

# “VILLAROSA”

## Progetto di impianto di accumulo idroelettrico

Comuni di Calascibetta, Enna e Villarosa (EN)

### COMMITTENTE



#### COORDINAMENTO / MANDANTE

STRATEGIES FOR WATER



Progettisti: Ing. Luigi Lorenzo Papetti

#### PROGETTAZIONE GEOTECNICA / MANDATARIA



Progettista: Ing. Luisella Vai



### Relazione descrittiva e di calcolo della galleria idraulica e della galleria di accesso

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
0	PRIMA EMISSIONE	Luglio 22	VLDC-SP	LV	PAC
1	REVISIONE 1 - INTEGRAZIONI	Maggio 23	SP	LV	P.MACCHI

Codice commessa: 1388    Codifica documento: 1388-A-GD-R-03-1

## INDICE

1. INTRODUZIONE .....	1
2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....	2
3. CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI .....	3
4. CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA.....	4
4.1 Caratterizzazione geologica.....	4
4.2 Caratterizzazione geotecnica.....	4
4.3 Caratterizzazione sismica.....	5
4.3.1 Galleria artificiale .....	6
4.3.2 Gallerie naturali .....	6
5. DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI PREVISTI.....	9
5.1 Galleria idraulica.....	9
5.1.1 Sezione tipo GI1 .....	10
5.1.2 Sezione tipo GI2 .....	10
5.1.3 Sezione tipo GIT1 .....	11
5.1.4 Sezione tipo GIT2.....	12
5.2 Galleria di accesso alla centrale .....	14
5.2.1 Galleria artificiale e Galleria cut & cover .....	15
5.2.2 Sezione tipo GC1 .....	19
5.2.3 Sezione tipo GC2 .....	20
5.3 Materiali.....	21
6. GALLERIE NATURALI: SINTESI DEI RISULTATI .....	23
6.1 Generalità sui modelli numerici per lo scavo delle gallerie naturali.....	23
6.2 Galleria Idraulica.....	24
6.2.1 Sezione tipo GI1 .....	25
6.2.2 Sezione tipo GI2 – Alta copertura .....	28
6.2.3 Sezione tipo GI2 – Bassa copertura .....	32
6.3 Galleria di accesso alla centrale .....	35
6.3.1 Sezione tipo GC1 .....	35
7. GALLERIE NATURALI: VERIFICHE STRUTTURALI DEI RIVESTIMENTI.....	39
7.1 Approcci di calcolo.....	39
7.1.1 Verifiche dei rivestimenti delle gallerie .....	39
7.1.2 Verifica della stabilità del fronte di scavo .....	41
7.2 Galleria idraulica.....	44

7.2.1	Sezione tipo GI1 .....	44
7.2.2	Sezione tipo GI2 .....	44
7.3	Galleria di accesso alla centrale .....	46
7.3.1	Verifica del rivestimento di prima fase .....	46
7.3.2	Verifica del rivestimento definitivo .....	46
7.3.3	Verifica di stabilità del fronte di scavo .....	49
8.	GALLERIA ARTIFICIALE E CUT&COVER: ANALISI E VERIFICHE.....	51
8.1	Generalità sui modelli numerici per gli scavi in trincea e per la galleria artificiale <i>cut &amp; cover</i> .....	52
8.1.1	Criteri di progettazione e verifica agli stati limite .....	52
8.2	Condizioni stratigrafiche e geometria di analisi .....	54
8.3	Verifiche SLU di tipo geotecnico (SLU-GEO) .....	56
8.3.1	Stabilità dell'opera (resistenza del terreno a valle).....	56
8.4	Verifiche SLU di tipo strutturale (SLU-STR) .....	57
8.4.1	Verifica della resistenza strutturale dei diaframmi .....	57
8.4.2	Verifica della resistenza strutturale della soletta-puntone .....	64

## TABELLE

Tabella 4.1 – Parametri geotecnici Unità Geotecniche

Tabella 4.2 – Riassunto dei dati di inputi sismico impiegati nei modelli di calcolo

Tabella 6.1 - Caratteristiche geomeccaniche della formazione di Terravecchia (135 m profondità)

Tabella 6.2 – Caratteristiche geomeccaniche della formazione di Terravecchia (145 m profondità)

Tabella 6.3 - Caratteristiche geomeccaniche della formazione di Terravecchia (15 m profondità)

Tabella 6.4 – Caratteristiche geomeccaniche della formazione di Terravecchia (10 m profondità)

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)

Tabella 7.3 – Sezione tipo GC1: calcolo del taglio resistente del rivestimento definitivo

Tabella 8.1 – Coefficienti parziali sulle azioni (A1 ed A2)

Tabella 8.2 – Coefficienti parziali sui terreni (M1 ed M2)

Tabella 8.3 – Coefficienti parziali per le verifiche di stabilità globale (R2)

Tabella 8.4 – Coefficienti parziali sulle resistenze (R1, R2 ed R3)

Tabella 8.5 – Galleria cut&cover di accesso alla centrale: Riepilogo delle spinte passive mobilitate

Tabella 8.6 – Galleria cut&cover di accesso alla centrale: verifiche a taglio della soletta-puntone

## FIGURE

Figura 1-1 – Posizione dell'attuale invaso

Figura 4-1 – Applicazione delle deformazioni di taglio sui bordi del modello per l'applicazione del Metodo delle deformazioni di taglio puro in campo libero

Figura 5-1 – Profilo in asse alla galleria idraulica

Figura 5-2 – Sezione tipo GI1: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5-3 – Sezione tipo GI2: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5-4 – Sezione tipo GIT1: geometria del cavo e interventi di sostegno, sezione trasversale

Figura 5-5 – Sezione tipo GIT2: geometria del cavo e interventi di sostegno, sezione trasversale

Figura 5-6 – Sezione tipo GIT2: geometria del cavo e interventi di sostegno, sezione longitudinale

Figura 5-7 – Profilo in asse alla galleria di accesso

Figura 5-8 – Sezione tipo TRa durante la fase realizzativa e nella fase finale a rinaturalizzazione completata

Figura 5-9 – Sezione tipo TRb durante la fase realizzativa e nella fase finale a rinaturalizzazione completata

Figura 5-10 – Sezione tipo TRc durante la fase realizzativa e nella fase finale a rinaturalizzazione completata

Figura 5-11 – Sezione tipo per lo scavo *cut & cover* della via di accesso alla centrale

Figura 5-12 – Sezione tipo per lo scavo in trincea della via di accesso alla centrale

Figura 5-13 – Sezione tipo GC1: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5-14 – Sezione tipo GC2: geometria del cavo e interventi di sostegno, sezione trasversale

Figura 5-15 – Sezione tipo GC2: geometria del cavo e interventi di sostegno, sezione longitudinale

Figura 6-1 – Sezione tipo GI1: Geometria del modello numerico utilizzato all'ultimo step dell'analisi statica e dell'analisi sismica

Figura 6-2 – Sezione tipo GI1: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

Figura 6-3 – Sezione tipo GI1: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti limitate ad una convergenza massima di 15 cm

Figura 6-4 – Sezione tipo GI1: raggio plastico e spostamenti nella fase di esercizio

Figura 6-5 – Sezione tipo GI1: incremento delle plasticizzazione e delle deformazioni durante la fase sismica

- Figura 6-6 – Sezione tipo GI2-alta copertura: Geometria del modello numerico utilizzato all'ultimo step dell'analisi statica e dell'analisi sismica
- Figura 6-7 – Sezione tipo GI2-alta copertura: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti
- Figura 6-8 – Sezione tipo GI2-alta copertura: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti limitate ad una convergenza massima di 15 cm
- Figura 6-9 – Sezione tipo GI2-alta copertura: raggio plastico e spostamenti nella fase di esercizio
- Figura 6-10 – Sezione tipo GI2-alta copertura: incremento delle plasticizzazione e delle deformazioni durante la fase sismica
- Figura 6-11 – Sezione tipo GI2-bassa copertura: Geometria del modello numerico utilizzato all'ultimo step dell'analisi statica e dell'analisi sismica
- Figura 6-12 – Sezione tipo GI2-bassa copertura: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti
- Figura 6-13 – Sezione tipo GI2-bassa copertura: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti limitate ad una convergenza massima di 15 cm
- Figura 6-14 – Sezione tipo GI2-bassa copertura: raggio plastico e spostamenti nella fase di esercizio
- Figura 6-15 – Sezione tipo GI2-bassa copertura: incremento delle plasticizzazione e delle deformazioni durante la fase sismica
- Figura 6-16 – Sezione tipo GC1: Geometria del modello numerico utilizzato all'ultimo step dell'analisi statica e dell'analisi sismica
- Figura 6-17 – Sezione tipo GC1: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti
- Figura 6-18 – Sezione tipo GC1: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti limitate ad una convergenza massima di 20 cm
- Figura 6-19 – Sezione tipo GC1: raggio plastico e spostamenti nella fase di esercizio
- Figura 6-20 – Sezione tipo GC1: incremento delle plasticizzazione e delle deformazioni durante la fase sismica
- Figura 7-1 – Stabilità del fronte metodo di Anagnostou & Kovari (1996)
- Figura 7-2 – Schema geometrico e forze agenti metodo di Anagnostou & Kovari (1996)
- Figura 7-3 – Schema di calcolo della forza applicata dall'elemento al fronte
- Figura 7-4 – Sezione tipo GI1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo
- Figura 7-5 – Sezione tipo GI2-alta copertura: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo
- Figura 7-6 – Sezione tipo GI2-bassa copertura: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo
- Figura 7-7 – Sezione tipo GC1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase
- Figura 7-8 – Sezione tipo GC1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo
- Figura 8-1 – Accesso alla centrale ( $h_{max}$  di scavo = 10 m): modello numerico delle paratie all'ultimo step di analisi
- Figura 8-2 – Galleria artificiale di accesso alla centrale ( $h_{max}$  di scavo = 15 m): modello numerico delle paratie all'ultimo step di analisi

- Figura 8-3 – Accesso alla centrale ( $h_{\max}$  di scavo = 10 m): riepilogo spinte agenti e resistenti, condizione statica (a sinistra) e sismica (a destra)
- Figura 8-4 – Galleria artificiale di accesso alla centrale ( $h_{\max}$  di scavo = 15 m): riepilogo spinte agenti e resistenti, condizione statica (a sinistra) e sismica (a destra)
- Figura 8-5 – Sezione resistente ed armature di calcolo per i diaframmi nel caso di scavo con  $H_{\max}=10$  m
- Figura 8-6 – Accesso alla centrale ( $h_{\max}$  di scavo = 10 m): inviluppo dei diagrammi di sfruttamento del momento in condizioni statiche
- Figura 8-7 – Accesso alla centrale ( $h_{\max}$  di scavo = 10 m): inviluppo dei diagrammi di sfruttamento del taglio in condizioni statiche
- Figura 8-8 – Accesso alla centrale ( $h_{\max}$  di scavo = 10 m): diagrammi di sfruttamento del momento in condizioni sismiche
- Figura 8-9 – Accesso alla centrale ( $h_{\max}$  di scavo = 10 m): diagrammi di sfruttamento del taglio in condizioni sismiche
- Figura 8-10 – Sezione resistente ed armature di calcolo per i diaframmi nel caso di scavo con  $H_{\max}=15$  m
- Figura 8-11 – Galleria artificiale di accesso alla centrale ( $h_{\max}$  di scavo = 15 m): inviluppo dei diagrammi di sfruttamento del momento in condizioni statiche
- Figura 8-12 – Galleria artificiale di accesso alla centrale ( $h_{\max}$  di scavo = 15 m): inviluppo dei diagrammi di sfruttamento del taglio in condizioni statiche
- Figura 8-13 – Galleria artificiale di accesso alla centrale ( $h_{\max}$  di scavo = 15 m): diagrammi di sfruttamento del momento in condizioni sismiche
- Figura 8-14 – Galleria artificiale di accesso alla centrale ( $h_{\max}$  di scavo = 15 m): diagrammi di sfruttamento del taglio in condizioni sismiche
- Figura 8-15 – Galleria cut&cover di accesso alla centrale: reazioni sul puntone allo SLU (975 kN/m) e allo SLV (1030 kN/m)
- Figura 8-16 – Galleria cut&cover di accesso alla centrale: verifiche di pressoflessione della soletta-puntone



## **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:

- HarpaCeas - ParatiePlus 2022
- Rocscience Inc. - Phase2 Versione 8.024
- Midas Information Technology - MidasGen 2020

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

## 4. CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA

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

- 1388-A-CT-R-01-1 - Relazione geologica generale
- 1388-A-GD-R-01-1 - Relazione geotecnica generale
- 1388-A-GD-R-02-1 - Relazione sulla sismica dei manufatti in sottterraneo.

### 4.1 Caratterizzazione geologica

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

- lo scavo della galleria idraulica interesserà per la maggior parte del tracciato le Argille Varicolori (AV), la formazione di Terravecchia (TRVa) ed in misura minore le Calcareniti di Capodarso (ENNb), le Marne di Enna (ENNa) e la formazione di Terravecchia (TRVc).
- lo scavo della galleria di accesso alla centrale interesserà esclusivamente la Formazione di Terravecchia (TRVa)

Nelle successive fasi di progettazione risulterà comunque necessario svolgere un'accurata campagna di indagini volta a definire con maggiore esattezza l'effettiva potenza di ciascuna formazione costituente la successione stratigrafica fino alla massima profondità raggiunta dalle opere in progetto.

### 4.2 Caratterizzazione geotecnica

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

La caratterizzazione delle diverse unità geotecniche è stata effettuata basandosi sui dati finora raccolti durante le campagne di indagini preliminari per i litotipi campionati e basandosi su dati di letteratura per le formazioni non direttamente riscontrate nella campagna di indagine. Per ulteriori approfondimenti si fa riferimento alla relazione Geotecnica generale 1388-A-GD-R-01-1.

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

fasi di progettazione da ulteriori indagini volte a caratterizzare in maniera più rigorosa i litotipi presenti in sito.

Tabella 4.1 – Parametri geotecnici Unità Geotecniche

Litotipo			Argille Varicolori (AV)	Terra- vecchia (TRVa)	Terra- vecchia (TRVc)	Marne di Enna (ENNa)	Calcareni di Capodarso (ENNb)
peso di volume	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	18 – 22	19 – 21	26	24	19
Criterio Mohr- Coulomb	$c'$	kPa	18 – 100	5 - 25	-	-	9
	$\phi'$	°	20 - 40	18 – 26	-	-	34
Criterio Hoek- Brown	$\sigma_{ci}$	MPa	-	-	50	20	-
	GSI	.	-	-	55	55	-
	$m_i$	.	-	-	17	4	-
	D	.	-	-	0	0	-
	$m_b$	.	-	-	3.408	0.802	-
	s	.	-	-	0.0067	0.0067	-
	$\alpha$	.	-	-	0.504	0.504	-
Coeff. di Poisson	$\nu$	.	0.4	0.4	0.30	0.30	0.30
Modulo elastico roccia intatta	$E_i$	MPa	-	-	13750	5000	-
Rap- porto modulo	MR	.	-	-	250	250	-
Modulo elastico	E	MPa	25 - 1485	30 - 700	5615	2041	52+0.5*z

Poiché il rivestimento della galleria idraulica scavata con TBM sarà identico lungo l'intero tracciato dell'opera, i calcoli di pre-dimensionamento e verifica strutturale sono stati svolti considerando unicamente le condizioni più critiche sotto il profilo geotecnico, ossia la presenza della Formazione di Terravecchia (TRVa).

### 4.3 Caratterizzazione sismica

Si riportano di seguito i parametri di calcolo impiegati per la definizione della forzante sismica relativa sia alla galleria artificiale nel tratto realizzato con tecnica *cut & cover* sia alle gallerie naturali.

#### 4.3.1 Galleria artificiale

Si riportano di seguito i principali parametri impiegati per la caratterizzazione sismica del sito in corrispondenza degli scavi in trincea per la il tratto iniziale della via di accesso alla Centrale:

- 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
- categoria di sottosuolo: Cat. C
- categoria topografica: Cat T1 (Superficie pianeggiante, pendii inclinazione media  $i < 15^\circ$ )
- coefficiente di amplificazione stratigrafica:  $S_S = 1.484$
- coefficiente di amplificazione topografica:  $S_T = 1.00$
- coefficiente amplificazione stratigrafica combinato con il coefficiente di amplificazione topografica:  $S = S_S * S_T = 1.0 * 1.484 = 1.484$
- $F_0 = 2.659$ ;  $T_C^* = 0.495s$  (SLV)
- accelerazione massima orizzontale attesa (SLV):  $a_g = 0.135$  g
- accelerazione massima orizzontale attesa su sito riferimento (S.L.V.):  
 $a_{max} = S * a_g = 1.484 * 0.135g = 0.200$  g
- coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito (opere flessibili):  $\beta_m = 0.6125$  (derivato considerando  $U_s=0.05$  m e  $\alpha=1$ )
- coefficiente sismico orizzontale  $K_h = \beta_m * a_{max}/g=0.1223$
- coefficiente sismico verticale  $K_v = K_h * 0.5=0.06115$
- metodo di calcolo della spinta pseudo-statica: Mononobe-Okabe.

#### 4.3.2 Gallerie naturali

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

In particolare, per quanto si riferisce ai rivestimenti delle gallerie, la presenza del carico sismico è stata esplicitamente considerata nelle simulazioni numeriche effettuate.

Come illustrato nella *Relazione sulla sismica dei manufatti in sotterraneo (Elaborato 1388-A-GD-R-02-1)*, a cui si rimanda per ulteriori dettagli, gli effetti tensionali e deformativi dovuti all'evento sismico sono stati considerati mediante una analisi semplificata di tipo pseudo-statico in cui si è applicato il *Metodo delle deformazioni di taglio puro in campo libero*. Tale metodo consente di simulare gli effetti di ovalizzazione del cavo in direzione trasversale mediante l'applicazione di uno spostamento a farfalla sui bordi del modello, come indicato in Figura 4-1.

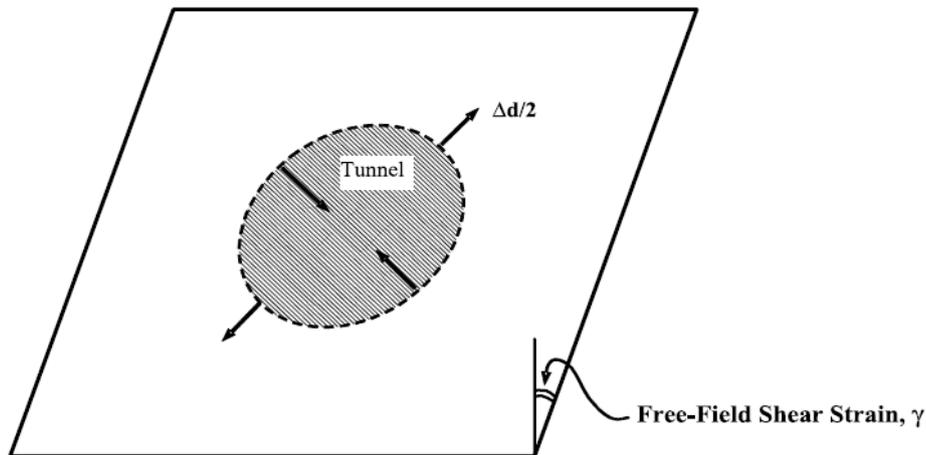


Figura 4-1 – Applicazione delle deformazioni di taglio sui bordi del modello per l'applicazione del Metodo delle deformazioni di taglio puro in campo libero

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 (Elaborato 1388-A-GD-R-02-1)*.

#### 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: 6.04
- Distanza dalla sorgente prevista: 20 - 50 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 4.2 – Riassunto dei dati di inputi sismico impiegati nei modelli di calcolo

Opera	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)
Galleria idraulica G11	TRVa	C	1.15	0.135	135	0.7	0.109	132	0.143	700	0.0002	15	0.0031
Galleria idraulica G12	TRVa	C	1.15	0.135	145	0.7	0.109	132	0.143	700	0.0002	15	0.0031
Galleria idraulica G12	TRVa	C	1.15	0.135	15	0.9	0.140	132	0.184	250	0.00074	15	0.0111
Galleria di accesso GC1-GC2	TRVa	C	1.15	0.135	10	0.9	0.140	132	0.184	250	0.00074	25	0.0177

## 5. DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI PREVISTI

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

### 5.1 Galleria idraulica

La galleria idraulica, come mostrato nell'immagine seguente, ha origine al di sotto del bacino di monte ed è collegata con quest'ultimo per mezzo di un pozzo verticale, profondo 20 m, che costituisce l'opera di presa di monte dell'impianto. Prosegue quindi per circa 1590 m con una pendenza del 17% e poi per circa 70 m con pendenza nulla prima di immettersi nella centrale idroelettrica. In questo tratto della galleria è prevista la posa di una condotta metallica, direttamente inghisata nel tunnel, la quale garantirà la resistenza strutturale necessaria ad assorbire la pressione interna durante le fasi di utilizzo dell'impianto. Superata la centrale la galleria idraulica prosegue per circa 2950 m con pendenza nulla fino al raggiungimento del bacino di valle.

Superata la centrale in caverna la via d'acqua prosegue fino all'opera di presa di valle senza alcuna blindatura metallica, pertanto la pressione esercitata dal battente idraulico durante la fase di utilizzo dovrà essere interamente assorbita dal rivestimento della galleria stessa, il quale dovrà garantire la stabilità del cavo nei confronti delle forze esterne ed interne, sia durante la fase di scavo sia durante la fase di esercizio.

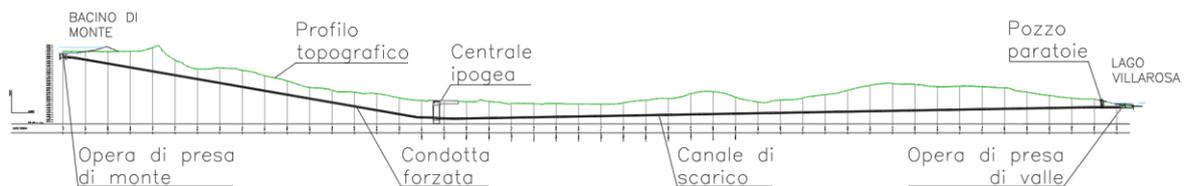


Figura 5-1 – Profilo in asse alla galleria idraulica

La galleria idraulica verrà scavata tramite fresa meccanica per la quasi totalità del suo tracciato. Allo stato attuale si prevede di realizzare con metodo tradizionale solamente le seguenti sezioni:

- il tratto immediatamente a valle del pozzo forzato, profondo 20 m, per una lunghezza di 54 m, necessario al montaggio della TBM la quale verrà calata tramite la struttura provvisoria del pozzo dell'opera di presa di monte (per ulteriori dettagli si veda l'elaborato 1388-A-GD-R-05-1 - *Relazione descrittiva e di calcolo dei pozzi verticali*);
- il tratto compreso tra il Pozzo Paratoie e l'opera di presa di valle, per una lunghezza di 72 m.

### 5.1.1 Sezione tipo G11

La sezione tipo G11 (Figura 5-2) è prevista per il rivestimento della galleria idraulica nel tratto compreso tra l'opera di presa di monte e la centrale idroelettrica.

La stabilità del cavo sarà assicurata mediante un rivestimento definitivo costituito da un anello di calcestruzzo armato di classe C30/37 dello spessore di 30 cm, al cui interno saranno inghisate le virole metalliche di diametro 5.90 m.

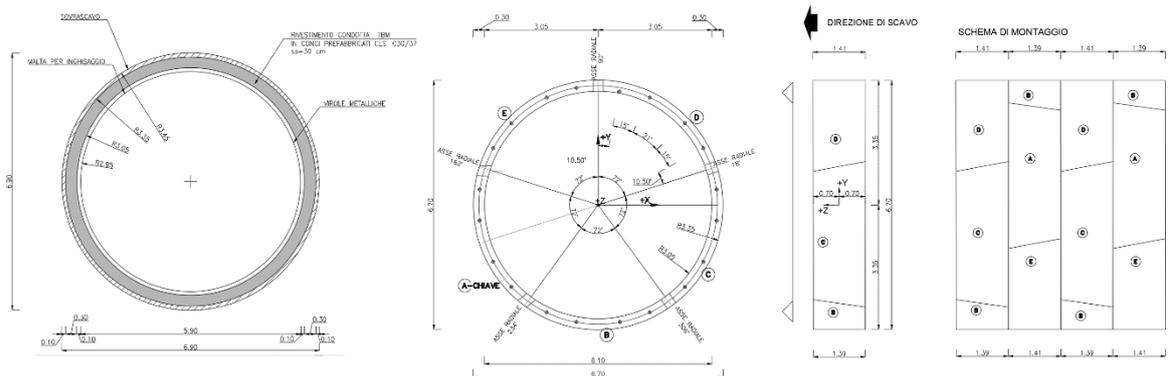


Figura 5-2 – Sezione tipo G11: geometria del cavo e interventi di sostegno

### 5.1.2 Sezione tipo G12

La sezione tipo G12 (Figura 5-3) è prevista per il rivestimento della galleria idraulica nel tratto compreso tra la centrale e l'opera di presa di valle.

La stabilità del cavo sarà assicurata mediante un rivestimento definitivo costituito da un anello di calcestruzzo armato di classe C30/37 dello spessore di 30 cm. Poiché in questo tratto della galleria non è prevista la posa delle virole metalliche il diametro interno della via d'acqua sarà pari a 6.10 m.

