



HARPACEAS
COMMUNITY
DAY 2023

Modellazione numerica con Flac3D: Il progetto della circonvallazione Nord – Ovest di Merano (2° lotto)

Ing. M. Moja - *Pro Iter Srl*

Ing. F. Prati - *Pro Iter Srl*



STAZIONE
APPALTANTE:
Prov. Aut. di Bolzano



COSTRUTTORE A.T.I.:
Consorzio San
Benedetto Scarl



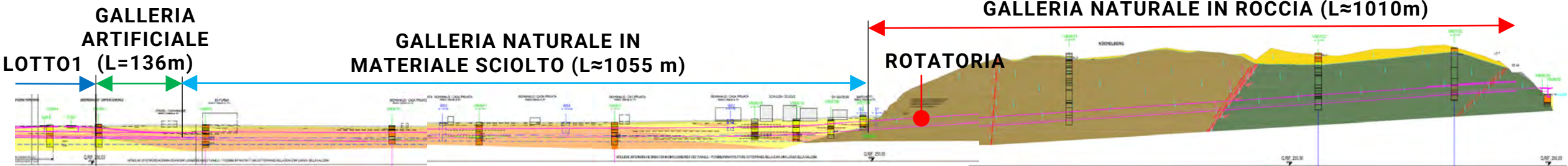
PROGETTISTI DELLE
OPERE IN SOTTERRANEO:
Pro Iter Srl



IL PROGETTO

Il Lotto 2 della circonvallazione è situato nella zona nord-ovest di Merano, in continuità con il Lotto 1, già completato e attualmente in esercizio; il tracciato in galleria attraversa, da ovest verso est, il centro cittadino e successivamente il Monte San Benedetto, per poi collegarsi alla viabilità di superficie della Val Passiria in prossimità dell'imbocco est. L'opera sotterranea, lunga circa 2200 m, è composta da primo tratto in **Galleria Artificiale (L = 136 m)**, collegata al Lotto 1 e alla viabilità di superficie, e un successivo **scavo convenzionale in sotterraneo (L = 2065 m)**, diviso in due porzioni di lunghezza pressoché equivalente.

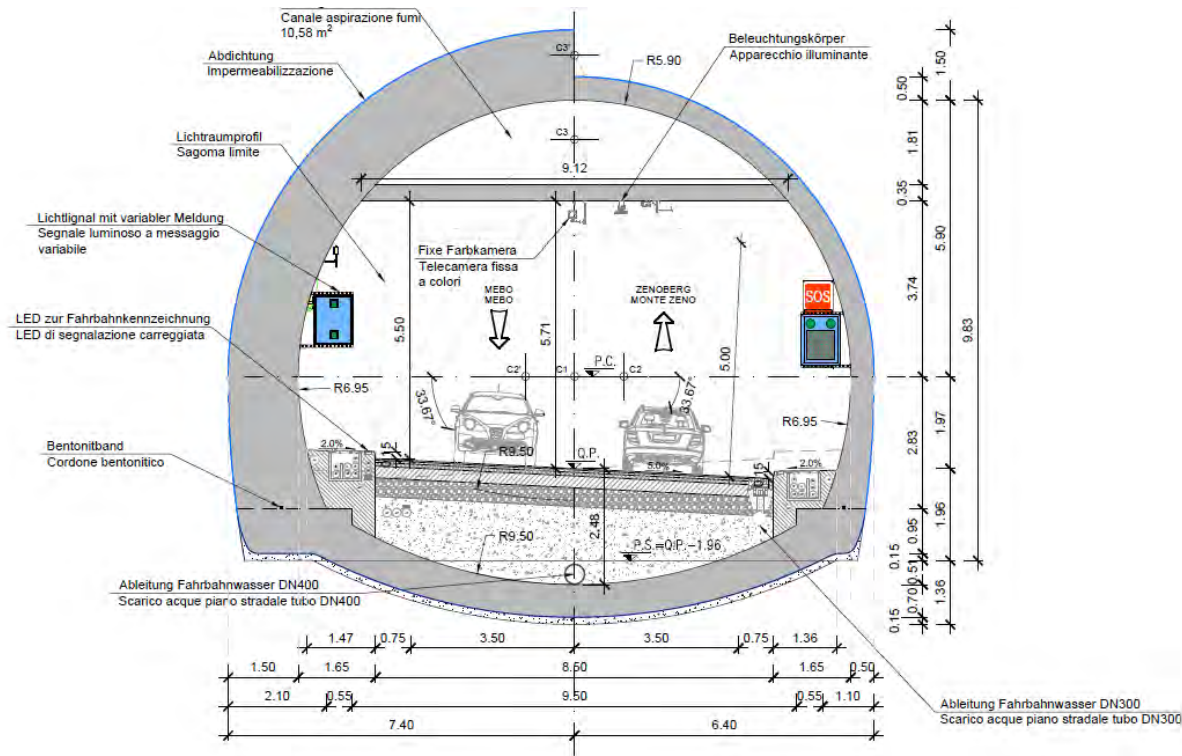
La prima tratta attraversa **terreni sciolti** con coperture ridotte sotto il centro cittadino di Merano mentre la seconda tratta attraversa **formazioni rocciose** metamorfiche con coperture fino a circa 100 m. A circa un chilometro dal portale est, è prevista una **rotatoria sotterranea** con un diametro complessivo di circa 42 m, sostenuta da un pilastro centrale in roccia del diametro di 8 m, che consente l'accesso al parcheggio sotterraneo di Monte San Benedetto, di futura realizzazione.



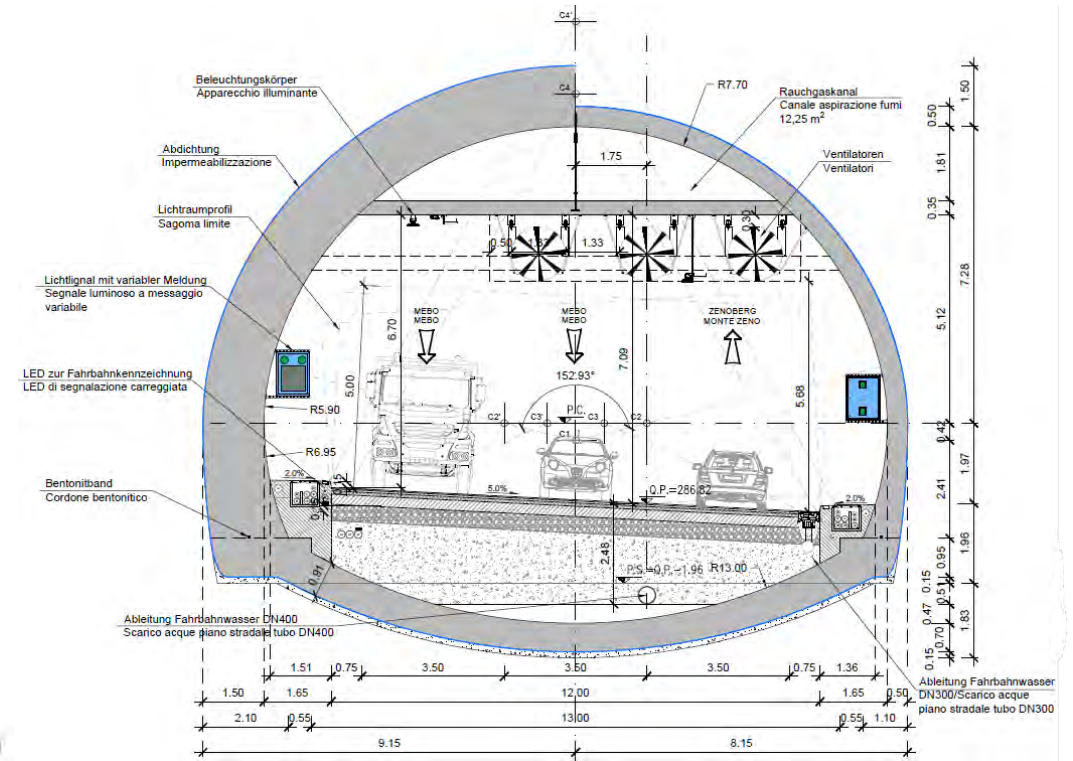
ARCHITETTONICI

La sezione standard della galleria presenta una carreggiata a doppio senso di marcia, caratterizzata da 2 corsie da 3.5 m più 2 banchine da 0.75 m per una larghezza complessiva della piattaforma di **8.5 m (Sezione 2Sp)**.

Lungo il tracciato sono previste **4 piazzole di sosta (Sezione Pb)**, 2 nel tratto in roccia e 2 nel tratto in materiale sciolto, che presentano una larghezza complessiva della piattaforma di **12 m**.



Sezione 2Sp

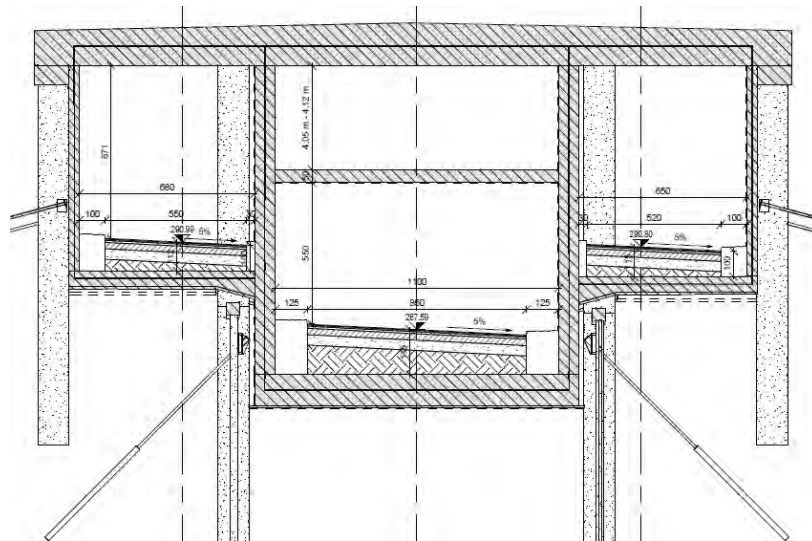


Sezione Pb

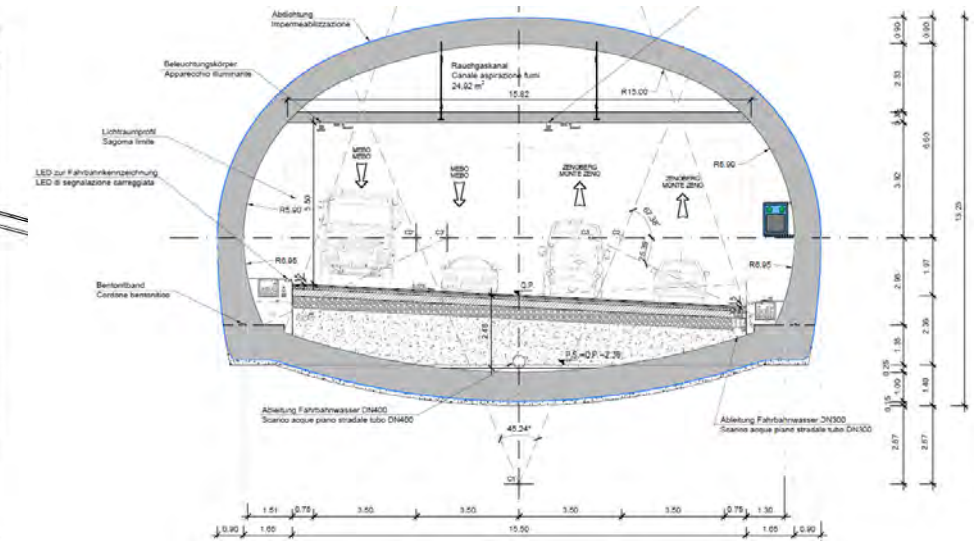


ARCHITETTONICI

La **Galleria Artificiale** ospita due rampe, una di ingresso e una di uscita, le cui corsie di accelerazione e decelerazione interessano anche il primo tratto di Galleria Naturale, per uno sviluppo di circa 160 m, comportando un significativo aumento della larghezza della piattaforma stradale (**Sezione 4Sp**, larghezza della piattaforma = **15.5 m**) e di conseguenza dell'area di scavo della sezione, che passa da circa 150 m² a circa 240 m².



Galleria artificiale

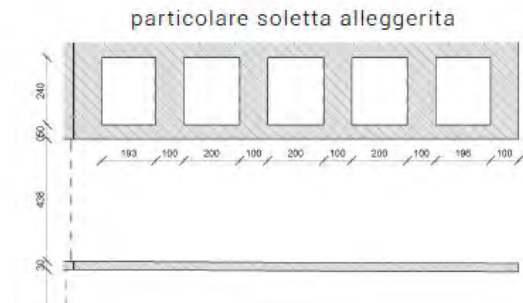
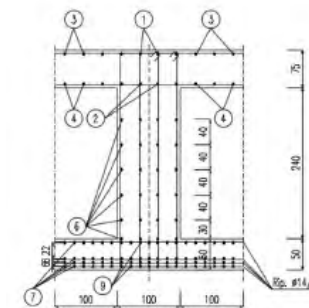
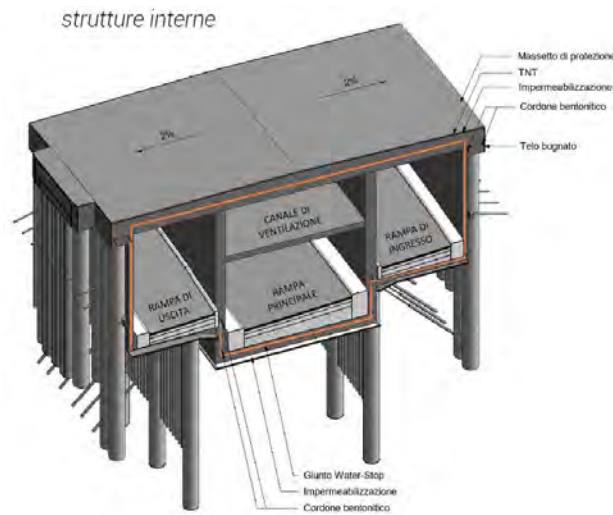
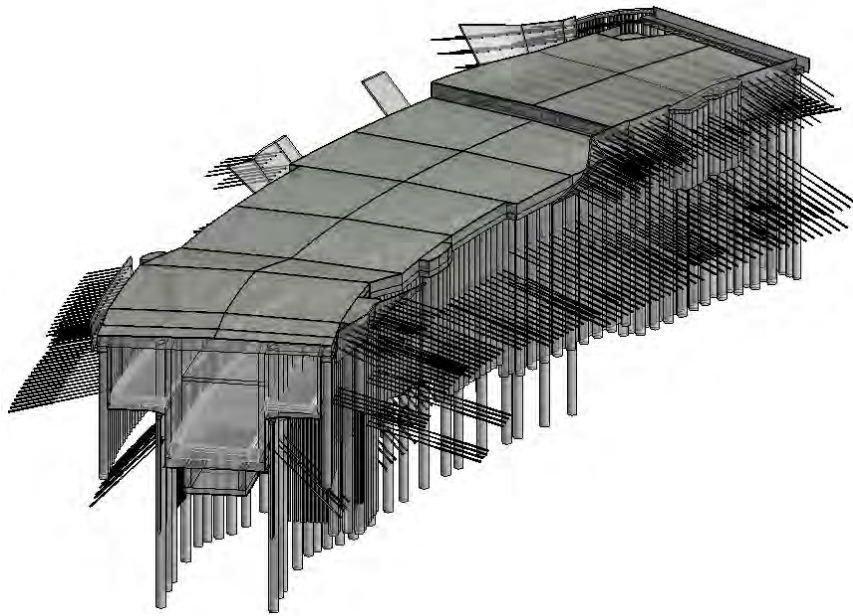


Sezione 4Sp



LA GALLERIA ARTIFICIALE

- METODO COSTRUTTIVO TOP-DOWN
- TERRENO DEPOSITI ALLUVIONALI
- PARATIA DI PALI DI GRANDE DIAMETRO $\phi 1200 / 1.5m$
- PALI DI SOSTEGNO PROVVISORI $\phi 1200 / 6m$
- SOLETTE DI COPERTURA $L_{max}=30m$ $H=1.5m - 3.65m$
- TIRANTI DA 4-5 TREFOLI DA 6" A INTERASSE 1.5 m
- SOLETTE DI BASE E STRUTTURE INTERNE IN C.A.



LA GALLERIA ARTIFICIALE



LA GALLERIA ARTIFICIALE



LA GALLERIA ARTIFICIALE

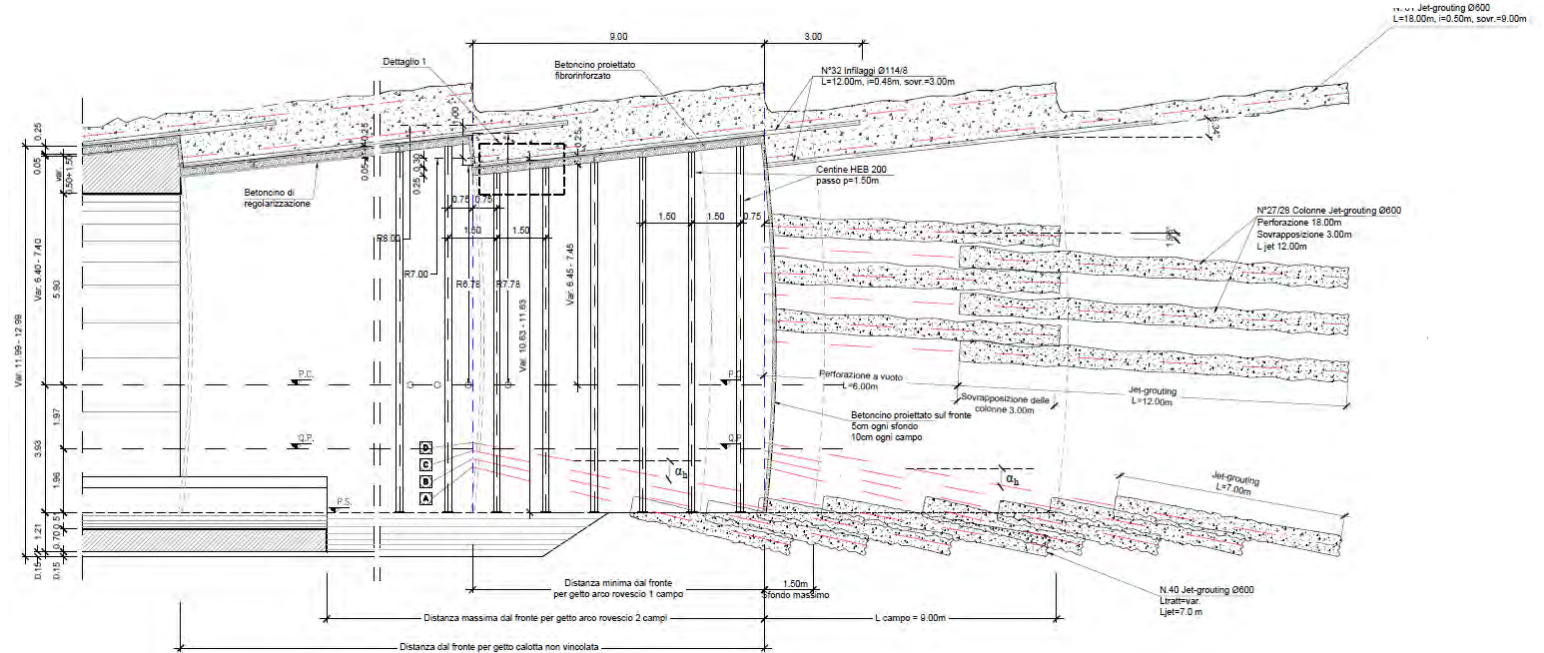
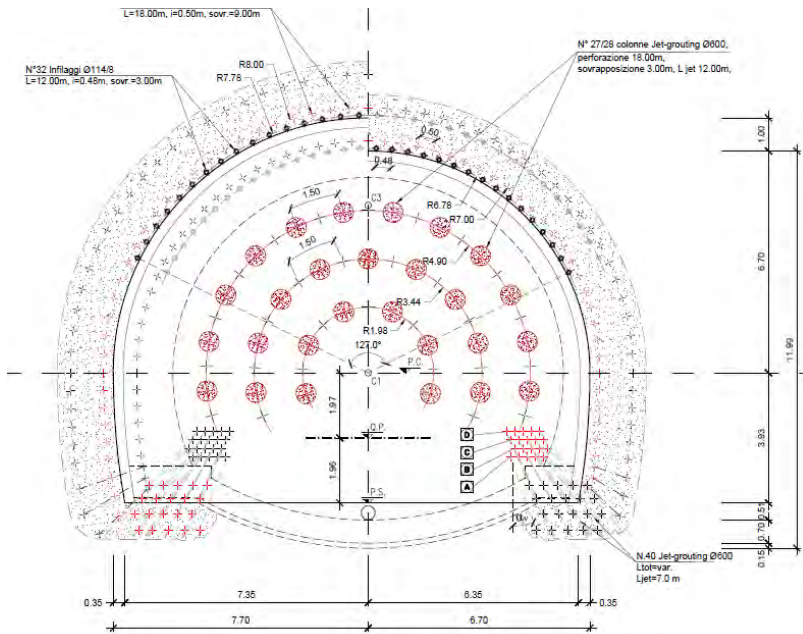


