

# Impianto "PESCOPAGANO"

## Impianto di accumulo idroelettrico mediante pompaggio ad alta flessibilità

Comune di Pescopagano (PZ)

### COMMITTENTE



### COORDINAMENTO / MANDANTE



Progettista: Ing. Luigi Lorenzo Papetti

### PROGETTAZIONE GEOTECNICA / MANDATARIA



Progettista: Ing. Luissella Vai

## Relazione descrittiva e di calcolo dei manufatti in sotterraneo

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
0	PROGETTO PRELIMINARE	04/06/2021	S.PIANA	L.VAI	

Codice commessa: 1295

Codifica documento: 1295-F-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 geotecnica delle Argille e Sabbie dell'unità di Ariano.....	7
4.2 Caratterizzazione geotecnica del Flysch Rosso e del Flysch Galestrino .....	9
4.3 Caratterizzazione sismica .....	11
5. DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI PREVISTI.....	14
5.1 Galleria di accesso alla centrale .....	14
5.1.1 Sezione AC1.....	14
5.1.2 Sezione AC1bis .....	15
5.1.3 Sezione AC2.....	16
5.1.4 Sezione AC3.....	17
5.1.5 Sezione AC4.....	18
5.2 Cunicolo delle sbarre .....	19
5.2.1 Sezione CS1.....	20
5.2.2 Sezione CS2.....	21
5.2.3 Sezione CS3.....	22
5.2.4 Sezione CS4.....	23
5.3 Galleria di accesso al pozzo piezometrico .....	24
5.3.1 Sezione AP1 .....	24
5.3.2 Sezione AP2.....	25
5.3.3 Sezione AP3.....	26
5.4 Galleria idraulica – tratto scavato in tradizionale .....	27
5.4.1 Sezione IT1 .....	27
5.4.2 Sezione IT1bis.....	28
5.4.3 Sezione IT2 .....	29
5.4.4 Sezione IT3 .....	30
5.5 Galleria idraulica – tratto scavato con TBM.....	31
5.5.1 Sezione IM1 .....	31
5.5.2 Sezione IM2 .....	31
5.6 Caverna Pozzo Piezometrico.....	32
5.7 Materiali.....	34
6. ANALISI NUMERICHE .....	37

6.1	Generalità.....	37
6.2	Galleria di accesso alla centrale .....	39
6.2.1	Sezione tipo AC1 .....	39
6.2.2	Sezione tipo AC2.....	41
6.2.3	Sezione tipo AC3.....	43
6.3	Cunicolo delle sbarre .....	44
6.3.1	Sezione tipo CS1 .....	44
6.3.2	Sezione tipo CS2.....	46
6.3.3	Sezione tipo CS3.....	48
6.4	Galleria di accesso al Pozzo Piezometrico .....	50
6.4.1	Sezione tipo AP1 .....	50
6.4.2	Sezione tipo AP2.....	52
6.5	Galleria idraulica – tratto scavato in tradizionale .....	54
6.5.1	Sezione tipo IT1.....	55
6.5.2	Sezione tipo IT2.....	57
6.6	Galleria idraulica – tratto scavato con TBM.....	59
6.6.1	Sezione tipo IM1 .....	59
6.6.2	Sezione tipo IM2.....	61
6.7	Caverna Pozzo Piezometrico.....	63
7.	VERIFICHE STRUTTURALI DEI SOSTEGNI .....	66
7.1	Approcci di calcolo.....	66
7.2	Galleria di accesso alla centrale .....	68
7.2.1	Sezione tipo AC1 .....	68
7.2.2	Sezione tipo AC2.....	69
7.2.3	Sezione tipo AC3.....	71
7.3	Cunicolo delle sbarre .....	72
7.3.1	Sezione tipo CS1 .....	72
7.3.2	Sezione tipo CS2.....	74
7.3.3	Sezione tipo CS3.....	75
7.4	Galleria di accesso al Pozzo Piezometrico .....	77
7.4.1	Sezione tipo AP1 .....	77
7.4.2	Sezione tipo AP2.....	78
7.5	Galleria idraulica – tratto scavato in tradizionale .....	80
7.5.1	Sezione tipo IT1.....	80
7.5.2	Sezione tipo IT2.....	81
7.6	Galleria idraulica – tratto scavato con TBM.....	83
7.6.1	Sezione tipo IM1 .....	83
7.6.2	Sezione tipo IM2.....	83
7.7	Caverna Pozzo Piezometrico.....	84

## 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 – Carta geologica con l'indicazione delle principali opere in progetto

Figura 4.2 – Sezione geologica in asse alla galleria di accesso alla centrale in caverna

Figura 4.3 – Sezione geologica in asse al cunicolo delle sbarre

Figura 4.4 – Sezione geologica in asse alla galleria di accesso al Pozzo Piezometrico

Figura 4.5 – Sezione geologica in asse alla galleria idraulica (tratto in Tradizionale) da pk 0+000 a pk 0+1300

Figura 4.6 – Sezione geologica in asse alla galleria idraulica (tratto meccanizzato) da pk 0+1300 a pk 0+3000

Figura 4.7 – Sezione geologica in asse alla galleria idraulica (tratto meccanizzato) da pk 0+3000 a pk 0+4704

Figura 4.8 – Legenda interpretativa

Figura 4.9 – 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 – Sezione tipo AC1: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.2 – Sezione tipo AC1bis: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.3 – Sezione tipo AC2: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.4 – Sezione tipo AC3: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.5 – Sezione tipo AC4: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.6 – Sezione tipo CS1: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.7 – Sezione tipo CS2: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.8 – Sezione tipo CS3: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.9 – Sezione tipo CS4: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.10 – Sezione tipo CS1: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.11 – Sezione tipo AP2: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.12 – Sezione tipo AP3: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.13 – Sezione tipo IT1: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.14 – Sezione tipo AC1bis: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.15 – Sezione tipo AP2: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.16 – Sezione tipo IT3: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.17 – Sezione tipo IM1: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.18 – Sezione tipo IM2: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.19 – Caverna Pozzo Piezometrico, planimetria

Figura 5.20 – Caverna Pozzo Piezometrico, sezione longitudinale

Figura 5.21 – Caverna Pozzo Piezometrico, sezione trasversale in corrispondenza della galleria di accesso

Figura 6.1 – Sezione tipo AC1: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

Figura 6.2 – Sezione tipo AC1: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

Figura 6.3 – Sezione tipo AC1: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

Figura 6.4 – Sezione tipo AC2: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

Figura 6.5 – Sezione tipo AC2: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

Figura 6.6 – Sezione tipo AC2: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

Figura 6.7 – Sezione tipo AC3: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

Figura 6.8 – Sezione tipo AC3: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

Figura 6.9 – Sezione tipo CS1: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

Figura 6.10 – Sezione tipo CS1: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

Figura 6.11 – Sezione tipo CS1: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

Figura 6.12 – Sezione tipo CS2: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

Figura 6.13 – Sezione tipo CS2: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

Figura 6.14 – Sezione tipo CS2: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

Figura 6.15 – Sezione tipo CS3: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

Figura 6.16 – Sezione tipo CS3: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

Figura 6.17 – Sezione tipo CS1: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

Figura 6.18 – Sezione tipo AP1: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

Figura 6.19 – Sezione tipo AP1: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

Figura 6.20 – Sezione tipo AP2: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

Figura 6.21 – Sezione tipo AP2: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

Figura 6.22 – Sezione tipo AP2: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

Figura 6.23 – Sezione tipo IT1: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

Figura 6.24 – Sezione tipo IT1: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

Figura 6.25 – Sezione tipo IT1: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

Figura 6.26 – Sezione tipo IT2: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

Figura 6.27 – Sezione tipo IT2: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

Figura 6.28 – Sezione tipo IT2: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

Figura 6.29 – Sezione tipo IM1: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

Figura 6.30 – Sezione tipo IM1: particolare del rivestimento della galleria simulato come anello continuo (sinistra) e con la presenza di cerniere interne (destra)

Figura 6.31 – Sezione tipo IM1: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

Figura 6.32 – Sezione tipo IM2: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

Figura 6.33 - Sezione tipo IM2: particolare del rivestimento della galleria simulato come anello continuo (sinistra) e con la presenza di cerniere interne (destra)

Figura 6.34 – Sezione tipo IM2: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

Figura 6.35 – Caverna Pozzo Piezometrico: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

Figura 6.36 – Caverna Pozzo Piezometrico: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

Figura 7.1 – Sezione tipo AC1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Figura 7.2 – Sezione tipo AC1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

Figura 7.3 – Sezione tipo AC2: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Figura 7.4 – Sezione tipo AC2: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

Figura 7.5 – Sezione tipo AC3: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Figura 7.6 – Sezione tipo AC3: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

Figura 7.7 – Sezione tipo CS1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Figura 7.8 – Sezione tipo CS1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

Figura 7.9 – Sezione tipo CS2: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Figura 7.10 – Sezione tipo CS2: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

Figura 7.11 – Sezione tipo CS3: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Figura 7.12 – Sezione tipo CS3: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

Figura 7.13 – Sezione tipo AP1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Figura 7.14 – Sezione tipo AP1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

Figura 7.15 – Sezione tipo AP2: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Figura 7.16 – Sezione tipo AP2: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

Figura 7.17 – Sezione tipo IT1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Figura 7.18 – Sezione tipo IT1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

Figura 7.19 – Sezione tipo IT2: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Figura 7.20 – Sezione tipo IT2: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

Figura 7.21 – Sezione tipo IM1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

Figura 7.22 – Sezione tipo IM2: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

Figura 7.23 – Caverna Pozzo Piezometrico: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Figura 7.24 – Caverna Pozzo Piezometrico: 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 della Progettazione Preliminare di un impianto di pompaggio puro nel comune di Pescopagano (PZ), realizzando un bacino artificiale a valle dell'esistente invaso di Saetta, nel medesimo comune, in località Convento di San Lorenzo.

In particolare la presente relazione ha per oggetto le analisi di progetto e verifica delle diverse opere in sotterraneo, ad eccezione della caverna che ospiterà la centrale la quale, per via della sua complessità, viene trattata separatamente nell'elaborato 1295-F-GD-R-01 (*Centrale in caverna - Relazione tecnica particolareggiata e di predimensionamento*). 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 delle diverse opere, redatta sulla base dei dati della campagna geologico-geotecnica integrativa, effettuata nel corso del 2020, unitamente ai dati già disponibili delle precedenti campagne di indagine. 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.

## **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.

Entrambi 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:

- Relazione geologica e idrogeologica generale;
- Relazione geotecnica generale.

In Figura 4.1 si riporta una carta geologica dell'area di interesse con l'indicazione delle principali opere che costituiscono l'impianto in progetto.

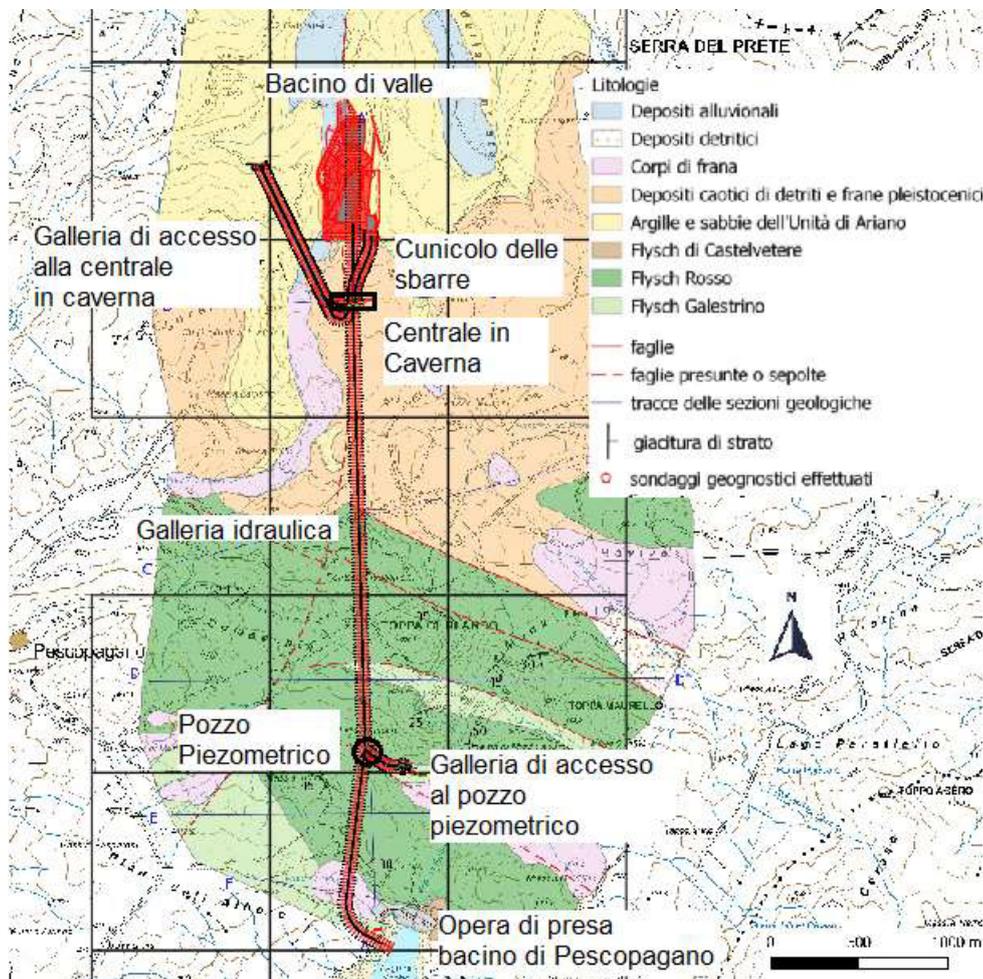


Figura 4.1 – Carta geologica con l'indicazione delle principali opere in progetto

Nelle Figure 4.2 – 4.7 si riportano le sezioni geologiche in asse alla galleria relative alle diverse opere in sotterraneo, mentre in Figura 4.8 si riporta la legenda interpretativa delle diverse unità geologiche.



Figura 4.2 – Sezione geologica in asse alla galleria di accesso alla centrale in caverna

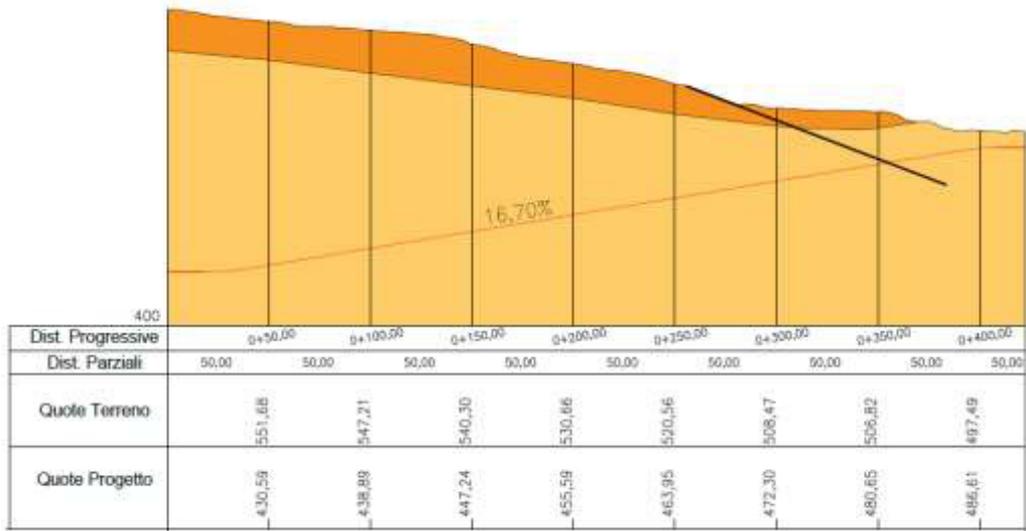


Figura 4.3 – Sezione geologica in asse al cunicolo delle sbarre

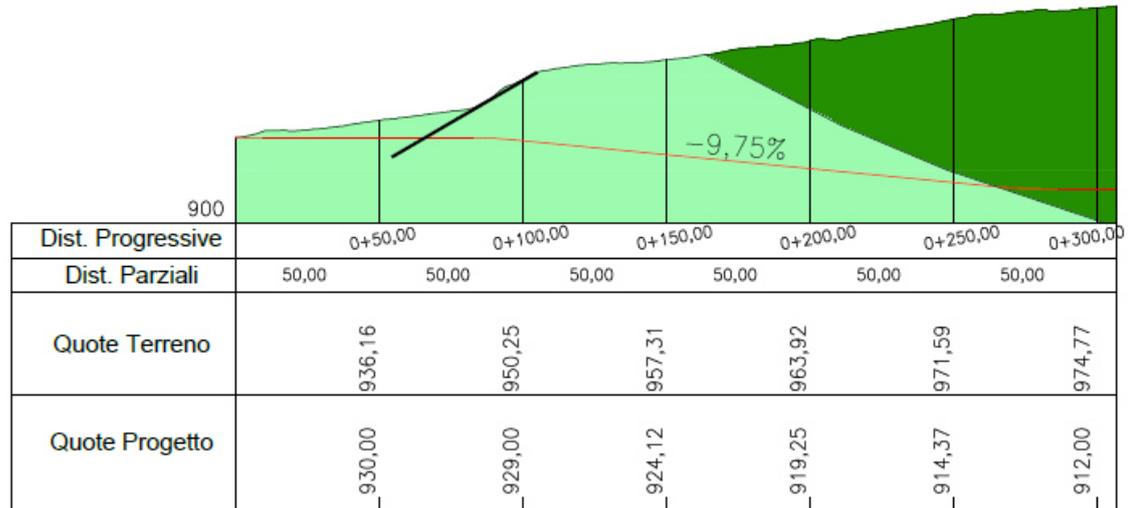


Figura 4.4 – Sezione geologica in asse alla galleria di accesso al Pozzo Piezometrico

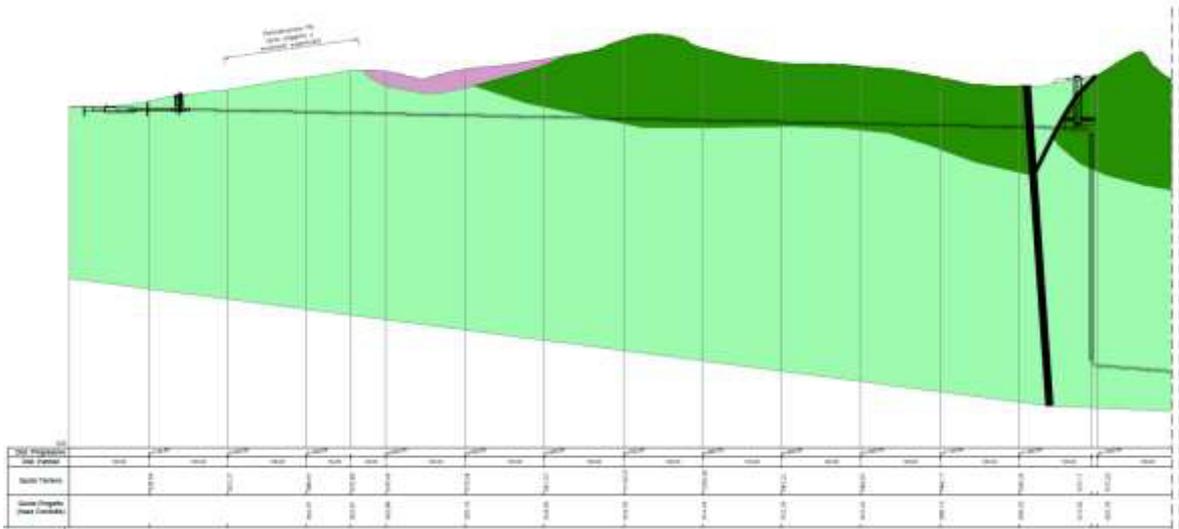


Figura 4.5 – Sezione geologica in asse alla galleria idraulica (tratto in Tradizionale) da pk 0+000 a pk 0+1300

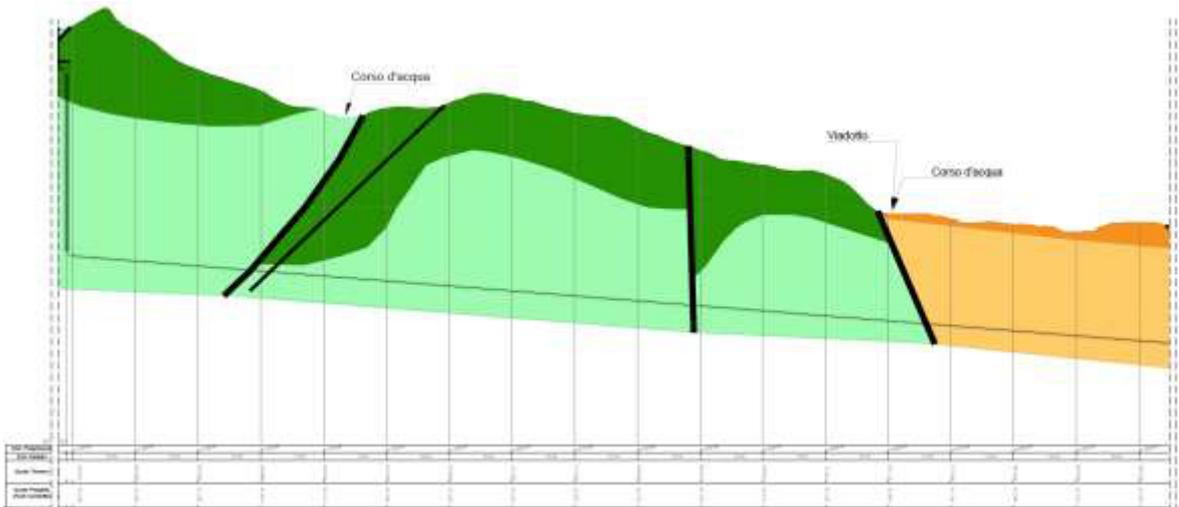


Figura 4.6 – Sezione geologica in asse alla galleria idraulica (tratto meccanizzato) da pk 0+1300 a pk 0+3000

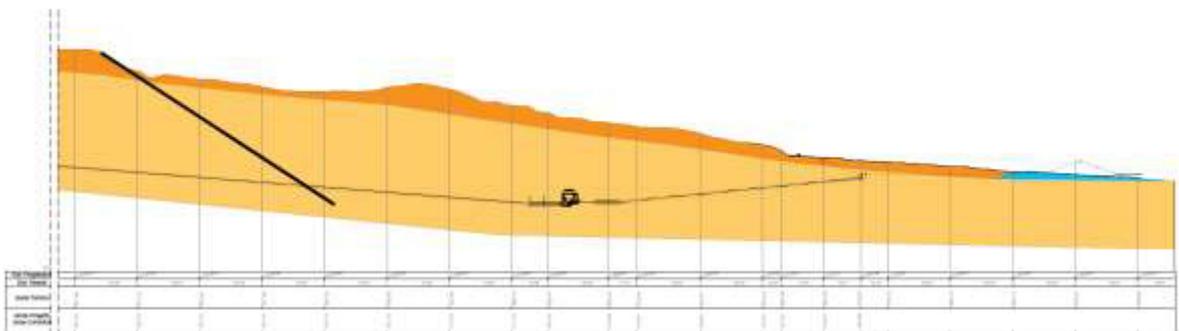


Figura 4.7 – Sezione geologica in asse alla galleria idraulica (tratto meccanizzato) da pk 0+3000 a pk 0+4704

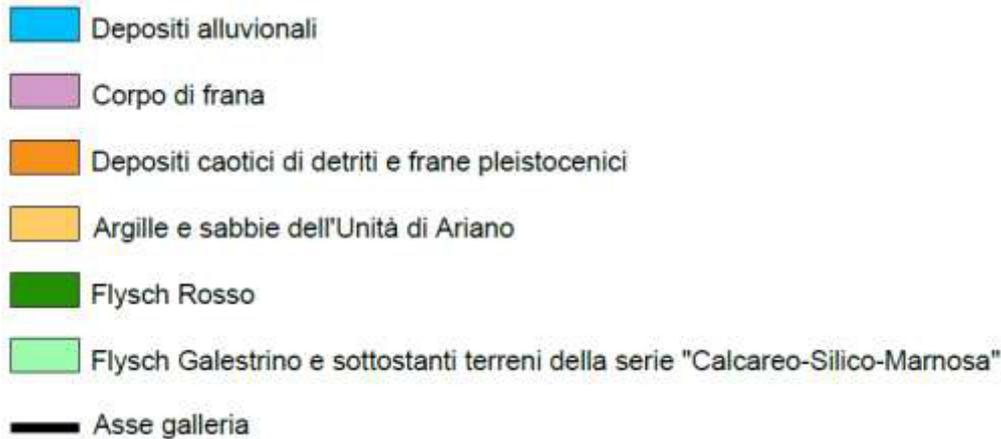


Figura 4.8 – Legenda interpretativa

Dalle figure precedenti è possibile osservare che:

- la galleria di accesso alla centrale (Figura 4.2) ed il cunicolo delle sbarre (Figura 4.3) interesseranno unicamente l'unità geologica delle Argille e sabbie dell'unità di Ariano ed i Depositi caotici di detriti e frane pleistocenici;
- la galleria di accesso al pozzo piezometrico (Figura 4.4), il tratto in tradizionale della galleria idraulica ed il pozzo piezometrico (Figura 4.5) interesseranno unicamente le unità geologiche costituite dal Flysch Rosso e dal Flysch galestrino;
- la galleria idraulica nel tratto a valle del pozzo piezometrico (Figure 4.6 e 4.7), in cui si prevede di realizzare lo scavo con la TBM, interesserà dapprima le unità del Flysch Rosso/Galestrino e a partire dalla pk 0+2600 l'unità delle Argille e sabbie dell'unità di Ariano.

#### 4.1 Caratterizzazione geotecnica delle Argille e Sabbie dell'unità di Ariano

La caratterizzazione geotecnica dell'unità geologica costituita dalle Argille e Sabbie dell'unità di Ariano è stata effettuata basandosi sui dati finora raccolti durante le campagne di indagini preliminari. Tali dati, seppur ancora limitati, hanno consentito di effettuare una prima caratterizzazione dell'unità geotecnica in oggetto. La caratterizzazione è stata effettuata basandosi principalmente sugli stendimenti delle indagini geosismiche e sulle rilevanze ottenute dal sondaggio S2, collocato in prossimità della zona di imbocco della galleria idraulica ed in terreni che, allo stato attuale di conoscenza, possono essere ritenuti geologicamente rappresentativi dell'unità in oggetto. A partire dal sondaggio S2 dunque si è potuta appurare la stratigrafia del terreno fino ad una profondità di 60 m, sono stati prelevati alcuni campioni indisturbati per sottoporli a prove di laboratorio e si sono condotte delle prove in sito di tipo dilatometrico.

A valle delle indagini effettuate è stato possibile ricavare una prima caratterizzazione geomeccanica per l'unità delle Argille e sabbie dell'unità di Ariano. Alla luce delle incer-

tezze attualmente esistenti circa la definizione dei parametri geotecnici da impiegare per le analisi delle opere in sotterraneo, si sono fatte due differenti ipotesi sui parametri di resistenza e di deformabilità:

1. la prima ipotesi si basa sul valore medio dei parametri derivanti dalle prove effettuate sul sondaggio S2
2. la seconda ipotesi, più conservativa, si basa sui valori minimi dei parametri ottenuti dalle prove effettuate sul sondaggio S2.

Inoltre per le sezioni in cui non viene riportato esplicitamente lo strato di depositi superficiali, in assenza di una caratterizzazione specifica degli strati più superficiali, si è ipotizzata, cautelativamente, la presenza di uno strato superficiale dello spessore di 5 m in cui il terreno risulta detensionato e con caratteristiche meccaniche più scadenti rispetto a quelle riscontrate a profondità maggiori.

Le proprietà geotecniche assunte in sede di progetto preliminare sono riassunte nel seguito, ovviamente tali parametri dovranno essere confermati da ulteriori indagini volte a caratterizzare in maniera più rigorosa i terreni presenti in sito:

- Argille e sabbie dell'unità di Ariano (valori medi):
  - $\gamma$  = 24 kN/m<sup>3</sup>, peso di volume
  - E = 1298 MPa, modulo di deformabilità
  - $\nu$  = 0.4, coefficiente di Poisson
  - Criterio di resistenza: Hoek & Brown generalizzato
  - $\sigma_{ci}$  = 7.74 MPa, resistenza a compressione monoassiale
  - $m_b$  = 4.898
  - s = 0.3292
  - a = 0.5
- Argille e sabbie dell'unità di Ariano (valori minimi):
  - $\gamma$  = 24 kN/m<sup>3</sup>, peso di volume
  - E = 565 MPa, modulo di deformabilità
  - $\nu$  = 0.4, coefficiente di Poisson
  - Criterio di resistenza: Hoek & Brown generalizzato
  - $\sigma_{ci}$  = 4 MPa, resistenza a compressione monoassiale
  - $m_b$  = 4.898
  - s = 0.3292
  - a = 0.5
- Argille e sabbie dell'unità di Ariano (detensionate):
  - $\gamma$  = 24 kN/m<sup>3</sup>, peso di volume
  - Criterio di resistenza: Mohr Coulomb
  - $\phi'$  = 30°, angolo di attrito;
  - $c'_p$  = 20 kPa, coesione;

- $E$  = 50 MPa, modulo di deformabilità
- Faglie e zone di disturbo tettonizzate
  - $\gamma$  = 24 kN/m<sup>3</sup>, peso di volume
  - $E$  = 306 MPa, modulo di deformabilità
  - $\nu$  = 0.4, coefficiente di Poisson
  - Criterio di resistenza: Hoek & Brown generalizzato
  - $\sigma_{ci}$  = 4 MPa, resistenza a compressione monoassiale
  - $m_b$  = 1.678
  - $s$  = 0.0117
  - $a$  = 0.503

## 4.2 Caratterizzazione geotecnica del Flysch Rosso e del Flysch Galestrino

La caratterizzazione geotecnica delle unità geologiche costituite dal Flysch Rosso e dal Flysch Galestrino è stata effettuata basandosi sui dati finora raccolti durante le campagne di indagini preliminari. Tali dati, seppur ancora limitati, hanno consentito di effettuare una prima caratterizzazione delle unità geotecniche in oggetto. La caratterizzazione è stata effettuata basandosi principalmente sugli stendimenti delle indagini geosismiche e sulle rilevanze ottenute dal sondaggio S1, collocato in prossimità del pozzo piezometrico ed in terreni che, allo stato attuale di conoscenza, possono essere ritenuti geologicamente rappresentativi dell'unità in oggetto. A partire dal sondaggio S1 dunque si è potuta appurare la stratigrafia del terreno fino ad una profondità di 80 m, sono stati prelevati alcuni campioni indisturbati per sottoporli a prove di laboratorio e si sono condotte delle prove in sito di tipo dilatometrico.

A valle delle indagini effettuate è stato possibile ricavare una prima caratterizzazione geomeccanica per le unità del Flysch Rosso e del Flysch Galestrino. Alla luce delle incertezze attualmente esistenti circa la definizione dei parametri geotecnici da impiegare per le analisi delle opere in sotterraneo, per ciascuna litologia che compone i Flysch (prevalentemente argilliti, calcilutiti e marne per il Flysch Galestrino e calcari, calcareniti e calcilutiti per il Flysch Rosso) si sono fatte differenti ipotesi sui parametri di resistenza e di deformabilità. Inoltre, in assenza di una caratterizzazione specifica degli strati più superficiali, si è ipotizzata, cautelativamente, la presenza di uno strato superficiale dello spessore di 7 m in cui il terreno risulta detensionato e con caratteristiche meccaniche più scadenti rispetto a quelle riscontrate a profondità maggiori.

Le proprietà geotecniche assunte in sede di progetto preliminare sono riassunte nel seguito, ovviamente tali parametri dovranno essere confermati da ulteriori indagini volte a caratterizzare in maniera più rigorosa i terreni presenti in sito.