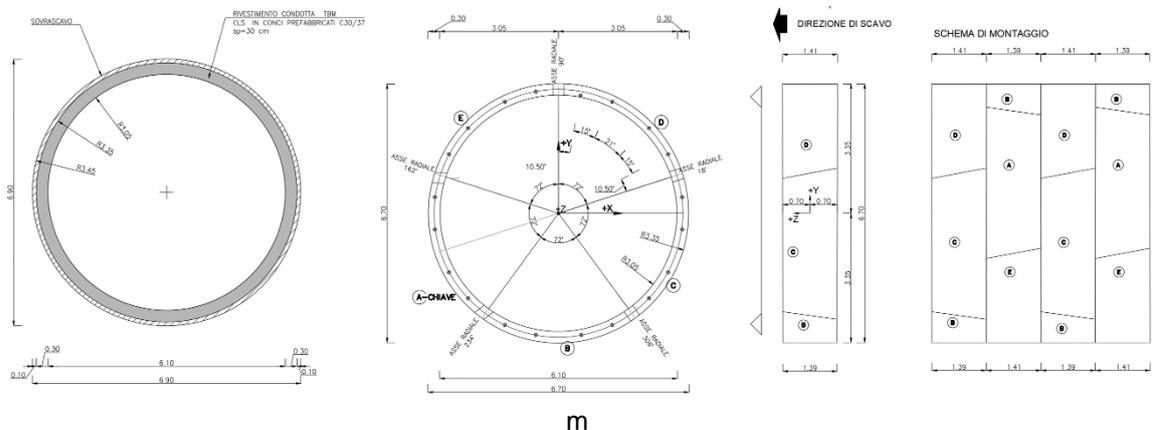


Figura 5-3 – Sezione tipo G12: geometria del cavo e interventi di sostegno

### 5.1.3 Sezione tipo GIT1

Per consentire il montaggio della TBM lo scavo della galleria idraulica verrà attaccato con metodo tradizionale per una lunghezza di 54 m a partire dal pozzo di presa di monte che, nella sua geometria provvisoria, presenta una sezione di scavo adatta a permettere il trasporto e la messa in stazione della TBM.

In considerazione della modesta copertura e delle caratteristiche meccaniche attese per i terreni presenti in sito, si prevede di rinforzare il contorno di scavo mediante un ombrello di tubi metallici in calotta. La sezione di scavo avrà dunque una geometria troncoconica (Figura 5-4), con campi della lunghezza di 9.00 m, in modo da assicurare la stabilità del cavo anche nel caso in cui il terreno risultasse detensionato e con caratteristiche tendenti ai valori minimi tra quelli individuati dalle campagne di indagine

Il rivestimento di prima fase sarà dunque costituito da uno strato di 30 cm di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di classe C30/37 e centine accoppiate HEB200 con passo 1 m.

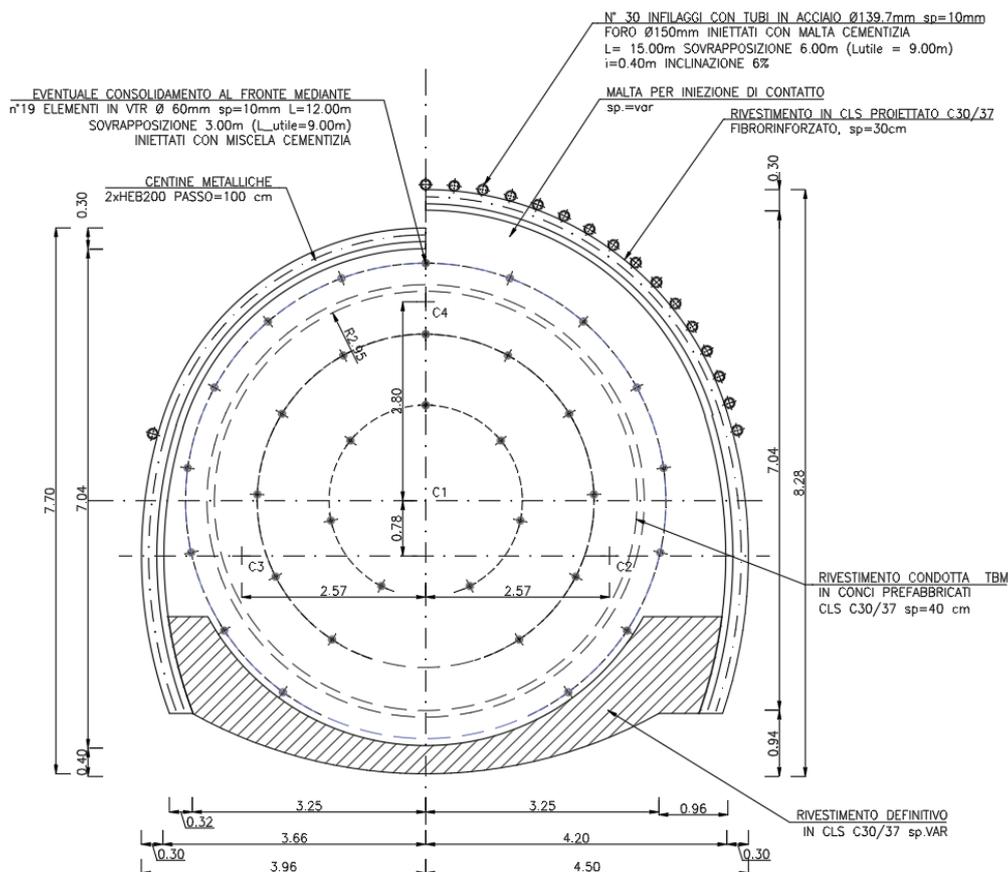


Figura 5-4 – Sezione tipo GIT1: geometria del cavo e interventi di sostegno, sezione trasversale



La sezione di scavo avrà dunque una geometria troncoconica (Figura 5-5 e Figura 5-6), con campi della lunghezza di 6.00 m, in modo da assicurare sia la dovuta impermeabilizzazione del cavo sia la stabilità dello stesso anche nel caso in cui il terreno risultasse detensionato e con caratteristiche tendenti ai valori minimi tra quelli individuati dalle campagne di indagine.

Il rivestimento di prima fase sarà dunque costituito da uno strato di 30 cm di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di classe C30/37 e centine accoppiate HEB200 con passo 1 m.

A completamento della galleria si procederà con il getto del rivestimento definitivo di spessore variabile da realizzarsi con calcestruzzo armato di classe C30/37. Nel caso di considerevoli venute d'acqua durante lo scavo è prevista la posa di drenaggi in avanzamento.

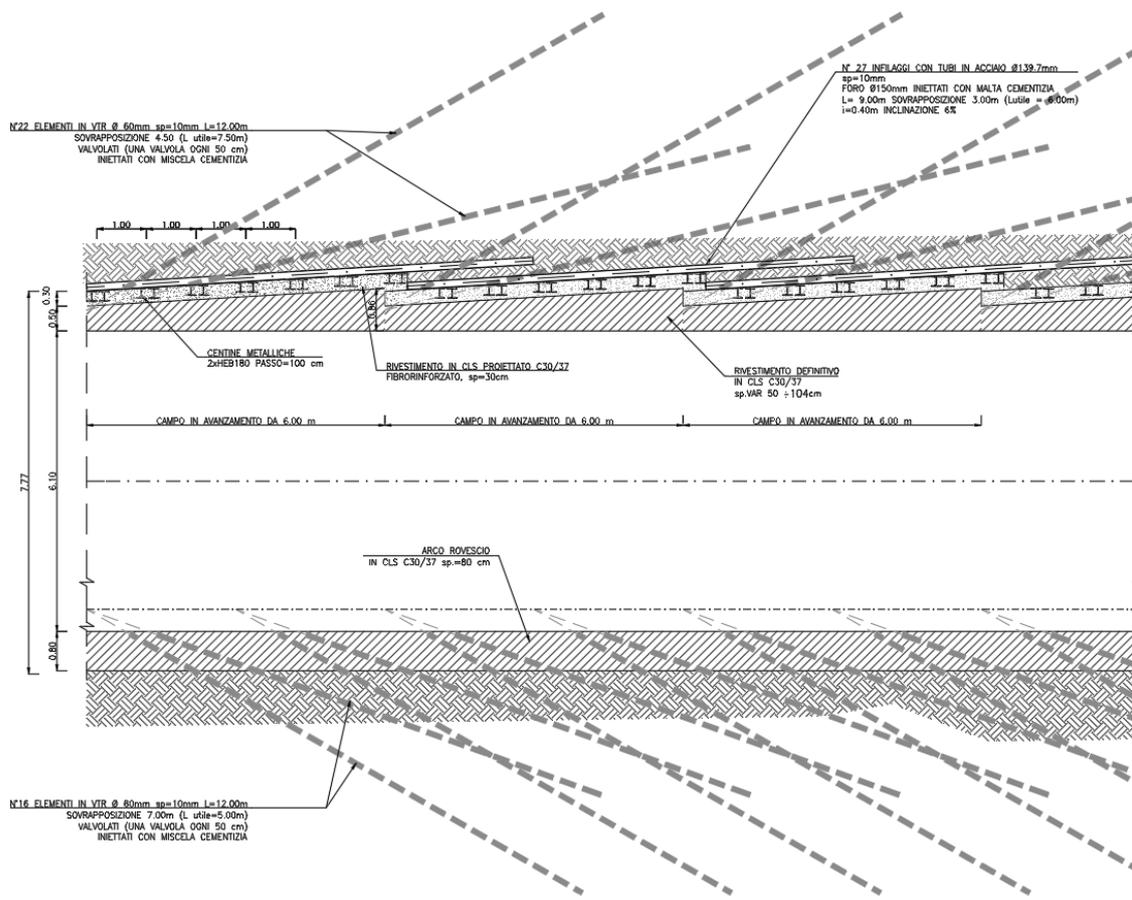


Figura 5-6 – Sezione tipo GIT2: geometria del cavo e interventi di sostegno, sezione longitudinale





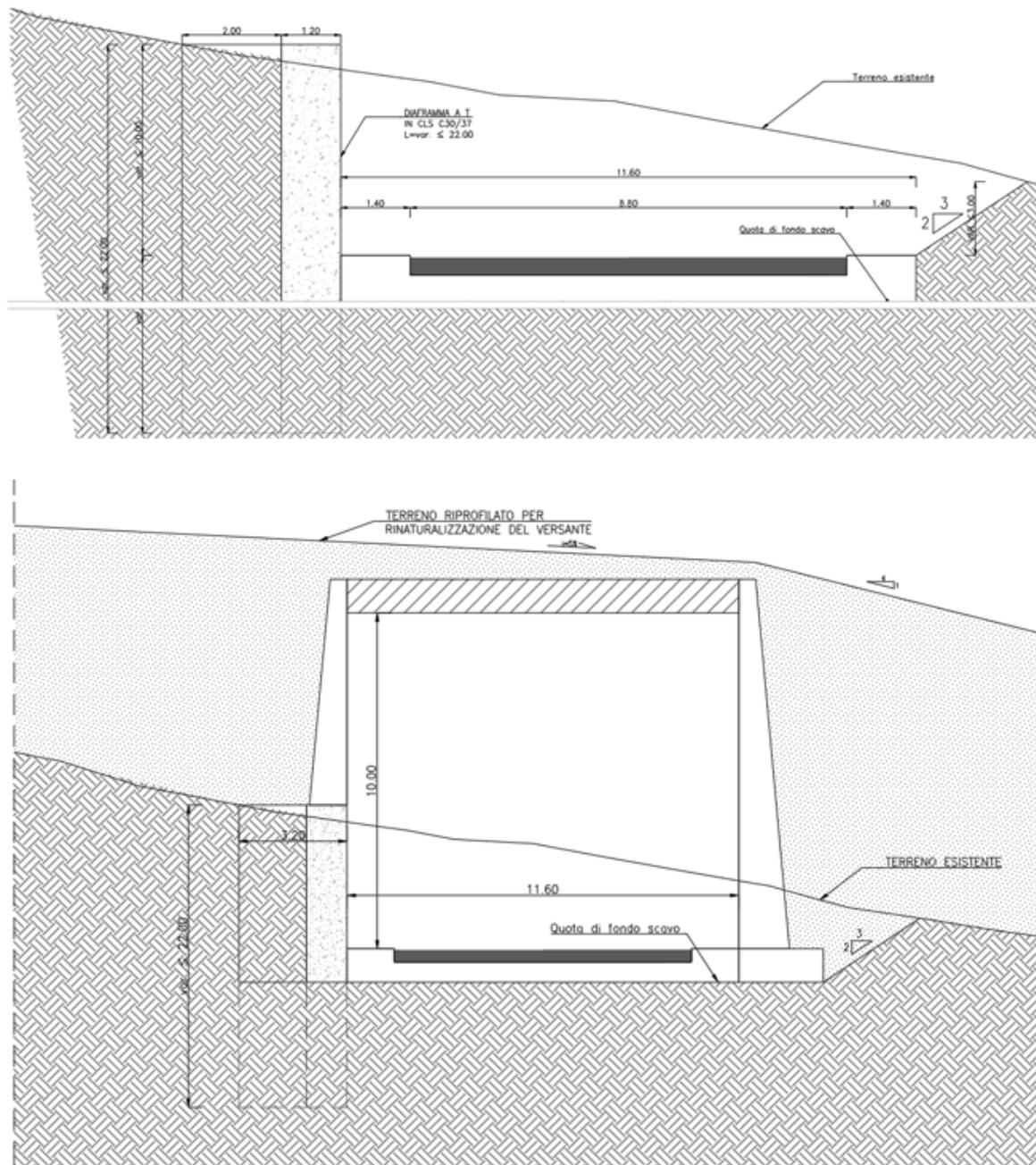


Figura 5-9 – Sezione tipo TRb durante la fase realizzativa e nella fase finale a rinaturalizzazione completata

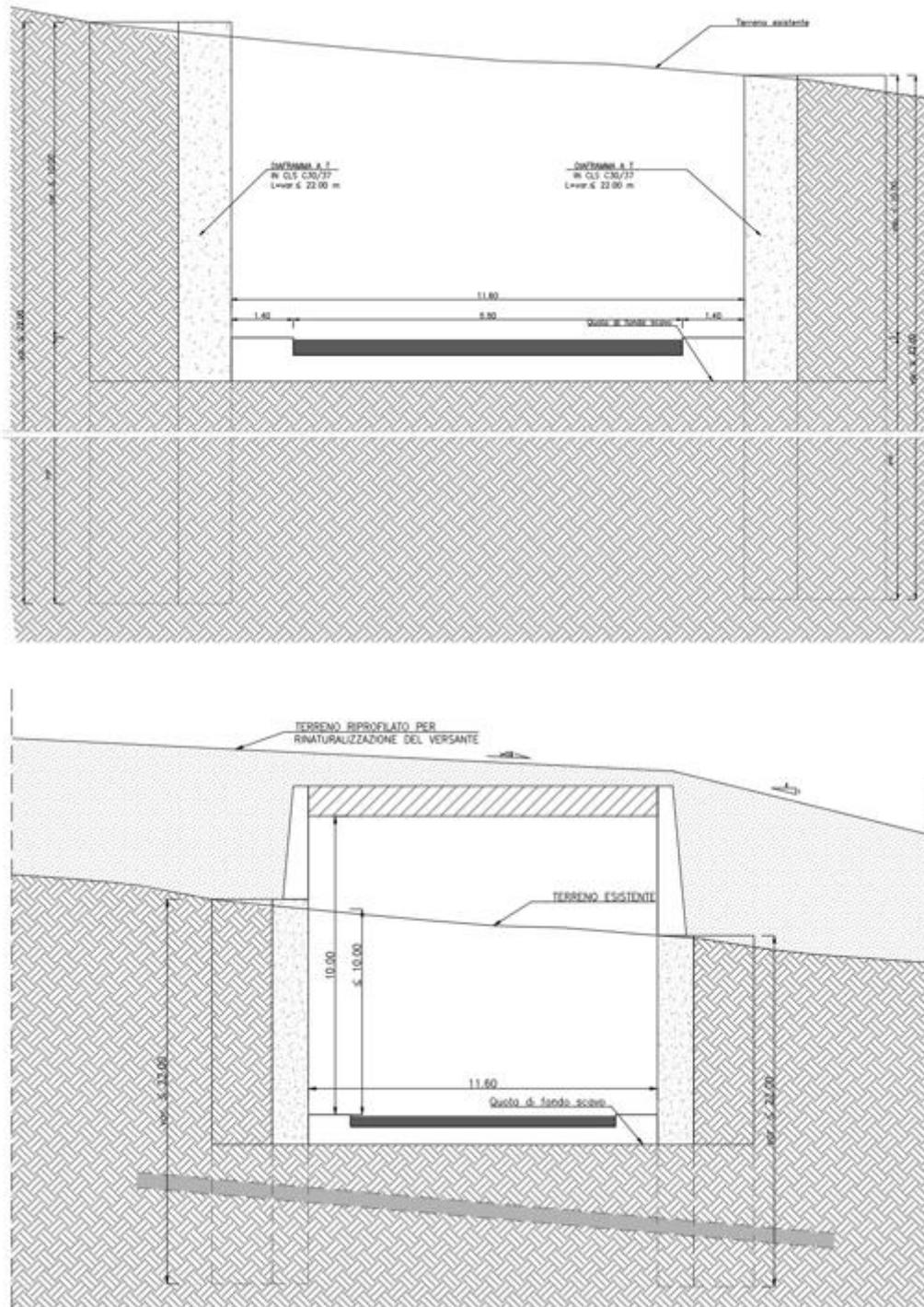


Figura 5-10 – Sezione tipo TRc durante la fase realizzativa e nella fase finale a rinaturalizzazione completata

In Figura 5-11 si riporta la sezione tipologia prevista per la realizzazione della galleria *cut & cover*.

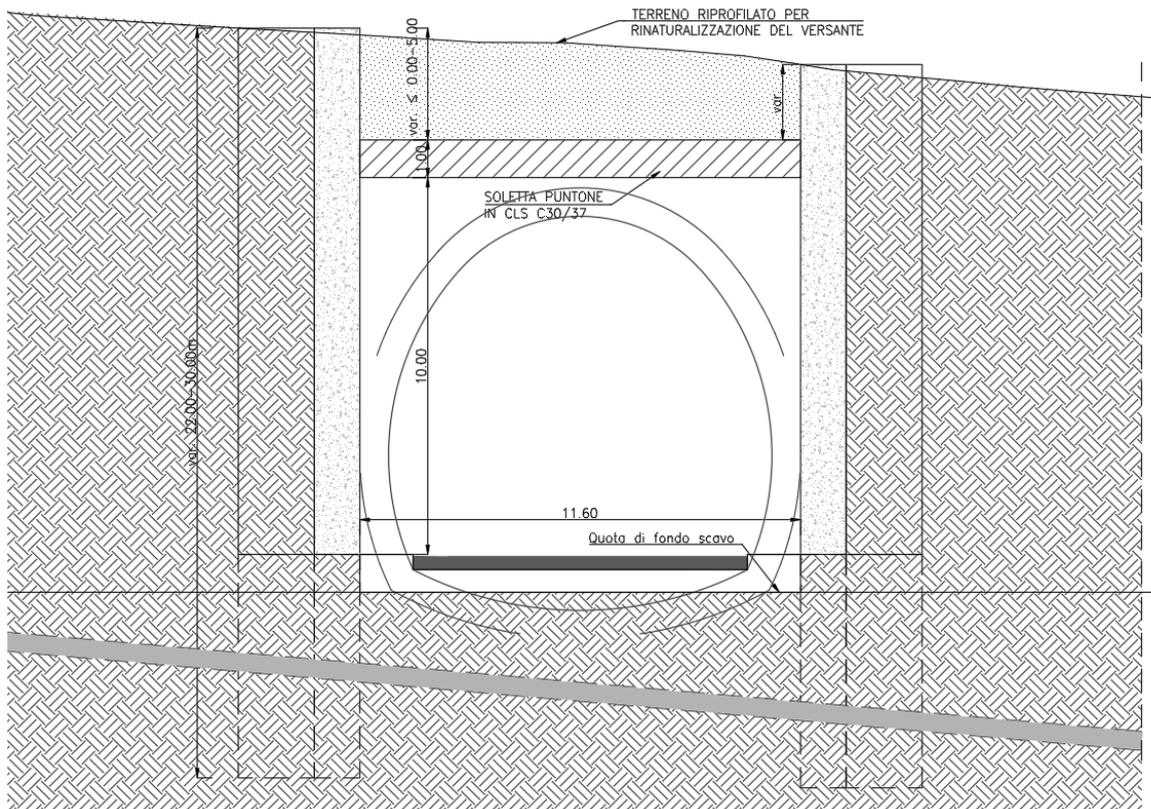


Figura 5-11 – Sezione tipo per lo scavo *cut & cover* della via di accesso alla centrale

I diaframmi di sostegno previsti per la realizzazione della galleria artificiale e della galleria realizzata con tecnica *cut & cover* sono costituiti da diaframmi a T realizzati con calcestruzzo di classe C30/37 ed aventi la geometria illustrata in Figura 5-12.

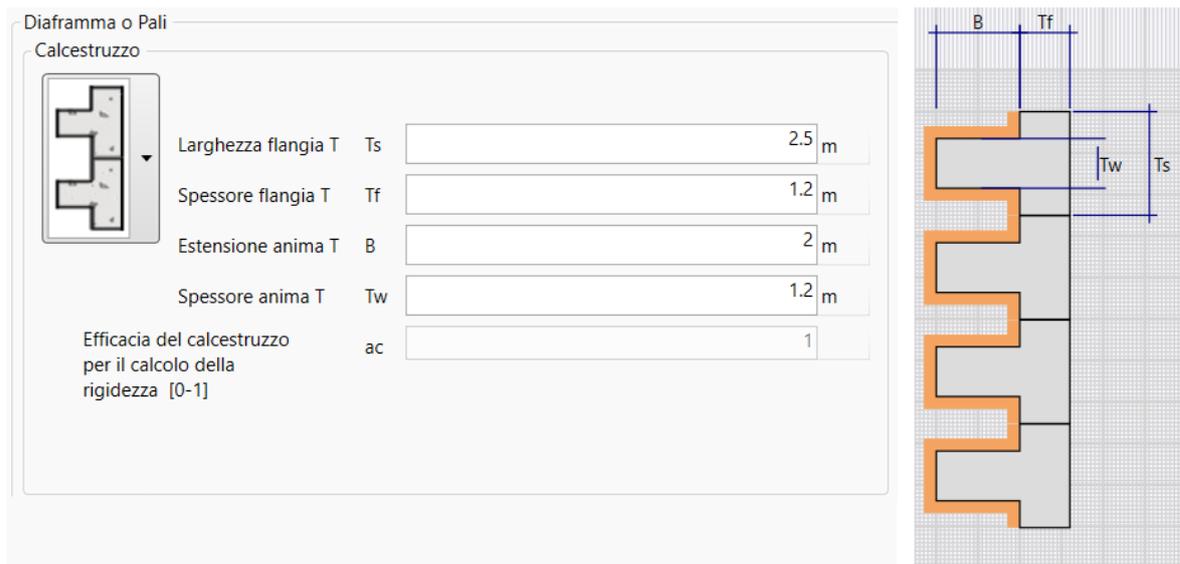


Figura 5-12 – Sezione tipo per lo scavo in trincea della via di accesso alla centrale

### 5.2.2 Sezione tipo GC1

La sezione tipo GC1 (Figura 5-13) costituisce la prosecuzione in naturale della galleria realizzata con tecnica cut & cover ed è prevista per lo scavo con copertura maggiore di 5 m.

Il rivestimento sarà dunque costituito da uno strato di 25 cm di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di classe C30/37 e centine accoppiate HEB200 con passo 1 m. Date le caratteristiche scadenti dell'unità geotecnica presente in sito e la modesta copertura è prevista la posa di una centina puntone in arco rovescio avente la funzione di limitare le deformazioni del cavo prima della posa del rivestimento definitivo.

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.

Sul fronte di scavo è previsto un consolidamento con barre VTR di lunghezza 24 m e sovrapposte per 12 m, iniettate con miscela cementizia, per un totale di 50.