LA GALLERIA NATURALE NEL TRATTO IN MATERIALE SCIOLTO

Per lo scavo della galleria naturale in materiale sciolto, all'interno dei DEPOSITI ALLUVIONALI con BASSE COPERTURE, sono previste sezioni di scavo troncoconiche che prevedono i seguenti interventi:

- INTERVENTI SUL CONTORNO: n. 61 trattamenti jet-grouting $\phi 600$ mm, L = 18 m, i = 0.5 m
n. 32 infillaggi $\phi 114/8$, L = 12 m, i = 0.48 m, su 120°
- INTERVENTI SUL FRONTE: n. 27/28 trattamenti jet-grouting $\phi 600$ mm, L = 18 m
- RIVESTIMENTO DI PRIMA FASE: 5+20 cm di betoncino proiettato fibrorinforzato C25/30
centine HEB200 / 1.5 m
- RIVESTIMENTO DEFINITIVO: 50-150 cm di c.a. C35/45 in calotta
70 cm di c.a. C32/45 in arco rovescio

Sezione	Campi di avanzamento	Campo di applicazione
2Sp_6	6 m	Edifici a meno di 6 m
2Sp_9	9 m	Edifici tra 6 e 15 m
2Sp_12	12 m	Edifici a più di 15 m



Sezione 2Sp_9

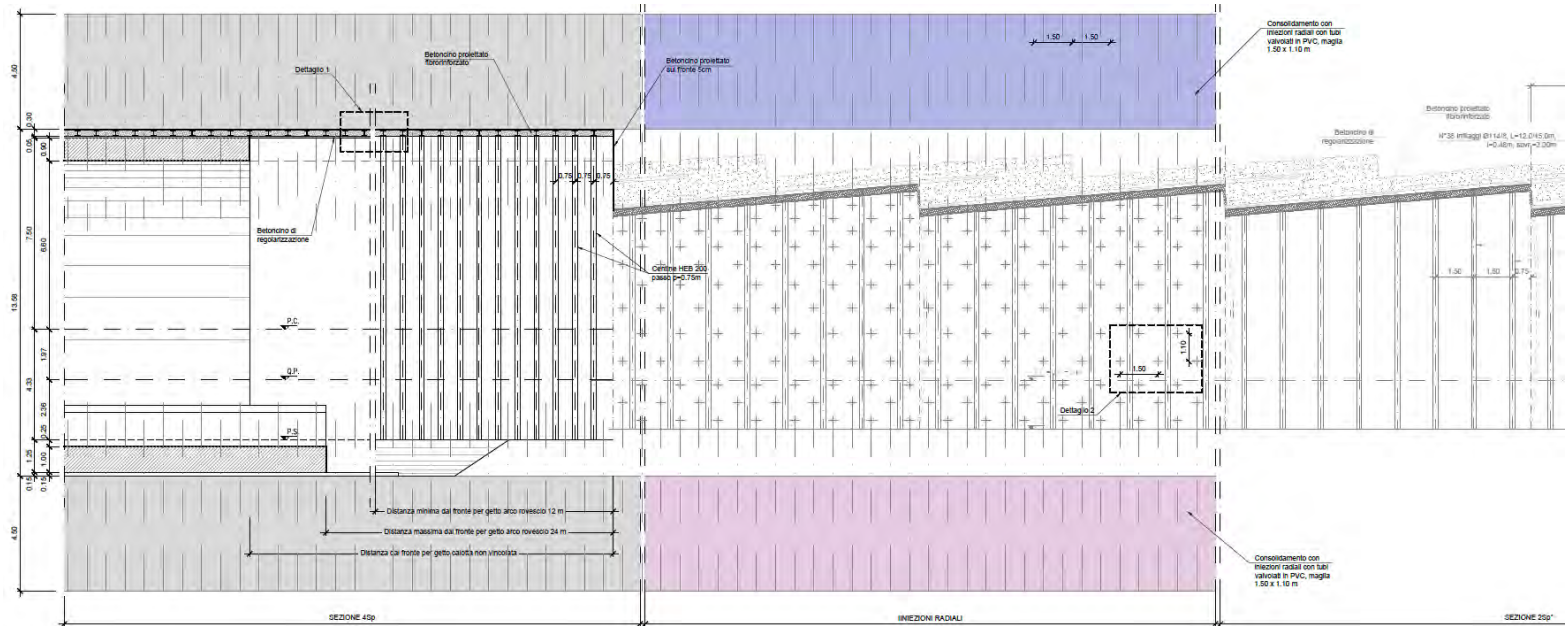
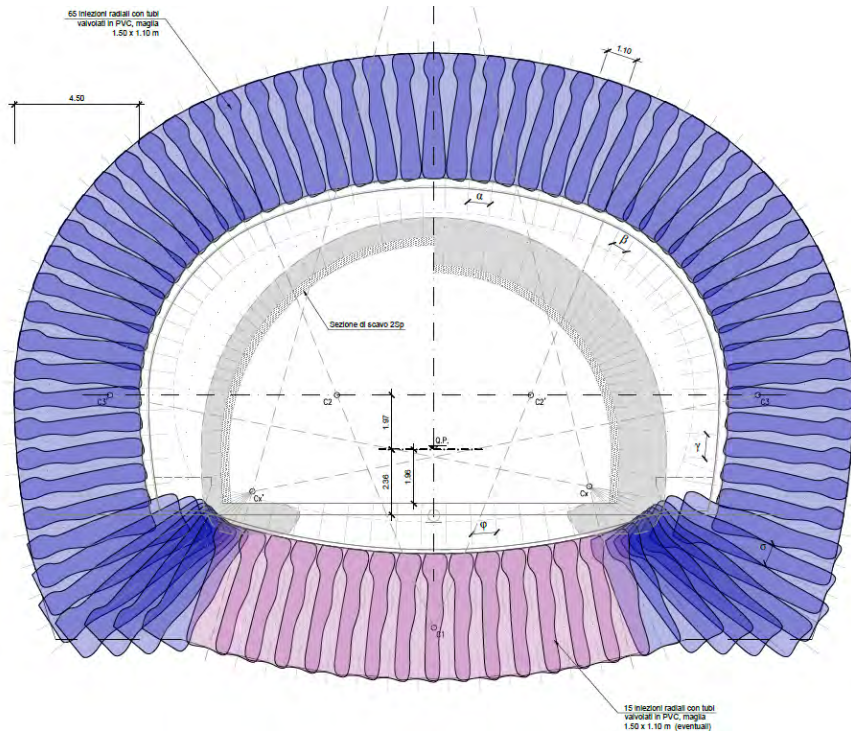
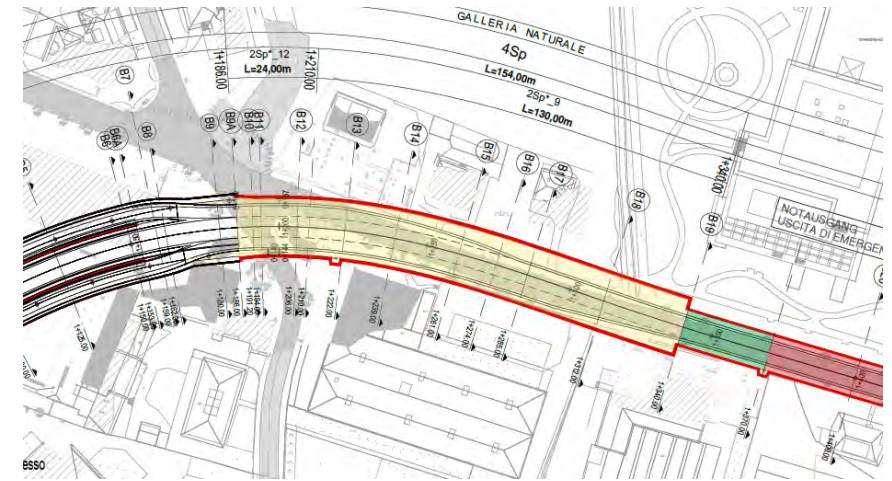
LA GALLERIA NATURALE NEL TRATTO IN MATERIALE SCIOLTO

Per lo scavo della **Sezione 4Sp**, è previsto:

- Lo scavo di un foro pilota con interventi e geometrie analoghe alla sezione 2Sp;
- L'esecuzione di **iniezioni radiali di miscela cemento-bentonite** sul contorno della sezione 4Sp, dello spessore di 4.5 m, tramite tubi in PVC valvolati (3valv/m)
- Lo scavo di allargo a piena sezione, con la messa in opera di:

RIVESTIMENTO DI PRIMA FASE: 5+25 cm di betoncino proiettato fibrorinforzato C25/30
centine HEB200 / 0,75 m

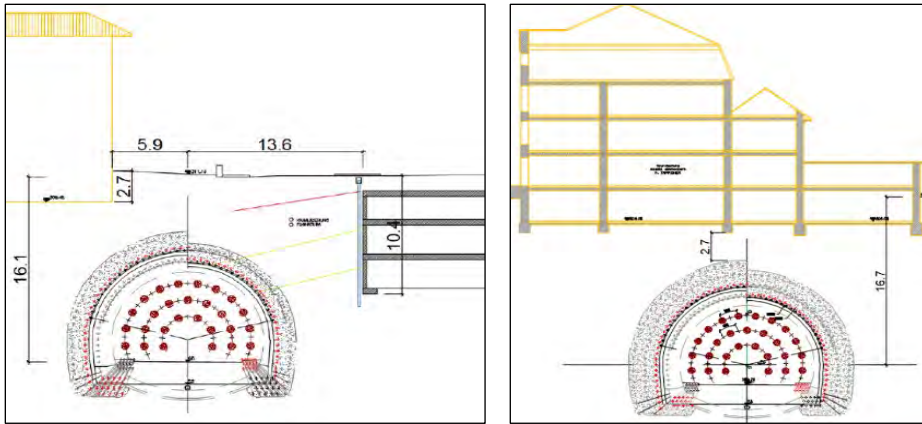
RIVESTIMENTO DEFINITIVO: 90 cm di c.a. C35/45 in calotta
100 cm di c.a. C32/45 in arco rovescio



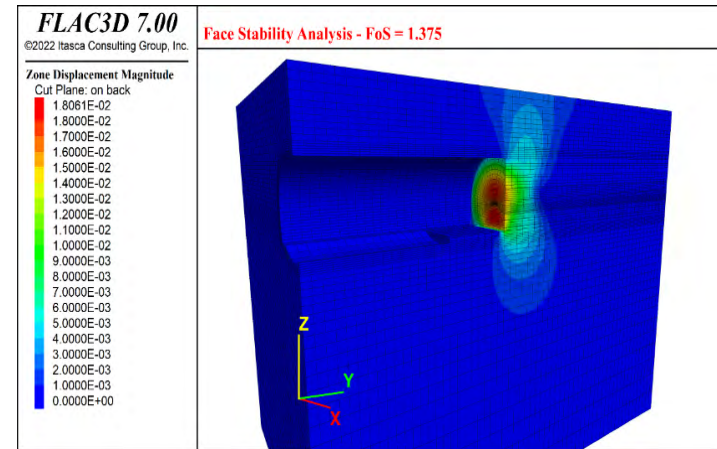
Sezione 4Sp



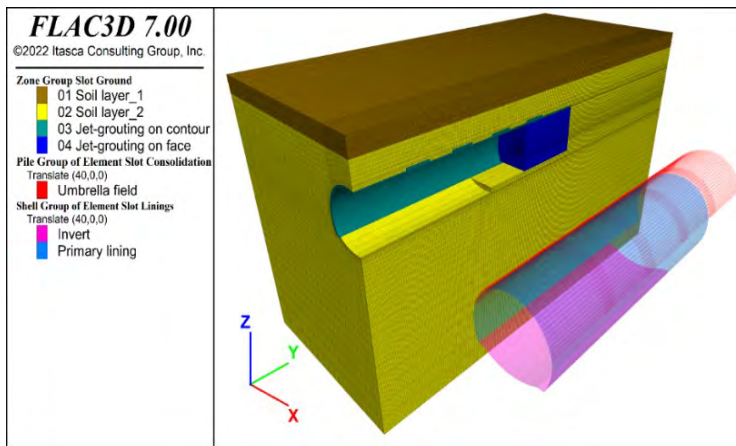
LA GALLERIA NATURALE NEL TRATTO IN MATERIALE SCIOLTO – I MODELLI DI CALCOLO



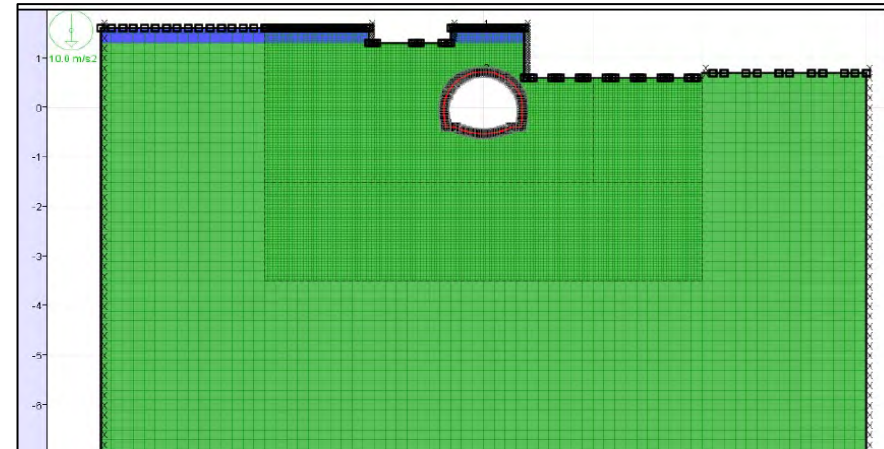
Condizioni al contorno: Sezione 2Sp_9 vicino agli edifici (a sinistra) e Sezione 2Sp_6 sotto gli edifici (a destra)



Face Stability Analysis – Sezione 2Sp_12 – FoS = 1.375 – Spostamenti

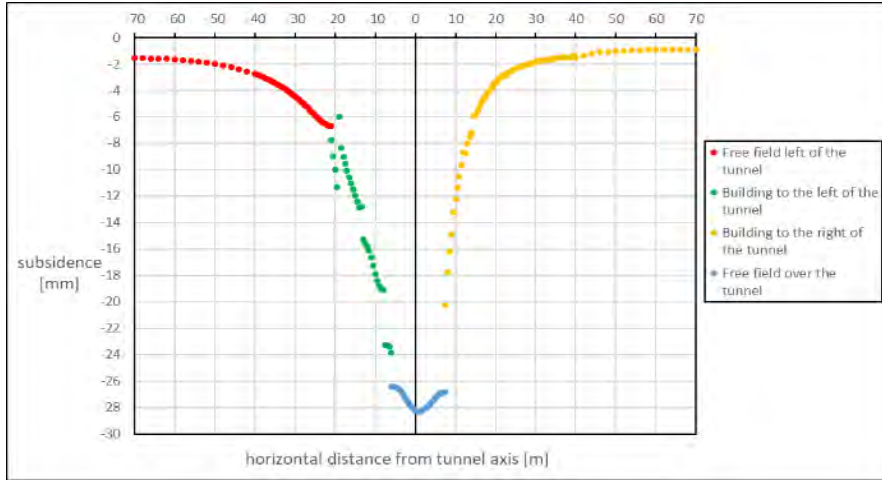


Analisi Step by Step FDM 3D per la definizione della curva di scarico – Section 2Sp_12 – Zone omogenee (a sinistra) e elementi strutturali (a destra)

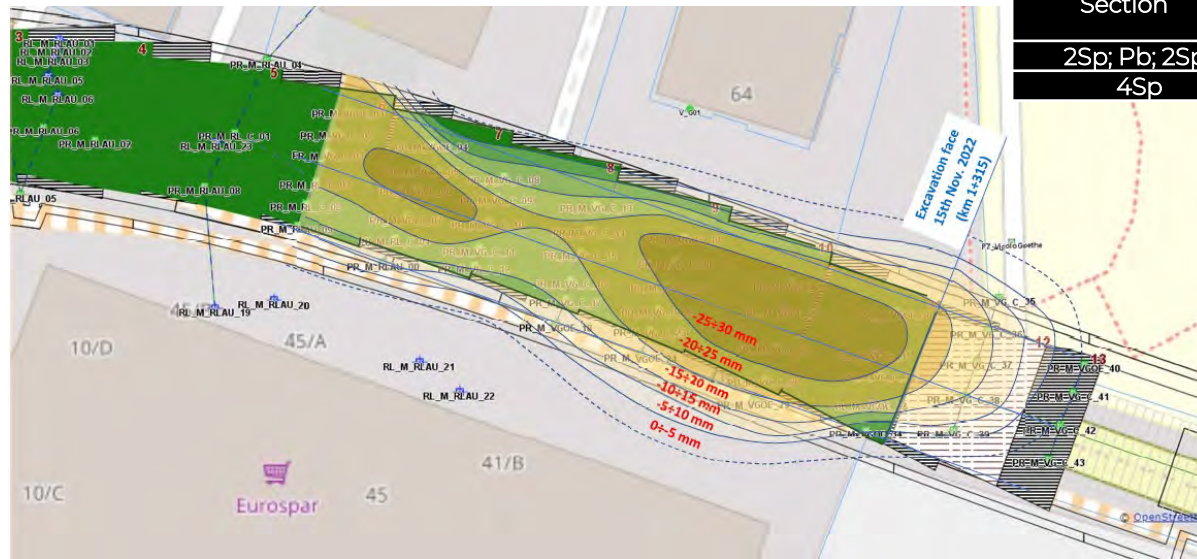


Analisi FDM 2D per la definizione dei cedimenti e delle sollecitazioni nei rivestimenti

LA GALLERIA NATURALE NEL TRATTO IN MATERIALE SCIOLTO – I MODELLI DI CALCOLO



Esempio di curve di subsidenza ricavata dai modelli numerici

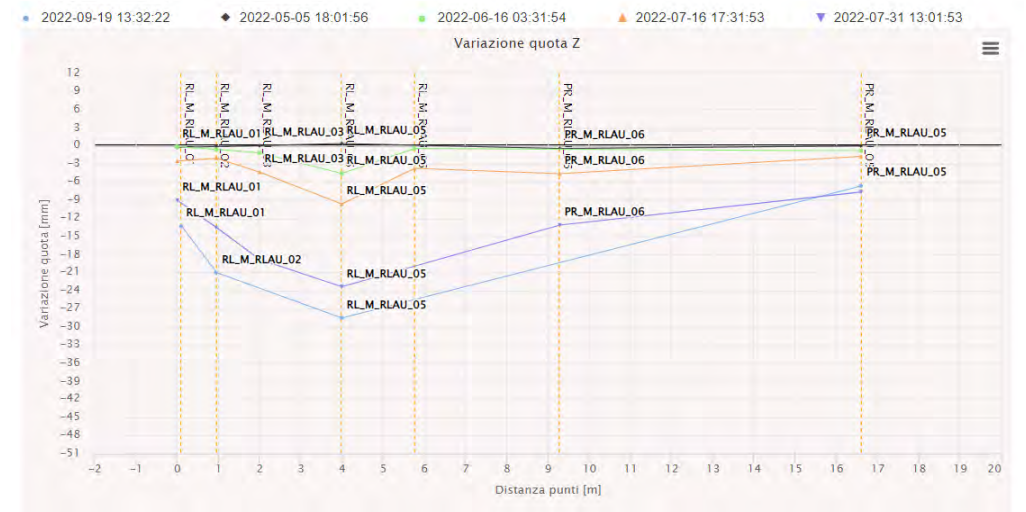


Monitoraggio in continuo durante l'avanzamento (GDTest)

Maximum subsidence values (Smax)				
Reference Section	Smax analytical method [mm]	Smax numerical analysis [mm]	Smax threshold value of Attention [mm]	Smax threshold value of Alarm [mm]
2Sp_6 (VL=0.5%)	23	24	50	80
2Sp_9 (VL=0.7%)	33	26		
2Sp_12 (VL=0.9%)	42	40		
Pb_6 (VL=0.5%)	33	33	50	80
Pb_9 (VL=0.7%)	47	38		
2Sp*_9 (VL=0.7%)	33	26	50	80
2Sp*_12 (VL=0.9%)	42	40		
4Sp	-	97	100	130