- Calcari e calcilutiti (valori medi):
  - $\gamma$  = 26 kN/m<sup>3</sup>, peso di volume
  - E = 4700 MPa, modulo di deformabilità
  - $\nu$  = 0.3, coefficiente di Poisson
  - GSI = 50, Geological Strength Index
  - Criterio di resistenza: Hoek & Brown generalizzato
  - $\sigma_{ci}$  = 34 MPa, resistenza a compressione monoassiale
  - $m_b$  = 1.509
  - s = 0.0039
  - a = 0.506
- Calcari e calcilutiti (valori minimi):
  - $\gamma$  = 26 kN/m<sup>3</sup>, peso di volume
  - E = 2700 MPa, modulo di deformabilità
  - $\nu$  = 0.3, coefficiente di Poisson
  - GSI = 35, Geological Strength Index
  - Criterio di resistenza: Hoek & Brown generalizzato
  - $\sigma_{ci}$  = 34 MPa, resistenza a compressione monoassiale
  - $m_b$  = 0.883
  - s = 0.0007
  - a = 0.516
- Calcari e calcilutiti (Faglie e zone di disturbo tettonizzate):
  - $\gamma$  = 26 kN/m<sup>3</sup>, peso di volume
  - E = 870 MPa, modulo di deformabilità
  - $\nu$  = 0.4, coefficiente di Poisson
  - GSI = 15, Geological Strength Index
  - Criterio di resistenza: Hoek & Brown generalizzato
  - $\sigma_{ci}$  = 34 MPa, resistenza a compressione monoassiale
  - $m_b$  = 0.432
  - s = 0.0001
  - a = 0.561
- Argilliti (valori medi):
  - $\gamma$  = 24 kN/m<sup>3</sup>, peso di volume
  - E = 1200 MPa, modulo di deformabilità
  - $\nu$  = 0.4, coefficiente di Poisson
  - GSI = 40, Geological Strength Index
  - Criterio di resistenza: Hoek & Brown generalizzato
  - $\sigma_{ci}$  = 30 MPa, resistenza a compressione monoassiale
  - $m_b$  = 0.469
  - s = 0.0013
  - a = 0.511

- Argilliti (valori minimi):
  - $\gamma$  = 24 kN/m<sup>3</sup>, peso di volume
  - E = 400 MPa, modulo di deformabilità
  - $\nu$  = 0.4, coefficiente di Poisson
  - GSI = 30, Geological Strength Index
  - Criterio di resistenza: Hoek & Brown generalizzato
  - $\sigma_{ci}$  = 20 MPa, resistenza a compressione monoassiale
  - $m_b$  = 0.328
  - s = 0.0004
  - a = 0.522
- Depositi superficiali:
  - $\gamma$  = 20 kN/m<sup>3</sup>, peso di volume
  - Criterio di resistenza: Mohr Coulomb
  - $\phi'$  = 30°, angolo di attrito;
  - $c'p$  = 20 kPa, coesione;
  - E = 40 MPa, modulo di deformabilità

### 4.3 Caratterizzazione sismica

Come già evidenziato nei documenti di progetto la zona che ospiterà l'impianto è soggetta ad un rischio sismico molto rilevante, di cui è necessario tenere conto in tutte le fasi di progettazione.

In particolare, per quanto si riferisce ai rivestimenti di galleria ed alle altre opere in sotterraneo, 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 4.9.

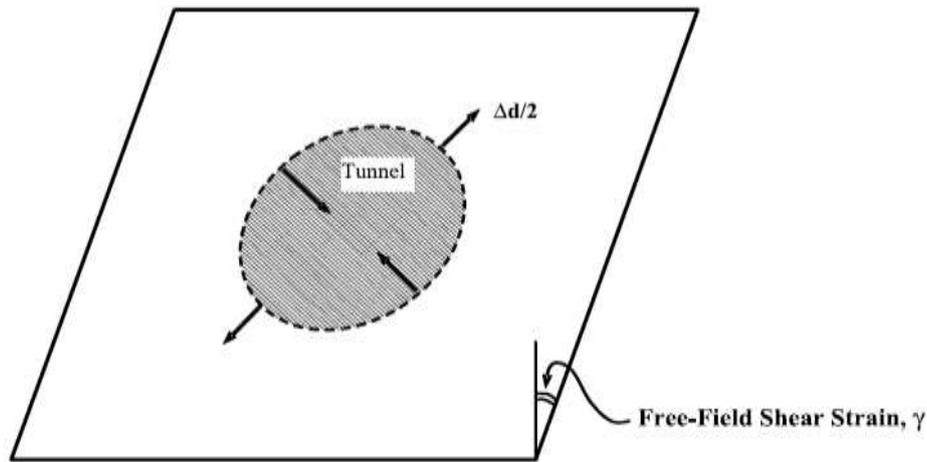


Figura 4.9 – Applicazione delle deformazioni di taglio sui bordi del modello per l'applicazione del Metodo delle deformazioni di taglio puro in campo libero

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.

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:

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

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

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

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

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

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

Opera	Sezione tipo	Litotipo	cat suolo	S	$a_{max,s}$	Copertura (m)	C	$a_{z,max}$	k	$V_s$ (m/s)	$C_s$ (m/s)	$\gamma_{max}$	h/2 (m)	$\Delta x_{max}$ (m)
Accesso alla centrale	AC1 AC2	Marne / Argilliti	B	1.2	0.4516	125	0.7	0.379	94	0.357	750	0.00050	20	0.0095
	AC3		B	1.2	0.4516	15	0.8	0.434	94	0.408	750	0.00054	20	0.0109
Accesso al Pozzo Piezom.	AP1 AP2	Calcari GSI30 GSI50	A	1	0.4541	56	0.7	0.318	66	0.210	1470	0.00014	20	0.0029
	AP1	Argilliti (Flysh)	B	1.2	0.4541	15	0.8	0.436	94	0.410	770	0.00053	20	0.0106
Caverna Pozzo Piezom.	-	Calcari GSI 50	A	1	0.4541	50	0.7	0.318	66	0.210	1470	0.00014	35	0.0050
Cunicolo Sbarre	CS1 CS2	Marne / Argilliti	B	1.2	0.4516	60	0.7	0.379	94	0.357	750	0.00050	20	0.0095
	CS3		B	1.2	0.4516	15	0.8	0.434	94	0.408	750	0.00054	20	0.0109
Idraulica Tradizionale	IT1 IT2	Calcari GSI30 GSI50	A	1	0.4541	56	0.7	0.318	66	0.210	1470	0.00014	20	0.0029
	IT1	Argilliti (Flysh)	B	1.2	0.4541	15	0.8	0.436	94	0.410	770	0.00053	20	0.0106
Idraulica TBM	IM1 IM2	Marne / Argilliti	B	1.2	0.4516	188 170	0.7	0.379	94	0.357	750	0.00050	12.5	0.0059
	IM1	Calcari GSI35	A	1	0.4541	400	0.7	0.318	66	0.210	1470	0.00014	12.5	0.0018
	IM2	Argilliti profonde (Flysh)	B	1.2	0.4541	400	0.7	0.381	94	0.359	1000	0.00036	12.2	0.0045
	IM2	Zone di faglia	B	1.2	0.4541	300	0.7	0.381	94	0.359	800	0.00045	12.2	0.0056

## 5. DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI PREVISTI

Nel presente capitolo si riporta, per ciascuna opera in sotterraneo 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 di accesso alla centrale

La galleria di accesso alla centrale in caverna ha una sezione interna di 8.00 m di larghezza per 8.15 m di altezza ed una lunghezza totale pari a circa 1190 m.

Come si può vedere in Figura 4.2 l'opera ricade totalmente nelle Argille e sabbie dell'unità di Ariano. Per tale opera sono state predimensionate le sezioni tipologiche descritte di seguito.

#### 5.1.1 Sezione AC1

La sezione tipo AC1 (Figura 5.1) è prevista nei tratti in alta copertura dei terreni appartenenti alla formazione delle Argille e sabbie dell'unità di Ariano, dove queste si presentano con caratteristiche geomeccaniche più severe.

Il rivestimento di prima fase di calotta e piedritti sarà costituito da uno strato di 20 cm di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di classe C25/30 e centine accoppiate HEB 180 con interasse longitudinale di 1.20 m.

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 fronte di scavo mediante 27 elementi in VTR iniettati con miscela cementizia.

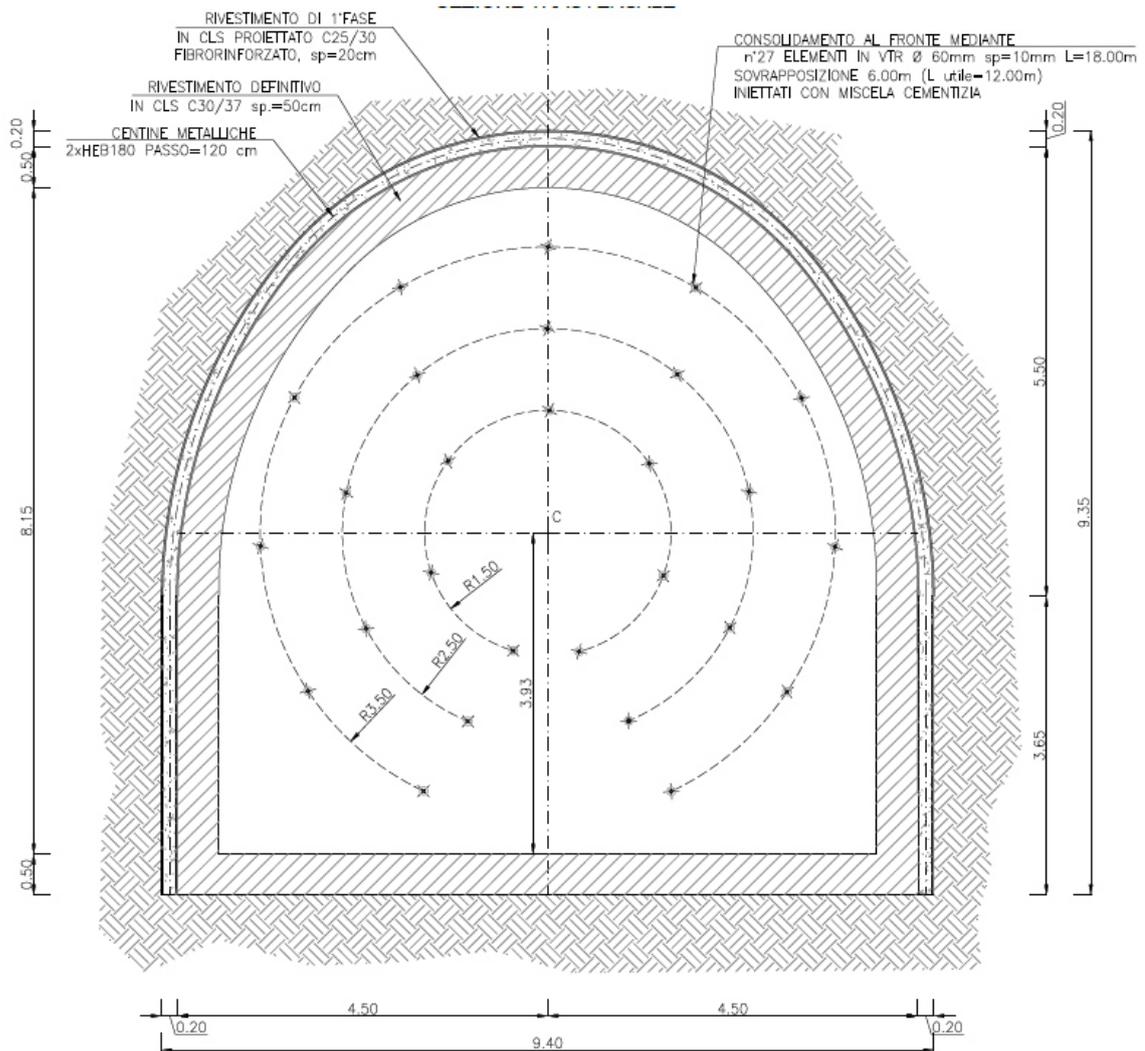


Figura 5.1 – Sezione tipo AC1: geometria del cavo e interventi di sostegno

### 5.1.2 Sezione AC1bis

La sezione tipo AC1bis (Figura 5.2) è prevista nei tratti in alta copertura dei terreni appartenenti alla formazione delle Argille e sabbie dell'unità di Ariano, dove queste si presentano con zone caratterizzate da disturbo tettonico o faglie.

Il rivestimento di prima fase di calotta e piedritti sarà costituito da uno strato di 20 cm di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di classe C25/30 e centine accoppiate HEB 180 con interasse longitudinale di 1.00 m.

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 inoltre la realizzazione di un preconsolidamento del fronte di scavo mediante 27 elementi in VTR iniettati con miscela cementizia

La sezione tipo AC1bis è caratterizzata infine dalla presenza di un arco rovescio idoneo ad una corretta redistribuzione dei carichi e delle deformazioni in terreni particolarmente difficili.

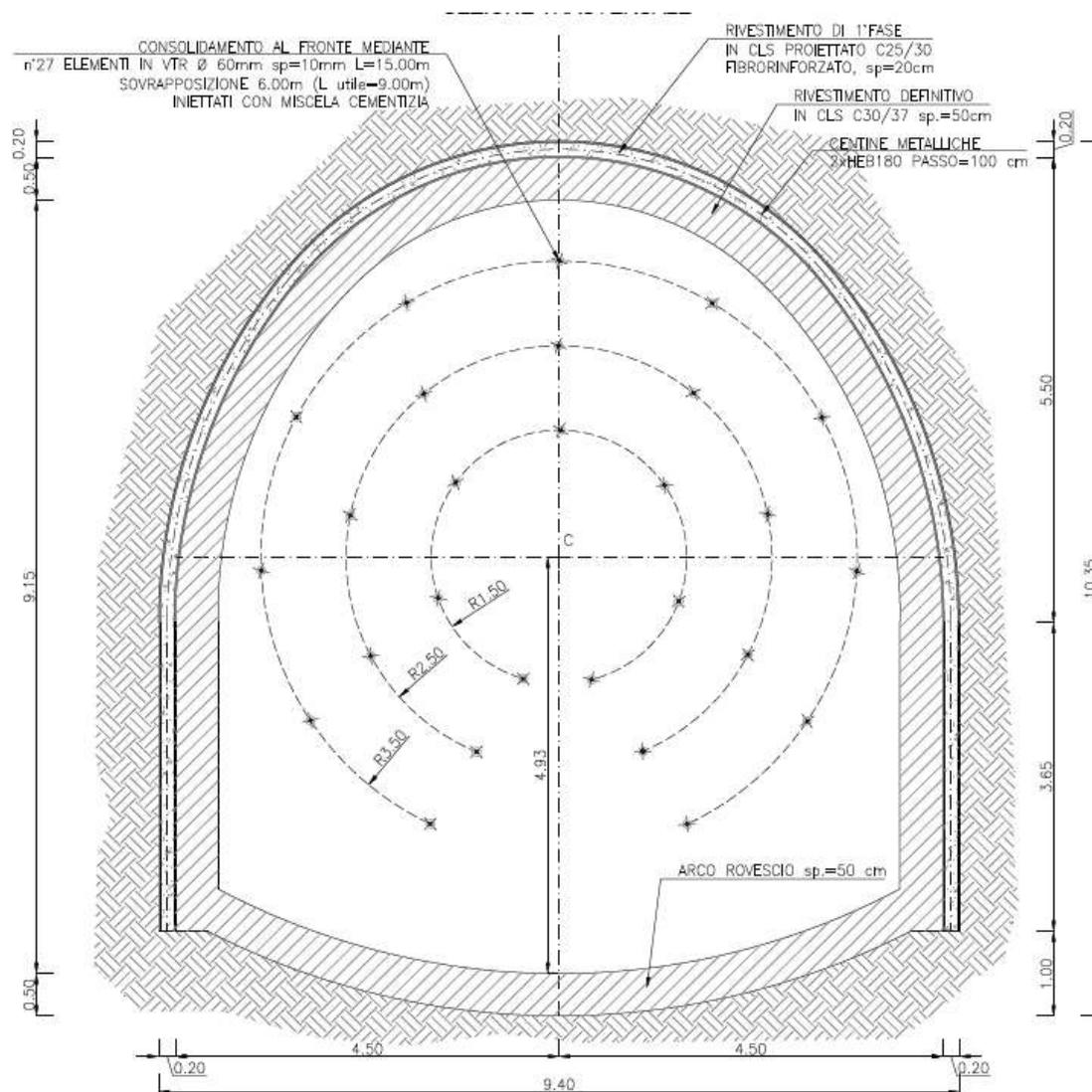


Figura 5.2 – Sezione tipo AC1bis: geometria del cavo e interventi di sostegno

### 5.1.3 Sezione AC2

La sezione tipo AC2 (Figura 5.3) è prevista nei tratti in alta copertura dei terreni appartenenti alla formazione delle Argille e sabbie dell'unità di Ariano, dove queste si presentano con caratteristiche geomeccaniche migliori.

Il rivestimento di prima fase di calotta e piedritti sarà costituito da uno strato di 20 cm di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di classe C25/30 e da 11/12 bulloni auto-perforanti di lunghezza pari a 5 m, posizionati a quinconce con passo pari a 2 m.

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.

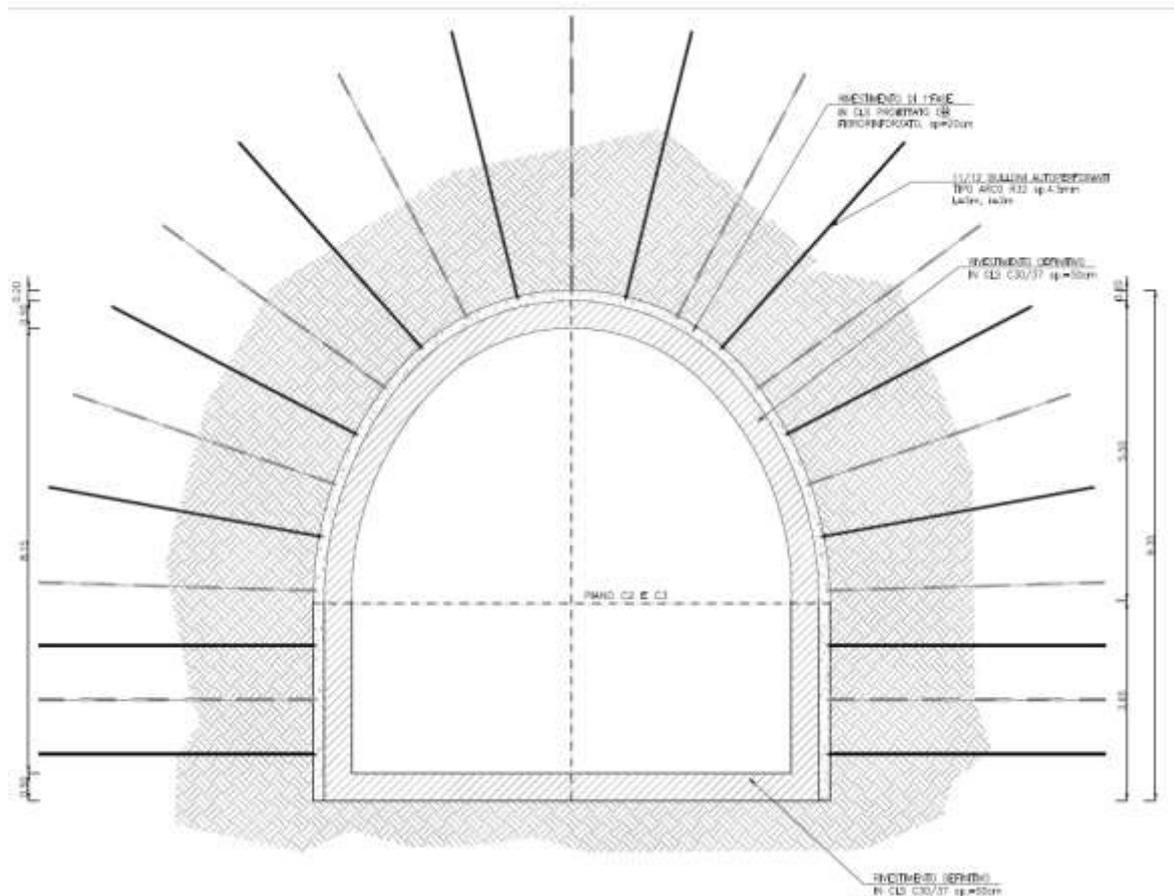


Figura 5.3 – Sezione tipo AC2: geometria del cavo e interventi di sostegno

#### 5.1.4 Sezione AC3

La sezione tipo AC3 (Figura 5.4) è prevista nei tratti in bassa copertura dei terreni appartenenti alla formazione delle Argille e sabbie dell'unità di Ariano.

Il rivestimento di prima fase di calotta e piedritti sarà costituito da uno strato di 20 cm di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di classe C25/30 e centine accoppiate HEB 120 con interasse longitudinale di 1.20 m.

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 fronte di scavo mediante 27 elementi in VTR iniettati con miscela cementizia.

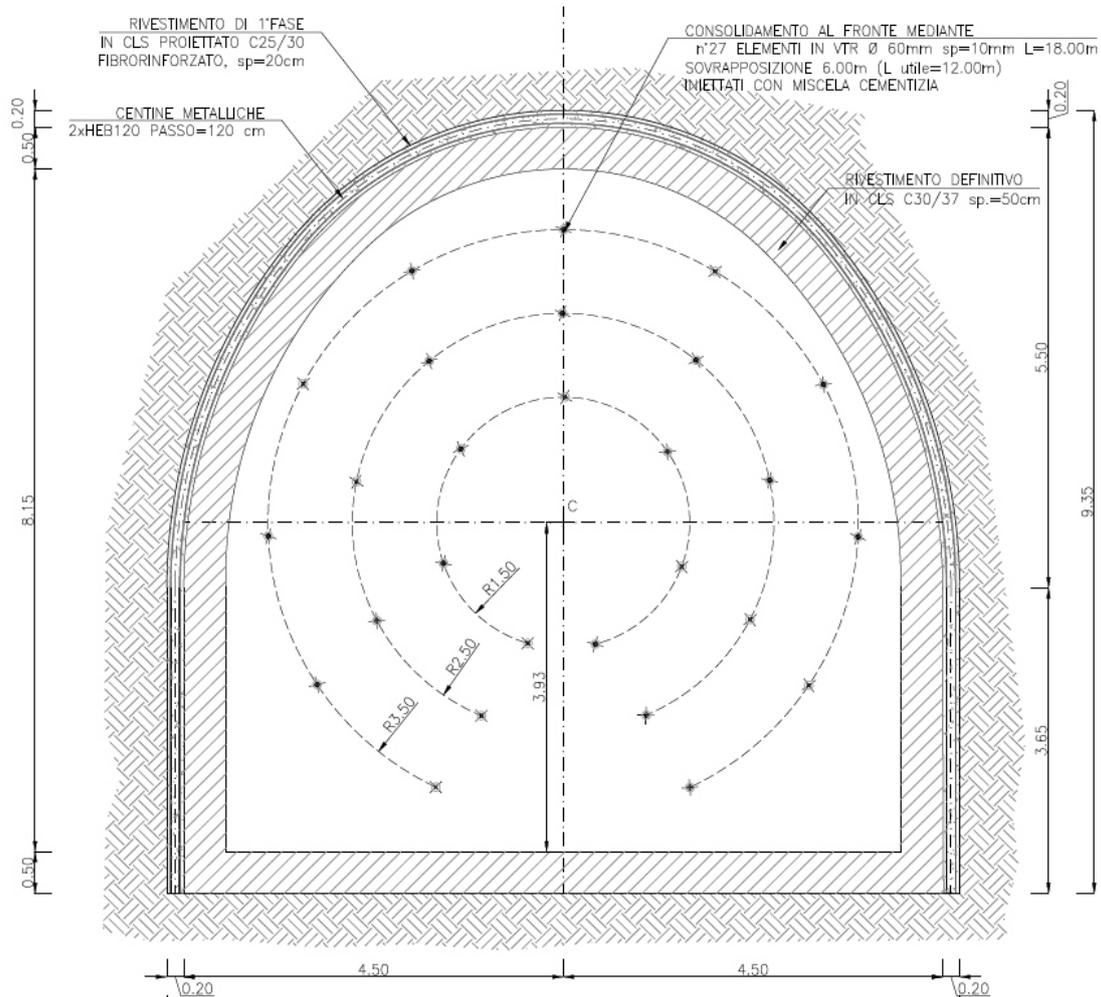


Figura 5.4 – Sezione tipo AC3: geometria del cavo e interventi di sostegno

### 5.1.5 Sezione AC4

La sezione tipo AC4 (Figura 5.5) è prevista in corrispondenza dell'imbocco della galleria di accesso alla centrale.

Il rivestimento di prima fase di calotta e piedritti sarà costituito da uno strato di 20 cm di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di classe C25/30 e centine accoppiate HEB 120 con interasse longitudinale di 1.00 m.

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 con-

torno di scavo mediante 35 infilaggi da realizzarsi sulle reni e sulla calotta con tubi in acciaio iniettati con malta cementizia.

A completamento della galleria si procederà con il getto del rivestimento definitivo dello spessore variabile fra i 50 ed i 104 cm da realizzarsi con calcestruzzo armato di classe C30/37.

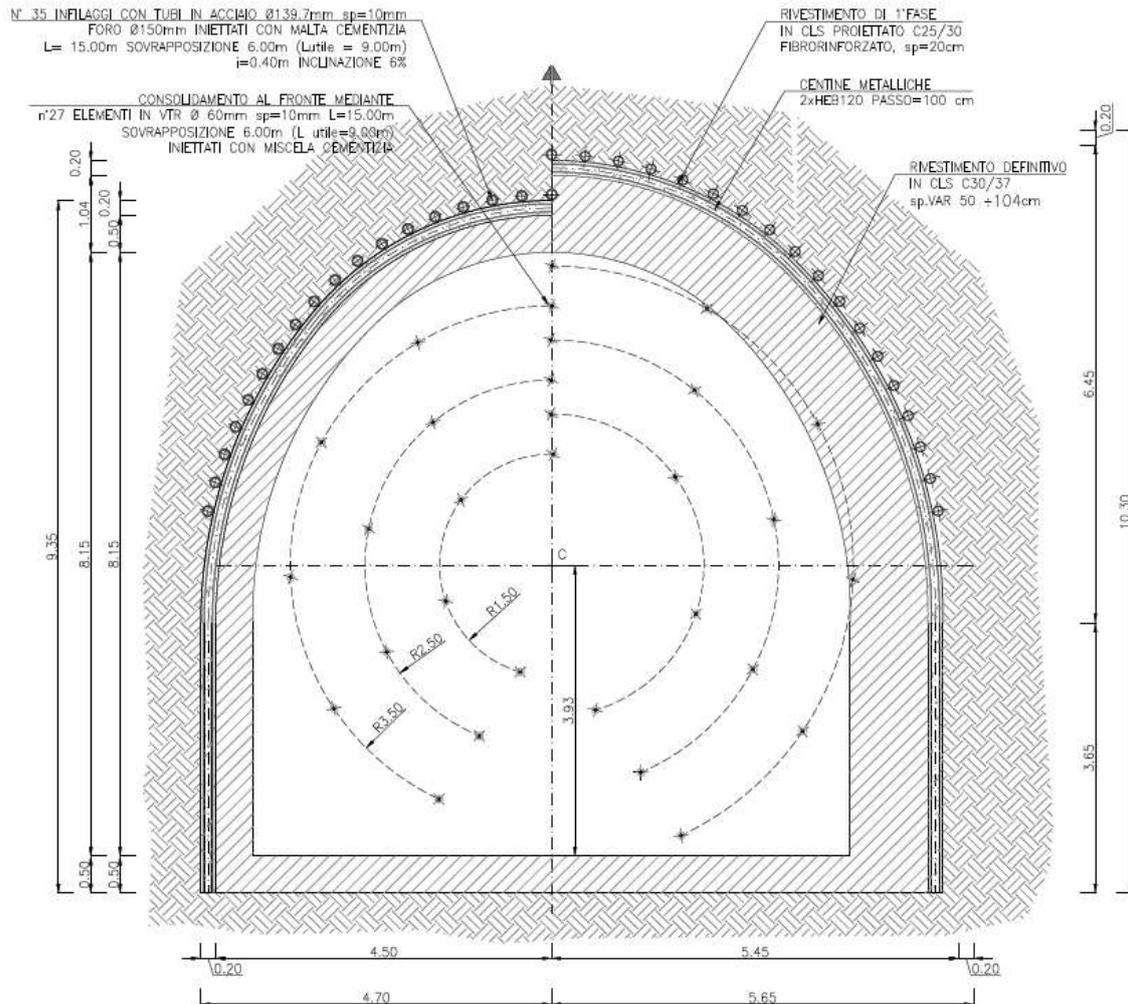


Figura 5.5 – Sezione tipo AC4: geometria del cavo e interventi di sostegno

## 5.2 Cunicolo delle sbarre

Il cunicolo delle sbarre ha una sezione interna di 5.00 m di larghezza per 6.26 m di altezza ed una lunghezza totale pari a circa 344 m.

Come si può vedere in Figura 4.3 l'opera ricade totalmente nelle Argille e sabbie dell'unità di Ariano. Per tale opera sono state predimensionate le sezioni tipologiche descritte di seguito.

### 5.2.1 Sezione CS1

La sezione tipo CS1 (Figura 5.6) è prevista nei tratti in alta copertura dei terreni appartenenti alla formazione delle Argille e sabbie dell'unità di Ariano, dove queste si presentano con caratteristiche geomeccaniche più severe.

Il rivestimento di prima fase di calotta e piedritti sarà costituito da uno strato di 20 cm di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di classe C25/30 e centine accoppiate HEB 180 con interasse longitudinale di 1.20 m.

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.

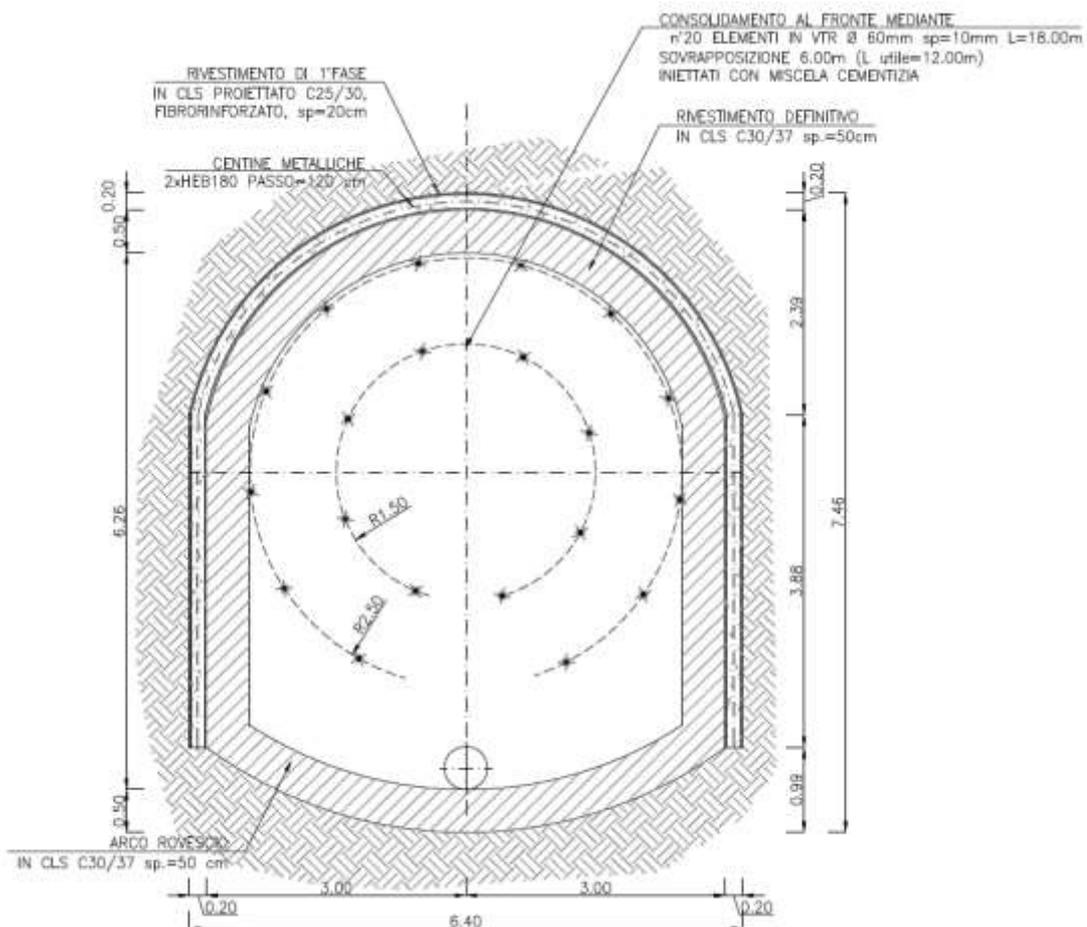


Figura 5.6 – Sezione tipo CS1: geometria del cavo e interventi di sostegno



### 5.2.3 Sezione CS3

La sezione tipo CS3 (Figura 5.8) è prevista nei tratti in bassa copertura dei terreni appartenenti alla formazione delle Argille e sabbie dell'unità di Ariano.

Il rivestimento di prima fase di calotta e piedritti sarà costituito da uno strato di 20 cm di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di classe C25/30 e centine accoppiate HEB 120 con interasse longitudinale di 1.20 m.

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 fronte di scavo mediante 20 elementi in VTR iniettati con miscela cementizia.