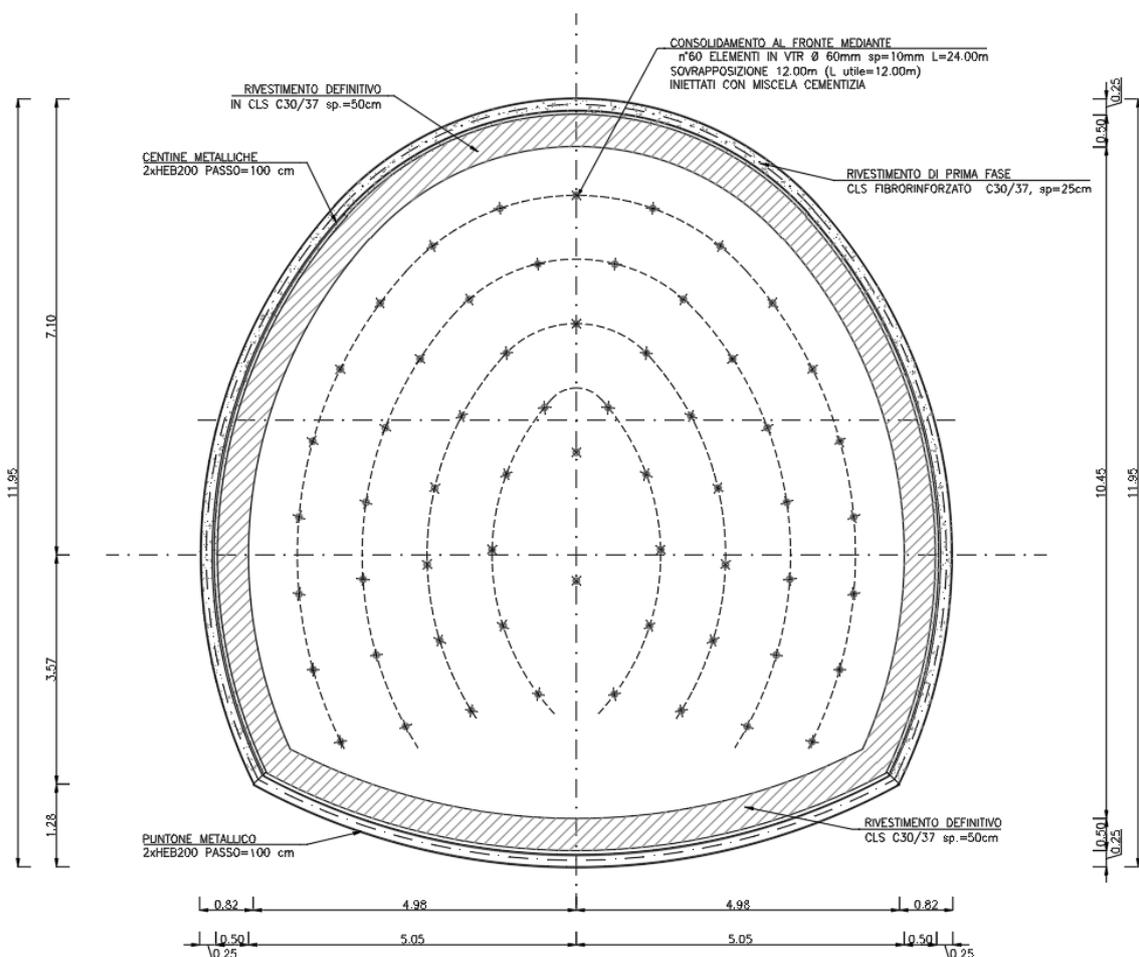


Figura 5-13 – Sezione tipo GC1: geometria del cavo e interventi di sostegno

### 5.2.3 Sezione tipo GC2

Per garantire la stabilità del cavo anche nei casi in cui il terreno risultasse detensio-  
nato e con caratteristiche tendenti ai valori minimi tra quelli individuati dalle campagne di  
indagine si prevede di rinforzare il contorno di scavo, mediante un ombrello di tubi metallici  
in calotta.

Il rivestimento di prima fase sarà dunque costituito da uno strato di 25 cm di calce-  
struzzo proiettato fibrorinforzato di classe C30/37 e centine accoppiate HEB200 con passo  
1 m. Date le caratteristiche scadenti dell'unità geotecnica presente in sito e la modesta  
copertura è prevista la posa di una centina puntone in arco rovescio avente la funzione di  
limitare le deformazioni del cavo prima della posa del rivestimento definitivo.

A completamento della galleria si procederà con il getto del rivestimento definitivo  
dello spessore variabile tra 50 cm ad inizio campo e 98 cm a fine campo, da realizzarsi con  
calcestruzzo armato di classe C30/37.

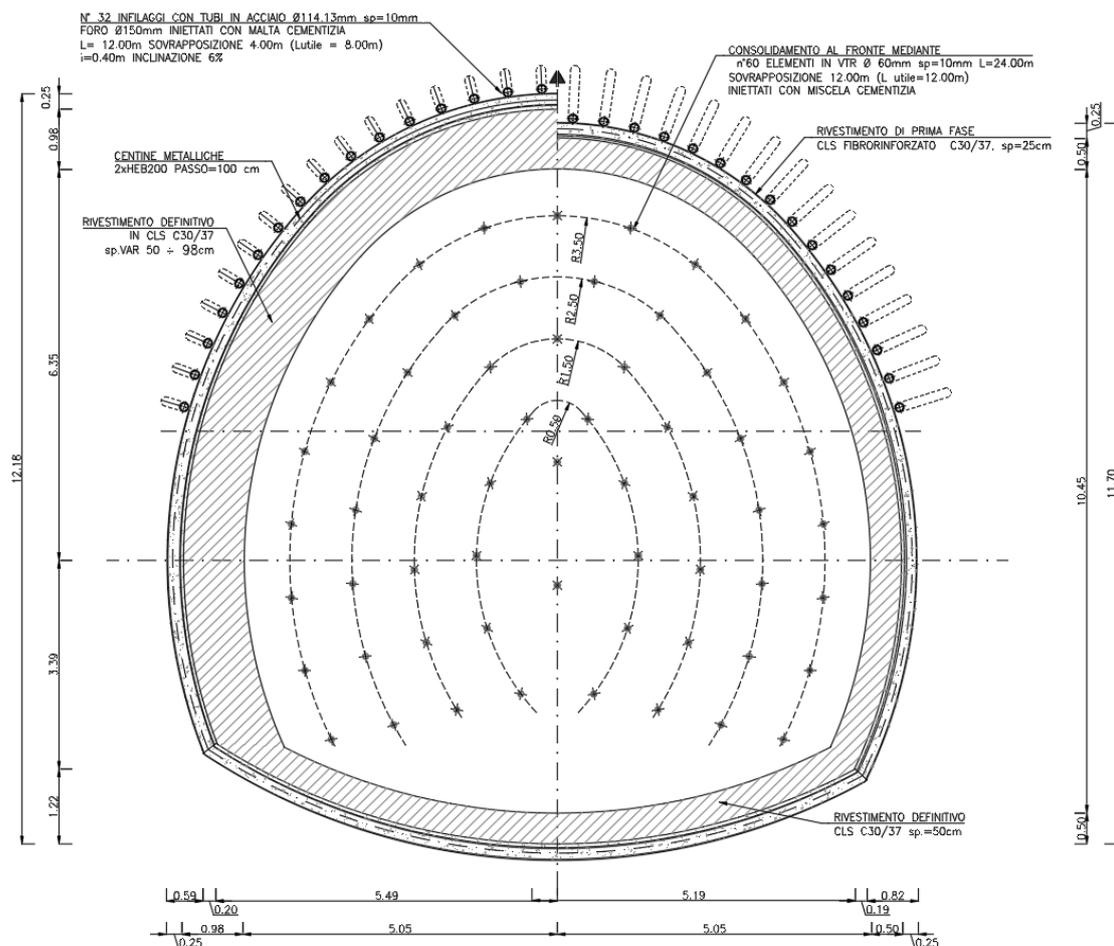


Figura 5-14 – Sezione tipo GC2: geometria del cavo e interventi di sostegno, sezione trasversale

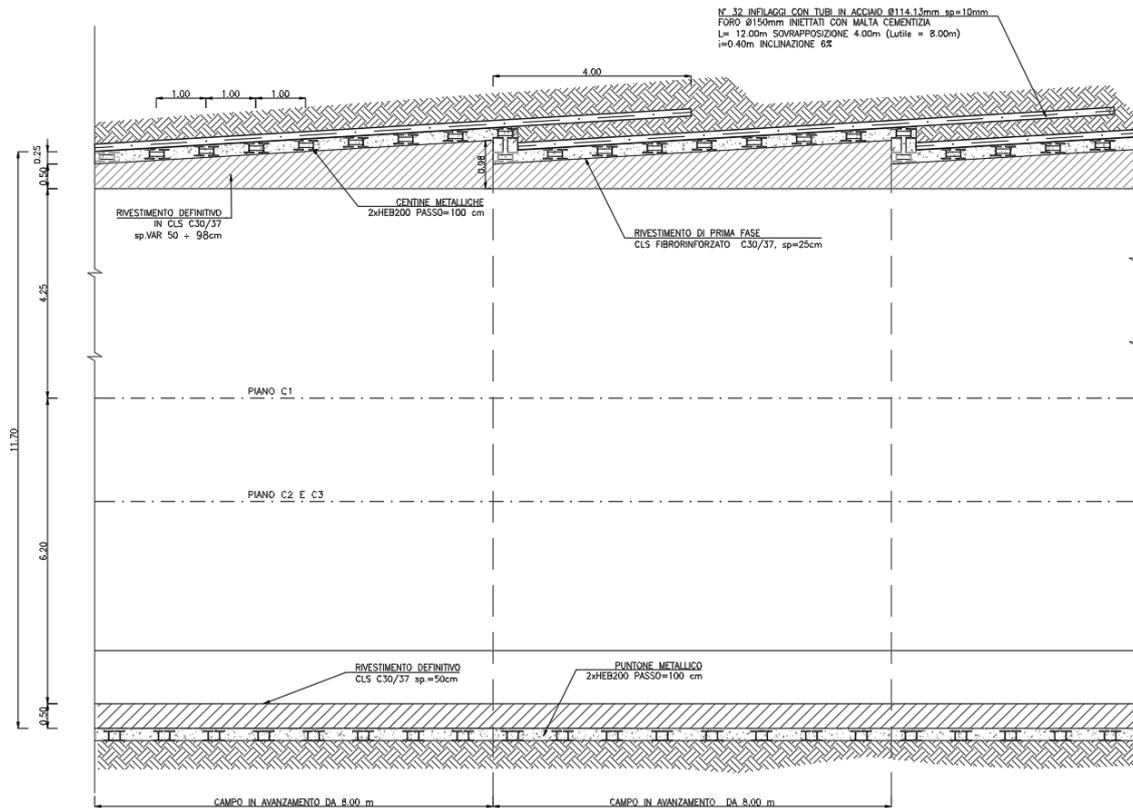


Figura 5-15 – Sezione tipo GC2: geometria del cavo e interventi di sostegno, sezione longitudinale

### 5.3 Materiali

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

#### Calcestruzzo per conci prefabbricati

classe di resistenza

C 30/37

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

$$f_{cd} \geq 17.00 \text{ N/mm}^2$$

modulo elastico

$$E = 32800 \text{ MPa}$$

#### Calcestruzzo proiettato fibrorinforzato

classe di resistenza

C 30/37

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

$$f_{cd} \geq 17 \text{ N/mm}^2$$

modulo elastico

$$E = 28500 \text{ MPa}$$

dosaggio fibre

$$\geq 3 \text{ kg/m}^3$$

#### Acciaio per centine galleria

tipo di acciaio

S275

tensione di snervamento

$$f_{yk} = 275 \text{ N/mm}^2$$

tensione di calcolo

$$f_{yd} = 261.9 \text{ N/mm}^2$$

tensione di rottura

$$f_{tk} = 430 \text{ N/mm}^2$$

modulo elastico

$$E = 210 \text{ GPa}$$

Calcestruzzo per getti in opera in sotterraneo

classe di resistenza

C 30/37

 $f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c$  $f_{cd} \geq 17.00 \text{ N/mm}^2$ 

modulo elastico

E = 32800 MPa

Calcestruzzo per getti in opera setti ed opere di sostegno

classe di resistenza

C 30/37

 $f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c$  $f_{cd} \geq 17.00 \text{ N/mm}^2$ 

modulo elastico

E = 32800 MPa

Acciaio in barre per armature

tipo di acciaio

B450C

modulo elastico

E = 210 GPa

Elementi strutturali in VTR al fronte

densità

 $\geq 1.7 \text{ t/m}^3$ 

resistenza a trazione

 $\geq 400 \text{ MPa (UNI 5819)}$ 

allungamento a rottura

 $\geq 2\%$ 

resistenza a flessione

 $\geq 350 \text{ MPa (UNI 4219)}$ 

resistenza a taglio

 $\geq 85 \text{ MPa (ASTM D732)}$ 

modulo elastico

E  $\geq 15000 \text{ MPa}$ 

contenuto in vetro in peso

 $\geq 55\%$ Infilaggi in tubi in acciaio

tipo di acciaio

S355JRH o S355J0H

secondo UNI EN 10210 - 1 o UNI EN 10219

## **6. GALLERIE NATURALI: SINTESI DEI RISULTATI**

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

### **6.1 Generalità sui modelli numerici per lo scavo delle gallerie naturali**

Per la valutazione del comportamento tensio-deformativo del terreno e delle strutture di sostegno della galleria naturale 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 armato con centine, e le strutture costituenti il rivestimento definitivo in calcestruzzo armato sono state discretizzate con elementi monodimensionali di tipo “liner” con comportamento elastico e caratteristiche meccaniche ed inerziali equivalenti a quelle delle strutture simulate.

Come descritto nella *Relazione sulla sismica dei manufatti in sotterraneo (Elaborato 1388-A-GD-R-02-1)*, 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*.

## 6.2 Galleria Idraulica

Nei paragrafi successivi si riporta una breve sintesi dei principali risultati ottenuti dalle simulazioni delle sezioni tipo più significative. In particolare si riportano i risultati di calcolo relativi alle condizioni di analisi ritenute dimensionanti per le principali sezioni tipologiche previste lungo il tracciato.

### 6.2.1 Sezione tipo GI1

La sezione tipo GI1 è prevista per il rivestimento della galleria idraulica nel tratto compreso tra l'opera di presa di monte e la centrale idroelettrica. I calcoli di progetto e verifica sono stati condotti considerando le condizioni più gravose per il rivestimento, ossia la massima copertura attesa e le proprietà geotecniche attribuite all'unità TRVa.

I parametri utilizzati per la modellazione sono riepilogati nella seguente Tabella 6.1:

Tabella 6.1 - Caratteristiche geomeccaniche della formazione di Terravecchia (135 m profondità)

$\gamma$	$c'$	$\phi'$	$\nu$	E
kN/m <sup>3</sup>	kPa	°	.	MPa
21	25	24	0.4	400

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 dalla formazione di Terravecchia (Figura 6-1).

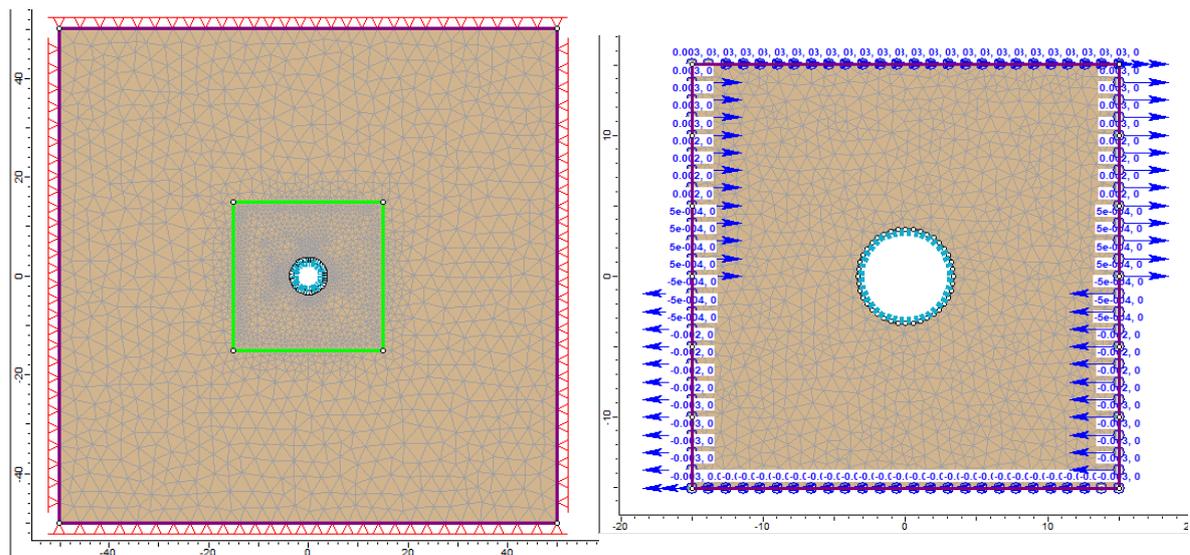


Figura 6-1 – Sezione tipo GI1: Geometria del modello numerico utilizzato all'ultimo step dell'analisi statica e dell'analisi sismica

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

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

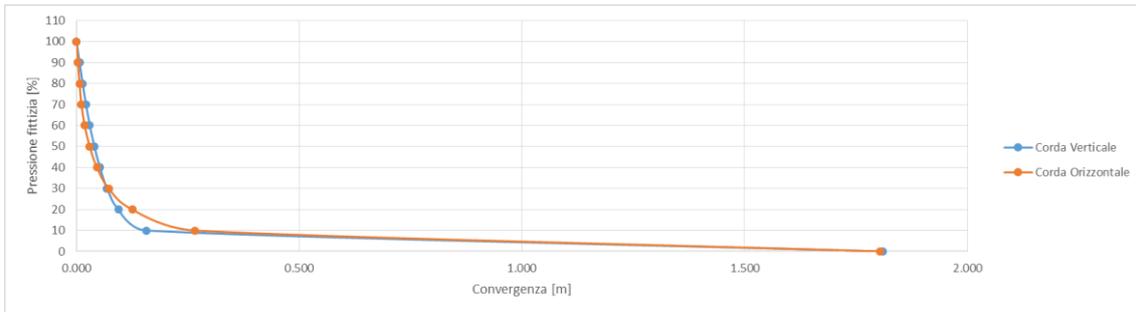


Figura 6-2 – Sezione tipo G11: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

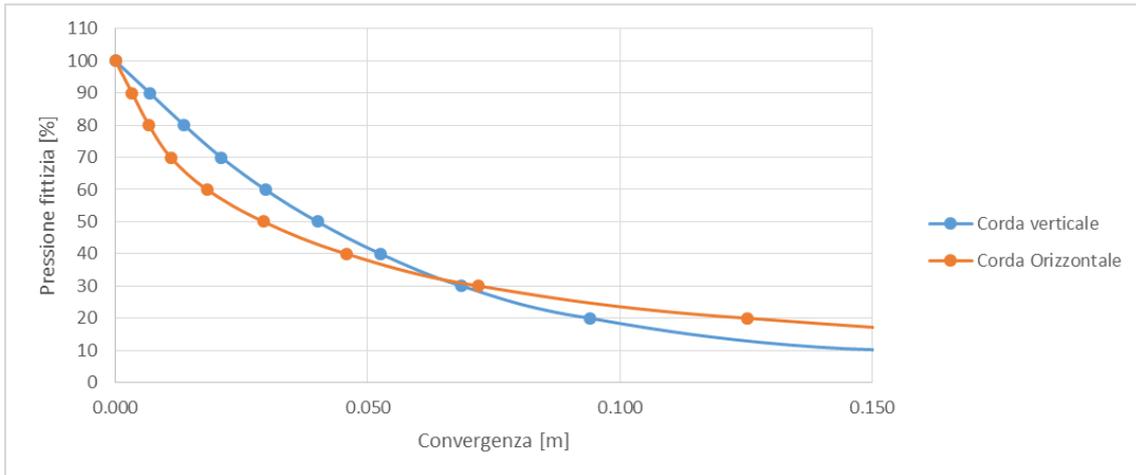


Figura 6-3 – Sezione tipo G11: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti limitate ad una convergenza massima di 15 cm

Le analisi svolte con il metodo di convergenza confinamento mostrano come il terreno circostante lo scavo mantenga un comportamento sostanzialmente elastico fino ad un rilascio libero del 60% per la calotta e del 30% per i piedritti, dopodiché si osserva la formazione di estese zone plastiche. Allo scarico totale il calcolo numerico non raggiunge la convergenza, il che indica chiaramente come non sia possibile ottenere l'equilibrio del contorno di scavo in assenza di interventi di sostegno.

L'aliquota di forze rilasciate precedentemente alla posa del rivestimento, in generale, può essere definita in funzione della distanza tra quest'ultimo ed il fronte di scavo. Nel caso di una galleria scavata con metodo meccanizzato si ha una pressione di confinamento al fronte data dalla testa di scavo, la quale contrasta le deformazioni del fronte antecedenti la posa del rivestimento. Allo stesso tempo lo scudo della macchina ha una forma trapezoidale, per cui genera un sovrascavo di entità compresa mediamente tra i 5 ed i 10 cm, il quale viene immediatamente riempito con una malta di intasamento. Tale sovrascavo darà comunque luogo ad una convergenza, valutabile nel nostro caso in un massimo di 15 cm, la quale si verifica preliminarmente alla posa dei conci di rivestimento; tale valore della convergenza è stato impiegato per definire, in via preliminare, il valore del rilascio tensionale che si verifica prima della posa del rivestimento.

Sulla base delle analisi svolte con il metodo di convergenza confinamento si sono ipotizzate le seguenti fasi di simulazione ed i relativi valori del rilascio tensionale parziale:

- 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 con rilascio tensionale parziale pari al 80% delle forze agenti
- STEP4 - Posa in opera dei conci costituenti il rivestimento della galleria con rilascio tensionale totale delle forze agenti
- STEP5 - Simulazione dell'azione sismica

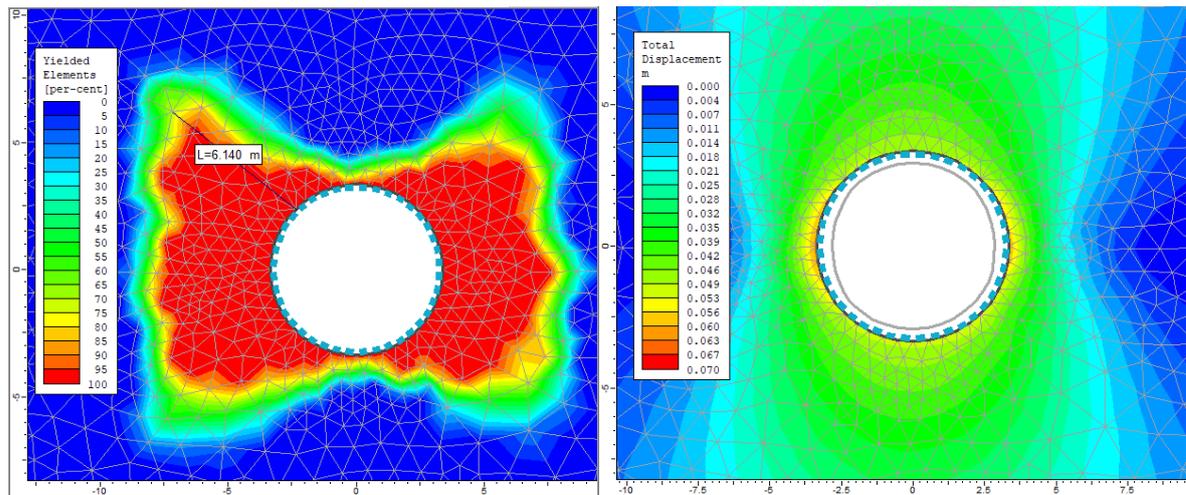


Figura 6-4 – Sezione tipo G11: raggio plastico e spostamenti nella fase di esercizio

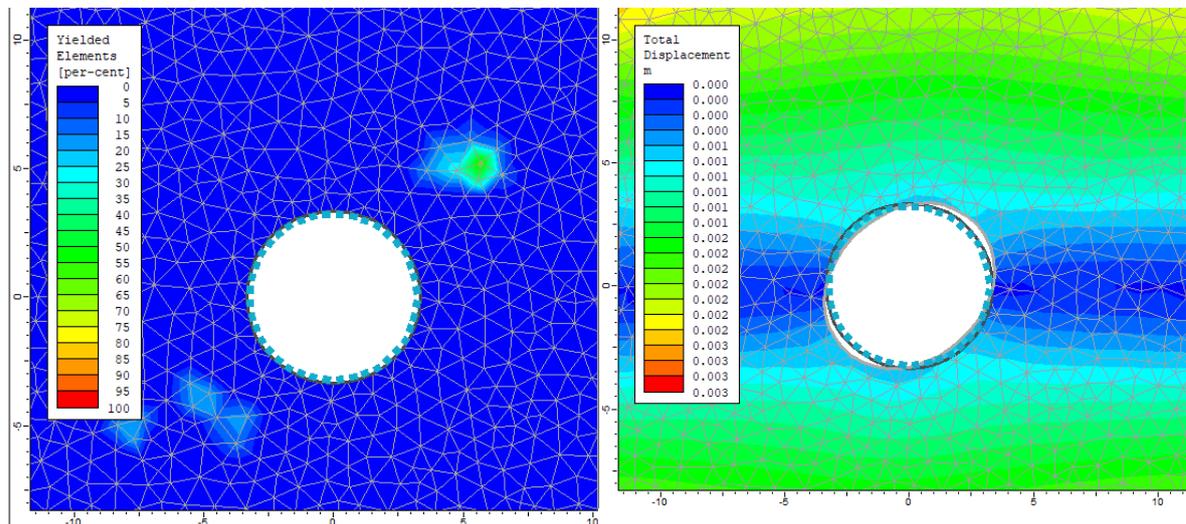


Figura 6-5 – Sezione tipo G11: incremento delle plasticizzazioni e delle deformazioni durante la fase sismica

L'esame delle simulazioni numeriche evidenzia che:

- il raggio plastico raggiunge allo step 4 il valore massimo, in corrispondenza delle reni, pari a circa 6.0 m, mentre risulta modesto in corrispondenza della calotta e dell'arco rovescio;
- gli spostamenti massimi calcolati allo step 4 valgono 60 mm in corrispondenza dei piedritti e 50 mm in corrispondenza della calotta e dell'arco rovescio;
- durante la fase sismica si osservano variazioni trascurabili delle zone di plasticizzazione nell'intorno del cavo, mentre la variazione degli spostamenti al contorno legata alla distorsione di taglio causata dalla deformazione sismica imposta al modello numerico risulta inferiore al millimetro.
- le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori contenuti e sempre inferiori ai limiti di resistenza delle strutture previste, come mostrato nel capitolo successivo.

