

“SERRA DEL CORVO”

Progetto di impianto di accumulo idroelettrico

Comune di Gravina in Puglia (BA)

COMMITTENTE



COORDINAMENTO / MANDANTE



Progettista: Ing. Luigi Lorenzo Papetti

PROGETTAZIONE GEOTECNICA / MANDATARIA



Progettista: Ing. Luisella Vai

Relazione descrittiva e di calcolo della galleria idraulica

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
0	PRIMA EMISSIONE	21/01/22	SP	LV	PAC

Codice commessa: 1373

Codifica documento: 1373-A-GD-R-02-0

INDICE

1. INTRODUZIONE	1
2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO	2
3. CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI	3
4. CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA.....	4
4.1 Caratterizzazione geologica.....	4
4.2 Caratterizzazione geotecnica.....	4
4.3 Caratterizzazione sismica	6
5. DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI PREVISTI.....	8
5.1 Galleria idraulica: descrizione generale	8
5.2 Sezione tipo S1	9
5.3 Sezioni tipo S2a e S2b	10
5.4 Imbocco della galleria di finestra.....	12
5.5 Materiali	14
6. ANALISI NUMERICHE	15
6.1 Generalità.....	15
6.2 Sezione tipo S1	18
6.3 Sezione tipo S2a	21
6.4 Sezione tipo S2b	23
6.5 Sezione tipo Sf-imb.....	26
7. VERIFICHE STRUTTURALI DEI SOSTEGNI	29
7.1 Approcci di calcolo.....	29
7.2 Sezione tipo S1	31
7.2.1 Verifica del rivestimento di prima fase	31
7.2.2 Verifica del rivestimento definitivo.....	31
7.3 Sezione tipo S2a	32
7.4 Sezione tipo S2b	33
7.5 Sezione tipo Sf-imb.....	34
7.5.1 Verifica del rivestimento di prima fase	34
7.5.2 Verifica del rivestimento definitivo.....	34

TABELLE

Tabella 4.1 – Riassunto dei dati di inputi sismico impiegati nei modelli di calcolo

Tabella 7.1 – Coefficienti parziali delle azioni (Tabella 6.2.I NTC2018)

Tabella 7.2 – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici (Tabella 6.2.II NTC2018)

FIGURE

Figura 4.1 – Applicazione delle deformazioni di taglio sui bordi del modello per l'applicazione del Metodo delle deformazioni di taglio puro in campo libero

Figura 5.1 – Profilo in asse alla galleria

Figura 5.2 – Sezione tipo S1: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.3 – Sezione tipo S2a: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.4 – Sezione tipo S2b: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.5 – Sezione tipo Sf-imb: geometria del cavo e interventi di sostegno, sezione trasversale

Figura 5.6 – Sezione tipo Sf-imb: geometria del cavo e interventi di sostegno, sezione longitudinale

Figura 6.1 – Sezione tipo S1: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione e particolare dell'intorno del cavo

Figura 6.2 – Sezione tipo S1: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

Figura 6.3 – Sezione tipo S1: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 7

Figura 6.4 – Sezione tipo S1: spostamenti e deformata aggiuntivi relativi al solo step 8

Figura 6.5 – Sezione tipo S2a: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione e particolare dell'intorno del cavo

Figura 6.6 – Sezione tipo S2a: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

Figura 6.7 – Sezione tipo S2a: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

Figura 6.8 – Sezione tipo S2a: spostamenti e deformata aggiuntivi relativi al solo step 6

Figura 6.9 – Sezione tipo S2b: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione e particolare dell'intorno del cavo

Figura 6.10 – Sezione tipo S2b: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

Figura 6.11 – Sezione tipo S2b: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

Figura 6.12 – Sezione tipo S2b: spostamenti e deformata aggiuntivi relativi al solo step 6

Figura 6.13 – Sezione tipo Sf-imb: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione e particolare dell'intorno del cavo

Figura 6.14 – Sezione tipo Sf-imb: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

Figura 6.15 – Sezione tipo S2b: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 6

Figura 6.16 – Sezione tipo Sf-imb: spostamenti e deformata aggiuntivi relativi al solo step 7

Figura 7.1 – Sezione tipo S1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Figura 7.2 – Sezione tipo S1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

Figura 7.3 – Sezione tipo S2a: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Figura 7.4 – Sezione tipo S2b: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Figura 7.5 – Sezione tipo Sf-imb: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Figura 7.6 – Sezione tipo Sf-imb: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

1. INTRODUZIONE

La presente relazione di calcolo è stata redatta per conto di EDISON S.p.A. nell'ambito del progetto per approvazione di un impianto di pompaggio puro ubicato in località Serra del Corvo, al confine tra la Puglia e la Basilicata, nel comune di Gravina di Puglia (BA). L'impianto in progetto prevede la realizzazione di un bacino artificiale ubicato a monte dell'esistente invaso del Basentello (Lago di Serra del Corvo).

In particolare la presente relazione ha per oggetto le analisi di progetto e verifica della galleria idraulica e della galleria di finestra. Dopo un breve cenno sui riferimenti normativi e sui codici di calcolo impiegati, si richiamano, al Capitolo 4, la caratterizzazione geologica, geotecnica e sismica delle diverse unità geotecniche previste lungo il tracciato dell'opera, redatte sulla base dei dati della campagna geologico-geotecnica, effettuata nel corso del 2021. Il Capitolo 5 riporta una breve descrizione degli interventi in progetto e dei materiali da costruzione previsti, mentre nei capitoli 6 e 7 sono esposti i risultati delle analisi numeriche di progetto e delle verifiche previste dalla normativa vigente condotte per le diverse sezioni di analisi della galleria idraulica e della galleria di finestra.

2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

La normativa di riferimento per i calcoli e le verifiche è costituita da:

- D.M. 17 gennaio 2018 “Norme tecniche per le costruzioni” - NTC 2018
- Circolare 11 febbraio 2019, n. 617/C.S.LL.PP.

3. CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI

I programmi di calcolo utilizzati per le analisi e le verifiche delle sezioni tipo sono:

- Rocscience Inc. – Phase2 Versione 8.024
- Midas Information Technology – MidasGen 2020

Tutti i software sono largamente impiegati a livello globale e di comprovata validità nella progettazione geotecnica e strutturale.

4. CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA

Il presente capitolo riporta un breve inquadramento dal punto di vista geologico, geotecnico e sismico relativo alle zone in cui risultano ubicate le diverse opere in sotterraneo. Per una trattazione più esaustiva si rimanda ai seguenti elaborati:

- 1373-A-GE-R-01 - Relazione geologica generale;
- 1373-A-GD-R-01 - Relazione geotecnica generale.

4.1 Caratterizzazione geologica

Dalla planimetria geologica e dalle sezioni geologiche interpretative, riportate negli allegati 1 e 2 della *Relazione geologica generale*, è possibile osservare che:

- lo scavo della galleria idraulica e della galleria di finestra interesserà unicamente l'unità geologica delle Argille limose di color grigio azzurro;
- il pozzo piezometrico ed il pozzo all'opera di presa attraverseranno, nel tratto superiore, le alternanze sabbiose limose, per uno spessore massimo pari a circa 50 m in corrispondenza del pozzo piezometrico, per poi intestarsi nelle argille limose grigie azzurre nel rimanente tratto;
- il pozzo che ospiterà la centrale ed il pozzo paratoie attraverseranno, nel tratto superiore, le alluvioni terrazzate, per uno spessore massimo pari a circa 10 m, per poi intestarsi nelle argille grigie azzurre nel rimanente tratto.

4.2 Caratterizzazione geotecnica

Le diverse unità geologiche illustrate al paragrafo precedente sono state caratterizzate da un punto di vista geotecnico al fine di determinare le caratteristiche fisiche e le proprietà meccaniche di resistenza e deformabilità utili per lo svolgimento dei calcoli di progetto.

La caratterizzazione delle diverse unità geotecniche è stata effettuata basandosi sui dati finora raccolti durante le campagne di indagini preliminari. Tali dati hanno consentito di effettuare una prima caratterizzazione dell'unità geotecnica in oggetto. La caratterizzazione è stata effettuata basandosi sui sondaggi esplorativi, sulle prove effettuate in situ e sulle prove di laboratorio effettuate sui campioni prelevati in situ. Per maggiori approfondimenti circa i dati raccolti durante la campagna prove e la determinazione dei parametri geotecnici si rimanda alla *Relazione Geotecnica Generale*.

Le proprietà geotecniche assunte in sede di progetto, per ciascuna unità, sono riassunte nel seguito, ovviamente tali parametri dovranno essere confermati nelle succes-

sive fasi di progettazione da ulteriori indagini volte a caratterizzare in maniera più rigorosa i terreni presenti in sito:

- Sabbia con ghiaia a livelli limosi (SG)
 - γ = 18 kN/m³, peso di volume
 - E = 300 MPa, modulo di deformabilità
 - ν = 0.3, coefficiente di Poisson
 - Criterio di resistenza: Mohr-Coulomb
 - c = 0 kPa, coesione
 - ϕ' = 29°, angolo di attrito;
- Limo con argilla (LA)
 - γ = 19 kN/m³, peso di volume
 - E = 60 MPa, modulo di deformabilità
 - ν = 0.4, coefficiente di Poisson
 - Criterio di resistenza: Mohr-Coulomb
 - c = 15 kPa, coesione
 - ϕ' = 24°, angolo di attrito;
 - Su = 300 kPa, coesione non drenata
- Sabbia media limosa (SL)
 - γ = 18 kN/m³, peso di volume
 - E = 300 MPa, modulo di deformabilità
 - ν = 0.3, coefficiente di Poisson
 - Criterio di resistenza: Mohr-Coulomb
 - c = 5 kPa, coesione
 - ϕ' = 27°, angolo di attrito;
- Argille limosa color grigie azzurre (Ag)¹:
 - γ = 20 kN/m³, peso di volume
 - E = 82.779 + 0.465*z MPa, modulo di deformabilità
 - ν = 0.45, coefficiente di Poisson
 - Criterio di resistenza: Tresca (per le opere in sotterraneo)
 - Su = 153.62 + 3.2941*z kPa, coesione non drenata
 - Criterio di resistenza: Mohr-Coulomb (per le opere di sostegno)
 - c = 25 kPa, coesione
 - ϕ = 20°, angolo di attrito;
- Alluvioni terrazzate e detriti di versante (AD)
 - γ = 19 kN/m³, peso di volume
 - E = 80 MPa, modulo di deformabilità
 - ν = 0.4, coefficiente di Poisson
 - Criterio di resistenza: Mohr-Coulomb

¹ Per le Argille grigie azzurre è stato assunto un valore variabile con la profondità del modulo di deformazione e della coesione non drenata. Le leggi di variazione sopra riportate sono state determinate sulla base dei dati raccolti durante la campagna indagini 2021.

- c = 19 kPa, coesione
- ϕ' = 23°, angolo di attrito;

4.3 Caratterizzazione sismica

Considerata l'importanza dell'opera in progetto si è ritenuto di considerare l'azione sismica agente sulle gallerie già dalle primissime fasi del progetto. In particolare, per quanto si riferisce ai rivestimenti delle gallerie, la presenza del carico sismico è stata esplicitamente considerata nelle simulazioni numeriche effettuate.

Come illustrato nella *Relazione sulla sismica dei manufatti in sotterraneo*, cui rimanda per ulteriori dettagli, gli effetti tensionali e deformativi dovuti all'evento sismico sono stati considerati mediante una analisi semplificata di tipo pseudo-statico in cui si è applicato il *Metodo delle deformazioni di taglio puro in campo libero*. Tale metodo consente di simulare gli effetti di ovalizzazione del cavo in direzione trasversale mediante l'applicazione di uno spostamento a farfalla sui bordi del modello, come indicato in Figura 4.1.

L'entità degli spostamenti applicati è stata definita in funzione delle caratteristiche meccaniche del terreno e dello studio di pericolosità sismica effettuato per il sito in cui si intende realizzare l'opera.

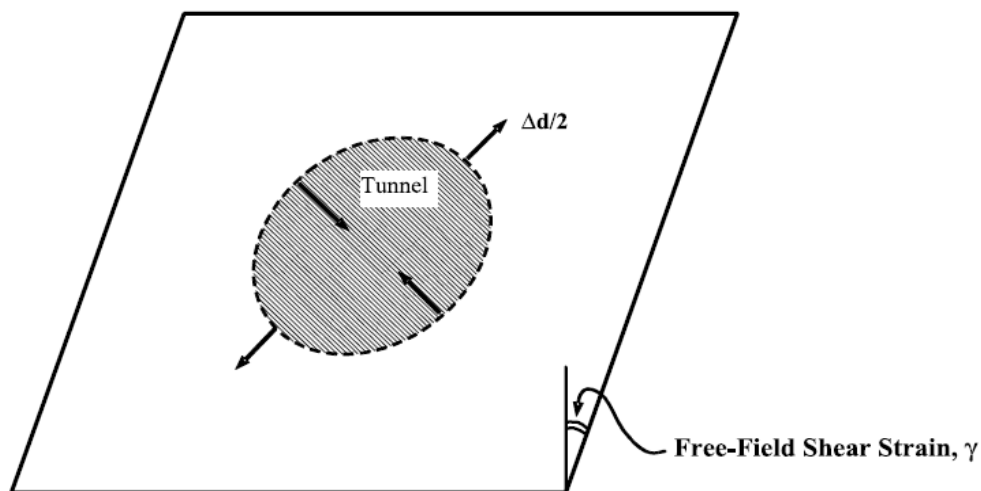


Figura 4.1 – Applicazione delle deformazioni di taglio sui bordi del modello per l'applicazione del Metodo delle deformazioni di taglio puro in campo libero

Si riportano di seguito i principali parametri impiegati per la caratterizzazione sismica delle diverse opere, mentre per un approfondimento circa la loro definizione si rimanda alla *Relazione sulla sismica dei manufatti in sotterraneo*.