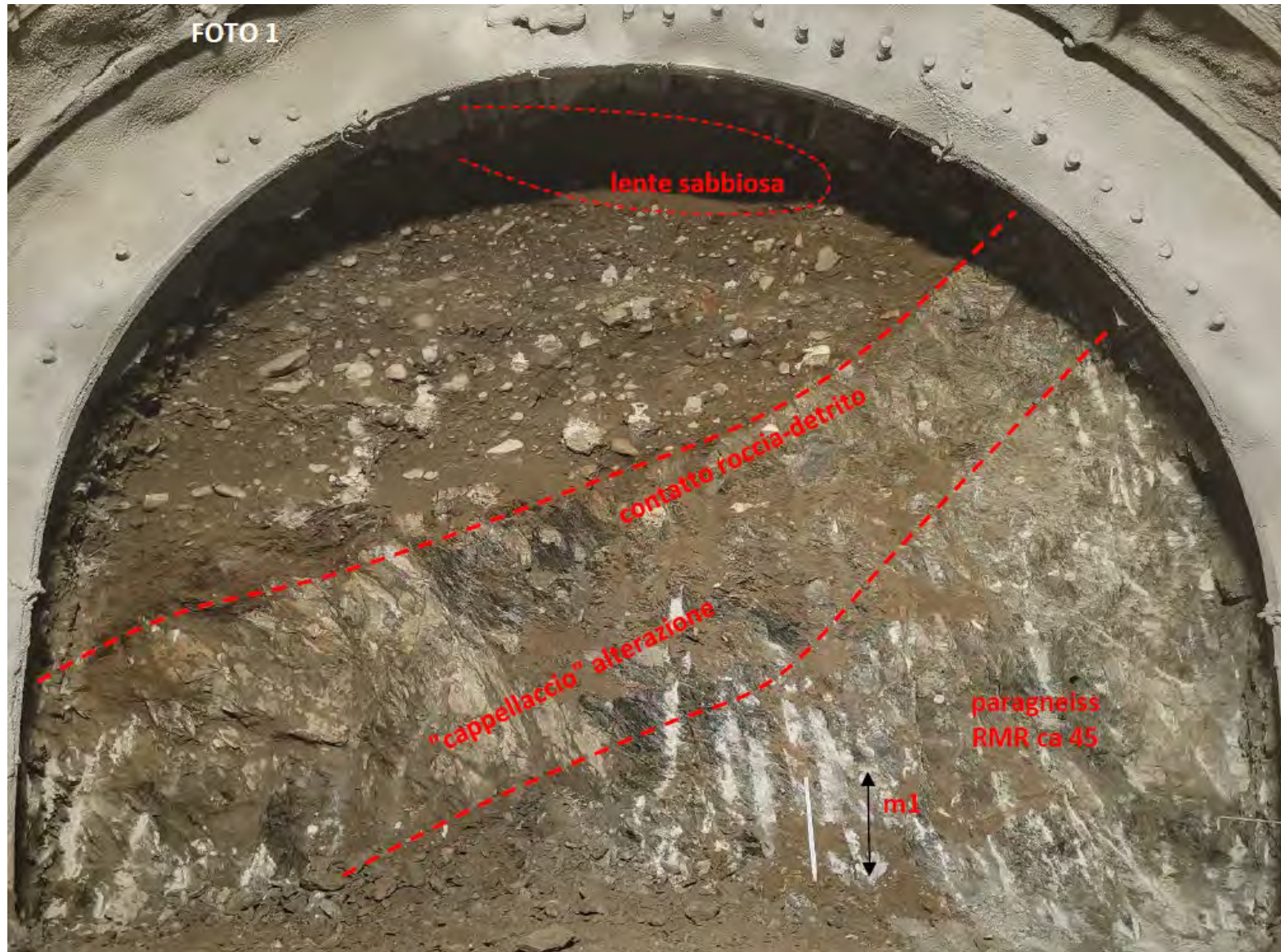
Attention and alarm thresholds values - Maximum subsidence (Smax) and distortion (Dmax) Monitoring section on surface NOT yet undercut by the tunnel excavation

Reference Section	Smax free field [mm]		Smax under buildings [mm]		Dmax under buildings [-]	
	Attention	Alarm	Attention	Alarm	Attention	Alarm
2Sp; Pb; 2Sp*	15	25	10	15	1/1000	1/600
4Sp	65	95				



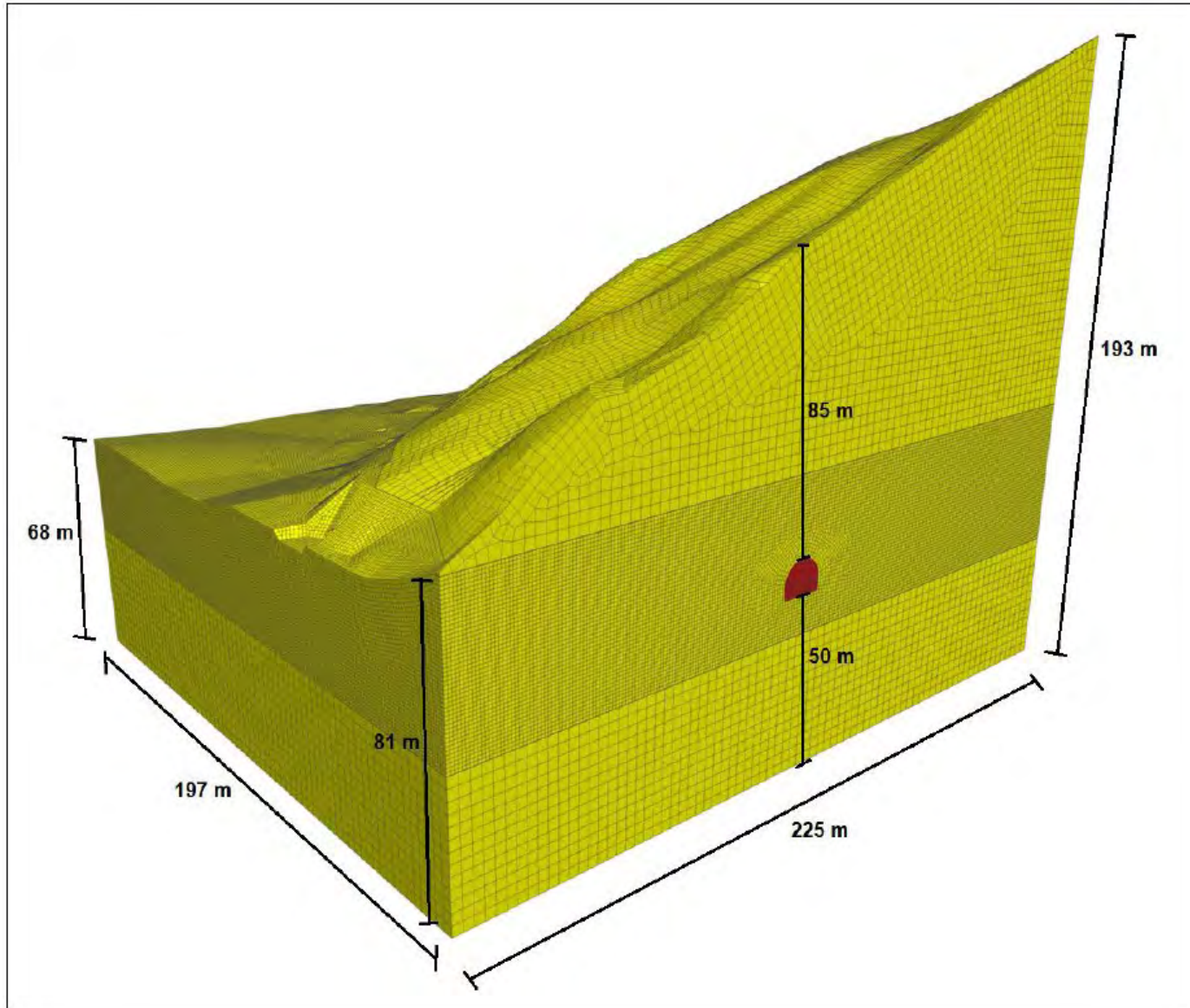


Scavo sotto gli edifici



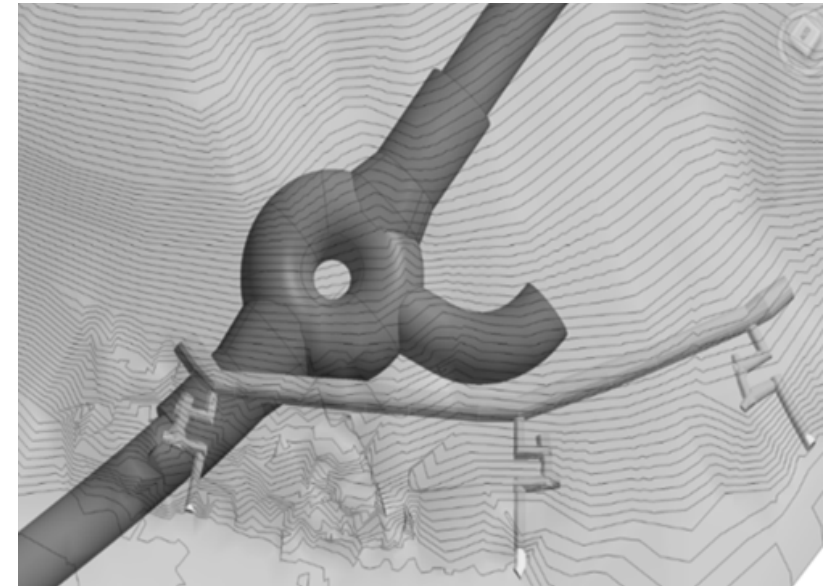
Zona di transizione tra la tratta in roccia e in materiale sciolto

LA GALLERIA NATURALE NEL TRATTO IN ROCCIA – MODELLO NUMERICO FLAC 3D DELLA ROTATORIA

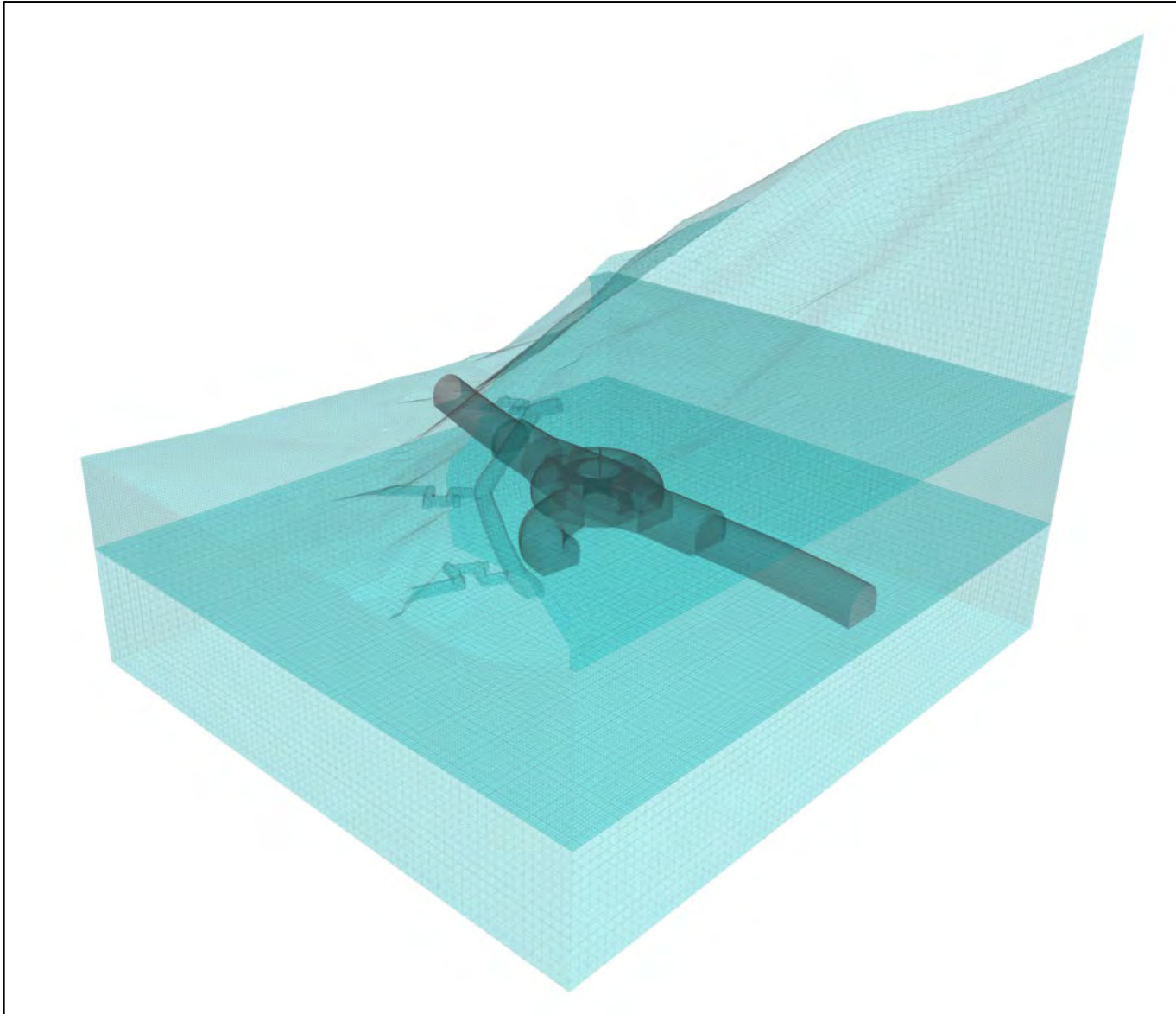


GEOMETRIA E MESH DEL MODELLO NUMERICO

- Il piano campagna è stato modellato considerando l'effettiva morfologia del versante, la quale è stata definita mediante l'esecuzione in sito di rilievi laser scanner.
- La mesh è stata infittita in prossimità delle aree di scavo. Gli elementi esaedrici che la compongono presentano una dimensione caratteristica pari a 0.5 m nelle zone da scavare, di 1 m nella fascia di ammasso roccioso contenente le aree di scavo e 3 m nelle due fasce di materiale inferiore e superiore del modello.
- È stato possibile modellare anche un cunicolo antiaereo esistente situato al di sopra della galleria naturale.

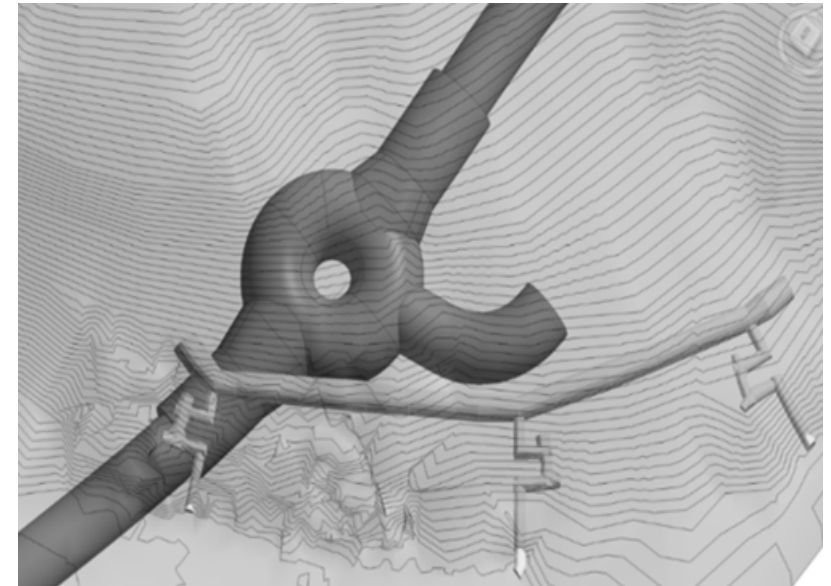


LA GALLERIA NATURALE NEL TRATTO IN ROCCIA – MODELLO NUMERICO FLAC 3D DELLA ROTATORIA



GEOMETRIA E MESH DEL MODELLO NUMERICO

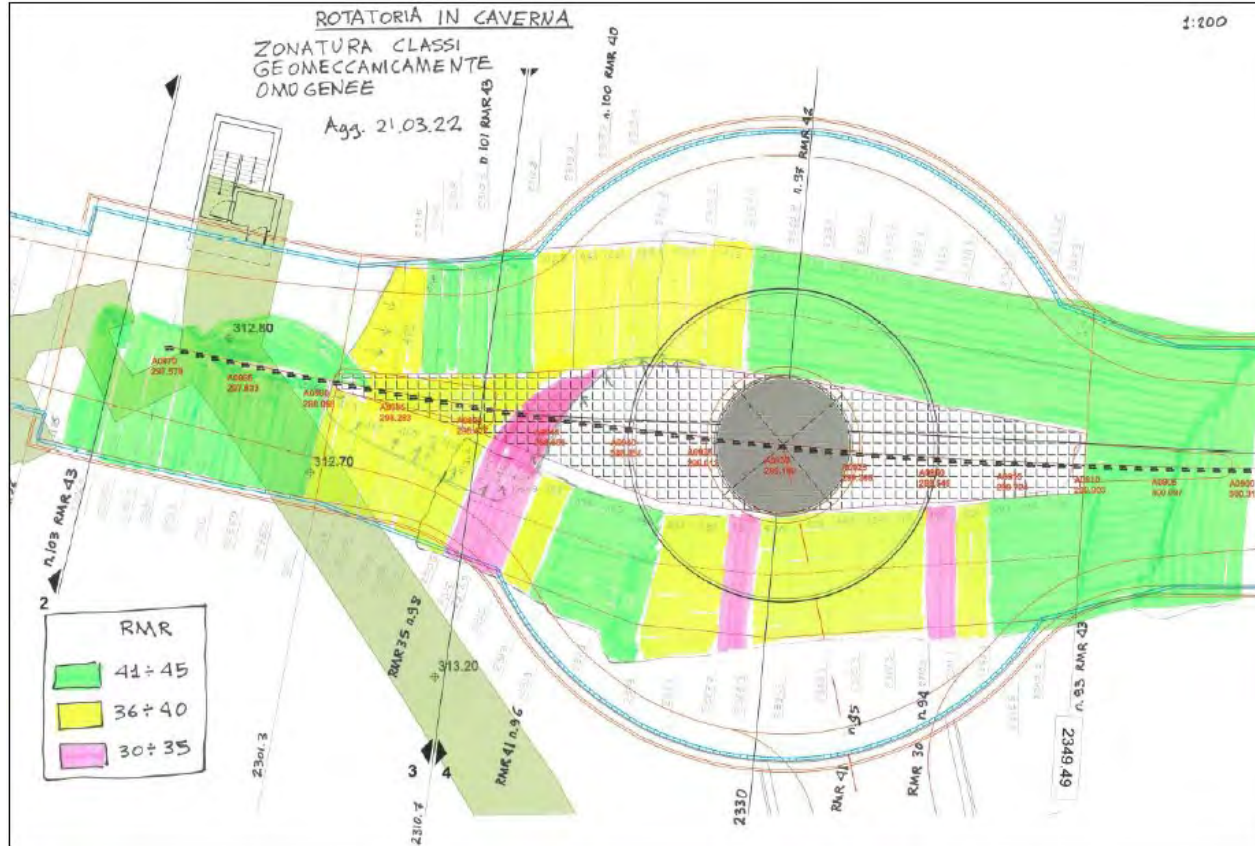
- Il piano campagna è stato modellato considerando l'effettiva morfologia del versante, la quale è stata definita mediante l'esecuzione in sito di rilievi laser scanner.
- La mesh è stata infittita in prossimità delle aree di scavo. Gli elementi esaedrici che la compongono presentano una dimensione caratteristica pari a 0.5 m nelle zone da scavare, di 1 m nella fascia di ammasso roccioso contenente le aree di scavo e 3 m nelle due fasce di materiale inferiore e superiore del modello.
- È stato possibile modellare anche un cunicolo antiaereo esistente situato al di sopra della galleria naturale.



LA GALLERIA NATURALE NEL TRATTO IN ROCCIA – MODELLO NUMERICO FLAC 3D DELLA ROTATORIA

CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA

A seguito dell'esecuzione dello scavo dei cunicoli laterali della rotatoria è stato possibile definire, sulla base dei rilievi geomeccanici e dei test di laboratorio effettuati è stato possibile definire il seguente set di parametri. In particolare, per l'identificazione di tali parametri si è fatto, cautelativamente, riferimento al rilievo del fronte di scavo nelle condizioni peggiori situato alla progressiva km 2+339.