### 6.2.2 Sezione tipo GI2 – Alta copertura

La sezione tipo GI2 è prevista per il rivestimento della galleria idraulica nel tratto compreso tra la centrale idroelettrica e l'opera di presa di valle. Come si è detto in questo tratto della galleria non saranno presenti le virole metalliche, pertanto il rivestimento della galleria dovrà essere in grado di assorbire anche il carico idraulico associato alle fasi di esercizio dell'impianto. I calcoli di progetto e verifica sono stati condotti considerando le condizioni più gravose per il rivestimento, nel presente paragrafo si riportano le analisi svolte in alta copertura con le proprietà geotecniche attribuite all'unità TRVa.

I parametri utilizzati per la modellazione sono riepilogati nella seguente Tabella 6.2:

Tabella 6.2 – Caratteristiche geomeccaniche della formazione di Terravecchia (145 m profondità)

$\gamma$	$c'$	$\phi'$	$\nu$	E
kN/m <sup>3</sup>	kPa	°	[-]	MPa
21	25	24	0.4	400

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 dalla formazione di Terravecchia (Figura 6-6).

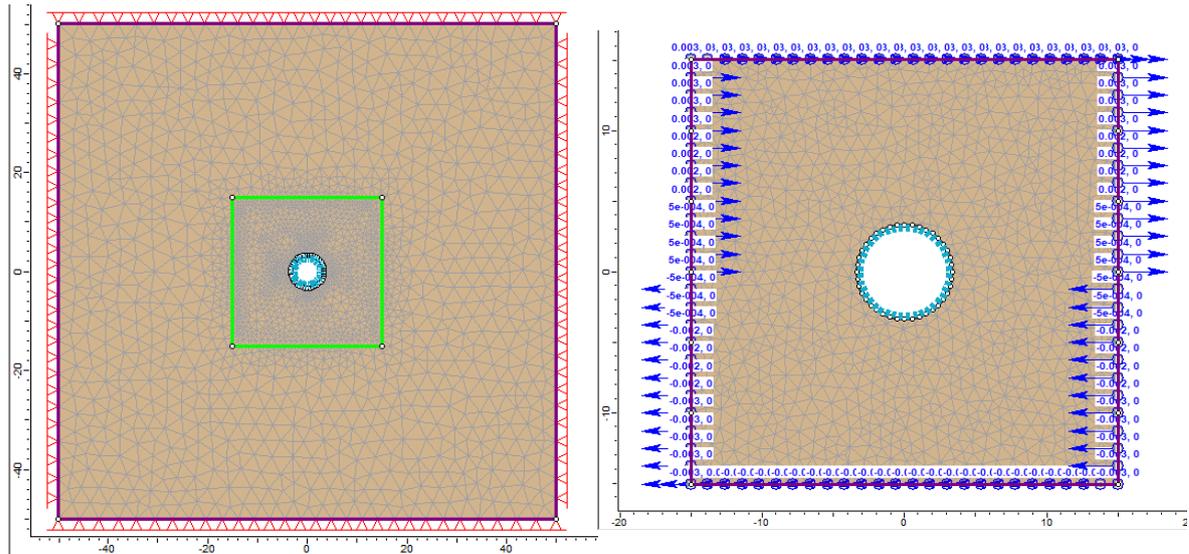


Figura 6-6 – Sezione tipo G12-alta copertura: Geometria del modello numerico utilizzato all'ultimo step dell'analisi statica e dell'analisi sismica

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

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

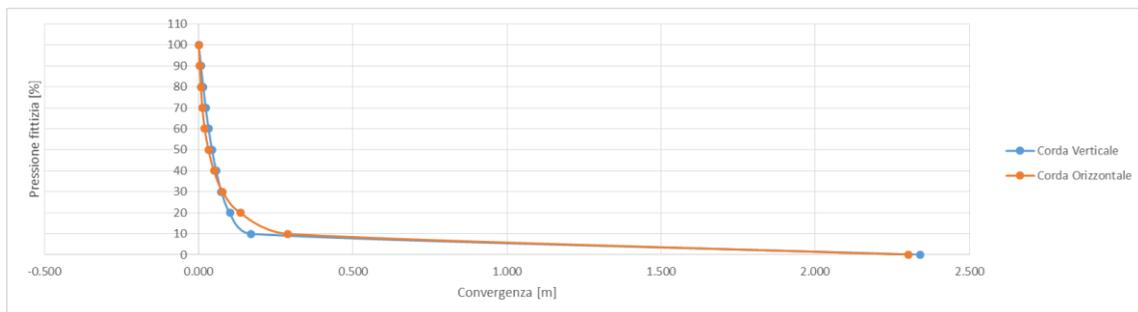


Figura 6-7 – Sezione tipo G12-alta copertura: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

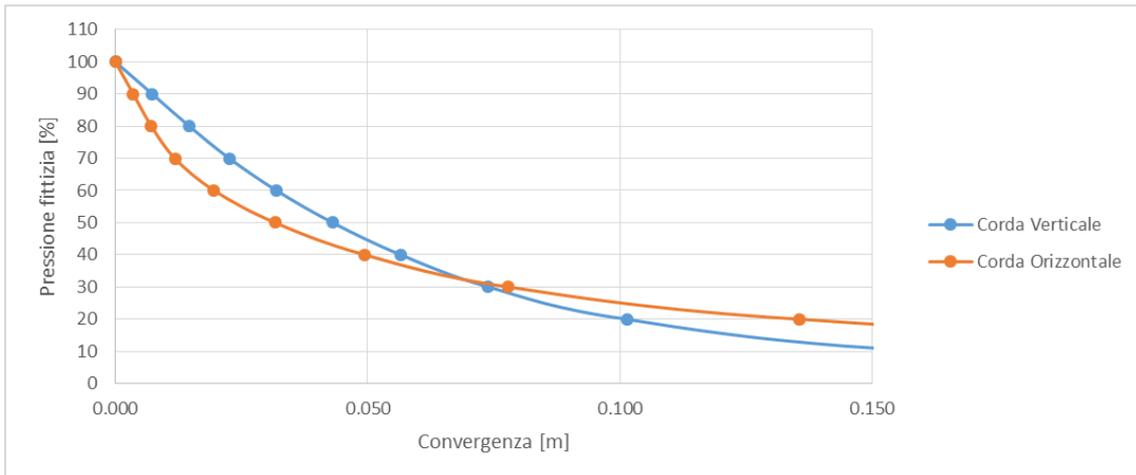


Figura 6-8 – Sezione tipo GI2-alta copertura: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti limitate ad una convergenza massima di 15 cm

Le analisi svolte con il metodo di convergenza confinamento mostrano come il terreno circostante lo scavo mantenga un comportamento sostanzialmente elastico fino ad un rilascio libero del 60% per la calotta e del 30% per i piedritti, dopodiché si osserva la formazione di estese zone plastiche. Allo scarico totale il calcolo numerico non raggiunge la convergenza, il che indica chiaramente come non sia possibile ottenere l'equilibrio del contorno di scavo in assenza di interventi di sostegno.

L'aliquota di forze rilasciate precedentemente alla posa del rivestimento, in generale, può essere definita in funzione della distanza tra quest'ultimo ed il fronte di scavo. Nel caso di una galleria scavata con metodo meccanizzato si ha una pressione di confinamento al fronte data dalla testa di scavo, la quale contrasta le deformazioni del fronte antecedenti la posa del rivestimento. Allo stesso tempo lo scudo della macchina ha una forma trapezoidale, per cui genera un sovrascavo di entità compresa mediamente tra i 5 ed i 10 cm, il quale viene immediatamente riempito con una malta di intasamento. Tale sovrascavo darà comunque luogo ad una convergenza, valutabile nel nostro caso in un massimo di 15 cm, la quale si verifica preliminarmente alla posa dei conci di rivestimento; tale valore della convergenza è stato impiegato per definire, in via preliminare, il valore del rilascio tensionale che si verifica prima della posa del rivestimento.

Sulla base delle analisi svolte con il metodo di convergenza confinamento si sono ipotizzate le seguenti fasi di simulazione ed i relativi valori del rilascio tensionale parziale:

- 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 con rilascio tensionale parziale pari al 80% delle forze agenti
- STEP4 - Posa in opera dei conci costituenti il rivestimento della galleria con rilascio tensionale totale delle forze agenti

- STEP5 - Applicazione della pressione interna
- STEP6 - Simulazione dell'azione sismica

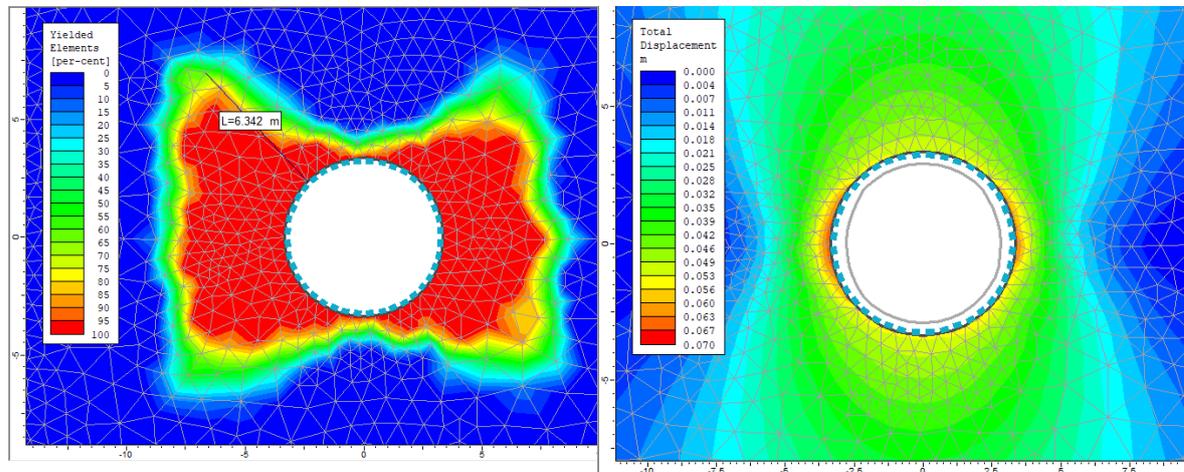


Figura 6-9 – Sezione tipo GI2-alta copertura: raggio plastico e spostamenti nella fase di esercizio

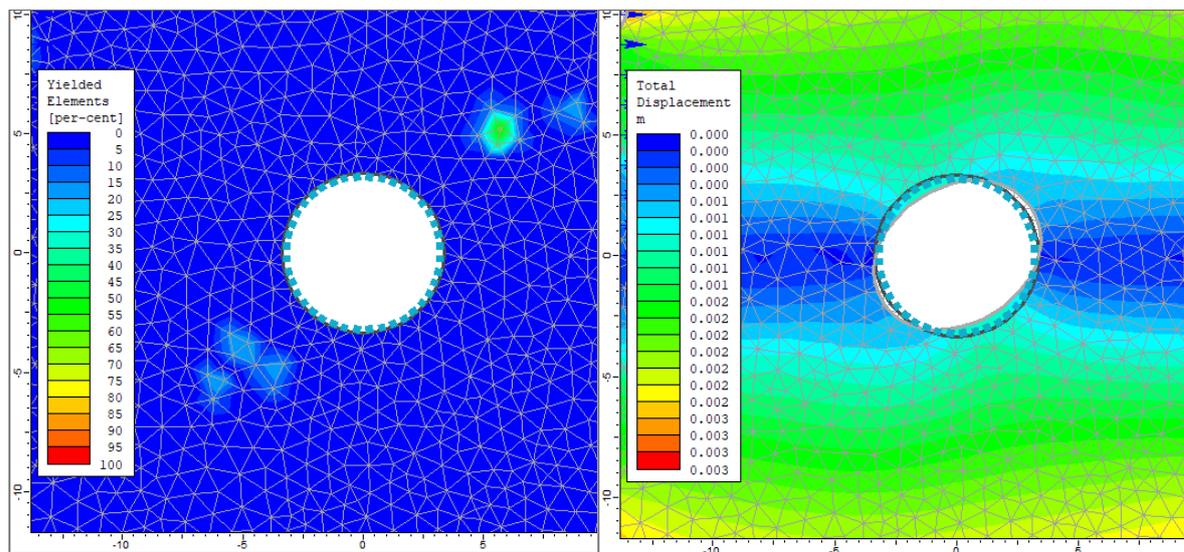


Figura 6-10 – Sezione tipo GI2-alta copertura: incremento delle plasticizzazioni e delle deformazioni durante la fase sismica

L'esame delle simulazioni numeriche evidenzia che:

- il raggio plastico raggiunge allo step 5 il valore massimo, in corrispondenza delle reni, pari a circa 6.5 m, mentre risulta modesto in corrispondenza della calotta e dell'arco rovescio;
- gli spostamenti massimi calcolati allo step 5 valgono 70 mm in corrispondenza dei piedritti e 55 mm in corrispondenza della calotta e dell'arco rovescio;
- durante la fase sismica si osservano variazioni trascurabili delle zone di plasticizzazione nell'intorno del cavo, mentre la variazione degli spostamenti al contorno legata alla distorsione di taglio causata dalla deformazione sismica imposta al modello numerico risulta inferiore al millimetro.

- le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori contenuti e sempre inferiori ai limiti di resistenza delle strutture previste, come mostrato nel capitolo successivo.

### 6.2.3 Sezione tipo GI2 – Bassa copertura

La sezione tipo GI2 è prevista per il rivestimento della galleria idraulica nel tratto compreso tra la centrale idroelettrica e l'opera di presa di valle. Come si è detto in questo tratto della galleria non saranno presenti le virole metalliche, pertanto il rivestimento della galleria dovrà essere in grado di assorbire anche il carico idraulico associato alle fasi di esercizio dell'impianto. I calcoli di progetto e verifica sono stati condotti considerando le condizioni più gravose per il rivestimento, nel presente paragrafo si riportano le analisi svolte in bassa copertura con le proprietà geotecniche attribuite all'unità TRVa.

I parametri utilizzati per la modellazione sono riepilogati nella seguente Tabella 6.3.

Tabella 6.3 - Caratteristiche geomeccaniche della formazione di Terravecchia (15 m profondità)

$\gamma$	$c'$	$\phi'$	$\nu$	E
kN/m <sup>3</sup>	kPa	°	[-]	MPa
21	15	20	0.4	35

In considerazione della modesta copertura il modello è stato esteso fino al piano campagna, la stratigrafia di analisi vede la presenza di un unico litotipo costituito dalla formazione di Terravecchia (Figura 6-11).

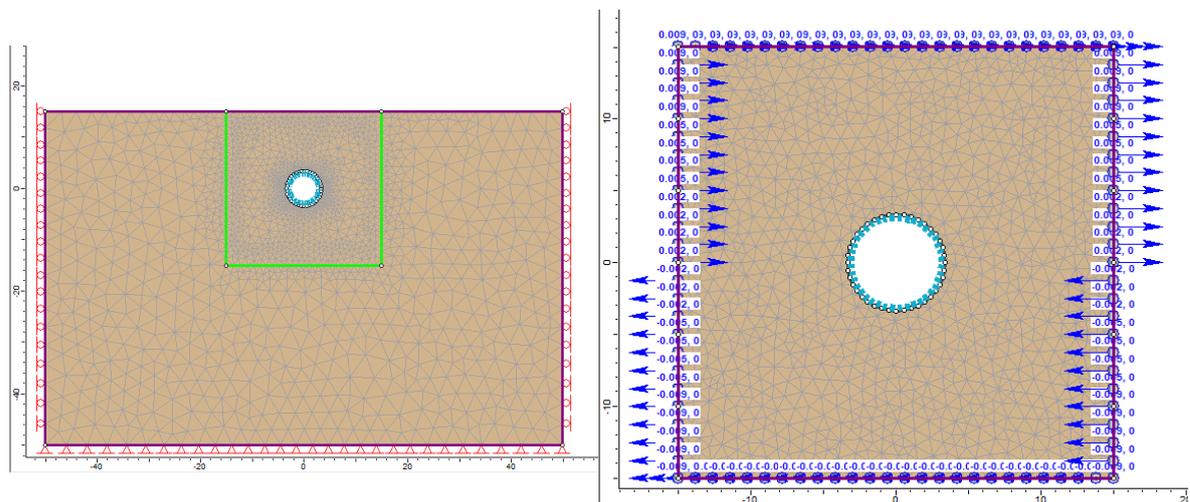


Figura 6-11 – Sezione tipo GI2-bassa copertura: Geometria del modello numerico utilizzato all'ultimo step dell'analisi statica e dell'analisi sismica

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

- I diagrammi di convergenza confinamento attraverso cui si sono definite le percentuali di rilascio parziale da attribuire alle diverse fasi della simulazione

- il diagramma con l'estensione della fascia plastica ed il campo di spostamento del terreno nell'intorno della galleria relativi all'ultimo step dell'analisi statica ed allo step aggiuntivo di analisi sismica

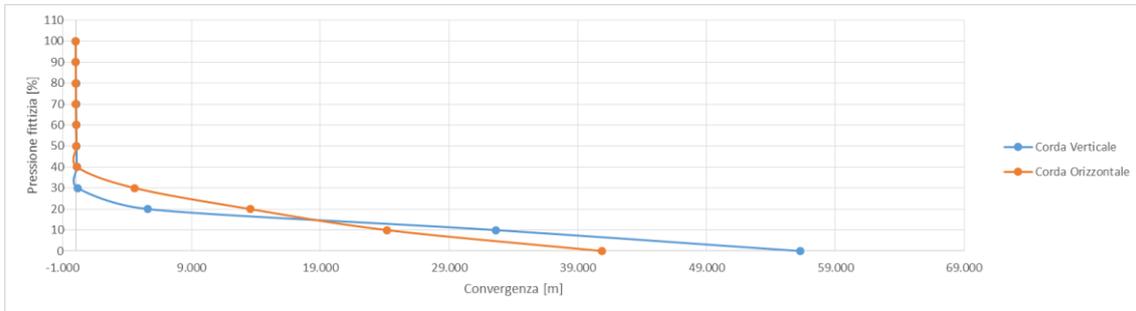


Figura 6-12 – Sezione tipo GI2-bassa copertura: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

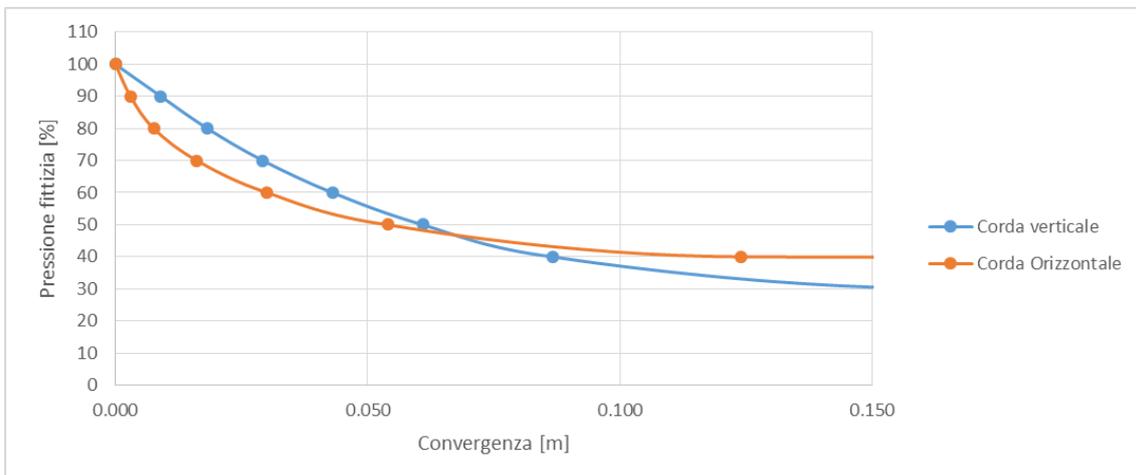


Figura 6-13 – Sezione tipo GI2-bassa copertura: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti limitate ad una convergenza massima di 15 cm

Le analisi svolte con il metodo di convergenza confinamento mostrano come il terreno circostante lo scavo mantenga un comportamento sostanzialmente elastico fino ad un rilascio libero del 40% per la calotta e del 20% per i piedritti, dopodiché si osserva la formazione di estese zone plastiche. Allo scarico totale il calcolo numerico non raggiunge la convergenza, il che indica chiaramente come non sia possibile ottenere l'equilibrio del contorno di scavo in assenza di interventi di sostegno.

L'aliquota di forze rilasciate precedentemente alla posa del rivestimento, in generale, può essere definita in funzione della distanza tra quest'ultimo ed il fronte di scavo. Nel caso di una galleria scavata con metodo meccanizzato si ha una pressione di confinamento al fronte data dalla testa di scavo, la quale contrasta le deformazioni del fronte antecedenti la posa del rivestimento. Allo stesso tempo lo scudo della macchina ha una forma trapezoidale, per cui genera un sovrascavo di entità compresa mediamente tra i 5 ed i 10 cm, il quale viene immediatamente riempito con una malta di intasamento. Tale sovrascavo darà

comunque luogo ad una convergenza, valutabile nel nostro caso in un massimo di 15 cm, la quale si verifica preliminarmente alla posa dei conci di rivestimento; tale valore della convergenza è stato impiegato per definire, in via preliminare, il valore del rilascio tensionale che si verifica prima della posa del rivestimento.

Sulla base delle analisi svolte con il metodo di convergenza confinamento si sono ipotizzate le seguenti fasi di simulazione ed i relativi valori del rilascio tensionale parziale:

- 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 con rilascio tensionale parziale pari al 30% delle forze agenti
- STEP4 - Posa in opera dei conci costituenti il rivestimento della galleria con rilascio tensionale totale delle forze agenti
- STEP5 - Applicazione della pressione interna
- STEP6 - Simulazione dell'azione sismica

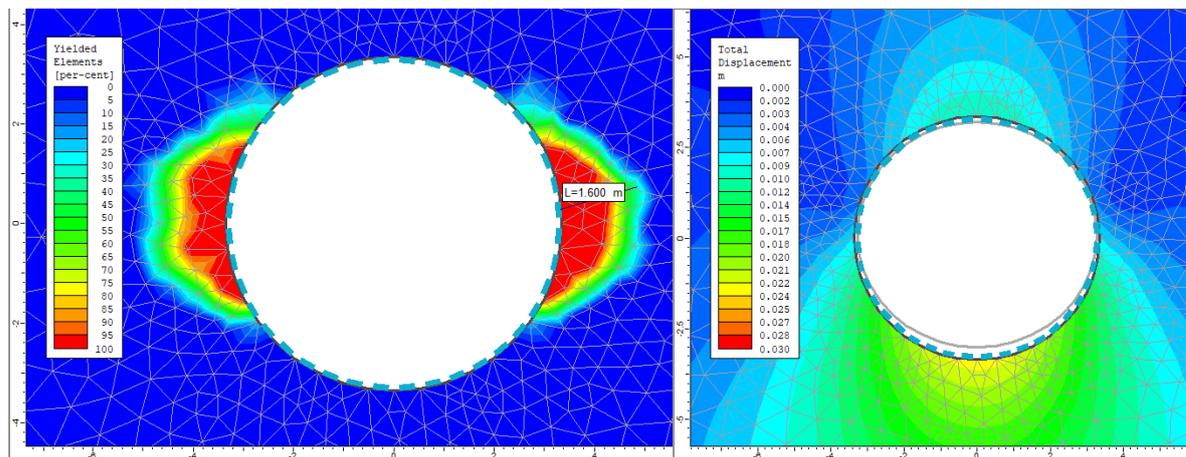


Figura 6-14 – Sezione tipo GI2-bassa copertura: raggio plastico e spostamenti nella fase di esercizio

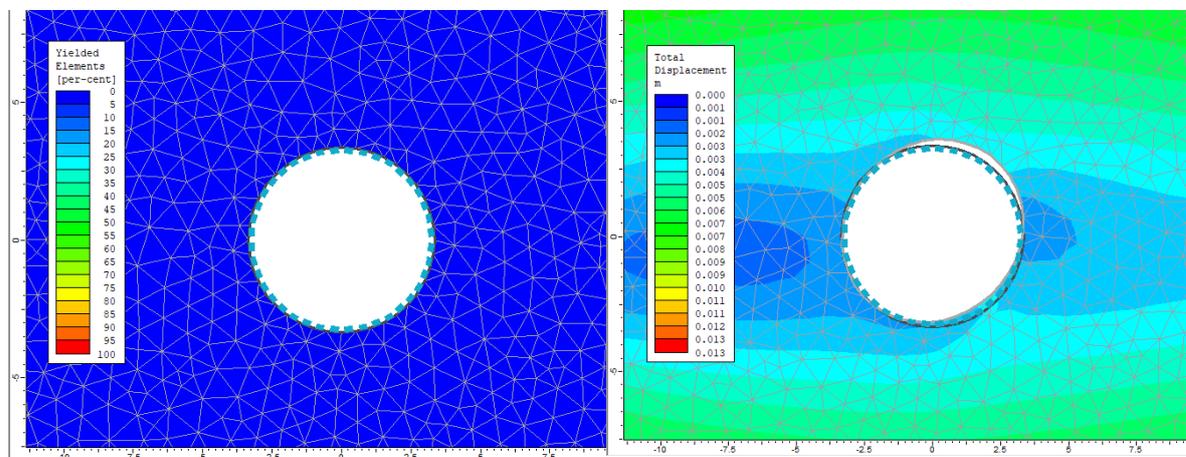


Figura 6-15 – Sezione tipo GI2-bassa copertura: incremento delle plasticizzazioni e delle deformazioni durante la fase sismica

L'esame delle simulazioni numeriche evidenzia che:

- il raggio plastico raggiunge allo step 5 il valore massimo, in corrispondenza delle reni, pari a circa 1.6 m, mentre risulta nullo in corrispondenza della calotta e dell'arco rovescio;
- gli spostamenti massimi calcolati allo step 5 valgono 8 mm in corrispondenza dei piedritti, 10 mm in corrispondenza della calotta e 23 mm in corrispondenza dell'arco rovescio;
- durante la fase sismica non si osservano variazioni delle zone di plasticizzazione nell'intorno del cavo, mentre la variazione degli spostamenti al contorno legata alla distorsione di taglio causata dalla deformazione sismica imposta al modello numerico risulta di ordine millimetrico.
- le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori contenuti e sempre inferiori ai limiti di resistenza delle strutture previste, come mostrato nel capitolo successivo.