Parametri comuni

- metodo di calcolo dell'azione pseudo-statica: Free-field shear deformation method
- vita nominale: $V_N = 100$ anni
- classe d'uso: classe IV $C_U=2.0$
- periodo di riferimento per l'azione sismica: $V_R = V_N * C_U = 100*2.0 = 200$ anni
- Magnitudo prevista: 6.5
- Distanza dalla sorgente prevista: < 10 km

Le formule applicate sono di seguito riepilogate:

$$a_{\max,s} = S \cdot a_g$$

$$a_{z,\max} = C \cdot a_{\max,s}$$

$$V_s = k \cdot a_{z,\max}$$

$$\gamma_{\max} = \frac{V_s}{C_s}$$

$$\Delta x_{\max} = \gamma_{\max} \frac{h_{\text{modello}}}{2}$$

In Tabella 4.1 sono stati riassunti i dati utilizzati per il calcolo della deformazione ed i valori dello spostamento Δx applicati ad ogni scatola di taglio.

Tabella 4.1 – Riassunto dei dati di input sismico impiegati nei modelli di calcolo

Sezione tipo	Litotipo	cat suolo	S	$a_{\max,s}$	copertura (m)	C	$a_{z,\max}$	k	V_s (m/s)	C_s (m/s)	γ_{\max}	h/2 (m)	Δx_{\max} (m)
S1	Argille grigie	B	1.2	0.205	100	0.7	0.1722	1.02	0.176	477	0.00037	20	0.0074
S2a	Argille grigie	B	1.2	0.205	120	0.7	0.1722	1.02	0.176	477	0.00037	20	0.0074
S2b	Argille grigie	B	1.2	0.205	35	0.7	0.1722	1.02	0.176	477	0.00037	20	0.0074
Imbocco finestra	Argille grigie	B	1.2	0.205	15	0.9	0.2214	1.02	0.226	477	0.00047	20	0.0083

5. DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI PREVISTI

Nel presente capitolo si riporta una breve descrizione delle sezioni tipologiche previste per garantire un adeguato sostegno del cavo sia in fase di esecuzione che in fase di utilizzo. Ulteriori dettagli sono riportati sugli elaborati grafici di progetto.

5.1 Galleria idraulica: descrizione generale

La galleria idraulica, come mostrato nell'immagine seguente, ha origine al di sotto del bacino di monte ed è collegata con quest'ultimo per mezzo di un pozzo verticale che costituisce l'opera di presa dell'impianto. La galleria prosegue dunque, con andamento orizzontale, per circa 1020 m, fino ad incontrare il pozzo piezometrico. In questo primo tratto la galleria ha una copertura pressoché costante che varia tra un minimo di circa 80 m ed un massimo di circa 100 m. All'incirca a metà del primo tratto della galleria idraulica è previsto l'accesso alla galleria di finestra, la quale verrà impiegata per consentire lo scavo della galleria principale su più fronti, e successivamente per consentire un accesso per le ispezioni della condotta. In questo tratto della galleria si prevede l'impiego della sezione tipo S1, descritta dettagliatamente nel seguito.

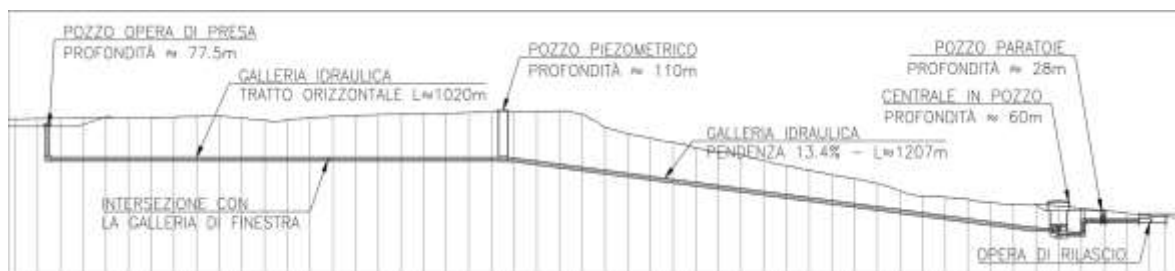


Figura 5.1 – Profilo in asse alla galleria

Superato il pozzo piezometrico la galleria idraulica prosegue con una pendenza del 13,4 % ($\approx 8^\circ$), per circa 1167 m, fino ad incontrare i pozzi che ospiteranno la centrale idroelettrica; superata la quale dopo un breve tratto in cui sarà ubicato il pozzo paratoie si ha l'opera di rilascio nel bacino esistente a valle. In questo secondo tratto la galleria ha una copertura variabile tra un minimo di circa 35 m ed un massimo di circa 120 m. In questo tratto della galleria si prevede l'impiego delle sezioni tipo S2a e S2b, descritte dettagliatamente nel seguito.

Come si è detto al Paragrafo 4.1 della presente relazione scavo della galleria idraulica interesserà direttamente la sola unità geotecnica delle Argille limose di color grigio azzurro.

5.2 Sezione tipo S1

La sezione tipo S1 (Figura 5.2) è prevista per tutto il tratto orizzontale della galleria idraulica che, come si è detto, va dall'opera di presa al pozzo piezometrico. In questo primo tratto non è prevista la posa di una condotta metallica interna alla galleria e pertanto la pressione esercitata dal battente idraulico, durante la fase di utilizzo, dovrà essere interamente assorbita dal rivestimento della galleria stessa, il quale dovrà garantire, ovviamente, la stabilità del cavo nei confronti delle forze esterne, sia durante la fase di scavo sia durante la fase di esercizio.

Il rivestimento di prima fase sarà dunque costituito da uno strato di 20 cm di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di classe C30/37 e centine accoppiate HEB 180 con interasse longitudinale di 1.00 m. Si prevede la disposizione del rivestimento di prima fase anche in corrispondenza dell'arco rovescio, con funzione di puntone, al fine da contenere la deformazione del cavo.

A completamento della galleria si procederà con il getto del rivestimento definitivo dello spessore di 50 cm da realizzarsi con calcestruzzo armato di classe C30/37.

Nel caso di condizioni particolarmente difficili si prevede un eventuale preconsolidamento del contorno del cavo (su calotta e piedritti) e del fronte di scavo mediante 27 elementi in VTR iniettati con miscela cementizia.

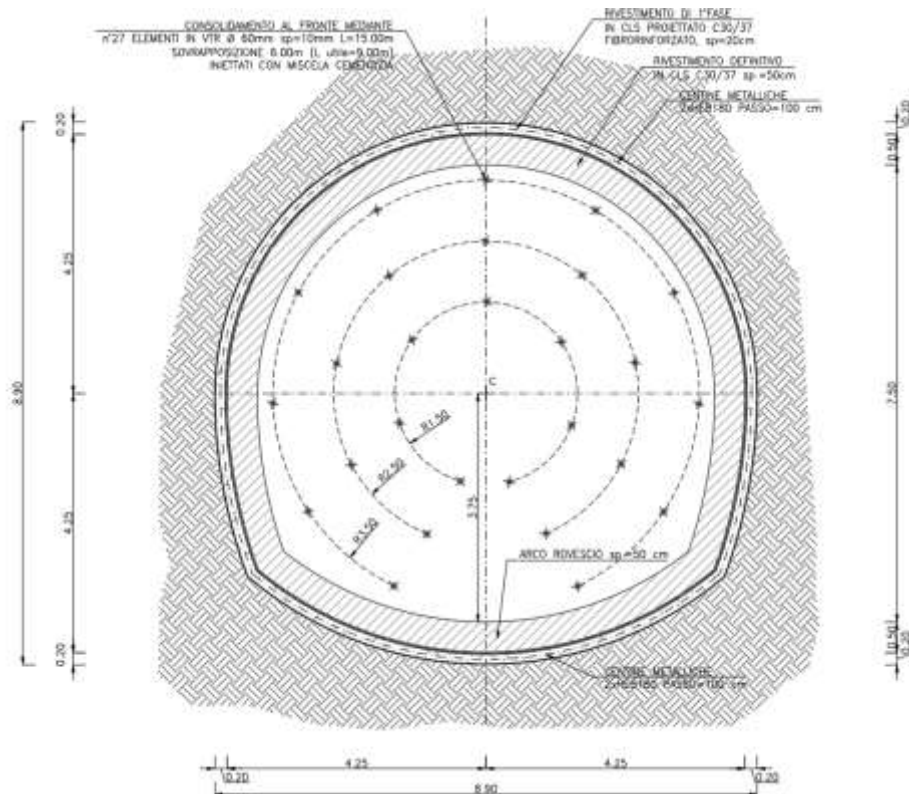


Figura 5.2 – Sezione tipo S1: geometria del cavo e interventi di sostegno

5.3 Sezioni tipo S2a e S2b

La sezione tipo S2 è prevista per tutto il tratto inclinato della galleria idraulica che, come si è detto, va dal pozzo piezometrico fino al pozzo che ospiterà la centrale idroelettrica. In questo secondo tratto, contrariamente al caso precedente, è prevista la posa di una condotta metallica interna alla galleria la quale assicurerà il contenimento della pressione esercitata dal battente idraulico durante la fase di utilizzo. Per tale ragione non si ha la necessità di realizzare un rivestimento definitivo in calcestruzzo armato; la stabilità del cavo nei confronti delle forze esterne, sia durante la fase di scavo sia durante la fase di esercizio, sarà dunque garantita dal solo rivestimento di prima fase, all'interno del quale verrà inghisata la condotta metallica.

La sezione S2, come si è detto in precedenza, si differenzia nelle due tipologie S2a e S2b descritte di seguito.

La sezione tipo S2a (Figura 5.3) è prevista per i casi di alta copertura (orientativamente maggiore di 60 m) ed eventualmente per i casi con copertura minore in cui le condizioni di scavo si rivelassero particolarmente difficili. Il rivestimento di prima fase sarà costituito da uno strato di 30 cm di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di classe C30/37 e centine accoppiate HEB 200 con interasse longitudinale di 1.00 m. Si prevede la disposizione del rivestimento di prima fase anche in corrispondenza dell'arco rovescio, con funzione di puntone, al fine da contenere la deformazione del cavo.

La sezione tipo S2b (Figura 5.4) è prevista per i casi di media copertura, orientativamente tra i 35 m ed i 60 m. Il rivestimento di prima fase sarà costituito da uno strato di 30 cm di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di classe C30/37 e centine accoppiate HEB 160 con interasse longitudinale di 1.00 m. Si prevede la disposizione del rivestimento di prima fase anche in corrispondenza dell'arco rovescio, con funzione di puntone, al fine da contenere la deformazione del cavo.

Nel caso in cui le condizioni di scavo richiedessero un contenimento del fronte per mezzo di un irrigidimento del nucleo di scavo si prevede, per entrambe le sezioni tipo, un eventuale preconsolidamento del contorno del cavo (su calotta e piedritti) e del fronte di scavo mediante 27 elementi in VTR iniettati con miscela cementizia.

