

FACOLTÀ DI INGEGNERIA  
CIVILE E INDUSTRIALE



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA



GEEG  
GEOTECHNICAL & ENVIRONMENTAL  
ENGINEERING GROUP

Convegno:

# Ricerca e Innovazione per lo sviluppo di opere di ingegneria in sotterraneo

Roma, 29 febbraio 2024 - Aula del Chiostro - San Pietro in Vincoli - Via Eudossiana 18, Roma



**Ing. E. M. Pizzarotti**  
Pro Iter S.r.l.

*La circosollazione stradale Nord-Ovest di Merano  
Infrastruttura sotterranea in area urbana  
Soluzioni efficaci ed efficienti per il secondo lotto*

[www.ing.uniroma1.it](http://www.ing.uniroma1.it) - [www.geeg.it](http://www.geeg.it)



**PRO  
ITER**  
Progetto  
Infrastrutture  
Territorio

# LA CIRCONVALLAZIONE STRADALE NORD-OVEST DI MERANO INFRASTRUTTURA SOTTERRANEA IN AREA URBANA SOLUZIONI EFFICACI ED EFFICIENTI PER IL SECONDO LOTTO

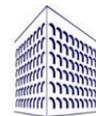
**STAZIONE APPALTANTE**  
*Provincia Autonoma di Bolzano*



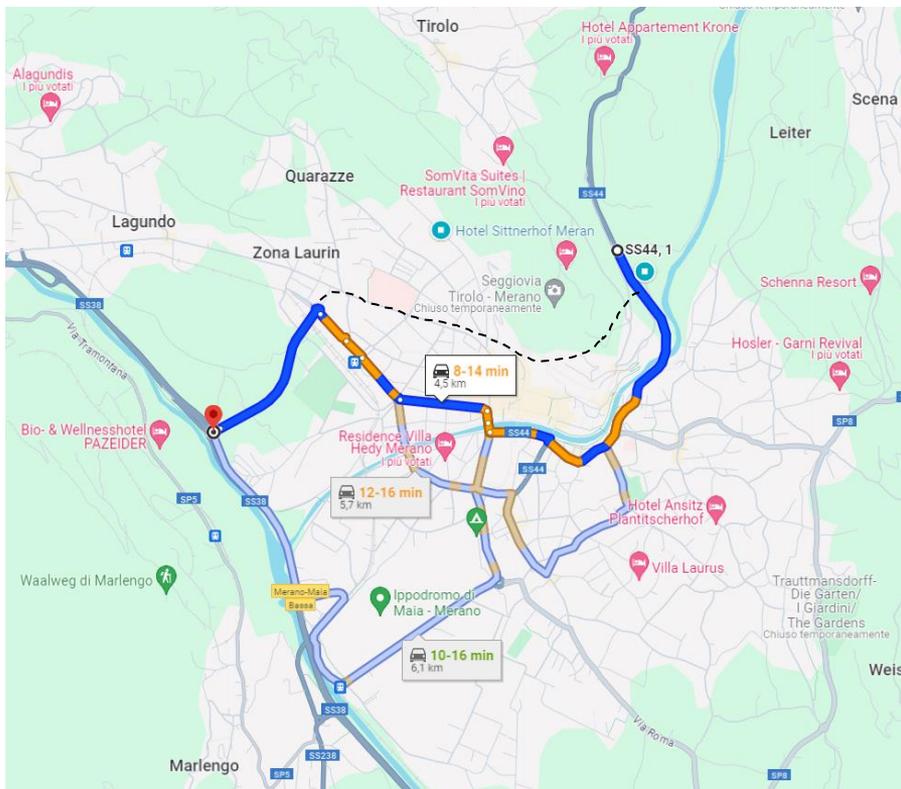
**COSTRUTTORE**  
*Consorzio San Benedetto Scarl*



**PROGETTO OPERE IN SOTTERRANEO**  
*Pro Iter Srl*



# BENEFICI PER LA CITTA' DI MERANO (progetto 2003)

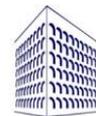


Il Comune di Merano sta sviluppando un Piano urbano della mobilità sostenibile (PUMS) che ha tra gli obiettivi:

- Il miglioramento della qualità della vita
- La gestione del traffico
- Lo sviluppo sostenibile
- L'attrattività turistica

## TEMPI DI PERCORRENZA

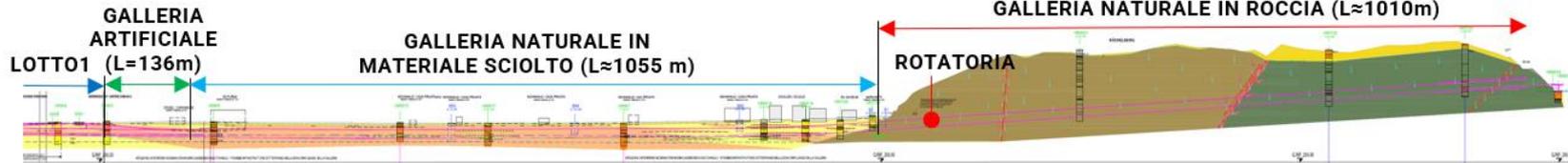
	T [min]	Riduzione [%]
Ante operam	10 – 16 min	-
Con l'entrata in esercizio del 1° Lotto	8 – 14 min	≈ 15 %
Ad opera ultimata	6 – 8 min	≈ 50 %



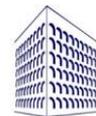


Il Lotto 2 della circonvallazione (**importo lavori 125.000.000 €**) è situato nella zona Nord-Ovest di Merano, in continuità con il Lotto 1, già completato e attualmente in esercizio dal 2013; il tracciato in galleria attraversa, da ovest verso est, il centro cittadino e successivamente il Monte San 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** (alluvioni) con coperture ridotte (< 8 m) sotto il centro cittadino mentre la seconda tratta attraversa **formazioni rocciose** metamorfiche (filladi, gneiss e micascisti) 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.