### 6.3 Galleria di accesso alla centrale

Nei paragrafi successivi si riporta una breve sintesi dei principali risultati ottenuti dalle simulazioni delle sezioni tipo più significative. In particolare si riportano i risultati di calcolo relativi alle condizioni di analisi ritenute dimensionanti per le principali sezioni tipologiche previste lungo il tracciato.

#### 6.3.1 Sezione tipo GC1

La sezione tipo GC1 costituisce la prosecuzione in naturale della galleria realizzata con tecnica *cut & cover* ed è prevista per lo scavo con copertura maggiore di 5 m. I calcoli di progetto e verifica sono stati condotti considerando le condizioni più gravose per il rivestimento, ossia la massima copertura attesa e le proprietà geotecniche attribuite all'unità TRVa.

I parametri utilizzati per la modellazione sono riepilogati nella seguente Tabella 6.4:

Tabella 6.4 – Caratteristiche geomeccaniche della formazione di Terravecchia (10 m profondità)

$\gamma$	$c'$	$\phi'$	$\nu$	E
kN/m <sup>3</sup>	kPa	°	.	MPa
21	15	20	0.4	35

In considerazione della modesta copertura il modello è stato esteso fino al piano campagna, la stratigrafia di analisi vede la presenza di un unico litotipo costituito dalla formazione di Terravecchia (Figura 6-11).

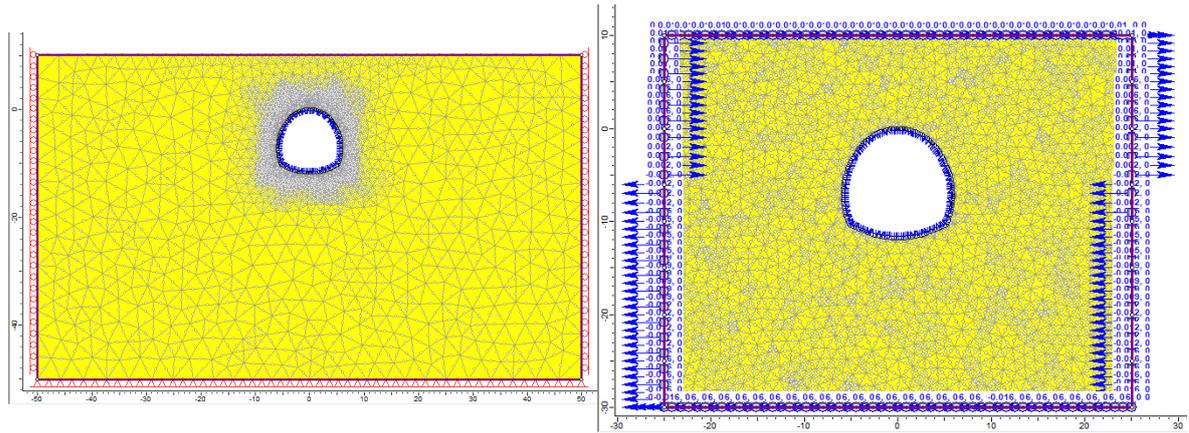


Figura 6-16 – Sezione tipo GC1: Geometria del modello numerico utilizzato all'ultimo step dell'analisi statica e dell'analisi sismica

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

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

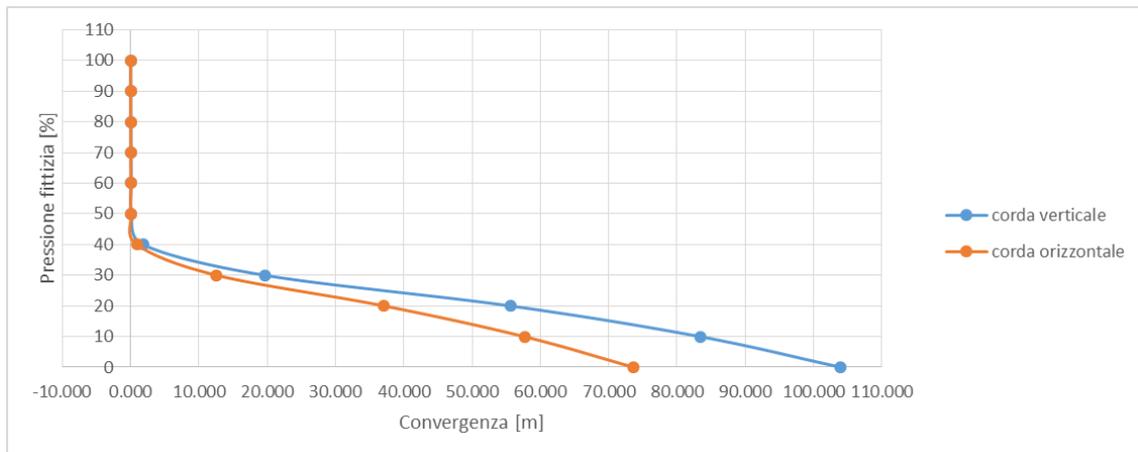


Figura 6-17 – Sezione tipo GC1: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti

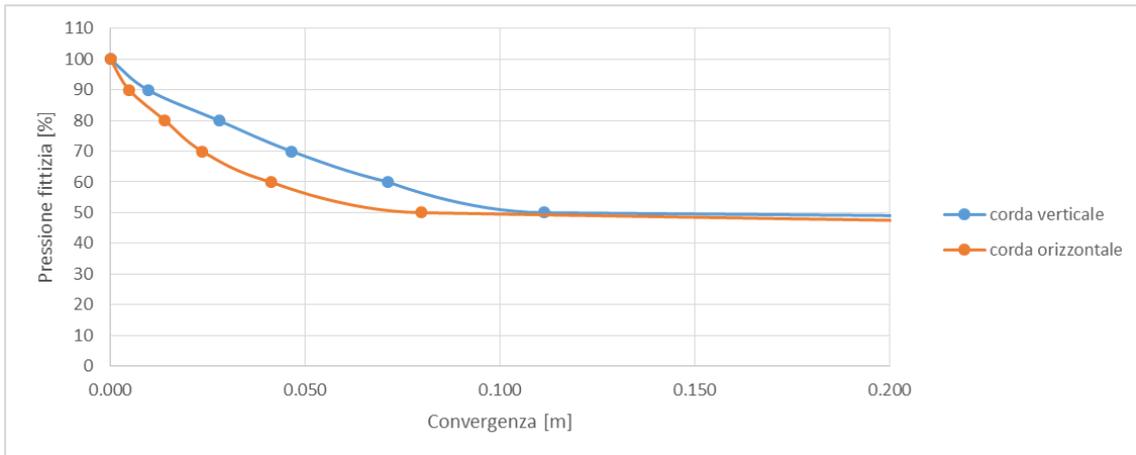


Figura 6-18 – Sezione tipo GC1: curve caratteristiche della calotta e dei piedritti limitate ad una convergenza massima di 20 cm

Le analisi svolte con il metodo di convergenza confinamento mostrano come il terreno circostante lo scavo mantenga un comportamento sostanzialmente elastico fino ad un rilascio libero del 40% per la calotta e del 20% per i piedritti, dopodiché si osserva la formazione di estese zone plastiche. Allo scarico totale il calcolo numerico non raggiunge la convergenza, il che indica chiaramente come non sia possibile ottenere l'equilibrio del contorno di scavo in assenza di interventi di sostegno.

Sulla base delle analisi svolte con il metodo di convergenza confinamento si sono ipotizzate le seguenti fasi di simulazione ed i relativi valori del rilascio tensionale parziale:

- 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 fino al 40% delle forze agenti
- STEP4 - Posa del rivestimento di prima fase con ulteriore rilascio tensionale parziale fino al 80% delle forze agenti
- STEP5 - Posa del rivestimento definitivo e allontanamento del fronte di scavo con rilascio tensionale completo delle forze agenti
- STEP6 - Fase di esercizio a lungo termine, si è valutato il deterioramento completo del rivestimento di prima fase con il rilascio delle tensioni sul rivestimento definitivo
- STEP7 – Applicazione della forzante sismica

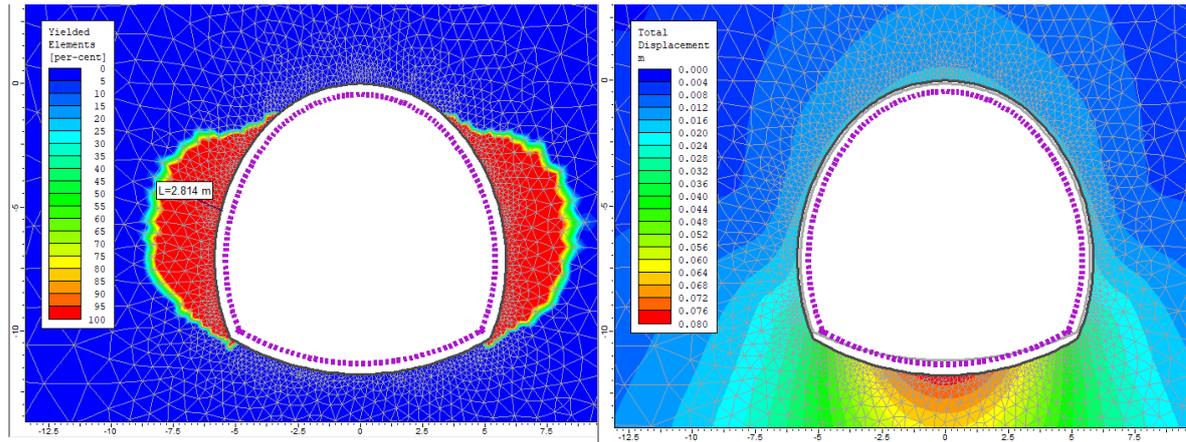


Figura 6-19 – Sezione tipo GC1: raggio plastico e spostamenti nella fase di esercizio

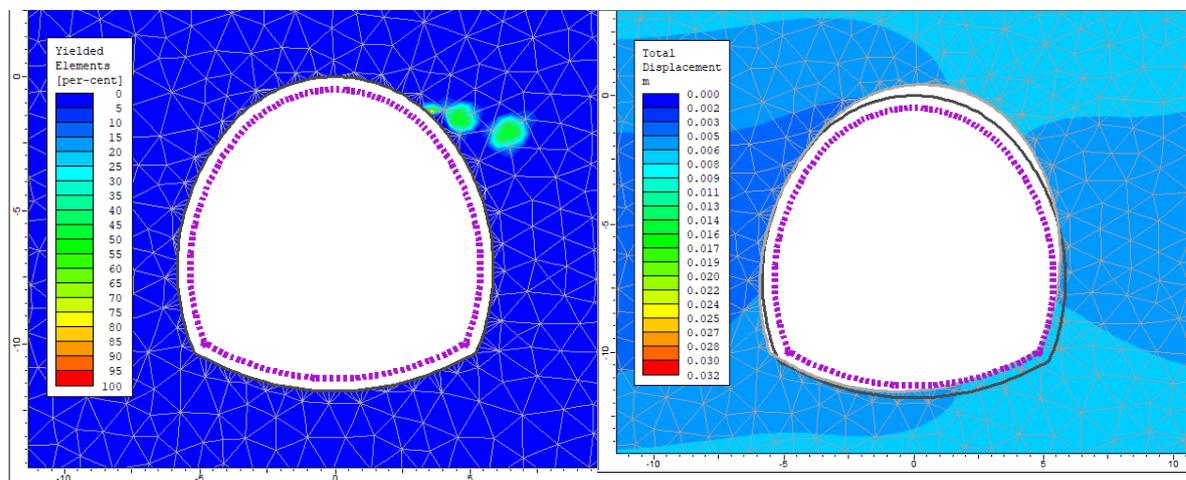


Figura 6-20 – Sezione tipo GC1: incremento delle plasticizzazioni e delle deformazioni durante la fase sismica

L'esame delle simulazioni numeriche evidenzia che:

- il raggio plastico raggiunge allo step 6 il valore massimo, in corrispondenza delle reni, pari a circa 2.8 m, mentre risulta nullo in corrispondenza della calotta e dell'arco rovescio;
- gli spostamenti massimi calcolati allo step 6 valgono circa 20 mm in corrispondenza dei piedritti, 17 mm in corrispondenza della calotta e 80 mm in corrispondenza dell'arco rovescio;
- durante la fase sismica si osservano variazioni trascurabili delle zone di plasticizzazione nell'intorno del cavo, mentre la variazione degli spostamenti al contorno legata alla distorsione di taglio causata dalla deformazione sismica imposta al modello numerico risulta di ordine millimetrico.
- le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori rilevanti ma sempre inferiori ai limiti di resistenza delle strutture previste, come mostrato nel capitolo successivo.

## 7. GALLERIE NATURALI: VERIFICHE STRUTTURALI DEI RIVESTIMENTI

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

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

### 7.1 Approcci di calcolo

#### 7.1.1 Verifiche dei rivestimenti delle gallerie

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 5.4 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.I delle NTC 2018, qui riportata (Tabella 7.1).

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

Carichi	Effetto	Coefficiente	EQU	A1 STR	A2 GEO
Permanenti G <sub>1</sub>	Favorevoli	γ <sub>G1</sub>	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Permanenti non strutturali G <sub>2</sub> (1)	Favorevoli	γ <sub>G2</sub>	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Variabili	Favorevoli	γ <sub>Qi</sub>	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 γ <sub>G1</sub>					

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

Parametro geotecnico		Coefficiente parziale γ <sub>M</sub>	
		M1	M2
tanφ' <sub>k</sub>	Tangente dell'angolo di attrito	1,00	1,25
c' <sub>k</sub>	Coesione efficace	1,00	1,25
c <sub>u,k</sub>	Resistenza al taglio non drenata	1,00	1,40
γ	Peso di volume	1,00	1,00

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

La verifica a pressoflessione dei rivestimenti di prima fase costituiti da calcestruzzo proiettato e centine metalliche viene effettuata considerando il diagramma di 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:

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

con

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

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

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

### 7.1.2 Verifica della stabilità del fronte di scavo

La stabilità del fronte delle diverse sezioni tipo è stata verificata secondo la metodologia proposta da Anagnostou e Kovari (1996) per cui il meccanismo di collasso consiste in un cuneo frontale e di un corpo prismatico che poggia sullo stesso (Figura 7-1).

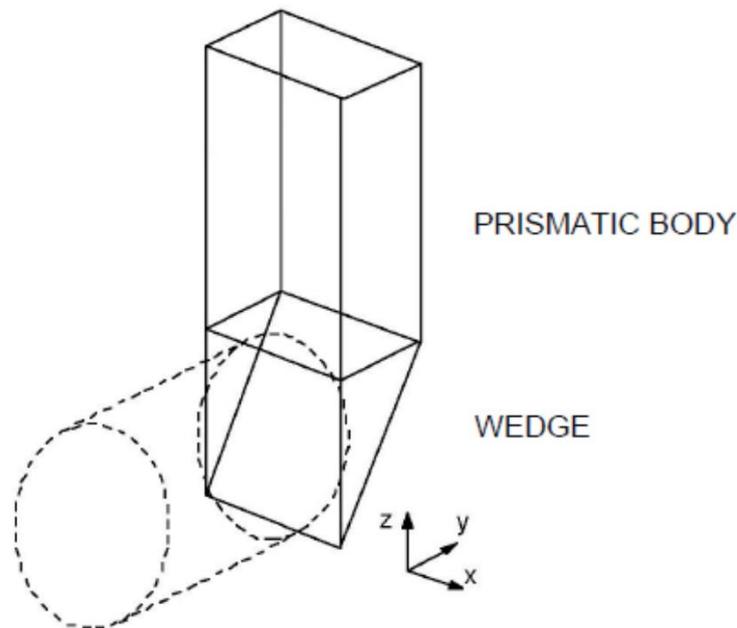


Figura 7-1 – Stabilità del fronte metodo di Anagnostou & Kovari (1996)

La stabilità del fronte si basa sulla verifica all'Equilibrio Limite di tutte le forze che agiscono sul sistema, come schematizzate nella Figura 7-2 seguente.

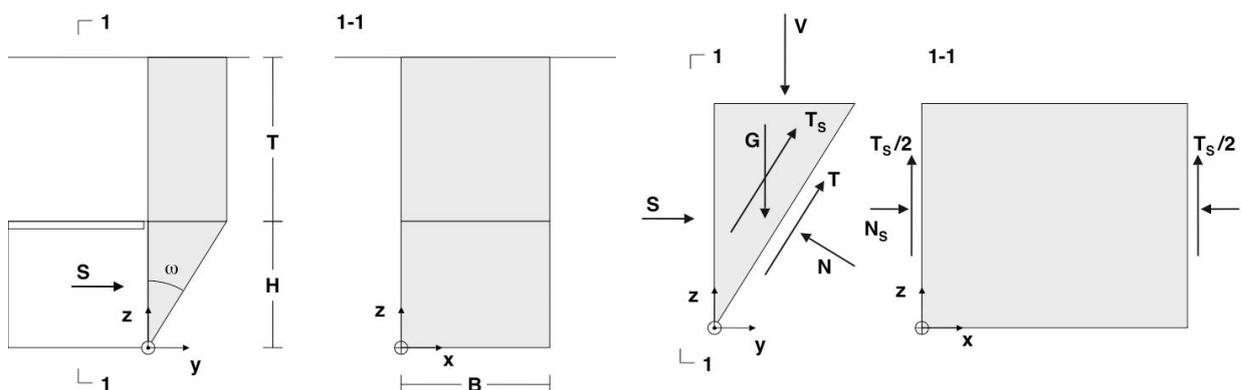


Figura 7-2 – Schema geometrico e forze agenti metodo di Anagnostou & Kovari (1996)

La risultante  $S$  è così calcolata:

- per il lungo termine o breve termine in terreni permeabili
- per il breve termine in terreni poco permeabili

$$S = \begin{cases} \frac{V + G}{\tan(\omega + \phi)} - \frac{T_s + c' \frac{B \cdot H}{\cos \omega}}{\cos \omega \cdot (\tan \omega + \tan \phi)} & (a) \\ B \cdot H \left( \sigma_{v,rid} + \frac{1}{2} \gamma \cdot H \right) - 2H \cdot S_u \frac{H \sin \omega + B}{\sin 2\omega} & (b) \end{cases}$$

con:

$$\begin{aligned} V &= F \cdot \sigma_{v,rid} \\ G &= \frac{1}{2} B \cdot H \cdot l \cdot \gamma \\ T_s &= \begin{cases} H^2 \tan \omega \cdot \left( c' + \lambda_k \tan \phi \frac{2\sigma_{v,rid} + H \cdot \gamma}{3} \right) & (a) \\ S_u \cdot H^2 \tan \omega & (b) \end{cases} \\ T_b &= \begin{cases} c' \cdot \left( B \cdot \frac{H}{\cos \omega} \right) + (V + G) \cdot \sin \omega \cdot \tan \phi' & (a) \\ S_u \cdot \left( B \cdot \frac{H}{\cos \omega} \right) & (b) \end{cases} \\ \sigma_{v,rid} &= \begin{cases} \left[ \frac{R \cdot \gamma - c'}{\lambda \cdot \tan \phi} \cdot \left( 1 - e^{(-\lambda \cdot \tan \phi \frac{T}{R})} \right) \right] & (a) \\ T \cdot \gamma \cdot \left( 1 - \frac{S_u}{R \cdot \gamma} \right) & (b) \end{cases} \end{aligned}$$

dove:

- V è il carico agente sul cuneo al fronte
- G è il peso del prisma al fronte
- $\omega$  è l'inclinazione del piano di scivolamento del prisma al fronte
- $\phi$  è l'angolo d'attrito del terreno
- $T_s$  è l'attrito che si sviluppa sulle facce laterali del prisma
- $c'$  è la coesione drenata del terreno
- B è la larghezza della galleria
- H è l'altezza della galleria
- $\sigma_{v,rid}$  è il carico verticale ridotto
- $\gamma$  è il peso specifico del terreno
- $S_u$  è la coesione non drenata del terreno
- l è la profondità del parallelepipedo
- $\lambda_k$  è il coefficiente d'attrito delle facce laterali del prisma al fronte
- $T_b$  è l'attrito che si sviluppa sulla faccia inferiore del prisma al fronte
- R è il rapporto tra l'area ed il perimetro della base del parallelepipedo
- $\lambda$  è il coefficiente d'attrito delle facce laterali del parallelepipedo

La forza applicata dagli elementi in VTR al fronte può essere calcolata come la sommatoria della forza applicata da ogni singolo elemento calcolabile secondo lo schema in Figura 7-3 come:

$$S_k = \min \begin{cases} F_b \\ T_w = \pi \cdot d_{foro} \cdot \tau_m \cdot a_k \\ T_b = \pi \cdot d_{foro} \cdot \tau_m \cdot (L - a_k) \end{cases}$$

dove:

- $F_b$  è il carico a rottura della barra in VTR
- $T_w$  è la forza di sfilamento del cuneo dalla barra
- $d_{foro}$  è il diametro di perforazione
- $\tau_m$  è l'attrito laterale
- $a_k$  è la lunghezza di barra all'interno del cuneo  $a_k = 0.5H \cdot \tan \omega$
- $T_b$  è la forza di sfilamento della barra oltre il cuneo al fronte
- $L$  è la lunghezza della barra, coincidente con la lunghezza di sovrapposizione

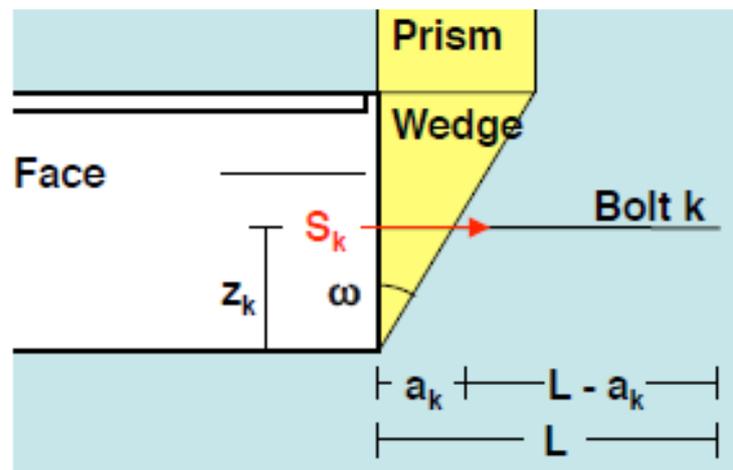


Figura 7-3 – Schema di calcolo della forza applicata dall'elemento al fronte

Essendo un problema geometrico e avendo una disposizione pressoché omogenea sul fronte è possibile semplificare la sommatoria delle forze applicate dai singoli elementi al fronte come la forza applicata dall'elemento posizionato a metà altezza di scavo moltiplicato per il numero totale di elementi in VTR.

Il Fattore di Sicurezza della stabilità del fronte di scavo è, quindi, così calcolabile:

- per il lungo termine o breve termine in terreni permeabili
- per il breve termine in terreni poco permeabili

$$FS = \begin{cases} \frac{T_s + c'_{fronte} \frac{B \cdot H}{\cos \omega}}{\cos \omega \cdot (\tan \omega + \tan \phi)} + S_{sist} & (a) \\ \frac{V + G}{\tan(\omega + \phi)} & \\ \frac{2H \cdot S_{u,fronte} \frac{H \sin \omega + B}{\sin 2\omega} + S_{sist}}{B \cdot H \left( \sigma_{v,rid} + \frac{1}{2} \gamma \cdot H \right)} & (b) \end{cases}$$

## 7.2 Galleria idraulica

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

### 7.2.1 Sezione tipo G11

La sezione tipo G11 presenta un rivestimento definitivo dello spessore di 30 cm, realizzato in calcestruzzo di classe C30/37 ed armato con 5+5  $\phi$  20 / m.

Come si può osservare dalla Figura 7-4 tutte le coppie di sollecitazione ricadono internamente al dominio di interazione e pertanto la verifica risulta soddisfatta.