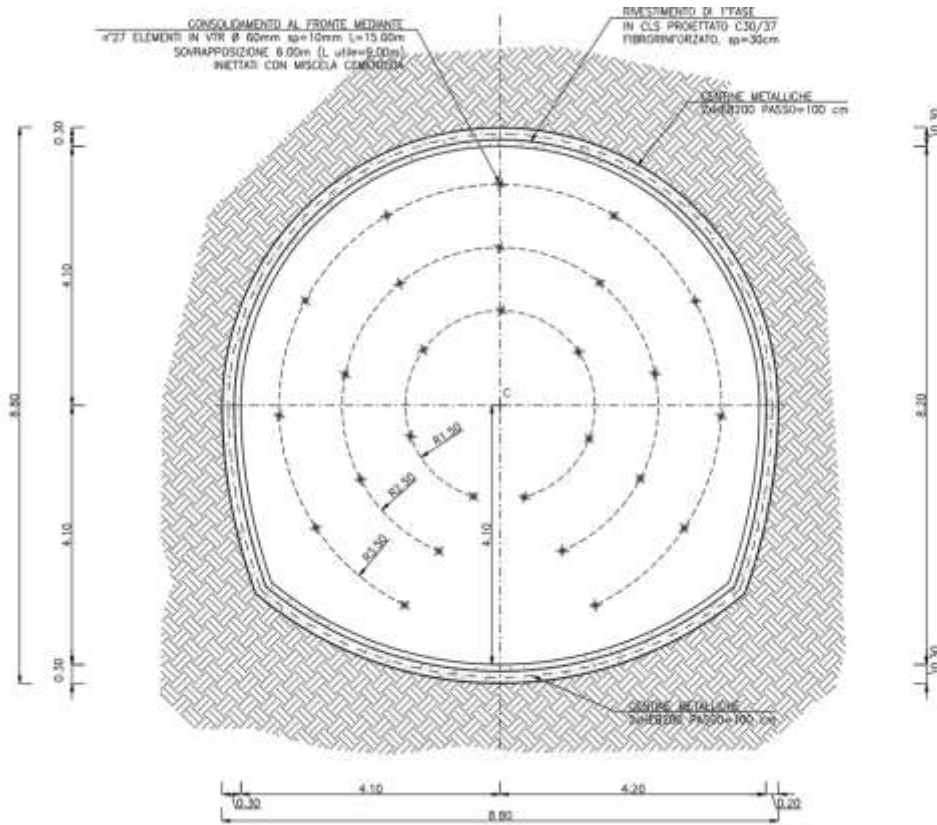


Figura 5.3 – Sezione tipo S2a: geometria del cavo e interventi di sostegno

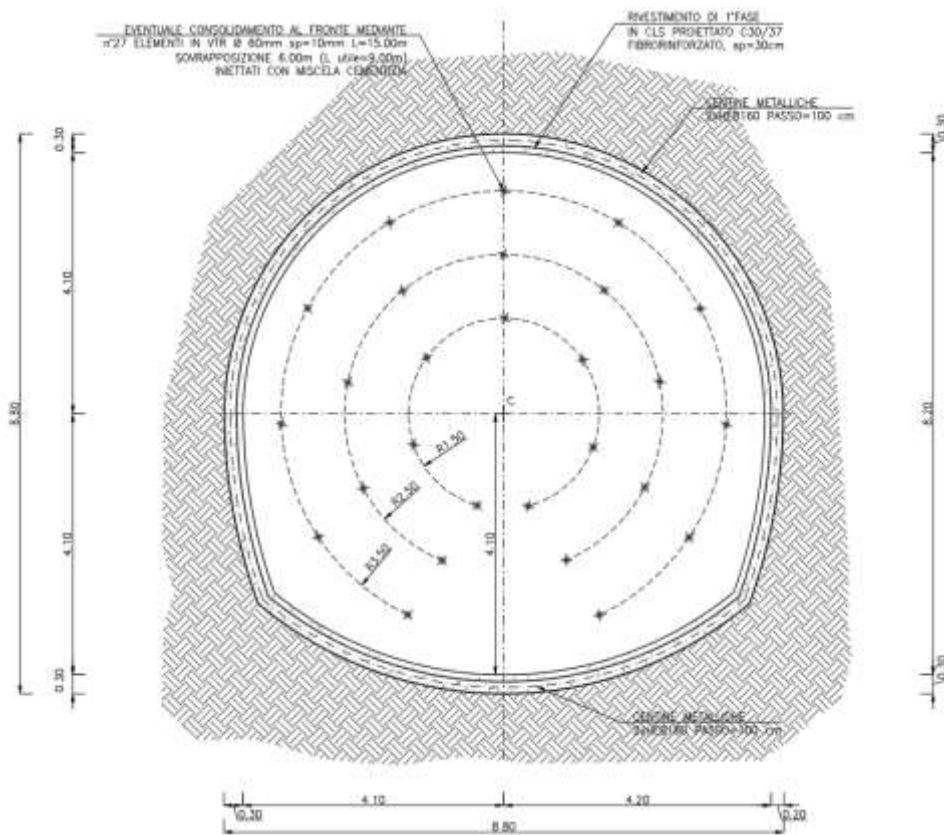


Figura 5.4 – Sezione tipo S2b: geometria del cavo e interventi di sostegno

5.4 Imbocco della galleria di finestra

Per la realizzazione della galleria di finestra si prevede di impiegare la sezione tipologica Sf avente rivestimenti analoghi a quelli previsti per la galleria idraulica in quanto si troverà nel suo complesso immersa negli stessi materiali e con coperture analoghe. L'unica condizione di analisi differente è rappresentata dall'imbocco della galleria in cui la stessa si trova ad avere una copertura inferiore al diametro. Per questa condizione è stata definita una sezione tipologica specifica, la sezione Sf-imb, la quale è prevista per i primi 27 m della galleria di finestra.

Per garantire la stabilità del cavo anche in condizioni di bassissima copertura, all'imbocco della galleria di finestra si prevede di rinforzare il contorno di scavo, sulle reni e sulla calotta, mediante un ombrello di tubi metallici inclinati di 3°. La sezione di avanzamento avrà dunque una forma tronco-conica per i primi tre campi di avanzamento della lunghezza di 9 m ciascuno.

Il rivestimento di prima fase sarà dunque costituito da uno strato di 20 cm di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di classe C30/37 e centine accoppiate HEB 180 con interasse longitudinale di 1.00 m. Si prevede la disposizione del rivestimento di prima fase anche in corrispondenza dell'arco rovescio, con funzione di puntone, al fine da contenere la deformazione del cavo.

A completamento della galleria si procederà con il getto del rivestimento definitivo dello spessore di 50 cm da realizzarsi con calcestruzzo armato di classe C30/37.

Si prevede la realizzazione di un preconsolidamento del fronte di scavo mediante 27 elementi in VTR iniettati con miscela cementizia nonché di un preconsolidamento del contorno di scavo mediante 33 infilaggi da realizzarsi sulle reni e sulla calotta con tubi in acciaio iniettati con malta cementizia.

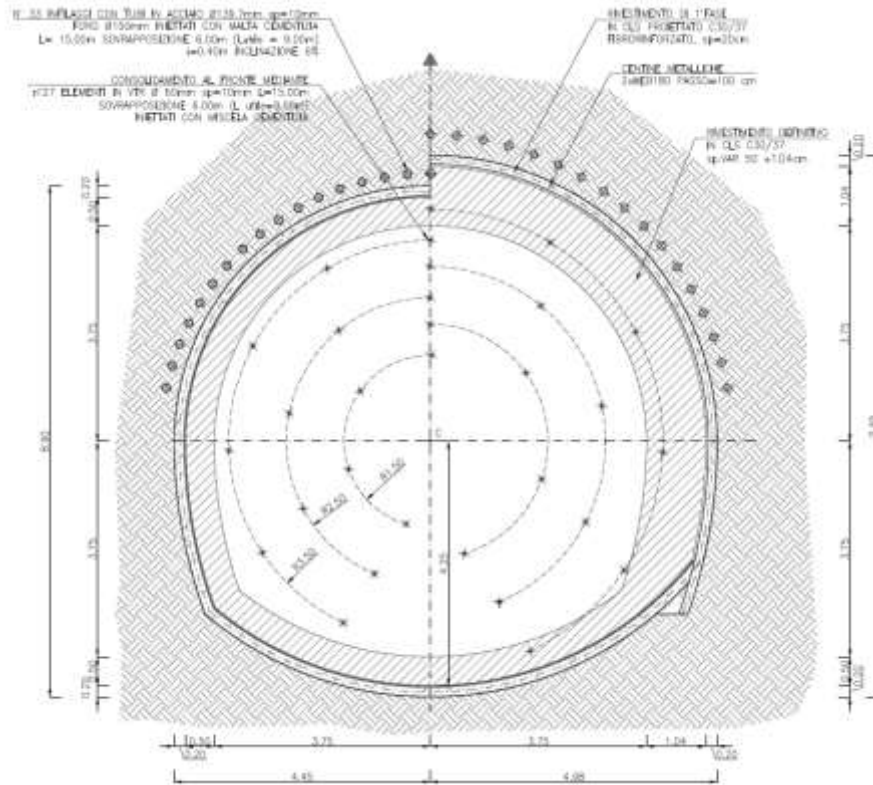


Figura 5.5 – Sezione tipo Sf-imb: geometria del cavo e interventi di sostegno, sezione trasversale

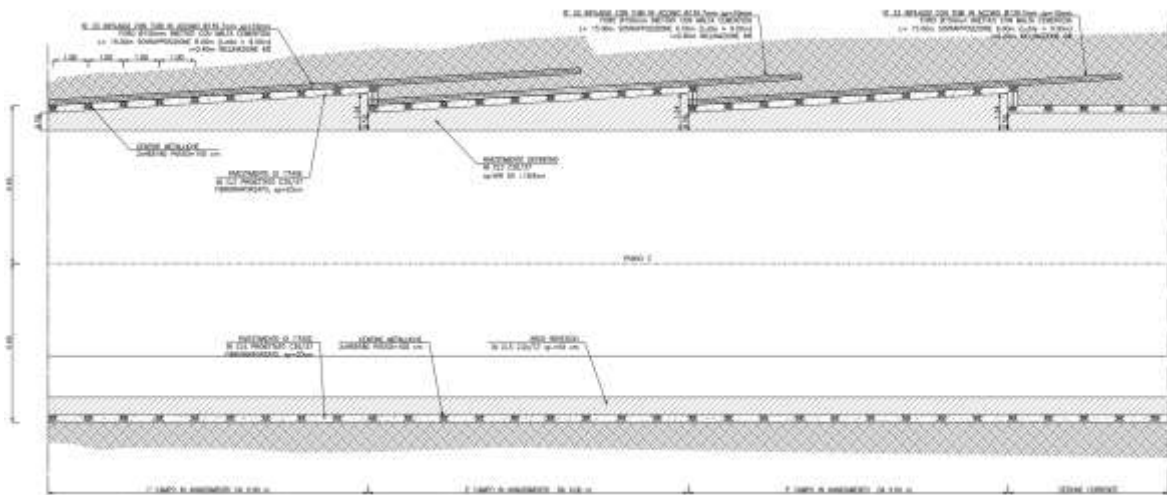


Figura 5.6 – Sezione tipo Sf-imb: geometria del cavo e interventi di sostegno, sezione longitudinale

Gli scavi necessari al raggiungimento della quota del piazzale antistante l'imbocco della galleria di finestra saranno sorretti da una paratia di pali. I calcoli relativi al predimensionamento della paratia sono riportati nella *Relazione sulla stabilità dell'imbocco della finestra*.

5.5 Materiali

I materiali che costituiscono le opere di sostegno sono definiti di seguito:

Calcestruzzo proiettato fibrorinforzato

classe di resistenza	C 30/37
$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c$	$f_{cd} \geq 17 \text{ N/mm}^2$
modulo elastico	$E = 28500 \text{ MPa}$
dosaggio fibre	$\geq 3 \text{ kg/m}^3$

Acciaio per centine galleria

tipo di acciaio	S275
tensione di snervamento	$f_{yk} = 275 \text{ N/mm}^2$
tensione di calcolo	$f_{yd} = 261.9 \text{ N/mm}^2$
tensione di rottura	$f_{tk} = 430 \text{ N/mm}^2$
modulo elastico	$E = 210 \text{ GPa}$

Calcestruzzo per getti in opera in sotterraneo

classe di resistenza	C 30/37
$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c$	$f_{cd} \geq 17.00 \text{ N/mm}^2$
modulo elastico	$E = 32800 \text{ MPa}$

Acciaio in barre per armature

Acciaio B450C	
modulo elastico	$E = 210 \text{ GPa}$

Elementi strutturali in VTR al fronte

Densità	$\geq 1.7 \text{ t/ m}^3$
Resistenza a trazione	$\geq 400 \text{ MPa (UNI 5819)}$
Allungamento a rottura	$\geq 2\%$
Resistenza a flessione	$\geq 350 \text{ MPa (UNI 4219)}$
Resistenza a taglio	$\geq 85 \text{ MPa (ASTM D732)}$
Modulo elastico	$E \geq 15000 \text{ MPa}$
Contenuto in vetro in peso	$\geq 55\%$

Infilaggi in tubi in acciaio

Acciaio tipo S355JRH o S355JRH
secondo UNI EN 10210 - 1 o UNI EN 10219

6. ANALISI NUMERICHE

Nel presente capitolo vengono dapprima descritte le strategie di analisi impiegate per le simulazioni numeriche e le caratteristiche dei modelli realizzati; successivamente vengono illustrati i principali risultati ottenuti dalle simulazioni condotte.

6.1 Generalità

Per la valutazione del comportamento tensio-deformativo del terreno e delle strutture di sostegno delle opere in sotterraneo sono state condotte delle analisi numeriche di simulazione dello scavo con il metodo degli elementi finiti, in condizioni di deformazione piana, utilizzando il codice di calcolo Phase 2 v. 8.024.

Il metodo degli elementi finiti in campo piano permette una valutazione, in termini quantitativi, dello stato tensionale e degli spostamenti nel terreno e nelle strutture, tenendo conto di uno stato di tensione iniziale anisotropo, dell'effettiva situazione geometrica in esame e della sequenza degli interventi previsti.

Lo stato tensionale iniziale è stato supposto di tipo geostatico; le tensioni principali massime e minime sono state assegnate mediante una prima fase di inizializzazione (Step 0), in cui agli elementi del modello, a partire da uno stato tensionale nullo, vengono applicate le forze di volume costituite dal peso proprio attribuito ai diversi materiali.

Il livello della falda considerato nei modelli di calcolo è stato dedotto dalle indicazioni fornite sulla *Relazione geologica generale*, in assenza di informazioni più precise circa l'andamento della piezometria lungo tutto il tracciato della galleria sono state svolte delle ipotesi conservative, le quali dovranno essere confermate nelle successive fasi di studio.

La simulazione delle diverse fasi di scavo e costruzione è stata condotta "attivando", nel corso della sequenza delle analisi, le caratteristiche degli elementi che nel modello rappresentano le strutture di sostegno e di rivestimento. Al tempo stesso, in accordo alle modalità esecutive seguite, lo scavo è stato riprodotto mediante l'usuale procedimento che consiste nel "disattivare elementi scavati" ed applicare sul contorno dello scavo delle forze nodali che portino su di esso, in modo graduale, a componenti di sollecitazione (normale e di taglio) nulle.

Per simulare gli effetti tensionali indotti dagli scavi, considerando la tridimensionalità del problema, si è adottata una tecnica di simulazione comunemente utilizzata nel calcolo di gallerie: questa consiste nell'applicazione di un sistema di forze equivalenti, con le quali la superficie lungo cui si opera lo scavo viene liberata dalle tensioni inizialmente presenti nel terreno (Barla e Jarre, 1986).

L'effetto di contenimento del cavo, dovuto al fronte di avanzamento, è introdotto nelle analisi graduando il sistema di forze equivalenti applicate sulla superficie dello scavo, in accordo con i procedimenti costruttivi previsti. La percentuale delle forze di scavo da applicare è valutabile, in funzione della distanza del fronte di avanzamento dalla sezione di calcolo, del comportamento del terreno (elastico; elasto-plastico) e della eventuale presenza di interventi di contenimento sul nucleo di scavo.

In relazione a quanto sopra, il metodo comporta:

- definizione del modello (dimensione fisica e geometrica della regione da rappresentare, sia per il terreno che per le strutture di sostegno, numerazione dei nodi e degli elementi, condizioni di contorno)
- definizione delle leggi sforzo-deformazione e di resistenza dei materiali interessati
- definizione dello stato tensionale preesistente nel terreno, prima dello scavo della galleria
- simulazione delle fasi esecutive previste

I modelli numerici sono stati sufficientemente estesi in profondità e lateralmente per permettere di ritenere trascurabili le condizioni di vincolo introdotte sui bordi dei modelli stessi. Nei casi di elevata copertura il modello non viene esteso fino al piano campagna, ma si tiene conto del reale carico geostatico definendo nel software la copertura voluta.