PARAMETRI DI HOEK AND BROWN

Analisi	GSI	σ_{ci}	m_i	E_i	D	γ	ν
[-]	[-]	[MPa]	[-]	[MPa]	[-]	[KN/m ³]	[m]
GA6_IV_Rilievo n.94 – km 2+339	35	25	20	4300	0	27	0.2

PARAMETRI DI MOHR-COULOMB (H=50m)

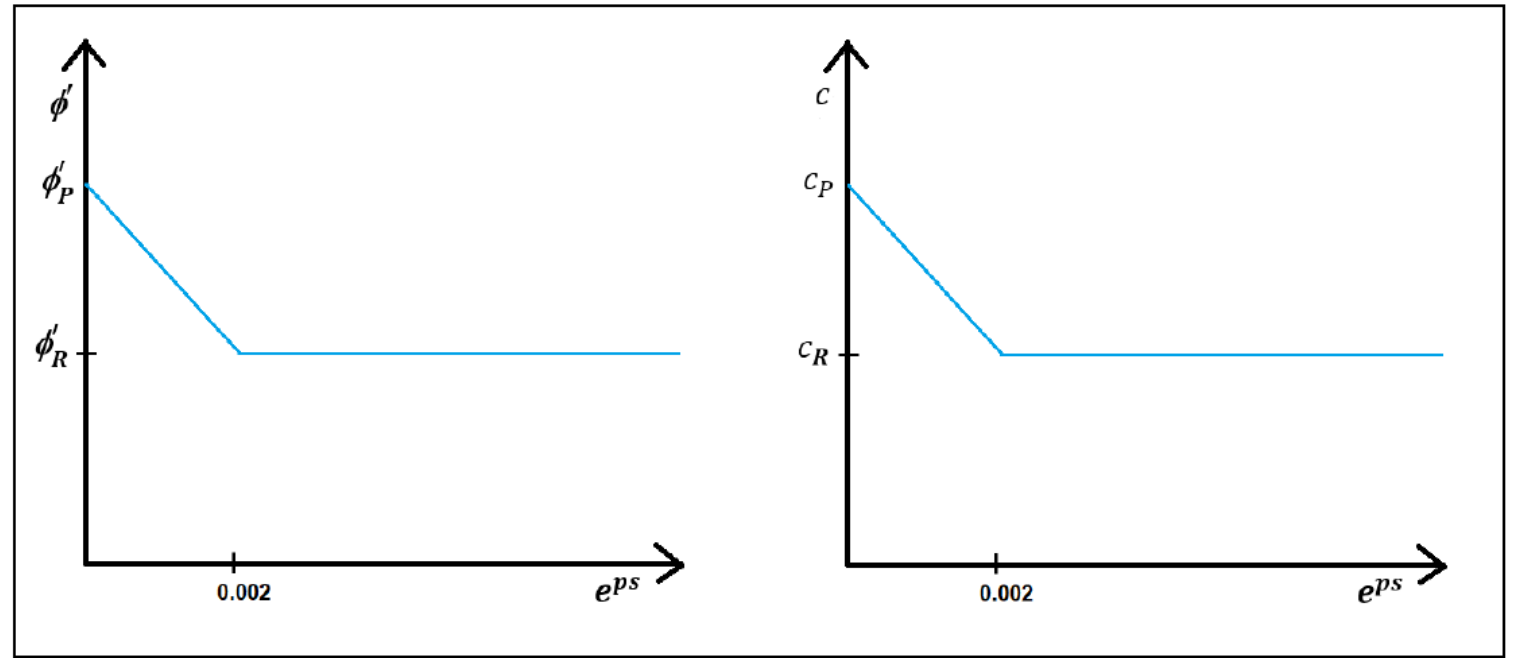
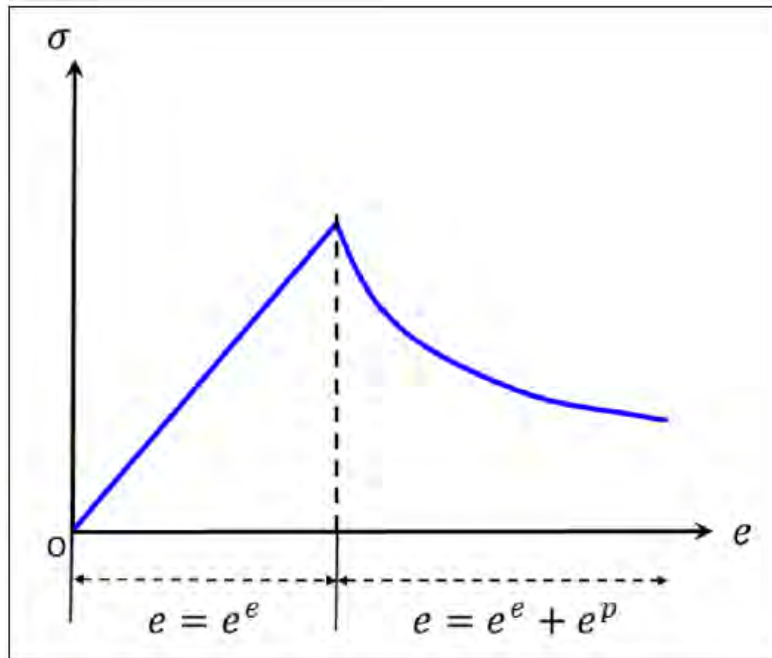
Analisi	γ	ϕ_{picco}	ϕ_{res}	C_{picco}	C_{res}	E_{tm} (GSI piccolo)	ψ
[-]	[kN/m ³]	[°]	[°]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[°]
GA6_Parametri di calcolo	27.0	50	45.3	0.268	0.197	488	6.24



LA GALLERIA NATURALE NEL TRATTO IN ROCCIA – MODELLO NUMERICO FLAC 3D DELLA ROTATORIA

LEGAME COSTITUTIVO STRAIN SOFTENING

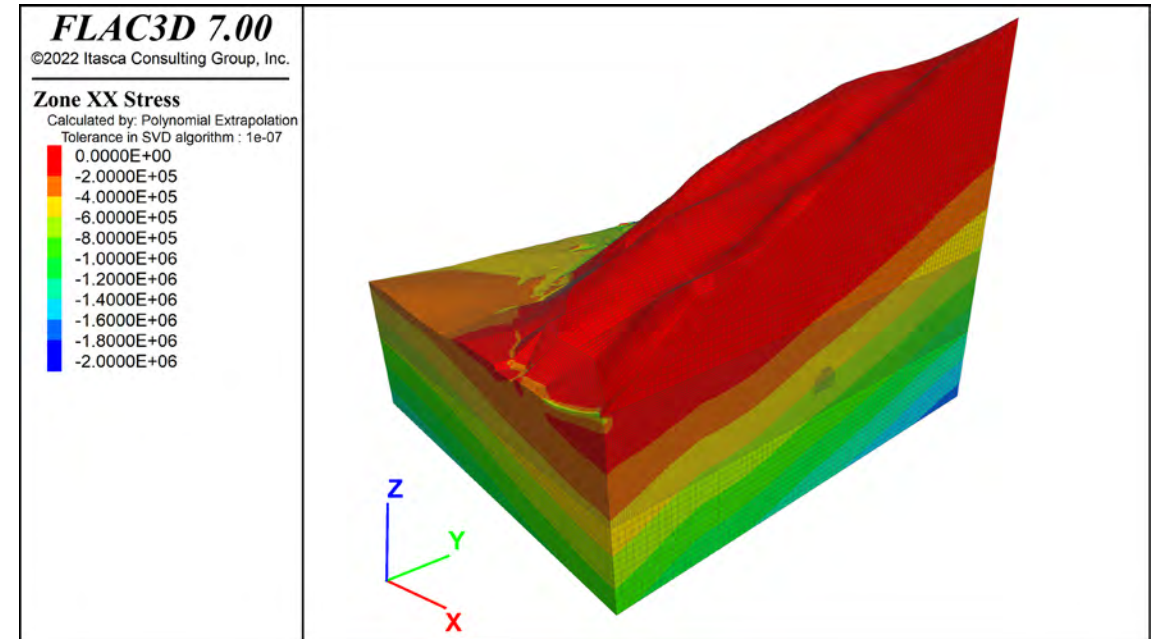
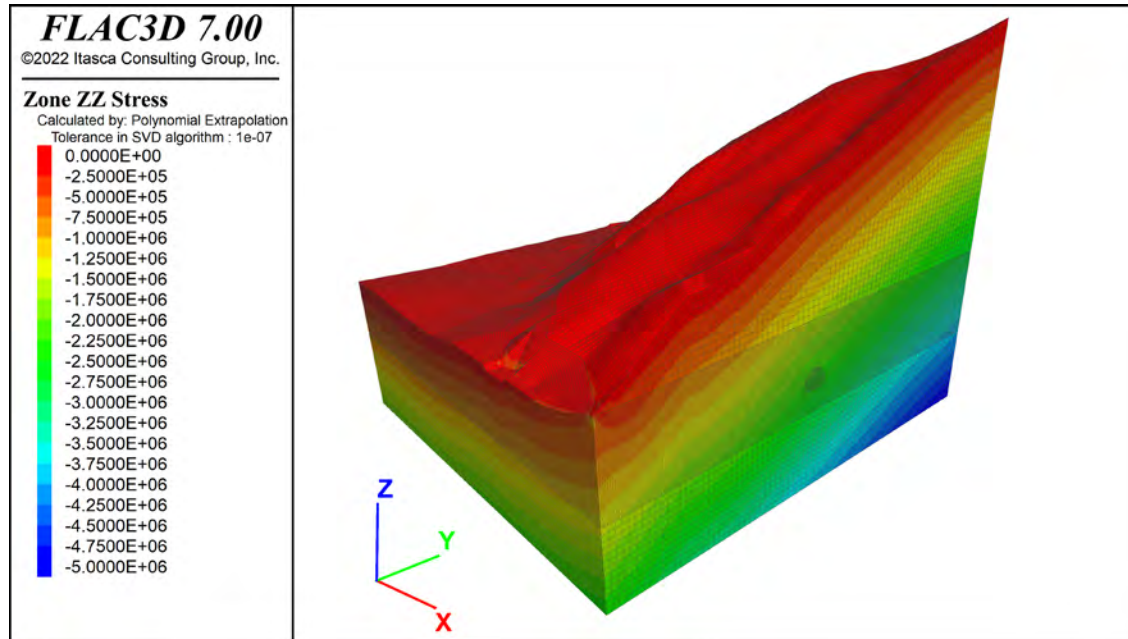
Per la modellazione dell'ammasso roccioso è stato utilizzato un legame costitutivo Strain-Softening con legge di flusso non associata (dilatanza $\psi < \text{angolo di resistenza al taglio } \phi$), basato sul criterio di plasticità Mohr-Coulomb che prevede, una volta raggiunta la superficie di plasticizzazione, definita inizialmente mediante i parametri di resistenza a taglio e coesione di picco ϕ_P' , c_P , che tali parametri decrescano in funzione dell'aumentare della deformazione plastica fino al raggiungimento dei corrispettivi valori residui.



LA GALLERIA NATURALE NEL TRATTO IN ROCCIA – MODELLO NUMERICO FLAC 3D DELLA ROTATORIA

FASI ESECUTIVE DELLA ROTATORIA E FASI DI CALCOLO DELL'ANALISI NUMERICA

Fase 0: Stato di sforzo iniziale; condizioni geostatiche con coefficiente di spinta a riposo $K_0 = 0.4$ e peso specifico dell'ammasso roccioso $\gamma = 27$ kN/mc.



LA GALLERIA NATURALE NEL TRATTO IN ROCCIA – MODELLO NUMERICO FLAC 3D DELLA ROTATORIA

FASI ESECUTIVE DELLA ROTATORIA E FASI DI CALCOLO DELL'ANALISI NUMERICA

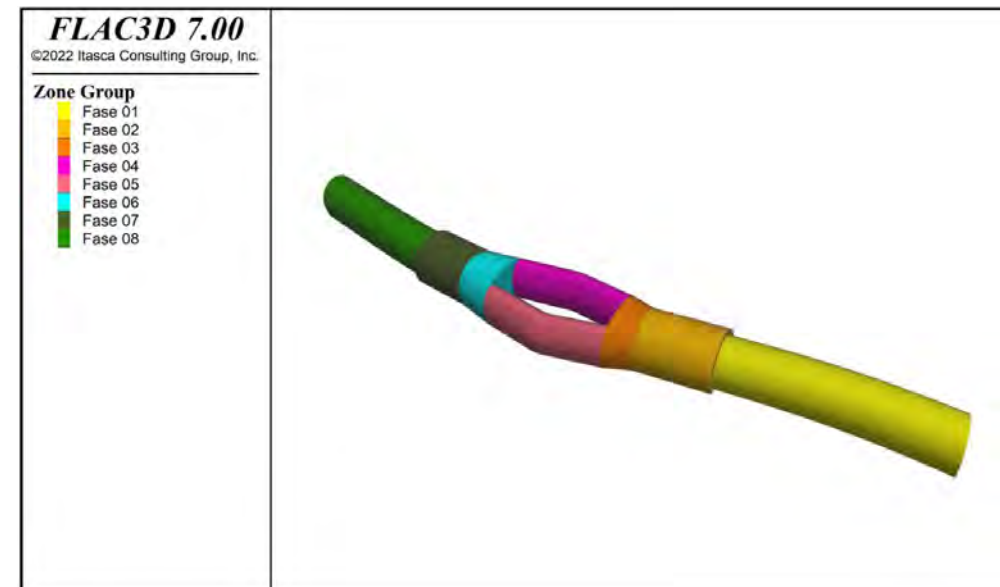
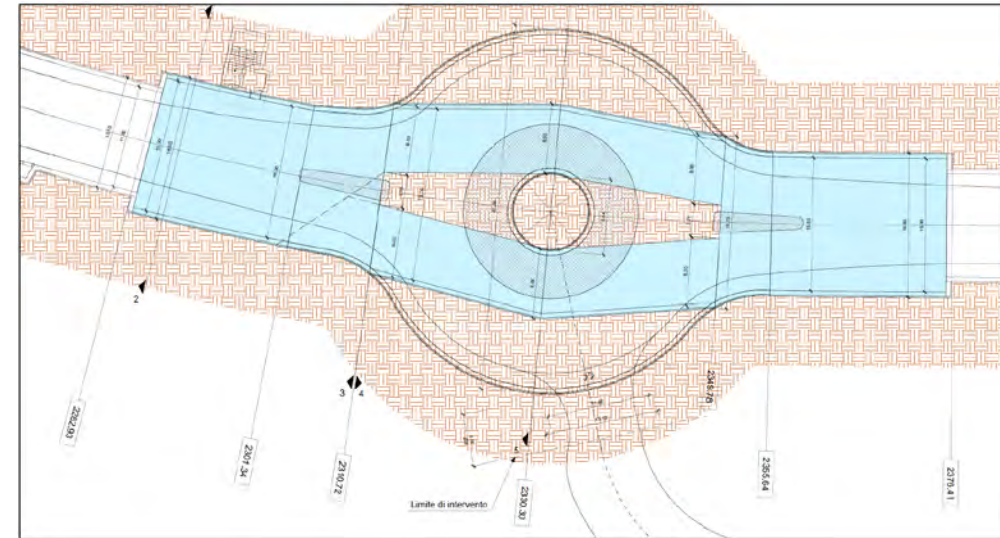
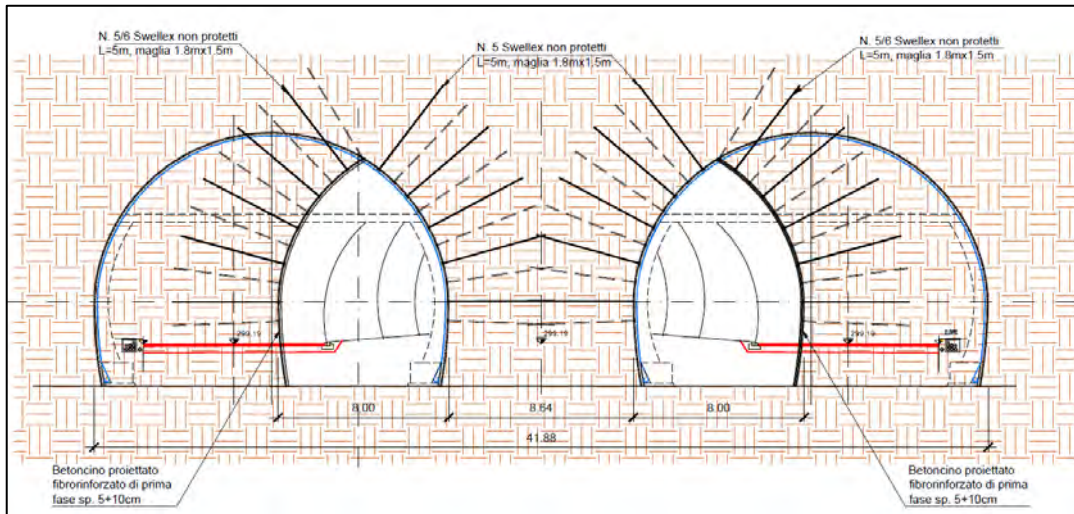
Fase 1: Scavo della galleria principale, da est verso ovest, applicando la sezione tipo 2Sp con larghezza interna di 11.8 m.

Fase 2: Passaggio alla sezione tipo 3Sp con larghezza interna di 15.3 m.

Fase 3: Proseguimento dello scavo con una sezione a larghezza variabile (“sezione di transizione”) al fine di raggiungere una larghezza della sezione di 19.75 m, sufficiente per l’attacco dei due cunicoli laterali.

Fasi 4 e 5: Scavo dei due cunicoli laterali di larghezza massima pari a 8 m lasciando un setto di roccia tra i due cunicoli di spessore variabile da circa 3.50 m fino a 8.50 m.

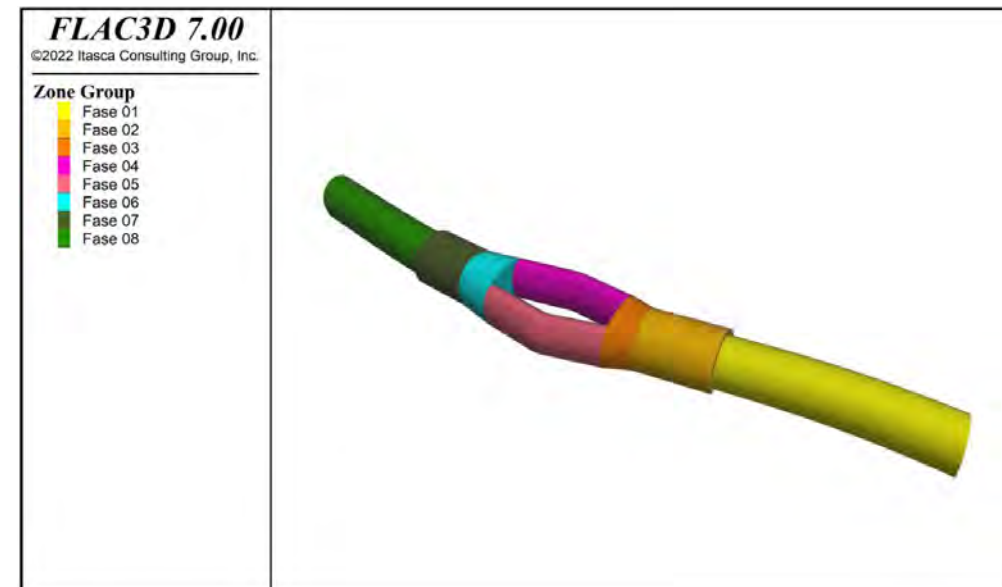
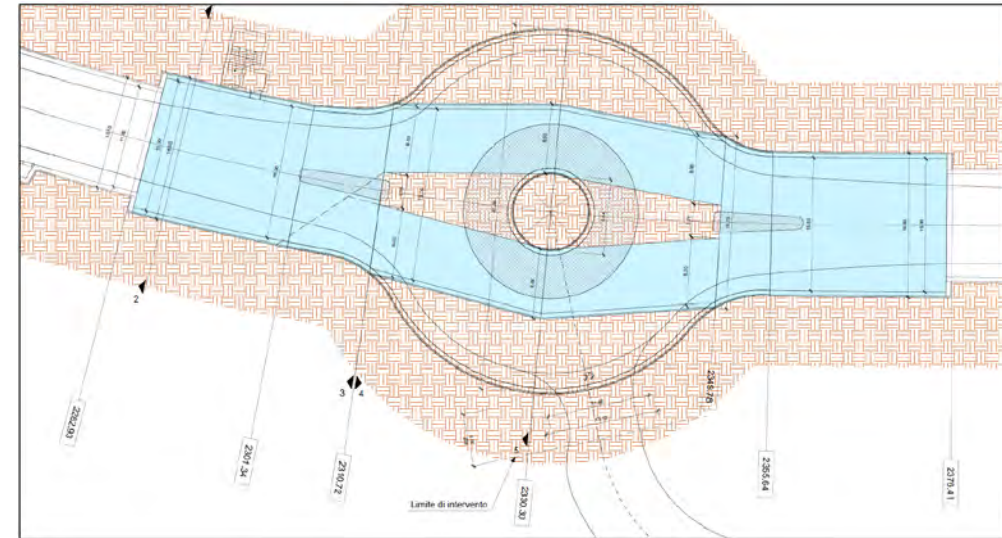
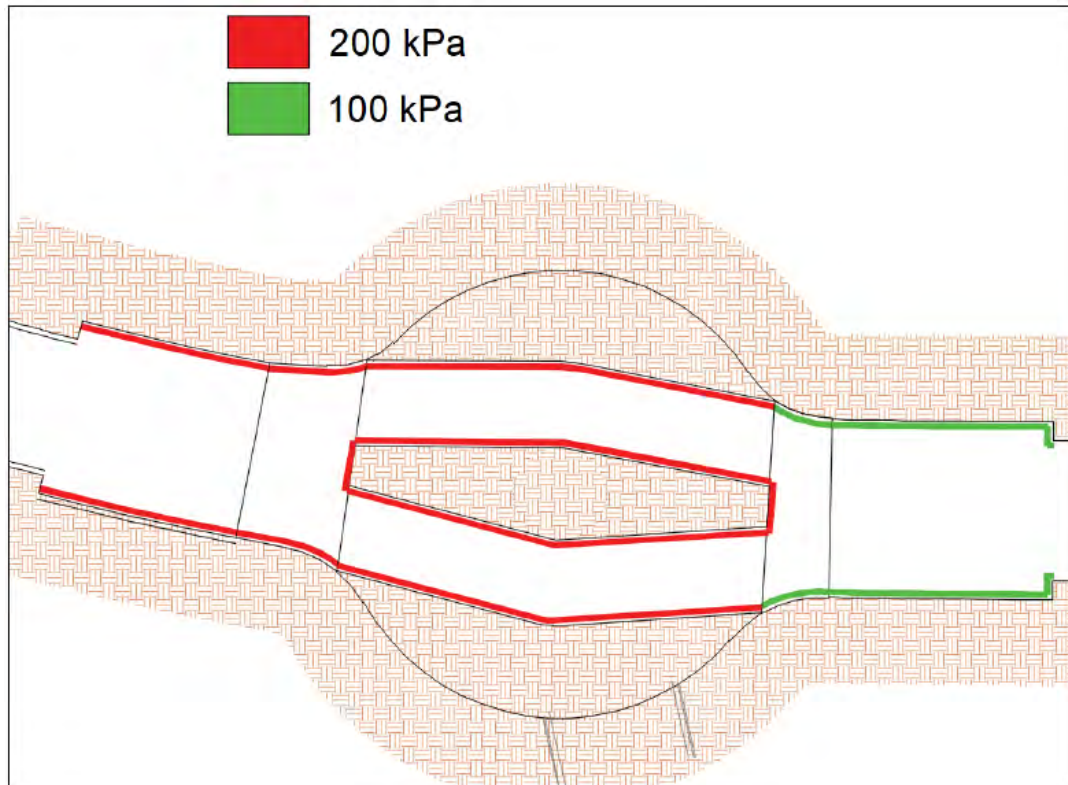
Fasi 6, 7 e 8: Proseguimento dello scavo della galleria principale con rispettivamente la sezione di transizione, la sezione 3Sp e la sezione 2Sp.