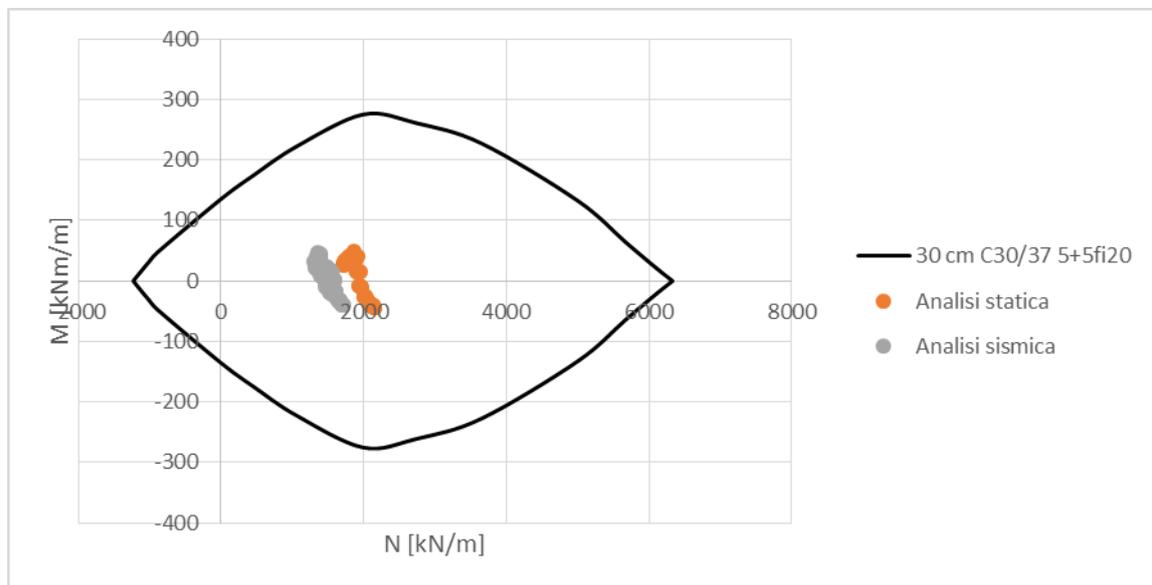


Figura 7-4 – Sezione tipo G11: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

La massima sollecitazione di taglio vale 57 kN/m in campo statico e 46 kN/m durante la fase sismica. Trascurando il contributo dell'armatura a taglio si ottiene un taglio resistente pari a 146 kN/m e pertanto la verifica risulta superata.

### 7.2.2 Sezione tipo G12

La sezione tipo G12 presenta un rivestimento definitivo dello spessore di 30 cm, realizzato in calcestruzzo di classe C30/37 ed armato con 5+5  $\phi$  20 / m.

Come si può osservare dalle figure seguenti (Figura 7-5 e Figura 7-6), tutte le coppie di sollecitazione ricadono internamente al dominio di interazione e pertanto la verifica risulta soddisfatta.

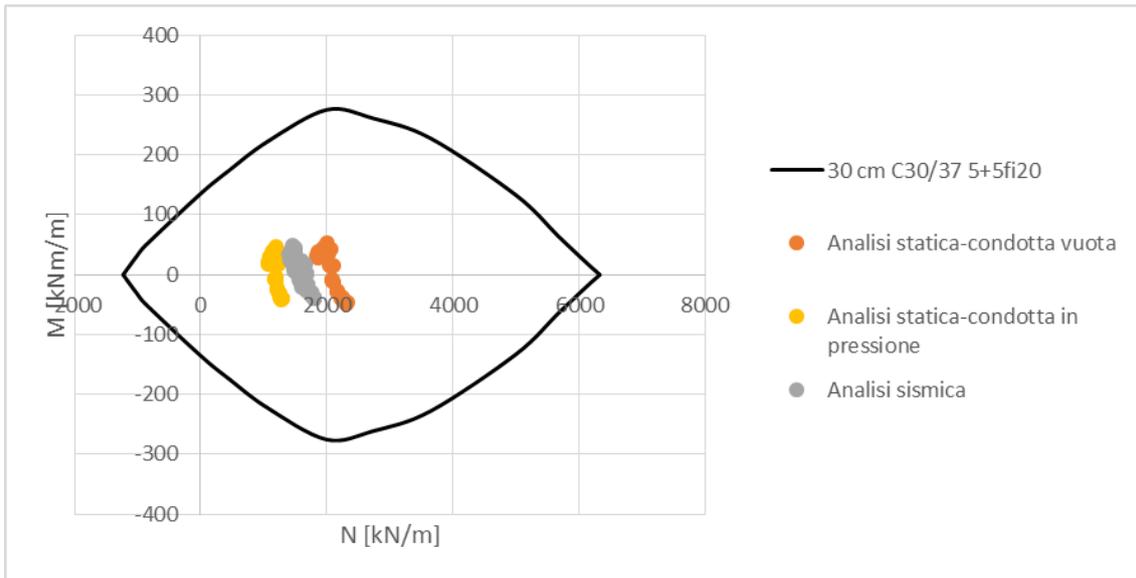


Figura 7-5 – Sezione tipo GI2-alta copertura: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

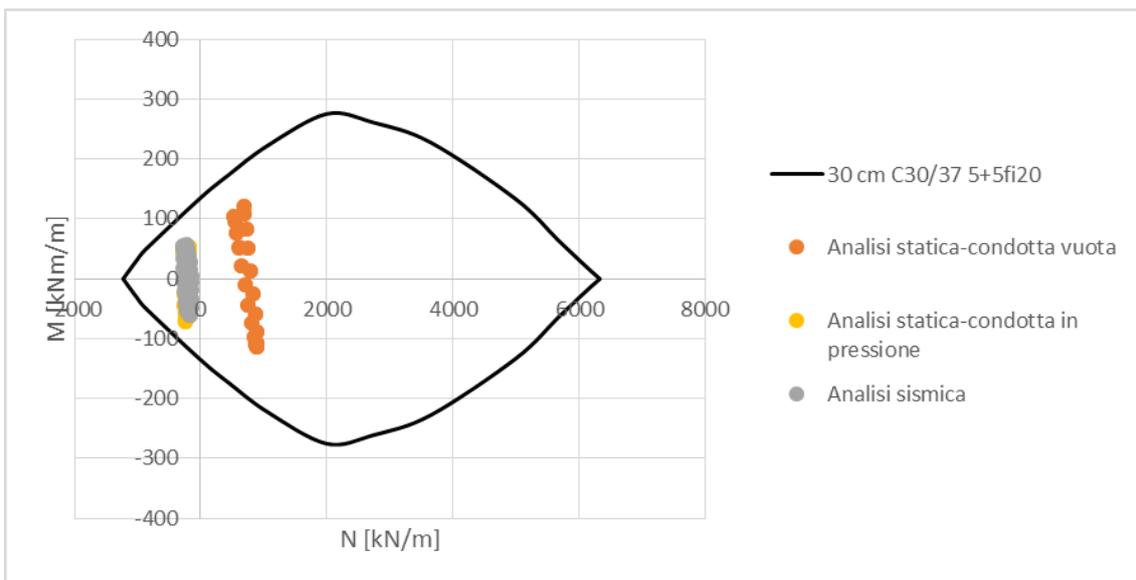


Figura 7-6 – Sezione tipo GI2-bassa copertura: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

La massima sollecitazione di taglio vale 74 kN/m in campo statico e 51 kN/m durante la fase sismica. Trascurando il contributo dell'armatura a taglio si ottiene un taglio resistente pari a 146 kN/m e pertanto la verifica risulta superata.

### 7.3 Galleria di accesso alla centrale

Nei seguenti paragrafi vengono illustrate le principali verifiche strutturali condotte sul rivestimento di prima fase e sul rivestimento definitivo della sezione GC1 della galleria di accesso alla centrale.

### 7.3.1 Verifica del rivestimento di prima fase

La sezione tipo GC1 presenta un rivestimento di prima fase su tutto il contorno di scavo, compreso l'arco rovescio ove è prevista la posa della centina puntone, costituito da:

- centine accoppiate HEB200 passo 1 m in acciaio S275
- calcestruzzo proiettato fibrorinforzato classe C30/37 con spessore 25 cm

Come si può osservare dalla Figura 7-7, tutte le coppie di sollecitazione ricadono internamente al dominio di interazione.

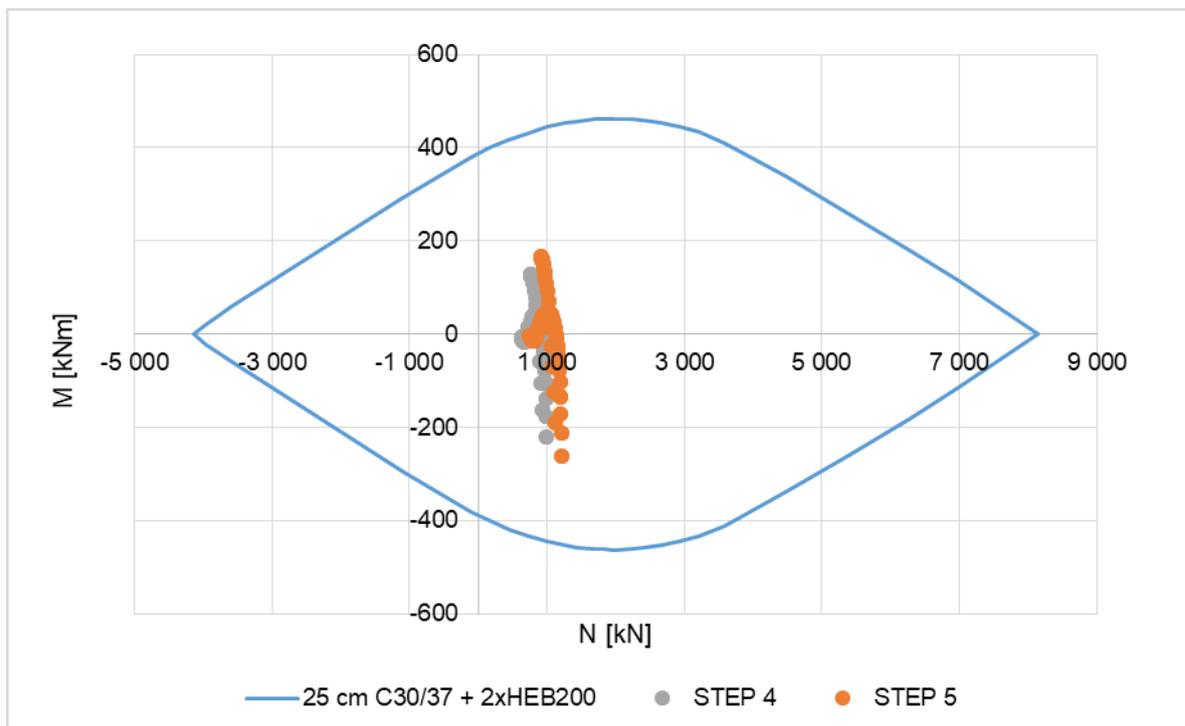


Figura 7-7 – Sezione tipo GC1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Il rivestimento di prima fase presenta una resistenza a taglio pari a 750 kN/m. La massima sollecitazione di taglio vale 280 kN/m, pertanto la verifica risulta soddisfatta.

### 7.3.2 Verifica del rivestimento definitivo

La sezione tipo GC1 presenta un rivestimento definitivo dello spessore di 50 cm, realizzato in calcestruzzo di classe C30/37 ed armato con 5+5  $\varnothing$  24 / m.

Come si può osservare dalla Figura 7-8 tutte le coppie di sollecitazione ricadono internamente al dominio di interazione e pertanto la verifica risulta soddisfatta per tutte le fasi di analisi.

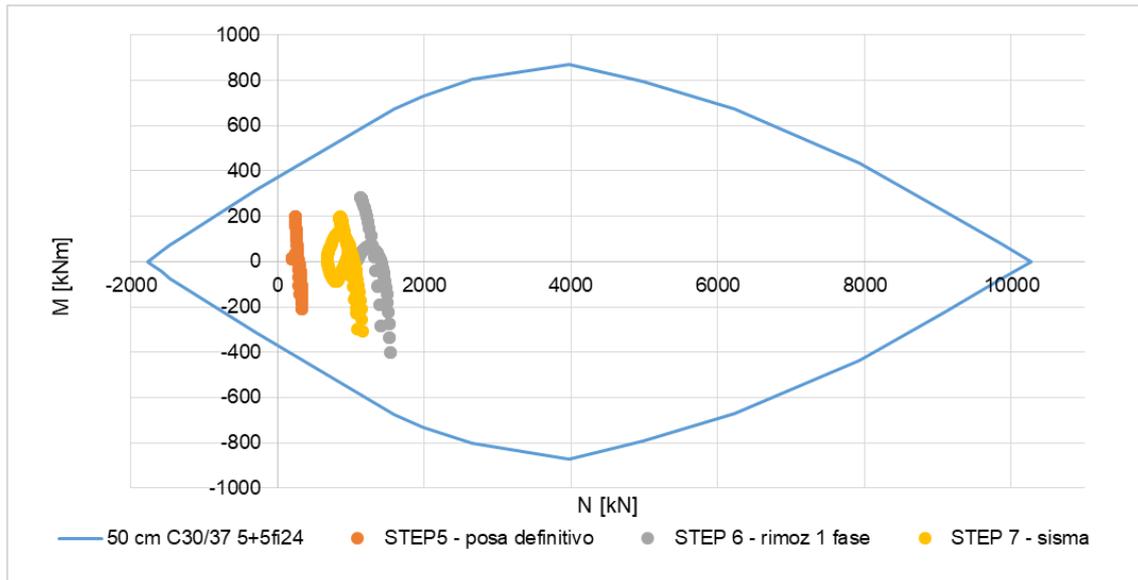


Figura 7-8 – Sezione tipo GC1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

La massima sollecitazione di taglio agente sul rivestimento definitivo 410 kN/m in campo statico e 305 kN/m durante la fase sismica. Considerando la presenza di un'armatura a taglio costituita da staffe  $\phi 12$  con maglia 20 x 40 cm si ottiene un taglio resistente pari a 560 kN/m e pertanto la verifica risulta superata.

Tabella 7.3 – Sezione tipo GC1: calcolo del taglio resistente del rivestimento definitivo

Dati generali							
$b_w$	=	1000	mm	$A_{sw}$	=	565.5	mm <sup>2</sup>
$h$	=	500	mm	$s$	=	400	mm
$d$	=	450	mm	$A_{sw}/s$	=	1.41371669	mm <sup>2</sup>
$f_{ck}$	=	30	N/mm <sup>2</sup>	$z$	=	405	mm
$f_{cd}$	=	17.00	N/mm <sup>2</sup>	$f_{ywk}$	=	450	N/mm <sup>2</sup>
$A_{sl}$	=	2261.9	mm <sup>2</sup>	$f_{ywd}$	=	391.3	N/mm <sup>2</sup>
$A_c$	=	500000	mm <sup>2</sup>	$\cot\theta$	=	2.5	
		1.67		$\cot\alpha$	=	0	( $\alpha = 90^\circ \rightarrow \cot\alpha = 0$ )
$k$	=	1.66666667		$\alpha$	=	90	°
$v_{min}$	=	0.41		$\alpha_{cw}$	=	1	(per strutture non precomprese $\alpha_{cw} = 1$ )
		0.005		$v_1$	=	0.528	
$\rho_l$	=	0.01					
		3.40					
EC2 - Elementi che non richiedono armature a taglio				EC2 - Elementi che richiedono armature a taglio			
$V_{Rd,c}$ [kN]	$V_{Rd,c,min}$ [kN]	<b>TAGLIO RESISTENTE</b> $V_{Rd,c}$ [kN]	Verifica	$V_{Rd,s}$ [kN]	$V_{Rd,max}$ [kN]	<b>TAGLIO RESISTENTE</b> $V_{Rd}$ [kN]	Verifica
222.4	185.6	222.4	NO VERIF.	560.1	1253.5	560.1	OK

### 7.3.3 Verifica di stabilità del fronte di scavo

La verifica di stabilità del fronte di scavo è stata condotta secondo i criteri illustrati al Paragrafo 7.1.2 della presente relazione. Come si può osservare il fronte della sezione tipo SGC1 non risulta stabile senza l'ausilio di barre in VRT, si prevede quindi l'uso di 60 barre in VTR di lunghezza 24 m sovrapposte di 12 m così da garantire un buon immersionamento oltre il fronte.

<b>GEOMETRIA</b>				
copertura	T	m	15	
altezza galleria	H	m	11.75	
larghezza galleria	B	m	11.7	
area fronte di scavo	A	m <sup>2</sup>	111.38	
profondità parallelepipedo	l	m	8.23	
angolo prisma al fronte	$\omega$	°	35	
area base parallelepipedo	F	m <sup>2</sup>	96.3	
perimetro base parallelepipedo	U	m	39.9	
rapporto area/perimetro base	R	m	2.4	
<b>TERRENO DI SCAVO</b>			<b>caratt</b>	<b>design</b>
peso specifico	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	21	21
coesione drenata / non drenata	$c' / S_u$	kPa	15	12
angolo d'attrito	$\phi'$	°	20	16
<b>FORZE</b>			<b>caratt</b>	<b>design</b>
coefficiente attrito laterale parallelepipedo	$\lambda$	.	0.8	
coefficiente attrito laterale prisma	$\lambda_k$	.	0.4	
carico verticale ridotto	$\sigma_{v,rid}$	kPa	102.57	127.10
peso scaricato del parallelepipedo di terreno	V	kN	9873.32	12235.24
peso prisma di terreno	G	kN	11876.2	11876.2
attrito laterale sulla faccia del prisma	$T_s$	kN	3570.09	3040.25
forza necessaria al supporto del fronte	S	kN	8245.91	13138.73
verifica stabilità fronte senza supporti in VTR	.	si/no	no	no
		<b>FS</b>	<b>0.46</b>	<b>0.32</b>
<b>SISTEMA VTR</b>			<b>caratt</b>	<b>design</b>
lunghezza barre VTR	L	m	24	
sovrapposizione barre VTR	L-l	m	12	
diametro foro per barre	$d_{foro}$	m	0.1	
attrito laterale	$\tau_m$	kPa	250	200.00
numero di barre in VTR	N	.	60	
<b>BARRA VTR</b>			<b>caratt</b>	<b>design</b>
carico di rottura barra VTR	$F_b$	kN	350	304.35
diametro esterno barra VTR	$d_e$	mm	60	
spessore barra VTR	$s_b$	mm	10	
lunghezza minima barra VTR	L-l	m	12	
immorsamento medio barra VTR nel cuneo	$a_k$	m	4.11	

immorsamento medio barra VTR nell'ammasso	$(L-l)-a_k$	m	7.89	
forza sfilamento del cuneo dalla barra in VTR	$T_w$	kN	323.1	258.5
forza sfilamento barra VTR dall'ammasso	$T_b$	kN	619.4	495.5
forza applicata da una singola barra in VTR	$S_k$	kN	323.1	258.5
forza applicata dal sistema di barre in VTR	$S_{sist}$	kN	19385.45	15508.36
verifica sistema VTR ipotizzato	.	si/no	si	si
		<b>FS</b>	<b>1.73</b>	<b>1.12</b>

## 8. GALLERIA ARTIFICIALE E CUT&COVER: ANALISI E VERIFICHE

Nel presente capitolo vengono dapprima descritte le strategie di analisi impiegate per le simulazioni numeriche agli elementi finiti e le caratteristiche dei modelli realizzati, successivamente si riportano i calcoli di predimensionamento delle paratie poste a sostegno degli scavi necessari alla realizzazione della via di accesso alla centrale.

Come si è detto al Paragrafo 5.2, la via di accesso alla centrale ha origine direttamente dal piano campagna in una zona pianeggiante per cui si prevede di realizzare l'opera di accesso secondo le seguenti modalità:

- nel tratto iniziale del tracciato, per una lunghezza di circa 410 m e fino ad una profondità massima di scavo di circa 10 m, si prevede di realizzare una galleria artificiale la quale, al termine dei lavori, potrà essere interrata per ripristinare la naturalità dei luoghi. In particolare per consentire la realizzazione delle opere si procederà secondo i seguenti criteri:
  - per una lunghezza di circa 155 m, si prevede di realizzare uno scavo in trincea (TRa) impostando le scarpate provvisorie con pendenza 3 a 2 fino ad un'altezza massima di circa 3 m. A partire dal fondo scavo verrà realizzata la struttura scatolare della galleria artificiale;
  - superati i 3 m di scavo e fino ad un'altezza massima di 10 m le scarpate saranno invece sostenute da paratie di sostegno costituite da diaframmi a T (TRb e TRc). La struttura scatolare risulterà fondata direttamente sui diaframmi di sostegno degli scavi;
- superati i 10 m di scavo la sezione risulterà completamente al di sotto del piano campagna per cui sarà possibile procedere alla realizzazione della galleria di accesso con metodo *cut & cover* per circa 70 m, fino a raggiungere una copertura di almeno 5 metri
- Superati i 15 m di scavo, corrispondenti dunque ad una copertura di circa 5 m al di sopra della galleria cut & cover sarà possibile proseguire lo scavo con una galleria naturale fino al raggiungimento della piano di lavoro della Centrale.

Per il pre-dimensionamento delle paratie di sostegno agli scavi sono state scelte, quali sezioni rappresentative, le sezioni di massima altezza nei casi di:

- scavo fino a 10 m, in cui non sono presenti elementi di contrasto per il sostegno dei diaframmi
- scavo fino a 15 m, in cui è presente la soletta puntone di contrasto dei diaframmi

Nel calcolo è stata simulata la condizione di scavo relativa alla fase di cantierizzazione delle opere, mentre non è stata simulata la fase finale di rinaturalizzazione del versante.

## 8.1 Generalità sui modelli numerici per gli scavi in trincea e per la galleria artificiale *cut & cover*

Le analisi numeriche, effettuate con il codice di calcolo Paratie Plus 2022, utilizzano il Metodo degli Elementi Finiti in campo monodimensionale. Il metodo consente di eseguire analisi statiche e pseudo-statiche di opere di sostegno flessibili in condizioni di deformazione piana, in presenza o meno di elementi strutturali di contrasto (puntoni e tiranti).

Lo studio di una parete flessibile viene condotto attraverso una simulazione numerica del reale: il programma stabilisce e risolve un sistema di equazioni algebriche la cui soluzione permette di riprodurre molto realisticamente l'effettivo comportamento dell'opera di sostegno. La schematizzazione in elementi finiti avviene in questo modo:

- si analizza un problema piano; i gradi di libertà nodali attivi sono lo spostamento laterale e la rotazione fuori piano; gli spostamenti verticali sono automaticamente vincolati (di conseguenza le azioni assiali nelle pareti verticali non sono calcolate)
- la parete flessibile di sostegno vera e propria è schematizzata da una serie di elementi beam verticali
- il terreno, che spinge contro la parete (da monte e da valle) e che reagisce in modo complesso alle deformazioni della parte, è simulato attraverso un doppio letto di molle elasto-plastiche connesse agli stessi nodi della parete
- gli elementi di sostegno quali tiranti e puntoni sono schematizzati tramite molle puntuali convergenti in alcuni punti (nodi) della parete ove convergono parimenti elementi beam e elementi terreno.

Il calcolo è di tipo incrementale, con iterazioni di equilibrio all'interno del singolo step di analisi; un simile approccio consente di simulare l'eventuale successione delle fasi esecutive dell'opera, definendo per ciascuna di esse lo stato di sforzo all'interno della struttura e degli elementi di contrasto, nonché la deformata d'asse dell'opera di sostegno. Al termine del calcolo, inoltre, è possibile definire l'involuppo delle sollecitazioni all'interno della struttura.

### 8.1.1 Criteri di progettazione e verifica agli stati limite

In accordo con le NTC-18, le verifiche nei confronti degli stati limite ultimi (SLU) devono rispettare la condizione:

$$E_d \leq R_d$$

dove  $E_d$  è il valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione e  $R_d$  il valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico.

Il valore di progetto dell'azione  $E_d$  è funzione delle azioni di progetto  $F_{k,i}$ , delle resistenze dei materiali di progetto  $X_k/\gamma_M$  e della geometria di progetto  $a_d$ , secondo la seguente espressione:

$$E_d = E \left[ \gamma_F F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right]$$

essendo  $\gamma_F$  e  $\gamma_M$  coefficienti di sicurezza parziali, rispettivamente sulle azioni e sulle resistenze dei materiali di progetto.

L'effetto delle azioni  $E_d$  viene espresso dalla seguente funzione:

$$E_d = \gamma_E E \left[ F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right]$$

dove  $\gamma_E = \gamma_F$ . L'effetto delle azioni può essere anche valutato direttamente come prodotto delle azioni caratteristiche per il fattore di sicurezza parziale sulle azioni:  $E_d = \gamma_E E_k$ .

La resistenza di progetto del sistema geotecnico  $R_d$  è data dalla seguente espressione:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_R} R \left[ \gamma_F F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right]$$

Dove  $\gamma_R$  è un coefficiente di sicurezza che opera direttamente sulla resistenza del sistema  $R$ , espressa sempre in funzione delle azioni di progetto  $\gamma_F F_k$ , delle resistenze dei materiali di progetto  $X_k/\gamma_M$  e della geometria di progetto  $a_d$ , con  $\gamma_F$  e  $\gamma_M$  coefficienti di sicurezza parziali, rispettivamente sulle azioni e sulle resistenze dei materiali di progetto.