Le strutture costituenti il rivestimento di prima fase, in calcestruzzo proiettato armato con centine, e le strutture costituenti il rivestimento definitivo in calcestruzzo armato sono state discretizzate con elementi monodimensionali di tipo "liner" con comportamento elastico e caratteristiche meccaniche ed inerziali equivalenti a quelle delle strutture simulate.

Come descritto nella *Relazione sulla sismica dei manufatti in sotterraneo*, cui si rimanda per ulteriori approfondimenti, per la simulazione del comportamento tensio-deformativo di ciascuna opera in sotterraneo sono stati realizzati due differenti modelli numerici:

1. Modello in condizioni statiche: sufficientemente esteso in profondità e lateralmente per permettere di ritenere trascurabili le condizioni di vincolo introdotte sui bordi dei modelli stessi. Nei casi di elevata copertura il modello non viene esteso fino al piano campagna, ma si tiene conto del reale carico geostatico definendo nel software la copertura voluta.
2. Modello in condizioni sismiche: questo secondo modello numerico, specifico per la simulazione delle condizioni sismiche, simula con più efficacia la "scatola di taglio" tipica del *Metodo delle deformazioni di taglio puro in campo libero*. In questo caso la dimensione del modello è stata ridotta ad un quadrato di lato pari a circa 4 volte il diametro equivalente della galleria. Per verificare la coerenza tensionale e deformativa tra il modello in condizioni statiche e quello in condizioni sismiche si è verificato che su

quest'ultimo i principali parametri tensionali e deformativi avessero, nell'ultimo step immediatamente precedente l'applicazione del carico sismico, una variazione non superiore al 5% rispetto al primo modello.

Le diverse fasi considerate nelle analisi sono riepilogate di seguito per le diverse sezioni tipo. I valori del rilascio tensionale parziale impiegati durante le diverse fasi realizzative sono stati definiti, per ciascuna sezione di calcolo, attraverso un'analisi delle curve caratteristiche della galleria in condizioni di scavo non sostenuto.

Sezione tipo S1

- STEP1 - Imposizione dello stato tensionale iniziale al modello (inizializzazione elastica)
- STEP2 - Imposizione dello stato tensionale iniziale al modello (inizializzazione plastica)
- STEP3 - Scavo a piena sezione della galleria con rilascio tensionale parziale pari al 60% delle forze agenti
- STEP4 - Posa del rivestimento di prima fase con ulteriore rilascio tensionale parziale pari all'80% delle forze agenti
- STEP5 - Posa del rivestimento definitivo con ulteriore rilascio tensionale parziale pari all'90% delle forze agenti
- STEP6 – Allontanamento del fronte di scavo dal rivestimento definitivo gettato in opera con rilascio tensionale completo delle forze agenti
- STEP7 – Fase di esercizio: applicazione del carico idrostatico interno alla galleria
- STEP8 - Sul modello impiegato per le analisi sismiche si è aggiunto un ulteriore step in cui vengono applicati gli spostamenti dovuti al sisma.

Sezioni tipo S2a e S2b

- STEP1 - Imposizione dello stato tensionale iniziale al modello (inizializzazione elastica)
- STEP2 - Imposizione dello stato tensionale iniziale al modello (inizializzazione plastica)
- STEP3 - Scavo a piena sezione della galleria con rilascio tensionale parziale pari al 60% delle forze agenti
- STEP4 - Posa del rivestimento con ulteriore rilascio tensionale parziale pari all'80% delle forze agenti
- STEP5 – Allontanamento del fronte di scavo dal rivestimento posato con rilascio tensionale completo delle forze agenti
- STEP6 - Sul modello impiegato per le analisi sismiche si è aggiunto un ulteriore step in cui vengono applicati gli spostamenti dovuti al sisma.

Sezioni tipo Sf-imb

- STEP1 - Imposizione dello stato tensionale iniziale al modello (inizializzazione elastica)
- STEP2 - Imposizione dello stato tensionale iniziale al modello (inizializzazione plastica)
- STEP3 - Scavo a piena sezione della galleria con rilascio tensionale parziale pari al 40% delle forze agenti

- STEP4 - Posa del rivestimento di prima fase con ulteriore rilascio tensionale parziale pari all'60% delle forze agenti
- STEP5 - Posa del rivestimento definitivo con ulteriore rilascio tensionale parziale pari all'90% delle forze agenti
- STEP6 – Allontanamento del fronte di scavo dal rivestimento definitivo gettato in opera con rilascio tensionale completo delle forze agenti
- STEP7 - Sul modello impiegato per le analisi sismiche si è aggiunto un ulteriore step in cui vengono applicati gli spostamenti dovuti al sisma

Nei paragrafi successivi si riporta una breve sintesi dei principali risultati ottenuti dalle simulazioni delle sezioni tipo più significative.

6.2 Sezione tipo S1

Per la simulazione della sezione tipo S1 sono state considerate le condizioni geometriche e stratigrafiche in corrispondenza del tratto della galleria immediatamente precedente il pozzo piezometrico, in cui si ha la massima copertura pari a circa 100 m.

In considerazione dell'elevata copertura il modello non è stato esteso fino al piano campagna, pertanto la stratigrafia di analisi vede la presenza di un unico litotipo costituito dalle Argille limose grigie azzurre (Ag) (Figura 6.1). Il livello della falda è stato assunto conservativamente pari a -20 m dal piano campagna.

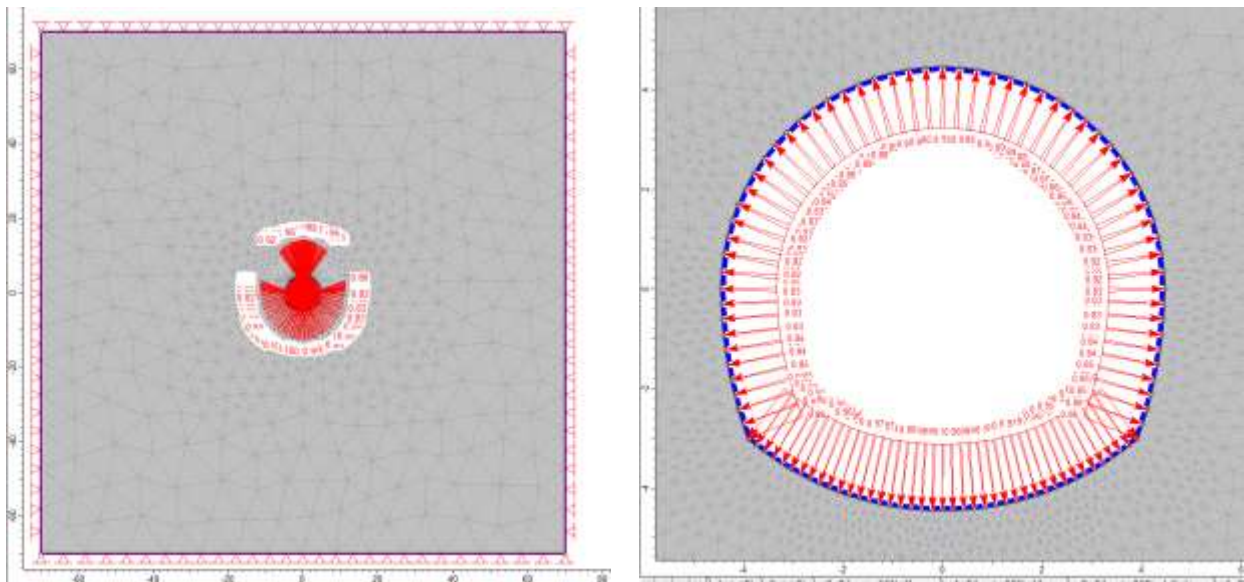


Figura 6.1 – Sezione tipo S1: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione e particolare dell'intorno del cavo

I risultati delle analisi sono illustrati nelle figure seguenti in cui sono riportati:

- I diagrammi di convergenza confinamento attraverso cui si sono definite le percentuali di rilascio parziale da attribuire alle diverse fasi della simulazione
- il diagramma con l'estensione della fascia plastica ed il campo di spostamento del terreno nell'intorno della galleria relativi all'ultimo step dell'analisi statica ed allo step aggiuntivo di analisi sismica

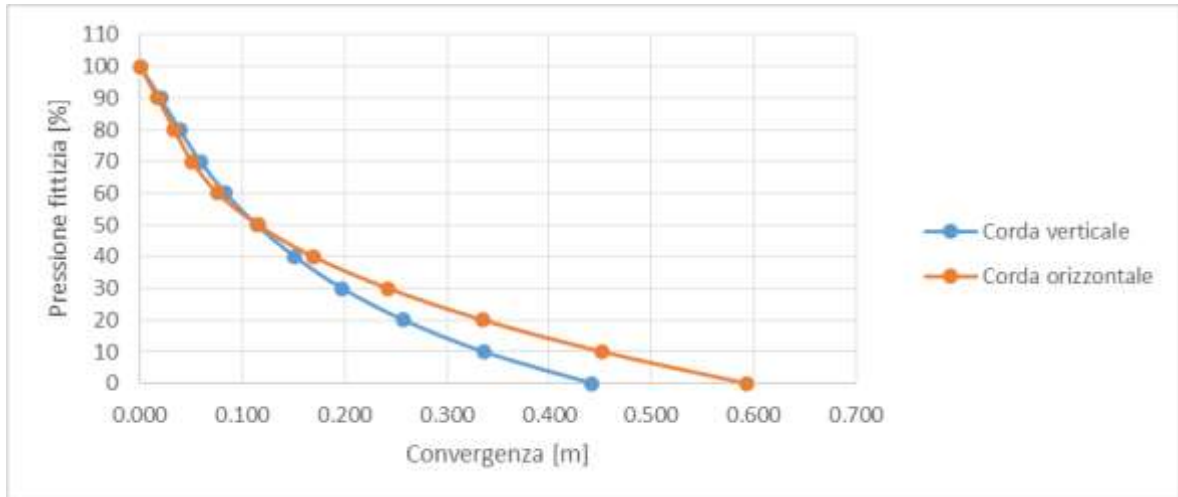


Figura 6.2 – Sezione tipo S1: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

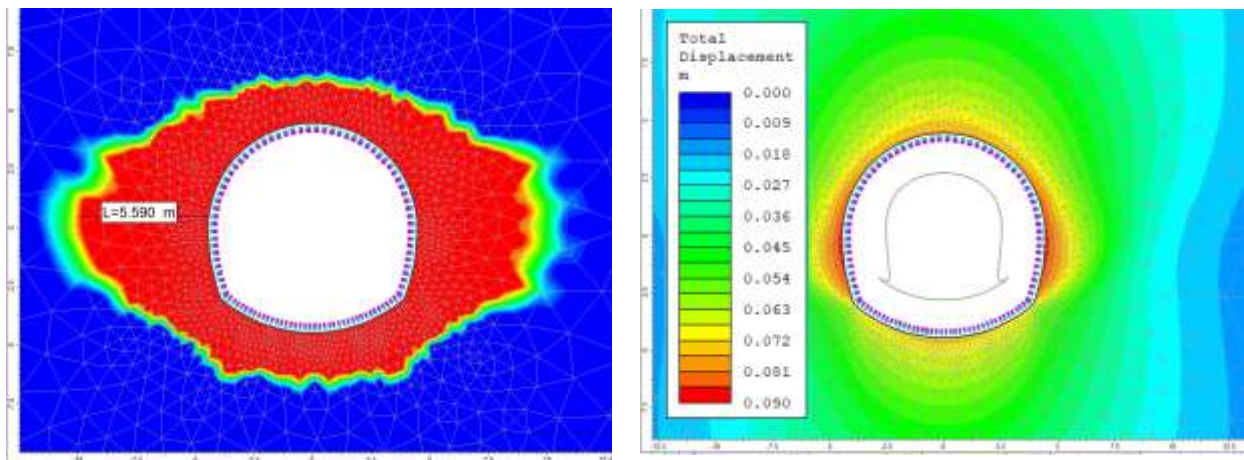


Figura 6.3 – Sezione tipo S1: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 7

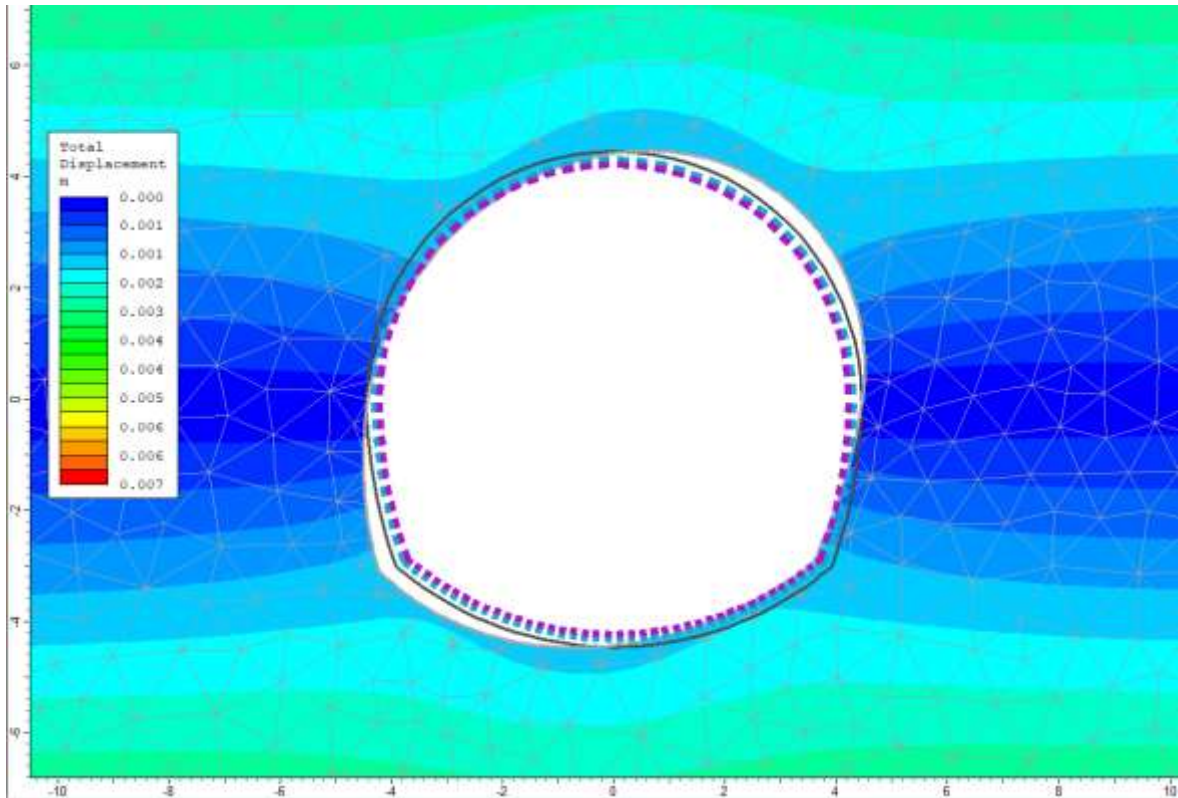


Figura 6.4 – Sezione tipo S1: spostamenti e deformata aggiuntivi relativi al solo step 8

