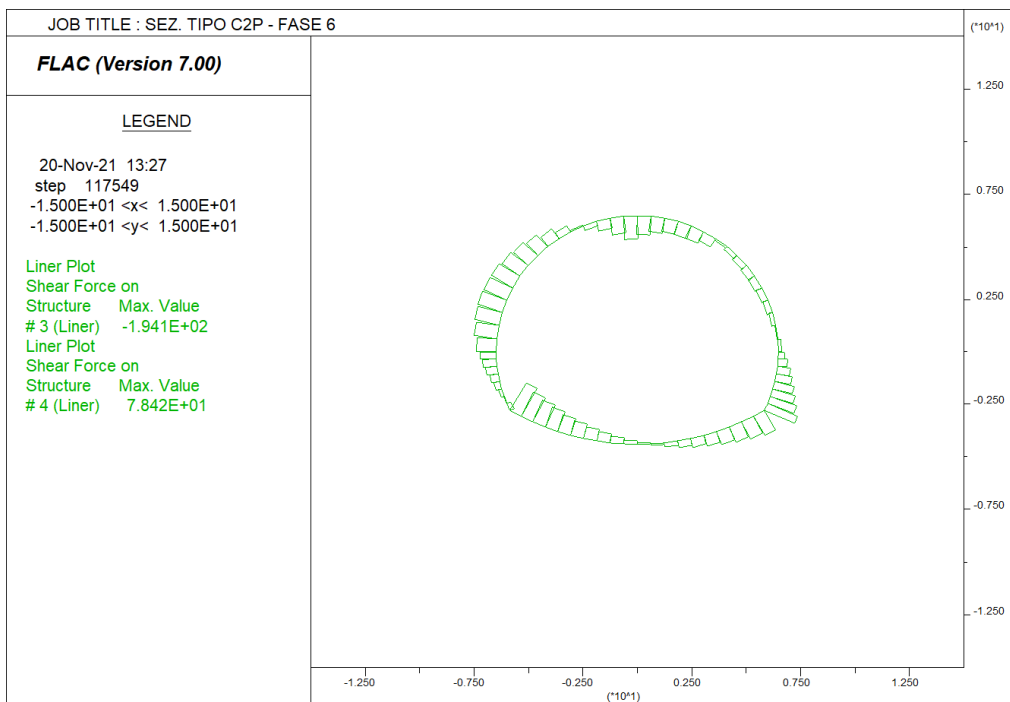
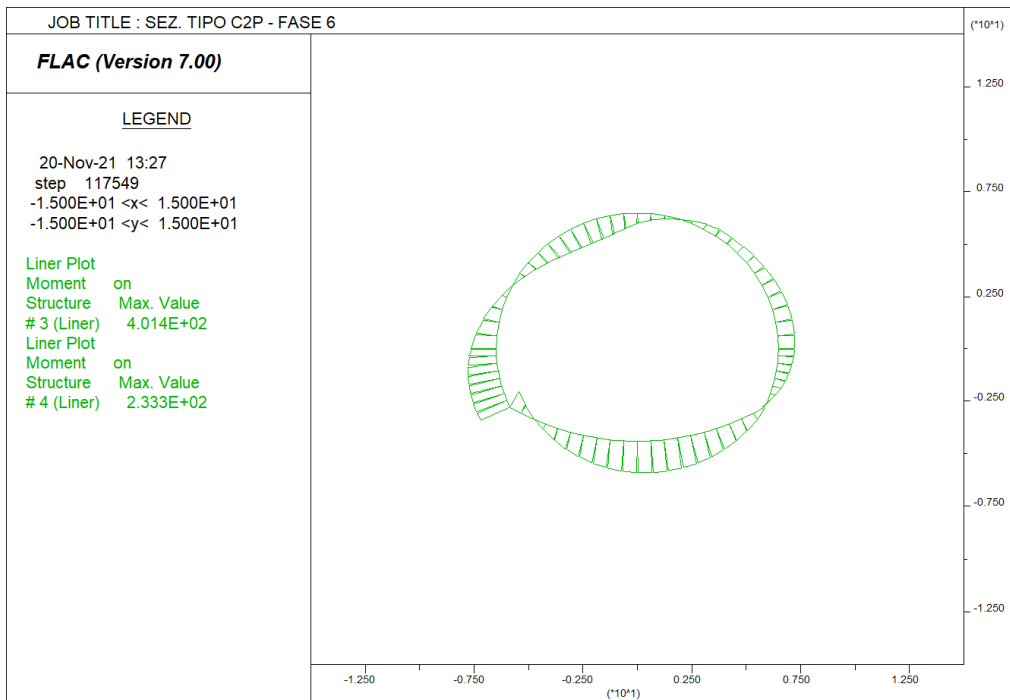


### Fase 6 – Condizioni sismiche - Deformata



### Fase 6 – Condizioni sismiche - Sollecitazioni nei rivestimenti definitivi





## Fase 02

### Azioni interne rivestimento di prima fase - Puntone

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop	Type	F-shear	F-axial	Mom-1	Mom-2
20	1	20	21	5001	liner	1.024E+02	3.967E+02	-6.338E+00	6.243E+01 -6
19	1	19	20	5001	liner	4.238E+01	3.586E+02	2.109E+01	6.344E+00 -5
18	1	18	19	5001	liner	1.672E+00	3.158E+02	2.217E+01	-2.109E+01 -5
17	1	17	18	5001	liner	-1.159E+01	2.856E+02	1.467E+01	-2.217E+01 -4
16	1	16	17	5001	liner	-1.119E+01	2.695E+02	7.426E+00	-1.467E+01 -4
15	1	15	16	5001	liner	-6.418E+00	2.603E+02	3.270E+00	-7.425E+00 -4
14	1	14	15	5001	liner	-2.402E+00	2.525E+02	1.716E+00	-3.270E+00 -4
13	1	13	14	5001	liner	-4.288E-01	2.464E+02	1.439E+00	-1.716E+00 -3
12	1	12	13	5001	liner	1.276E-01	2.422E+02	1.523E+00	-1.440E+00 -3
11	1	11	12	5001	liner	9.289E-02	2.400E+02	1.583E+00	-1.523E+00 -3
10	1	10	11	5001	liner	-8.134E-02	2.399E+02	1.530E+00	-1.583E+00 -3
9	1	9	10	5001	liner	-8.442E-02	2.419E+02	1.476E+00	-1.531E+00 -3
8	1	8	9	5001	liner	4.054E-01	2.458E+02	1.739E+00	-1.477E+00 -3
7	1	7	8	5001	liner	2.261E+00	2.519E+02	3.203E+00	-1.739E+00 -4
6	1	6	7	5001	liner	6.114E+00	2.598E+02	7.163E+00	-3.205E+00 -4
5	1	5	6	5001	liner	1.077E+01	2.692E+02	1.413E+01	-7.163E+00 -4
4	1	4	5	5001	liner	1.120E+01	2.850E+02	2.138E+01	-1.413E+01 -4
3	1	3	4	5001	liner	-1.460E+00	3.142E+02	2.043E+01	-2.138E+01 -5
2	1	2	3	5001	liner	-4.161E+01	3.560E+02	-6.505E+00	-2.043E+01 -5
1	1	1	2	5001	liner	-1.003E+02	3.923E+02	-6.140E+01	6.504E+00 -6