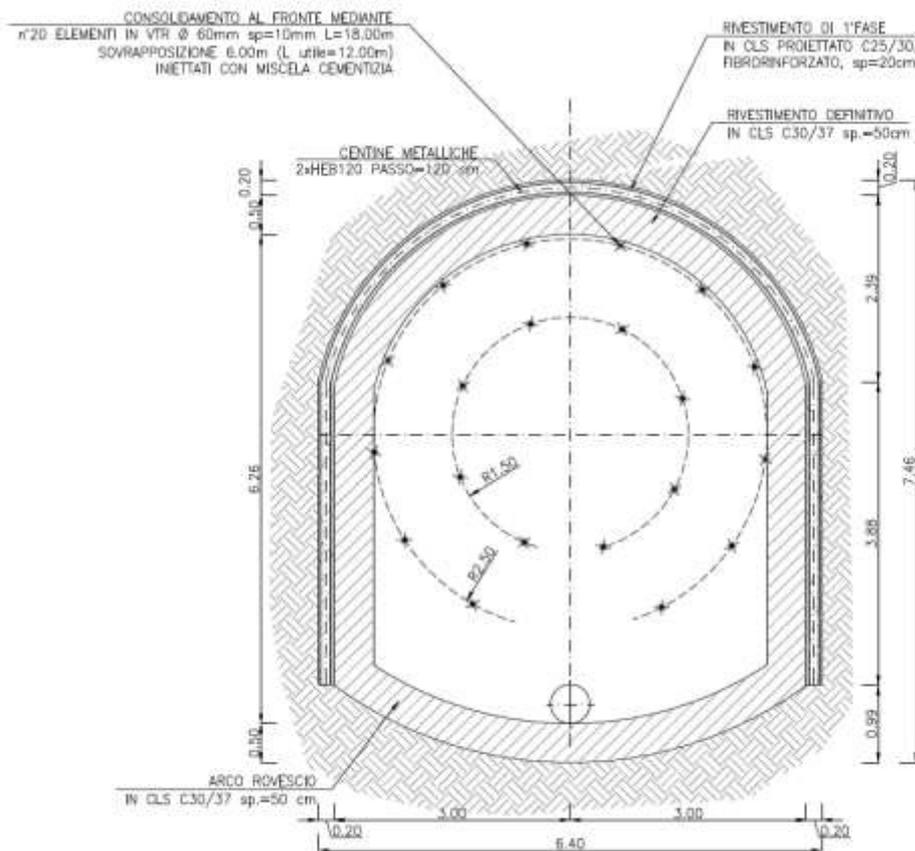


Figura 5.8 – Sezione tipo CS3: geometria del cavo e interventi di sostegno

### 5.2.4 Sezione CS4

La sezione tipo CS4 (Figura 5.9) è prevista in corrispondenza dell'imbocco del cunicolo delle sbarre.

Il rivestimento di prima fase di calotta e piedritti sarà costituito da uno strato di 20 cm di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di classe C25/30 e centine accoppiate HEB 120 con interasse longitudinale di 1.00 m.

Si prevede la realizzazione di un preconsolidamento del fronte di scavo mediante 20 elementi in VTR iniettati con miscela cementizia nonché di un preconsolidamento del contorno di scavo mediante 23 infilaggi da realizzarsi sulle reni e sulla calotta con tubi in acciaio iniettati con malta cementizia.

A completamento della galleria si procederà con il getto del rivestimento definitivo dello spessore variabile fra i 50 ed i 104 cm da realizzarsi con calcestruzzo armato di classe C30/37.

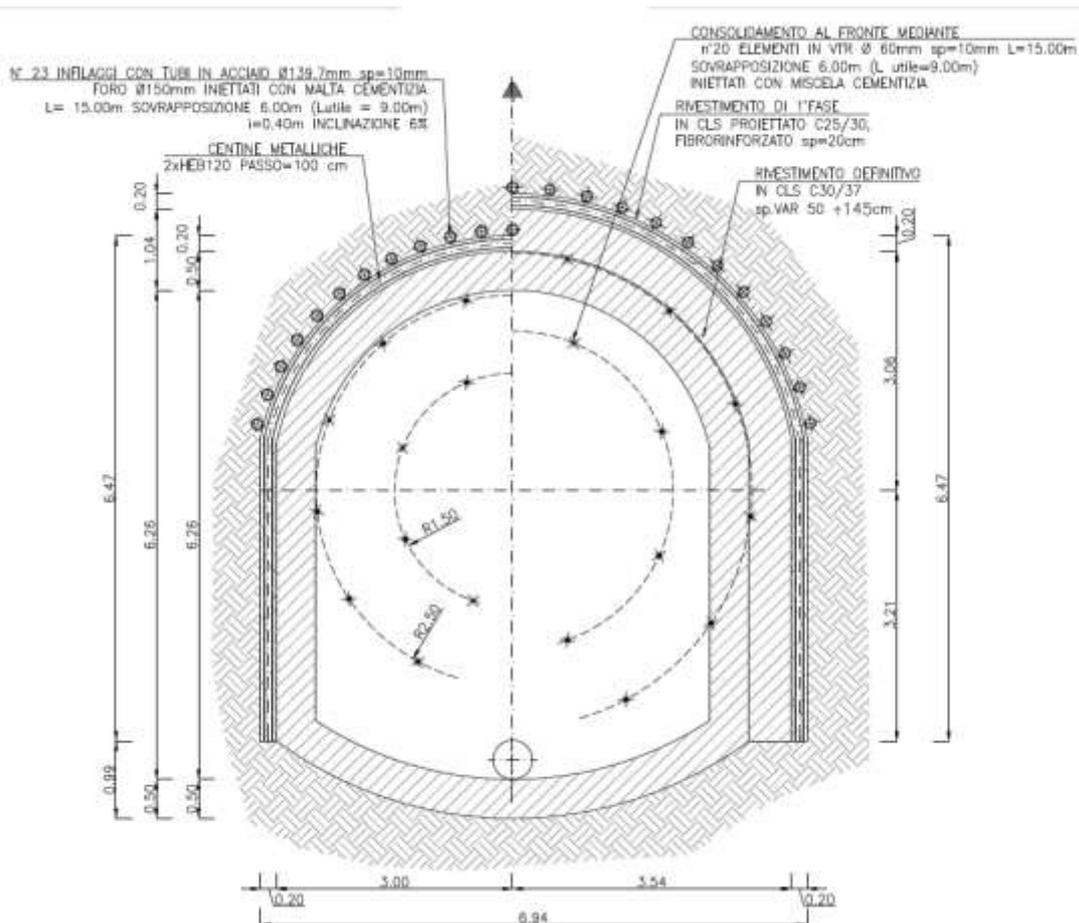


Figura 5.9 – Sezione tipo CS4: geometria del cavo e interventi di sostegno

### 5.3 Galleria di accesso al pozzo piezometrico

La galleria di accesso al pozzo piezometrico ha una sezione interna di 8.00 m di larghezza per 7.00 m di altezza ed una lunghezza totale pari a circa 205 m.

Come si può vedere in Figura 4.4 l'opera attraversa dapprima l'unità geologica del Flysch Galestrino e successivamente quella del Flysch Rosso. Per tale opera sono state predimensionate le sezioni tipologiche descritte di seguito.

#### 5.3.1 Sezione AP1

La sezione tipo AP1 (Figura 5.10) è prevista nei tratti di alta e bassa copertura dei terreni appartenenti alle formazioni dei Flysch, dove queste si presentano con caratteristiche geomeccaniche più severe.

Il rivestimento di prima fase di calotta e piedritti sarà costituito da uno strato di 20 cm di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di classe C25/30 e centine accoppiate HEB 120 con interasse longitudinale di 1.20 m.

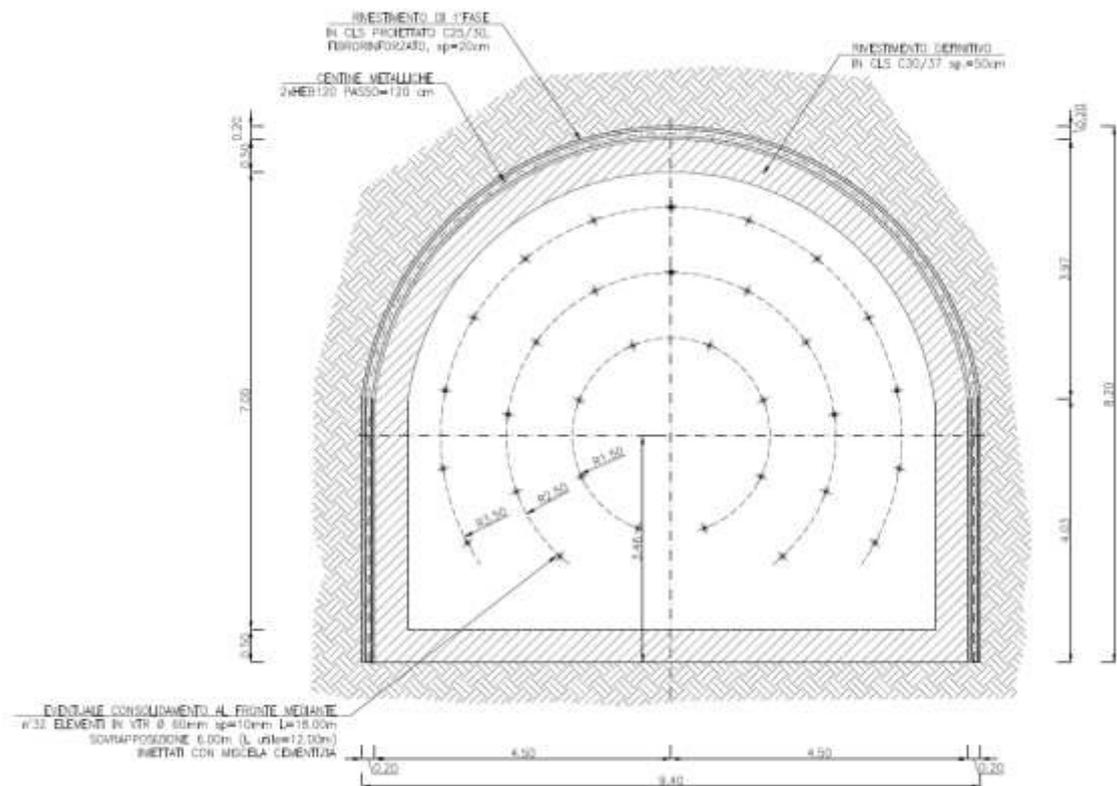


Figura 5.10 – Sezione tipo CS1: geometria del cavo e interventi di sostegno

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 fronte di scavo mediante 32 elementi in VTR iniettati con miscela cementizia.

### 5.3.2 Sezione AP2

La sezione tipo AP2 (Figura 5.11) è prevista nei tratti in alta copertura dei terreni appartenenti alle formazioni dei Flysch, dove queste si presentano con caratteristiche geomeccaniche migliori.

Il rivestimento di prima fase di calotta e piedritti sarà costituito da uno strato di 20 cm di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di classe C25/30 e da 10/11 bulloni auto-perforanti di lunghezza pari a 5 m, posizionati a quinconce con passo pari a 2 m.

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.

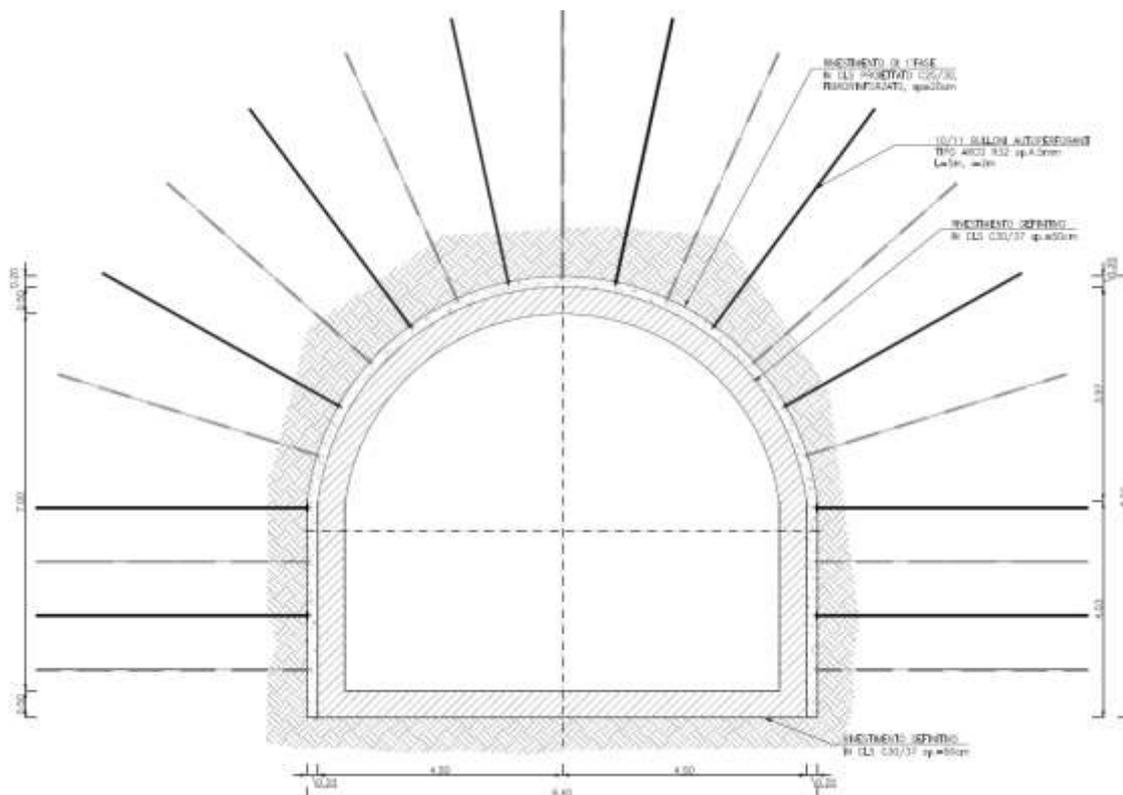


Figura 5.11 – Sezione tipo AP2: geometria del cavo e interventi di sostegno



## 5.4 Galleria idraulica – tratto scavato in tradizionale

La galleria idraulica, nel tratto a monte del pozzo piezometrico in cui verrà scavata con il metodo tradizionale, ha una sezione interna di 4.40 m di larghezza per 4.40 m di altezza ed una lunghezza totale pari a circa 1212 m.

Come si può vedere in Figura 4.5 l'opera attraversa dapprima l'unità geologica del Flysch Galestrino e successivamente quella del Flysch Rosso. Per tale opera sono state predimensionate le sezioni tipologiche descritte di seguito.

### 5.4.1 Sezione IT1

La sezione tipo IT1 (Figura 5.13) è prevista nei tratti di alta e bassa copertura dei terreni appartenenti alle formazioni dei Flysch, dove queste si presentano con caratteristiche geomeccaniche più severe.

Il rivestimento di prima fase di calotta e piedritti sarà costituito da uno strato di 20 cm di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di classe C25/30 e centine accoppiate HEB 120 con interasse longitudinale di 1.20 m.

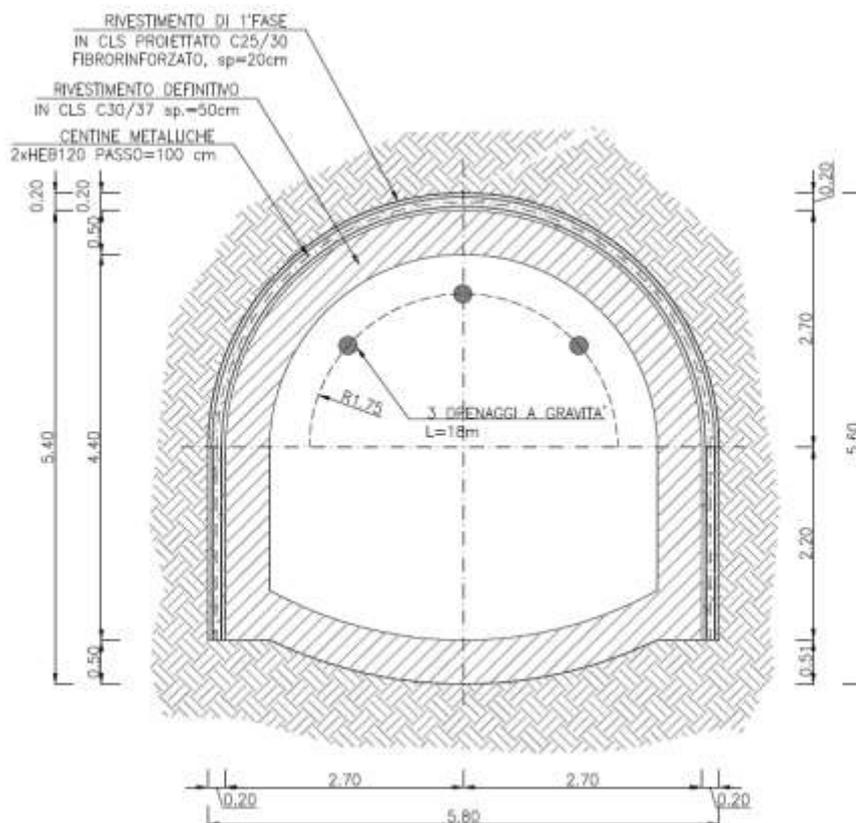


Figura 5.13 – Sezione tipo IT1: geometria del cavo e interventi di sostegno

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 fronte di scavo mediante 16 elementi in VTR iniettati con miscela cementizia, mentre nel caso in cui si riscontrasse la presenza di acqua si prevede l'esecuzione di 3 drenaggi a gravità.

#### 5.4.2 Sezione IT1bis

La sezione tipo IT1bis (Figura 5.14) è prevista nei tratti di alta copertura dei terreni appartenenti alle formazioni dei Flysch, dove queste si presentano con zone caratterizzate da disturbo tettonico o faglie.

Il rivestimento di prima fase di calotta e piedritti sarà costituito da uno strato di 20 cm di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di classe C25/30 e centine accoppiate HEB 120 con interasse longitudinale di 1.00 m.

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.

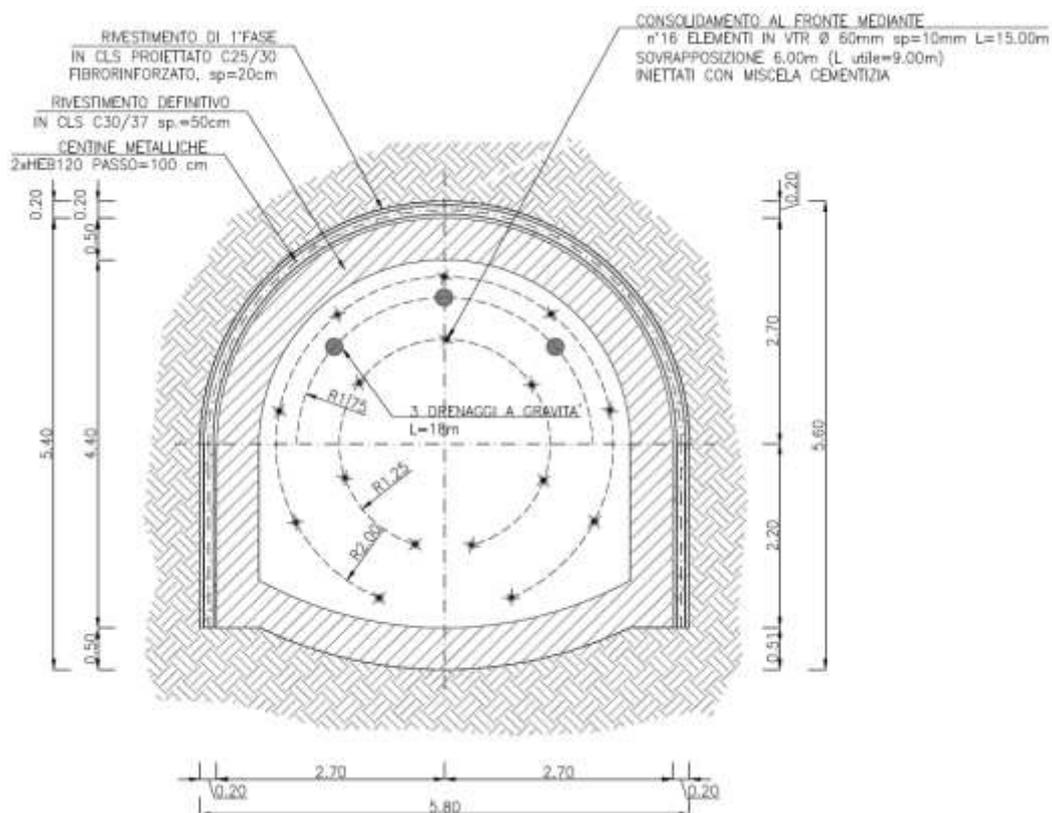


Figura 5.14 – Sezione tipo AC1bis: geometria del cavo e interventi di sostegno

Si prevede inoltre la realizzazione di un preconsolidamento del fronte di scavo mediante 16 elementi in VTR iniettati con miscela cementizia, mentre nel caso in cui si riscontrasse la presenza di acqua si prevede l'esecuzione di 3 drenaggi a gravità.

#### 5.4.3 Sezione IT2

La sezione tipo IT2 (Figura 5.15) è prevista nei tratti in alta copertura dei terreni appartenenti alle formazioni dei Flysch, dove queste si presentano con caratteristiche geomeccaniche migliori.

Il rivestimento di prima fase di calotta e piedritti sarà costituito da uno strato di 20 cm di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di classe C25/30 e da 6/7 bulloni autoperforanti di lunghezza pari a 3 m, posizionati a quinconce con passo pari a 2 m.

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.

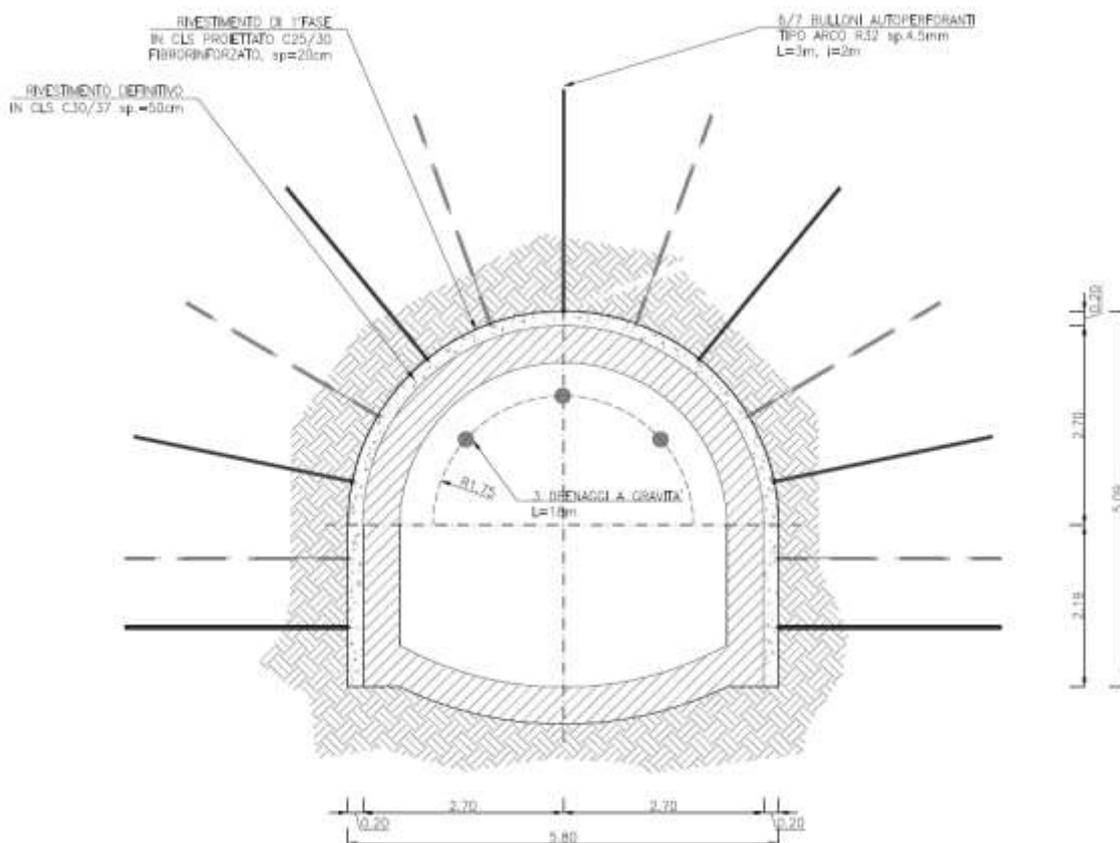


Figura 5.15 – Sezione tipo AP2: geometria del cavo e interventi di sostegno

#### 5.4.4 Sezione IT3

La sezione tipo IT3 (Figura 5.16) è prevista in corrispondenza dell'imbocco di monte della galleria idraulica.

Il rivestimento di prima fase di calotta e piedritti sarà costituito da uno strato di 20 cm di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di classe C25/30 e centine accoppiate HEB 120 con interasse longitudinale di 1.00 m.

Si prevede la realizzazione di un preconsolidamento del fronte di scavo mediante 16 elementi in VTR iniettati con miscela cementizia nonché di un preconsolidamento del contorno di scavo mediante 23 infilaggi da realizzarsi sulle reni e sulla calotta con tubi in acciaio iniettati con malta cementizia. Nel caso in cui si riscontrasse la presenza di acqua si prevede l'esecuzione di 3 drenaggi a gravità.

A completamento della galleria si procederà con il getto del rivestimento definitivo dello spessore variabile fra i 50 ed i 104 cm da realizzarsi con calcestruzzo armato di classe C30/37.

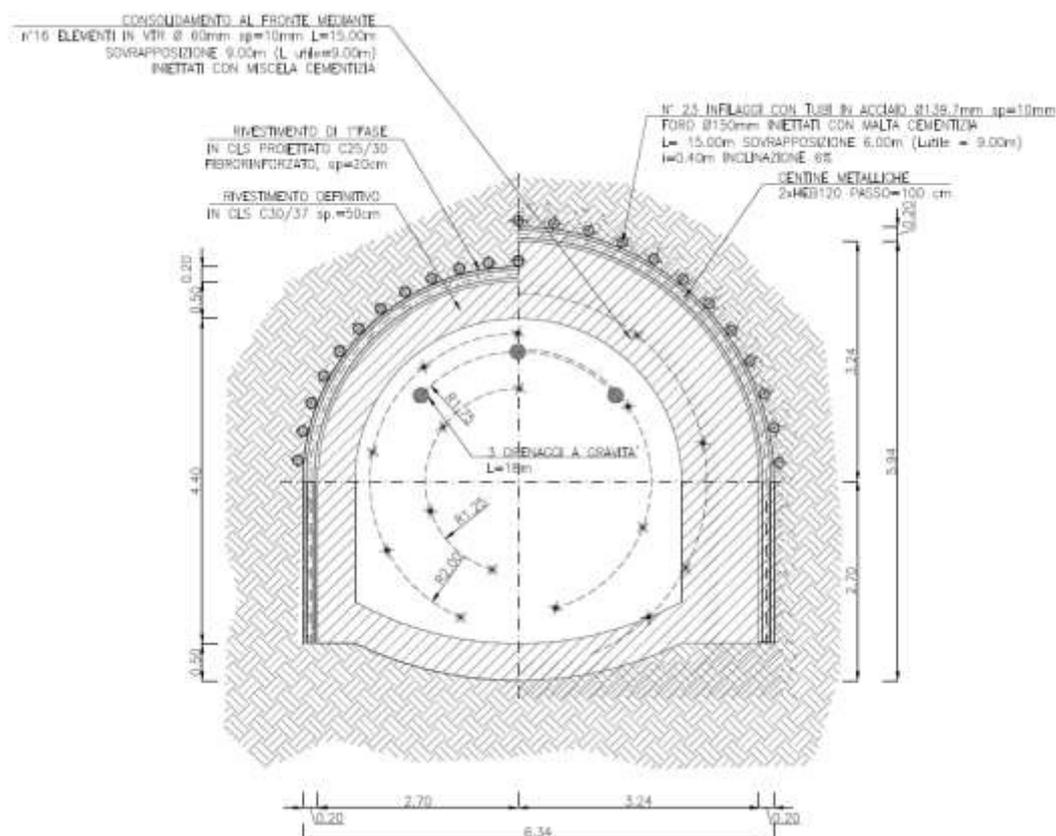


Figura 5.16 – Sezione tipo IT3: geometria del cavo e interventi di sostegno



l'ammasso roccioso si presenta con caratteristiche meccaniche e di resistenza molto basse ed in corrispondenza delle zone di disturbo tettonico.

La stabilità del cavo sarà assicurata mediante un rivestimento definitivo costituito da un anello di calcestruzzo armato di classe C40/50 dello spessore di 25 cm.

Nel caso di condizioni particolarmente difficili si prevede un eventuale preconsolidamento del fronte di scavo mediante 9 elementi in VTR iniettati con miscela cementizia.

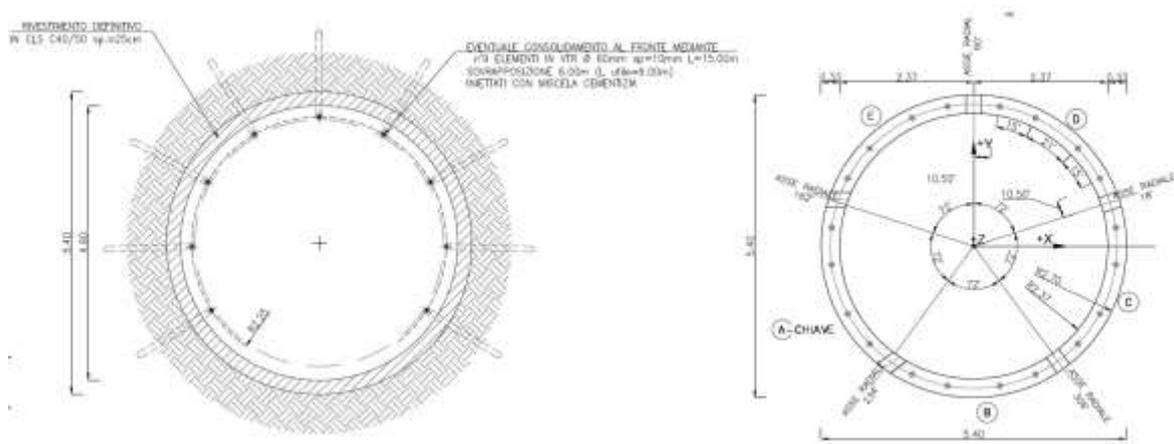


Figura 5.18 – Sezione tipo IM2: geometria del cavo e interventi di sostegno

## 5.6 Caverna Pozzo Piezometrico

La caverna posta alla base del Pozzo Piezometrico (Figure 5.19 – 5.21) ha dimensioni in pianta pari a 40.10 m x 13.40 m, un'altezza massima pari a 17.5 m ed una copertura pari a circa 50 m.