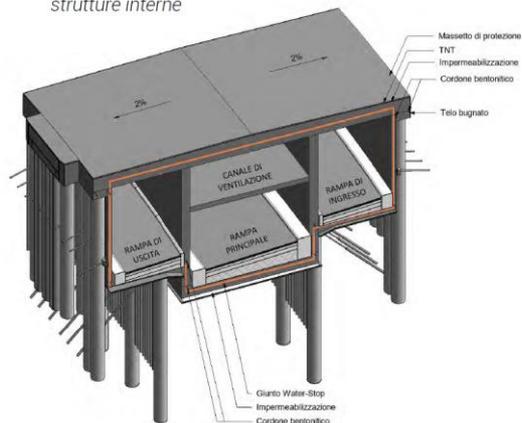
**Ing. E. M. Pizzarotti** - *La circonvallazione stradale Nord-Ovest di Merano. Infrastruttura sotterranea in area urbana. Soluzioni efficaci ed efficienti per il secondo lotto*



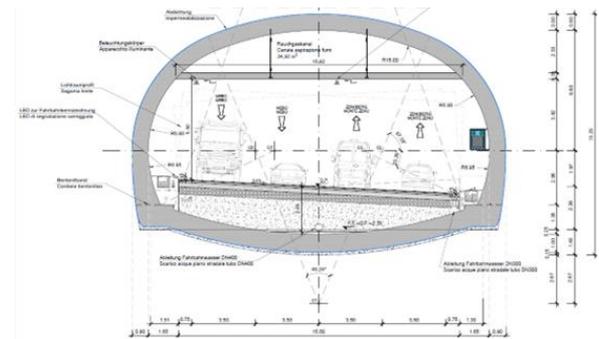
La **Galleria Artificiale** (larghezza circa 30 m, profondità max circa 20 m) ospita due rampe, una di ingresso e una di uscita, le cui corsie di accelerazione e decelerazione interessano anche il primo tratto di Galleria Naturale, per uno sviluppo di circa 160 m, comportando un significativo aumento 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 m<sup>2</sup> (sezione 2Sp) a circa 240 m<sup>2</sup>.



strutture interne



**Galleria artificiale**



**Sezione 4Sp**



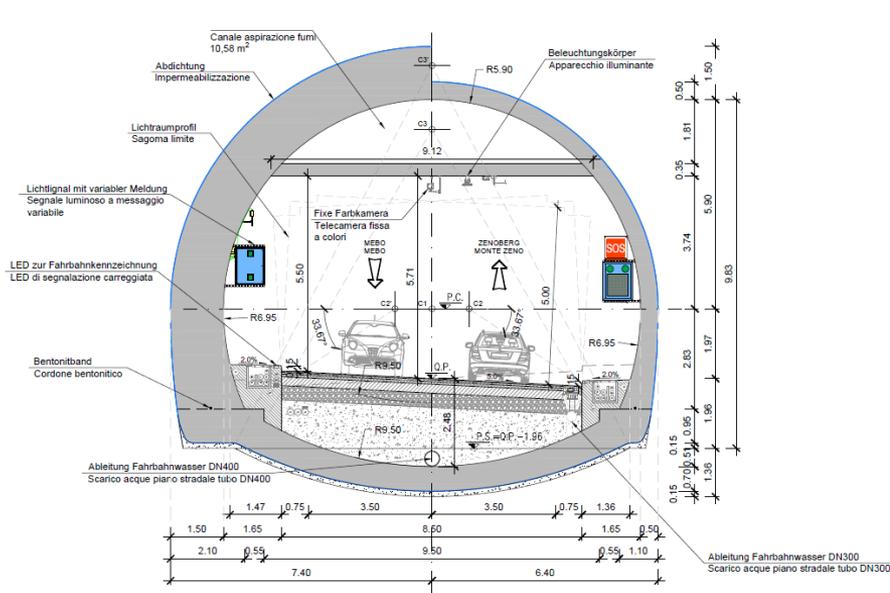
**Ing. E. M. Pizzarotti - La circonvallazione stradale Nord-Ovest di Merano. Infrastruttura sotterranea in area urbana. Soluzioni efficaci ed efficienti per il secondo lotto**



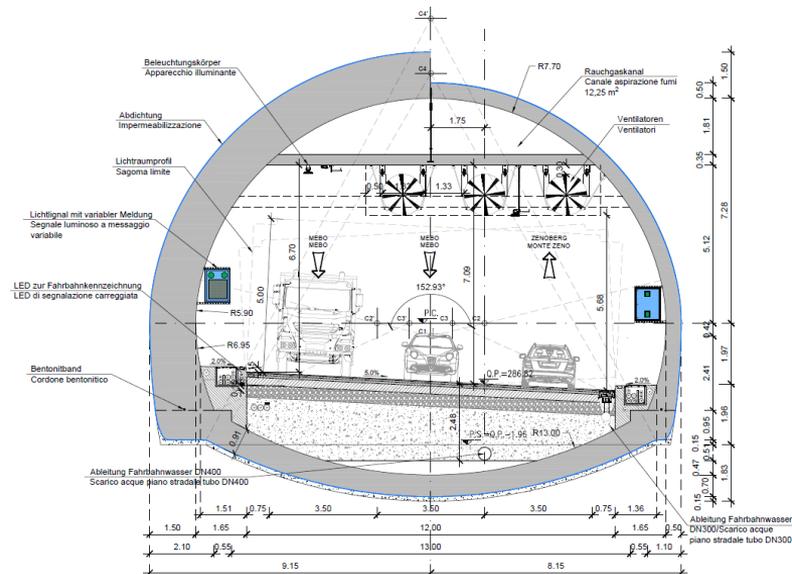
La sezione standard della galleria presenta una carreggiata a doppio senso di marcia, caratterizzata da 2 corsie da 3.5 m più 2 banchine da 0.75 m per una larghezza complessiva della piattaforma di **8.5 m (Sezione 2Sp)**.

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**.

E' prevista una ventilazione longitudinale in esercizio, con aspirazione dei fumi in caso di incendio in un canale superiore.



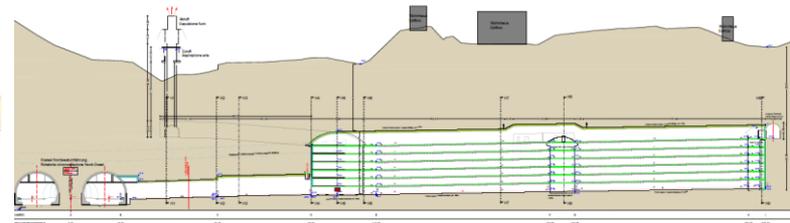
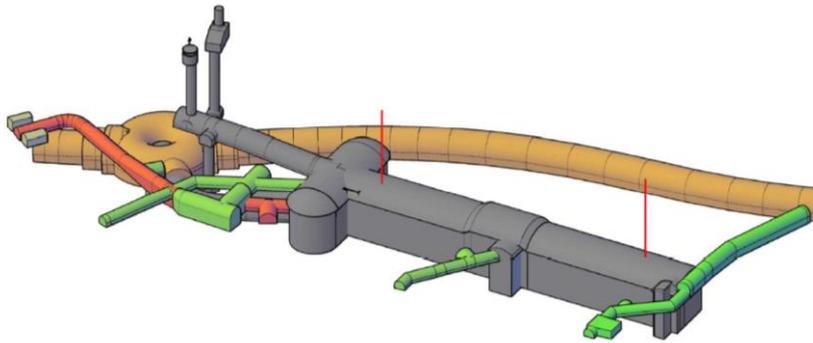
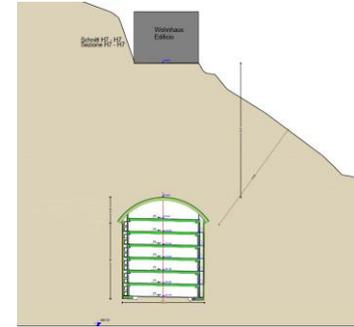
**Sezione 2Sp**