### Azioni interne rivestimento di prima fase - Calotta

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop	Type	F-shear	F-axial	Mom-1	Mom-2
68	2	148	21	5002	liner	-6.207E+01	4.263E+02	3.362E+01	-6.243E+01 -6
67	2	147	148	5002	liner	-7.422E+01	4.194E+02	2.403E+00	-3.362E+01 -6
66	2	146	147	5002	liner	-1.118E+01	4.322E+02	-2.305E+00	-2.395E+00 -6
65	2	145	146	5002	liner	-3.914E-01	4.338E+02	-2.471E+00	2.306E+00 -6
64	2	144	145	5002	liner	2.058E+00	4.349E+02	-1.610E+00	2.475E+00 -6
63	2	143	144	5002	liner	2.721E+00	4.354E+02	-4.646E-01	1.609E+00 -6
62	2	142	143	5002	liner	2.762E+00	4.352E+02	7.012E-01	4.602E-01 -6
61	2	141	142	5002	liner	2.122E+00	4.333E+02	1.593E+00	-7.004E-01 -6
60	2	140	141	5002	liner	6.596E-01	4.273E+02	2.041E+00	-1.594E+00 -6
59	2	139	140	5002	liner	7.283E-02	4.205E+02	2.088E+00	-2.039E+00 -6
58	2	138	139	5002	liner	2.843E-01	4.116E+02	2.279E+00	-2.086E+00 -6
57	2	137	138	5002	liner	4.521E-01	3.999E+02	2.583E+00	-2.277E+00 -6
56	2	136	137	5002	liner	-9.499E-01	3.856E+02	1.939E+00	-2.583E+00 -6
55	2	135	136	5002	liner	-2.664E+00	3.685E+02	1.347E-01	-1.938E+00 -5
54	2	134	135	5002	liner	-2.299E+00	3.491E+02	-1.421E+00	-1.360E-01 -5
53	2	133	134	5002	liner	-8.611E-01	3.268E+02	-2.001E+00	1.418E+00 -5
52	2	132	133	5002	liner	1.482E+00	3.026E+02	-9.982E-01	2.001E+00 -4
51	2	131	132	5002	liner	-8.046E-02	2.677E+02	-1.052E+00	9.975E-01 -4
50	2	130	131	5002	liner	-7.290E-01	2.449E+02	-1.545E+00	1.052E+00 -3
49	2	129	130	5002	liner	1.240E-01	2.290E+02	-1.462E+00	1.546E+00 -3
48	2	128	129	5002	liner	1.813E-01	2.174E+02	-1.338E+00	1.461E+00 -3
47	2	127	128	5002	liner	-5.043E-02	2.087E+02	-1.373E+00	1.339E+00 -3
46	2	126	127	5002	liner	-1.212E-01	2.025E+02	-1.456E+00	1.374E+00 -3
45	2	125	126	5002	liner	-1.983E-02	1.996E+02	-1.469E+00	1.455E+00 -3
44	2	124	125	5002	liner	6.244E-02	2.000E+02	-1.426E+00	1.468E+00 -3
43	2	123	124	5002	liner	1.380E-01	2.037E+02	-1.335E+00	1.428E+00 -3
42	2	122	123	5002	liner	-2.459E-03	2.102E+02	-1.338E+00	1.336E+00 -3
41	2	121	122	5002	liner	-3.626E-01	2.192E+02	-1.581E+00	1.335E+00 -3
40	2	120	121	5002	liner	-4.685E-01	2.307E+02	-1.895E+00	1.578E+00 -3
39	2	119	120	5002	liner	6.057E-01	2.463E+02	-1.483E+00	1.893E+00 -3
38	2	118	119	5002	liner	-6.641E-02	2.702E+02	-1.527E+00	1.482E+00 -4
37	2	117	118	5002	liner	-1.399E+00	3.074E+02	-2.475E+00	1.527E+00 -4
36	2	116	117	5002	liner	1.215E+00	3.340E+02	-1.652E+00	2.475E+00 -5
35	2	115	116	5002	liner	2.938E+00	3.574E+02	3.332E-01	1.656E+00 -5
34	2	114	115	5002	liner	2.943E+00	3.777E+02	2.325E+00	-3.325E-01 -6
33	2	113	114	5002	liner	1.082E+00	3.938E+02	3.056E+00	-2.323E+00 -6
32	2	112	113	5002	liner	-6.633E-01	4.060E+02	2.606E+00	-3.055E+00 -6
31	2	111	112	5002	liner	-6.343E-01	4.151E+02	2.177E+00	-2.607E+00 -6
30	2	110	111	5002	liner	-9.970E-02	4.218E+02	2.111E+00	-2.178E+00 -6



29	2	109	110	5002	liner	-7.245E-01	4.275E+02	1.621E+00	-2.112E+00	-6
28	2	108	109	5002	liner	-2.161E+00	4.325E+02	7.056E-01	-1.614E+00	-6
27	2	107	108	5002	liner	-2.764E+00	4.341E+02	-4.600E-01	-7.026E-01	-6
26	2	106	107	5002	liner	-3.012E+00	4.334E+02	-1.727E+00	4.598E-01	-6
25	2	105	106	5002	liner	-2.252E+00	4.320E+02	-2.675E+00	1.728E+00	-6
24	2	104	105	5002	liner	2.926E-01	4.305E+02	-2.552E+00	2.675E+00	-6
23	2	103	104	5002	liner	1.098E+01	4.287E+02	2.064E+00	2.552E+00	-6
22	2	102	103	5002	liner	7.333E+01	4.147E+02	3.290E+01	-2.062E+00	-6
21	2	1	102	5002	liner	6.140E+01	4.214E+02	6.140E+01	-3.290E+01	-6

### Fase 03

#### Azioni interne rivestimento di prima fase - Puntone

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop	Type	F-shear	F-axial	Mom-1	Mom-2	
20	1	20	21	5001	liner	1.414E+02	7.489E+02	-1.594E+01	9.336E+01	-1
19	1	19	20	5001	liner	6.433E+01	7.025E+02	2.570E+01	1.594E+01	-1
18	1	18	19	5001	liner	1.042E+01	6.409E+02	3.245E+01	-2.570E+01	-1
17	1	17	18	5001	liner	-1.500E+01	5.950E+02	2.274E+01	-3.245E+01	-9
16	1	16	17	5001	liner	-1.704E+01	5.681E+02	1.171E+01	-2.274E+01	-9
15	1	15	16	5001	liner	-1.075E+01	5.527E+02	4.746E+00	-1.171E+01	-8
14	1	14	15	5001	liner	-4.228E+00	5.399E+02	2.009E+00	-4.745E+00	-8
13	1	13	14	5001	liner	-6.164E-01	5.298E+02	1.609E+00	-2.008E+00	-8
12	1	12	13	5001	liner	3.416E-01	5.220E+02	1.830E+00	-1.609E+00	-8
11	1	11	12	5001	liner	1.827E-01	5.182E+02	1.949E+00	-1.830E+00	-8
10	1	10	11	5001	liner	-1.328E-01	5.181E+02	1.863E+00	-1.949E+00	-8
9	1	9	10	5001	liner	-2.532E-01	5.214E+02	1.699E+00	-1.862E+00	-8
8	1	8	9	5001	liner	5.323E-01	5.285E+02	2.043E+00	-1.698E+00	-8
7	1	7	8	5001	liner	3.849E+00	5.390E+02	4.535E+00	-2.043E+00	-8
6	1	6	7	5001	liner	1.029E+01	5.521E+02	1.120E+01	-4.534E+00	-8
5	1	5	6	5001	liner	1.659E+01	5.674E+02	2.194E+01	-1.120E+01	-9
4	1	4	5	5001	liner	1.462E+01	5.932E+02	3.140E+01	-2.193E+01	-9
3	1	3	4	5001	liner	-9.670E+00	6.379E+02	2.514E+01	-3.140E+01	-1
2	1	2	3	5001	liner	-6.371E+01	6.994E+02	-1.610E+01	-2.514E+01	-1
1	1	1	2	5001	liner	-1.383E+02	7.434E+02	-9.185E+01	1.610E+01	-1