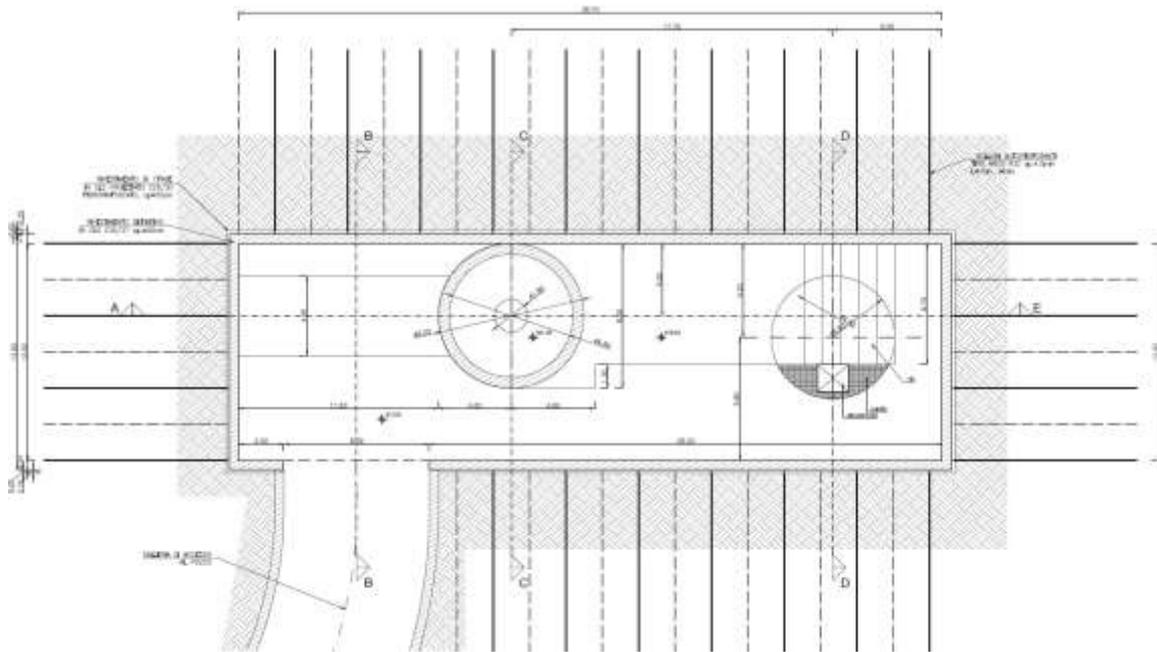


Figura 5.19 – Caverna Pozzo Piezometrico, planimetria

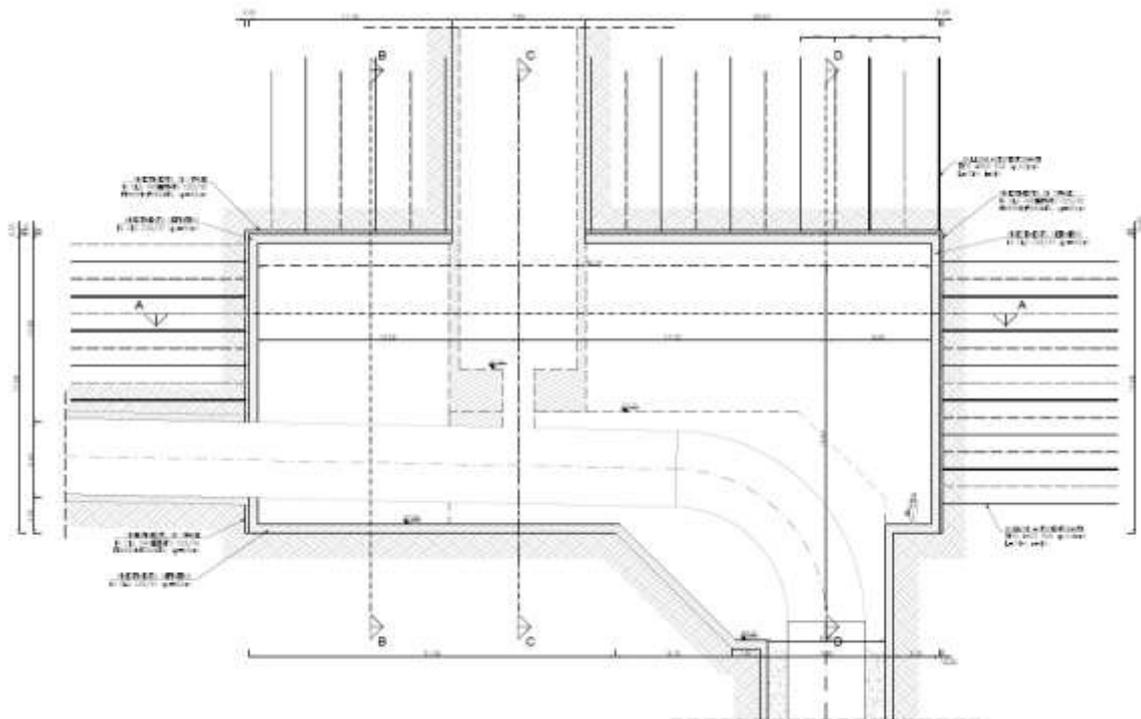


Figura 5.20 – Caverna Pozzo Piezometrico, sezione longitudinale

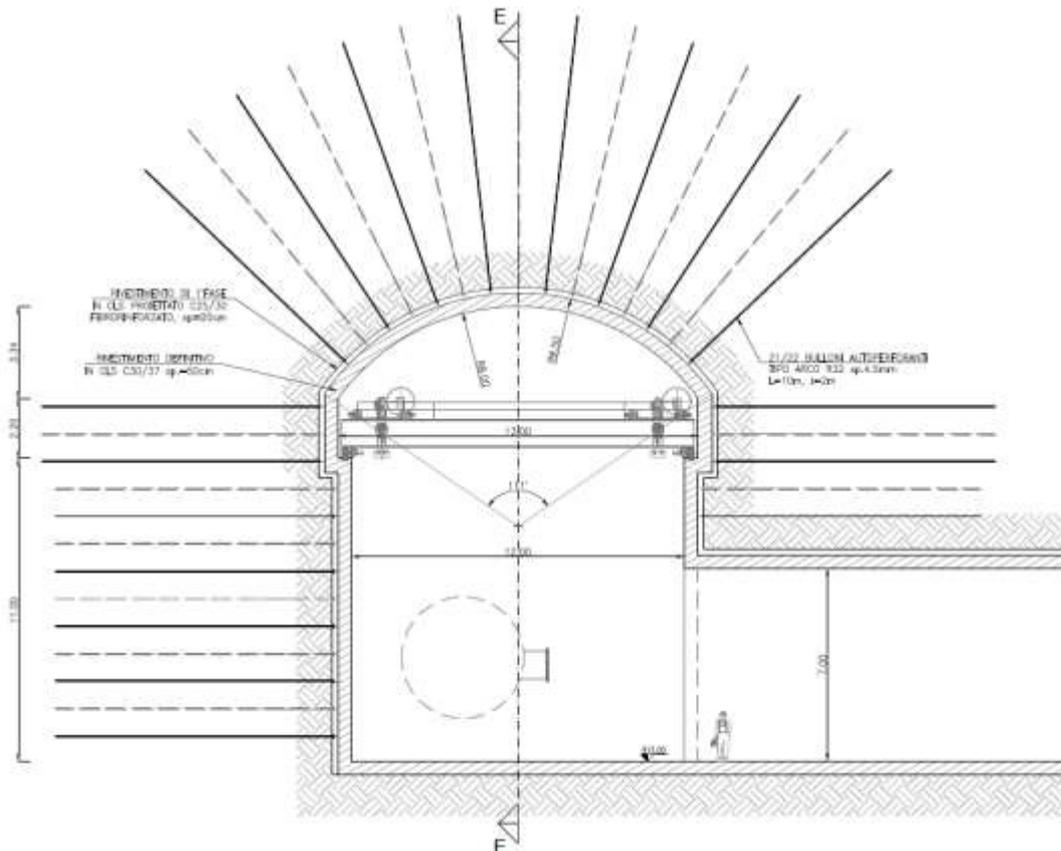


Figura 5.21 – Caverna Pozzo Piezometrico, sezione trasversale in corrispondenza della galleria di accesso

## 5.7 Materiali

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

### Calcestruzzo proiettato fibrorinforzato

classe di resistenza

C 25/30

$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c$

$f_{cd} \geq 14.16 \text{ N/mm}^2$

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

$E = 210 \text{ GPa}$

### Bulloni di ancoraggio

Bulloni autoperforanti tipo ARCO R32

Carico di rottura

$\geq 250 \text{ kN}$

Carico di snervamento	$\geq 210$ kN
Diametro nominale	32 mm

Calcestruzzo per getti in opera

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

Calcestruzzo per conci prefabbricati (sezione tipo IM1)

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

Calcestruzzo per conci prefabbricati (sezione tipo IM2)

classe di resistenza	C 40/50
$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c$	$f_{cd} \geq 22.66$ N/mm <sup>2</sup>
modulo elastico	E = 35220 MPa

Acciaio in barre per armature

Acciaio B450C	
modulo elastico	E = 210 GPa

Infilaggi in tubi in acciaio

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

Elementi strutturali in VTR al fronte

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



## 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.

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 eventualmente 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. I tiranti di ancoraggio sono stati simulati con elementi monodimensionali di tipo “bolt” aventi caratteristiche meccaniche e di resistenza equivalenti a quelle degli elementi simulati.

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 nelle due direzioni per permettere di ritenere del tutto trascurabili le condizioni di vincolo introdotte;
2. Modello in condizioni sismiche: 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*.

Le diverse fasi considerate nelle analisi sono:

- 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 definito per ciascuna sezione tipo attraverso un’analisi delle curve caratteristiche in condizioni di scavo non sostenuto

- STEP4 - Posa del rivestimento e degli eventuali ancoraggi di prima fase con ulteriore rilascio tensionale parziale
- STEP5 - Posa del rivestimento definitivo con rilascio tensionale completo
- STEP6 - Sul modello impiegato per le analisi sismiche si è aggiunto un ulteriore step in cui vengono applicati gli spostamenti dovuti al sisma.

## 6.2 Galleria di accesso alla centrale

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

### 6.2.1 Sezione tipo AC1

Per la simulazione della sezione tipo AC1 sono state considerate le condizioni geometriche e stratigrafiche in corrispondenza del tratto terminale della galleria, in cui si ha la massima copertura pari a circa 125 m (Figura 6.1).

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 e sabbie dell'Unità di Ariano (valori minimi).

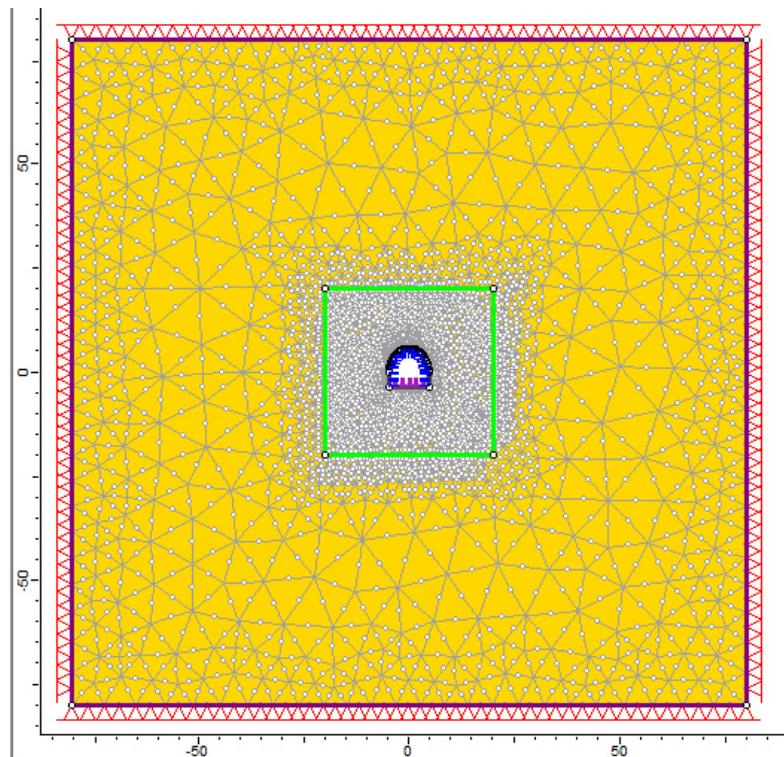


Figura 6.1 – Sezione tipo AC1: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

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

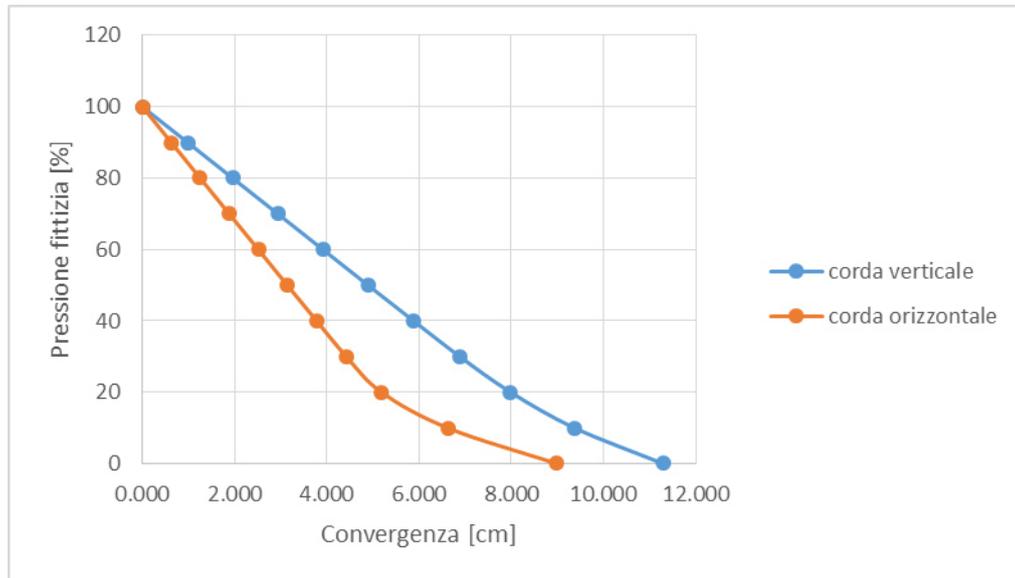


Figura 6.2 – Sezione tipo AC1: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

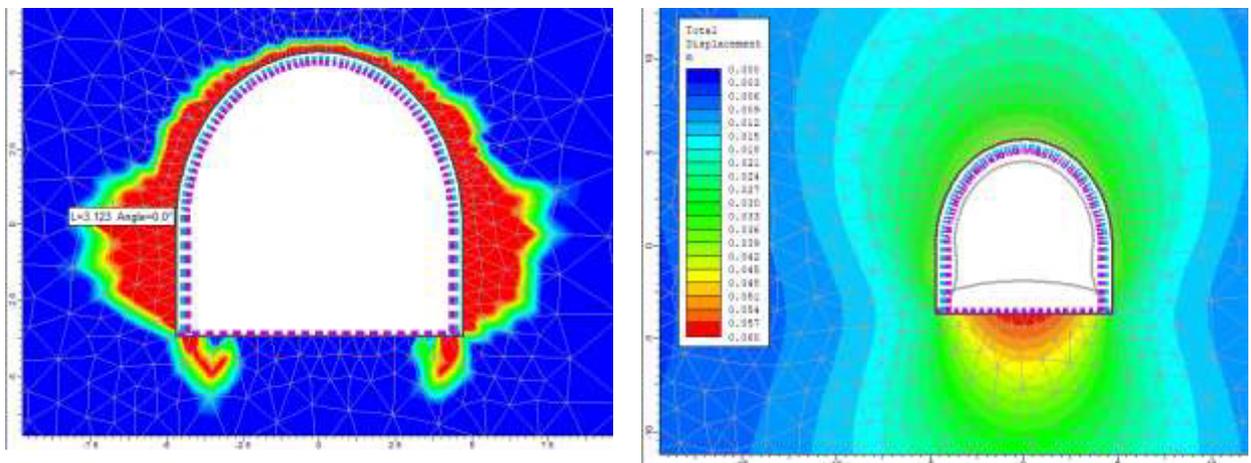


Figura 6.3 – Sezione tipo AC1: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

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 dell' 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 seguenti valori del rilascio tensionale parziale:
  - 90% contestualmente allo scavo del fronte

- 95% contestualmente alla posa del rivestimento di prima fase
- 100% contestualmente alla posa del rivestimento definitivo
- Il raggio plastico raggiunge allo step 5 il valore massimo, in corrispondenza dei piedritti, pari a circa 3.00 m, mentre risulta estremamente ridotto in corrispondenza della calotta
- Gli spostamenti massimi calcolati allo step 5 in corrispondenza dei piedritti e della calotta valgono circa 4.00 cm
- Le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori piuttosto elevati ma comunque inferiori ai limiti di resistenza delle strutture previste, come mostrato nel capitolo successivo.

### 6.2.2 Sezione tipo AC2

Per la simulazione della sezione tipo AC2 sono state considerate le condizioni geometriche e stratigrafiche in corrispondenza del tratto terminale della galleria, in cui si ha la massima copertura pari a circa 125 m (Figura 6.4).

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 e sabbie dell'Unità di Ariano (valori medi).

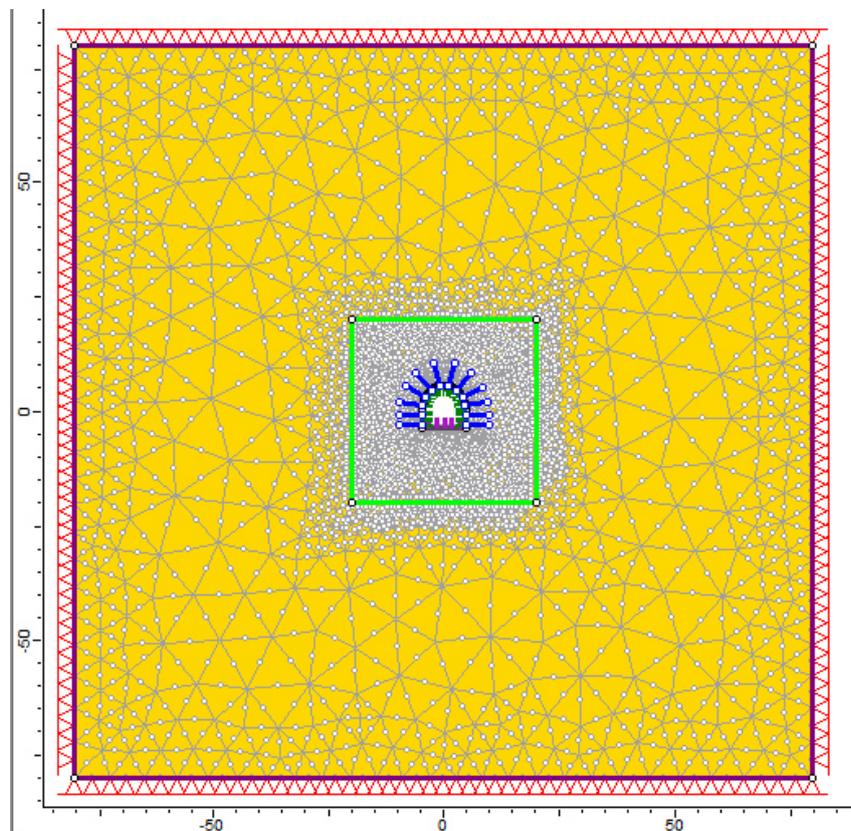


Figura 6.4 – Sezione tipo AC2: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

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

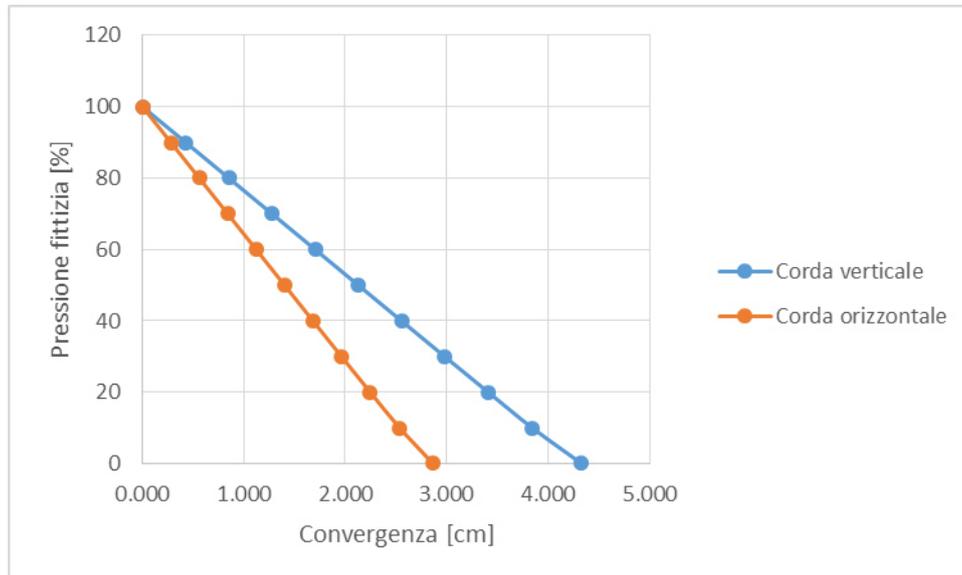


Figura 6.5 – Sezione tipo AC2: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

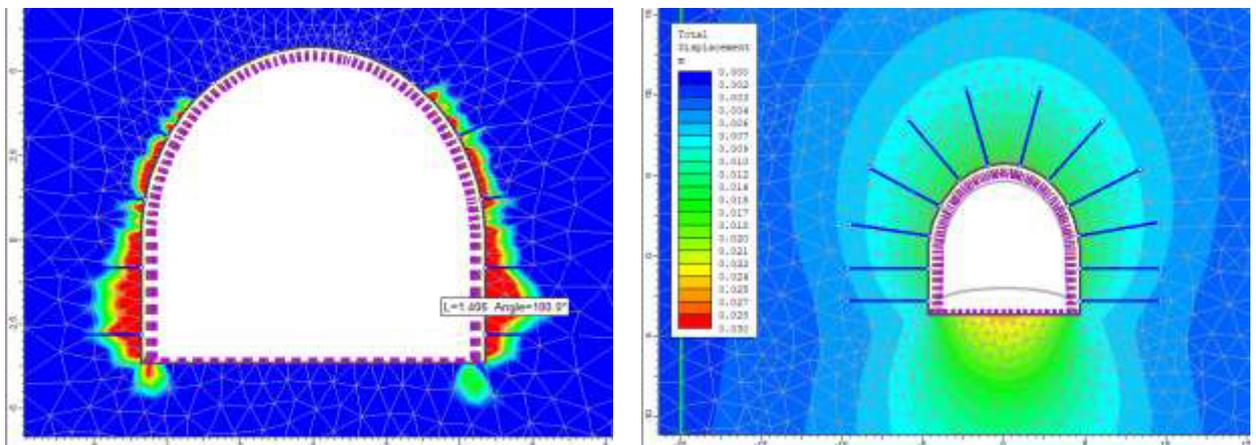


Figura 6.6 – Sezione tipo AC2: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

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 pressoché totale. Sulla base dei grafici mostrati si sono ipotizzati i seguenti valori del rilascio tensionale parziale:
  - 90% contestualmente allo scavo del fronte
  - 95% contestualmente alla posa del rivestimento di prima fase

- 100% contestualmente alla posa del rivestimento definitivo
- Il raggio plastico raggiunge allo step 5 il valore massimo, in corrispondenza dei piedritti, pari a circa 1.40 m, mentre risulta nullo in corrispondenza della calotta
- Gli spostamenti massimi calcolati allo step 5 in corrispondenza dei piedritti e della calotta valgono circa 1.50 cm
- Le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori modesti in campo statico mentre risultano più elevati durante la fase sismica ma comunque inferiori ai limiti di resistenza delle strutture previste, come mostrato nel capitolo successivo.

### 6.2.3 Sezione tipo AC3

Per la simulazione della sezione tipo AC3 sono state considerate le condizioni geometriche e stratigrafiche in prossimità dell'imbocco della galleria, in cui si ha una copertura pari a circa 15 m (Figura 6.7).

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

- da 0 a -5 m: Argille e sabbie dell'unità di Ariano (detensionate)
- da -5 m fino al fondo del modello: Argille e sabbie dell'unità di Ariano (valori minimi)

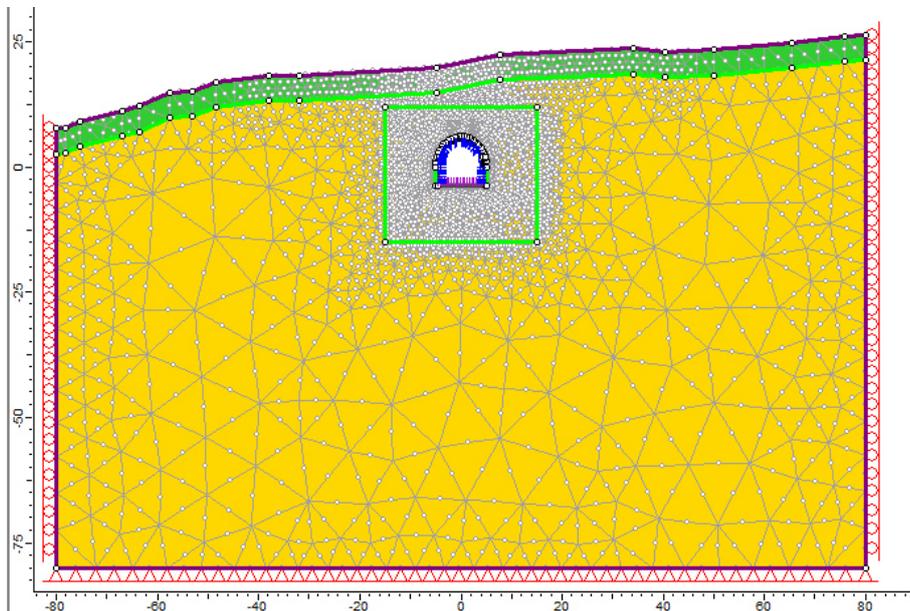


Figura 6.7 – Sezione tipo AC3: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

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

- 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

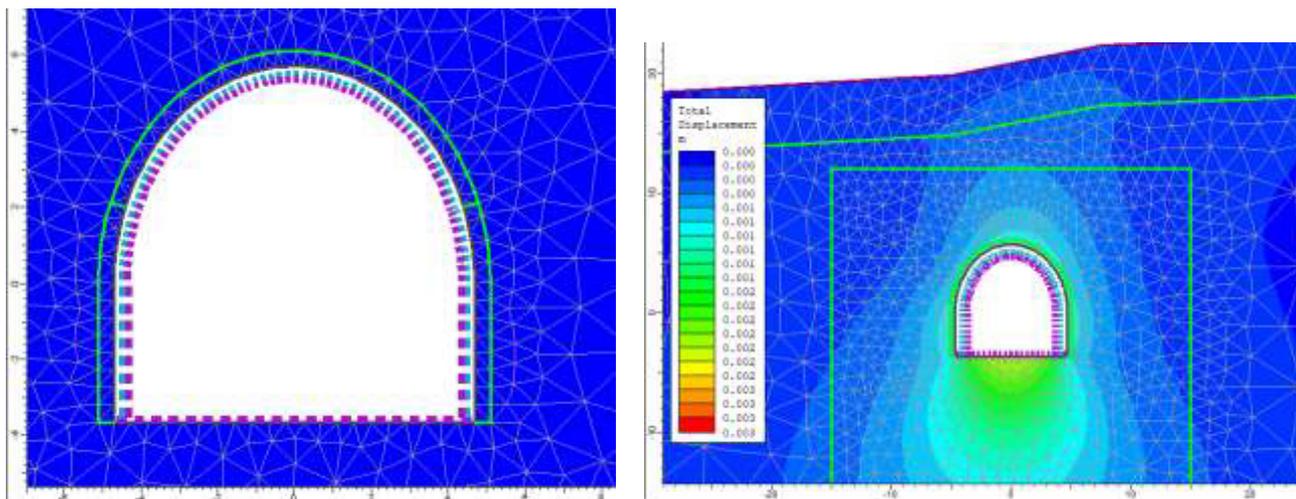


Figura 6.8 – Sezione tipo AC3: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

L'esame delle simulazioni numeriche evidenzia che:

- In considerazione della bassa copertura della sezione in analisi e per limitare il più possibile gli effetti deformativi si sono ipotizzati i seguenti valori del rilascio tensionale parziale:
  - 80% contestualmente allo scavo del fronte
  - 90% contestualmente alla posa del rivestimento di prima fase
  - 100% contestualmente alla posa del rivestimento definitivo
- Allo step 5 il terreno circostante la galleria non mostra segni evidenti di plasticizzazioni
- Gli spostamenti massimi calcolati allo step 5 in corrispondenza dei piedritti e della calotta risultano inferiori ai 3 mm
- Le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori modesti in campo statico mentre risultano più elevati durante la fase sismica ma comunque inferiori ai limiti di resistenza delle strutture previste, come mostrato nel capitolo successivo.

### 6.3 Cunicolo delle sbarre

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

#### 6.3.1 Sezione tipo CS1

Per la simulazione della sezione tipo CS1 sono state considerate le condizioni geometriche e stratigrafiche in corrispondenza del tratto terminale della galleria, in cui si ha la massima copertura pari a circa 127 m (Figura 6.9).

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 e sabbie dell'Unità di Ariano (valori minimi).

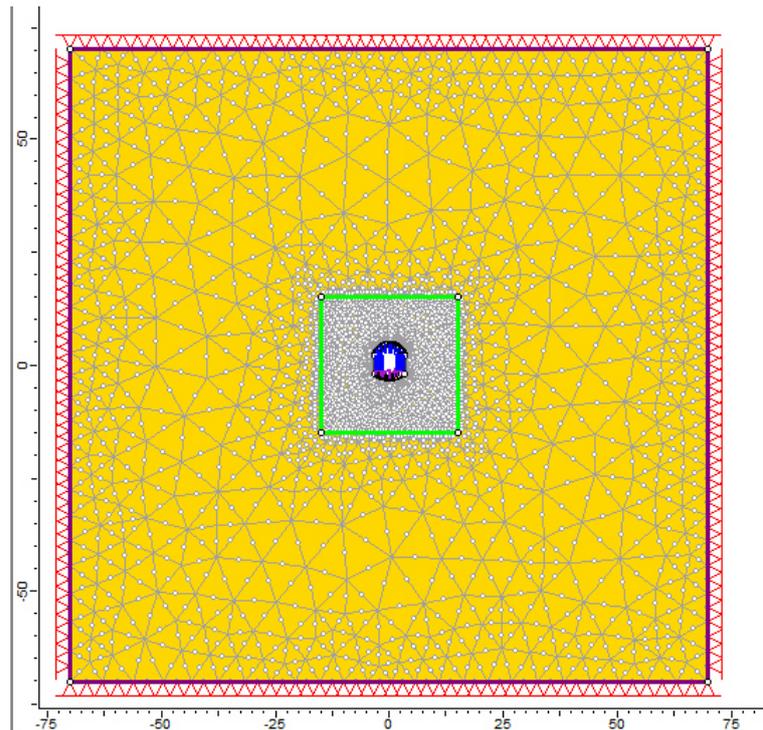


Figura 6.9 – Sezione tipo CS1: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

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

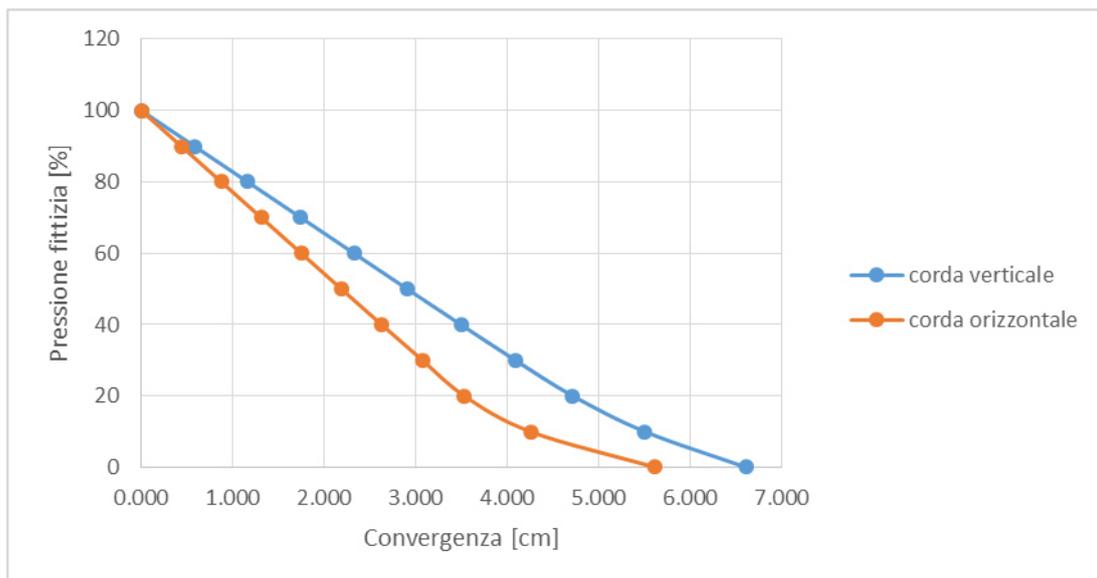


Figura 6.10 – Sezione tipo CS1: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

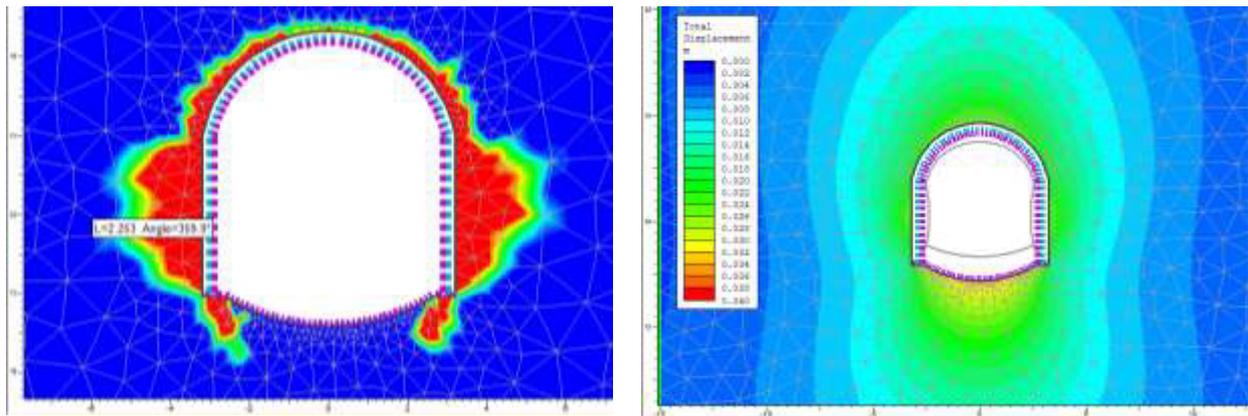


Figura 6.11 – Sezione tipo CS1: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

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 dell' 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 seguenti valori del rilascio tensionale parziale:
  - 90% contestualmente allo scavo del fronte
  - 95% contestualmente alla posa del rivestimento di prima fase
  - 100% contestualmente alla posa del rivestimento definitivo
- Il raggio plastico raggiunge allo step 5 il valore massimo, in corrispondenza dei piedritti, pari a circa 2.25 m, mentre risulta estremamente ridotto in corrispondenza della calotta
- Gli spostamenti massimi calcolati allo step 5 in corrispondenza dei piedritti e della calotta valgono circa 2.50 cm
- Le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori piuttosto elevati ma comunque inferiori ai limiti di resistenza delle strutture previste, come mostrato nel capitolo successivo.