**Sezione Pb**

## ROTATORIA SOTTERRANEA LOTTO 2 E PARCHEGGIO SOTTERRANEO (PPP)

Il costruendo parcheggio sotterraneo a 7 piani ha una larghezza di circa 20 m, un'altezza di circa 25 m e una lunghezza di circa 170 m

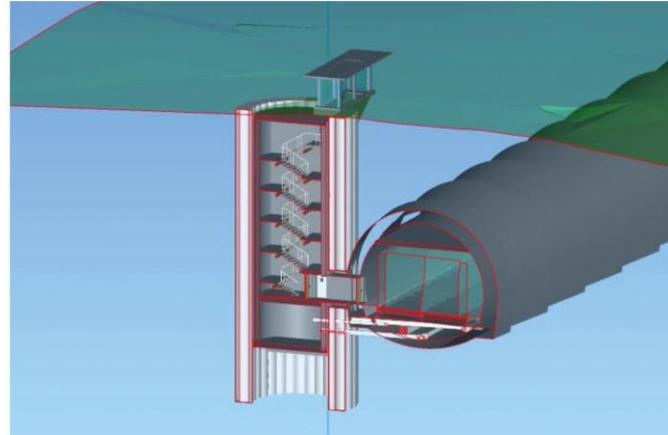
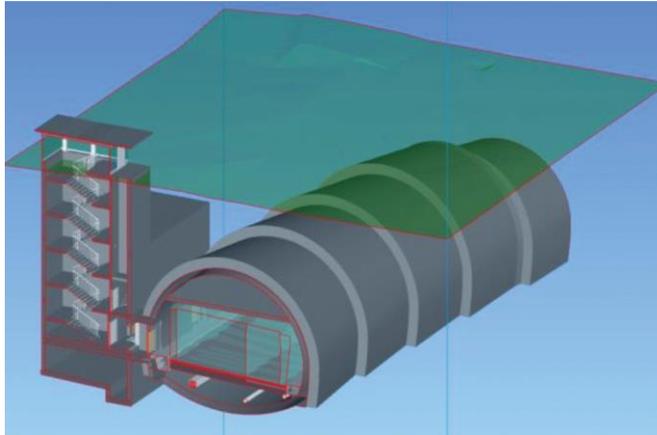
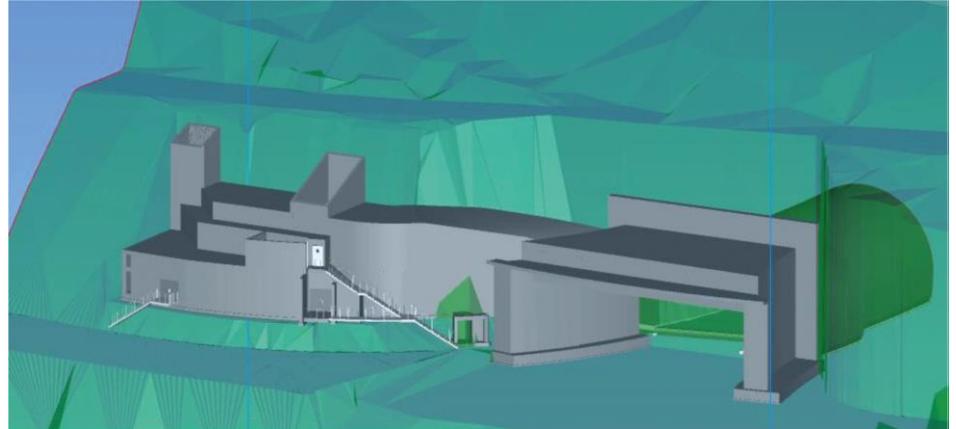
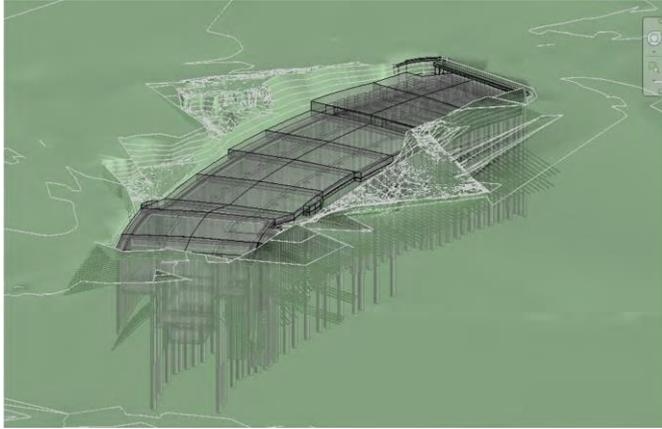


In fase di Progettazione Esecutiva di Dettaglio (in ambiente BIM, con restituzione anche del lotto precedente), nell'ottica di **minimizzare gli impatti sul territorio, migliorare le modalità costruttive e ridurre i tempi di costruzione**, sono state apportate delle ottimizzazioni al Progetto per Appalto, in particolare alle seguenti WBS:

- 1) **La galleria artificiale**
- 2) **La sezione 4Sp;**
- 3) **Lo scavo della galleria in materiale sciolto;**
- 4) **La rotatoria sotterranea.**



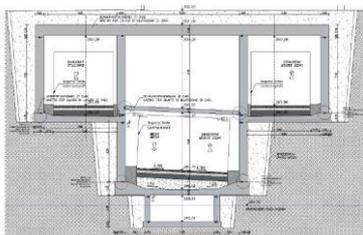
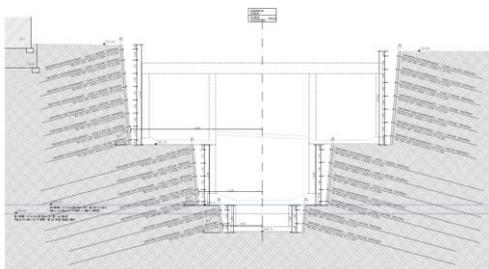
# progetto esecutivo di dettaglio in ambiente BIM



# 1) galleria artificiale

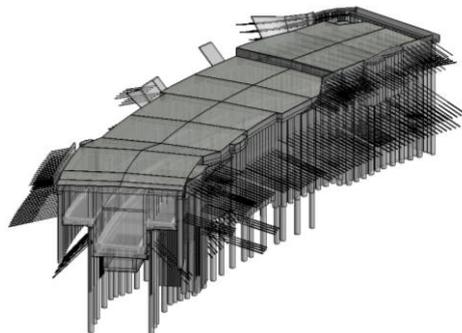
## PROGETTO PER APPALTO

- METODO COSTRUTTIVO **DOWN-TOP**
- SOIL NAILING
- SCATOLARE IN C.A.