#### Azioni interne rivestimento di prima fase - Calotta

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop	Type	F-shear	F-axial	Mom-1	Mom-2	
68	2	148	21	5002	liner	-1.333E+02	6.437E+02	3.150E+01	-9.336E+01	-1
67	2	147	148	5002	liner	-7.749E+01	5.480E+02	-1.090E+00	-3.150E+01	-8
66	2	146	147	5002	liner	-7.269E+00	5.710E+02	-4.147E+00	1.090E+00	-9
65	2	145	146	5002	liner	2.397E+00	5.783E+02	-3.140E+00	4.148E+00	-9
64	2	144	145	5002	liner	3.531E+00	5.854E+02	-1.657E+00	3.142E+00	-9
63	2	143	144	5002	liner	3.530E+00	5.918E+02	-1.726E-01	1.657E+00	-9
62	2	142	143	5002	liner	3.303E+00	5.966E+02	1.216E+00	1.731E-01	-9
61	2	141	142	5002	liner	2.490E+00	5.992E+02	2.263E+00	-1.216E+00	-9
60	2	140	141	5002	liner	8.321E-01	5.977E+02	2.827E+00	-2.263E+00	-9
59	2	139	140	5002	liner	3.214E-01	5.955E+02	3.044E+00	-2.827E+00	-9
58	2	138	139	5002	liner	6.879E-01	5.895E+02	3.509E+00	-3.043E+00	-9
57	2	137	138	5002	liner	3.027E-01	5.794E+02	3.712E+00	-3.507E+00	-9
56	2	136	137	5002	liner	-1.550E+00	5.648E+02	2.661E+00	-3.711E+00	-9
55	2	135	136	5002	liner	-3.200E+00	5.442E+02	4.941E-01	-2.661E+00	-8
54	2	134	135	5002	liner	-2.995E+00	5.186E+02	-1.535E+00	-4.938E-01	-8
53	2	133	134	5002	liner	-1.382E+00	4.885E+02	-2.470E+00	1.534E+00	-7
52	2	132	133	5002	liner	1.579E+00	4.555E+02	-1.399E+00	2.468E+00	-7
51	2	131	132	5002	liner	2.922E-02	4.066E+02	-1.379E+00	1.399E+00	-6
50	2	130	131	5002	liner	-1.177E+00	3.736E+02	-2.176E+00	1.379E+00	-5
49	2	129	130	5002	liner	1.140E-01	3.514E+02	-2.098E+00	2.175E+00	-5
48	2	128	129	5002	liner	3.674E-01	3.354E+02	-1.849E+00	2.098E+00	-5
47	2	127	128	5002	liner	2.731E-02	3.236E+02	-1.831E+00	1.849E+00	-5
46	2	126	127	5002	liner	-1.448E-01	3.154E+02	-1.929E+00	1.831E+00	-5
45	2	125	126	5002	liner	-2.463E-02	3.115E+02	-1.945E+00	1.929E+00	-4
44	2	124	125	5002	liner	8.953E-02	3.119E+02	-1.885E+00	1.946E+00	-4
43	2	123	124	5002	liner	1.731E-01	3.168E+02	-1.768E+00	1.885E+00	-5
42	2	122	123	5002	liner	-1.600E-01	3.256E+02	-1.876E+00	1.768E+00	-5

41	2	121	122	5002	liner	-7.004E-01	3.375E+02	-2.350E+00	1.876E+00	-5
40	2	120	121	5002	liner	-5.239E-01	3.533E+02	-2.705E+00	2.351E+00	-5
39	2	119	120	5002	liner	1.200E+00	3.754E+02	-1.893E+00	2.705E+00	-6
38	2	118	119	5002	liner	-5.519E-01	4.116E+02	-2.267E+00	1.894E+00	-6
37	2	117	118	5002	liner	-1.413E+00	4.619E+02	-3.225E+00	2.268E+00	-7
36	2	116	117	5002	liner	2.093E+00	4.975E+02	-1.808E+00	3.225E+00	-7
35	2	115	116	5002	liner	3.810E+00	5.292E+02	7.719E-01	1.808E+00	-8
34	2	114	115	5002	liner	3.574E+00	5.553E+02	3.190E+00	-7.706E-01	-8
33	2	113	114	5002	liner	1.706E+00	5.746E+02	4.346E+00	-3.191E+00	-9
32	2	112	113	5002	liner	-5.966E-01	5.865E+02	3.942E+00	-4.346E+00	-9
31	2	111	112	5002	liner	-1.088E+00	5.933E+02	3.204E+00	-3.941E+00	-9
30	2	110	111	5002	liner	-4.462E-01	5.967E+02	2.902E+00	-3.204E+00	-9
29	2	109	110	5002	liner	-9.209E-01	5.970E+02	2.279E+00	-2.902E+00	-9
28	2	108	109	5002	liner	-2.581E+00	5.971E+02	1.193E+00	-2.278E+00	-9
27	2	107	108	5002	liner	-3.370E+00	5.940E+02	-2.242E-01	-1.193E+00	-9
26	2	106	107	5002	liner	-3.881E+00	5.882E+02	-1.855E+00	2.226E-01	-9
25	2	105	106	5002	liner	-3.768E+00	5.808E+02	-3.438E+00	1.854E+00	-9
24	2	104	105	5002	liner	-2.385E+00	5.734E+02	-4.441E+00	3.438E+00	-9
23	2	103	104	5002	liner	7.307E+00	5.660E+02	-1.366E+00	4.439E+00	-9
22	2	102	103	5002	liner	7.726E+01	5.418E+02	3.113E+01	1.366E+00	-8
21	2	1	102	5002	liner	1.308E+02	6.375E+02	9.185E+01	-3.113E+01	-1

### Azioni interne rivestimento definitivo – Arco Rovescio

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop	Type	F-shear	F-axial	Mom-1	Mom-2	
88	3	220	221	5003	liner	2.745E+00	-2.372E+02	1.548E+00	5.571E-03	5
87	3	219	220	5003	liner	-1.644E-01	-2.361E+02	1.442E+00	-1.544E+00	5
86	3	218	219	5003	liner	-1.604E+00	-2.308E+02	4.486E-01	-1.441E+00	5
85	3	217	218	5003	liner	-2.509E+00	-2.261E+02	-1.104E+00	-4.485E-01	5
84	3	216	217	5003	liner	-2.938E+00	-2.220E+02	-2.920E+00	1.103E+00	5
83	3	215	216	5003	liner	-2.975E+00	-2.185E+02	-4.760E+00	2.920E+00	5
82	3	214	215	5003	liner	-2.679E+00	-2.157E+02	-6.415E+00	4.756E+00	5
81	3	213	214	5003	liner	-2.105E+00	-2.136E+02	-7.714E+00	6.412E+00	5
80	3	212	213	5003	liner	-1.346E+00	-2.122E+02	-8.552E+00	7.719E+00	5
79	3	211	212	5003	liner	-4.715E-01	-2.114E+02	-8.846E+00	8.554E+00	5
78	3	210	211	5003	liner	4.545E-01	-2.115E+02	-8.564E+00	8.845E+00	5
77	3	209	210	5003	liner	1.340E+00	-2.122E+02	-7.734E+00	8.563E+00	5
76	3	208	209	5003	liner	2.099E+00	-2.136E+02	-6.439E+00	7.738E+00	5
75	3	207	208	5003	liner	2.665E+00	-2.158E+02	-4.793E+00	6.442E+00	5
74	3	206	207	5003	liner	2.956E+00	-2.186E+02	-2.971E+00	4.800E+00	5
73	3	205	206	5003	liner	2.942E+00	-2.221E+02	-1.150E+00	2.971E+00	5
72	3	204	205	5003	liner	2.502E+00	-2.262E+02	3.905E-01	1.158E+00	5
71	3	203	204	5003	liner	1.589E+00	-2.309E+02	1.376E+00	-3.924E-01	5
70	3	202	203	5003	liner	1.388E-01	-2.362E+02	1.460E+00	-1.374E+00	5
69	3	201	202	5003	liner	-2.582E+00	-2.372E+02	-8.873E-04	-1.460E+00	5