L'esame delle simulazioni numeriche evidenzia che:

- le analisi svolte con il metodo di convergenza confinamento mostrano come il terreno circostante la galleria mantenga un comportamento sostanzialmente elastico fino ad un rilascio parziale nell'ordine del 30% per i piedritti e del 40% per la calotta. Superate tali soglie iniziano a formarsi le prime zone di plasticizzazione. Sulla base dei grafici mostrati si sono ipotizzati i valori del rilascio tensionale parziale indicati nel paragrafo precedente;
- il raggio plastico raggiunge allo step 7 il valore massimo, in corrispondenza dei piedritti, pari a circa 5.60 m, mentre risulta più contenuto in corrispondenza della calotta e dell'arco rovescio dove raggiunge rispettivamente i valori di circa 1.70 m e 2.00 m
- gli spostamenti massimi calcolati allo step 7 valgono 8.8 cm in corrispondenza dei piedritti, 7.8 cm in corrispondenza della calotta e 7.5 cm in corrispondenza dell'arco rovescio;
- durante la fase sismica si ha una leggera variazione della plasticizzazione nell'intorno del cavo ed una variazione della deformazione del contorno legata alla distorsione di taglio causata dalla deformazione sismica imposta al modello numerico;
- le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori contenuti fino alla fase 6, mentre aumentano considerevolmente, raggiungendo valori piuttosto elevati con l'applicazione del carico idrostatico all'interno della condotta. In ogni caso, le sollecitazioni calcolate dal software restano inferiori ai limiti di resistenza delle strutture previste, come mostrato nel capitolo successivo.

6.3 Sezione tipo S2a

Per la simulazione della sezione tipo S2a sono state considerate le condizioni geometriche e stratigrafiche in corrispondenza del tratto della galleria immediatamente a valle del pozzo piezometrico, in cui si ha la massima copertura pari a circa 120 m.

In considerazione dell'elevata copertura il modello non è stato esteso fino al piano campagna, pertanto la stratigrafia di analisi vede la presenza di un unico litotipo costituito dalle Argille limose grigie azzurre (Ag) (Figura 6.5). Il livello della falda è stato assunto conservativamente pari a -20 m dal piano campagna.

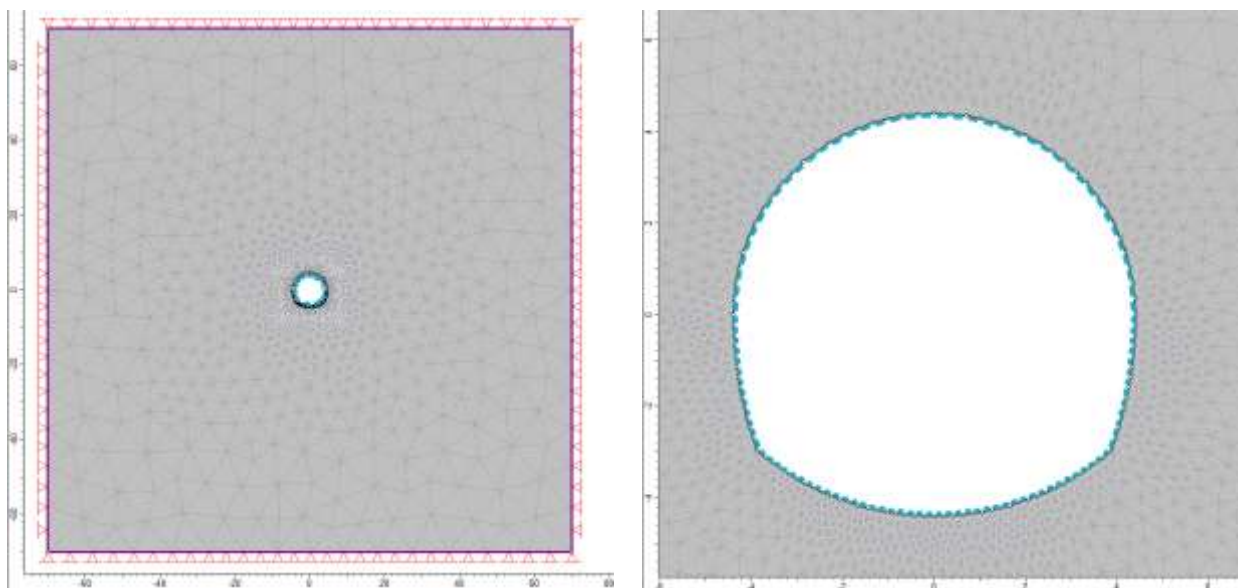


Figura 6.5 – Sezione tipo S2a: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione e particolare dell'intorno del cavo

I risultati delle analisi sono illustrati nelle figure seguenti in cui sono riportati:

- i diagrammi di convergenza confinamento attraverso cui si sono definite le percentuali di rilascio parziale da attribuire alle diverse fasi della simulazione
- il diagramma con l'estensione della fascia plastica ed il campo di spostamento del terreno nell'intorno della galleria relativi all'ultimo step dell'analisi statica ed allo step aggiuntivo di analisi sismica

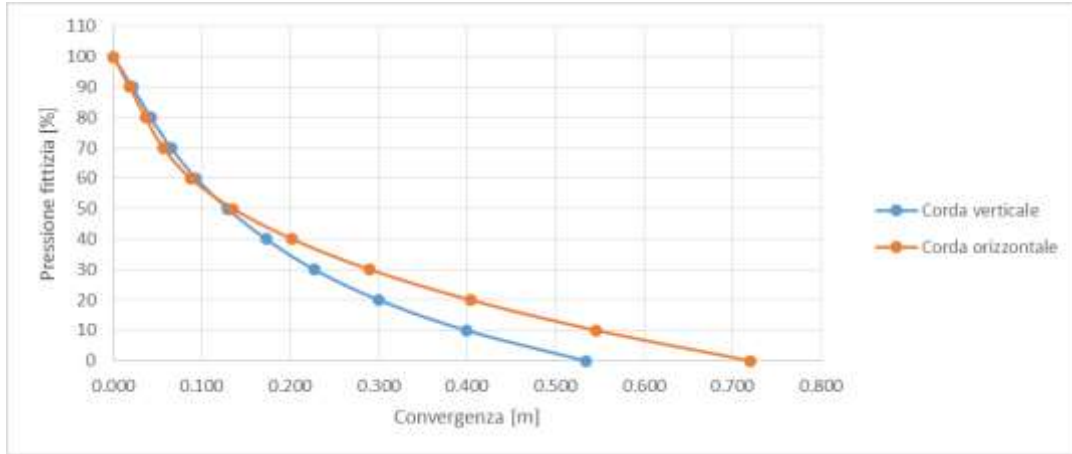


Figura 6.6 – Sezione tipo S2a: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

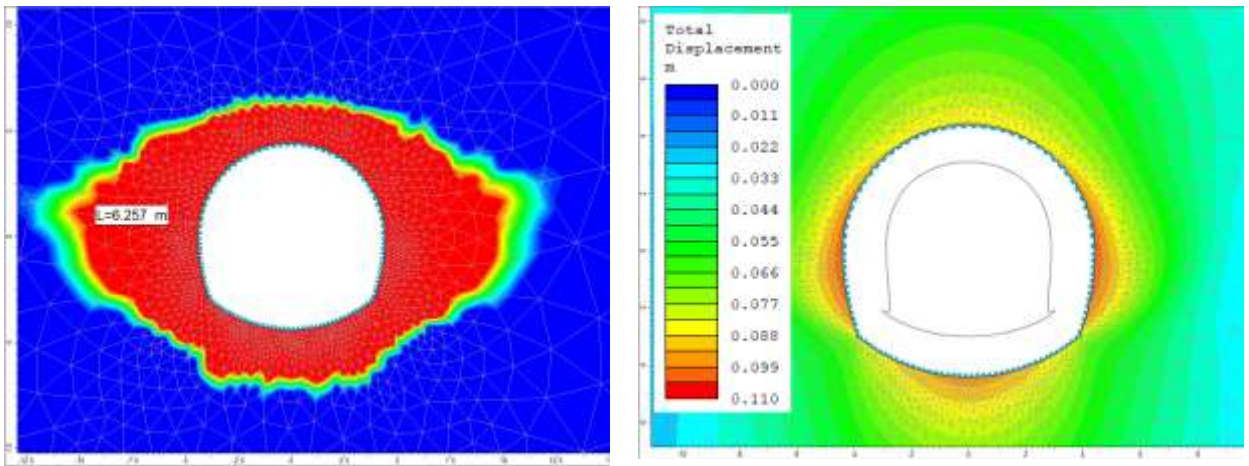


Figura 6.7 – Sezione tipo S2a: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

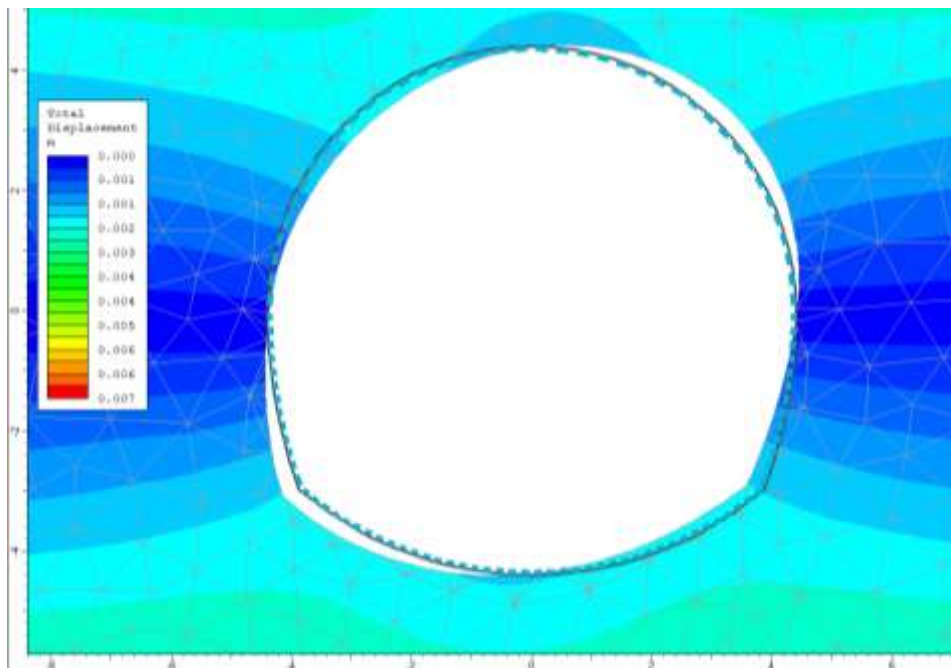


Figura 6.8 – Sezione tipo S2a: spostamenti e deformata aggiuntivi relativi al solo step 6

L'esame delle simulazioni numeriche evidenzia che:

- le analisi svolte con il metodo di convergenza confinamento mostrano come il terreno circostante la galleria mantenga un comportamento sostanzialmente elastico fino ad un rilascio parziale nell'ordine del 30% per i piedritti e del 40% per la calotta. Superate tali soglie iniziano a formarsi le prime zone di plasticizzazione. Sulla base dei grafici mostrati si sono ipotizzati i valori del rilascio tensionale parziale indicati nel paragrafo 6.1;
- il raggio plastico raggiunge allo step 5 il valore massimo, in corrispondenza dei piedritti, pari a circa 6.25 m, mentre risulta più contenuto in corrispondenza della calotta e dell'arco rovescio dove raggiunge rispettivamente i valori di circa 2.20 m e 2.65 m;
- gli spostamenti massimi calcolati allo step 5 valgono 10.4 cm in corrispondenza dei piedritti, 8.9 cm in corrispondenza della calotta e 9.7 cm in corrispondenza dell'arco rovescio;
- durante la fase sismica si ha una leggera variazione della plasticizzazione nell'intorno del cavo ed una variazione della deformazione del contorno legata alla distorsione di taglio causata dalla deformazione sismica imposta al modello numerico;
- le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori piuttosto elevati ma comunque inferiori ai limiti di resistenza delle strutture previste, come mostrato nel capitolo successivo.

6.4 Sezione tipo S2b

Per la simulazione della sezione tipo S2b sono state considerate le condizioni geometriche e stratigrafiche in corrispondenza del tratto di minima copertura della galleria pari a circa 35 m.

In considerazione della modesta copertura il modello è stato esteso fino al piano campagna. Nel modello numerico (Figura 6.9) è stata assunta la seguente stratigrafia di analisi riferita all'asse della galleria:

- da 0 a -5.5 m: Alluvioni terrazzate e detriti di versante (AD)
- da -5.5 m fino al fondo del modello: Argille limose grigie azzurre (Ag)

Il livello della falda è stato assunto conservativamente pari a -13.5 m dal piano campagna.