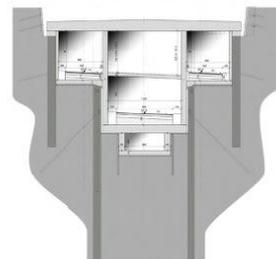


## PROGETTO ESECUTIVO DI DETTAGLIO

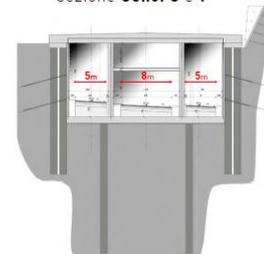
- METODO COSTRUTTIVO **TOP-DOWN**
- PARATIA DI PALI DI GRANDE DIAMETRO  $\phi 1200/1.5$  m (4638 m) e  $\phi 1000/1.2$  m (595 m) L = 27 m
- PALI DI SOSTEGNO PROVVISORI  $\phi 1200/6$  m (1..400 m) L = 13-21 m
- SOLETTE DI COPERTURA L<sub>max</sub>=30 m H=1.5 m - 3.65 m
- TIRANTI DA 4-5 TREFOLI DA 6" A INTERASSE 1.5 m (4.618 m)
- SOLETTE DI BASE E STRUTTURE INTERNE IN C.A. (7.397 m<sup>3</sup>, 1.612.595 kg)



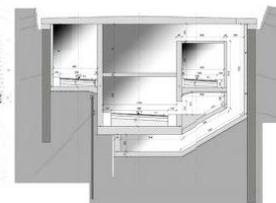
sezione **Concio 1**



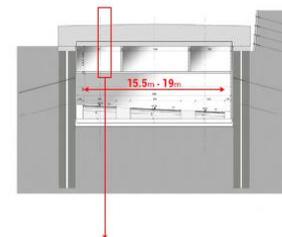
sezione **Conci 3 e 7**



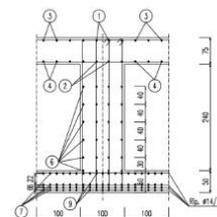
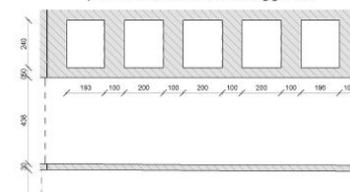
sezione **Concio 2**



sezione **Conci 8 e 9**



particolare soletta alleggerita



# 1) galleria artificiale: vantaggi del metodo TOP-DOWN

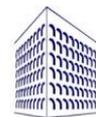
Maggiore sicurezza durante lo scavo, garantita dalla presenza di pali di grande diametro al posto della chiodatura del terreno.

Riduzione dell'impatto sull'ambiente circostante, in termini di polveri e rumore, lavorando al coperto anziché all'aperto, nonché del traffico di cantiere, grazie alla possibilità di accedere all'area di scavo direttamente dalla rotatoria del lotto precedente;

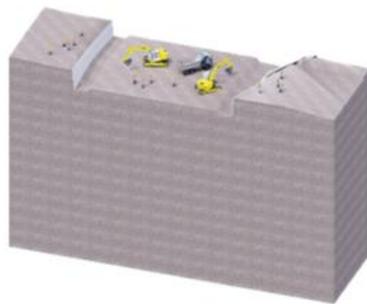
Possibilità di effettuare immediatamente il rinterro, riducendo l'interferenza con la viabilità.

Riduzione dei tempi di costruzione: la soluzione top-down è stata completata in circa un anno (1 turno/giorno, 5 giorni/settimana), nonostante tutti i vincoli a cui era sottoposto il cantiere, a fronte di un tempo di completamento della soluzione down-top superiore del 40%, a parità di costo totale.

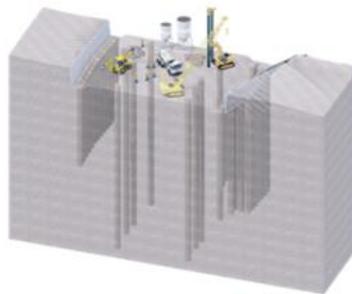
Aumento della sicurezza dello scavo anche nel primo tratto della galleria naturale, grazie alla riduzione delle dimensioni della sezione dello scavo.



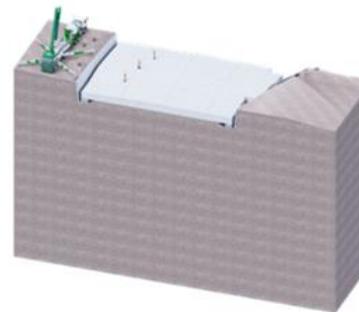
# 1) galleria artificiale: fasi esecutive



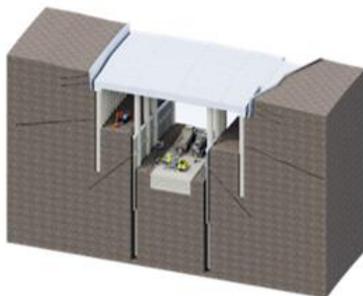
1) Approach excavation supported by soil nailing (slope 5/1)