### Fase 04

### Azioni interne rivestimento di prima fase - Puntone

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop	Type	F-shear	F-axial	Mom-1	Mom-2	
20	1	20	21	5001	liner	1.773E+02	9.315E+02	-2.565E+01	1.227E+02	-1
19	1	19	20	5001	liner	8.402E+01	8.828E+02	2.874E+01	2.565E+01	-1
18	1	18	19	5001	liner	2.120E+01	8.071E+02	4.247E+01	-2.874E+01	-1
17	1	17	18	5001	liner	-1.445E+01	7.484E+02	3.311E+01	-4.247E+01	-1
16	1	16	17	5001	liner	-2.341E+01	7.109E+02	1.796E+01	-3.311E+01	-1
15	1	15	16	5001	liner	-1.654E+01	6.892E+02	7.247E+00	-1.796E+01	-1
14	1	14	15	5001	liner	-7.394E+00	6.738E+02	2.460E+00	-7.247E+00	-1
13	1	13	14	5001	liner	-1.439E+00	6.617E+02	1.529E+00	-2.460E+00	-1
12	1	12	13	5001	liner	4.168E-01	6.521E+02	1.798E+00	-1.529E+00	-1
11	1	11	12	5001	liner	2.843E-01	6.474E+02	1.982E+00	-1.798E+00	-1
10	1	10	11	5001	liner	-1.890E-01	6.472E+02	1.860E+00	-1.982E+00	-1
9	1	9	10	5001	liner	-2.899E-01	6.513E+02	1.673E+00	-1.860E+00	-1
8	1	8	9	5001	liner	1.314E+00	6.600E+02	2.523E+00	-1.673E+00	-1
7	1	7	8	5001	liner	6.803E+00	6.724E+02	6.927E+00	-2.523E+00	-1

6	1	6	7	5001	liner	1.577E+01	6.881E+02	1.714E+01	-6.927E+00	-1
5	1	5	6	5001	liner	2.265E+01	7.092E+02	3.180E+01	-1.714E+01	-1
4	1	4	5	5001	liner	1.457E+01	7.455E+02	4.123E+01	-3.180E+01	-1
3	1	3	4	5001	liner	-1.942E+01	8.026E+02	2.866E+01	-4.123E+01	-1
2	1	2	3	5001	liner	-8.375E+01	8.790E+02	-2.556E+01	-2.866E+01	-1
1	1	1	2	5001	liner	-1.744E+02	9.261E+02	-1.211E+02	2.556E+01	-1

### Azioni interne rivestimento di prima fase - Calotta

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop	Type	F-shear	F-axial	Mom-1	Mom-2	
68	2	148	21	5002	liner	-1.821E+02	7.961E+02	3.821E+01	-1.227E+02	-1
67	2	147	148	5002	liner	-9.889E+01	6.471E+02	-3.377E+00	-3.821E+01	-1
66	2	146	147	5002	liner	-8.510E+00	6.822E+02	-6.956E+00	3.378E+00	-1
65	2	145	146	5002	liner	4.338E+00	6.956E+02	-5.132E+00	6.957E+00	-1
64	2	144	145	5002	liner	5.878E+00	7.095E+02	-2.661E+00	5.133E+00	-1
63	2	143	144	5002	liner	5.341E+00	7.238E+02	-4.143E-01	2.661E+00	-1
62	2	142	143	5002	liner	4.424E+00	7.367E+02	1.445E+00	4.155E-01	-1
61	2	141	142	5002	liner	3.324E+00	7.473E+02	2.841E+00	-1.443E+00	-1
60	2	140	141	5002	liner	1.300E+00	7.549E+02	3.722E+00	-2.842E+00	-1
59	2	139	140	5002	liner	9.066E-01	7.636E+02	4.336E+00	-3.722E+00	-1
58	2	138	139	5002	liner	1.569E+00	7.667E+02	5.398E+00	-4.335E+00	-1
57	2	137	138	5002	liner	1.457E+00	7.635E+02	6.385E+00	-5.398E+00	-1
56	2	136	137	5002	liner	-1.808E+00	7.531E+02	5.161E+00	-6.385E+00	-1
55	2	135	136	5002	liner	-8.360E+00	7.347E+02	-4.990E-01	-5.162E+00	-1
54	2	134	135	5002	liner	-3.022E+00	7.014E+02	-2.545E+00	4.989E-01	-1
53	2	133	134	5002	liner	-1.646E+00	6.643E+02	-3.659E+00	2.544E+00	-1
52	2	132	133	5002	liner	1.717E+00	6.226E+02	-2.496E+00	3.658E+00	-9
51	2	131	132	5002	liner	7.128E-01	5.599E+02	-2.013E+00	2.496E+00	-8
50	2	130	131	5002	liner	-1.398E+00	5.068E+02	-2.960E+00	2.013E+00	-8
49	2	129	130	5002	liner	9.514E-02	4.743E+02	-2.896E+00	2.960E+00	-7
48	2	128	129	5002	liner	5.680E-01	4.516E+02	-2.512E+00	2.896E+00	-7
47	2	127	128	5002	liner	2.321E-01	4.340E+02	-2.354E+00	2.511E+00	-6
46	2	126	127	5002	liner	-4.358E-02	4.202E+02	-2.384E+00	2.354E+00	-6
45	2	125	126	5002	liner	1.382E-02	4.108E+02	-2.375E+00	2.384E+00	-6
44	2	124	125	5002	liner	5.683E-02	4.114E+02	-2.336E+00	2.374E+00	-6
43	2	123	124	5002	liner	4.689E-02	4.224E+02	-2.304E+00	2.336E+00	-6
42	2	122	123	5002	liner	-4.269E-01	4.373E+02	-2.593E+00	2.304E+00	-6
41	2	121	122	5002	liner	-1.024E+00	4.552E+02	-3.286E+00	2.593E+00	-7
40	2	120	121	5002	liner	-5.473E-01	4.779E+02	-3.657E+00	3.286E+00	-7
39	2	119	120	5002	liner	1.250E+00	5.116E+02	-2.810E+00	3.656E+00	-8
38	2	118	119	5002	liner	-1.288E+00	5.683E+02	-3.682E+00	2.810E+00	-9
37	2	117	118	5002	liner	-1.358E+00	6.312E+02	-4.602E+00	3.682E+00	-1
36	2	116	117	5002	liner	2.548E+00	6.759E+02	-2.877E+00	4.602E+00	-1
35	2	115	116	5002	liner	4.026E+00	7.152E+02	-1.516E-01	2.878E+00	-1
34	2	114	115	5002	liner	8.926E+00	7.497E+02	5.893E+00	1.515E-01	-1
33	2	113	114	5002	liner	1.964E+00	7.664E+02	7.223E+00	-5.893E+00	-1
32	2	112	113	5002	liner	-1.835E+00	7.732E+02	5.980E+00	-7.223E+00	-1
31	2	111	112	5002	liner	-2.083E+00	7.723E+02	4.570E+00	-5.981E+00	-1
30	2	110	111	5002	liner	-1.137E+00	7.660E+02	3.801E+00	-4.571E+00	-1
29	2	109	110	5002	liner	-1.370E+00	7.552E+02	2.873E+00	-3.801E+00	-1
28	2	108	109	5002	liner	-3.414E+00	7.459E+02	1.437E+00	-2.873E+00	-1
27	2	107	108	5002	liner	-4.498E+00	7.346E+02	-4.545E-01	-1.437E+00	-1
26	2	106	107	5002	liner	-5.577E+00	7.206E+02	-2.800E+00	4.544E-01	-1
25	2	105	106	5002	liner	-6.059E+00	7.053E+02	-5.348E+00	2.800E+00	-1
24	2	104	105	5002	liner	-4.583E+00	6.907E+02	-7.275E+00	5.348E+00	-1
23	2	103	104	5002	liner	8.508E+00	6.771E+02	-3.697E+00	7.275E+00	-1
22	2	102	103	5002	liner	9.891E+01	6.408E+02	3.790E+01	3.697E+00	-1
21	2	1	102	5002	liner	1.792E+02	7.898E+02	1.211E+02	-3.790E+01	-1