### 6.3.2 Sezione tipo CS2

Per la simulazione della sezione tipo CS2 sono state considerate le condizioni geometriche e stratigrafiche in corrispondenza del tratto terminale della galleria, in cui si ha la massima copertura pari a circa 127 m (Figura 6.12).

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 e sabbie dell'Unità di Ariano (valori medi).

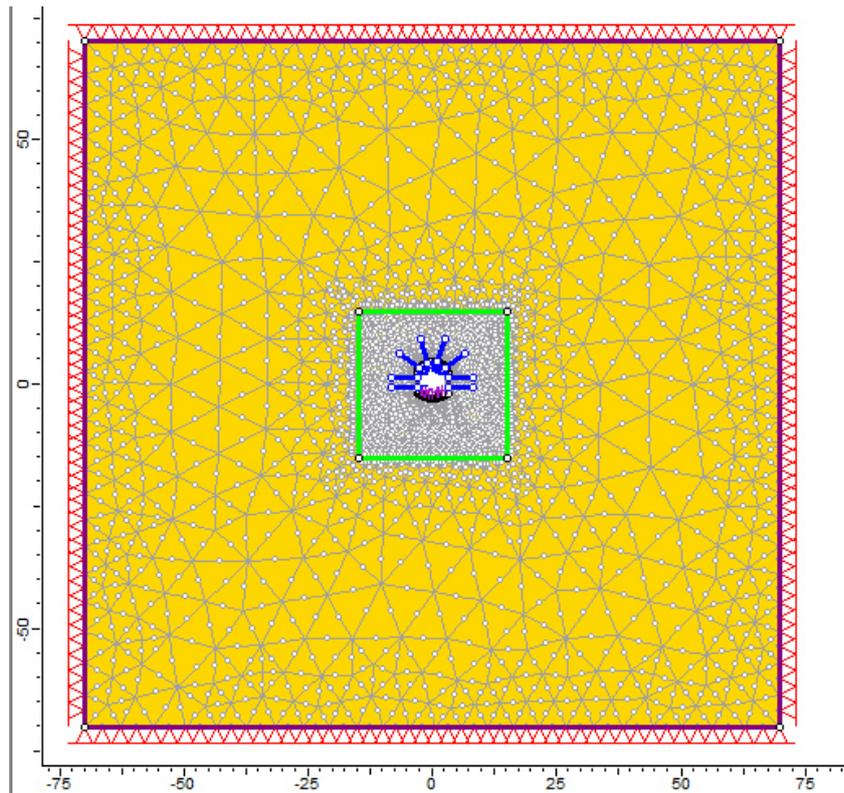


Figura 6.12 – Sezione tipo CS2: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

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

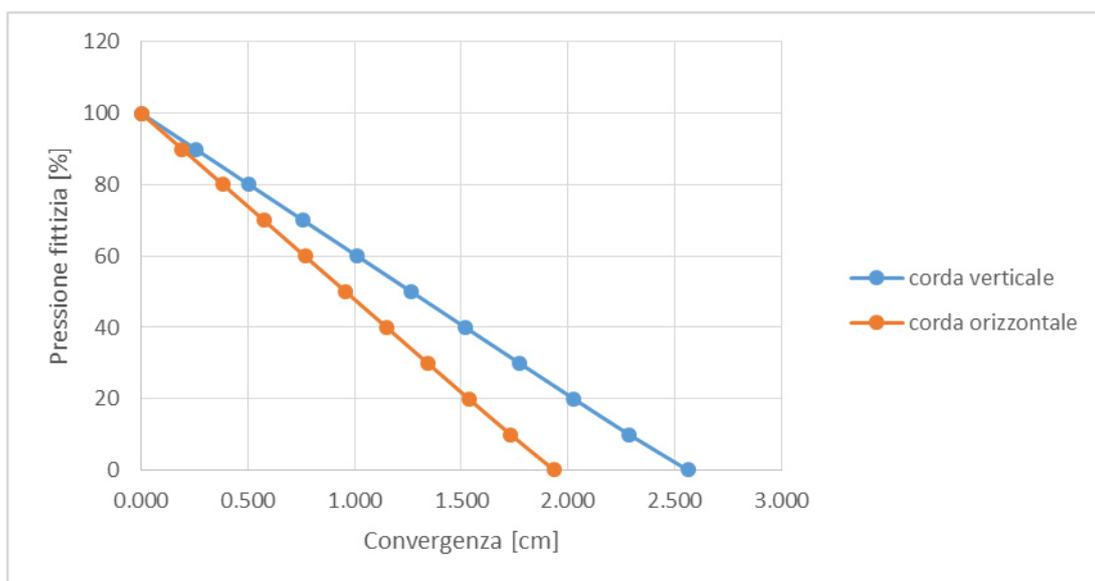


Figura 6.13 – Sezione tipo CS2: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

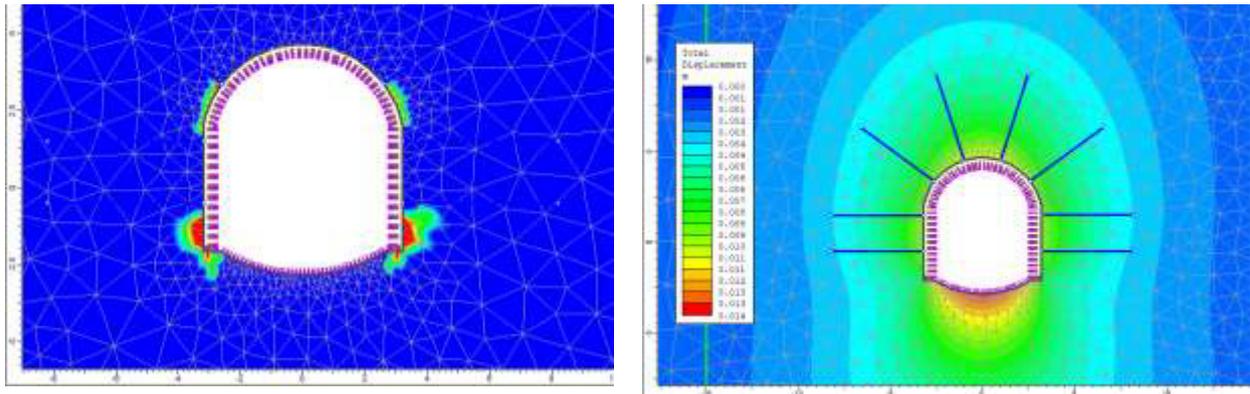


Figura 6.14 – Sezione tipo CS2: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

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 pressoché totale. Sulla base dei grafici mostrati si sono ipotizzati i seguenti valori del rilascio tensionale parziale:
  - 90% contestualmente allo scavo del fronte
  - 95% contestualmente alla posa del rivestimento di prima fase
  - 100% contestualmente alla posa del rivestimento definitivo
- allo step 5 si osserva la formazione di zone di plasticizzazione estremamente ridotte localizzate alla base dei piedritti ed in corrispondenza delle reni
- Gli spostamenti massimi calcolati allo step 5 in corrispondenza dei piedritti e della calotta valgono circa 1.00 cm
- Le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori modesti in campo statico mentre risultano più elevati durante la fase sismica ma comunque inferiori ai limiti di resistenza delle strutture previste, come mostrato nel capitolo successivo.

### 6.3.3 Sezione tipo CS3

Per la simulazione della sezione tipo CS3 sono state considerate le condizioni geometriche e stratigrafiche in prossimità dell'imbocco della galleria, in cui si ha una copertura pari a circa 15 m (Figura 6.15).

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

- da 0 a -5 m: Argille e sabbie dell'unità di Ariano (detensionate)
- da -5 m fino al fondo del modello: Argille e sabbie dell'unità di Ariano (valori minimi)

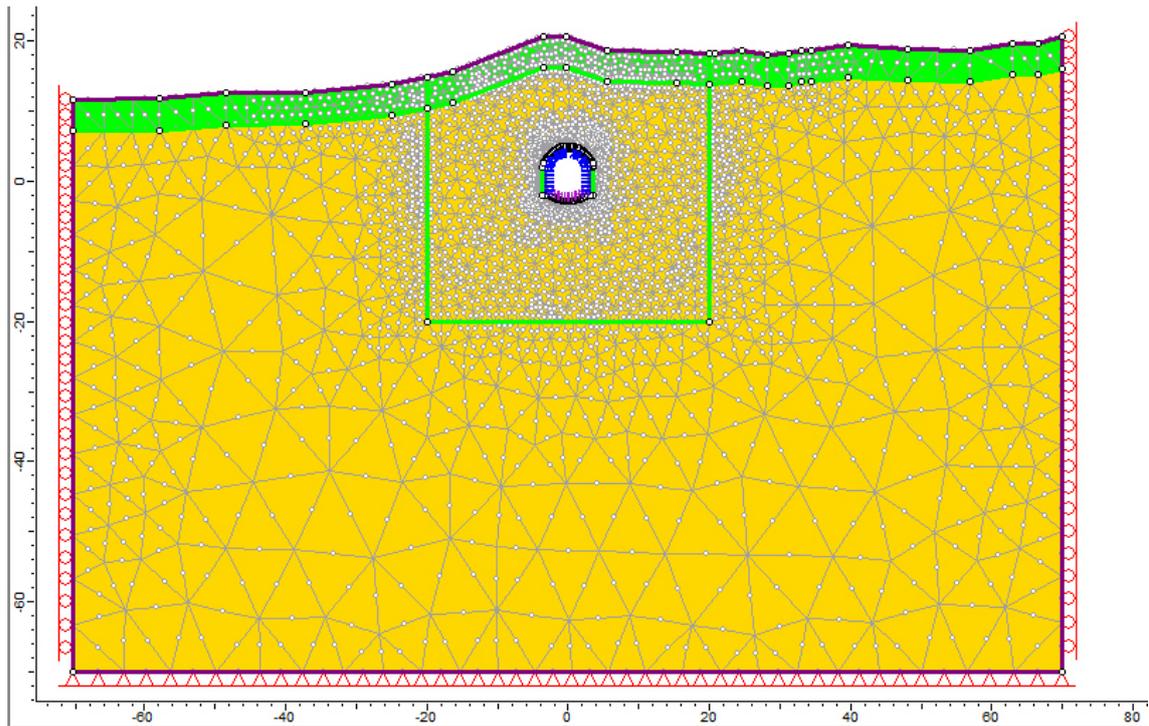


Figura 6.15 – Sezione tipo CS3: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

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

- 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

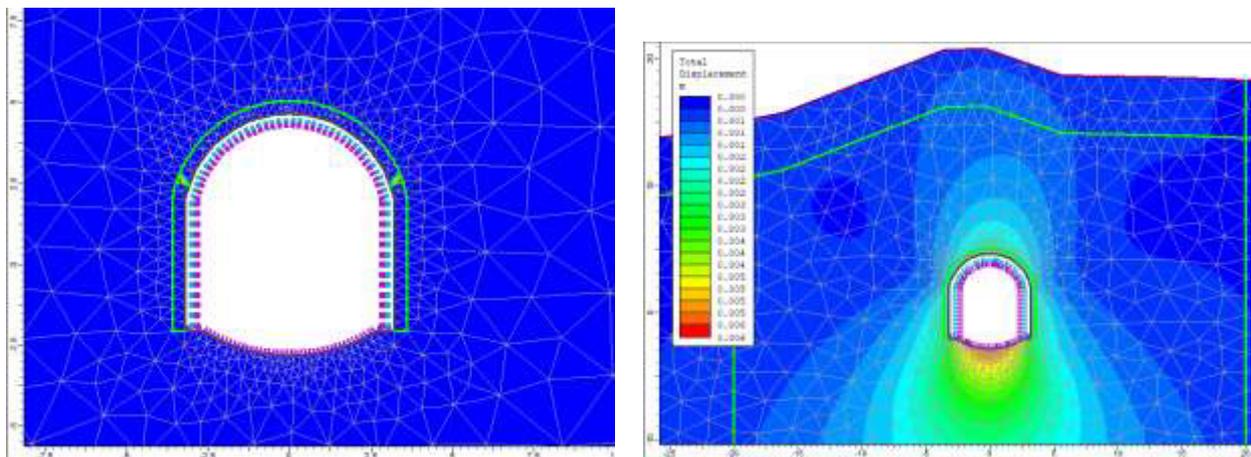


Figura 6.16 – Sezione tipo CS3: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

L'esame delle simulazioni numeriche evidenzia che:

- In considerazione della bassa copertura della sezione in analisi e per limitare il più possibile gli effetti deformativi si sono ipotizzati i seguenti valori del rilascio tensionale parziale:
  - 80% contestualmente allo scavo del fronte

- 90% contestualmente alla posa del rivestimento di prima fase
- 100% contestualmente alla posa del rivestimento definitivo
- Allo step 5 il terreno circostante la galleria non mostra segni evidenti di plasticizzazioni
- Gli spostamenti massimi calcolati allo step 5 in corrispondenza dei piedritti e della cassetta risultano inferiori ai 3 mm
- Le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori modesti in campo statico mentre risultano più elevati durante la fase sismica ma comunque inferiori ai limiti di resistenza delle strutture previste, come mostrato nel capitolo successivo.

## 6.4 Galleria di accesso al Pozzo Piezometrico

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

### 6.4.1 Sezione tipo AP1

La sezione tipo AP1 viene impiegata sia in bassa sia in alta copertura, quest'ultima condizione risulta più gravosa ai fini delle verifiche strutturali dei rivestimenti e pertanto dimensionante. Si riportano di seguito i risultati ottenuti dall'analisi della sezione tipo AP1 in alta copertura.

Per la simulazione della sezione tipo AP1 sono state considerate le condizioni geometriche e stratigrafiche in corrispondenza del tratto terminale della galleria, in cui si ha la massima copertura pari a circa 60 m (Figura 6.17).

In considerazione della copertura non troppo elevata il modello è stato esteso fino al piano campagna. Nel modello numerico è stata assunta la seguente stratigrafia di analisi riferita all'asse della galleria:

- da 0 a -7 m: Depositi superficiali
- da -7 a -24 m: Argilliti (valori minimi)
- da -24 m fino al fondo del modello: Calcari e calcilutiti (valori minimi):

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

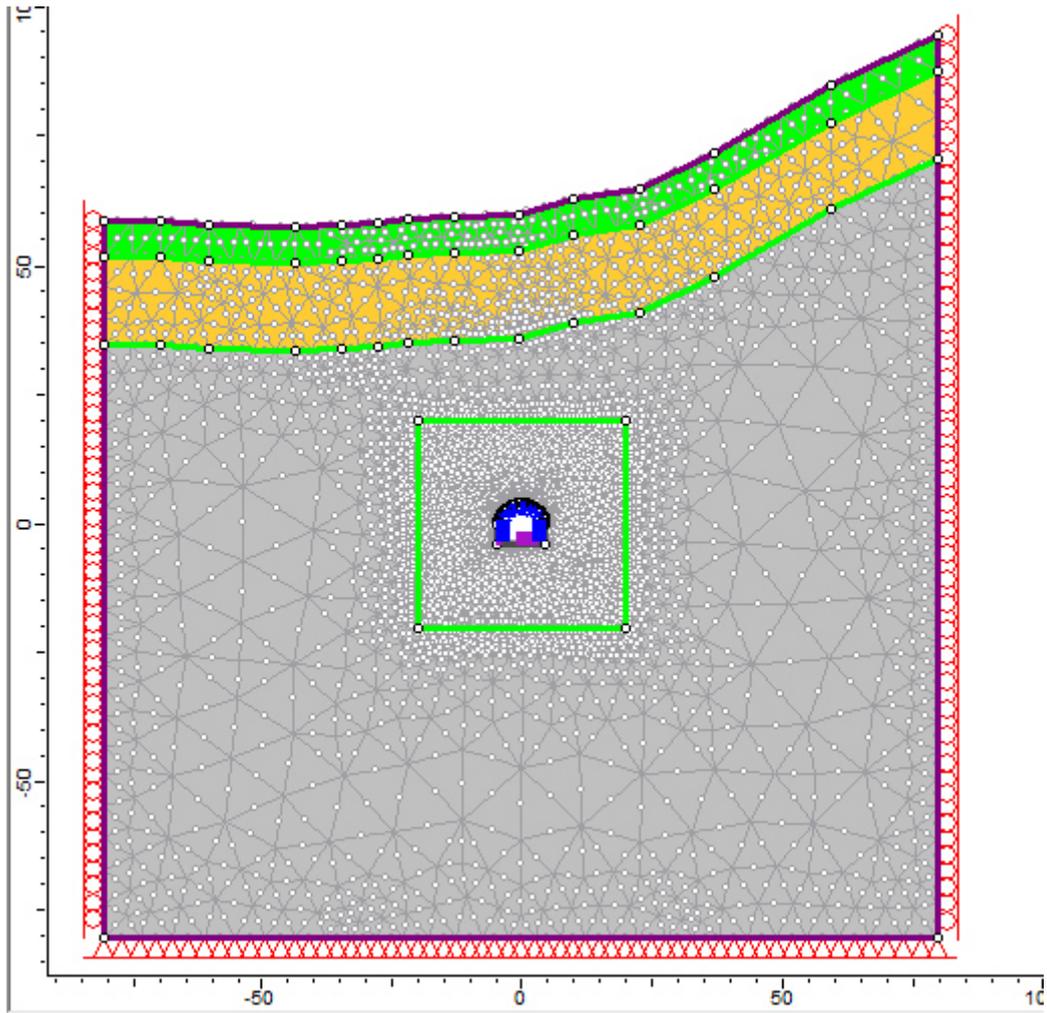


Figura 6.17 – Sezione tipo CS1: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

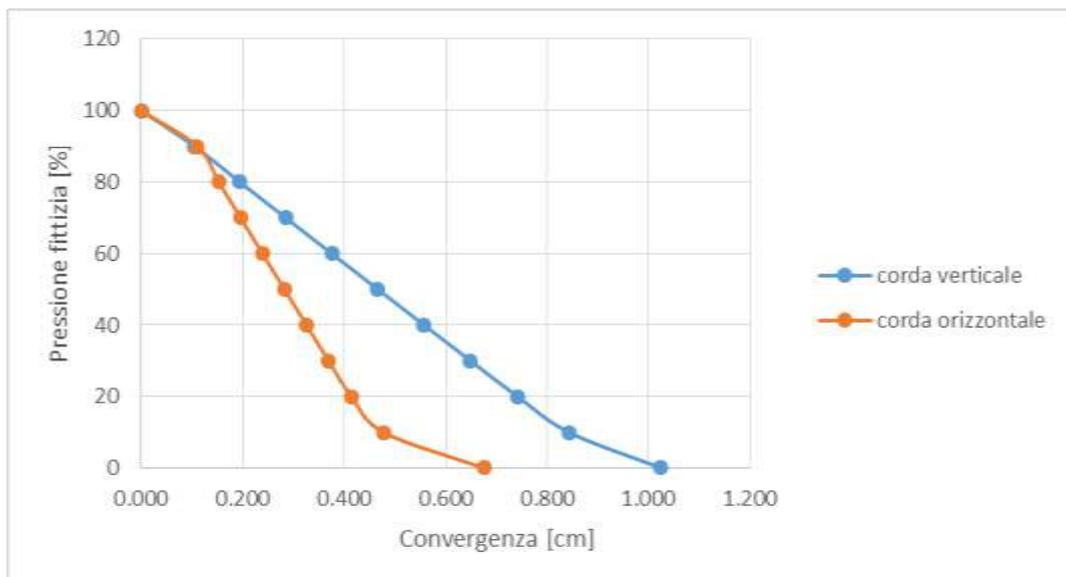


Figura 6.18 – Sezione tipo AP1: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

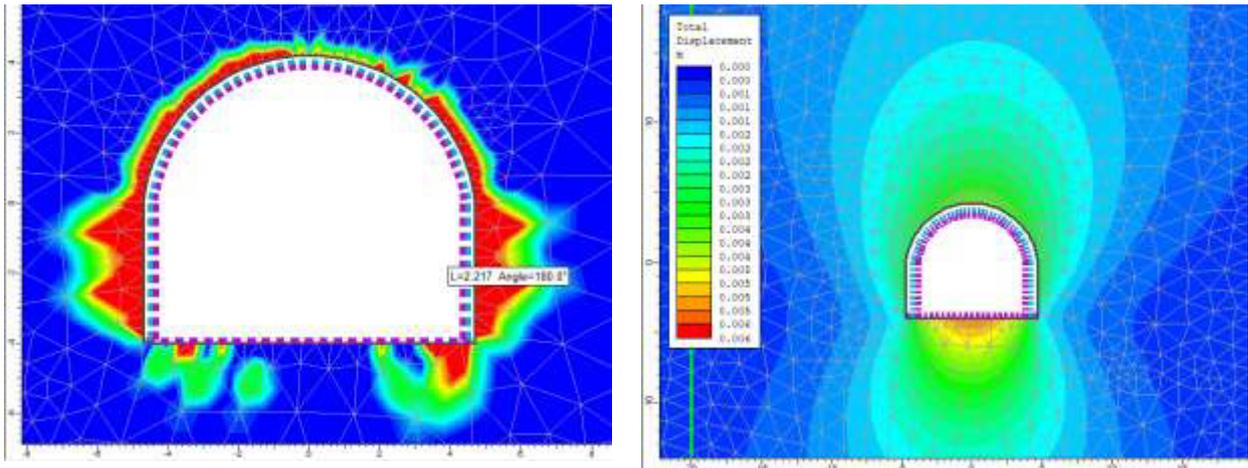


Figura 6.19 – Sezione tipo AP1: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

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 dell' 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 seguenti valori del rilascio tensionale parziale:
  - 90% contestualmente allo scavo del fronte
  - 95% contestualmente alla posa del rivestimento di prima fase
  - 100% contestualmente alla posa del rivestimento definitivo
- Il raggio plastico raggiunge allo step 5 il valore massimo, in corrispondenza dei piedritti, pari a circa 2.20 m, mentre risulta estremamente ridotto in corrispondenza della calotta
- Gli spostamenti massimi calcolati allo step 5 in corrispondenza dei piedritti e della calotta valgono circa 0.40 cm
- Le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori modesti in campo statico mentre risultano più elevati durante la fase sismica ma comunque inferiori ai limiti di resistenza delle strutture previste, come mostrato nel capitolo successivo.

#### 6.4.2 Sezione tipo AP2

Per la simulazione della sezione tipo AP2 sono state considerate le condizioni geometriche e stratigrafiche in corrispondenza del tratto terminale della galleria, in cui si ha la massima copertura pari a circa 60 m (Figura 6.20).

In considerazione della copertura non troppo elevata il modello è stato esteso fino al piano campagna. Nel modello numerico è stata assunta la seguente stratigrafia di analisi riferita all'asse della galleria:

- da 0 a -7 m: Depositi superficiali
- da -7 a -24 m: Argilliti (valori minimi)
- da -24 m fino al fondo del modello: Calcari e calcilutiti (valori medi):

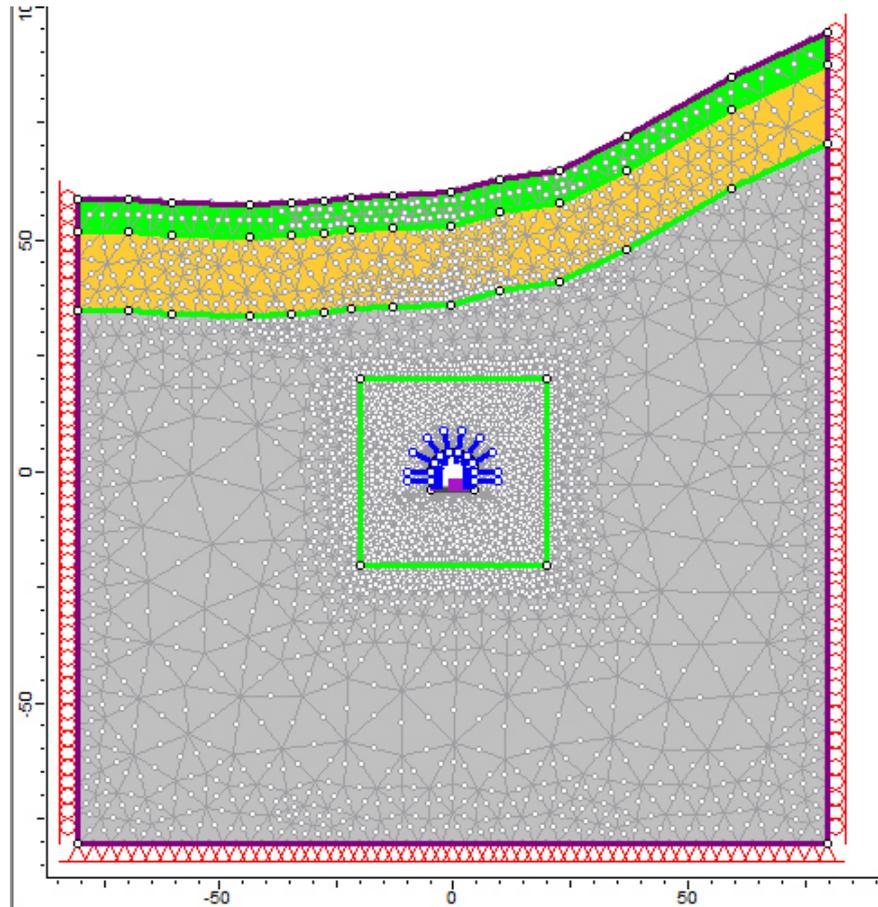


Figura 6.20 – Sezione tipo AP2: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

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

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 pressoché totale. Sulla base dei grafici mostrati si sono ipotizzati i seguenti valori del rilascio tensionale parziale:
  - 90% contestualmente allo scavo del fronte
  - 95% contestualmente alla posa del rivestimento di prima fase
  - 100% contestualmente alla posa del rivestimento definitivo
- Il raggio plastico raggiunge allo step 5 il valore massimo, in corrispondenza dei piedritti, pari a circa 2.00 m, mentre risulta nullo in corrispondenza della calotta

- Gli spostamenti massimi calcolati allo step 5 in corrispondenza dei piedritti e della calotta valgono circa 1.00 cm
- Le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori modesti in campo statico mentre risultano più elevati durante la fase sismica ma comunque inferiori ai limiti di resistenza delle strutture previste, come mostrato nel capitolo successivo.

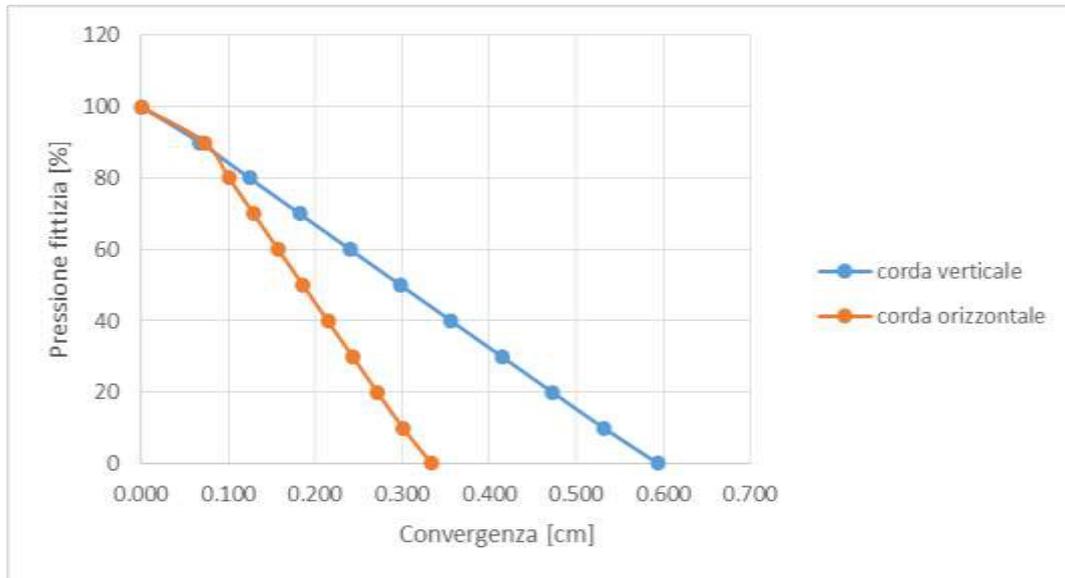


Figura 6.21 – Sezione tipo AP2: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

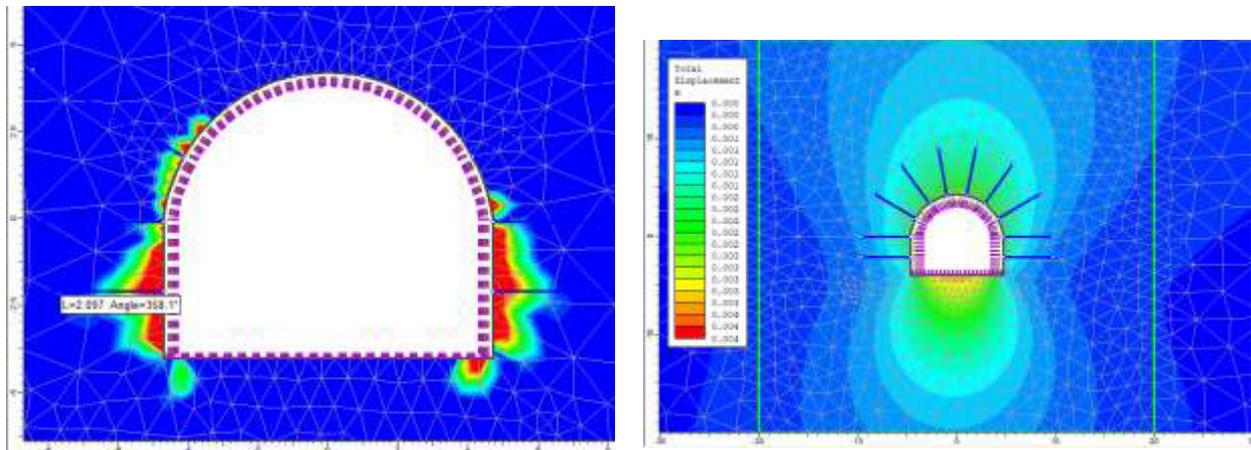


Figura 6.22 – Sezione tipo AP2: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

## 6.5 Galleria idraulica – tratto scavato in tradizionale

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

### 6.5.1 Sezione tipo IT1

La sezione tipo IT1 viene impiegata sia in bassa sia in alta copertura, quest'ultima condizione risulta più gravosa ai fini delle verifiche strutturali dei rivestimenti e pertanto dimensionante. Si riportano di seguito i risultati ottenuti dall'analisi della sezione tipo IT1 in alta copertura.

Per la simulazione della sezione tipo IT1 sono state considerate le condizioni geometriche e stratigrafiche in corrispondenza della pk 0+720, in cui si ha la massima copertura pari a circa 105 m (Figura 6.23).

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 Calcari e calcilutiti (valori minimi).