2) Execution of large diameter piles



3) Execution of the roof slab



4) Excavation until reaching the main axis foundation level



5) Execution of the main axis slab and covering of the tunnel



6) Completion of the structure and demolition of intermediate piles



# 1) galleria artificiale



viste verso la galleria naturale  
struttura al rustico

# 1) galleria artificiale



viste verso la galleria naturale  
struttura interna in fase di completamento



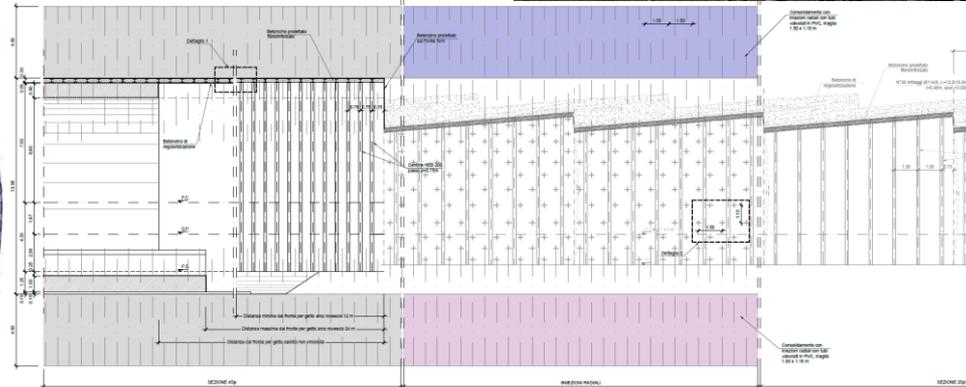
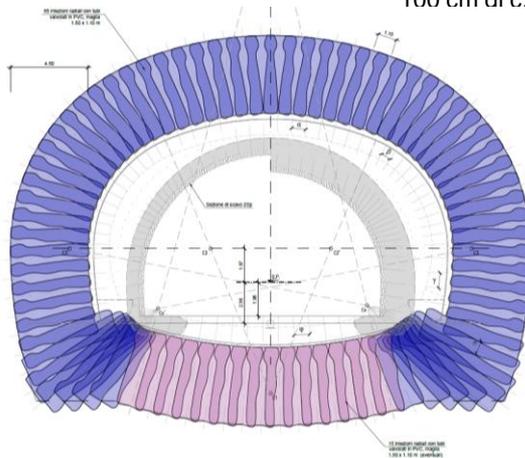
## 2) sezione 4Sp

Lo scavo della **Sezione 4Sp**, nel **PROGETTO ESECUTIVO DI DETTAGLIO** è stato modificato prevedendo:

- Lo scavo di un foro pilota con interventi e geometrie analoghe alla sezione «standard» a 2 corsie;
- 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



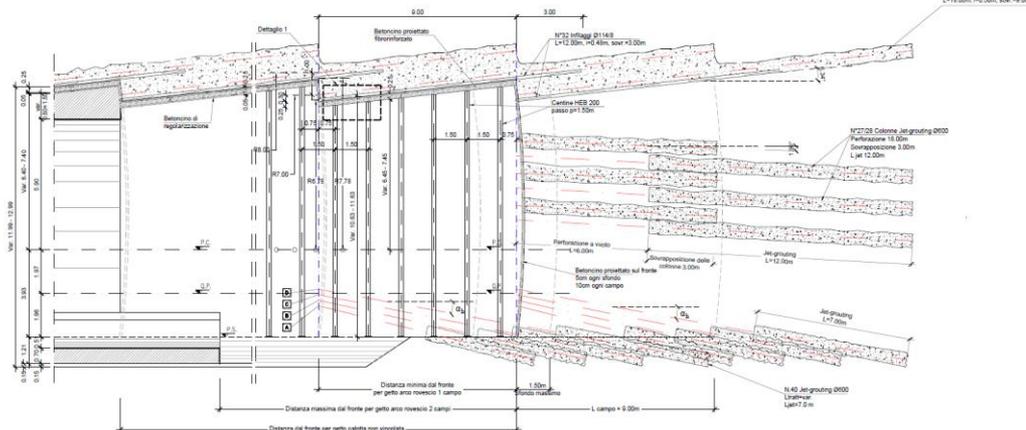
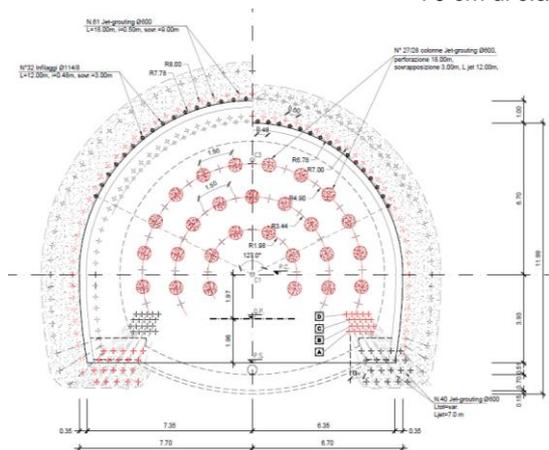
**Sezione 4Sp**

### 3) scavo della galleria in materiale sciolto

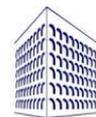
Per lo scavo della galleria naturale in materiale sciolto, all'interno dei DEPOSITI ALLUVIONALI con BASSE COPERTURE, sono previste sezioni di scavo troncoconiche che prevedono i seguenti interventi:

- INTERVENTI SUL CONTORNO: n. 61 trattamenti jet-grouting  $\phi 600$  mm, L = 18 m, i = 0.5 m  
n. 32 infilaggi  $\phi 114/8$ , L = 12 m, i = 0.48 m, su  $120^\circ$
- 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

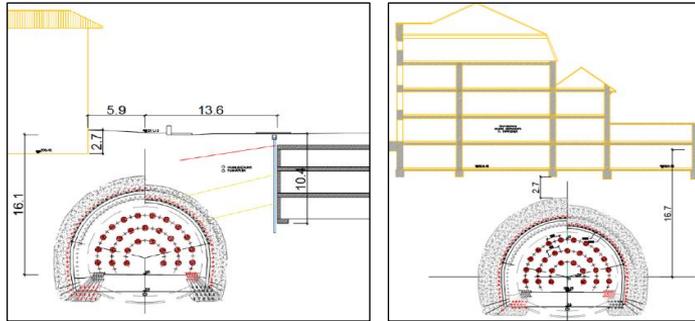
Sezione	Campi di avanzamento	Campo di applicazione (distanze dall'asse galleria)
2Sp_6	6 m	Edifici a meno di 6 m
2Sp_9	9 m	Edifici tra 6 e 15 m
2Sp_12	12 m	Edifici a più di 15 m