### Azioni interne rivestimento definitivo – Arco Rovescio

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop	Type	F-shear	F-axial	Mom-1	Mom-2	
88	3	220	221	5003	liner	3.148E+01	-2.852E+02	2.694E+01	-9.131E+00	6
87	3	219	220	5003	liner	2.447E+01	-2.855E+02	4.209E+01	-2.695E+01	6
86	3	218	219	5003	liner	2.032E+01	-2.815E+02	5.467E+01	-4.209E+01	5
85	3	217	218	5003	liner	1.662E+01	-2.779E+02	6.495E+01	-5.466E+01	5
84	3	216	217	5003	liner	1.336E+01	-2.747E+02	7.322E+01	-6.495E+01	5
83	3	215	216	5003	liner	1.045E+01	-2.721E+02	7.969E+01	-7.323E+01	5
82	3	214	215	5003	liner	7.821E+00	-2.699E+02	8.453E+01	-7.969E+01	5
81	3	213	214	5003	liner	5.427E+00	-2.682E+02	8.789E+01	-8.453E+01	5
80	3	212	213	5003	liner	3.197E+00	-2.671E+02	8.985E+01	-8.788E+01	5
79	3	211	212	5003	liner	1.054E+00	-2.665E+02	9.049E+01	-8.984E+01	5
78	3	210	211	5003	liner	-1.031E+00	-2.665E+02	8.986E+01	-9.050E+01	5
77	3	209	210	5003	liner	-3.151E+00	-2.671E+02	8.790E+01	-8.985E+01	5
76	3	208	209	5003	liner	-5.375E+00	-2.682E+02	8.458E+01	-8.791E+01	5
75	3	207	208	5003	liner	-7.769E+00	-2.698E+02	7.977E+01	-8.458E+01	5
74	3	206	207	5003	liner	-1.039E+01	-2.720E+02	7.334E+01	-7.977E+01	5
73	3	205	206	5003	liner	-1.331E+01	-2.747E+02	6.509E+01	-7.333E+01	5
72	3	204	205	5003	liner	-1.661E+01	-2.778E+02	5.481E+01	-6.509E+01	5
71	3	203	204	5003	liner	-2.032E+01	-2.814E+02	4.223E+01	-5.480E+01	5
70	3	202	203	5003	liner	-2.448E+01	-2.854E+02	2.708E+01	-4.223E+01	6
69	3	201	202	5003	liner	-3.134E+01	-2.850E+02	9.346E+00	-2.707E+01	6

### Azioni interne rivestimento definitivo – Calotta

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop	Type	F-shear	F-axial	Mom-1	Mom-2	
136	4	348	221	5004	liner	2.829E+01	6.632E+01	8.263E-01	9.125E+00	-2
135	4	347	348	5004	liner	2.106E+01	6.286E+01	8.490E+00	-8.256E-01	-2
134	4	346	347	5004	liner	1.484E+01	5.892E+01	1.388E+01	-8.487E+00	-1
133	4	345	346	5004	liner	8.999E+00	5.430E+01	1.715E+01	-1.388E+01	-1
132	4	344	345	5004	liner	3.647E+00	5.001E+01	1.847E+01	-1.715E+01	-1
131	4	343	344	5004	liner	-5.606E-02	4.486E+01	1.845E+01	-1.847E+01	-1
130	4	342	343	5004	liner	-3.111E+00	3.943E+01	1.732E+01	-1.845E+01	-1
129	4	341	342	5004	liner	-5.512E+00	3.380E+01	1.532E+01	-1.732E+01	-1
128	4	340	341	5004	liner	-7.786E+00	2.585E+01	1.037E+01	-1.533E+01	-8
127	4	339	340	5004	liner	-9.025E+00	1.561E+01	4.635E+00	-1.037E+01	-5
126	4	338	339	5004	liner	-8.254E+00	5.433E+00	-6.143E-01	-4.635E+00	-1
125	4	337	338	5004	liner	-5.615E+00	-4.326E+00	-4.185E+00	6.142E-01	1
124	4	336	337	5004	liner	-1.263E+00	-1.337E+01	-4.988E+00	4.185E+00	4
123	4	335	336	5004	liner	4.746E+00	-2.150E+01	-1.971E+00	4.989E+00	7
122	4	334	335	5004	liner	-1.134E+00	-2.158E+01	-2.693E+00	1.971E+00	7
121	4	333	334	5004	liner	-6.132E-01	-2.453E+01	-3.082E+00	2.692E+00	8
120	4	332	333	5004	liner	5.000E-01	-2.657E+01	-2.764E+00	3.082E+00	8
119	4	331	332	5004	liner	1.484E+00	-2.729E+01	-1.819E+00	2.763E+00	9
118	4	330	331	5004	liner	-2.564E-01	-2.539E+01	-1.982E+00	1.819E+00	8
117	4	329	330	5004	liner	-9.649E-02	-2.374E+01	-2.044E+00	1.983E+00	7
116	4	328	329	5004	liner	5.148E-01	-2.158E+01	-1.717E+00	2.044E+00	7
115	4	327	328	5004	liner	5.836E-01	-1.834E+01	-1.346E+00	1.717E+00	6
114	4	326	327	5004	liner	3.087E-01	-1.425E+01	-1.150E+00	1.346E+00	4
113	4	325	326	5004	liner	9.138E-02	-9.427E+00	-1.092E+00	1.150E+00	3
112	4	324	325	5004	liner	-8.281E-02	-9.227E+00	-1.145E+00	1.092E+00	3
111	4	323	324	5004	liner	-3.909E-01	-1.422E+01	-1.395E+00	1.146E+00	4
110	4	322	323	5004	liner	-7.984E-01	-1.861E+01	-1.904E+00	1.396E+00	6
109	4	321	322	5004	liner	-8.536E-01	-2.199E+01	-2.445E+00	1.902E+00	7
108	4	320	321	5004	liner	-1.511E-01	-2.409E+01	-2.541E+00	2.445E+00	8
107	4	319	320	5004	liner	-1.914E-01	-2.570E+01	-2.663E+00	2.541E+00	8
106	4	318	319	5004	liner	-1.593E+00	-2.717E+01	-3.677E+00	2.663E+00	9
105	4	317	318	5004	liner	1.261E-02	-2.598E+01	-3.668E+00	3.676E+00	8
104	4	316	317	5004	liner	1.250E+00	-2.373E+01	-2.874E+00	3.668E+00	7
103	4	315	316	5004	liner	1.818E+00	-2.060E+01	-1.717E+00	2.873E+00	6
102	4	314	315	5004	liner	-4.628E+00	-2.079E+01	-4.660E+00	1.717E+00	6
101	4	313	314	5004	liner	1.337E+00	-1.264E+01	-3.811E+00	4.661E+00	4
100	4	312	313	5004	liner	5.693E+00	-3.560E+00	-1.919E-01	3.812E+00	1
99	4	311	312	5004	liner	8.317E+00	6.218E+00	5.097E+00	1.916E-01	-2

98	4	310	311	5004	liner	9.052E+00	1.640E+01	1.085E+01	-5.098E+00	-5
97	4	309	310	5004	liner	7.531E+00	2.651E+01	1.564E+01	-1.085E+01	-8
96	4	308	309	5004	liner	5.214E+00	3.445E+01	1.753E+01	-1.564E+01	-1
95	4	307	308	5004	liner	2.780E+00	4.005E+01	1.854E+01	-1.753E+01	-1
94	4	306	307	5004	liner	-3.231E-01	4.543E+01	1.842E+01	-1.854E+01	-1
93	4	305	306	5004	liner	-4.178E+00	5.050E+01	1.691E+01	-1.843E+01	-1
92	4	304	305	5004	liner	-8.843E+00	5.514E+01	1.370E+01	-1.691E+01	-1
91	4	303	304	5004	liner	-1.471E+01	5.947E+01	8.356E+00	-1.370E+01	-1
90	4	302	303	5004	liner	-2.115E+01	6.322E+01	6.614E-01	-8.356E+00	-2
89	4	201	302	5004	liner	-2.840E+01	6.671E+01	-9.344E+00	-6.610E-01	-2