I risultati delle analisi sono illustrati nelle figure seguenti in cui sono riportati:

- i diagrammi di convergenza confinamento attraverso cui si sono definite le percentuali di rilascio parziale da attribuire alle diverse fasi della simulazione;
- il diagramma con l'estensione della fascia plastica ed il campo di spostamento del terreno nell'intorno della galleria relativi all'ultimo step dell'analisi statica ed allo step aggiuntivo di analisi sismica.

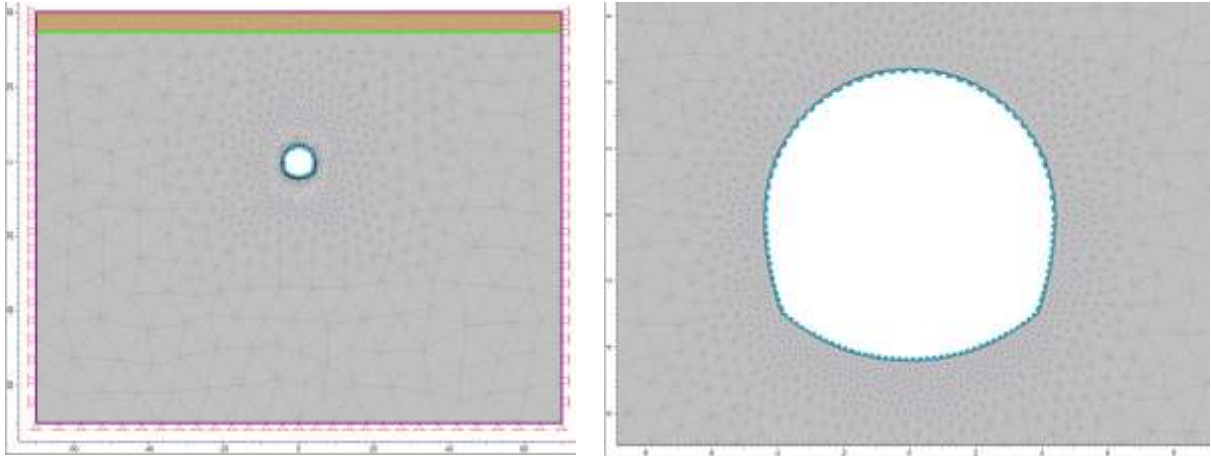


Figura 6.9 – Sezione tipo S2b: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione e particolare dell'intorno del cavo

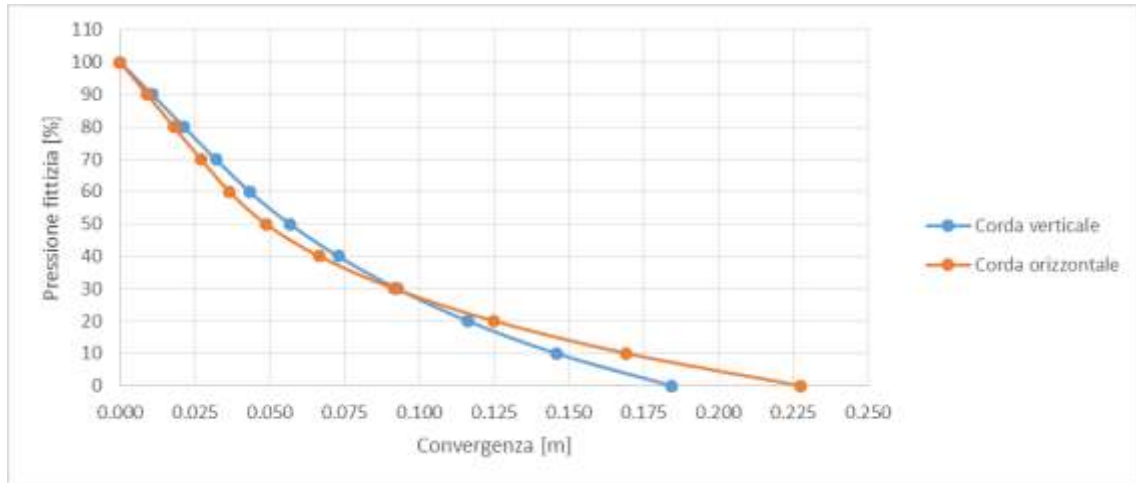


Figura 6.10 – Sezione tipo S2b: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

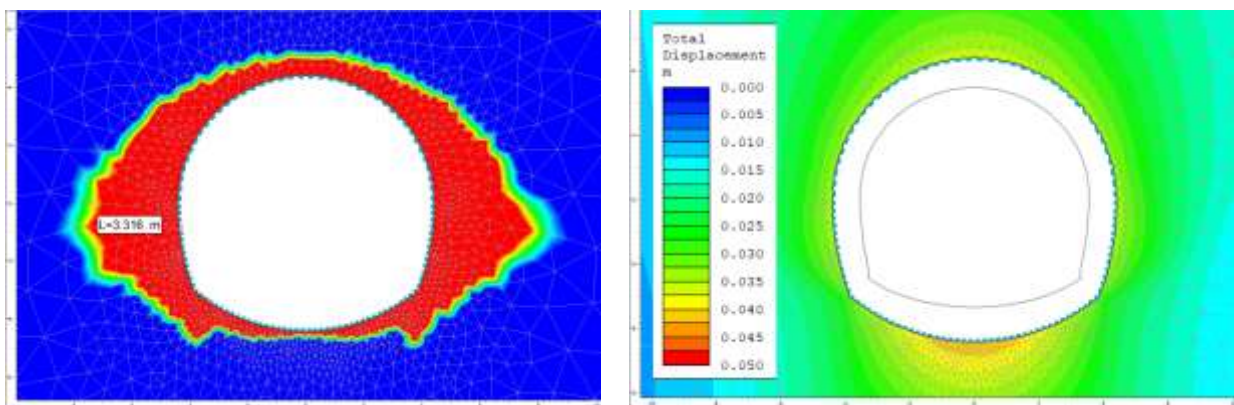


Figura 6.11 – Sezione tipo S2b: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

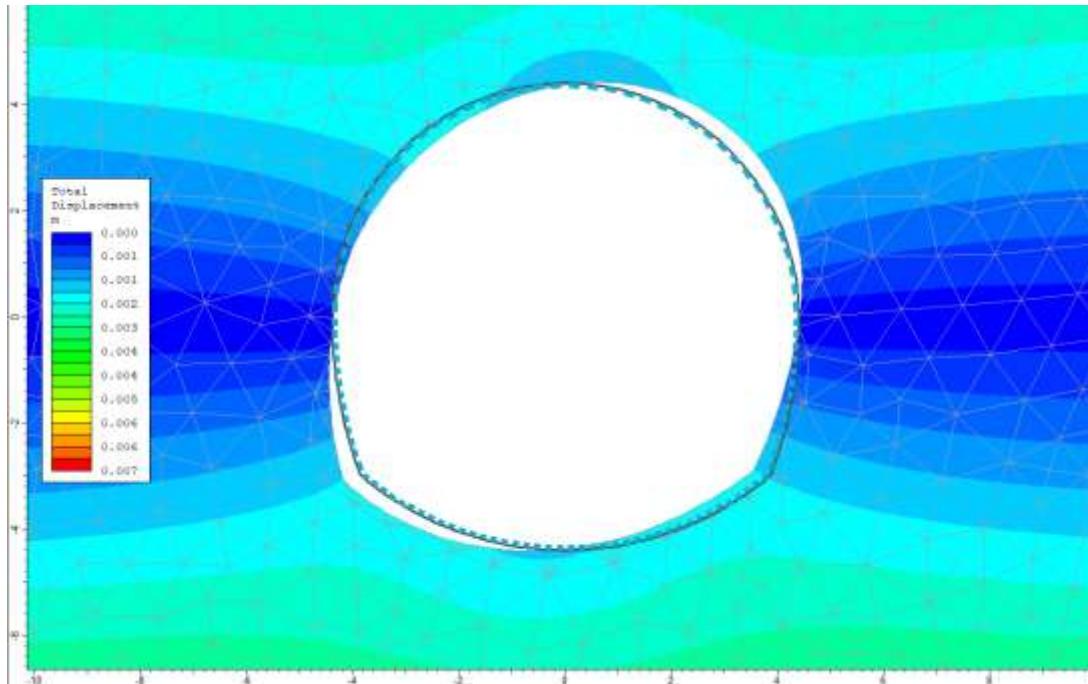


Figura 6.12 – Sezione tipo S2b: spostamenti e deformata aggiuntivi relativi al solo step 6

L'esame delle simulazioni numeriche evidenzia che:

- le analisi svolte con il metodo di convergenza confinamento mostrano come il terreno circostante la galleria mantenga un comportamento sostanzialmente elastico fino ad un rilascio parziale nell'ordine del 40% per i piedritti e del 60% per la calotta. Superate tali soglie iniziano a formarsi le prime zone di plasticizzazione. Sulla base dei grafici mostrati si sono ipotizzati i valori del rilascio tensionale parziale indicati nel paragrafo 6.1.
- Il raggio plastico raggiunge allo step 5 il valore massimo, in corrispondenza dei piedritti, pari a circa 3.30 m, mentre risulta estremamente contenuto in corrispondenza della calotta e dell'arco rovescio dove raggiunge rispettivamente i valori di circa 0.55 m e 0.25 m
- Gli spostamenti massimi calcolati allo step 5 valgono 3.4 cm in corrispondenza dei piedritti, 3.7 cm in corrispondenza della calotta e 4.2 cm in corrispondenza dell'arco rovescio
- Durante la fase sismica si ha una leggera variazione della plasticizzazione nell'intorno del cavo ed una variazione della deformazione del contorno legata alla distorsione di taglio causata dalla deformazione sismica imposta al modello numerico
- Le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori piuttosto limitati e decisamente inferiori ai limiti di resistenza delle strutture previste, come mostrato nel capitolo successivo.

6.5 Sezione tipo Sf-imb

Per la simulazione della sezione tipo Sf-imb sono state considerate le condizioni geometriche e stratigrafiche in prossimità dell'imbocco della galleria considerando una copertura pari a 15 m.

In considerazione della modesta copertura il modello è stato esteso fino al piano campagna. La stratigrafia di analisi simulata nel modello numerico (Figura 6.13) vede la presenza di un unico litotipo costituito dalle Argille limose grigie azzurre (Ag).

La sezione di calcolo è stata assunta, cautelativamente, considerando la sezione di scavo ad un terzo del campo di avanzamento.

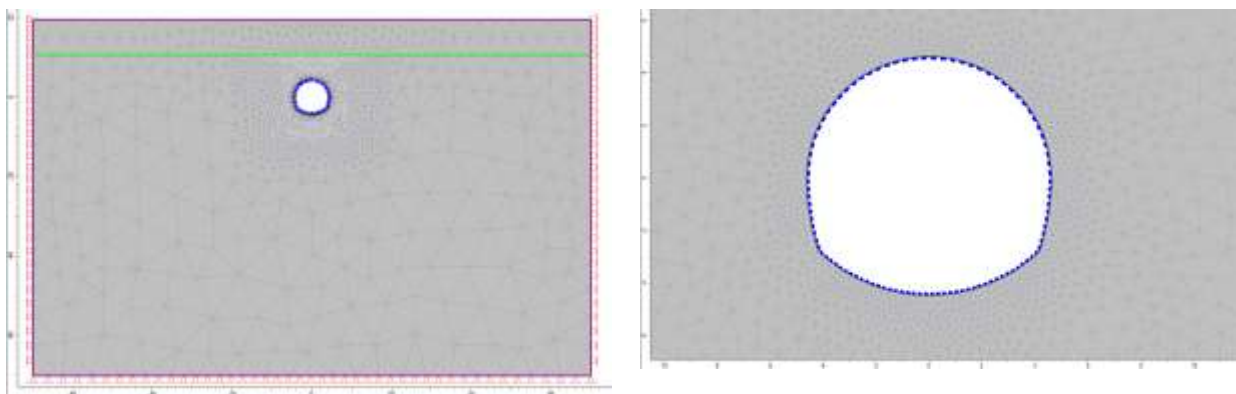


Figura 6.13 – Sezione tipo Sf-imb: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione e particolare dell'intorno del cavo

I risultati delle analisi sono illustrati nelle figure seguenti in cui sono riportati:

- I diagrammi di convergenza confinamento attraverso cui si sono definite le percentuali di rilascio parziale da attribuire alle diverse fasi della simulazione;
- il diagramma con l'estensione della fascia plastica ed il campo di spostamento del terreno nell'intorno della galleria relativi all'ultimo step dell'analisi statica ed allo step aggiuntivo di analisi sismica.