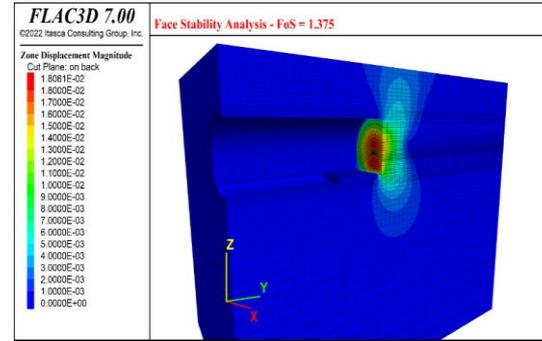
Sezione 2Sp\_9



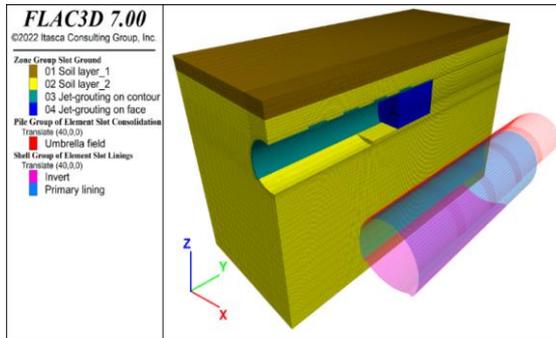
# 3) scavo della galleria in materiale sciolto



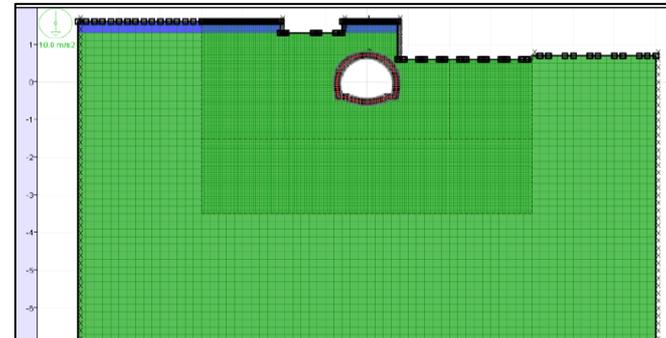
Condizioni al contorno: Sezione 2Sp\_9 vicino agli edifici (a sinistra) e Sezione 2Sp\_6 sotto gli edifici (a destra)



Face Stability Analysis – Sezione 2Sp\_12 – FoS = 1.375 – Spostamenti

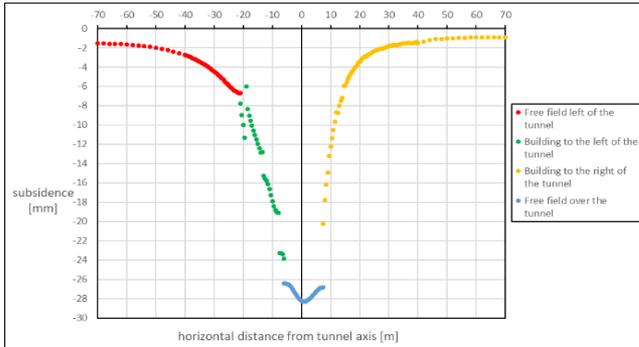


Analisi Step by Step FDM 3D per la definizione della curva di scarico – Section 2Sp\_12 – Zone omogenee (a sinistra) e elementi strutturali (a destra)

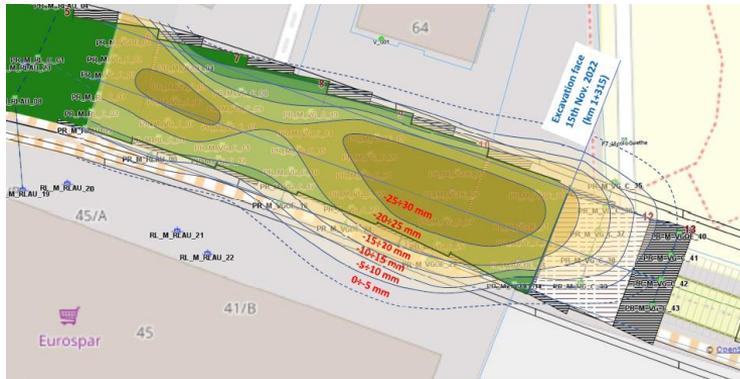


Analisi FDM 2D per la definizione dei cedimenti e delle sollecitazioni nei rivestimenti

# 3) scavo della galleria in materiale sciolto



Esempio di curve di subsidenza ricavata dai modelli numerici



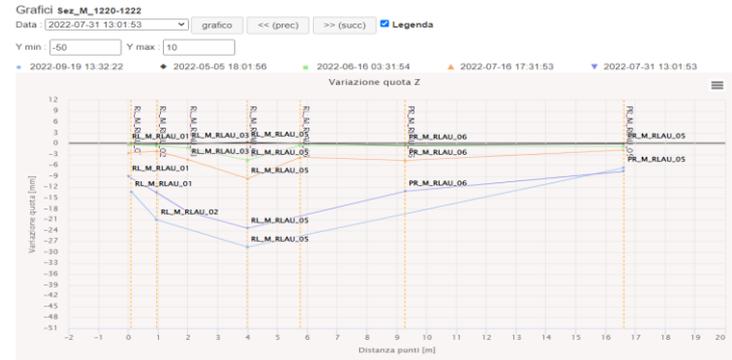
Monitoraggio in continuo durante l'avanzamento (GDTest)

## Attention and alarm thresholds values - Maximum subsidence (Smax) and distortion (Dmax) Monitoring section on surface

Reference Section	Smax free field [mm]		Smax under buildings [mm]		Dmax under buildings [-]	
	Attention	Alarm	Attention	Alarm	Attention	Alarm
2Sp; Pb; 2Sp*	50	80	30	50	1/350	1/200
4Sp	80	130				

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

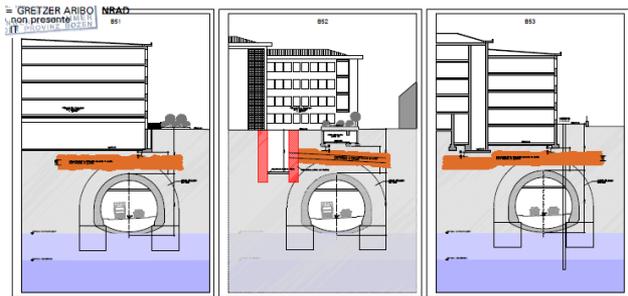
Reference Section	Smax free field [mm]		Smax under buildings [mm]		Dmax under buildings [-]	
	Attention	Alarm	Attention	Alarm	Attention	Alarm
2Sp; Pb; 2Sp*	15	25	10	15	1/1000	1/600
4Sp	65	95				