## Fase 05

### Azioni interne rivestimento definitivo – Arco Rovescio

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop	Type	F-shear	F-axial	Mom-1	Mom-2	
88	3	220	221	5003	liner	4.860E+01	-3.141E+02	2.111E+01	6.387E+00	6
87	3	219	220	5003	liner	3.958E+01	-3.156E+02	4.560E+01	-2.111E+01	6
86	3	218	219	5003	liner	3.376E+01	-3.123E+02	6.647E+01	-4.558E+01	6
85	3	217	218	5003	liner	2.836E+01	-3.094E+02	8.402E+01	-6.647E+01	6
84	3	216	217	5003	liner	2.335E+01	-3.069E+02	9.846E+01	-8.401E+01	5
83	3	215	216	5003	liner	1.865E+01	-3.047E+02	1.100E+02	-9.845E+01	5
82	3	214	215	5003	liner	1.424E+01	-3.029E+02	1.188E+02	-1.100E+02	5
81	3	213	214	5003	liner	1.005E+01	-3.016E+02	1.250E+02	-1.188E+02	5
80	3	212	213	5003	liner	6.015E+00	-3.006E+02	1.287E+02	-1.250E+02	5
79	3	211	212	5003	liner	2.057E+00	-3.002E+02	1.300E+02	-1.287E+02	5
78	3	210	211	5003	liner	-1.931E+00	-3.002E+02	1.288E+02	-1.300E+02	5
77	3	209	210	5003	liner	-5.898E+00	-3.006E+02	1.252E+02	-1.288E+02	5
76	3	208	209	5003	liner	-9.943E+00	-3.015E+02	1.190E+02	-1.252E+02	5
75	3	207	208	5003	liner	-1.416E+01	-3.028E+02	1.103E+02	-1.190E+02	5
74	3	206	207	5003	liner	-1.858E+01	-3.046E+02	9.876E+01	-1.103E+02	5
73	3	205	206	5003	liner	-2.327E+01	-3.068E+02	8.436E+01	-9.876E+01	5
72	3	204	205	5003	liner	-2.828E+01	-3.094E+02	6.687E+01	-8.437E+01	6
71	3	203	204	5003	liner	-3.367E+01	-3.123E+02	4.603E+01	-6.687E+01	6
70	3	202	203	5003	liner	-3.950E+01	-3.155E+02	2.159E+01	-4.604E+01	6
69	3	201	202	5003	liner	-4.827E+01	-3.138E+02	-5.708E+00	-2.160E+01	6

### Azioni interne rivestimento definitivo – Calotta

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop	Type	F-shear	F-axial	Mom-1	Mom-2	
136	4	348	221	5004	liner	2.985E+01	8.430E+01	1.688E+01	-6.384E+00	-2
135	4	347	348	5004	liner	2.287E+01	8.096E+01	2.520E+01	-1.688E+01	-2
134	4	346	347	5004	liner	1.663E+01	7.693E+01	3.125E+01	-2.520E+01	-2
133	4	345	346	5004	liner	1.090E+01	7.249E+01	3.520E+01	-3.124E+01	-1
132	4	344	345	5004	liner	5.799E+00	6.762E+01	3.731E+01	-3.521E+01	-1
131	4	343	344	5004	liner	1.276E+00	6.246E+01	3.778E+01	-3.731E+01	-1
130	4	342	343	5004	liner	-2.697E+00	5.705E+01	3.680E+01	-3.778E+01	-1
129	4	341	342	5004	liner	-6.043E+00	5.143E+01	3.461E+01	-3.680E+01	-1
128	4	340	341	5004	liner	-9.713E+00	4.340E+01	2.844E+01	-3.461E+01	-9
127	4	339	340	5004	liner	-1.273E+01	3.291E+01	2.035E+01	-2.844E+01	-6
126	4	338	339	5004	liner	-1.371E+01	2.236E+01	1.163E+01	-2.035E+01	-2
125	4	337	338	5004	liner	-1.277E+01	1.205E+01	3.507E+00	-1.163E+01	5
124	4	336	337	5004	liner	-1.021E+01	2.094E+00	-2.985E+00	-3.505E+00	3
123	4	335	336	5004	liner	-5.972E+00	-7.077E+00	-6.782E+00	2.984E+00	6
122	4	334	335	5004	liner	-7.969E-01	-1.487E+01	-7.285E+00	6.778E+00	6
121	4	333	334	5004	liner	-1.896E+00	-1.735E+01	-8.489E+00	7.283E+00	7
120	4	332	333	5004	liner	-1.070E+00	-1.979E+01	-9.169E+00	8.489E+00	8
119	4	331	332	5004	liner	1.308E+00	-2.179E+01	-8.341E+00	9.173E+00	8
118	4	330	331	5004	liner	-4.400E-01	-2.034E+01	-8.612E+00	8.332E+00	8
117	4	329	330	5004	liner	5.950E-02	-2.010E+01	-8.571E+00	8.609E+00	7
116	4	328	329	5004	liner	1.283E+00	-1.941E+01	-7.751E+00	8.567E+00	7
115	4	327	328	5004	liner	1.387E+00	-1.686E+01	-6.865E+00	7.747E+00	6
114	4	326	327	5004	liner	8.162E-01	-1.295E+01	-6.348E+00	6.867E+00	4
113	4	325	326	5004	liner	1.269E-01	-8.133E+00	-6.265E+00	6.346E+00	3
112	4	324	325	5004	liner	-4.662E-01	-9.100E+00	-6.554E+00	6.258E+00	3
111	4	323	324	5004	liner	-1.335E+00	-1.418E+01	-7.402E+00	6.553E+00	4

110	4	322	323	5004	liner	-2.129E+00	-1.809E+01	-8.751E+00	7.397E+00	6
109	4	321	322	5004	liner	-1.916E+00	-2.062E+01	-9.969E+00	8.750E+00	7
108	4	320	321	5004	liner	-4.135E-01	-2.102E+01	-1.024E+01	9.974E+00	7
107	4	319	320	5004	liner	-1.912E-01	-2.226E+01	-1.037E+01	1.024E+01	8
106	4	318	319	5004	liner	-7.512E-01	-2.307E+01	-1.085E+01	1.037E+01	8
105	4	317	318	5004	liner	2.407E+00	-2.062E+01	-9.315E+00	1.085E+01	8
104	4	316	317	5004	liner	3.155E+00	-1.796E+01	-7.312E+00	9.318E+00	7
103	4	315	316	5004	liner	2.358E+00	-1.494E+01	-5.816E+00	7.315E+00	6
102	4	314	315	5004	liner	5.859E+00	-7.872E+00	-2.098E+00	5.823E+00	6
101	4	313	314	5004	liner	1.022E+01	1.364E+00	4.402E+00	2.098E+00	3
100	4	312	313	5004	liner	1.277E+01	1.130E+01	1.253E+01	-4.404E+00	3
99	4	311	312	5004	liner	1.365E+01	2.175E+01	2.121E+01	-1.253E+01	-2
98	4	310	311	5004	liner	1.254E+01	3.239E+01	2.919E+01	-2.122E+01	-6
97	4	309	310	5004	liner	9.346E+00	4.298E+01	3.514E+01	-2.919E+01	-9
96	4	308	309	5004	liner	5.715E+00	5.098E+01	3.720E+01	-3.513E+01	-1
95	4	307	308	5004	liner	2.326E+00	5.647E+01	3.805E+01	-3.720E+01	-1
94	4	306	307	5004	liner	-1.541E+00	6.188E+01	3.748E+01	-3.804E+01	-1
93	4	305	306	5004	liner	-6.130E+00	6.695E+01	3.525E+01	-3.747E+01	-1
92	4	304	305	5004	liner	-1.130E+01	7.169E+01	3.114E+01	-3.525E+01	-1
91	4	303	304	5004	liner	-1.707E+01	7.607E+01	2.494E+01	-3.114E+01	-2
90	4	302	303	5004	liner	-2.335E+01	8.001E+01	1.645E+01	-2.494E+01	-2
89	4	201	302	5004	liner	-3.052E+01	8.349E+01	5.701E+00	-1.645E+01	-2