LA GALLERIA NATURALE NEL TRATTO IN ROCCIA – MODELLO NUMERICO FLAC 3D DELLA ROTATORIA

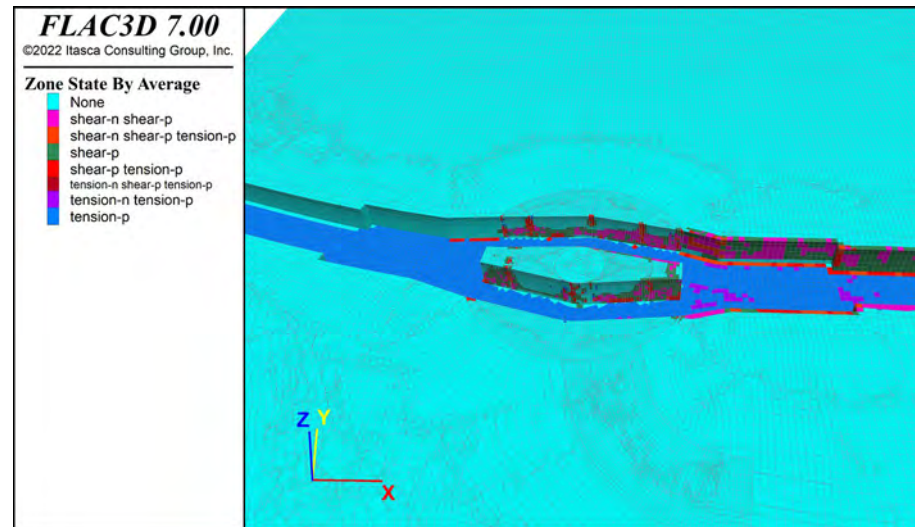
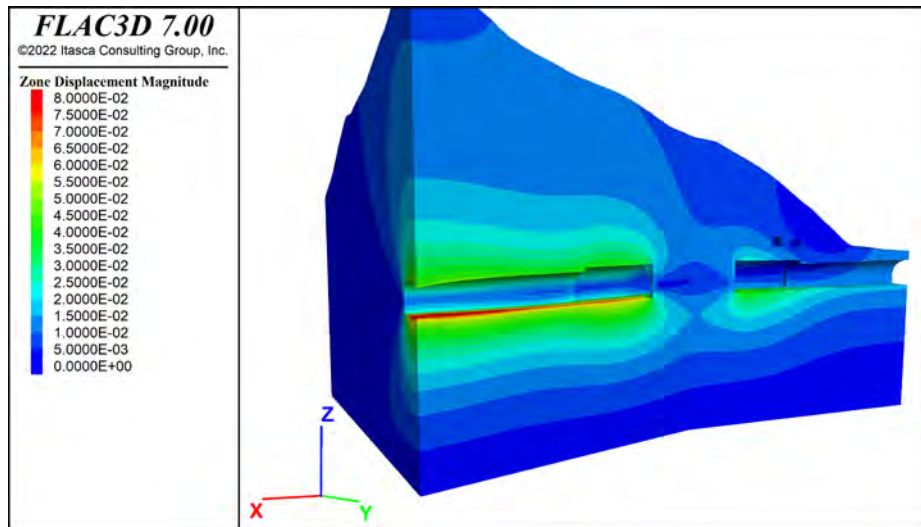
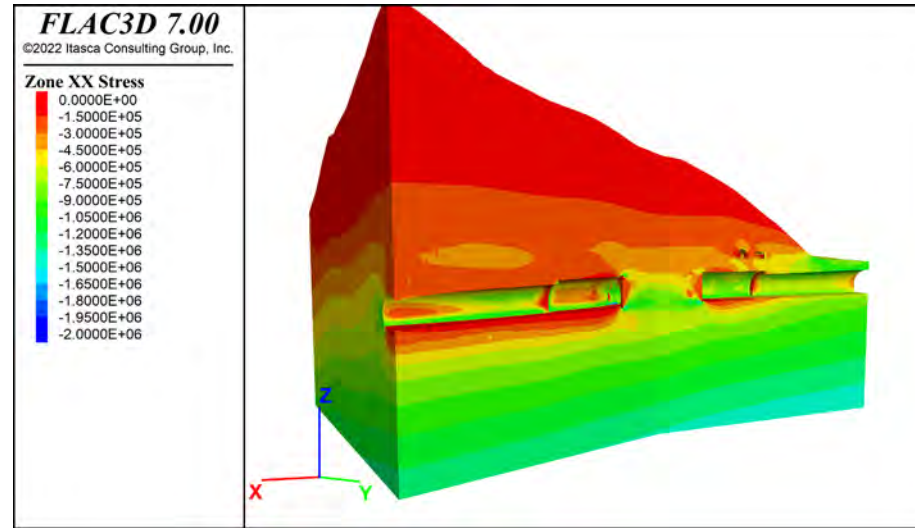
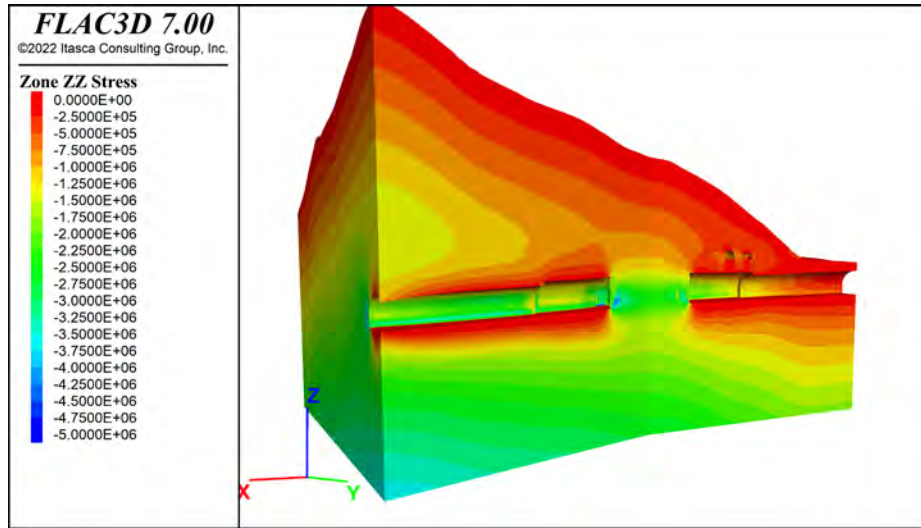
FASI ESECUTIVE DELLA ROTATORIA E FASI DI CALCOLO DELL'ANALISI NUMERICA

Durante le fasi da 1 a 8 sono via via applicate sul contorno della cavità specifiche pressioni di confinamento atte a simulare la presenza degli interventi di confinamento di prima fase (chiodature e betoncino).



LA GALLERIA NATURALE NEL TRATTO IN ROCCIA – MODELLO NUMERICO FLAC 3D DELLA ROTATORIA

RISULTATI SIGNIFICATIVI: FASI DI CALCOLO da 1 a 8



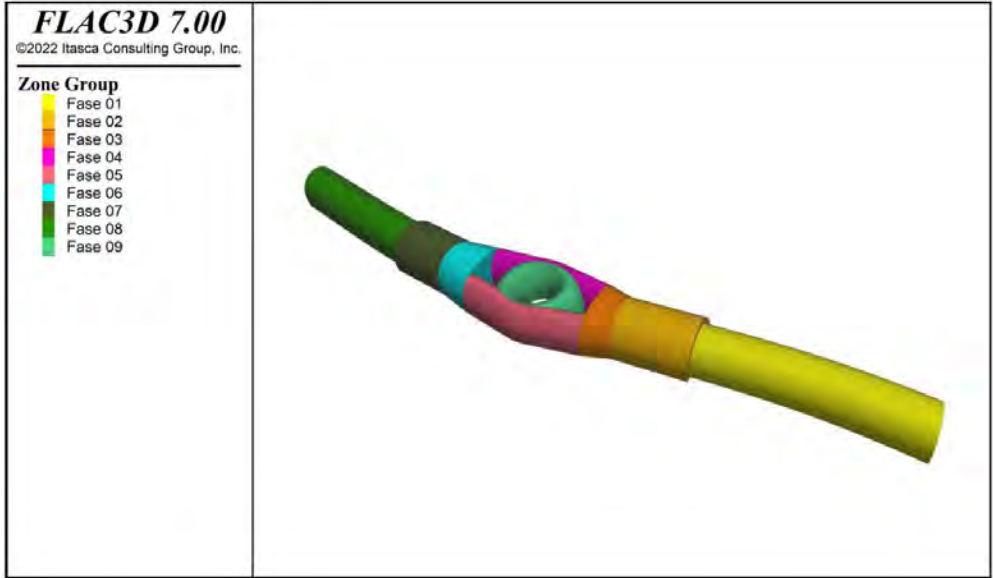
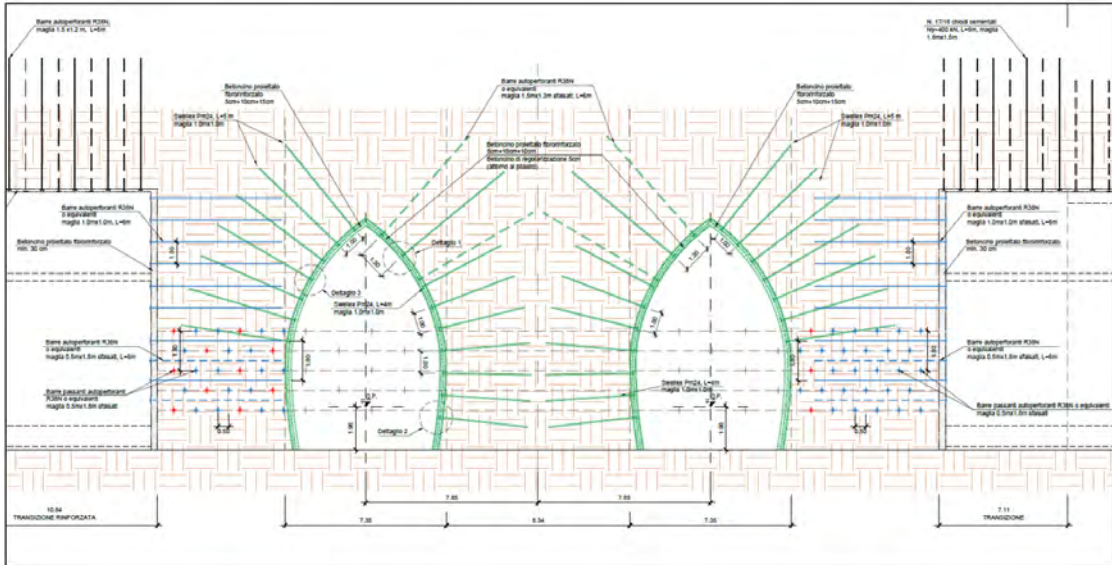
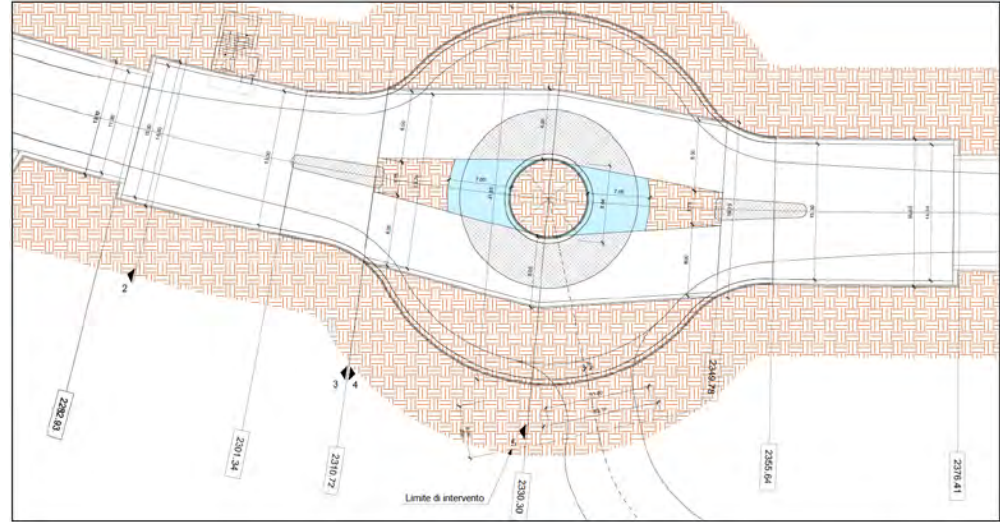
LA GALLERIA NATURALE NEL TRATTO IN ROCCIA – MODELLO NUMERICO FLAC 3D DELLA ROTATORIA

FASI ESECUTIVE DELLA ROTATORIA E FASI DI CALCOLO DELL'ANALISI NUMERICA

Fase 9: Completamento dello scavo attorno al pilastro centrale mediante due cunicoli trasversali delle dimensioni minime necessarie per garantire l'operatività delle attrezzature necessarie all'esecuzione della fase successiva (larghezza di circa 7 m).

A seguito dello scavo dei cunicoli trasversali si identificano il pilastro centrale in roccia a pianta circolare e due setti laterali in roccia a pianta trapezia.

Prima di procedere con le successive fasi di calcolo viene installato il rivestimento definitivo del pilastro centrale in calcestruzzo armato di spessore 50 cm. Nel modello, tale rivestimento, è simulato mediante l'utilizzo di elementi strutturali di tipo shell.



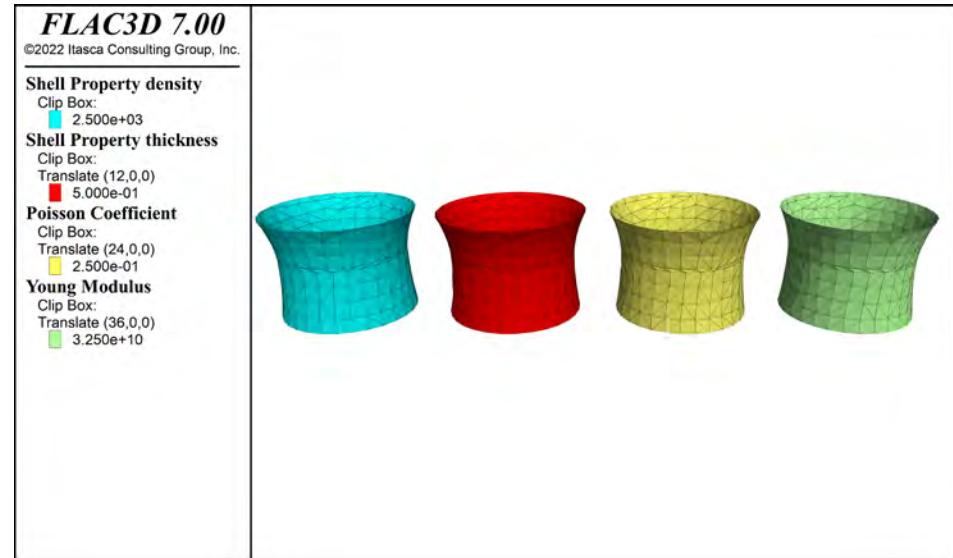
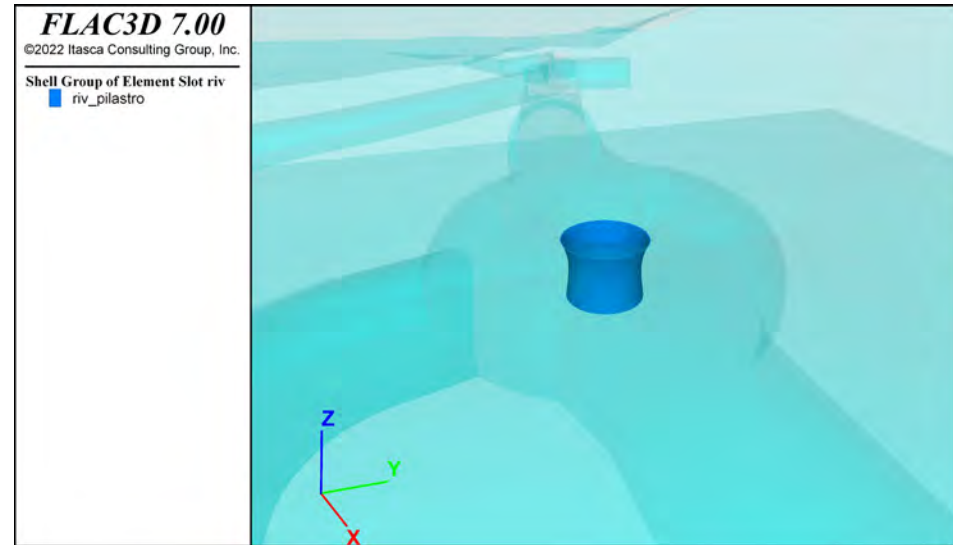
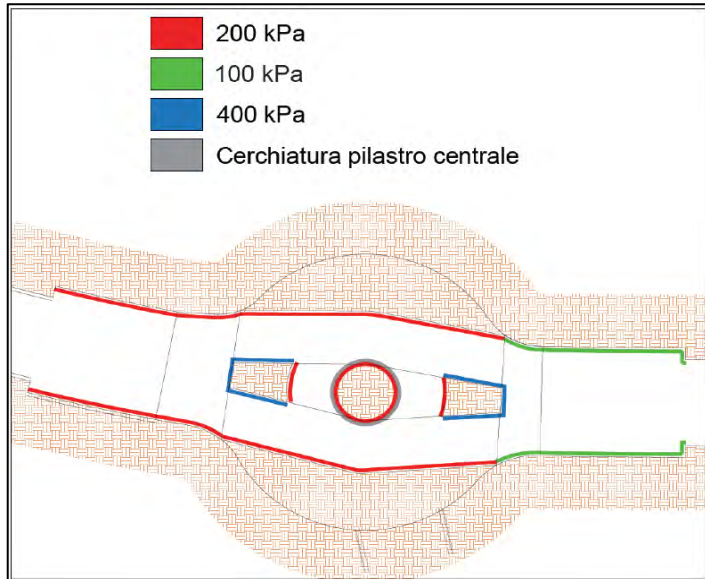
LA GALLERIA NATURALE NEL TRATTO IN ROCCIA – MODELLO NUMERICO FLAC 3D DELLA ROTATORIA

FASI ESECUTIVE DELLA ROTATORIA E FASI DI CALCOLO DELL'ANALISI NUMERICA

Fase 9: Completamento dello scavo attorno al pilastro centrale mediante due cunicoli trasversali delle dimensioni minime necessarie per garantire l'operatività delle attrezzature necessarie all'esecuzione della fase successiva (larghezza di circa 7 m).