Per le paratie la normativa (par. 6.5.3.1.2 delle NTC-18) prevede che debbano essere prese in considerazione almeno le seguenti verifiche agli stati limite ultimi:

- SLU di tipo Geotecnico (GEO), relative a condizioni di:
  - Stabilità globale dell'insieme terreno-opera;
  - Collasso per rotazione intorno ad un punto dell'opera (moto rigido);
  - Collasso per carico limite verticale;
  - Sfilamento di uno o più ancoraggi;
  - Stabilità del fondo scavo in terreni a grana fine in condizioni non drenate.
- SLU di tipo idraulico (UPL e HYD), relative a condizioni di:
  - Stabilità del fondo scavo per sollevamento;
  - Sifonamento del fondo scavo.
- SLU di tipo strutturale (STR), relative a condizioni di:
  - Raggiungimento della resistenza in uno o più ancoraggi;
  - Raggiungimento della resistenza in uno o più puntoni o di sistemi di contrasto;
  - Raggiungimento della resistenza strutturale della paratia.

Le NTC-18 indicano combinazioni progettuali distinte, che vengono utilizzate a seconda del tipo di opera esaminato e della situazione che si intende verificare:

- Approccio 1 Combinazione 1: A1 + M1 + R1 (R3 per tiranti)
- Approccio 1 Combinazione 2: A2 + M2 + R1 (R2 per le verifiche di stabilità globale) tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 8.1÷8.4.

Tabella 8.1 – Coefficienti parziali sulle azioni (A1 ed A2)

CARICHI	EFFETTO	Coefficiente parziale $\gamma_F$ (o $\gamma_E$ )	(A1) STR	(A2) GEO
Permanenti	Favorevole	$\gamma_{G1}$	1.0	1.0
	Sfavorevole		1.3	1.0
Permanenti non strutturali	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0.8	0.8
	Sfavorevole		1.5	1.3
Variabili	Favorevole	$\gamma_{Qi}$	0.0	0.0
	Sfavorevole		1.5	1.3

Tabella 8.2 – Coefficienti parziali sui terreni (M1 ed M2)

PARAMETRO	Coefficiente parziale	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\gamma_{\phi'}$	1.0	1.25
Coesione efficace	$\gamma_{c'}$	1.0	1.25
Resistenza non drenata	$\gamma_{Cu}$	1.0	1.4
Peso dell'unità di volume	$\gamma_{\gamma}$	1.0	1.0

Tabella 8.3 – Coefficienti parziali per le verifiche di stabilità globale (R2)

Coefficiente parziale	(R2)
$\gamma_{R\_statico}$	1.1
$\gamma_{R\_sismico}$	1.2

Tabella 8.4 – Coefficienti parziali sulle resistenze (R1, R2 ed R3)

VERIFICA	Coefficiente parziale	(R1)	(R2)	(R3)
Capacità portante della fondazione	$\gamma_R$	1.0	1.0	1.4
Scorrimento	$\gamma_R$	1.0	1.0	1.1
Resistenza del terreno a valle	$\gamma_R$	1.0	1.0	1.4

## 8.2 Condizioni stratigrafiche e geometria di analisi

La successione stratigrafica assunta nei calcoli è stata derivata a partire dalle indicazioni riportate al Capitolo 4 della presente relazione. In particolare, lungo la verticale di calcolo, si è considerata la presenza di un unico strato di terreno costituito dall'unità TRVa.

Lo schema tipo di intervento simulato numericamente per le due sezioni di analisi viene mostrato di seguito in Figura 8-1 e in Figura 8-2.

I parametri geotecnici adottati per le argille della formazione TRVa derivano dalla caratterizzazione geotecnica condotta su questa unità geotecnica, per il cui dettaglio si rimanda alla Relazione geotecnica generale (1388-A-GD-R-01), da cui derivano i seguenti parametri caratteristici in termini di tensioni efficaci:

- $c_k' = 15 \text{ kPa}$
- $\phi_k' = 20^\circ$ .

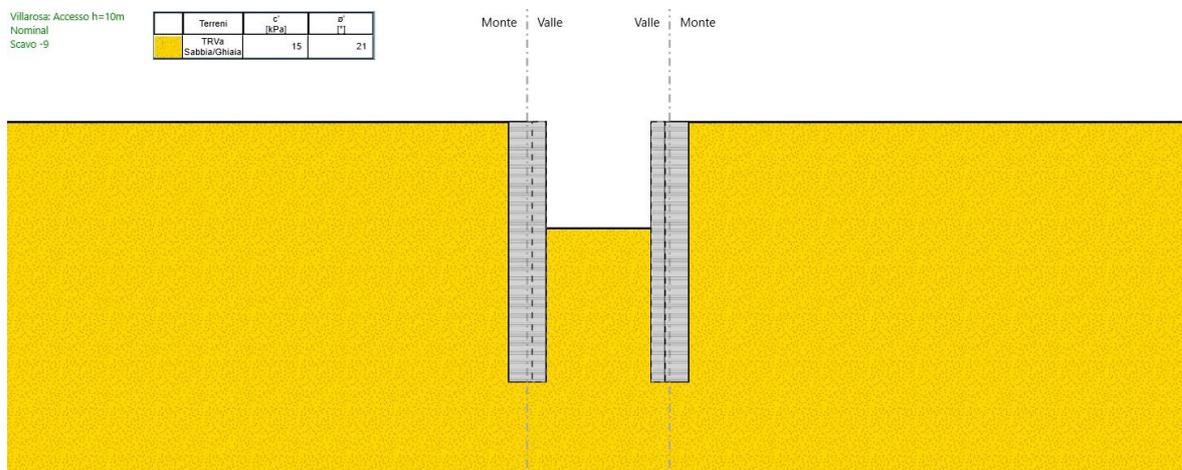


Figura 8-1 – Accesso alla centrale ( $h_{\max}$  di scavo = 10 m): modello numerico delle paratie all'ultimo step di analisi

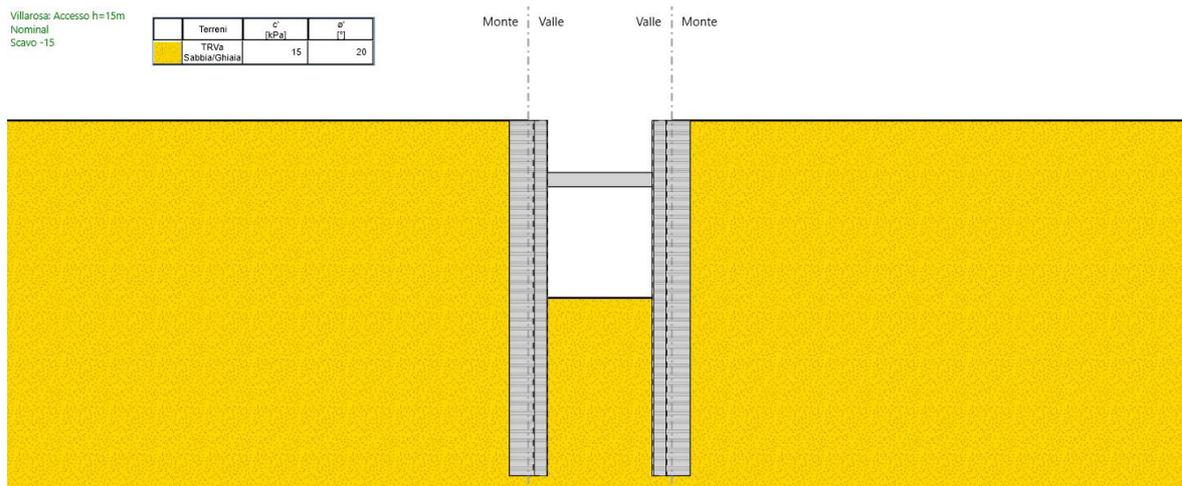


Figura 8-2 – Galleria artificiale di accesso alla centrale ( $h_{\max}$  di scavo = 15 m): modello numerico delle paratie all'ultimo step di analisi

### 8.3 Verifiche SLU di tipo geotecnico (SLU-GEO)

Le verifiche di sicurezza di tipo geotecnico considerate pertinenti per il caso in esame sono:

- stabilità dell'opera (collasso per rotazione intorno ad un punto fisso) (Par. 8.3.1)

#### 8.3.1 Stabilità dell'opera (resistenza del terreno a valle)

La stabilità dell'opera deve essere verificata, con riferimento alla normativa italiana, secondo l'Approccio 1 - Combinazione 2 (A2 + M2 + R1) e secondo la combinazione SISM-GEO tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 8.1÷8.4.

In Tabella 8.5 si riporta il riepilogo delle spinte, calcolate dal software Paratie (Figura 8-3 e Figura 8-4), relativamente all'ultima fase di calcolo, alla quale corrisponde la massima altezza libera. Come si può osservare la percentuale massima di spinta passiva mobilitata a valle dell'opera è sempre inferiore all'unità e pertanto la verifica risulta soddisfatta positivamente per tutte le analisi.

Tabella 8.5 – Galleria cut&cover di accesso alla centrale: Riepilogo delle spinte passive mobilitate

Sezione di analisi	Condizione	STAT-GEO	SISM-GEO
Hmax=10m	Spinta agente (kN/m)	2768	2542
	Massima spinta ammissibile (kN/m)	4254	4456
	Rapporto di sfruttamento	0.65	0.57
Hmax=15m	Spinta agente (kN/m)	3887	3688
	Massima spinta ammissibile (kN/m)	5373	5540
	Rapporto di sfruttamento	0.72	0.67

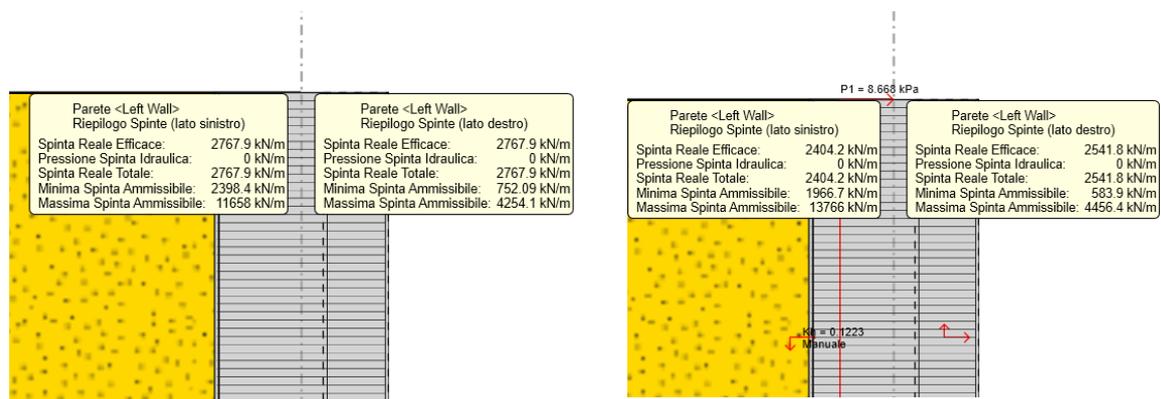


Figura 8-3 – Accesso alla centrale ( $h_{max}$  di scavo = 10 m): riepilogo spinte agenti e resistenti, condizione statica (a sinistra) e sismica (a destra)

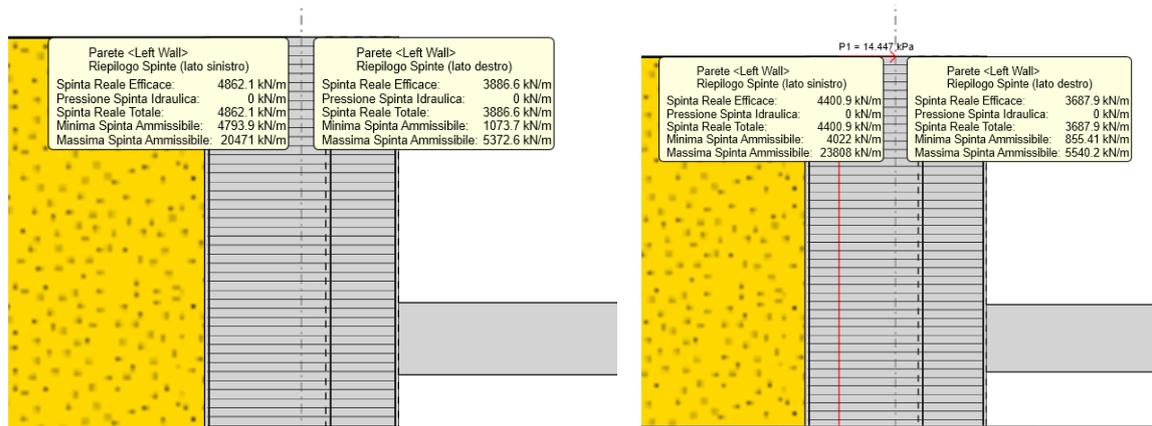


Figura 8-4 – Galleria artificiale di accesso alla centrale ( $h_{\max}$  di scavo = 15 m): riepilogo spinte agenti e resistenti, condizione statica (a sinistra) e sismica (a destra)

## 8.4 Verifiche SLU di tipo strutturale (SLU-STR)

Le verifiche di sicurezza di tipo strutturale considerate pertinenti per il caso in esame sono:

- verifica della resistenza strutturale dei diaframmi (Par. 8.4.1)
- verifica della resistenza strutturale della soletta-puntone (Par. 8.4.2)

### 8.4.1 Verifica della resistenza strutturale dei diaframmi

La verifica della sezione degli elementi strutturali è stata condotta in accordo alle NTC-18. La sezione resistente deve avere un momento resistente  $M_{Rd}$  tale che sia soddisfatta la seguente disuguaglianza:

$$M_{Ed} < M_{Rd},$$

con:

$M_{Rd}$  = momento flettente resistente di calcolo

$M_{Ed}$  = momento flettente di calcolo agente.

Analogamente, per la verifica a taglio si deve disporre di uno sforzo di taglio resistente tale per cui:

$$V_{Ed} < V_{c,Rd}$$

con:

$V_{Rd}$  = sforzo di taglio resistente di calcolo

$V_{Ed}$  = sforzo di taglio di calcolo agente.

### Verifica dei diaframmi con Hmax-scavo=10m

Il calcestruzzo impiegato per il getto in opera dei pali è della classe C30/37. La sezione di progetto e le armature ipotizzate in fase di predimensionamento sono riportate nella seguente Figura 8-5.

In particolare per garantire il superamento delle verifiche strutturali nelle sezioni più sollecitate è necessario disporre le seguenti armature:

- armatura a flessione: 34 barre  $\varnothing 26$  mm
- armatura a taglio: staffe  $\varnothing 14$  mm a 4 bracci, passo 15 cm.

I valori del momento resistente di calcolo  $M_{Rd}$  e dello sforzo di taglio resistente di calcolo  $V_{Rd}$  risultano pari a:

$$M_{Rd} = 3220 \text{ kNm/m}$$

$$V_{Rd} = 590 \text{ kN/m.}$$

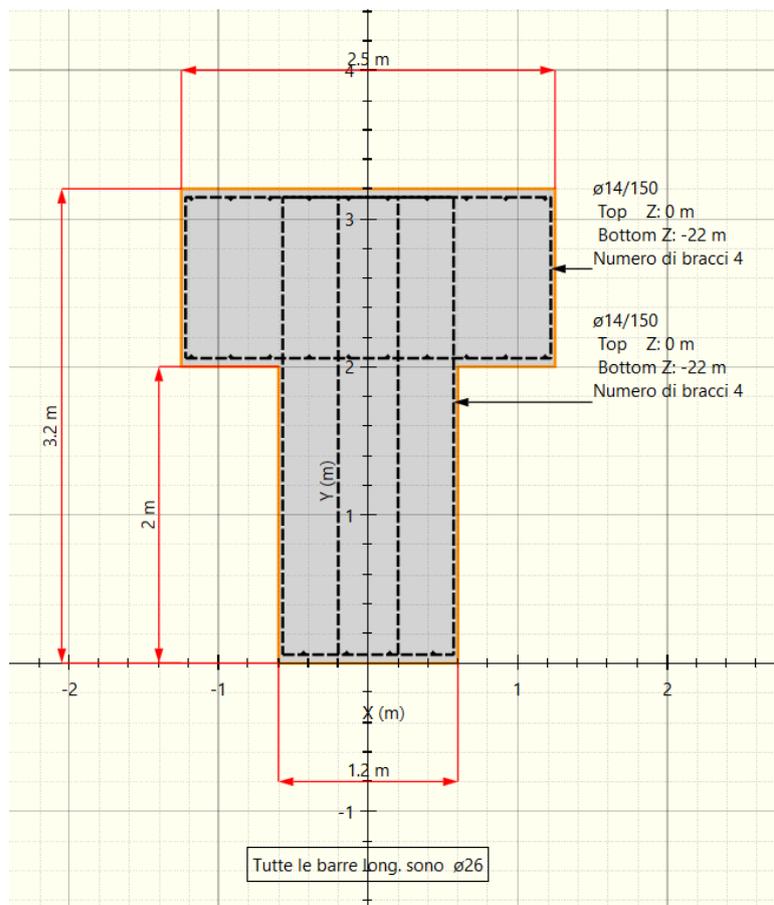


Figura 8-5 – Sezione resistente ed armature di calcolo per i diaframmi nel caso di scavo con  $H_{max}=10$  m

Nelle figure seguenti si riportano i diagrammi di sfruttamento (azione sollecitante/azione resistente) della sezione resistente nei confronti del momento flettente e del taglio lungo la paratia. In particolare si riportano l'involuppo dei diagrammi di sfruttamento per le diverse fasi di analisi per le verifiche in campo statico statiche ed i diagrammi di sfruttamento relativi alla sola analisi pseudo-statica per le verifiche in campo sismico. Come

si può osservare l'azione sollecitante risulta sempre inferiore alla resistenza disponibile e, pertanto, tutte le verifiche risultano soddisfatte positivamente.

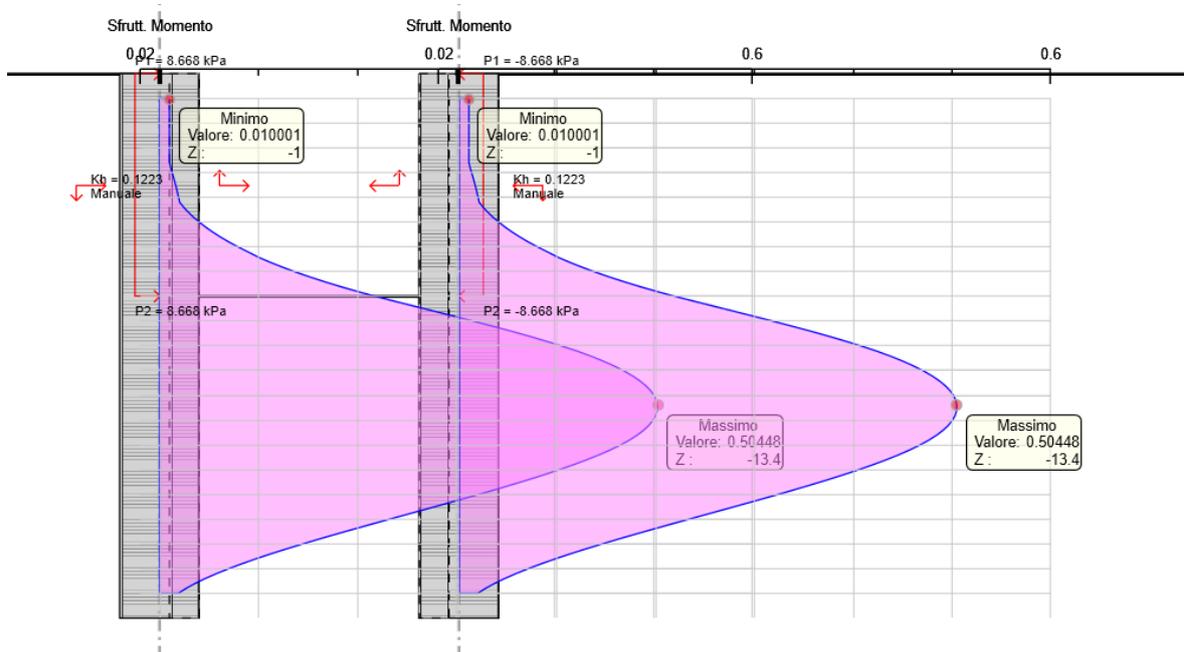


Figura 8-6 – Accesso alla centrale ( $h_{\max}$  di scavo = 10 m): involucro dei diagrammi di sfruttamento del momento in condizioni statiche

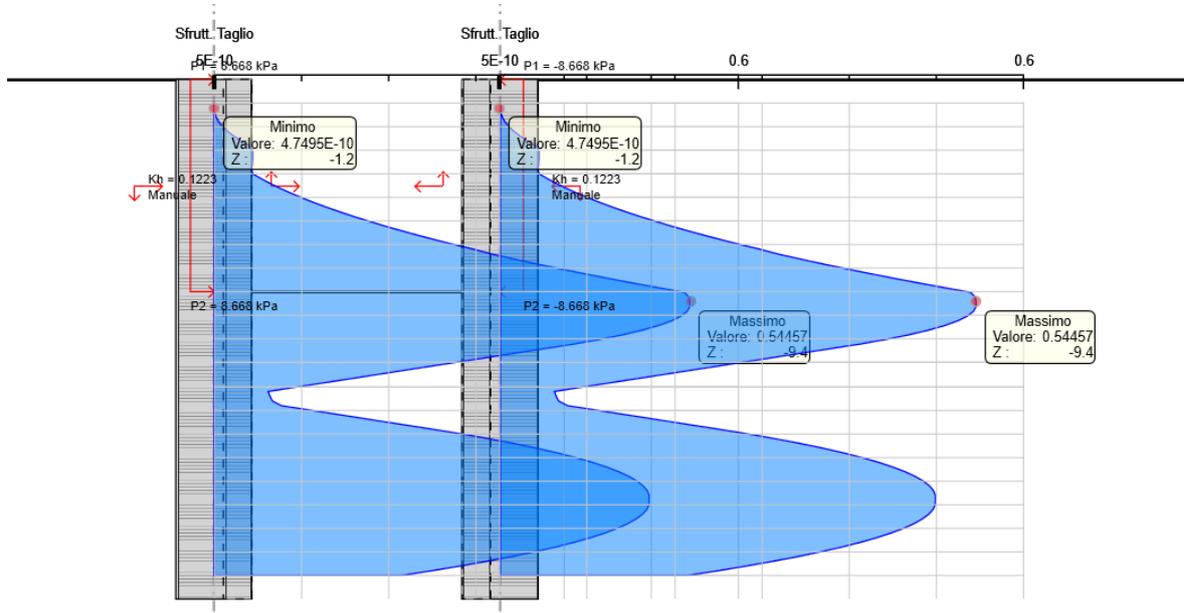


Figura 8-7 – Accesso alla centrale ( $h_{\max}$  di scavo = 10 m): involucro dei diagrammi di sfruttamento del taglio in condizioni statiche

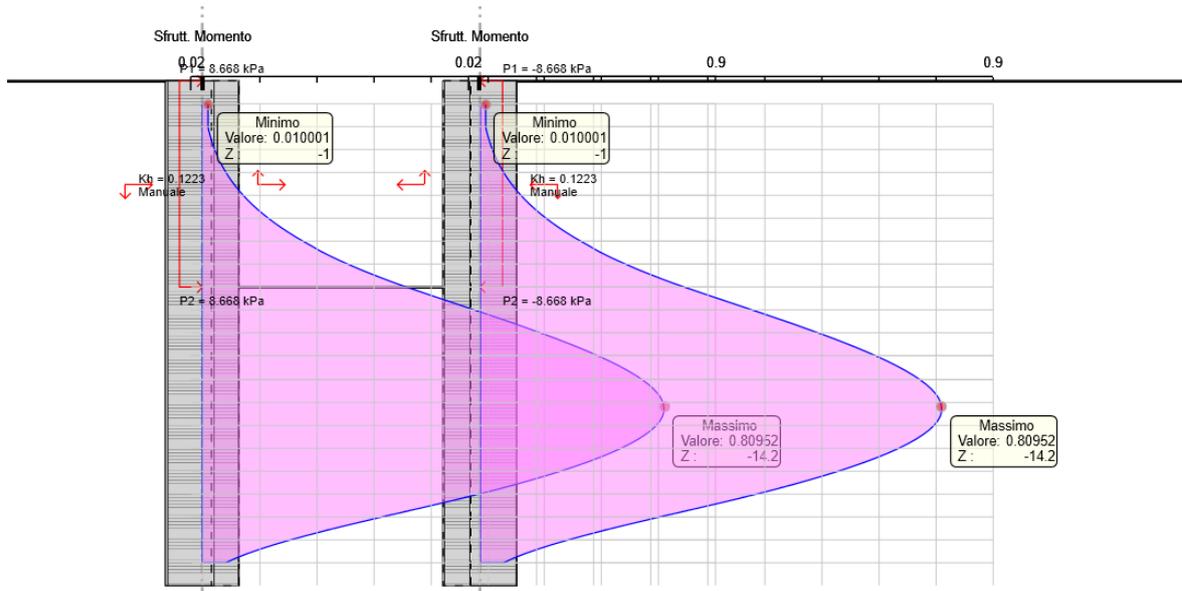


Figura 8-8 – Accesso alla centrale ( $h_{\max}$  di scavo = 10 m): diagrammi di sfruttamento del momento in condizioni sismiche

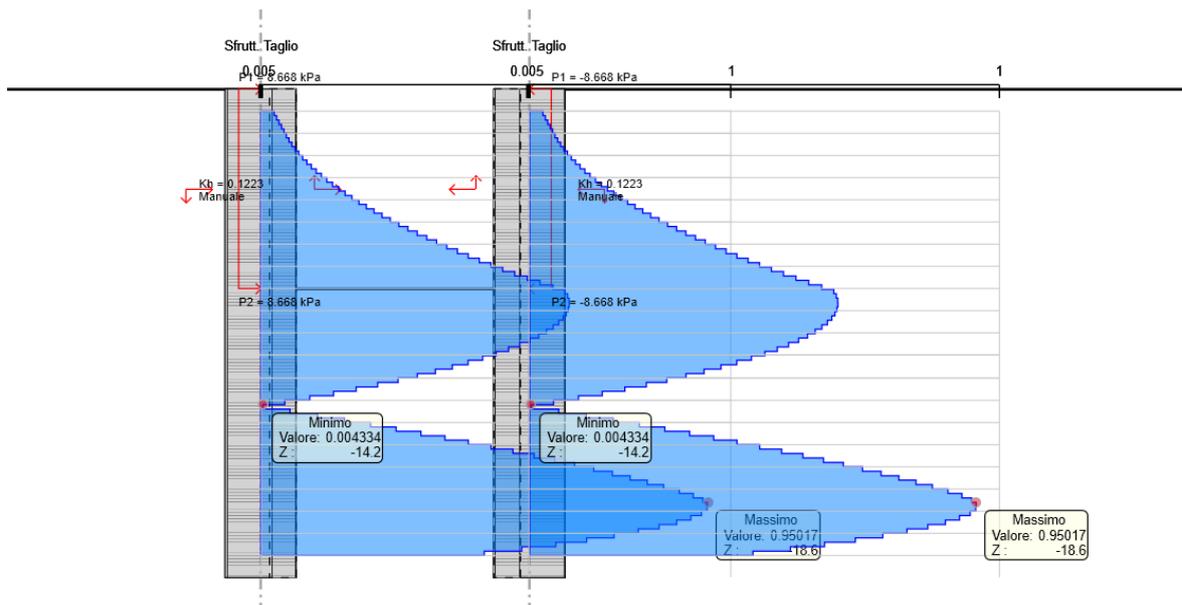


Figura 8-9 – Accesso alla centrale ( $h_{\max}$  di scavo = 10 m): diagrammi di sfruttamento del taglio in condizioni sismiche

### Verifica dei diaframmi con $H_{\max}$ -scavo=15m

Il calcestruzzo impiegato per il getto in opera dei pali è della classe C30/37. La sezione di progetto e le armature ipotizzate in fase di predimensionamento sono riportate nella seguente Figura 8-10.