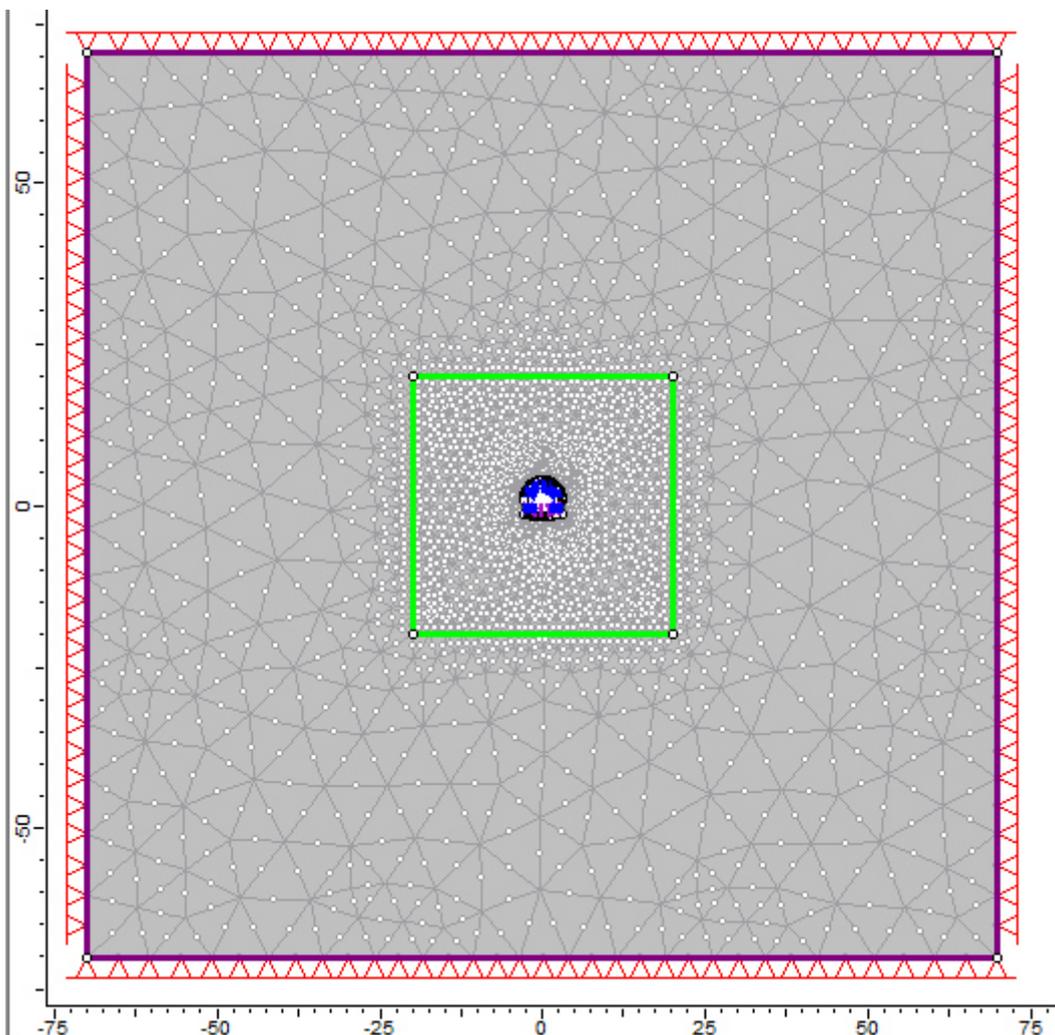


Figura 6.23 – Sezione tipo IT1: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

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

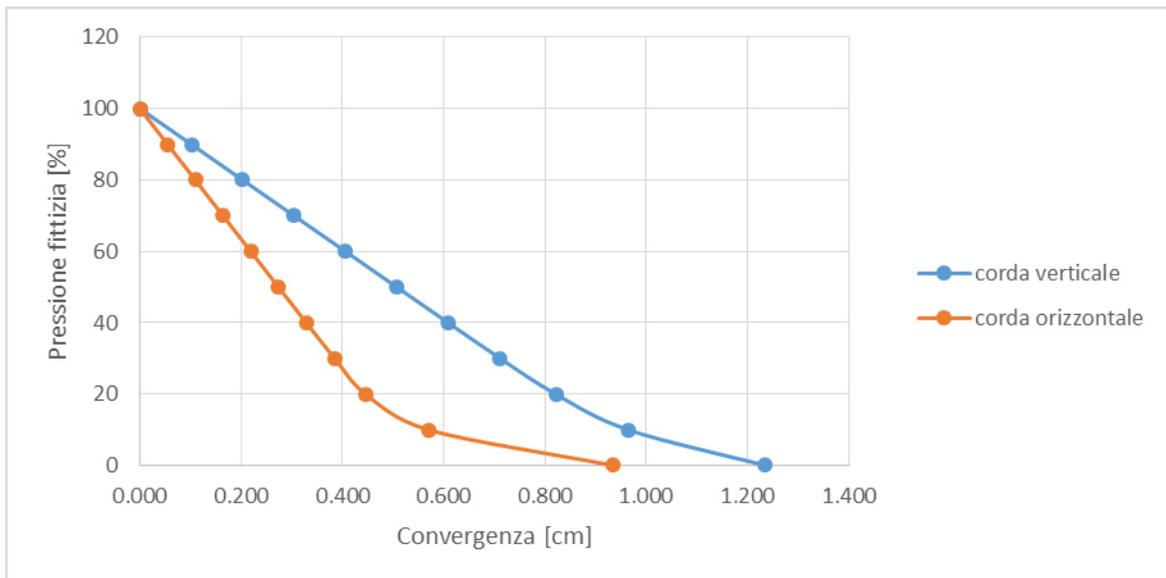


Figura 6.24 – Sezione tipo IT1: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

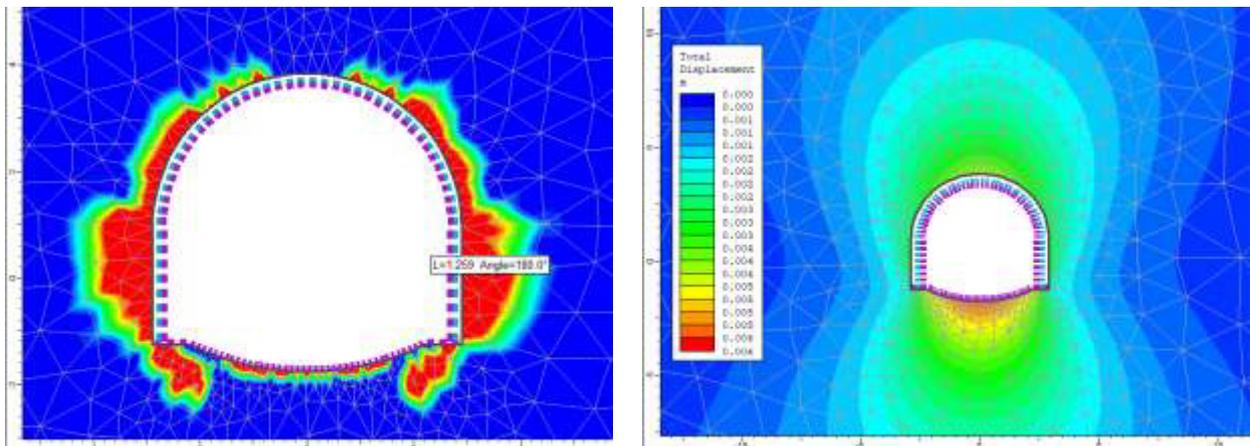


Figura 6.25 – Sezione tipo IT1: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

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 dell' 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 seguenti valori del rilascio tensionale parziale:

- 90% contestualmente allo scavo del fronte
- 95% contestualmente alla posa del rivestimento di prima fase
- 100% contestualmente alla posa del rivestimento definitivo
- Il raggio plastico raggiunge allo step 5 il valore massimo, in corrispondenza dei piedritti, pari a circa 1.25 m, mentre risulta estremamente ridotto in corrispondenza della calotta
- Gli spostamenti massimi calcolati allo step 5 in corrispondenza dei piedritti e della calotta valgono circa 0.50 cm
- Le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori modesti sia in campo statico sia durante la fase sismica e sempre inferiori ai limiti di resistenza delle strutture previste, come mostrato nel capitolo successivo.

### 6.5.2 Sezione tipo IT2

Per la simulazione della sezione tipo IT2 sono state considerate le condizioni geometriche e stratigrafiche in corrispondenza della pk 0+720, in cui si ha la massima copertura pari a circa 105 m (Figura 6.26).

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 Calcari e calcilutiti (valori medi).

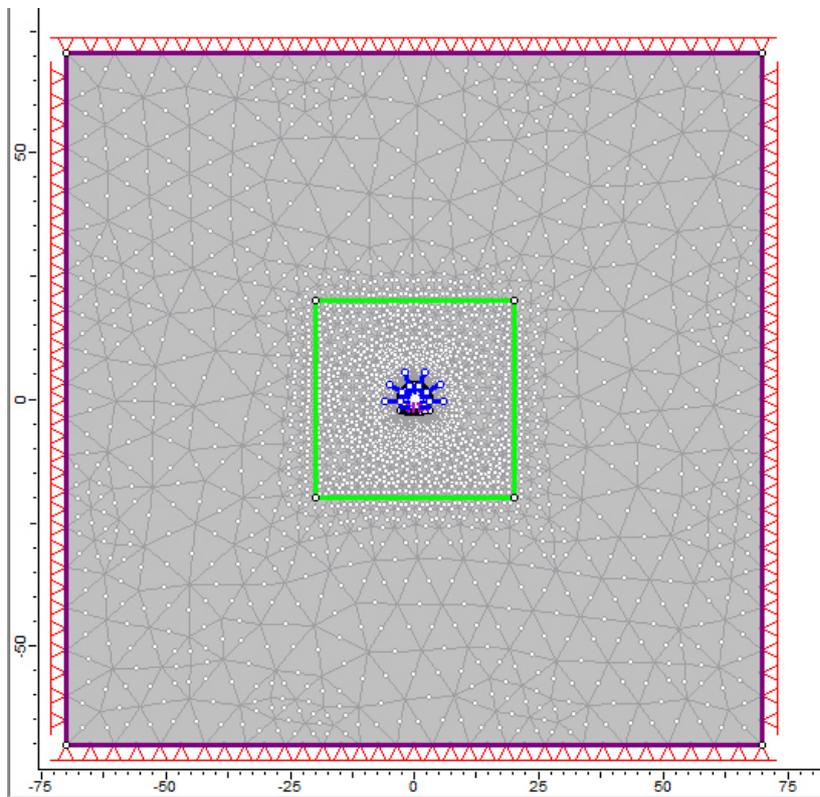


Figura 6.26 – Sezione tipo IT2: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

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

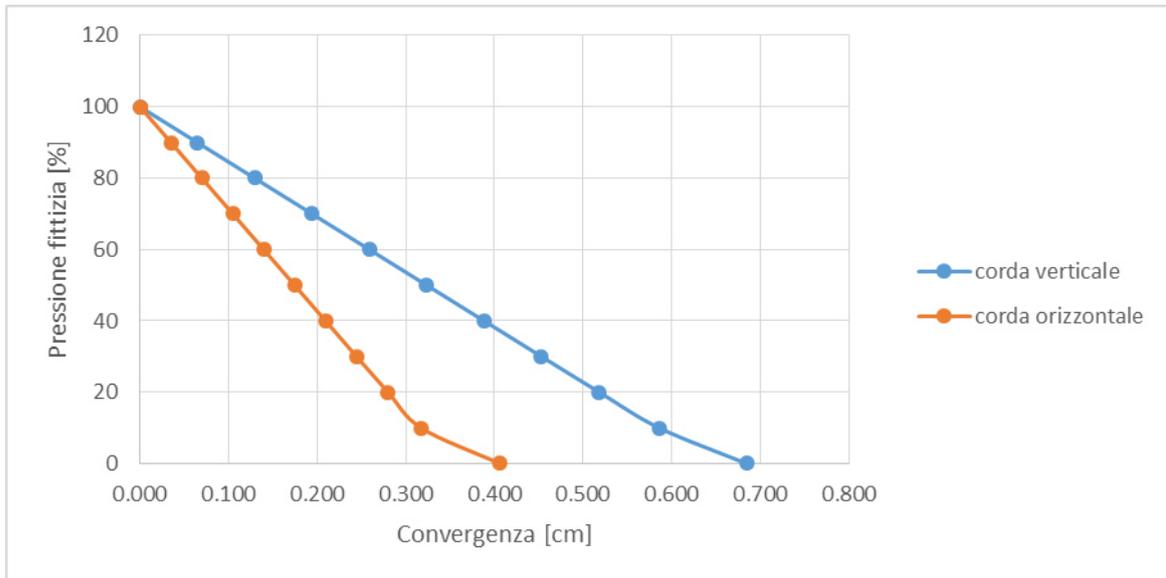


Figura 6.27 – Sezione tipo IT2: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

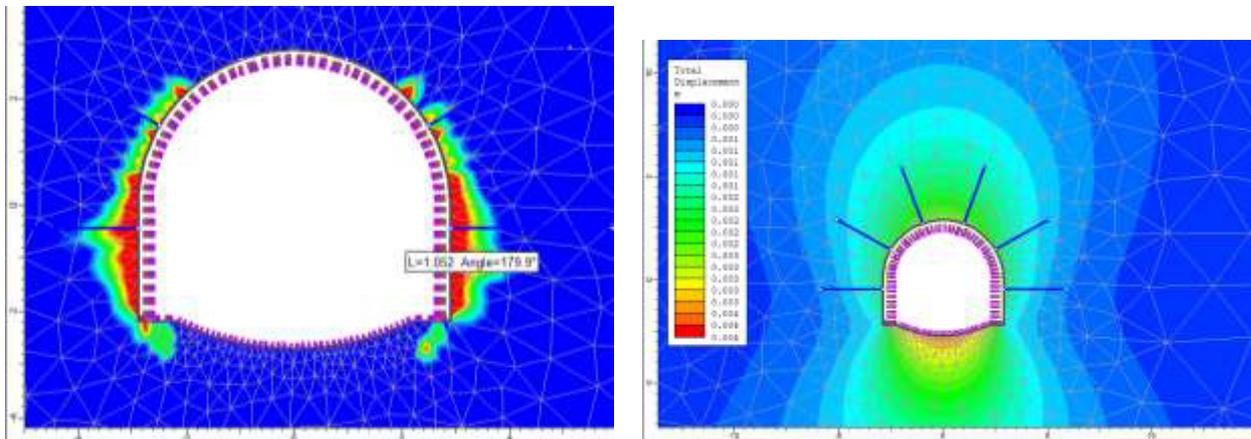


Figura 6.28 – Sezione tipo IT2: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

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 pressoché totale. Sulla base dei grafici mostrati si sono ipotizzati i seguenti valori del rilascio tensionale parziale:
  - 90% contestualmente allo scavo del fronte
  - 95% contestualmente alla posa del rivestimento di prima fase

- 100% contestualmente alla posa del rivestimento definitivo
- Il raggio plastico raggiunge allo step 5 il valore massimo, in corrispondenza dei piedritti, pari a circa 1.00 m, mentre risulta nullo in corrispondenza della calotta
- Gli spostamenti massimi calcolati allo step 5 in corrispondenza dei piedritti e della calotta risultano inferiori a 0.5 cm
- Le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori modesti sia in campo statico sia durante la fase sismica e sempre inferiori ai limiti di resistenza delle strutture previste, come mostrato nel capitolo successivo.

## 6.6 Galleria idraulica – tratto scavato con TBM

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

Si osserva che al fine di simulare in maniera semplificata il comportamento del rivestimento della galleria scavata con TBM, costituito da una serie di conci prefabbricati giuntati tra loro, sono state svolte due simulazioni parallele:

- nel primo caso il rivestimento viene simulato come un anello continuo di calcestruzzo armato, si trascura quindi la presenza dei giunti tra i conci
- nel secondo caso per simulare la presenza dei giunti si sono posizionate delle cerniere interne all'elemento "liner" in corrispondenza dei giunti previsti

il comportamento reale della struttura costituisce una soluzione intermedia tra i due casi limite illustrati sopra, i quali, come mostrato nel capitolo successivo risultano entrambi verificati sotto il profilo strutturale.

### 6.6.1 Sezione tipo IM1

La sezione tipo IM1 viene impiegata sia nei tratti appartenenti alle formazioni dei Flysch sia nei tratti appartenenti alle Argille e sabbie dell'unità di Ariano, dove l'ammasso roccioso si presenta con caratteristiche meccaniche e di resistenza medio-basse. Tra le diverse condizioni analizzate la più gravosa ai fini delle verifiche strutturali del rivestimento, e dunque dimensionante, è risultata la sezione in massima copertura, collocata immediatamente a valle del pozzo piezometrico. Si riportano di seguito i risultati ottenuti dall'analisi della sezione tipo IM1.

Per la simulazione della sezione tipo IM1 sono state considerate le condizioni geometriche e stratigrafiche in corrispondenza della pk 0+1350, in cui si ha la massima copertura pari a circa 400 m (Figure 6.29 e 6.30).

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 Calcari e calcilutiti (valori minimi).

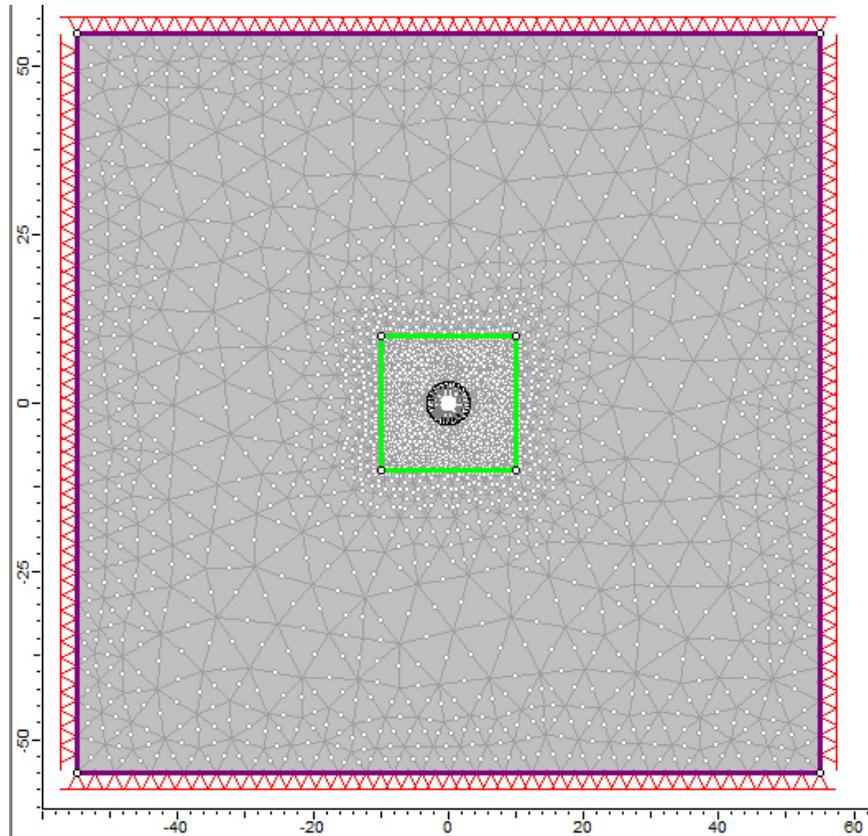


Figura 6.29 – Sezione tipo IM1: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

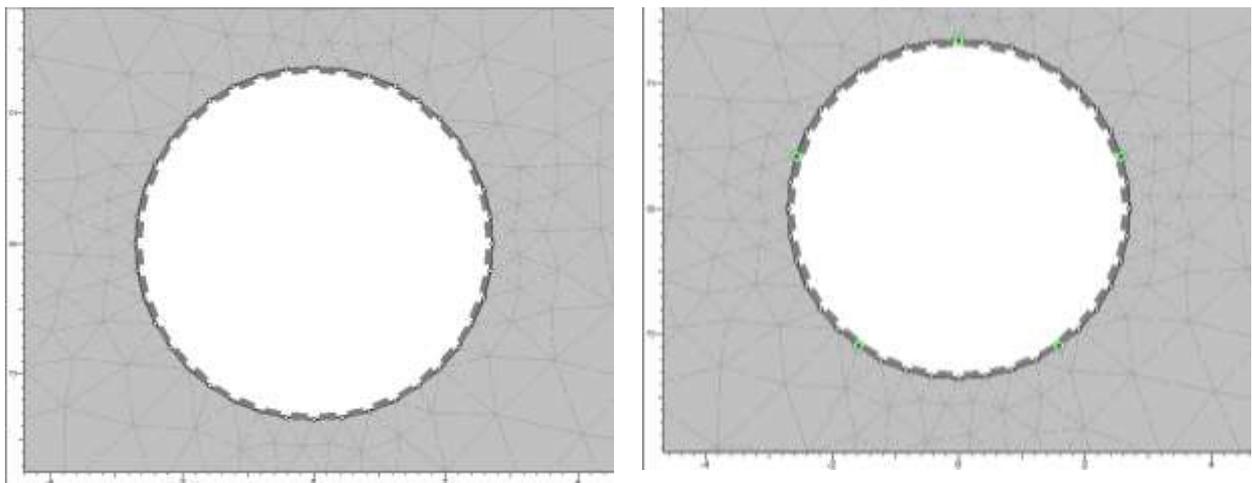


Figura 6.30 – Sezione tipo IM1: particolare del rivestimento della galleria simulato come anello continuo (sinistra) e con la presenza di cerniere interne (destra)

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

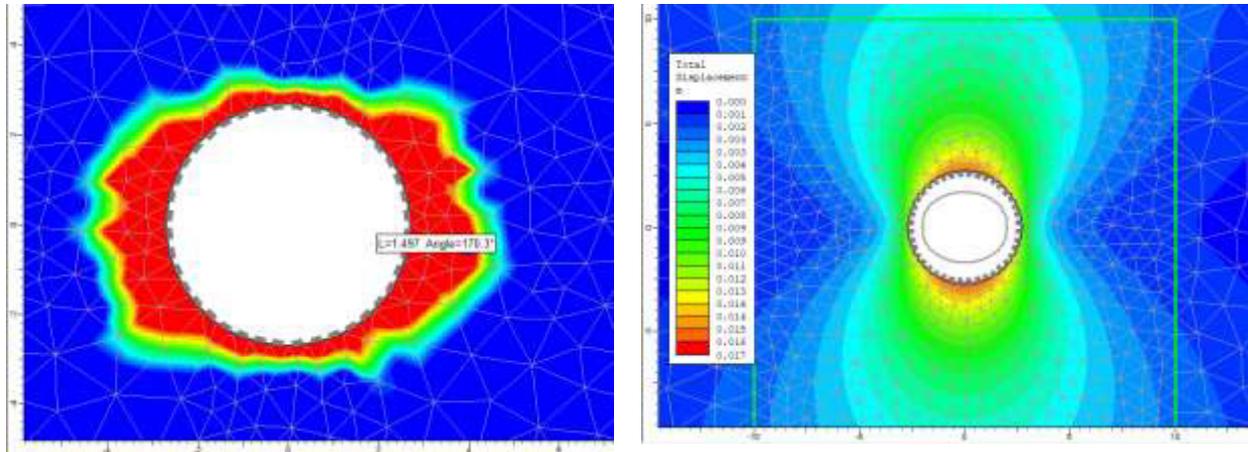


Figura 6.31 – Sezione tipo IM1: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

L'esame delle simulazioni numeriche evidenzia che:

- Il raggio plastico raggiunge allo step 5 il valore massimo, in corrispondenza dei piedritti, pari a circa 1.50 m, mentre risulta estremamente ridotto in corrispondenza della calotta
- Gli spostamenti massimi calcolati allo step 5 in corrispondenza dei piedritti e della calotta valgono circa 1.50 cm
- Le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori piuttosto elevati ma comunque inferiori ai limiti di resistenza delle strutture previste, come mostrato nel capitolo successivo.

### 6.6.2 Sezione tipo IM2

La sezione tipo IM2 viene impiegata sia nei tratti appartenenti alle formazioni dei Flysch sia nei tratti appartenenti alle Argille e sabbie dell'unità di Ariano, dove l'ammasso roccioso si presenta con caratteristiche meccaniche e di resistenza molto basse ed in corrispondenza delle zone di disturbo tettonico. Tra le diverse condizioni analizzate la più gravosa ai fini delle verifiche strutturali del rivestimento, e dunque dimensionante, è risultata la sezione posta in prossimità della pk 0+1600 in cui sono attese delle zone fortemente tettonizzate all'interno del Flysch Galestrino. Si riportano di seguito i risultati ottenuti dall'analisi della sezione tipo IM2.

Per la simulazione della sezione tipo IM2 sono state considerate le condizioni geometriche e stratigrafiche in corrispondenza della pk 0+1600, in cui si ha una copertura pari a circa 290 m (Figure 6.32 e 6.33).

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 Calcari e calcilutiti (valori minimi).

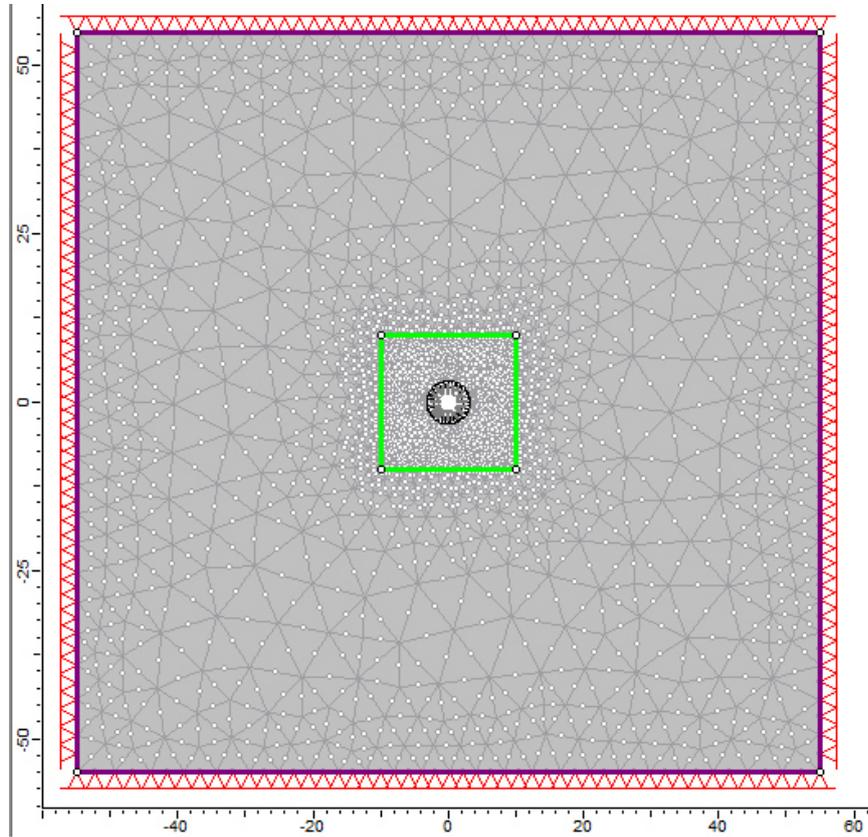


Figura 6.32 – Sezione tipo IM2: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

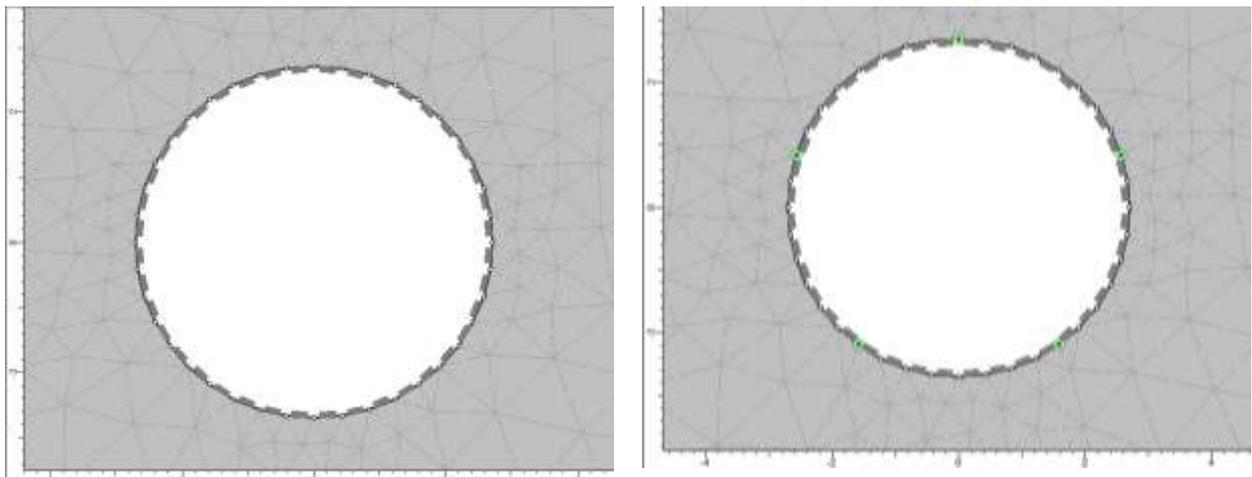


Figura 6.33 - Sezione tipo IM2: particolare del rivestimento della galleria simulato come anello continuo (sinistra) e con la presenza di cerniere interne (destra)

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

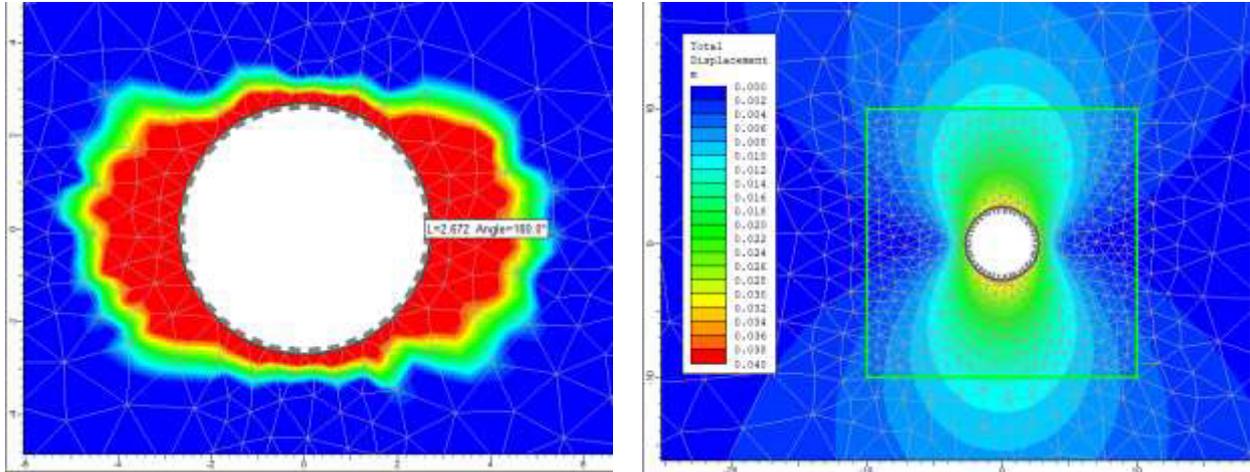


Figura 6.34 – Sezione tipo IM2: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

L'esame delle simulazioni numeriche evidenzia che:

- Il raggio plastico raggiunge allo step 5 il valore massimo, in corrispondenza dei piedritti, pari a circa 2.60 m, mentre risulta estremamente ridotto in corrispondenza della calotta
- Gli spostamenti massimi calcolati allo step 5 in corrispondenza dei piedritti e della calotta valgono circa 3.50 cm
- Le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori decisamente elevati ma comunque inferiori ai limiti di resistenza delle strutture previste, come mostrato nel capitolo successivo.

## 6.7 Caverna Pozzo Piezometrico

Per la simulazione della caverna sono state considerate le condizioni geometriche relative ad una sezione "standard", in cui non si è considerata la presenza dei pozzi e della galleria di accesso. La considerazione in maniera puntuale di tali elementi richiederebbe l'impiego di un modello numerico più complesso, di tipo tridimensionale, che esula dagli scopi del predimensionamento della caverna e pertanto viene rinviata alle fasi di progettazione più avanzate.

Nelle simulazioni numeriche si è tenuto conto di una copertura media sulla caverna pari a 50 m (Figura 6.35). In considerazione della copertura non troppo elevata il modello è stato esteso fino al piano campagna. Di seguito si riporta la stratigrafia di analisi:

- da 0 a -7 m: Depositi superficiali
- da -7 a -24 m: Argilliti (valori minimi)
- da -24 m fino al fondo del modello: Calcari e calcilutiti (valori medi):

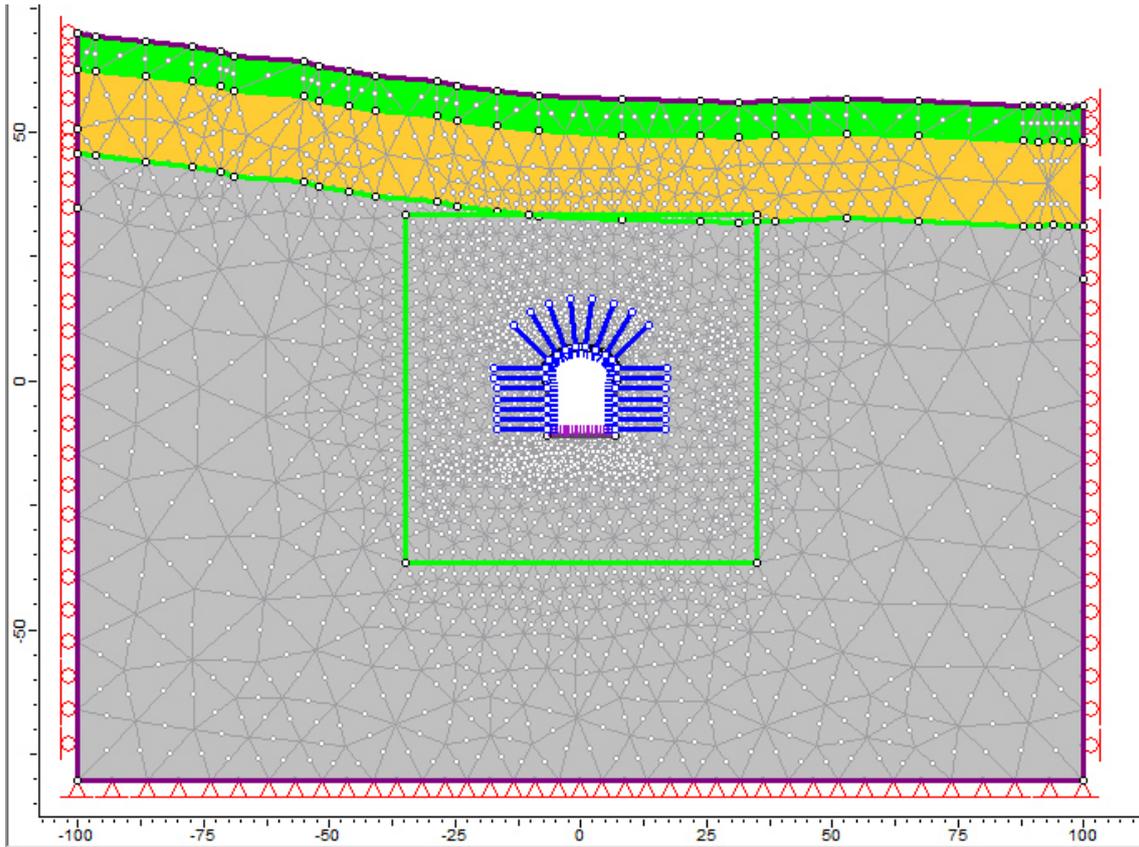


Figura 6.35 – Caverna Pozzo Piezometrico: Geometria del modello numerico per le analisi statiche relativa all'ultimo step della simulazione

I risultati delle analisi sono illustrati nelle figure seguenti in cui sono riportati il diagramma con l'estensione della fascia plastica ed il campo di spostamento del terreno nell'intorno della caverna relativi all'ultimo step dell'analisi statica.