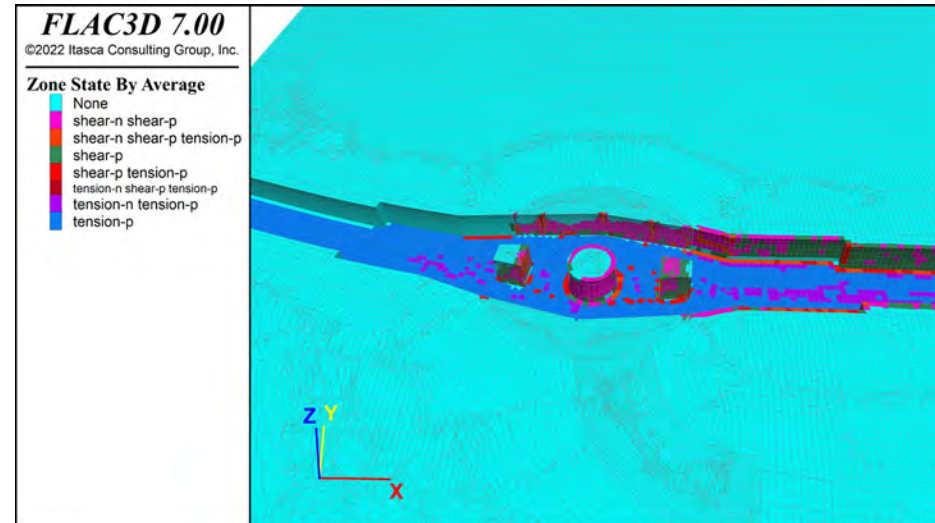
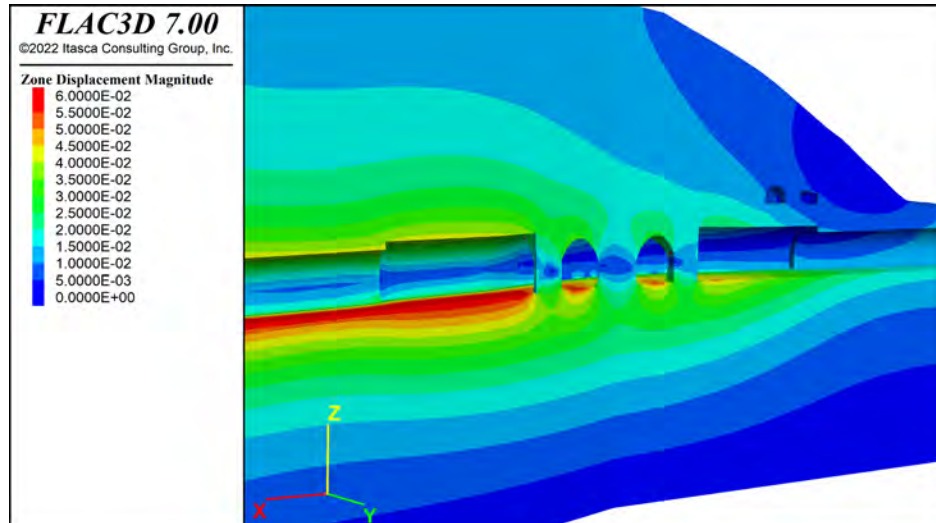
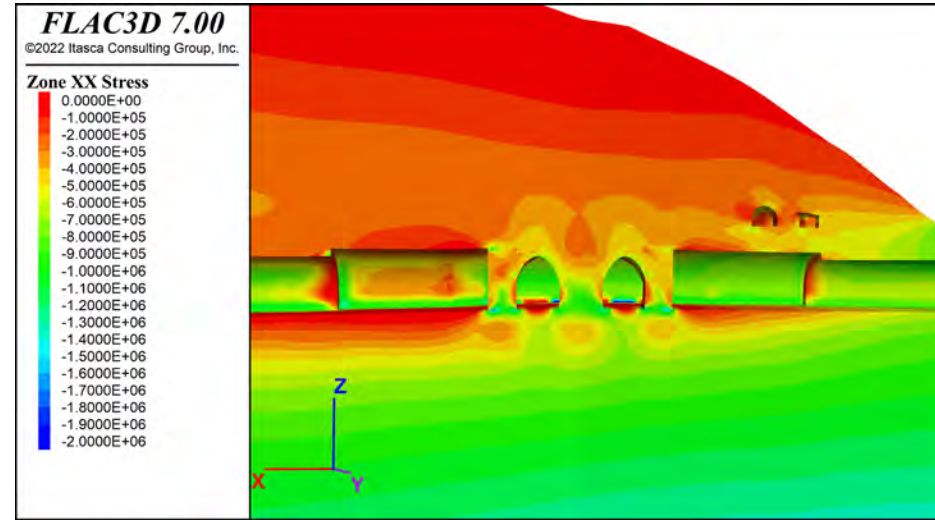
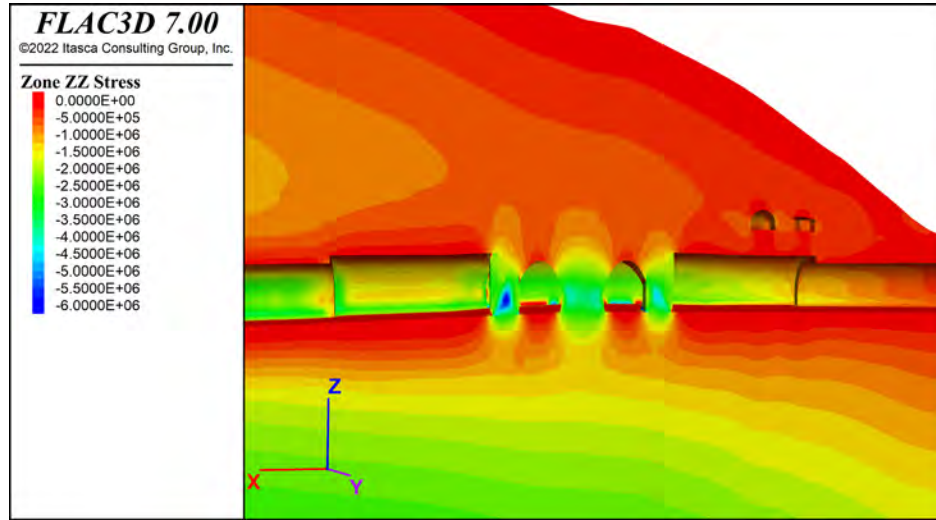
A seguito dello scavo dei cunicoli trasversali si identificano il pilastro centrale in roccia a pianta circolare e due setti laterali in roccia a pianta trapezia.

Prima di procedere con le successive fasi di calcolo viene installato il rivestimento definitivo del pilastro centrale in calcestruzzo armato di spessore 50 cm. Nel modello, tale rivestimento, è simulato mediante l'utilizzo di elementi strutturali di tipo shell.



LA GALLERIA NATURALE NEL TRATTO IN ROCCIA – MODELLO NUMERICO FLAC 3D DELLA ROTATORIA

RISULTATI SIGNIFICATIVI: FASE DI CALCOLO 9

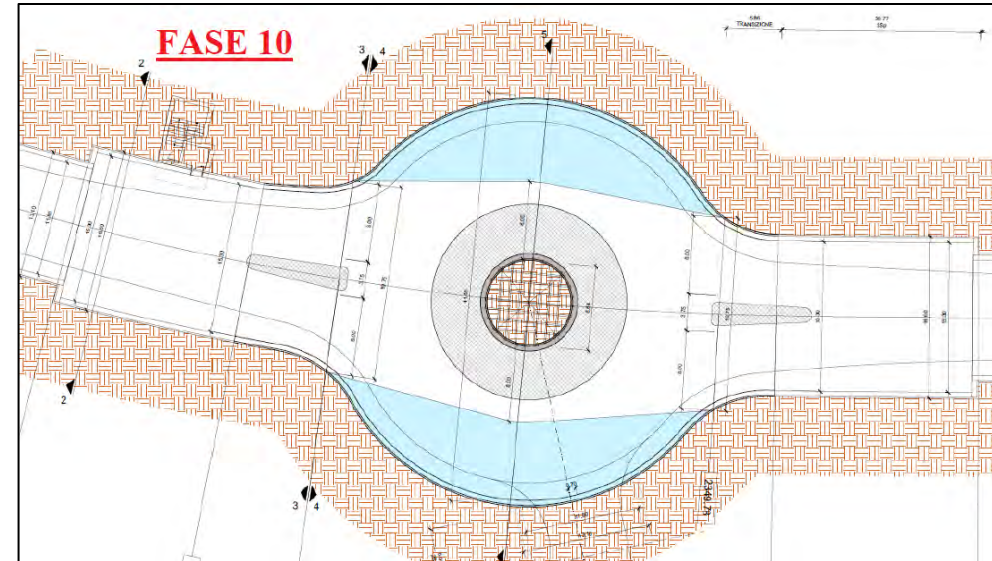
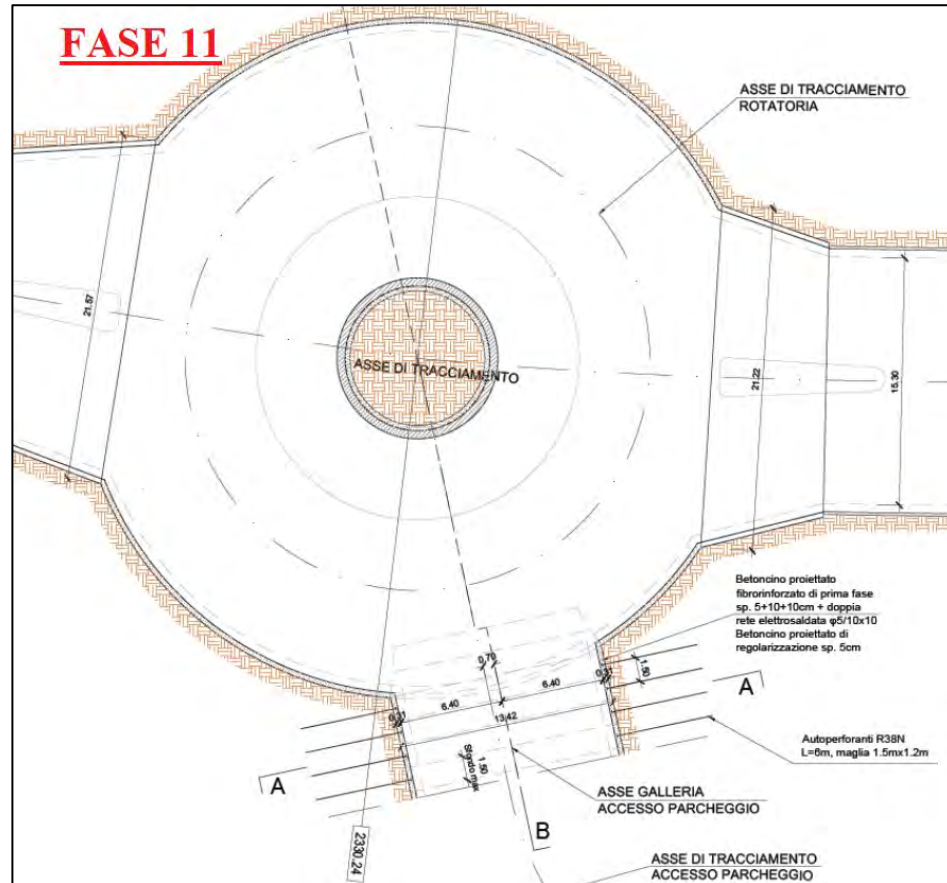


LA GALLERIA NATURALE NEL TRATTO IN ROCCIA – MODELLO NUMERICO FLAC 3D DELLA ROTATORIA

FASI ESECUTIVE DELLA ROTATORIA E FASI DI CALCOLO DELL'ANALISI NUMERICA

Fase 10: Scavo di allargamento della rotatoria e scavo dei setti laterali di roccia (rimane esclusivamente il pilastro centrale a pianta circolare).

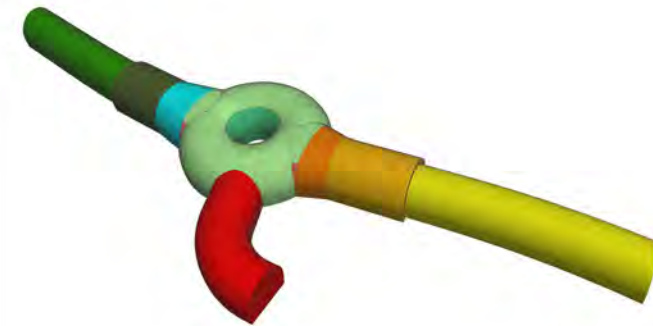
Fase 11: Scavo della galleria di accesso al parcheggio sotterraneo.



FLAC3D 7.00
©2022 Itasca Consulting Group, Inc.

Zone Group

- Fase 01
- Fase 02
- Fase 03
- Fase 04
- Fase 05
- Fase 06
- Fase 07
- Fase 08
- Fase 09
- Fase 10_a
- Fase 10_b
- Fase 10_c
- Fase 10_d
- Fase 10_e
- Fase 10_f
- Fase 11



LA GALLERIA NATURALE NEL TRATTO IN ROCCIA – MODELLO NUMERICO FLAC 3D DELLA ROTATORIA

FASI ESECUTIVE DELLA ROTATORIA E FASI DI CALCOLO DELL'ANALISI NUMERICA

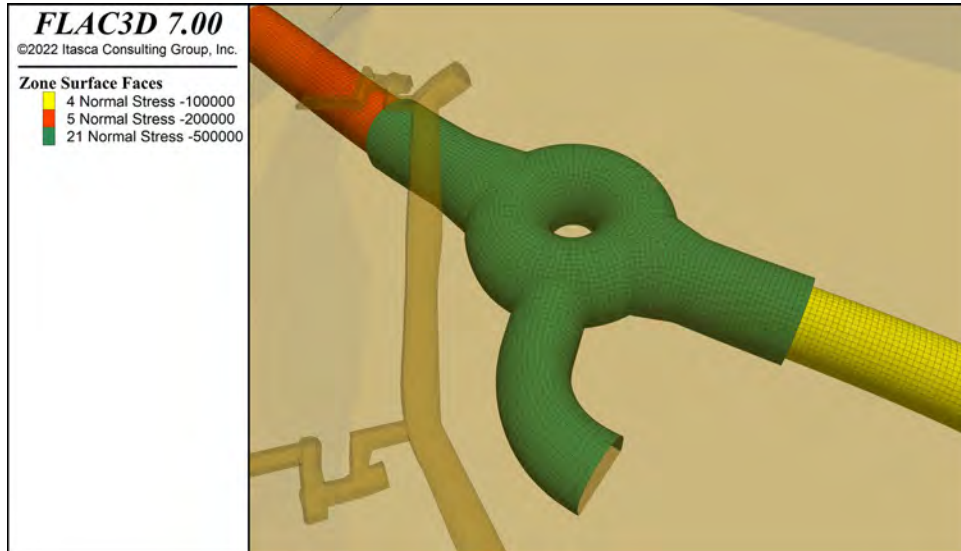
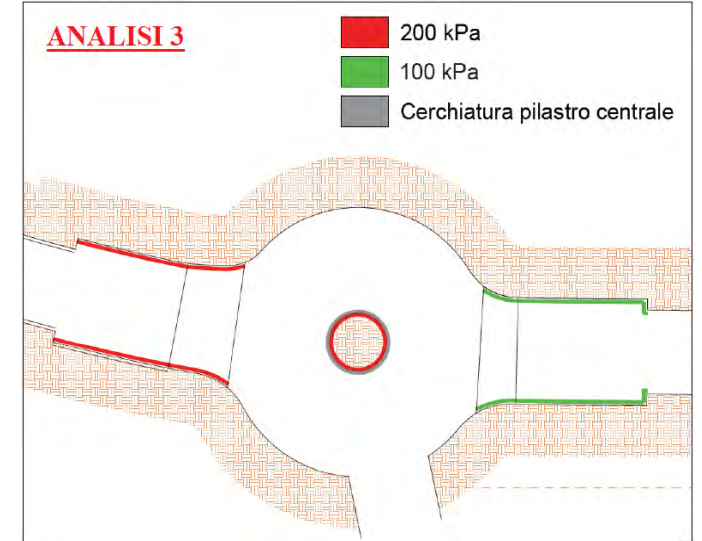
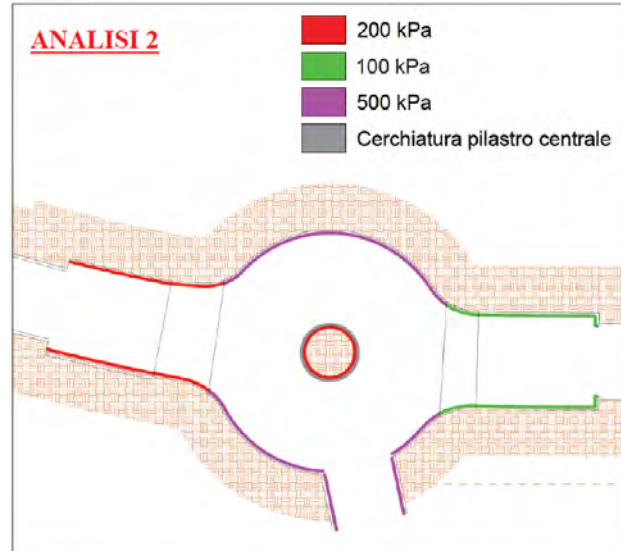
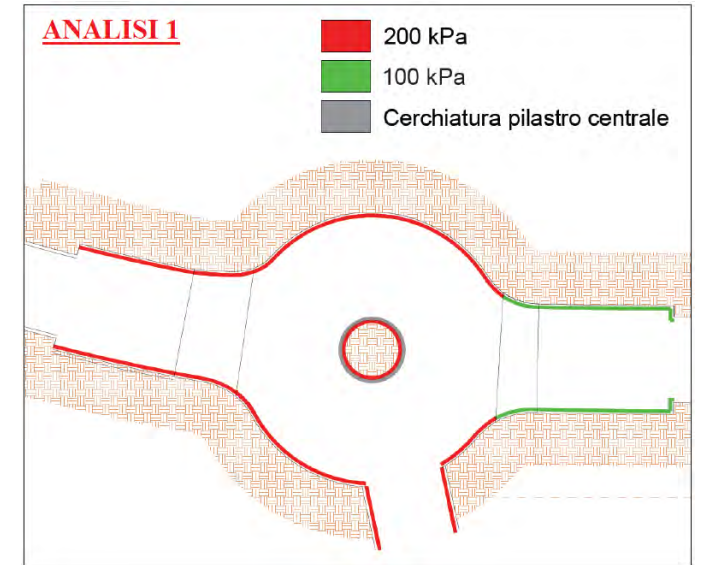
Fase 10: Scavo di allargamento della rotatoria e scavo dei setti laterali di roccia (rimane esclusivamente il pilastro centrale a pianta circolare).

Fase 11: Scavo della galleria di accesso al parcheggio sotterraneo.

Analisi 1: Sul contorno dello scavo di allargamento della rotatoria e della galleria di accesso al parcheggio sotterraneo viene applicata una pressione di confinamento pari a 200 kPa, atta a simulare gli interventi di confinamento di prima fase (chiodature e betoncino). L'analisi 1 è cautelativa dal punto di vista della valutazione delle convergenze della cavità.

Analisi 2: Viene applicata una pressione di confinamento pari a 500 kPa. L'analisi 2 è cautelativa dal punto di vista delle sollecitazioni nei rivestimenti definitivi.

Analisi 3: Non viene applicata nessuna pressione di confinamento. L'analisi 3 è stata utilizzata per il dimensionamento cautelativo del rivestimento definitivo del pilastro centrale.