# 3) scavo della galleria in materiale sciolto: sottopasso delle scuole

## PROGETTO PER APPALTO

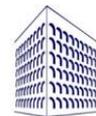
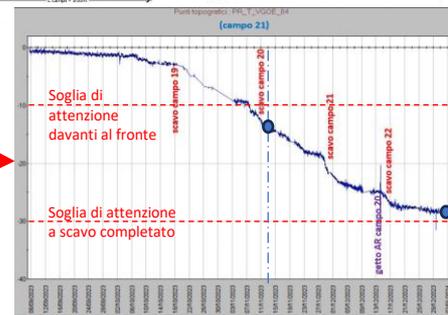
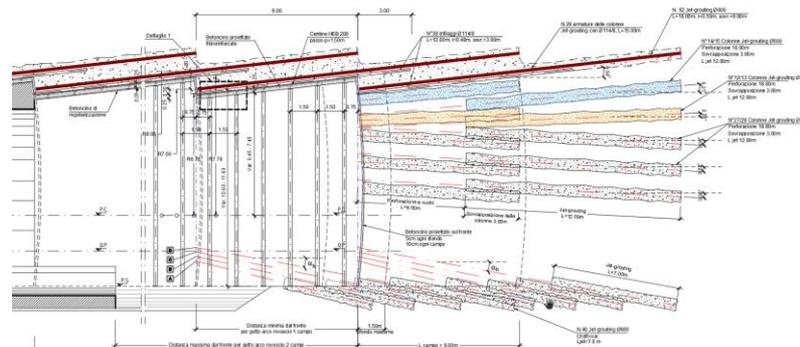
- SCAVO DI POZZI DA PIANO CAMPAGNA PER LA SUCCESSIVA ESECUZIONE DI INIEZIONI DI COMPENSAZIONE SUBORIZZONTALI



## PROGETTO ESECUTIVO DI DETTAGLIO

SCAVO A FORO CIECO CON CAMPI DA 9 m «RINFORZATI» CON

- ARMATURA DELLE COLONNE JET GROUTING SUL CONTORNO;
- INFITTIMENTO DELLE COLONNE JET-GROUTING SUL FRONTE



### 3) scavo della galleria in materiale sciolto



#### **ACCORGIMENTI COSTRUTTIVI**

- realizzazione degli infilaggi prima delle iniezioni jet-grouting con sistema Simmetrix, senza cementazione
- prefori con martello ad acqua e rivestimento e successivo riallineamento con stazione totale per iniezioni jet-grouting
- sistema di controllo automatico della pressione e del volume di iniezione jet-grouting

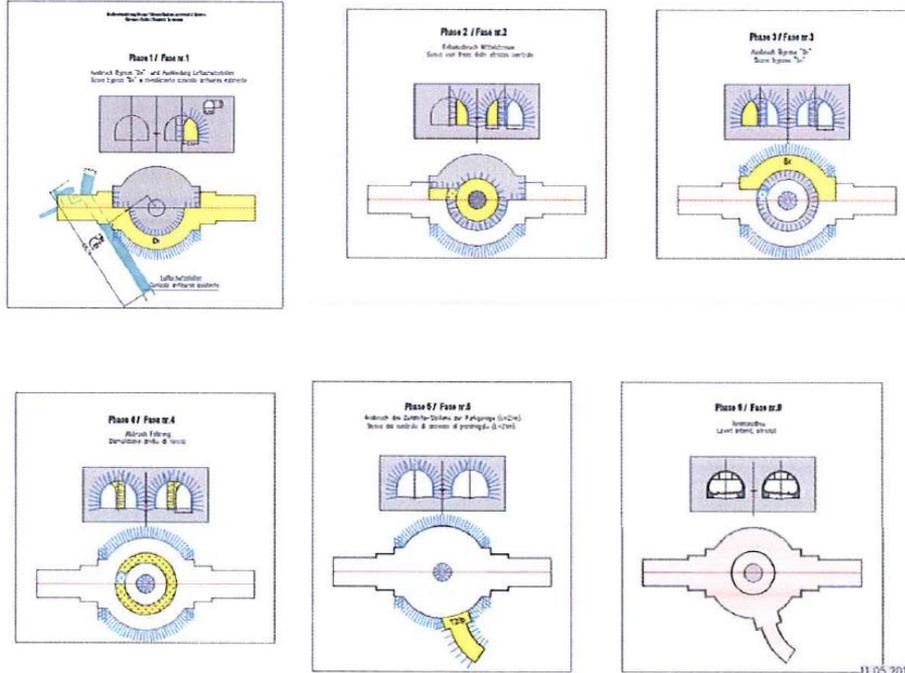
#### **RISULTATI**

I cedimenti superficiali in asse galleria sotto via Goethe sono a oggi mediamente di 3,5 cm con un massimo di 6 cm in un breve tratto di attraversamento di una litologia sfavorevole (riporto antropico sabbioso).

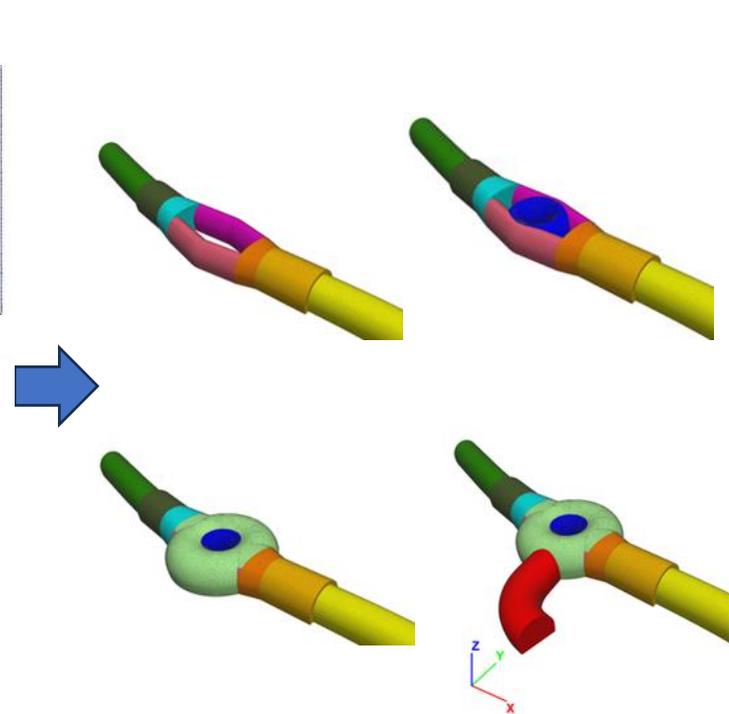
Nel tratto di sottopasso delle scuole i cedimenti massimi sono stati di 3 cm.