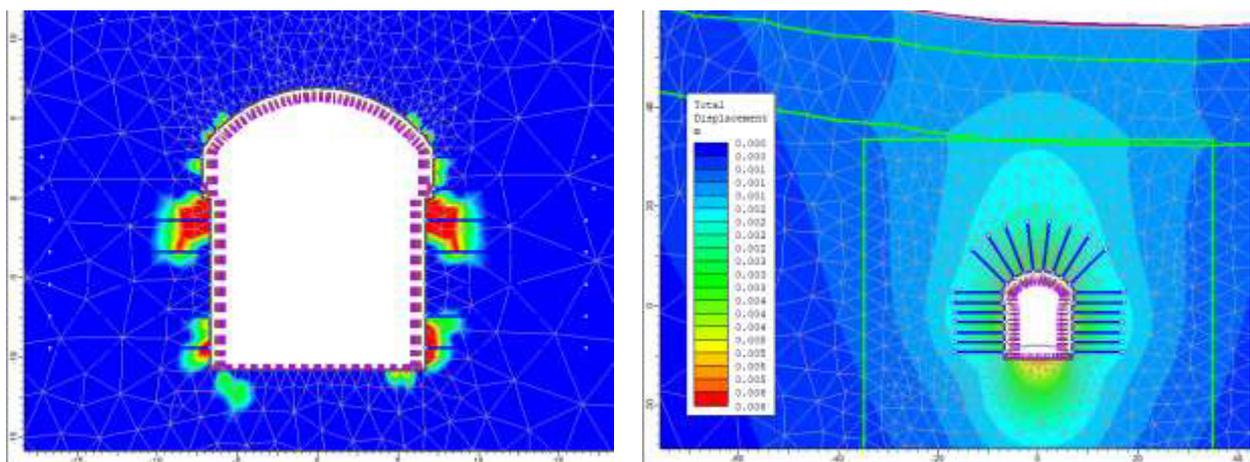


Figura 6.36 – Caverna Pozzo Piezometrico: raggio plastico, spostamenti e deformata allo step 5

L'esame delle simulazioni numeriche evidenzia che:

- allo step 5 si osserva la formazione di zone di plasticizzazione estremamente ridotte localizzate alla base dei piedritti ed in corrispondenza delle reni
- Gli spostamenti massimi calcolati allo step 5 in corrispondenza dei piedritti e della calotta valgono circa 0.50 cm
- Le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori modesti in campo statico mentre risultano più elevati durante la fase sismica ma comunque 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 delle diverse opere in sotterraneo si è effettuato il calcolo delle sollecitazioni nelle strutture tramite una serie di analisi numeriche di interazione tra le strutture di rivestimento stesse e l'ammasso roccioso 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 6 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 5.7 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  $\gamma_F$  utilizzati nelle analisi sono quelli indicati nella Tabella 6.2.1 delle NTC 2018, qui riportata (Tabella 4).

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

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

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

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

Parametro geotecnico		Coefficiente parziale $\gamma_M$	
		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
$\gamma$	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 resistenza<sup>1</sup> 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:

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

$$\text{con } A_v = A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$$

<sup>1</sup> Il diagramma di resistenza della sezione composta acciaio-calcestruzzo è stato ottenuto mediante l'ausilio del software MidasGen 2020.

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

## 7.2 Galleria di accesso alla centrale

Nei seguenti paragrafi vengono illustrate, per ciascuna sezione tipo, le principali verifiche strutturali condotte sul rivestimento di prima fase e sul rivestimento definitivo.

### 7.2.1 Sezione tipo AC1

#### Verifica del rivestimento di prima fase

La sezione tipo AC1 presenta un rivestimento di prima fase su calotta e piedritti costituito da:

- centine accoppiate HEB 180 passo 1.20 m in acciaio S275
- calcestruzzo proiettato fibrorinforzato classe C25/30 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.

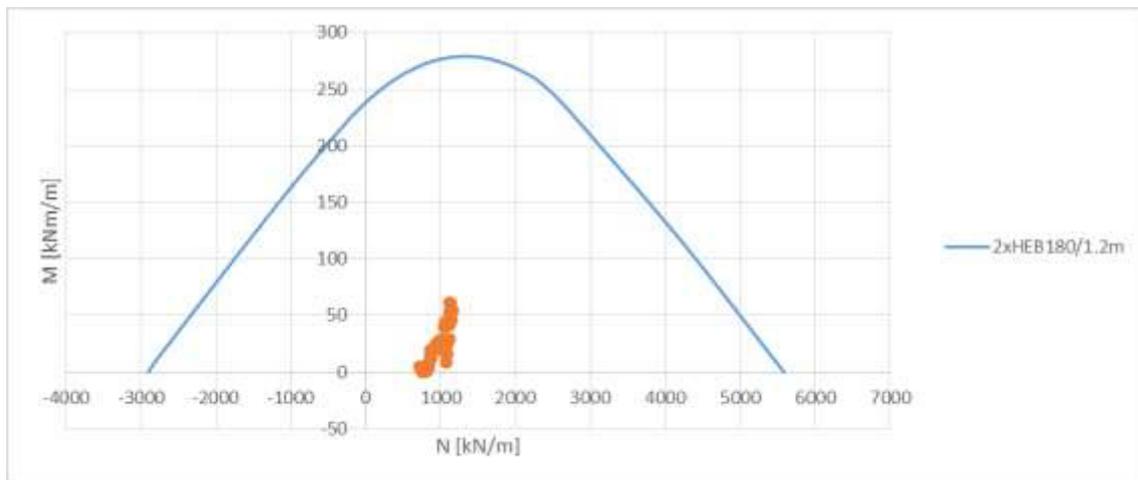


Figura 7.1 – Sezione tipo AC1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Il rivestimento di prima fase presenta una resistenza a taglio pari a 511 kN/m. La massima sollecitazione di taglio vale 56 kN/m, pertanto la verifica risulta soddisfatta.

#### Verifica del rivestimento definitivo

La sezione tipo AC1 presenta un rivestimento definitivo dello spessore di 50 cm, realizzato in calcestruzzo di classe C30/37 ed armato con 5+5  $\phi$  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.

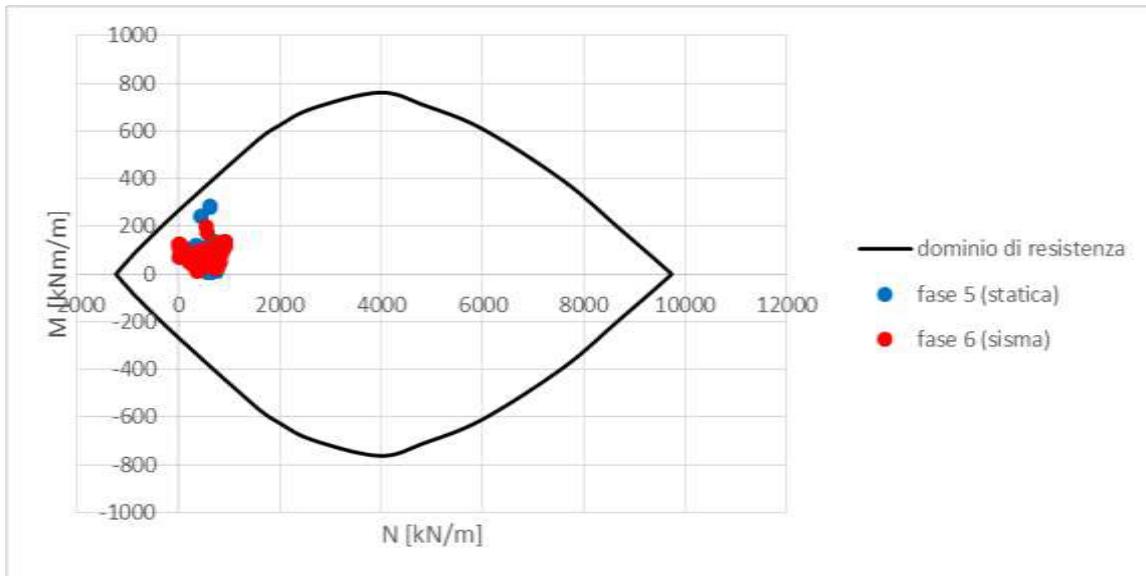


Figura 7.2 – Sezione tipo AC1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

La massima sollecitazione di taglio vale 244 kN/m in campo statico e 186 kN/m durante la fase sismica. Considerando la presenza di un'armatura a taglio costituita da staffe  $\phi 10$  con maglia 20 x 40 cm si ottiene un taglio resistente pari a 389 kN/m e pertanto la verifica risulta superata.

### 7.2.2 Sezione tipo AC2

#### Verifica del rivestimento di prima fase

La sezione tipo AC2 presenta un rivestimento di prima fase su calotta e piedritti costituito da:

- calcestruzzo proiettato fibrorinforzato classe C25/30 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.

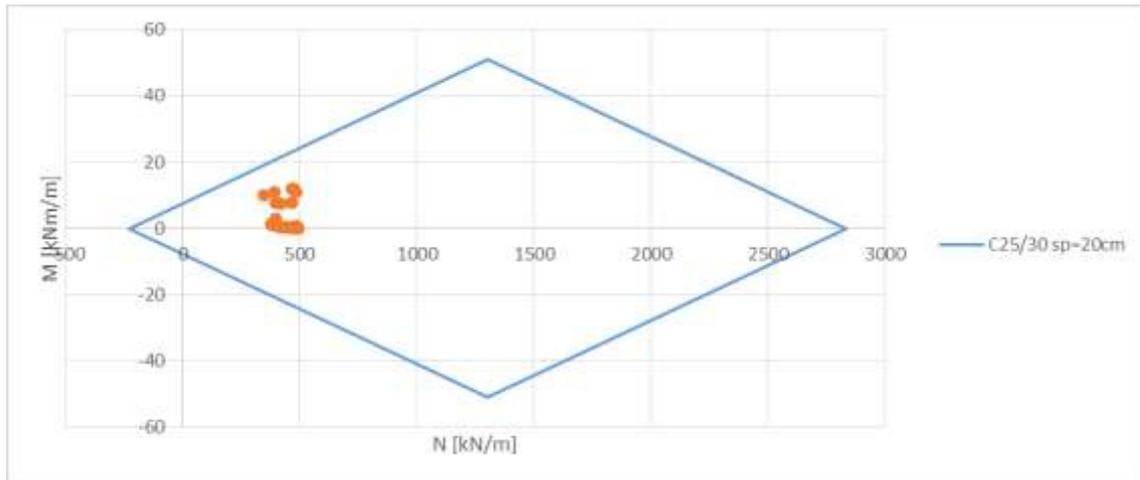


Figura 7.3 – Sezione tipo AC2: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Il rivestimento di prima fase presenta una resistenza a taglio pari a 99 kN/m. La massima sollecitazione di taglio vale 25 kN/m, pertanto la verifica risulta soddisfatta.

#### Verifica del rivestimento definitivo

La sezione tipo AC2 presenta un rivestimento definitivo dello spessore di 50 cm, realizzato in calcestruzzo di classe C30/37 ed armato con 5+5  $\phi$  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.

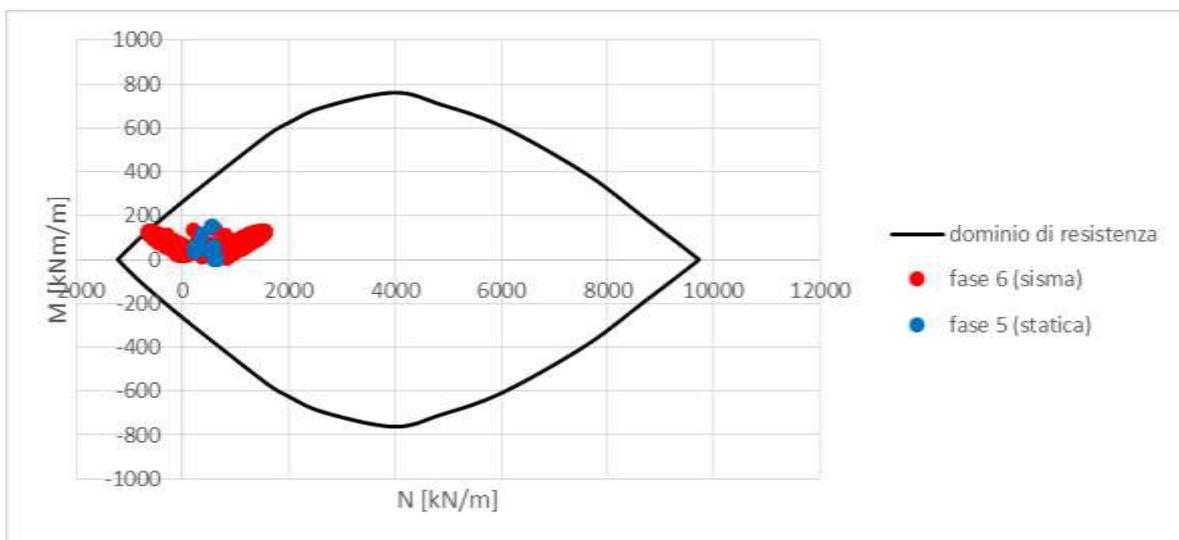


Figura 7.4 – Sezione tipo AC2: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

La massima sollecitazione di taglio vale 249 kN/m in campo statico e 259 kN/m durante la fase sismica. Considerando la presenza di un'armatura a taglio costituita da staffe

$\phi 10$  con maglia  $20 \times 40$  cm si ottiene un taglio resistente pari a  $389$  kN/m e pertanto la verifica risulta superata.

### 7.2.3 Sezione tipo AC3

#### Verifica del rivestimento di prima fase

La sezione tipo AC3 presenta un rivestimento di prima fase su calotta e piedritti costituito da:

- centine accoppiate HEB 120 passo 1.20 m in acciaio S275
- calcestruzzo proiettato fibrorinforzato classe C25/30 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.

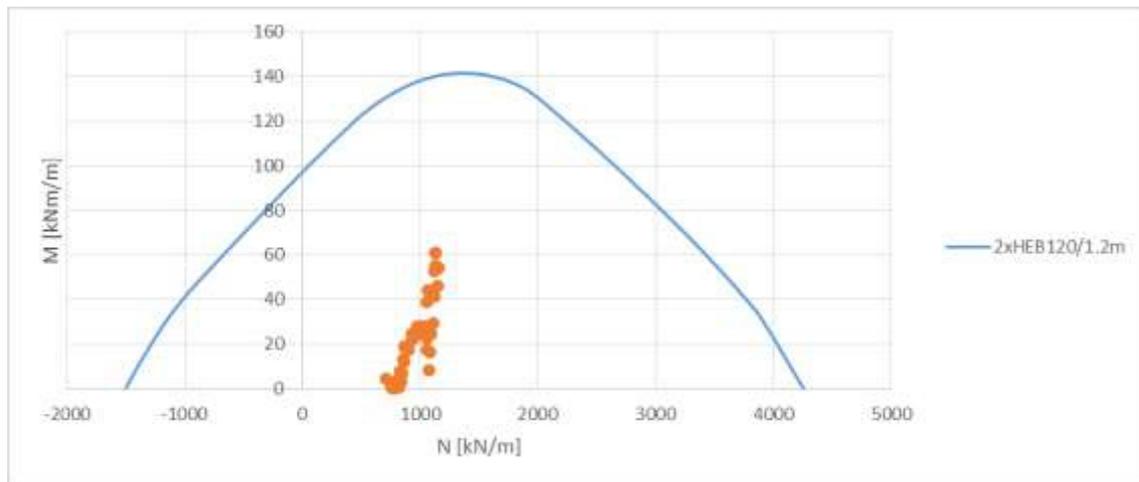


Figura 7.5 – Sezione tipo AC3: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Il rivestimento di prima fase presenta una resistenza a taglio pari a  $276$  kN/m. La massima sollecitazione di taglio vale  $48$  kN/m, pertanto la verifica risulta soddisfatta.

#### Verifica del rivestimento definitivo

La sezione tipo AC3 presenta un rivestimento definitivo dello spessore di  $50$  cm, realizzato in calcestruzzo di classe C30/37 ed armato con  $5+5 \phi 20$  / 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.

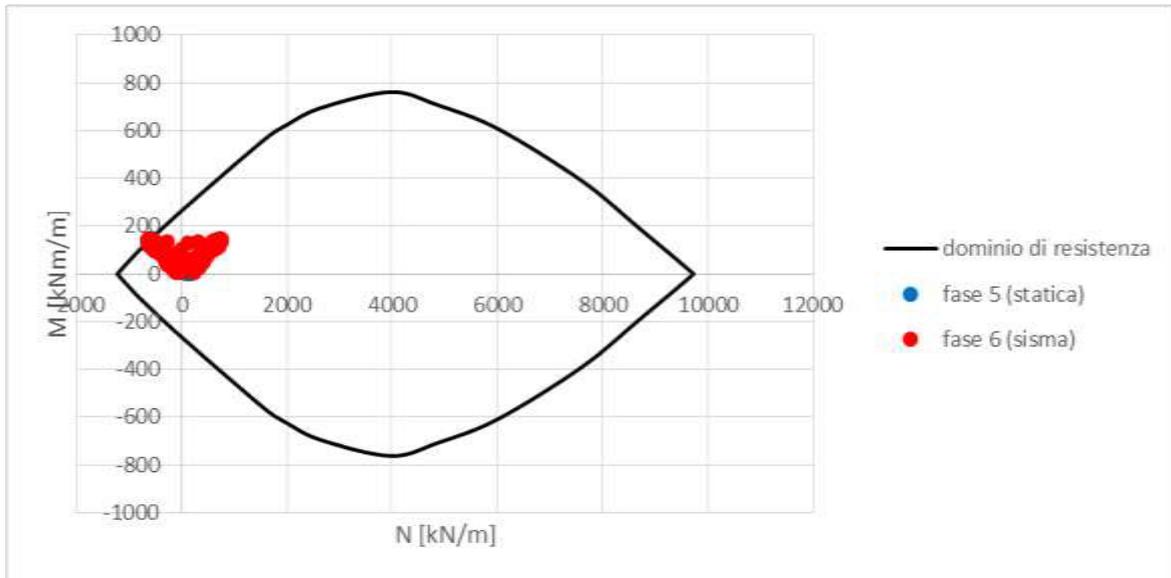


Figura 7.6 – Sezione tipo AC3: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

La massima sollecitazione di taglio vale 52 kN/m in campo statico e 154 kN/m durante la fase sismica. Considerando la presenza di un'armatura a taglio costituita da staffe  $\phi 10$  con maglia 40 x 40 cm si ottiene un taglio resistente pari a 194 kN/m e pertanto la verifica risulta superata.

### 7.3 Cunicolo delle sbarre

Nei seguenti paragrafi vengono illustrate, per ciascuna sezione tipo, le principali verifiche strutturali condotte sul rivestimento di prima fase e sul rivestimento definitivo.

#### 7.3.1 Sezione tipo CS1

##### Verifica del rivestimento di prima fase

La sezione tipo CS1 presenta un rivestimento di prima fase su calotta e piedritti costituito da:

- centine accoppiate HEB 180 passo 1.20 m in acciaio S275
- calcestruzzo proiettato fibrorinforzato classe C25/30 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.

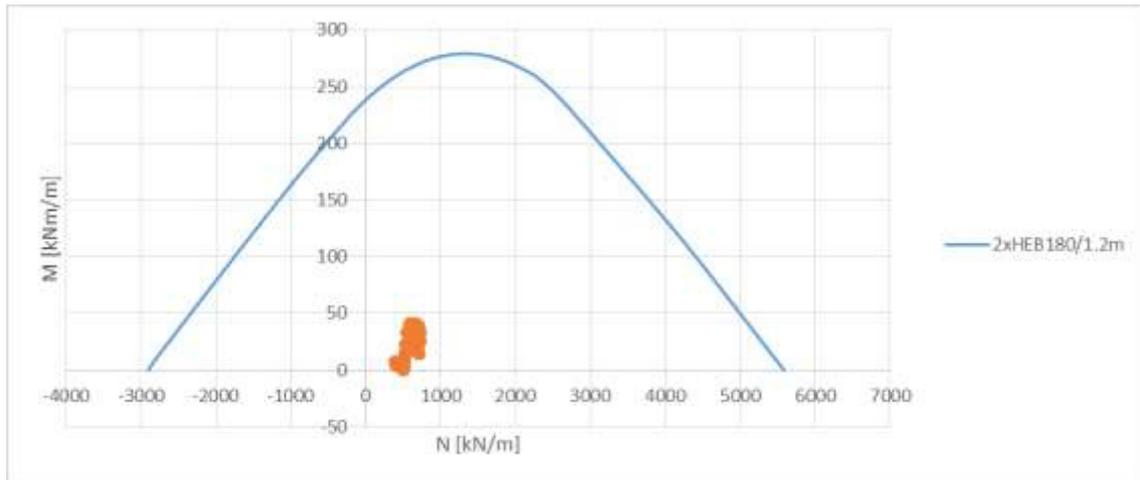


Figura 7.7 – Sezione tipo CS1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Il rivestimento di prima fase presenta una resistenza a taglio pari a 511 kN/m. La massima sollecitazione di taglio vale 80 kN/m, pertanto la verifica risulta soddisfatta.

#### Verifica del rivestimento definitivo

La sezione tipo CS1 presenta un rivestimento definitivo dello spessore di 50 cm, realizzato in calcestruzzo di classe C30/37 ed armato con 5+5  $\phi$  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.

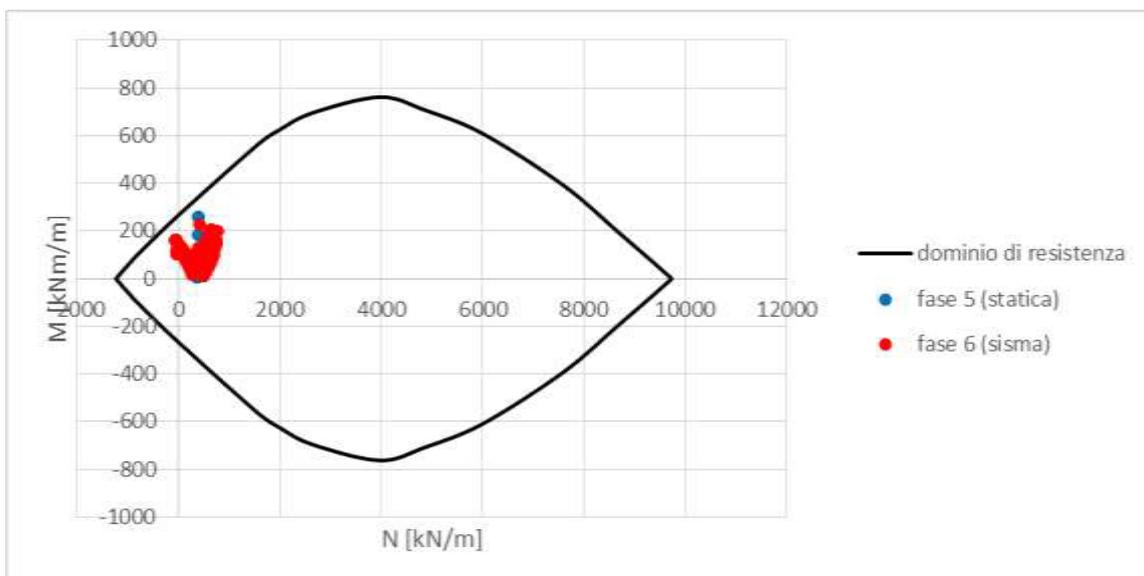


Figura 7.8 – Sezione tipo CS1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

La massima sollecitazione di taglio vale 255 kN/m in campo statico e 299 kN/m durante la fase sismica. Considerando la presenza di un'armatura a taglio costituita da staffe  $\phi 10$  con maglia 20 x 40 cm si ottiene un taglio resistente pari a 389 kN/m e pertanto la verifica risulta superata.

### 7.3.2 Sezione tipo CS2

#### Verifica del rivestimento di prima fase

La sezione tipo CS2 presenta un rivestimento di prima fase su calotta e piedritti costituito da:

- calcestruzzo proiettato fibrorinforzato classe C25/30 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.

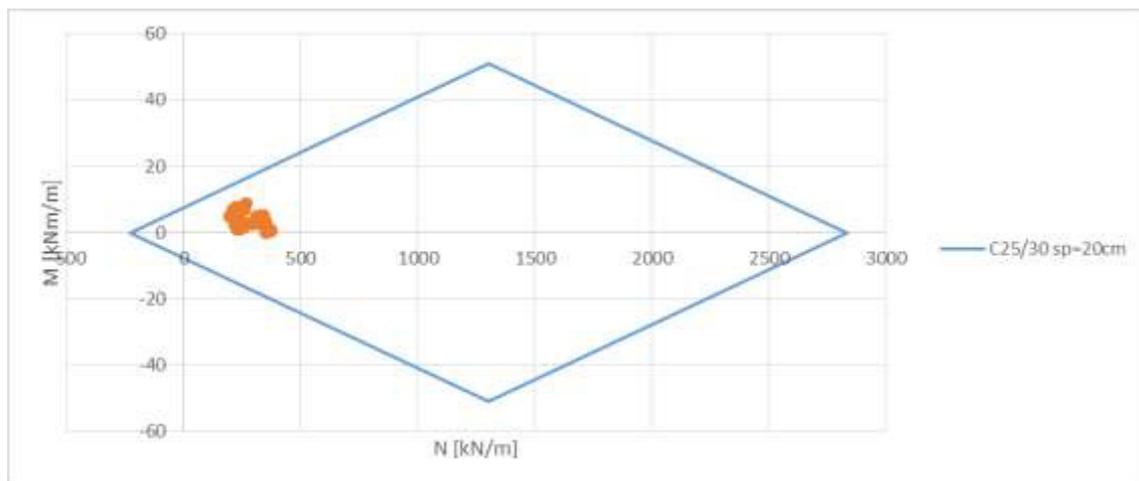


Figura 7.9 – Sezione tipo CS2: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Il rivestimento di prima fase presenta una resistenza a taglio pari a 99 kN/m. La massima sollecitazione di taglio vale 29 kN/m, pertanto la verifica risulta soddisfatta.

#### Verifica del rivestimento definitivo

La sezione tipo CS2 presenta un rivestimento definitivo dello spessore di 50 cm, realizzato in calcestruzzo di classe C30/37 ed armato con 5+5  $\phi 20$  / 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.

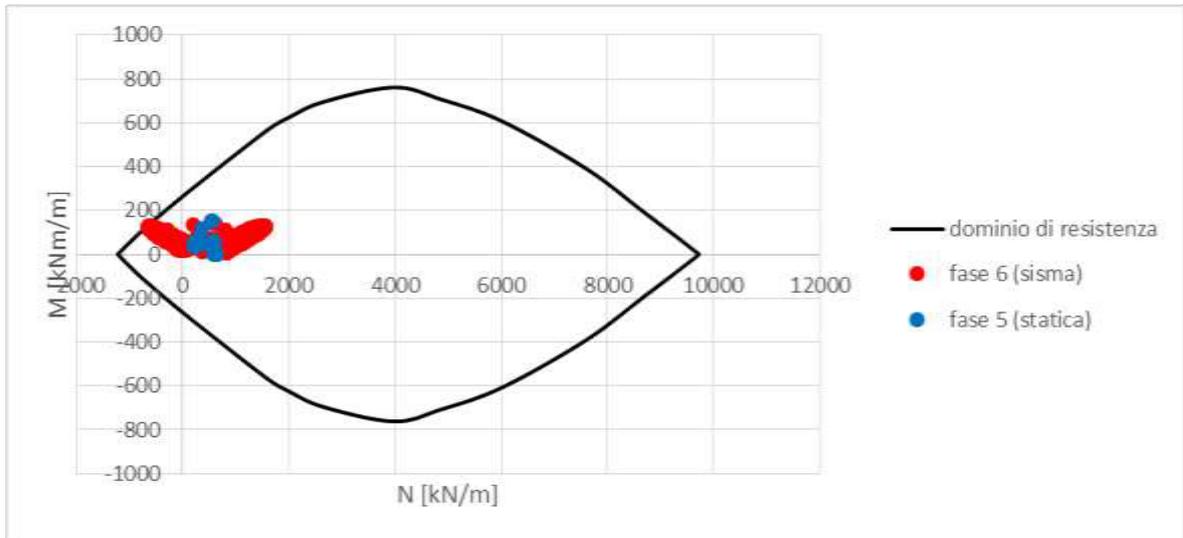


Figura 7.10 – Sezione tipo CS2: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

La massima sollecitazione di taglio vale 202 kN/m in campo statico e 245 kN/m durante la fase sismica. Considerando la presenza di un'armatura a taglio costituita da staffe  $\phi 10$  con maglia 20 x 40 cm si ottiene un taglio resistente pari a 389 kN/m e pertanto la verifica risulta superata.

### 7.3.3 Sezione tipo CS3

#### Verifica del rivestimento di prima fase

La sezione tipo CS3 presenta un rivestimento di prima fase su calotta e piedritti costituito da:

- centine accoppiate HEB 120 passo 1.20 m in acciaio S275
- calcestruzzo proiettato fibrorinforzato classe C25/30 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.

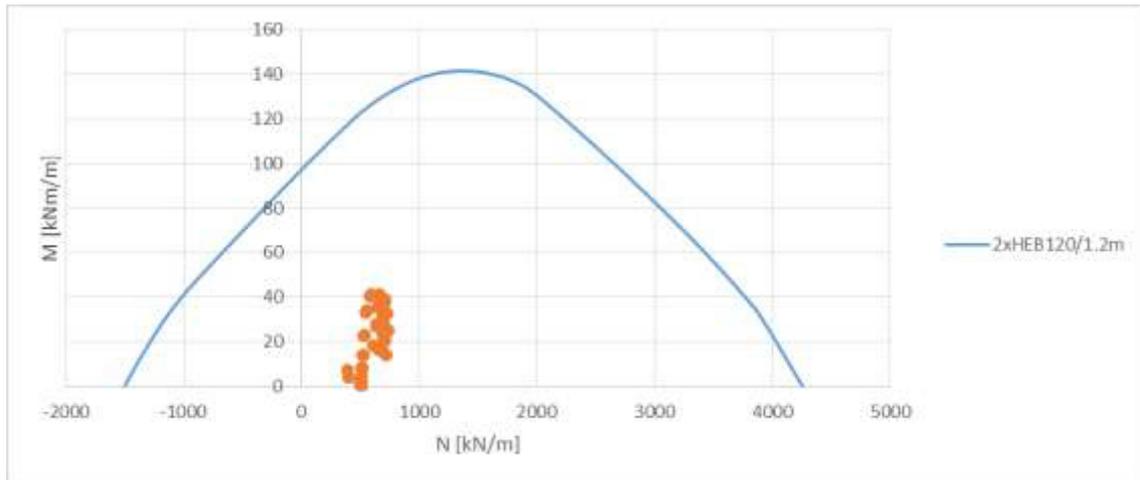


Figura 7.11 – Sezione tipo CS3: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Il rivestimento di prima fase presenta una resistenza a taglio pari a 276 kN/m. La massima sollecitazione di taglio vale 67 kN/m, pertanto la verifica risulta soddisfatta.

#### Verifica del rivestimento definitivo

La sezione tipo CS3 presenta un rivestimento definitivo dello spessore di 50 cm, realizzato in calcestruzzo di classe C30/37 ed armato con 5+5  $\phi$  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.