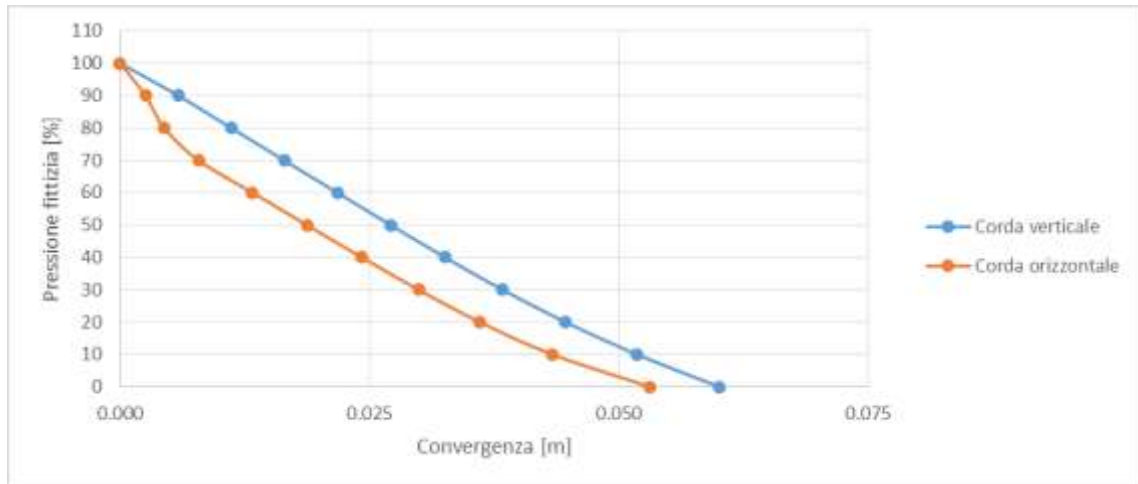


Figura 6.14 – Sezione tipo Sf-imb: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

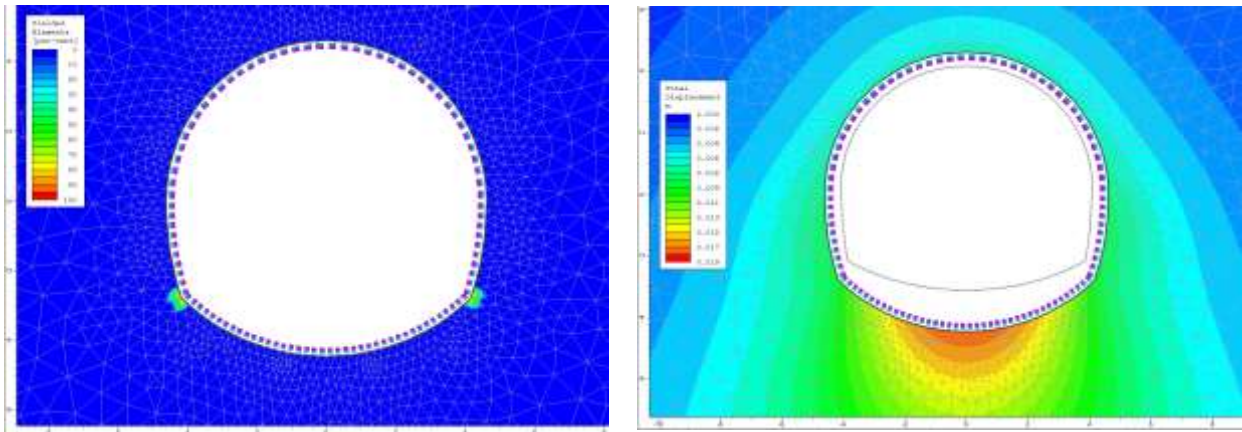


Figura 6.15 – Sezione tipo S2b: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 6

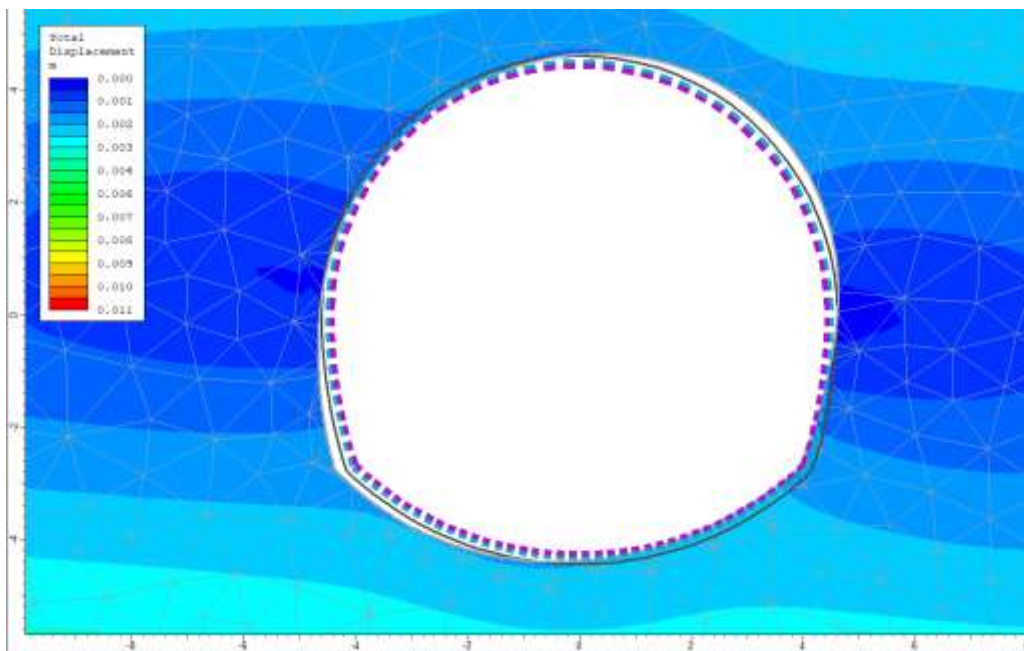


Figura 6.16 – Sezione tipo Sf-imb: spostamenti e deformata aggiuntivi relativi al solo step 7

L'esame delle simulazioni numeriche evidenzia che:

- le analisi svolte con il metodo di convergenza confinamento mostrano come il terreno circostante la galleria mantenga un comportamento sostanzialmente elastico fino ad un rilascio parziale nell'ordine del 80% per i piedritti e del 90% per la calotta. Superate tali soglie iniziano a formarsi le prime zone di plasticizzazione. Sulla base dei grafici mostrati si sono ipotizzati i valori del rilascio tensionale parziale indicati nel paragrafo 6.1;
- al termine dell'analisi non si osserva l'insorgenza di zone plastiche nel terreno, ad eccezione degli elementi in prossimità degli spigoli nei nodi piedritto arco rovescio;
- Gli spostamenti massimi calcolati allo step 6 valgono 0.7 cm in corrispondenza dei piedritti, 0.6 cm in corrispondenza della calotta e 1.9 cm in corrispondenza dell'arco rovescio;
- durante la fase sismica non si osservano variazioni della plasticizzazione nell'intorno del cavo, mentre si osserva una leggera variazione della deformazione del contorno legata alla distorsione di taglio causata dalla deformazione sismica imposta al modello numerico;
- le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori decisamente contenuti e sicuramente inferiori ai limiti di resistenza delle strutture previste, come mostrato nel capitolo successivo.

7. VERIFICHE STRUTTURALI DEI SOSTEGNI

Per il predimensionamento delle strutture di rivestimento della galleria idraulica si è effettuato il calcolo delle sollecitazioni nelle strutture tramite una serie di analisi numeriche di interazione tra le strutture di rivestimento stesse ed il terreno circostante che hanno consentito di valutare lo stato tensio-deformativo nelle strutture e nel terreno. I risultati ottenuti dalle suddette analisi sono descritti e commentati nel Capitolo precedente della presente relazione.

Le verifiche di predimensionamento delle strutture previste dal progetto sono state condotte relativamente sia alle strutture costituenti il rivestimento di prima fase sia alle strutture costituenti il rivestimento definitivo.

7.1 Approcci di calcolo

Con riferimento ai valori delle caratteristiche di sollecitazione derivati dall'analisi numerica, sono state condotte le verifiche del rivestimento in ottemperanza alle norme vigenti per i materiali impiegati. Le verifiche della sicurezza e delle prestazioni sono state condotte adottando il metodo semi-probabilistico agli Stati Limite Ultimi proposto dalle NTC 2018.

Per ciascuna fase dell'analisi sono state individuate le sezioni di massima sollecitazione, in relazione ai valori massimi calcolati di sforzo normale, momento flettente e sforzo di taglio e ne è stato verificato il dimensionamento e la compatibilità con la resistenza dei materiali adottati.

Le caratteristiche dei materiali adottati per le strutture di rivestimento sono richiamate al Paragrafo 0 della presente relazione.

Le verifiche sono state effettuate in riferimento alla seguente combinazione di coefficienti:

approccio 1 - combinazione 1: A1+M1+R1

in quanto è la combinazione più severa nei confronti del dimensionamento strutturale delle opere a contatto con il terreno. I coefficienti parziali per le azioni γ_F utilizzati nelle analisi sono quelli indicati nella Tabella 6.2.I delle NTC 2018, qui riportata (Tabella 7.1).

I coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno γ_M utilizzati nelle analisi sono quelli indicati nella Tabella 6.2.II delle NTC 2018, qui riportata (Tabella 7.2).

Tabella 7.1 – Coefficienti parziali delle azioni (Tabella 6.2.I NTC2018)

Carichi	Effetto	Coefficiente	EQU	A1 STR	A2 GEO
Permanenti G ₁	Favorevoli	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Permanenti non strutturali G ₂ ⁽¹⁾	Favorevoli	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Variabili	Favorevoli	γ_{Qi}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Per i carichi permanenti G ₂ si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G1}					

Tabella 7.2 – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici (Tabella 6.2.II NTC2018)

Parametro geotecnico		Coefficiente parziale γ_M	
		M1	M2
$\tan\phi'_k$	Tangente dell'angolo di attrito	1,00	1,25
c'_k	Coesione efficace	1,00	1,25
$c_{u,k}$	Resistenza al taglio non drenata	1,00	1,40
γ	Peso di volume	1,00	1,00

Le verifiche di resistenza dei rivestimenti sono state condotte nei confronti della pressoflessione e del taglio considerando, per ciascuna fase di analisi, le caratteristiche di sollecitazione derivanti dalle simulazioni numeriche.

La verifica a pressoflessione dei rivestimenti di prima fase costituiti da calcestruzzo proiettato e centine metalliche viene effettuata considerando il diagramma di resistenza² della sezione composta acciaio-calcestruzzo. Nella verifica viene cautelativamente trascurato il contributo delle fibre presenti nel calcestruzzo proiettato.

La verifica allo Stato Limite Ultimo per taglio dei rivestimenti di prima fase costituiti da calcestruzzo proiettato e centine metalliche viene effettuata considerando solamente la resistenza delle centine e trascurando cautelativamente il contributo del calcestruzzo proiettato. La verifica a taglio viene considerata soddisfatta quando:

$$V_{Sd} \leq V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

con $A_v = A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$

Nei seguenti paragrafi sono illustrati i risultati di calcolo relativi alle verifiche condotte.

² Il diagramma di resistenza della sezione composta acciaio-calcestruzzo è stato ottenuto mediante l'ausilio del software MidasGen 2020.

7.2 Sezione tipo S1

7.2.1 Verifica del rivestimento di prima fase

La sezione tipo S1 presenta un rivestimento di prima fase su tutto il contorno costituito da:

- centine accoppiate HEB 180 passo 1.00 m in acciaio S275
- calcestruzzo proiettato fibrorinforzato classe C30/37 con spessore 20 cm

Come si può osservare dalla figura seguente, tutte le coppie di sollecitazione ricadono internamente al dominio di interazione e pertanto la verifica risulta soddisfatta.

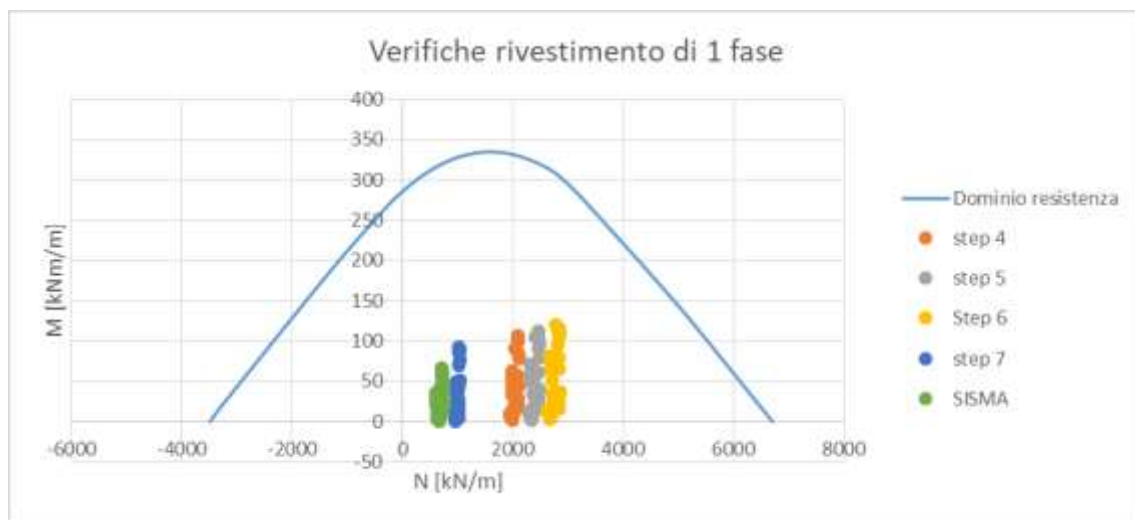


Figura 7.1 – Sezione tipo S1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Il rivestimento di prima fase presenta una resistenza a taglio pari a 751 kN/m. La massima sollecitazione di taglio vale 278 kN/m, pertanto la verifica risulta soddisfatta.

7.2.2 Verifica del rivestimento definitivo

La sezione tipo S1 presenta un rivestimento definitivo dello spessore di 50 cm, realizzato in calcestruzzo di classe C30/37 ed armato con 10+10 ϕ 26 / m. Tale quantità di armatura risulta necessaria per contenere la pressione interna della condotta durante la fase di esercizio.

Come si può osservare dalla figura seguente, tutte le coppie di sollecitazione ricadono internamente al dominio di interazione e pertanto la verifica risulta soddisfatta.