## Fase 05a

### Azioni interne rivestimento definitivo – Arco Rovescio

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop	Type	F-shear	F-axial	Mom-1	Mom-2	
88	3	220	221	5003	liner	1.503E+02	3.731E+02	-1.523E+02	2.374E+02	3
87	3	219	220	5003	liner	1.413E+02	3.807E+02	-6.488E+01	1.523E+02	3
86	3	218	219	5003	liner	1.384E+02	3.825E+02	2.078E+01	6.488E+01	3
85	3	217	218	5003	liner	1.325E+02	3.808E+02	1.028E+02	-2.078E+01	3
84	3	216	217	5003	liner	1.229E+02	3.762E+02	1.789E+02	-1.028E+02	3
83	3	215	216	5003	liner	1.092E+02	3.694E+02	2.464E+02	-1.789E+02	3
82	3	214	215	5003	liner	9.100E+01	3.614E+02	3.028E+02	-2.464E+02	2
81	3	213	214	5003	liner	6.865E+01	3.535E+02	3.452E+02	-3.028E+02	2
80	3	212	213	5003	liner	4.277E+01	3.469E+02	3.717E+02	-3.452E+02	2
79	3	211	212	5003	liner	1.453E+01	3.430E+02	3.807E+02	-3.717E+02	2
78	3	210	211	5003	liner	-1.452E+01	3.430E+02	3.717E+02	-3.807E+02	2
77	3	209	210	5003	liner	-4.277E+01	3.469E+02	3.452E+02	-3.717E+02	2
76	3	208	209	5003	liner	-6.864E+01	3.535E+02	3.028E+02	-3.452E+02	2
75	3	207	208	5003	liner	-9.099E+01	3.614E+02	2.465E+02	-3.028E+02	2
74	3	206	207	5003	liner	-1.092E+02	3.694E+02	1.789E+02	-2.465E+02	3
73	3	205	206	5003	liner	-1.229E+02	3.762E+02	1.028E+02	-1.789E+02	3
72	3	204	205	5003	liner	-1.325E+02	3.808E+02	2.082E+01	-1.028E+02	3
71	3	203	204	5003	liner	-1.384E+02	3.825E+02	-6.484E+01	-2.082E+01	3
70	3	202	203	5003	liner	-1.413E+02	3.807E+02	-1.523E+02	6.484E+01	3
69	3	201	202	5003	liner	-1.500E+02	3.733E+02	-2.371E+02	1.523E+02	3

### Azioni interne rivestimento definitivo – Calotta

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop	Type	F-shear	F-axial	Mom-1	Mom-2	
136	4	348	221	5004	liner	-9.651E+01	3.660E+02	2.034E+02	-2.374E+02	-3
135	4	347	348	5004	liner	-9.703E+01	3.463E+02	1.681E+02	-2.034E+02	-3
134	4	346	347	5004	liner	-9.146E+01	3.296E+02	1.349E+02	-1.681E+02	-3
133	4	345	346	5004	liner	-8.451E+01	3.133E+02	1.042E+02	-1.349E+02	-3
132	4	344	345	5004	liner	-7.641E+01	2.978E+02	7.646E+01	-1.042E+02	-3
131	4	343	344	5004	liner	-6.666E+01	2.839E+02	5.228E+01	-7.646E+01	-2
130	4	342	343	5004	liner	-5.609E+01	2.717E+02	3.194E+01	-5.228E+01	-2
129	4	341	342	5004	liner	-4.532E+01	2.614E+02	1.551E+01	-3.194E+01	-2
128	4	340	341	5004	liner	-2.039E+01	2.506E+02	2.543E+00	-1.551E+01	-2
127	4	339	340	5004	liner	-8.765E+00	2.418E+02	-3.031E+00	-2.543E+00	-1
126	4	338	339	5004	liner	-7.840E+00	2.426E+02	-8.017E+00	3.031E+00	-1
125	4	337	338	5004	liner	-6.319E+00	2.336E+02	-1.204E+01	8.017E+00	-1
124	4	336	337	5004	liner	-3.044E+00	2.268E+02	-1.397E+01	1.204E+01	-8
123	4	335	336	5004	liner	6.285E-01	2.226E+02	-1.357E+01	1.397E+01	-6
122	4	334	335	5004	liner	4.163E+00	2.183E+02	-1.092E+01	1.357E+01	-6

121	4	333	334	5004	liner	2.681E+00	2.103E+02	-9.219E+00	1.092E+01	-4
120	4	332	333	5004	liner	1.268E+00	2.011E+02	-8.413E+00	9.219E+00	-3
119	4	331	332	5004	liner	1.979E+00	1.918E+02	-7.155E+00	8.413E+00	-3
118	4	330	331	5004	liner	-1.567E+00	1.830E+02	-8.152E+00	7.155E+00	-3
117	4	329	330	5004	liner	-2.728E+00	1.748E+02	-9.886E+00	8.152E+00	-3
116	4	328	329	5004	liner	-1.648E+00	1.676E+02	-1.093E+01	9.886E+00	-3
115	4	327	328	5004	liner	-1.189E+00	1.638E+02	-1.169E+01	1.093E+01	-4
114	4	326	327	5004	liner	-1.022E+00	1.642E+02	-1.234E+01	1.169E+01	-5
113	4	325	326	5004	liner	-6.395E-01	1.670E+02	-1.275E+01	1.234E+01	-6
112	4	324	325	5004	liner	-9.213E-02	1.660E+02	-1.281E+01	1.275E+01	-6
111	4	323	324	5004	liner	9.857E-02	1.626E+02	-1.274E+01	1.281E+01	-5
110	4	322	323	5004	liner	5.170E-02	1.624E+02	-1.271E+01	1.274E+01	-3
109	4	321	322	5004	liner	7.956E-01	1.657E+02	-1.220E+01	1.271E+01	-3
108	4	320	321	5004	liner	2.498E+00	1.738E+02	-1.062E+01	1.220E+01	-2
107	4	319	320	5004	liner	1.224E+00	1.808E+02	-9.838E+00	1.062E+01	-2
106	4	318	319	5004	liner	-1.211E+00	1.899E+02	-1.061E+01	9.838E+00	-3
105	4	317	318	5004	liner	1.544E-01	2.009E+02	-1.051E+01	1.061E+01	-3
104	4	316	317	5004	liner	-1.163E+00	2.105E+02	-1.125E+01	1.051E+01	-5
103	4	315	316	5004	liner	-2.502E+00	2.189E+02	-1.284E+01	1.125E+01	-6
102	4	314	315	5004	liner	2.040E-01	2.221E+02	-1.271E+01	1.284E+01	-6
101	4	313	314	5004	liner	3.200E+00	2.274E+02	-1.068E+01	1.271E+01	-9
100	4	312	313	5004	liner	6.280E+00	2.322E+02	-6.682E+00	1.068E+01	-1
99	4	311	312	5004	liner	7.363E+00	2.416E+02	-2.000E+00	6.682E+00	-1
98	4	310	311	5004	liner	8.355E+00	2.415E+02	3.313E+00	2.000E+00	-1
97	4	309	310	5004	liner	1.973E+01	2.494E+02	1.586E+01	-3.313E+00	-2
96	4	308	309	5004	liner	4.565E+01	2.598E+02	3.241E+01	-1.586E+01	-2
95	4	307	308	5004	liner	5.621E+01	2.704E+02	5.278E+01	-3.241E+01	-2
94	4	306	307	5004	liner	6.634E+01	2.829E+02	7.684E+01	-5.278E+01	-2
93	4	305	306	5004	liner	7.587E+01	2.968E+02	1.044E+02	-7.684E+01	-3
92	4	304	305	5004	liner	8.410E+01	3.123E+02	1.349E+02	-1.044E+02	-3
91	4	303	304	5004	liner	9.089E+01	3.287E+02	1.679E+02	-1.349E+02	-3
90	4	302	303	5004	liner	9.657E+01	3.453E+02	2.031E+02	-1.679E+02	-3
89	4	201	302	5004	liner	9.674E+01	3.648E+02	2.371E+02	-2.031E+02	-3