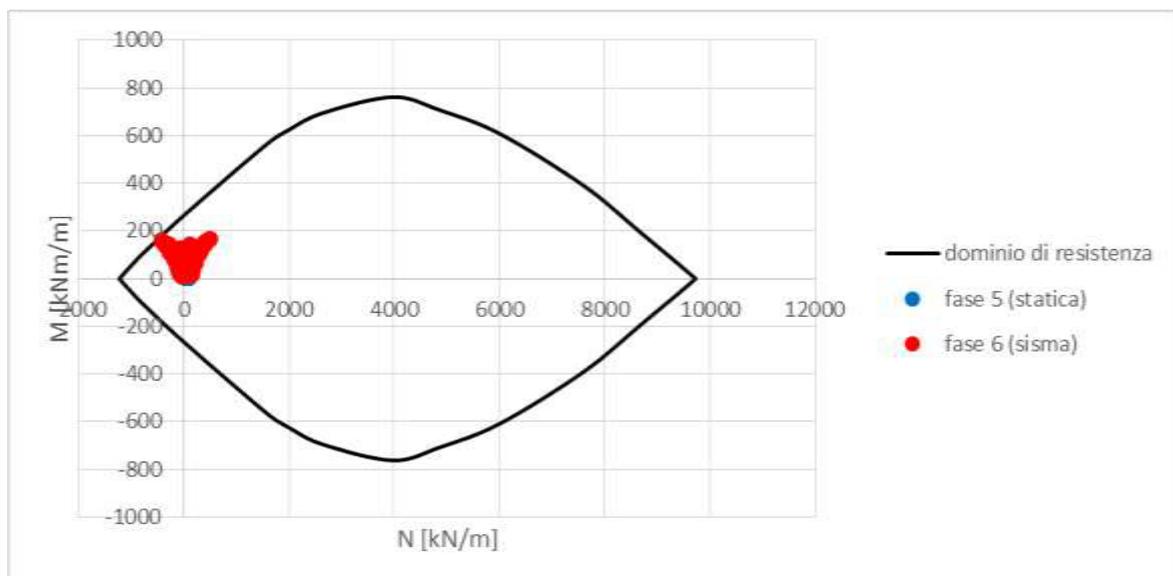


Figura 7.12 – Sezione tipo CS3: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

La massima sollecitazione di taglio vale 68 kN/m in campo statico e 136 kN/m durante la fase sismica. Considerando la presenza di un'armatura a taglio costituita da staffe  $\phi 10$  con maglia 40 x 40 cm si ottiene un taglio resistente pari a 194 kN/m e pertanto la verifica risulta superata.

## 7.4 Galleria di accesso al Pozzo Piezometrico

Nei seguenti paragrafi vengono illustrate, per ciascuna sezione tipo, le principali verifiche strutturali condotte sul rivestimento di prima fase e sul rivestimento definitivo.

### 7.4.1 Sezione tipo AP1

#### Verifica del rivestimento di prima fase

La sezione tipo AP1 presenta un rivestimento di prima fase su calotta e piedritti costituito da:

- centine accoppiate HEB 120 passo 1.20 m in acciaio S275
- calcestruzzo proiettato fibrorinforzato classe C25/30 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.

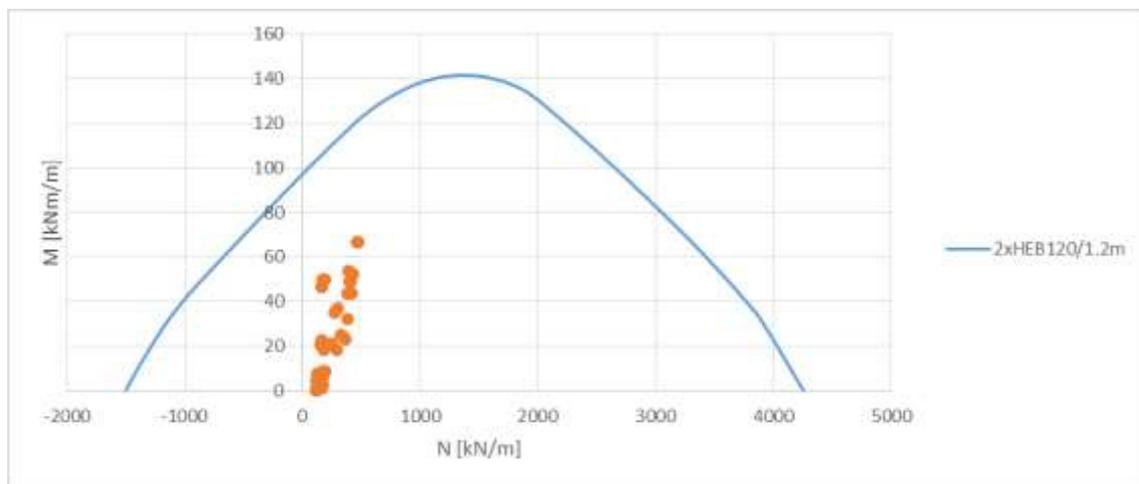


Figura 7.13 – Sezione tipo AP1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Il rivestimento di prima fase presenta una resistenza a taglio pari a 276 kN/m. La massima sollecitazione di taglio vale 16 kN/m, pertanto la verifica risulta soddisfatta.

### Verifica del rivestimento definitivo

La sezione tipo AP1 presenta un rivestimento definitivo dello spessore di 50 cm, realizzato in calcestruzzo di classe C30/37 ed armato con 5+5  $\phi$  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.

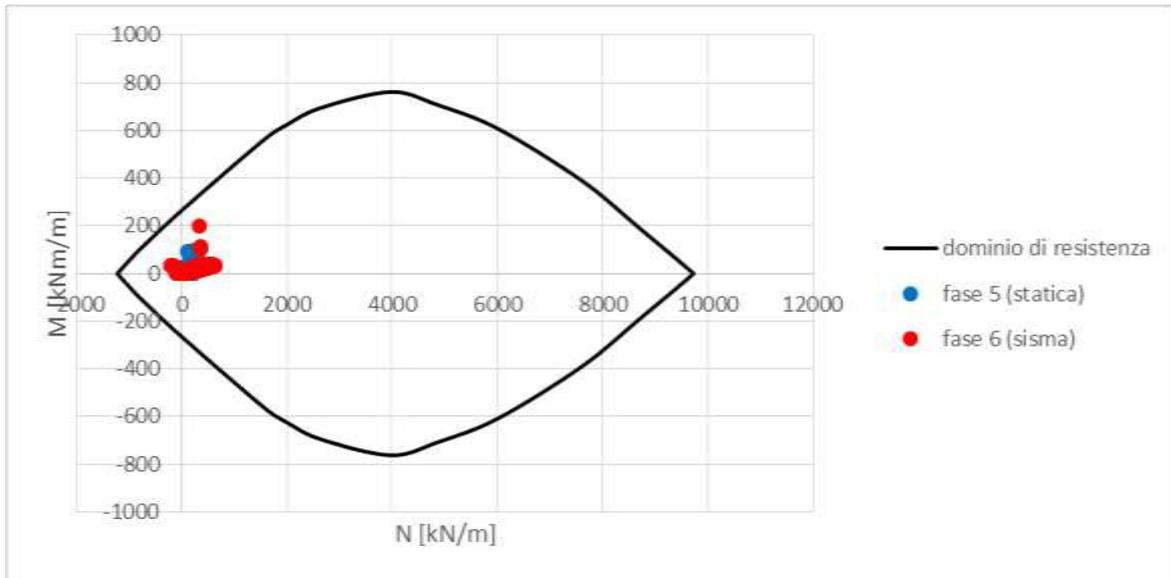


Figura 7.14 – Sezione tipo AP1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

La massima sollecitazione di taglio vale 97 kN/m in campo statico e 182 kN/m durante la fase sismica. Considerando la presenza di un'armatura a taglio costituita da staffe  $\phi$ 10 con maglia 40 x 40 cm si ottiene un taglio resistente pari a 194 kN/m e pertanto la verifica risulta superata.

#### 7.4.2 Sezione tipo AP2

### Verifica del rivestimento di prima fase

La sezione tipo AP2 presenta un rivestimento di prima fase su calotta e piedritti costituito da:

- calcestruzzo proiettato fibrorinforzato classe C25/30 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.

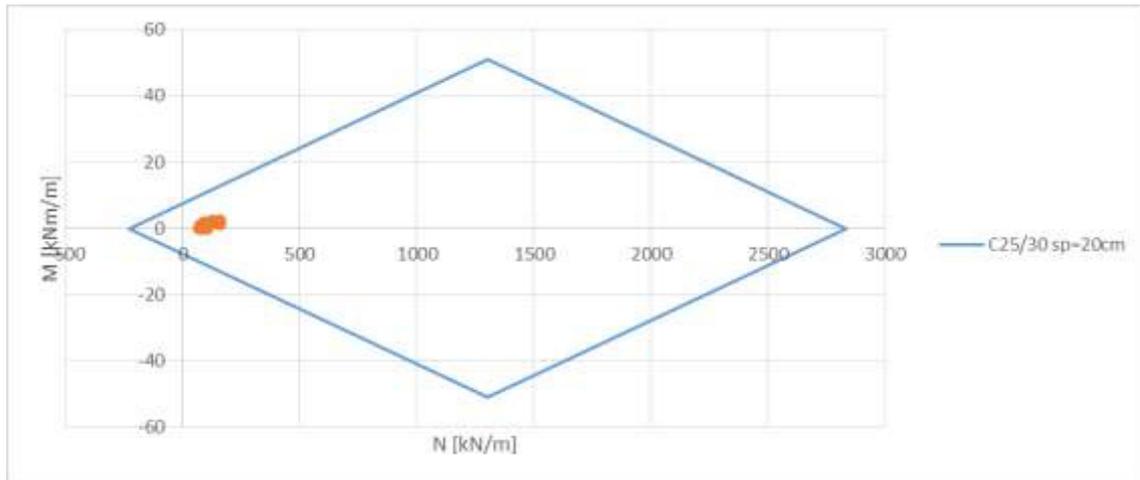


Figura 7.15 – Sezione tipo AP2: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Il rivestimento di prima fase presenta una resistenza a taglio pari a 99 kN/m. La massima sollecitazione di taglio vale 7 kN/m, pertanto la verifica risulta soddisfatta.

#### Verifica del rivestimento definitivo

La sezione tipo AP2 presenta un rivestimento definitivo dello spessore di 50 cm, realizzato in calcestruzzo di classe C30/37 ed armato con 5+5  $\phi$  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.

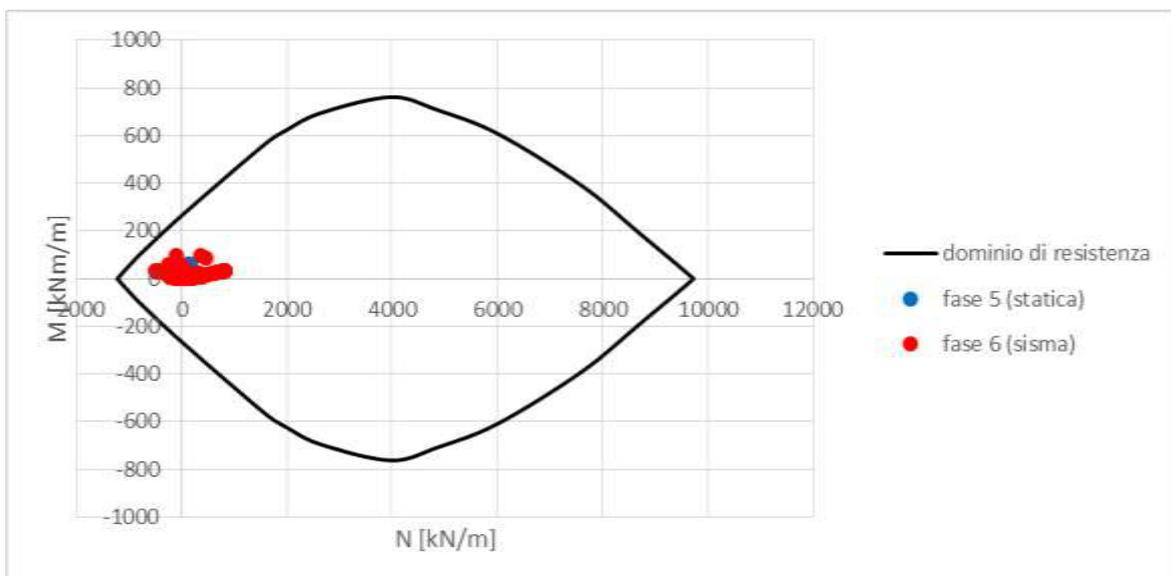


Figura 7.16 – Sezione tipo AP2: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

La massima sollecitazione di taglio vale 107 kN/m in campo statico e 169 kN/m durante la fase sismica. Considerando la presenza di un'armatura a taglio costituita da staffe  $\phi 10$  con maglia 40 x 40 cm si ottiene un taglio resistente pari a 194 kN/m e pertanto la verifica risulta superata.

## 7.5 Galleria idraulica – tratto scavato in tradizionale

Nei seguenti paragrafi vengono illustrate, per ciascuna sezione tipo, le principali verifiche strutturali condotte sul rivestimento di prima fase e sul rivestimento definitivo.

### 7.5.1 Sezione tipo IT1

#### Verifica del rivestimento di prima fase

La sezione tipo IT1 presenta un rivestimento di prima fase su calotta e piedritti costituito da:

- centine accoppiate HEB 120 passo 1.20 m in acciaio S275
- calcestruzzo proiettato fibrorinforzato classe C25/30 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.

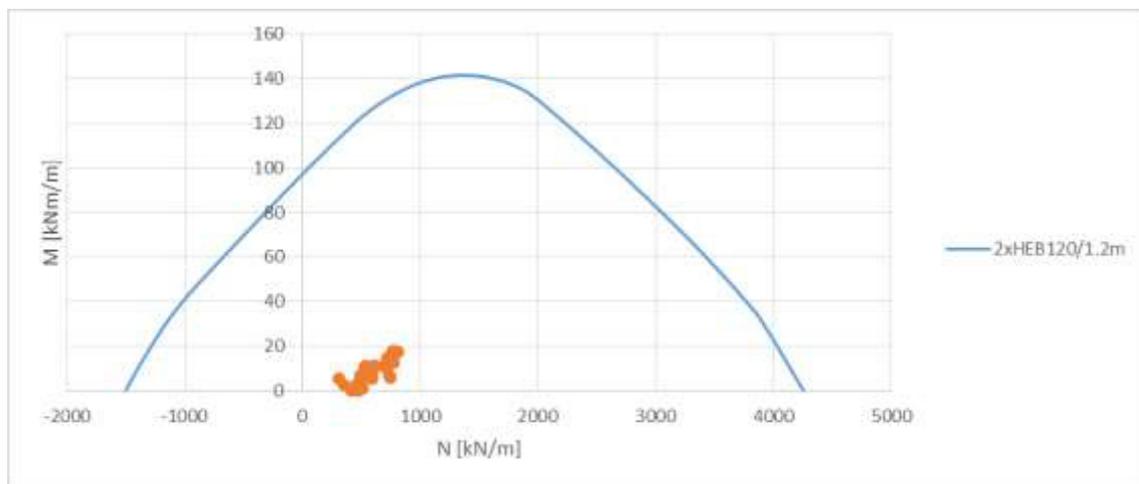


Figura 7.17 – Sezione tipo IT1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Il rivestimento di prima fase presenta una resistenza a taglio pari a 276 kN/m. La massima sollecitazione di taglio vale 41 kN/m, pertanto la verifica risulta soddisfatta.

### Verifica del rivestimento definitivo

La sezione tipo IT1 presenta un rivestimento definitivo dello spessore di 50 cm, realizzato in calcestruzzo di classe C30/37 ed armato con 5+5  $\phi$  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.

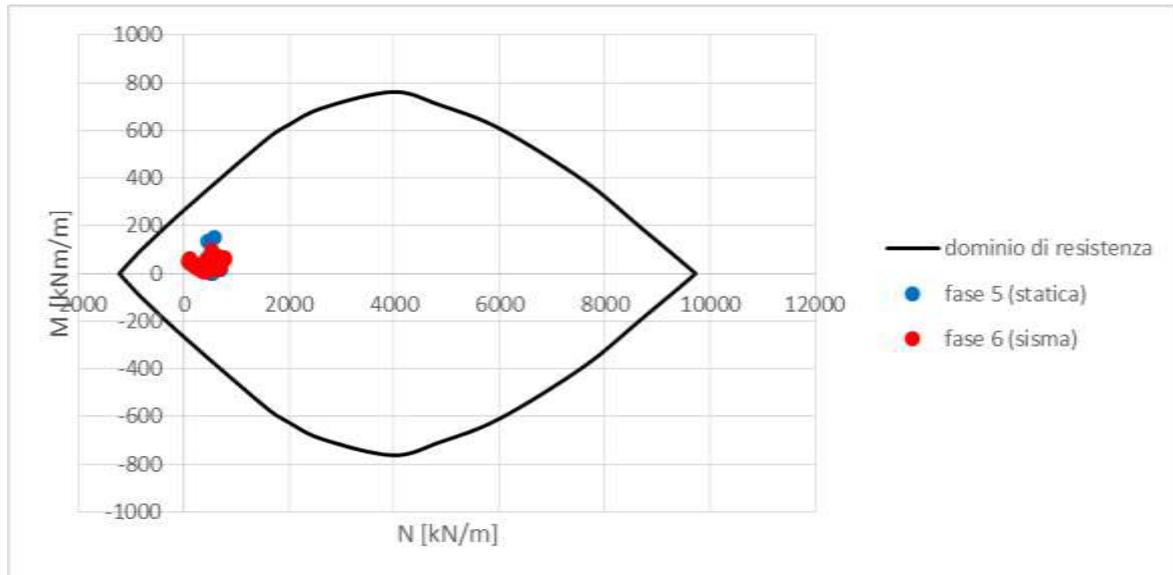


Figura 7.18 – Sezione tipo IT1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

La massima sollecitazione di taglio vale 225 kN/m in campo statico e 256 kN/m durante la fase sismica. Considerando la presenza di un'armatura a taglio costituita da staffe  $\phi$ 10 con maglia 20 x 40 cm si ottiene un taglio resistente pari a 389 kN/m e pertanto la verifica risulta superata.

### 7.5.2 Sezione tipo IT2

#### Verifica del rivestimento di prima fase

La sezione tipo AP2 presenta un rivestimento di prima fase su calotta e piedritti costituito da:

- calcestruzzo proiettato fibrorinforzato classe C25/30 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.

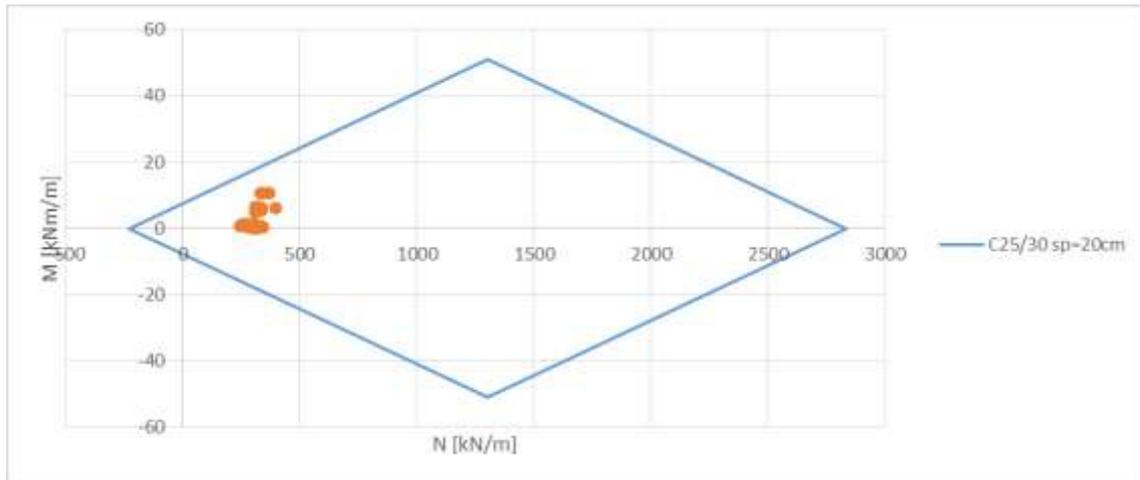


Figura 7.19 – Sezione tipo IT2: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Il rivestimento di prima fase presenta una resistenza a taglio pari a 99 kN/m. La massima sollecitazione di taglio vale 44 kN/m, pertanto la verifica risulta soddisfatta.

#### Verifica del rivestimento definitivo

La sezione tipo IT2 presenta un rivestimento definitivo dello spessore di 50 cm, realizzato in calcestruzzo di classe C30/37 ed armato con 5+5  $\phi$  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.

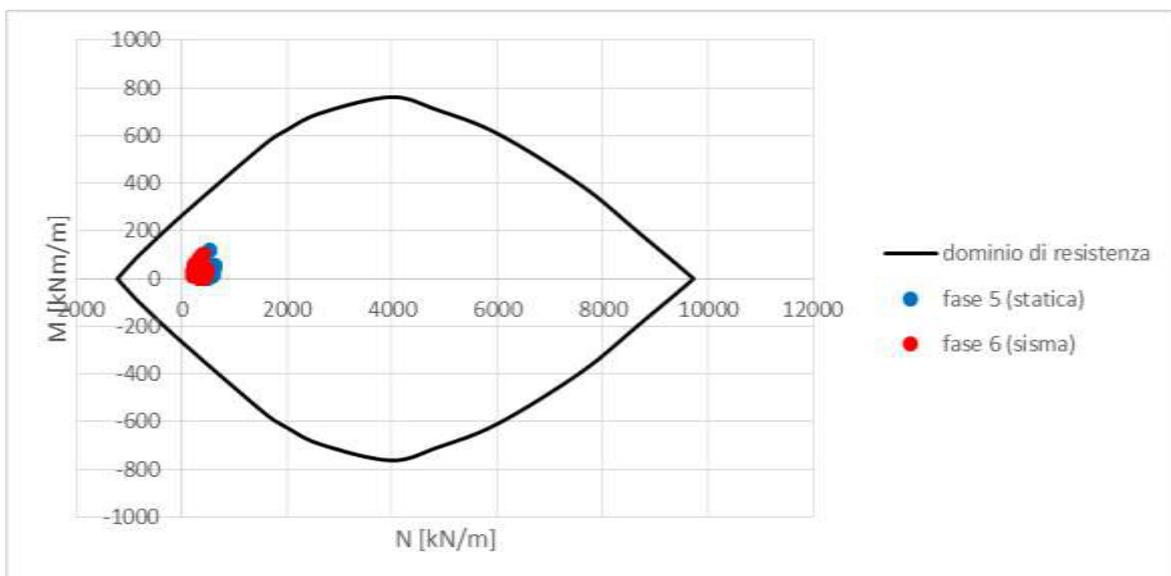


Figura 7.20 – Sezione tipo IT2: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

La massima sollecitazione di taglio vale 133 kN/m in campo statico e 170 kN/m durante la fase sismica. Considerando la presenza di un'armatura a taglio costituita da staffe  $\phi 10$  con maglia 40 x 40 cm si ottiene un taglio resistente pari a 194 kN/m e pertanto la verifica risulta superata.

## 7.6 Galleria idraulica – tratto scavato con TBM

Nei seguenti paragrafi vengono illustrate, per ciascuna sezione tipo, le principali verifiche strutturali condotte sul rivestimento definitivo.

### 7.6.1 Sezione tipo IM1

La sezione tipo IM1 presenta un rivestimento definitivo dello spessore di 25 cm, realizzato in calcestruzzo di classe C30/37 ed armato con 5+5  $\phi 24$  / 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.

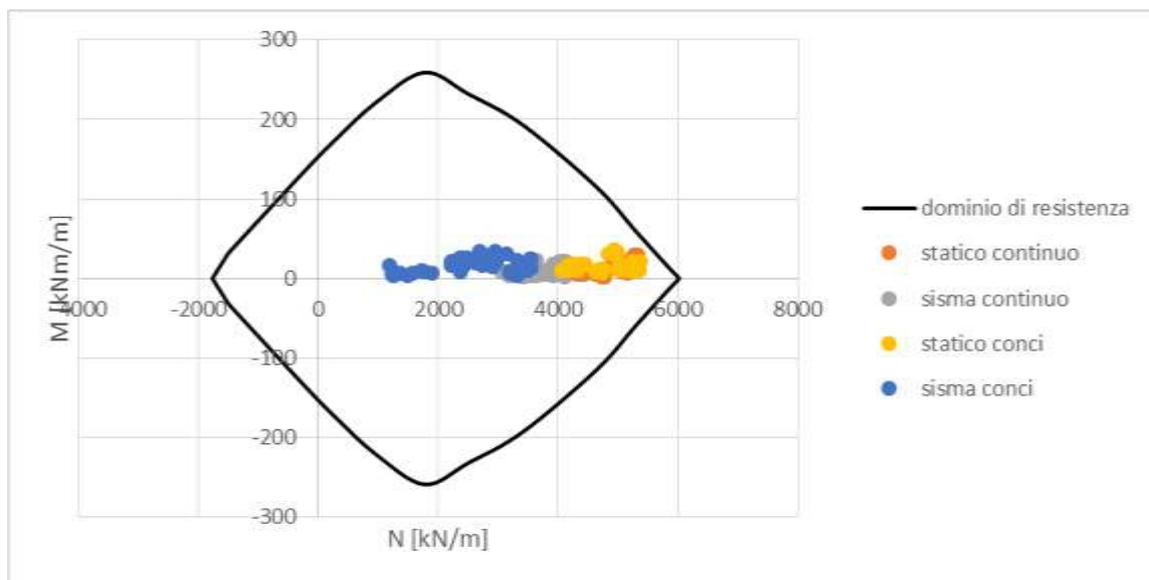


Figura 7.21 – Sezione tipo IM1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

La massima sollecitazione di taglio vale 88 kN/m in campo statico e 91 kN/m durante la fase sismica. Trascurando il contributo dell'armatura a taglio si ottiene un taglio resistente pari a 155 kN/m e pertanto la verifica risulta superata.

### 7.6.2 Sezione tipo IM2

La sezione tipo IM2 presenta un rivestimento definitivo dello spessore di 25 cm, realizzato in calcestruzzo di classe C40/50 ed armato con 5+5  $\phi 24$  / 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.

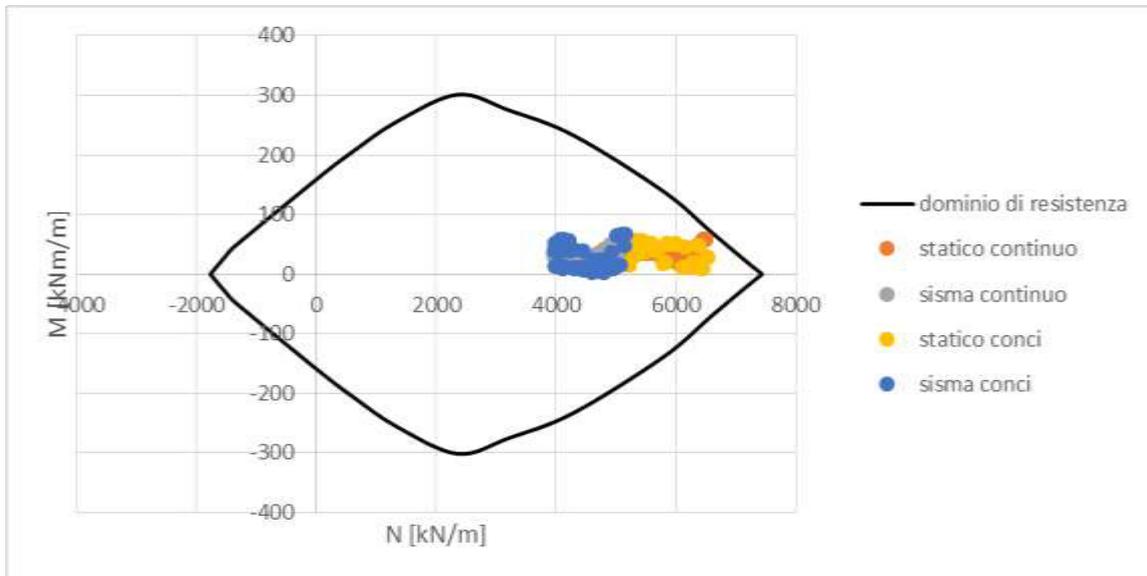


Figura 7.22 – Sezione tipo IM2: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

La massima sollecitazione di taglio vale 154 kN/m in campo statico e 156 kN/m durante la fase sismica. Considerando la presenza di un'armatura a taglio costituita da staffe  $\phi 10$  con maglia 20 x 40 cm si ottiene un taglio resistente pari a 172 kN/m e pertanto la verifica risulta superata.

## 7.7 Caverna Pozzo Piezometrico

Nei seguenti paragrafi vengono illustrate le principali verifiche strutturali condotte sul rivestimento di prima fase e sul rivestimento definitivo della caverna.

La sezione tipo della caverna presenta un rivestimento di prima fase su calotta e piedritti costituito da:

- calcestruzzo proiettato fibrorinforzato classe C25/30 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.

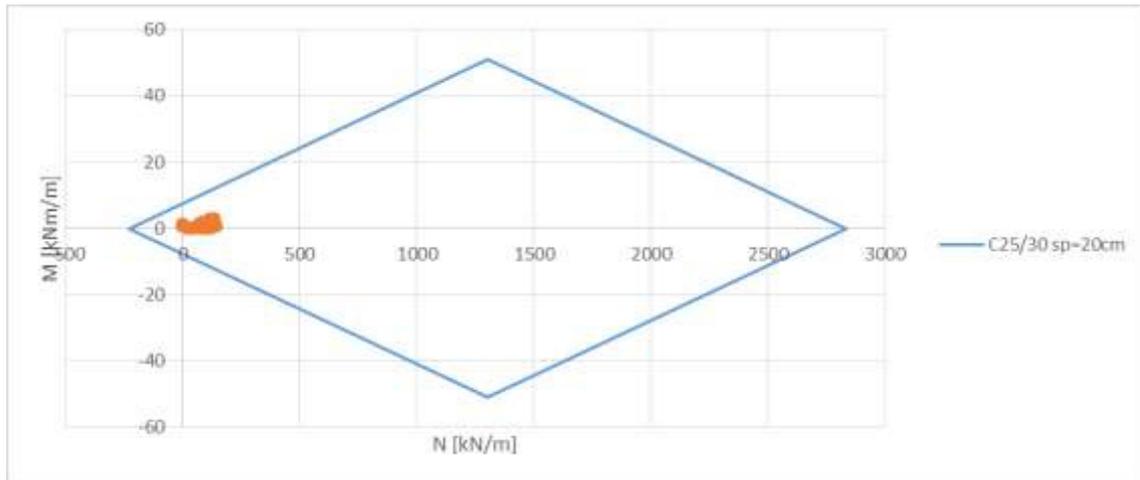


Figura 7.23 – Caverna Pozzo Piezometrico: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Il rivestimento di prima fase presenta una resistenza a taglio pari a 99 kN/m. La massima sollecitazione di taglio vale 13 kN/m, pertanto la verifica risulta soddisfatta.

#### Verifica del rivestimento definitivo

La sezione tipo della caverna presenta un rivestimento definitivo dello spessore di 50 cm, realizzato in calcestruzzo di classe C30/37 ed armato con 5+5  $\phi$  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.

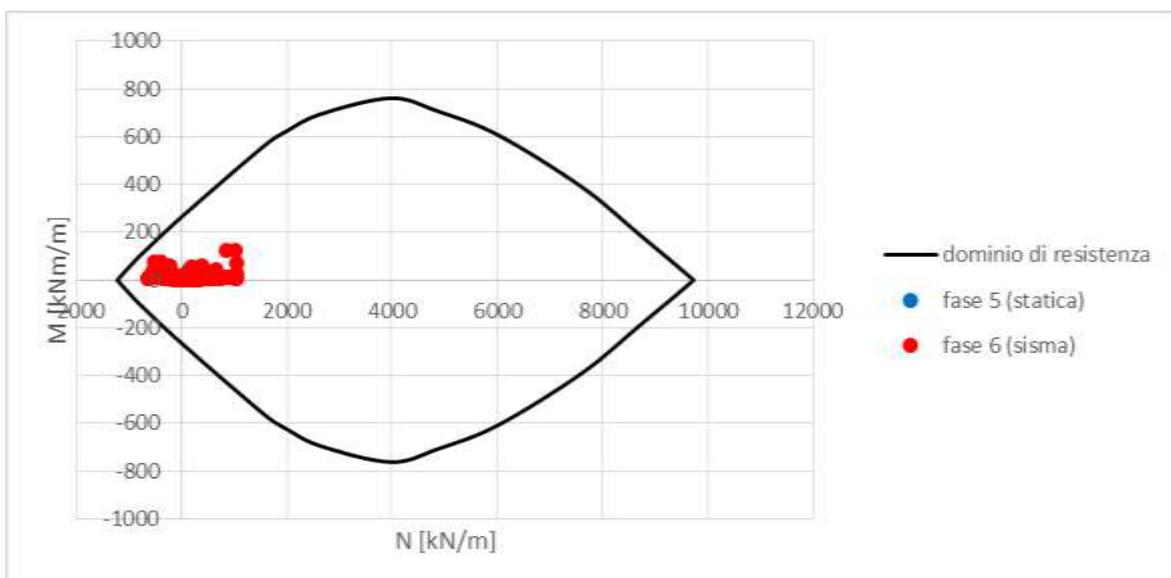


Figura 7.24 – Caverna Pozzo Piezometrico: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

La massima sollecitazione di taglio vale 60 kN/m in campo statico e 125 kN/m durante la fase sismica. Considerando la presenza di un'armatura a taglio costituita da staffe  $\phi 10$  con maglia 40 x 40 cm si ottiene un taglio resistente pari a 194 kN/m e pertanto la verifica risulta superata.