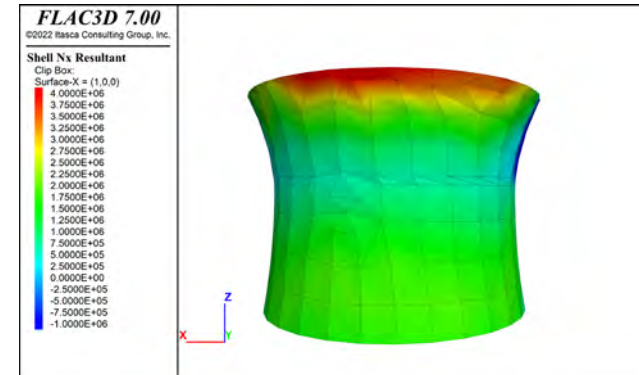
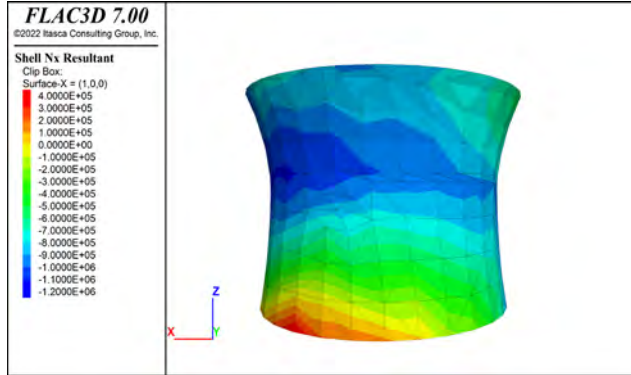
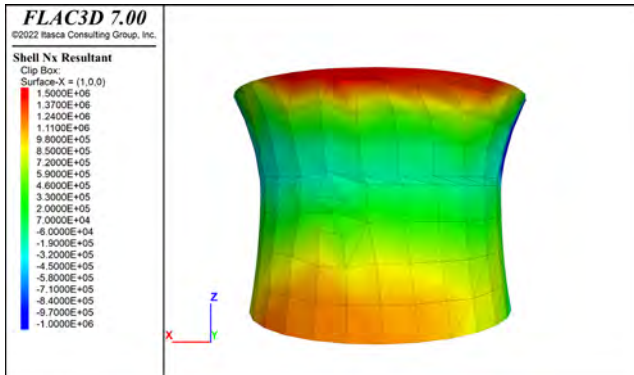
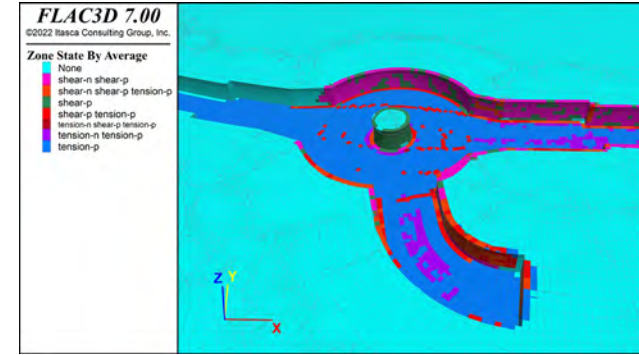
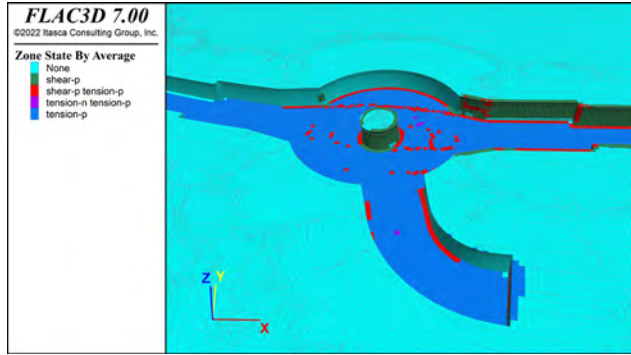
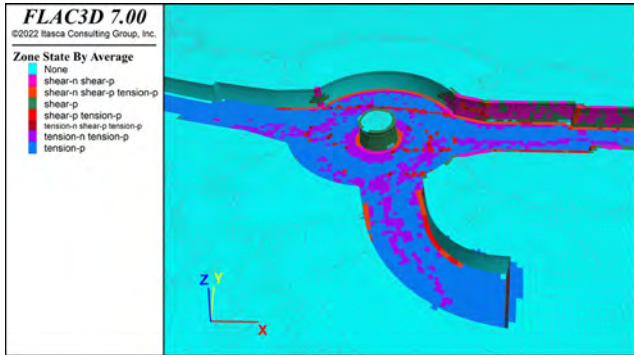
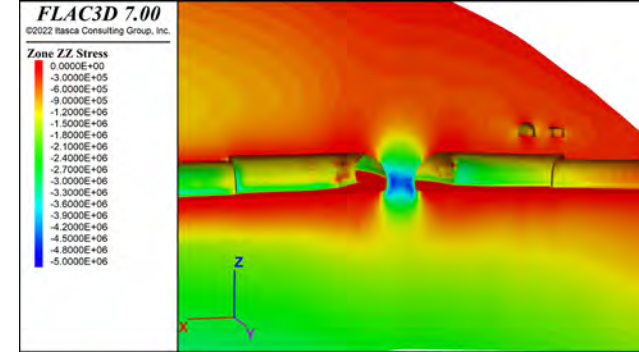
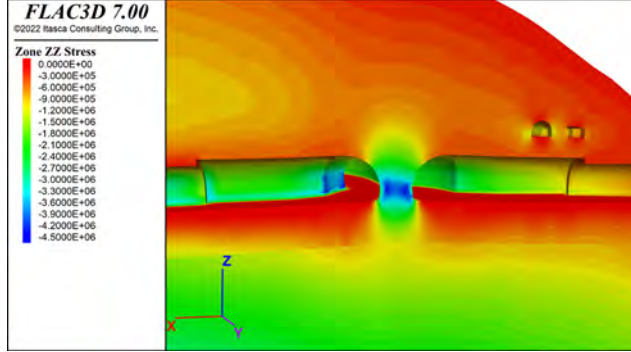
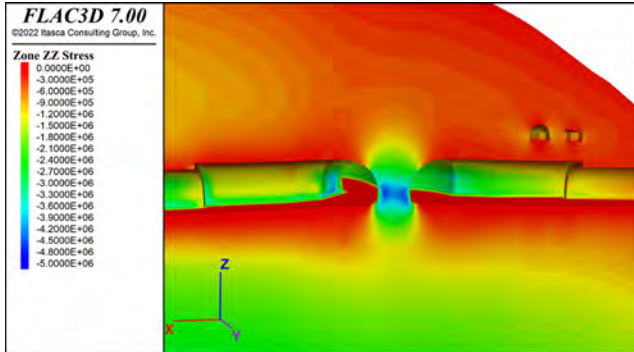
LA GALLERIA NATURALE NEL TRATTO IN ROCCIA – MODELLO NUMERICO FLAC 3D DELLA ROTATORIA

RISULTATI SIGNIFICATIVI: FASE DI CALCOLO 11

ANALISI 1

ANALISI 2

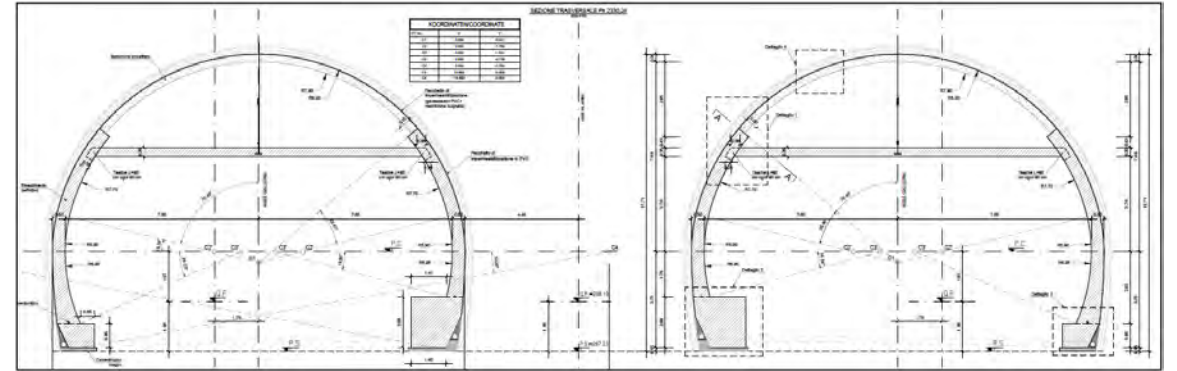
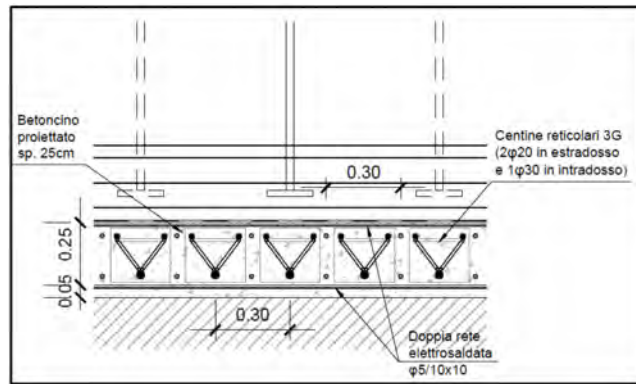
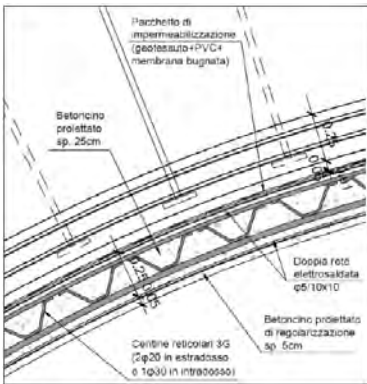
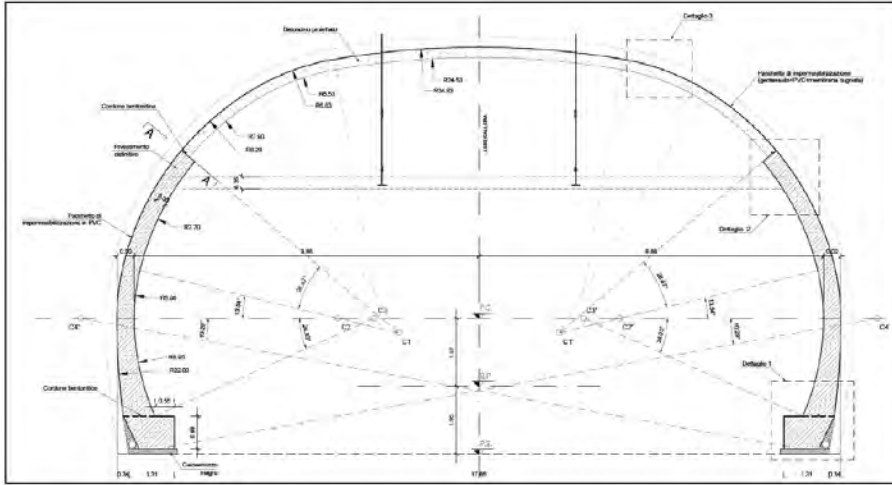
ANALISI 3



LA GALLERIA NATURALE NEL TRATTO IN ROCCIA – MODELLO NUMERICO FLAC 3D DELLA ROTATORIA

FASI ESECUTIVE DELLA ROTATORIA E FASI DI CALCOLO DELL'ANALISI NUMERICA

Fase 12: Installazione dei rivestimenti definitivi e rimozione di tutte le pressioni di confinamento applicate al fine di simulare i rivestimenti di prima fase.

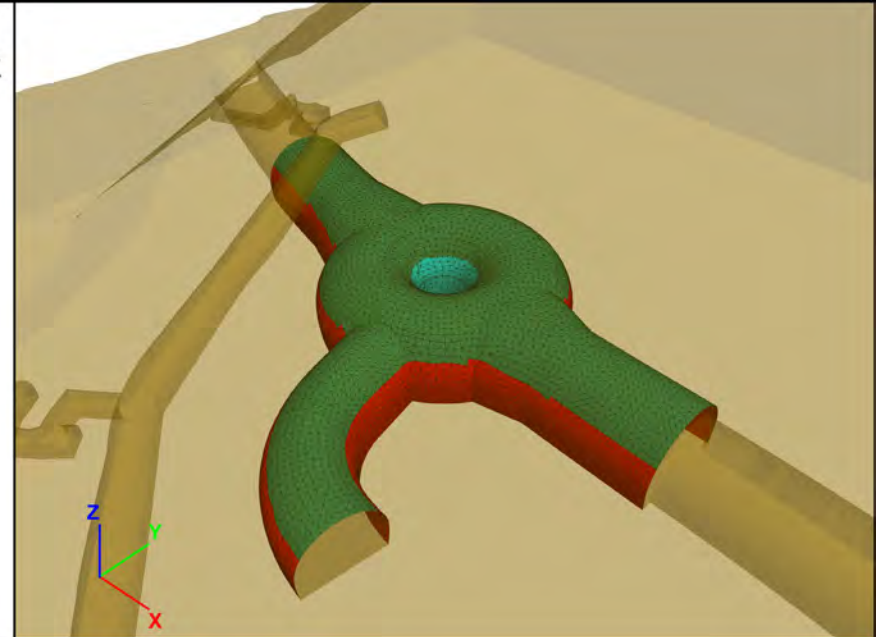


FLAC3D 7.00

©2022 Itasca Consulting Group, Inc.

Shell Group of Element

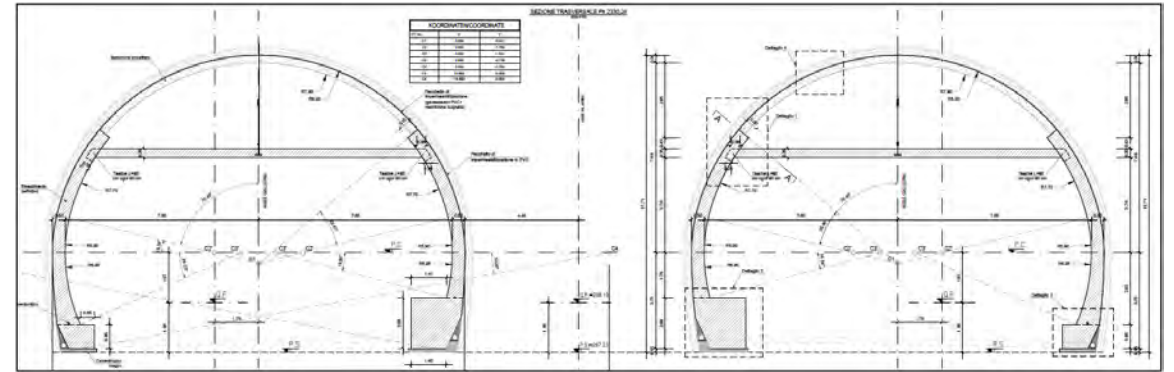
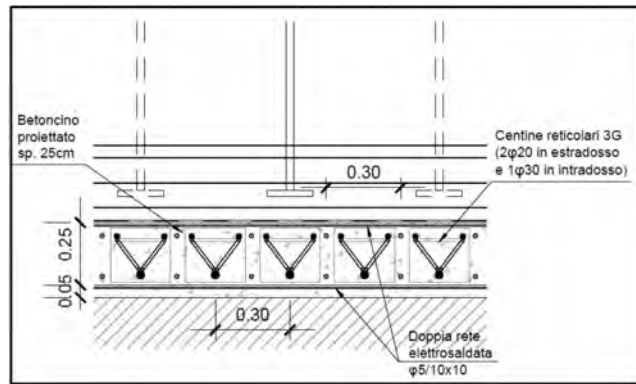
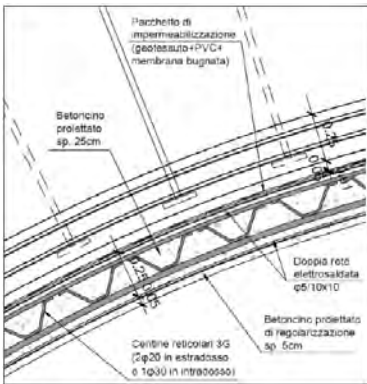
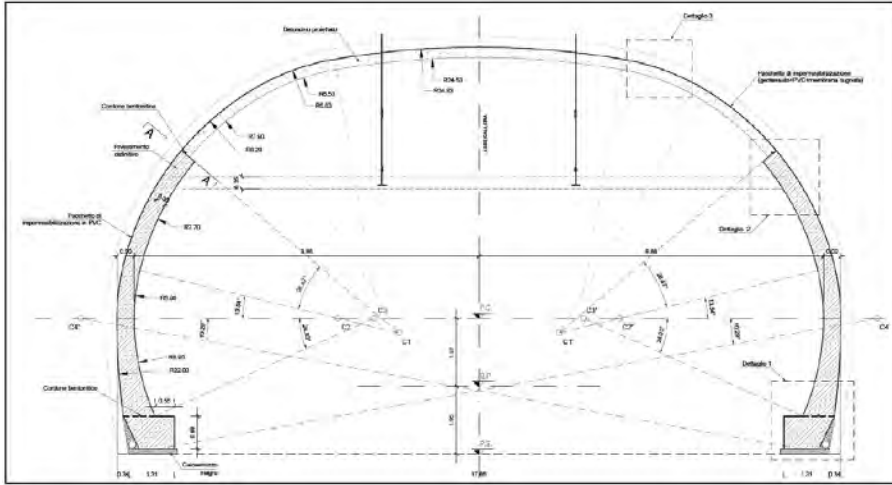
- riv=c_a
- riv=riv_pilastro
- riv=single_shell



LA GALLERIA NATURALE NEL TRATTO IN ROCCIA – MODELLO NUMERICO FLAC 3D DELLA ROTATORIA

FASI ESECUTIVE DELLA ROTATORIA E FASI DI CALCOLO DELL'ANALISI NUMERICA

Fase 12: Installazione dei rivestimenti definitivi e rimozione di tutte le pressioni di confinamento applicate al fine di simulare i rivestimenti di prima fase.



FLAC3D 7.00

©2022 Itasca Consulting Group, Inc.