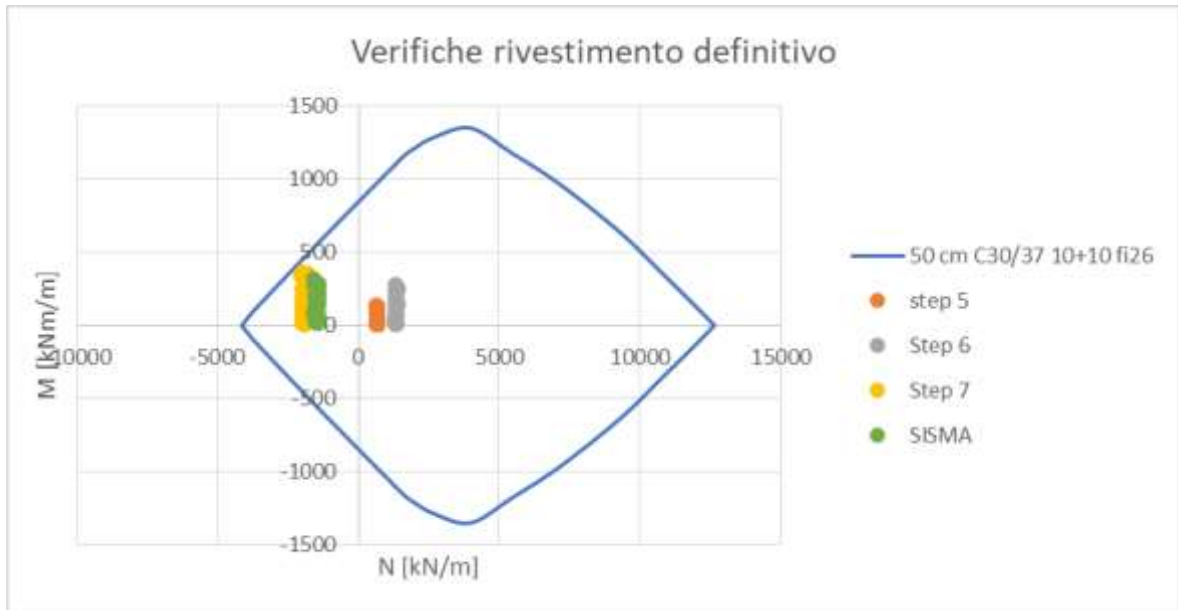


Figura 7.2 – Sezione tipo S1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

La massima sollecitazione di taglio vale 501 kN/m in campo statico e 415 kN/m durante la fase sismica. Considerando la presenza di un'armatura a taglio costituita da staffe $\phi 12$ con maglia 20 x 40 cm si ottiene un taglio resistente pari a 560 kN/m e pertanto la verifica risulta superata.

7.3 Sezione tipo S2a

La sezione tipo S2a presenta unicamente un rivestimento di prima fase su tutto il contorno, il quale costituisce dunque, a tutti gli effetti il rivestimento definitivo della galleria, all'interno del quale verrà poi inghisata la condotta metallica. Il rivestimento ipotizzato in fase di progetto risulta costituito da:

- centine accoppiate HEB 200 passo 1.00 m in acciaio S275
- calcestruzzo proiettato fibrorinforzato classe C30/37 con spessore 30 cm

Come si può osservare dalla figura seguente, tutte le coppie di sollecitazione ricadono internamente al dominio di interazione e pertanto la verifica risulta soddisfatta. Il rivestimento di prima fase presenta una resistenza a taglio pari a 751 kN/m. La massima sollecitazione di taglio vale 643 kN/m, pertanto la verifica risulta soddisfatta.

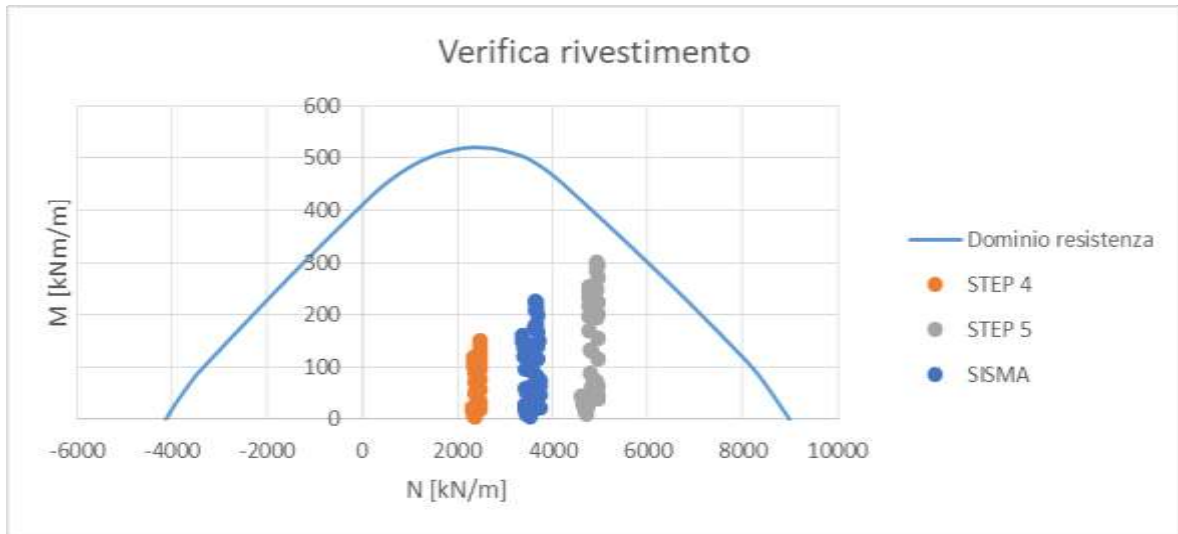


Figura 7.3 – Sezione tipo S2a: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

7.4 Sezione tipo S2b

La sezione tipo S2b presenta unicamente un rivestimento di prima fase su tutto il contorno, il quale costituisce dunque, a tutti gli effetti il rivestimento definitivo della galleria, all'interno del quale verrà poi inghisata la condotta metallica. Il rivestimento ipotizzato in fase di progetto risulta costituito da:

- centine accoppiate HEB 160 passo 1.00 m in acciaio S275
- calcestruzzo proiettato fibrorinforzato classe C30/37 con spessore 30 cm

Come si può osservare dalla figura seguente, tutte le coppie di sollecitazione ricadono internamente al dominio di interazione e pertanto la verifica risulta soddisfatta. Il rivestimento di prima fase presenta una resistenza a taglio pari a 531 kN/m. La massima sollecitazione di taglio vale 235 kN/m, pertanto la verifica risulta soddisfatta.

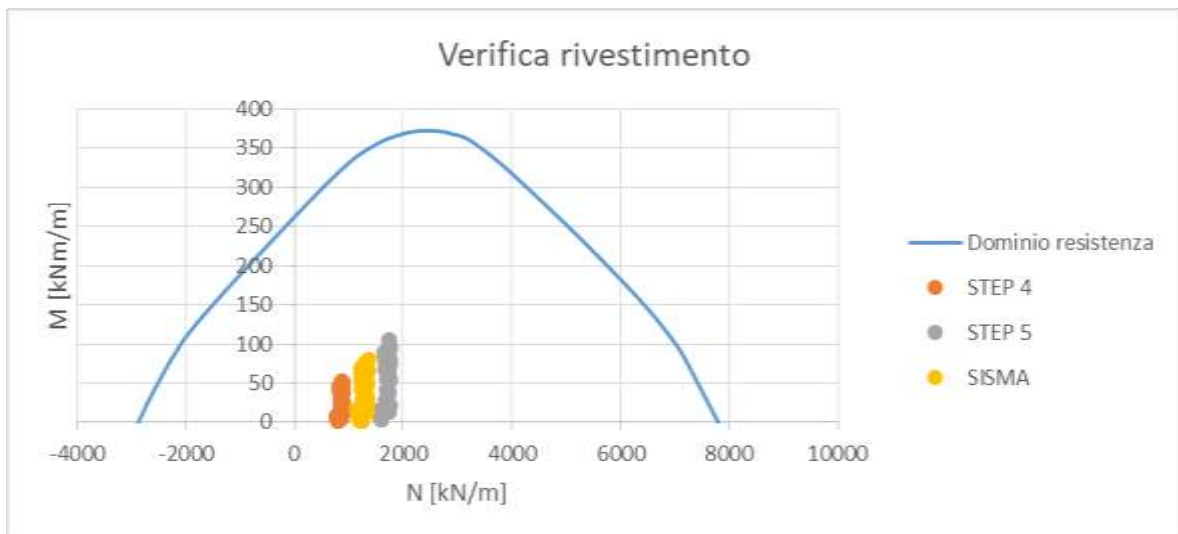


Figura 7.4 – Sezione tipo S2b: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

7.5 Sezione tipo Sf-imb

7.5.1 Verifica del rivestimento di prima fase

La sezione tipo Sf-imb presenta un rivestimento di prima fase su tutto il contorno costituito da:

- centine accoppiate HEB 180 passo 1.00 m in acciaio S275
- calcestruzzo proiettato fibrorinforzato classe C30/37 con spessore 20 cm

Come si può osservare dalla figura seguente, tutte le coppie di sollecitazione ricadono internamente al dominio di interazione e pertanto la verifica risulta soddisfatta.

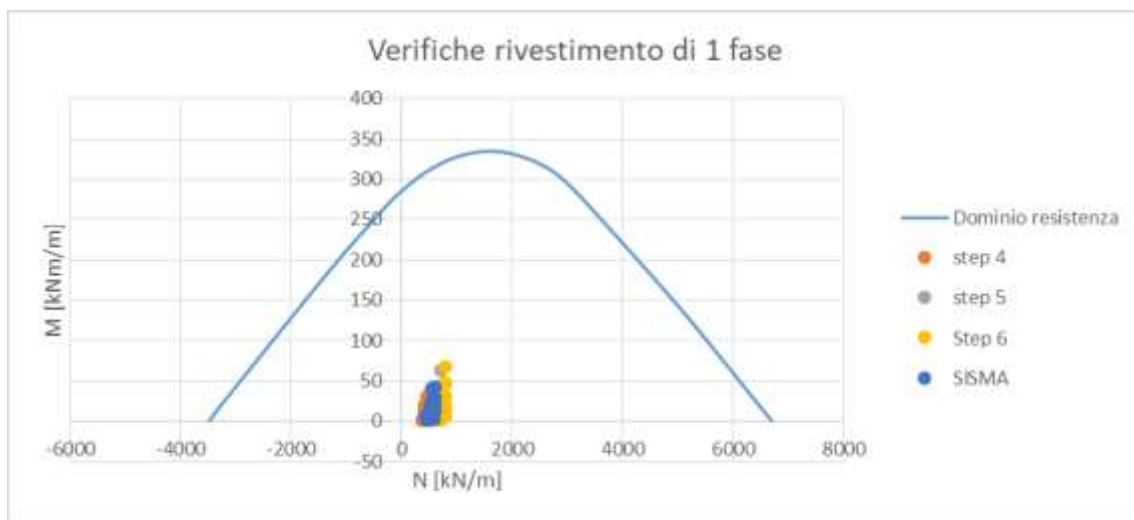


Figura 7.5 – Sezione tipo Sf-imb: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Il rivestimento di prima fase presenta una resistenza a taglio pari a 751 kN/m. La massima sollecitazione di taglio vale 92 kN/m, pertanto la verifica risulta soddisfatta.

7.5.2 Verifica del rivestimento definitivo

La sezione tipo Sf-imb presenta un rivestimento definitivo dello spessore di 50 cm, realizzato in calcestruzzo di classe C30/37 ed armato con 5+5 ϕ 20 / m.

Come si può osservare dalla figura seguente, tutte le coppie di sollecitazione ricadono internamente al dominio di interazione e pertanto la verifica risulta soddisfatta.

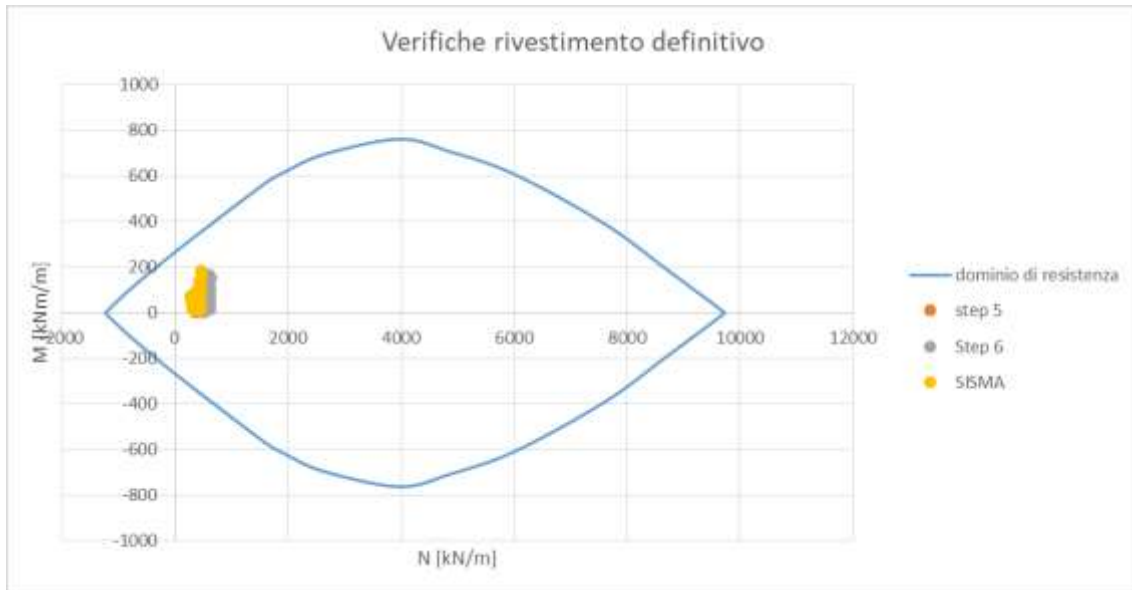


Figura 7.6 – Sezione tipo Sf-imb: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

La massima sollecitazione di taglio vale 202 kN/m in campo statico e 142 kN/m durante la fase sismica. Considerando la presenza di un'armatura a taglio costituita da staffe $\phi 12$ con maglia 40 x 40 cm si ottiene un taglio resistente pari a 280 kN/m e pertanto la verifica risulta superata.