## Fase 06

### Azioni interne rivestimento definitivo – Arco Rovescio

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop	Type	F-shear	F-axial	Mom-1	Mom-2	
88	3	220	221	5003	liner	1.380E+02	-5.211E+02	9.217E+01	-1.409E+01	7
87	3	219	220	5003	liner	1.161E+02	-5.314E+02	1.640E+02	-9.218E+01	7
86	3	218	219	5003	liner	1.008E+02	-5.340E+02	2.264E+02	-1.640E+02	7
85	3	217	218	5003	liner	8.554E+01	-5.365E+02	2.794E+02	-2.264E+02	6
84	3	216	217	5003	liner	7.027E+01	-5.389E+02	3.228E+02	-2.794E+02	6
83	3	215	216	5003	liner	5.496E+01	-5.412E+02	3.569E+02	-3.229E+02	6
82	3	214	215	5003	liner	3.955E+01	-5.435E+02	3.814E+02	-3.569E+02	6
81	3	213	214	5003	liner	2.401E+01	-5.456E+02	3.962E+02	-3.814E+02	6
80	3	212	213	5003	liner	8.285E+00	-5.477E+02	4.013E+02	-3.962E+02	6
79	3	211	212	5003	liner	-7.670E+00	-5.497E+02	3.966E+02	-4.014E+02	6
78	3	210	211	5003	liner	-2.382E+01	-5.516E+02	3.819E+02	-3.966E+02	6
77	3	209	210	5003	liner	-4.025E+01	-5.533E+02	3.570E+02	-3.819E+02	6
76	3	208	209	5003	liner	-5.699E+01	-5.548E+02	3.217E+02	-3.570E+02	6
75	3	207	208	5003	liner	-7.407E+01	-5.562E+02	2.759E+02	-3.217E+02	6
74	3	206	207	5003	liner	-9.148E+01	-5.573E+02	2.193E+02	-2.759E+02	6
73	3	205	206	5003	liner	-1.093E+02	-5.581E+02	1.516E+02	-2.193E+02	6
72	3	204	205	5003	liner	-1.275E+02	-5.587E+02	7.275E+01	-1.516E+02	7
71	3	203	204	5003	liner	-1.461E+02	-5.589E+02	-1.766E+01	-7.274E+01	7
70	3	202	203	5003	liner	-1.651E+02	-5.587E+02	-1.199E+02	1.767E+01	7
69	3	201	202	5003	liner	-1.941E+02	-5.515E+02	-2.297E+02	1.199E+02	7

### Azioni interne rivestimento definitivo – Calotta

Elem	ID	Nod1	Nod2	Prop	Type	F-shear	F-axial	Mom-1	Mom-2	
136	4	348	221	5004	liner	7.842E+01	1.077E+02	1.350E+01	1.409E+01	-2
135	4	347	348	5004	liner	6.738E+01	1.064E+02	3.802E+01	-1.350E+01	-2
134	4	346	347	5004	liner	5.739E+01	1.043E+02	5.887E+01	-3.801E+01	-2
133	4	345	346	5004	liner	4.843E+01	1.016E+02	7.646E+01	-5.887E+01	-2

132	4	344	345	5004	liner	3.985E+01	9.841E+01	9.092E+01	-7.646E+01	-1
131	4	343	344	5004	liner	3.152E+01	9.445E+01	1.024E+02	-9.092E+01	-1
130	4	342	343	5004	liner	2.336E+01	8.981E+01	1.108E+02	-1.024E+02	-1
129	4	341	342	5004	liner	1.607E+01	8.477E+01	1.167E+02	-1.108E+02	-1
128	4	340	341	5004	liner	7.486E+00	7.712E+01	1.214E+02	-1.167E+02	-1
127	4	339	340	5004	liner	-1.563E+00	6.638E+01	1.204E+02	-1.214E+02	-8
126	4	338	339	5004	liner	-8.649E+00	5.454E+01	1.149E+02	-1.204E+02	-4
125	4	337	338	5004	liner	-1.337E+01	4.235E+01	1.064E+02	-1.149E+02	-1
124	4	336	337	5004	liner	-1.581E+01	3.002E+01	9.634E+01	-1.064E+02	2
123	4	335	336	5004	liner	-1.769E+01	1.835E+01	8.509E+01	-9.634E+01	4
122	4	334	335	5004	liner	-1.703E+01	7.063E+00	7.427E+01	-8.510E+01	5
121	4	333	334	5004	liner	-1.439E+01	-3.512E+00	6.511E+01	-7.427E+01	7
120	4	332	333	5004	liner	-1.027E+01	-1.281E+01	5.858E+01	-6.511E+01	8
119	4	331	332	5004	liner	-4.687E+00	-2.099E+01	5.561E+01	-5.859E+01	8
118	4	330	331	5004	liner	-2.373E+01	-1.448E+01	4.051E+01	-5.560E+01	7
117	4	329	330	5004	liner	-3.228E+01	-1.569E+01	1.999E+01	-4.051E+01	7
116	4	328	329	5004	liner	-3.351E+01	-2.072E+01	-1.323E+00	-1.999E+01	7
115	4	327	328	5004	liner	-3.339E+01	-2.815E+01	-2.256E+01	1.322E+00	6
114	4	326	327	5004	liner	-3.751E+01	-4.218E+01	-4.641E+01	2.256E+01	6
113	4	325	326	5004	liner	-4.586E+01	-5.824E+01	-7.557E+01	4.641E+01	5
112	4	324	325	5004	liner	-5.684E+01	-7.405E+01	-1.117E+02	7.557E+01	6
111	4	323	324	5004	liner	-4.100E+01	-7.978E+01	-1.378E+02	1.117E+02	8
110	4	322	323	5004	liner	-2.530E+01	-8.314E+01	-1.539E+02	1.378E+02	9
109	4	321	322	5004	liner	-1.119E+01	-8.282E+01	-1.610E+02	1.539E+02	1
108	4	320	321	5004	liner	3.381E+00	-8.076E+01	-1.588E+02	1.610E+02	1
107	4	319	320	5004	liner	1.723E+01	-7.615E+01	-1.479E+02	1.588E+02	1
106	4	318	319	5004	liner	2.917E+01	-6.856E+01	-1.293E+02	1.479E+02	1
105	4	317	318	5004	liner	4.001E+01	-5.908E+01	-1.039E+02	1.293E+02	1
104	4	316	317	5004	liner	4.849E+01	-4.727E+01	-7.303E+01	1.039E+02	9
103	4	315	316	5004	liner	5.362E+01	-3.343E+01	-3.893E+01	7.302E+01	7
102	4	314	315	5004	liner	5.914E+01	-1.968E+01	-1.325E+00	3.893E+01	6
101	4	313	314	5004	liner	6.139E+01	-4.083E+00	3.771E+01	1.332E+00	3
100	4	312	313	5004	liner	6.225E+01	1.135E+01	7.729E+01	-3.770E+01	3
99	4	311	312	5004	liner	6.053E+01	2.724E+01	1.158E+02	-7.728E+01	-3
98	4	310	311	5004	liner	5.551E+01	4.380E+01	1.511E+02	-1.158E+02	-6
97	4	309	310	5004	liner	4.748E+01	5.981E+01	1.812E+02	-1.511E+02	-1
96	4	308	309	5004	liner	3.951E+01	6.954E+01	1.956E+02	-1.812E+02	-1
95	4	307	308	5004	liner	3.399E+01	7.653E+01	2.079E+02	-1.956E+02	-1
94	4	306	307	5004	liner	2.787E+01	8.333E+01	2.180E+02	-2.079E+02	-1
93	4	305	306	5004	liner	2.007E+01	8.934E+01	2.253E+02	-2.180E+02	-1
92	4	304	305	5004	liner	1.402E+01	9.635E+01	2.303E+02	-2.252E+02	-2
91	4	303	304	5004	liner	7.752E+00	1.031E+02	2.332E+02	-2.303E+02	-2
90	4	302	303	5004	liner	4.547E-01	1.095E+02	2.333E+02	-2.332E+02	-2
89	4	201	302	5004	liner	-1.035E+01	1.148E+02	2.297E+02	-2.333E+02	-2