Shell Property density

2.500e+03

Shell Property thickness

Translate (100,0,0)

3.000e-01

5.000e-01

Poisson Coefficient

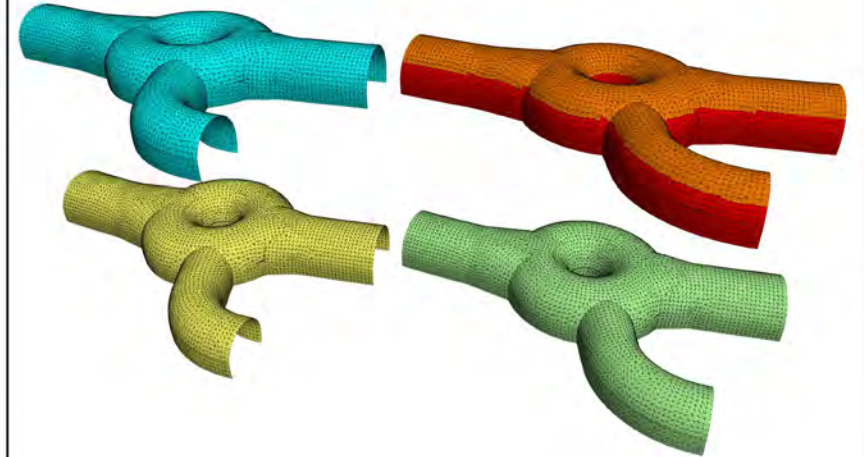
Translate (0,0,-50)

2.500e-01

Young Modulus

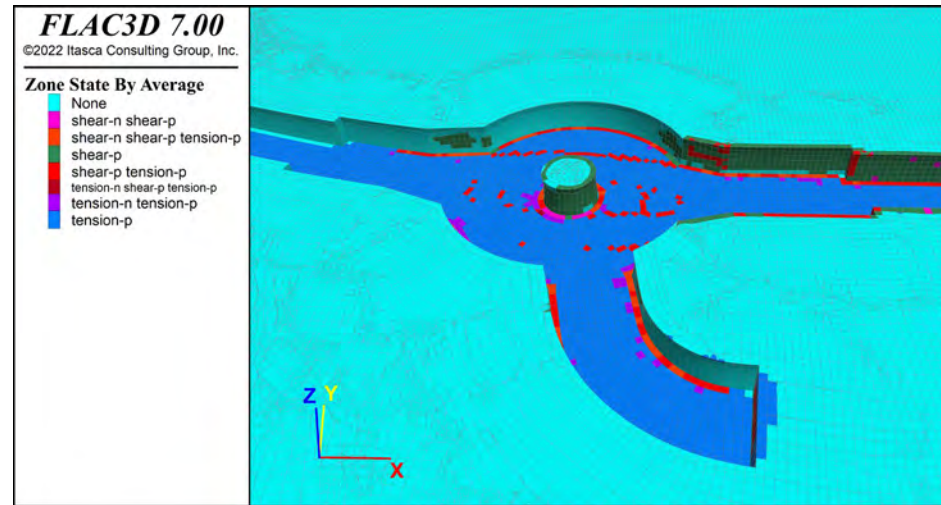
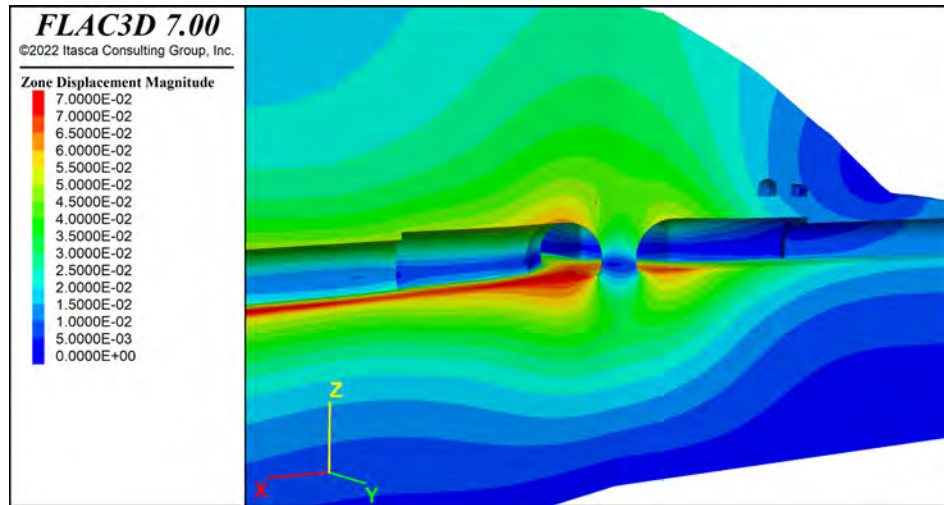
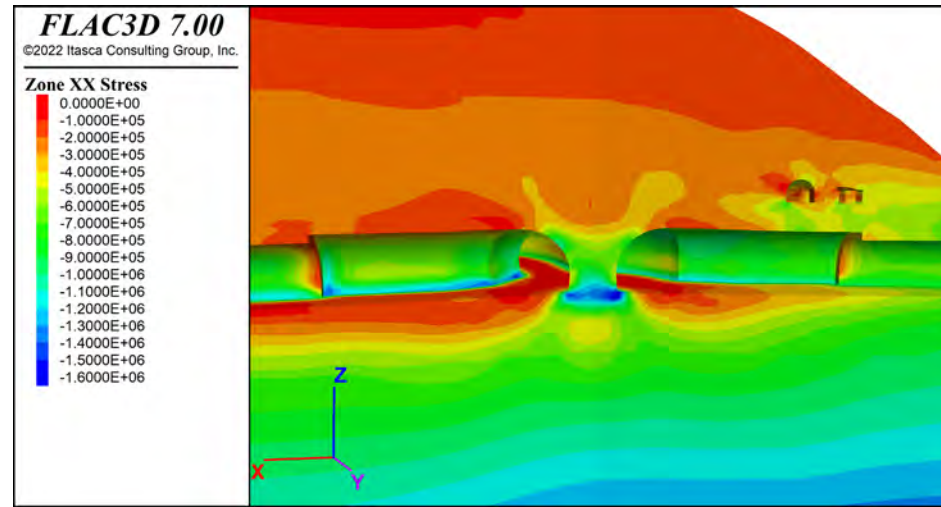
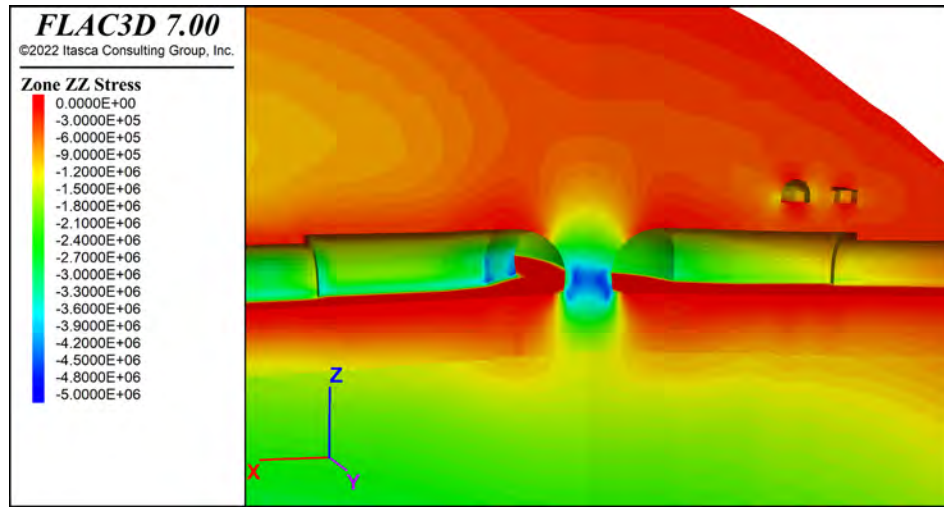
Translate (100,0,-50)

3.250e+10



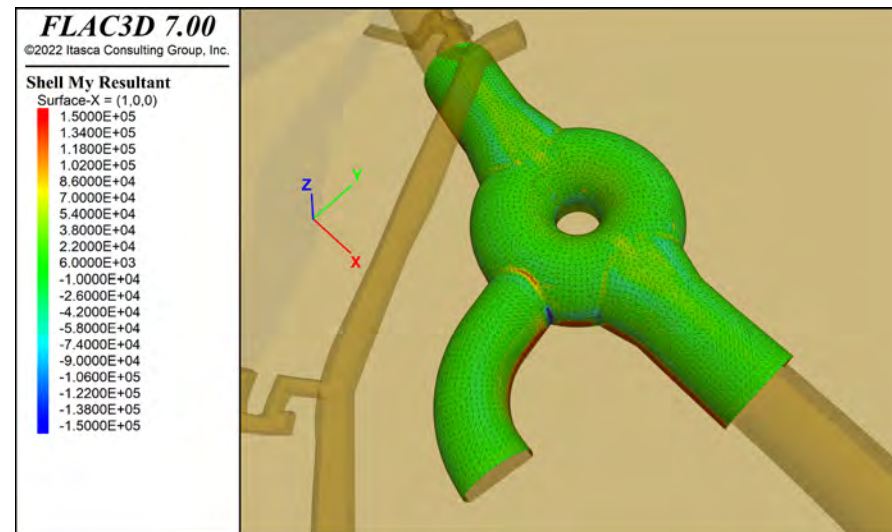
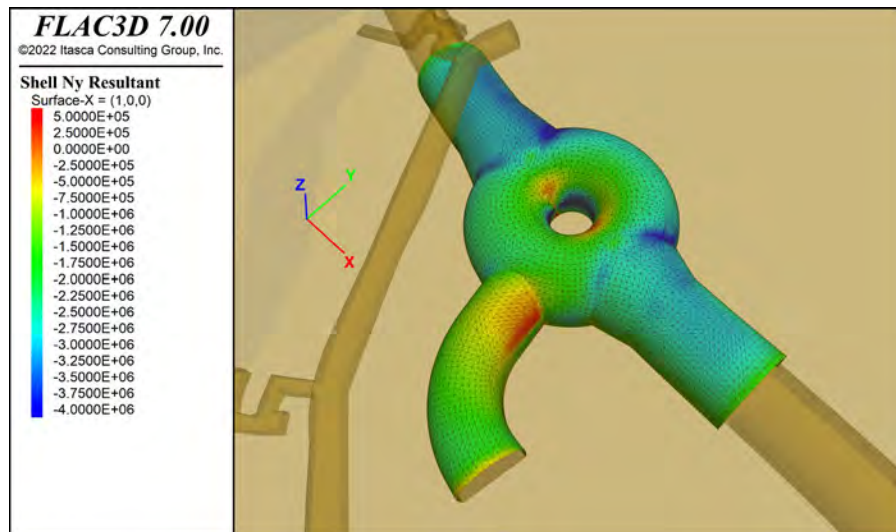
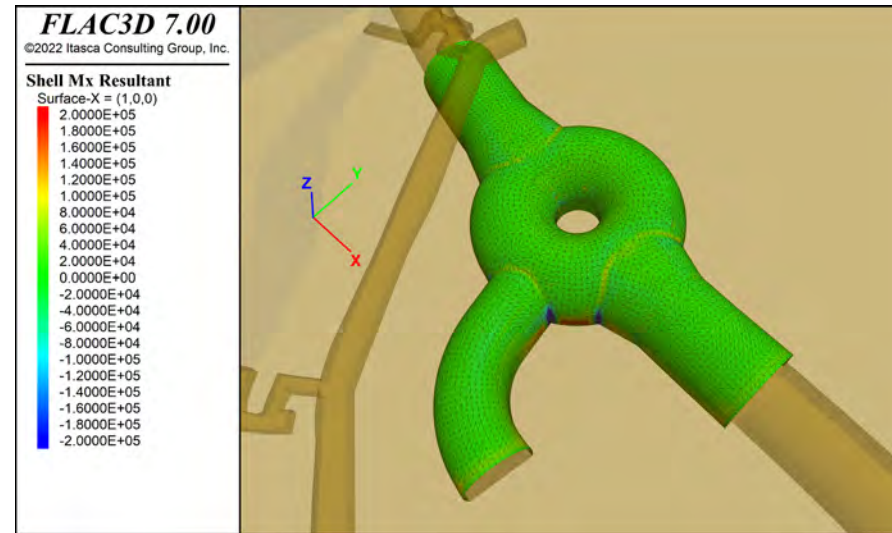
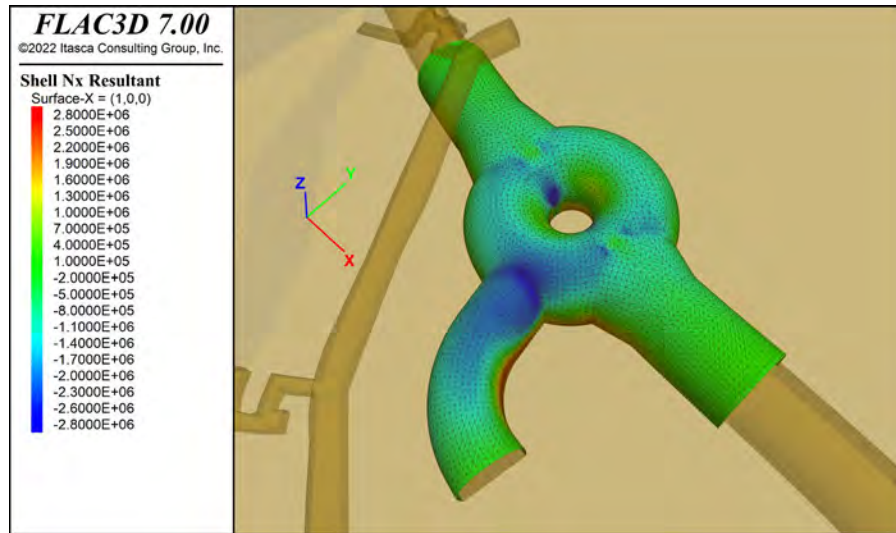
LA GALLERIA NATURALE NEL TRATTO IN ROCCIA – MODELLO NUMERICO FLAC 3D DELLA ROTATORIA

RISULTATI SIGNIFICATIVI: FASE DI CALCOLO 12



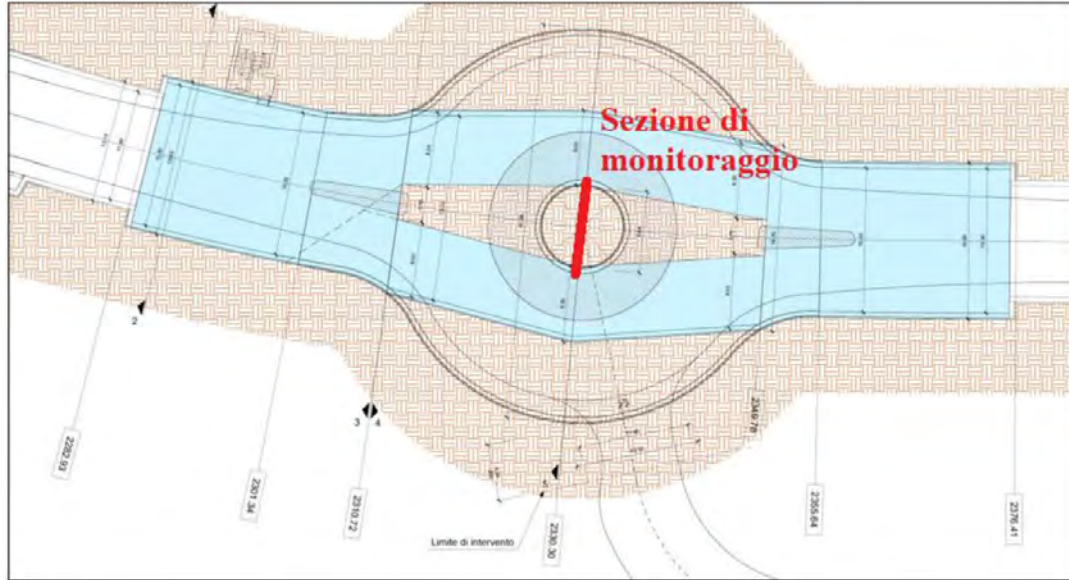
LA GALLERIA NATURALE NEL TRATTO IN ROCCIA – MODELLO NUMERICO FLAC 3D DELLA ROTATORIA

RISULTATI SIGNIFICATIVI: FASE DI CALCOLO 12

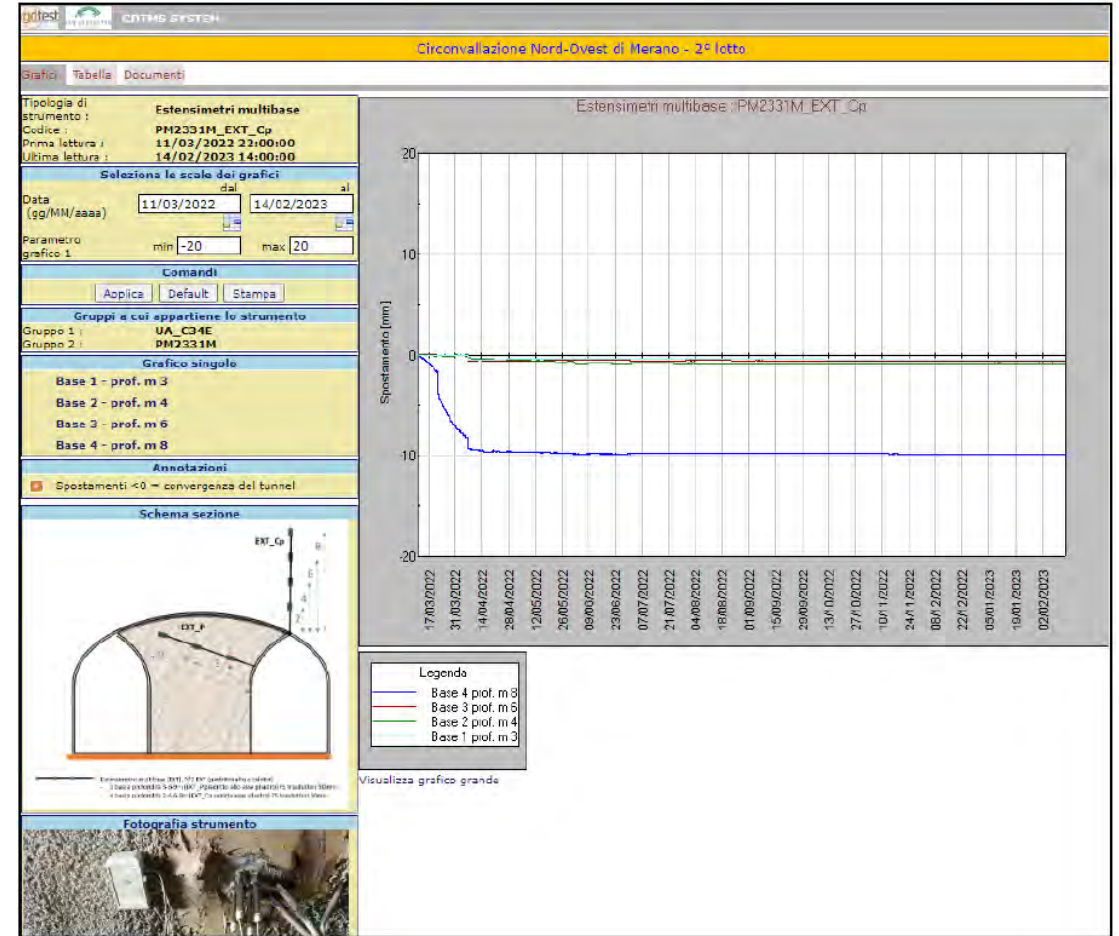


LA GALLERIA NATURALE NEL TRATTO IN ROCCIA – DATI DI MONITORAGGIO E CONFRONTO CON I RISULTATI DELLE ANALISI NUMERICHE

Di seguito sono mostrati i risultati del monitoraggio eseguito mediante estensimetri multibase installati in corrispondenza del pilastro centrale.



I risultati forniti dagli estensimetri multibase mostrano che gli spostamenti registrati alla fine del mese di marzo del 2022 sono indicativamente compresi fra 0.3 cm e 1 cm.

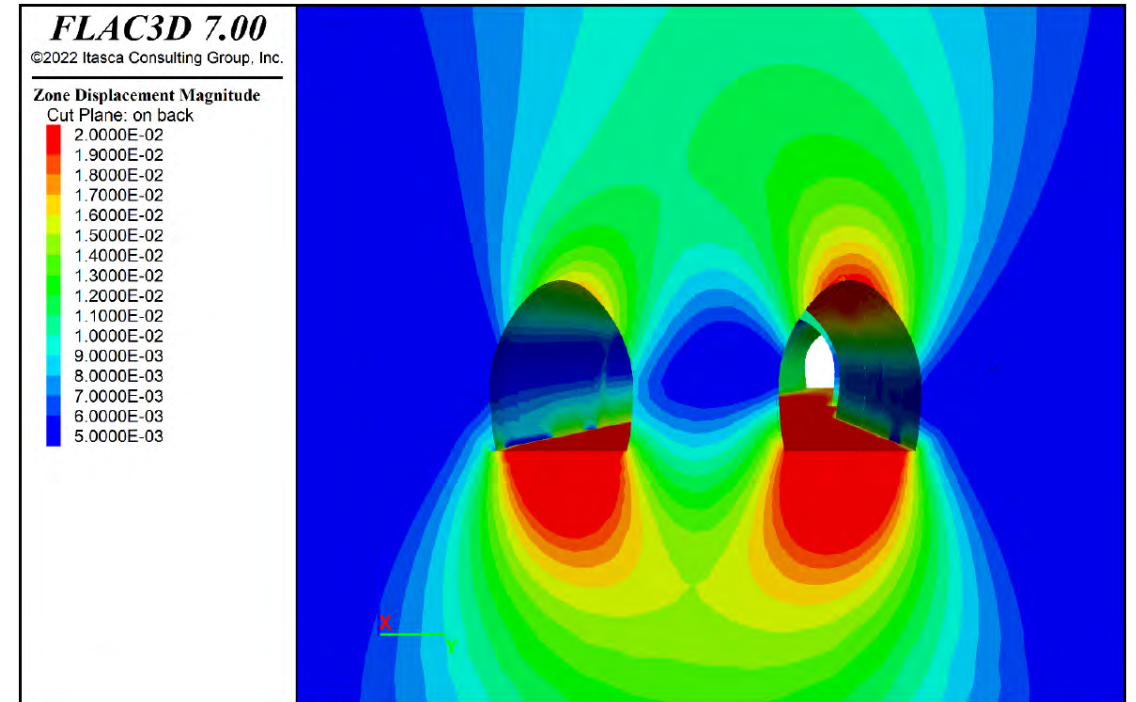


LA GALLERIA NATURALE NEL TRATTO IN ROCCIA – DATI DI MONITORAGGIO E CONFRONTO CON I RISULTATI DELLE ANALISI NUMERICHE

Di seguito sono mostrati i risultati del monitoraggio eseguito mediante estensimetri multibase installati in corrispondenza del pilastro centrale.



I risultati forniti dagli estensimetri multibase mostrano che gli spostamenti registrati alla fine del mese di marzo del 2022 sono indicativamente compresi fra 0.3 cm e 1 cm.



Nella sezione trasversale in corrispondenza del pilastro centrale, il modello numerico mostra lo svilupparsi di un cedimento massimo in calotta pari a 2 cm per il cunicolo di destra e di 1.7 cm per quello di sinistra. I valori ottenuti dall'analisi risultano superiori a quelli registrati dalla strumentazione.

<https://www.youtube.com/Merano>



QUESTION
AND
ANSWER
SESSION

17 maggio 2023

since 1990

HARPACEAS

Your digital partner

VIALE RICHARD, 3A - 20143 MILANO

TEL: 02-891741

info@harpaceas.it

harpaceas.it