In particolare per garantire il superamento delle verifiche strutturali nelle sezioni più sollecitate è necessario disporre le seguenti armature:

- armatura a flessione: 34 barre  $\varnothing 26$  mm
- armatura a taglio: staffe  $\varnothing 14$  mm a 4 bracci, passo 15 cm.

I valori del momento resistente di calcolo  $M_{Rd}$  e dello sforzo di taglio resistente di calcolo  $V_{Rd}$  risultano pari a:

$$M_{Rd} = 3220 \text{ kNm/m}$$

$$V_{Rd} = 590 \text{ kN/m.}$$

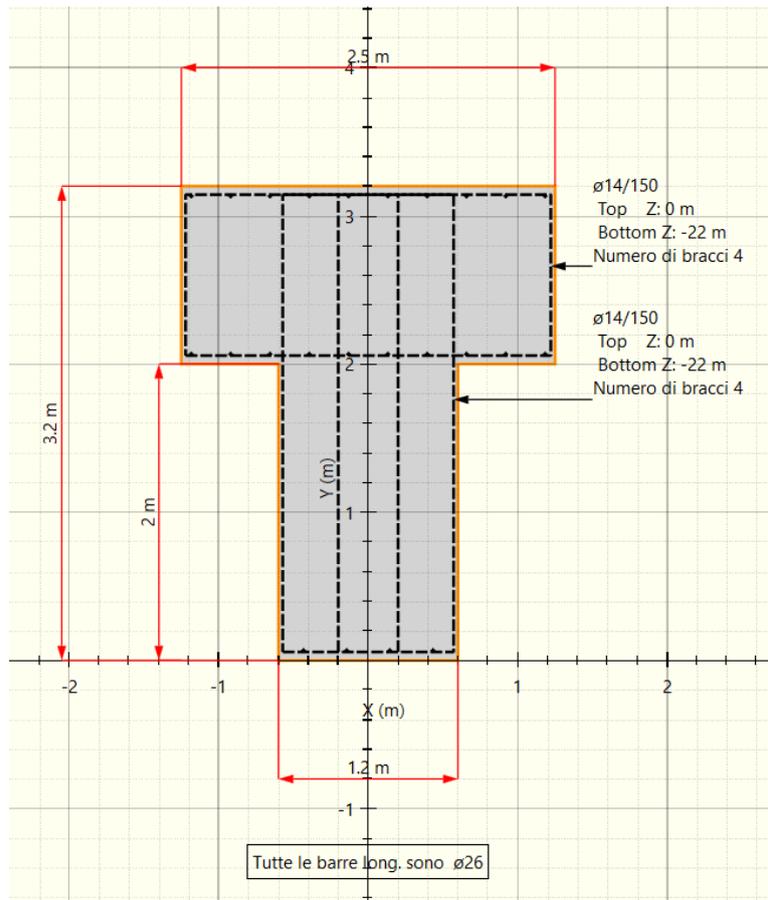


Figura 8-10 – Sezione resistente ed armature di calcolo per i diaframmi nel caso di scavo con  $H_{max}=15$  m

Nelle figure seguenti si riportano i diagrammi di sfruttamento (azione sollecitante/azione resistente) della sezione resistente nei confronti del momento flettente e del taglio lungo la paratia. In particolare si riportano l'involuppo dei diagrammi di sfruttamento per le diverse fasi di analisi per le verifiche in campo statico statiche ed i diagrammi di sfruttamento relativi alla sola analisi pseudo-statica per le verifiche in campo sismico. Come si può osservare l'azione sollecitante risulta sempre inferiore alla resistenza disponibile e, pertanto, tutte le verifiche risultano soddisfatte positivamente.

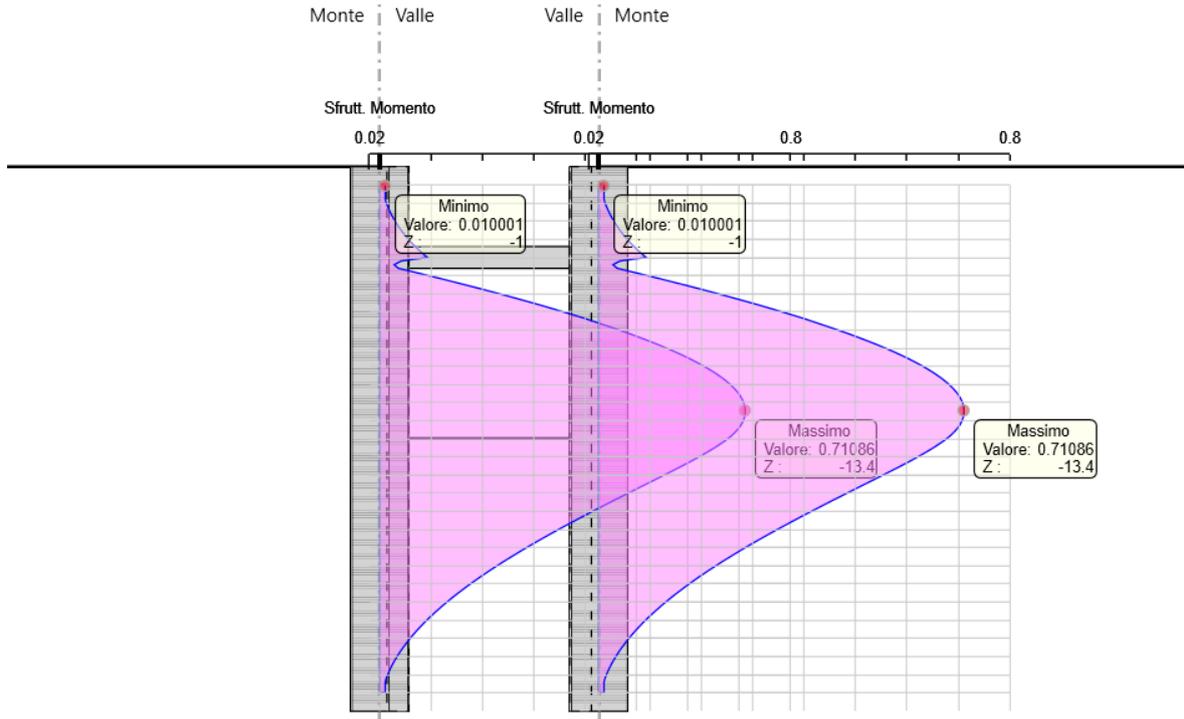


Figura 8-11 – Galleria artificiale di accesso alla centrale ( $h_{max}$  di scavo = 15 m): involucro dei diagrammi di sfruttamento del momento in condizioni statiche

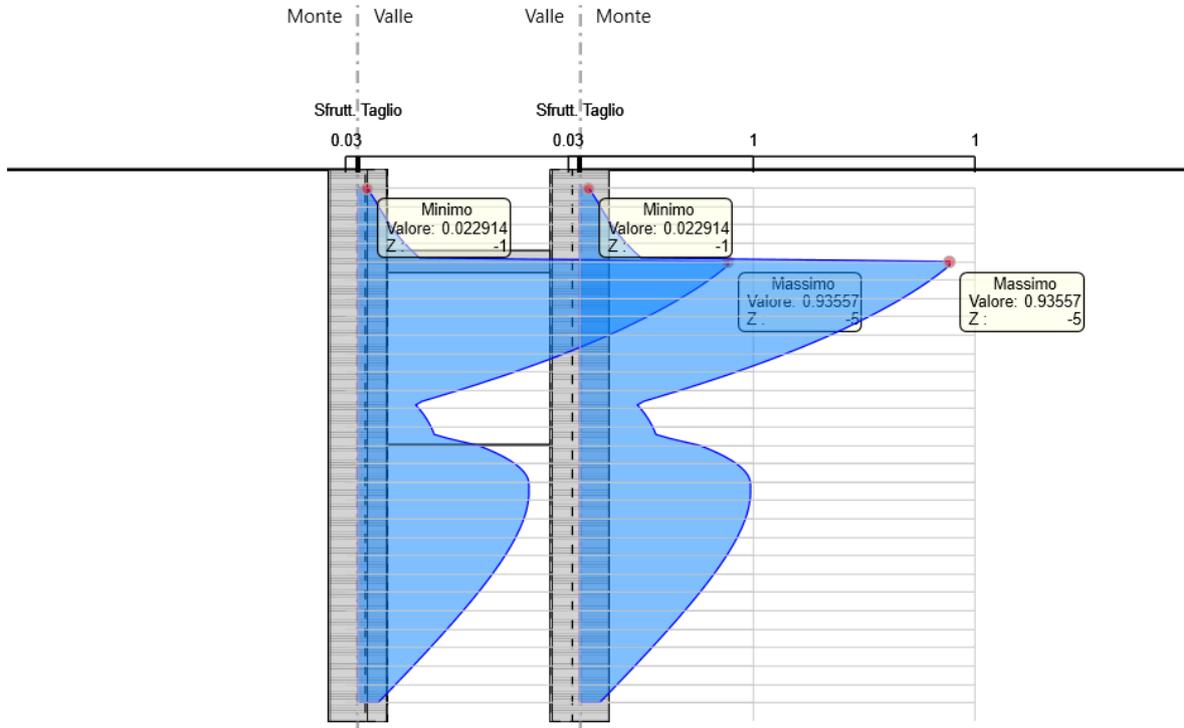


Figura 8-12 – Galleria artificiale di accesso alla centrale ( $h_{max}$  di scavo = 15 m): involucro dei diagrammi di sfruttamento del taglio in condizioni statiche

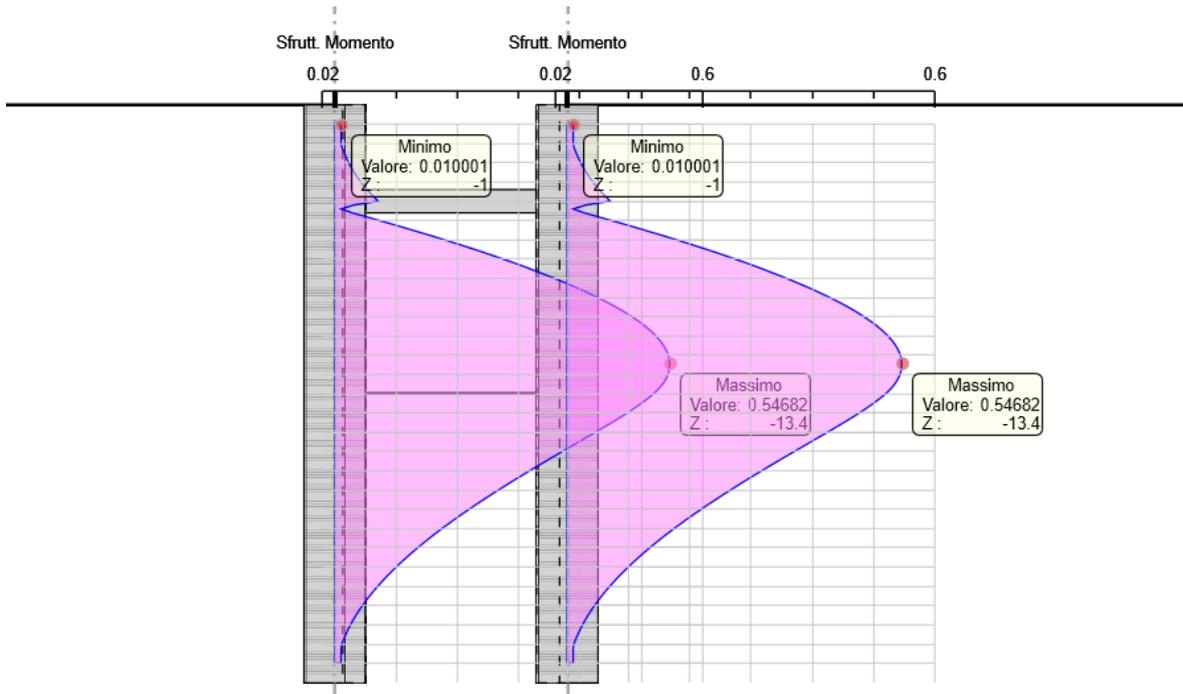


Figura 8-13 – Galleria artificiale di accesso alla centrale ( $h_{max}$  di scavo = 15 m): diagrammi di sfruttamento del momento in condizioni sismiche

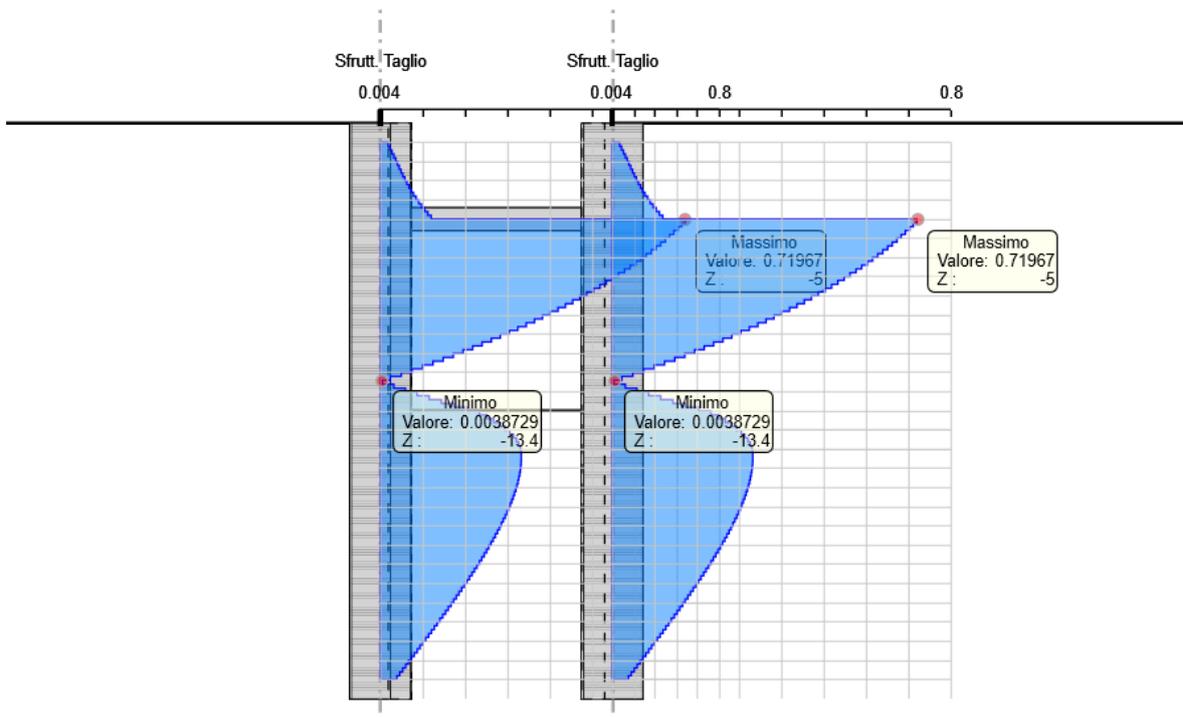


Figura 8-14 – Galleria artificiale di accesso alla centrale ( $h_{max}$  di scavo = 15 m): diagrammi di sfruttamento del taglio in condizioni sismiche

### 8.4.2 Verifica della resistenza strutturale della soletta-puntone

Per le verifiche della soletta-puntone è stato svolto un calcolo semplificato al fine di verificare la sezione resistente della stessa nei confronti della pressoflessione. Ai fini della verifica è stata considerata la reazione normale agente sul puntone, calcolata per mezzo del software Paratie Plus, combinata con il momento flettente derivante dal peso proprio della soletta e del terreno imbarcato su di essa.

Si riportano di seguito le reazioni massime agenti sul puntone calcolate per mezzo del software Paratie Plus.

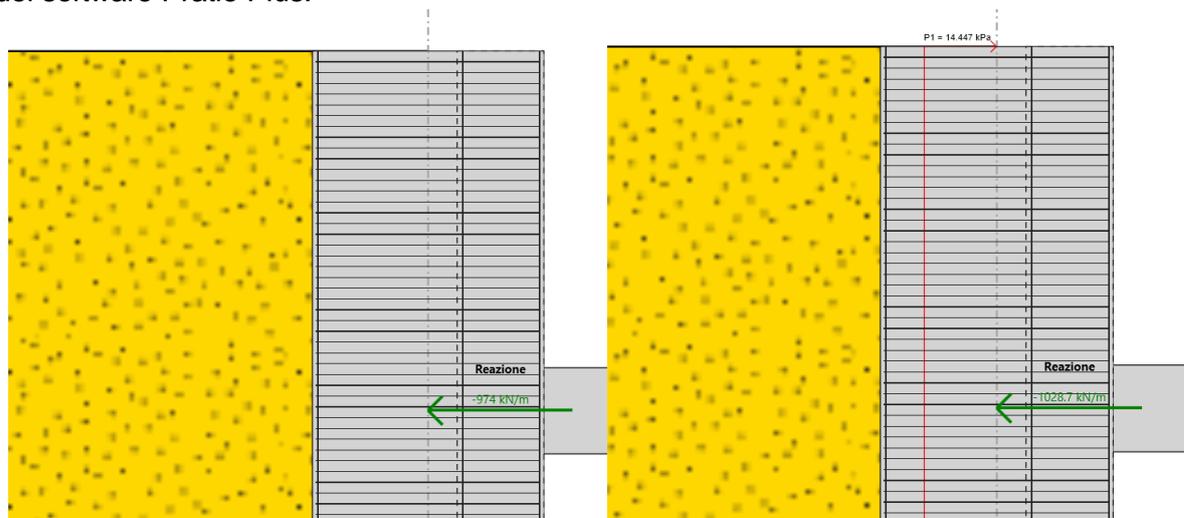


Figura 8-15 – Galleria cut&cover di accesso alla centrale: reazioni sul puntone allo SLU (975 kN/m) e allo SLV (1030 kN/m)

Il momento flettente ed il taglio agenti sul puntone sono stati valutati considerando uno schema di semplice appoggio per cui il momento massimo si ha in mezzeria e può essere calcolato come:

$$M_{SLU} = 1.3 \cdot q \cdot \frac{l^2}{8} = 3050 \text{ kNm/m}$$

$$M_{SLV} = q \cdot \frac{l^2}{8} \cdot (1 + K_V) = 2500 \text{ kNm/m}$$

mentre il taglio massimo si ha in corrispondenza degli appoggi e può essere valutato come:

$$V_{SLU} = 1.3 \cdot q \cdot \frac{l}{2} = 1015 \text{ kNm/m}$$

$$V_{SLV} = q \cdot \frac{l}{2} \cdot (1 + K_V) = 830 \text{ kNm/m}$$

Si dispone la seguente armatura a flessione:

- Armatura tesa: 2 strati di  $\phi$  26 mm passo 10 cm
- Armatura compressa: 1  $\phi$  26 mm passo 10 cm

Come si può osservare dalla Figura 8-16 tutte le coppie di sollecitazione ricadono internamente al dominio di interazione e pertanto la verifica risulta soddisfatta.

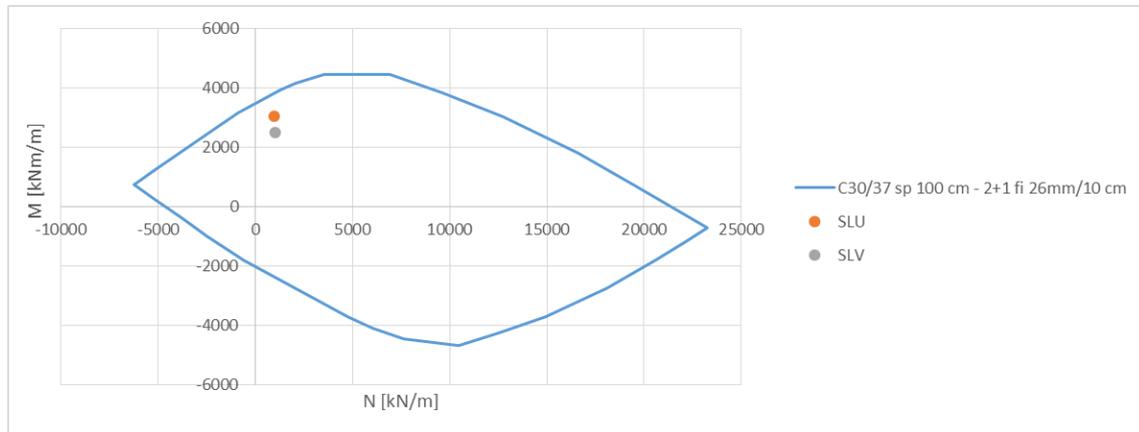


Figura 8-16 – Galleria cut&cover di accesso alla centrale: verifiche di pressoflessione della soletta-puntone

La massima sollecitazione di taglio agente sul rivestimento definitivo 1015 kN/m in campo statico e 830 kN/m durante la fase sismica. Considerando la presenza di un'armatura a taglio costituita da staffe  $\phi 12$  con maglia 20 x 40 cm si ottiene un taglio resistente pari a 1160 kN/m e pertanto la verifica risulta superata.

Tabella 8.6 – Galleria cut&cover di accesso alla centrale: verifiche a taglio della soletta-puntone

Dati generali							
$b_w$	=	1000	mm	$A_{sw}$	=	565.5	mm <sup>2</sup>
$h$	=	1000	mm	$s$	=	400	mm
$d$	=	930	mm	$A_{sw}/s$	=	1.41371669	mm <sup>2</sup>
$f_{ck}$	=	30	N/mm <sup>2</sup>	$z$	=	837	mm
$f_{cd}$	=	17.00	N/mm <sup>2</sup>	$f_{ywk}$	=	450	N/mm <sup>2</sup>
$A_{sl}$	=	10618.6	mm <sup>2</sup>	$f_{ywd}$	=	391.3	N/mm <sup>2</sup>
$A_c$	=	1000000	mm <sup>2</sup>	$\cot\theta$	=	2.5	
		1.46		$\cot\alpha$	=	0	( $\alpha = 90^\circ \rightarrow \cot\alpha = 0$ )
$k$	=	1.46373890		$\alpha$	=	90	°
$v_{min}$	=	0.34		$\alpha_{cw}$	=	1	(per strutture non precomprese $\alpha_{cw} = 1$ )
		0.011		$v_1$	=	0.528	
$\rho_l$	=	0.01					
		3.40					
EC2 - Elementi che non richiedono armature a taglio				EC2 - Elementi che richiedono armature a taglio			
$V_{Rd,c}$ [kN]	$V_{Rd,c,min}$ [kN]	<b>TAGLIO RESISTENTE</b> $V_{Rd,c}$ [kN]	Verifica	$V_{Rd,s}$ [kN]	$V_{Rd,max}$ [kN]	<b>TAGLIO RESISTENTE</b> $V_{Rd}$ [kN]	Verifica
530.5	315.7	530.5	NO VERIF.	1157.6	2590.7	1157.6	OK