# 4) rotatoria sotterranea: fasi esecutive

## PROGETTO PER APPALTO



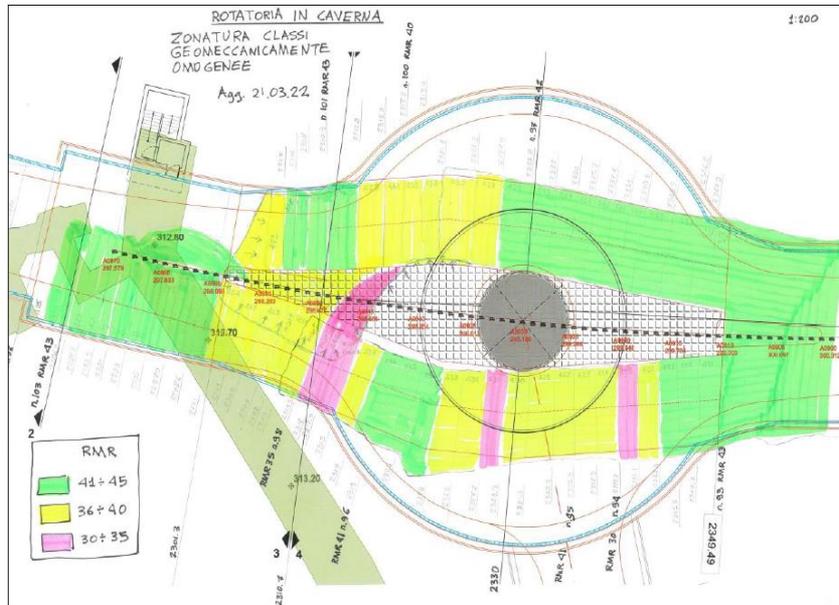
## PROGETTO ESECUTIVO DI DETTAGLIO



# 4) rotatoria sotterranea

## 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, il seguente set di parametri da adottare cautelativamente con riferimento alle condizioni peggiori riscontrate (Classe IV).



## PARAMETRI DI HOEK AND BROWN

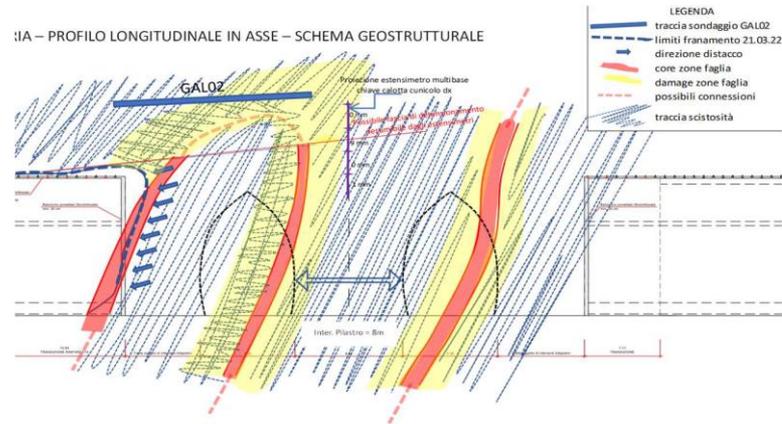
Analisi	GSI	$\sigma_{ci}$	$m_i$	Ei	D	$\gamma$	v
[-]	[-]	[MPa]	[-]	[MPa]	[-]	[KN/m <sup>3</sup> ]	[m]
GA6_IV_Rilievo n.94 – km 2+339	35	25	20	4300	0	27	0.2

## PARAMETRI DI MOHR-COULOMB (H=50m)

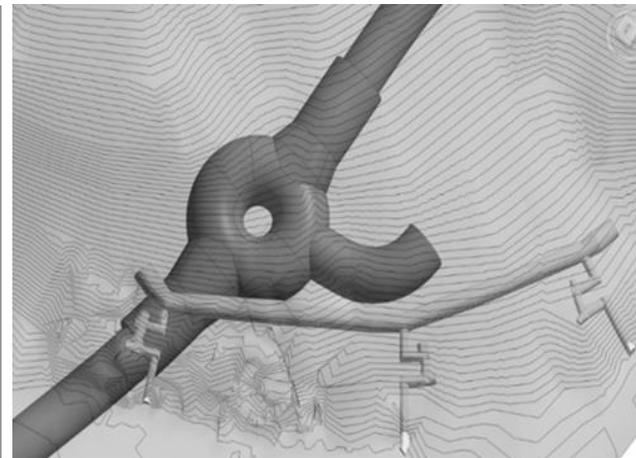
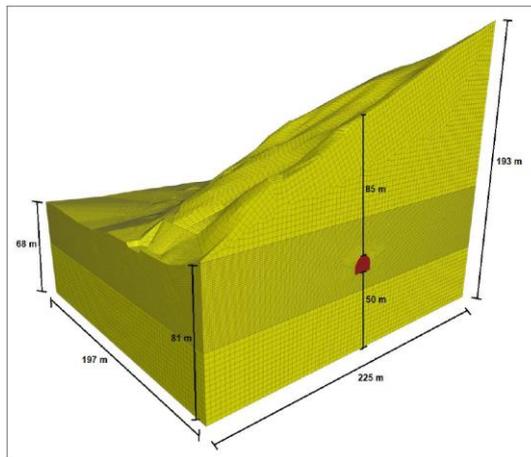
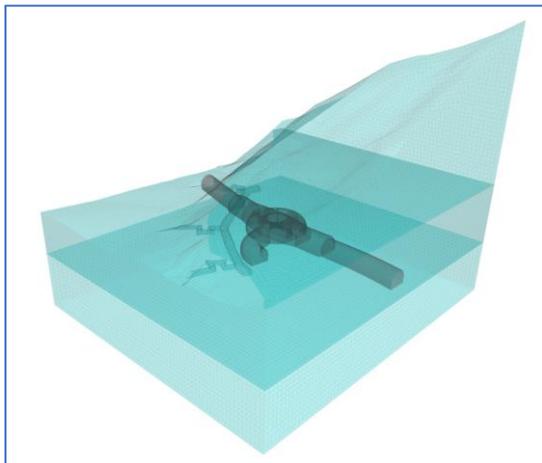
Analisi	$\gamma$	$\phi_{picco}$	$\phi_{res}$	$C_{picco}$	$C_{res}$	$E_{rm}$ (GSI picco)	$\psi$
[-]	[KN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[°]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[°]
GA6_Parametri di calcolo	27.0	50	45.3	0.268	0.197	488	6.24

Le analisi numeriche 3D sono state svolte sia con riferimento a un ammasso continuo equivalente (Classe IV) sia introducendo la principale discontinuità che interessa il pilastro centrale (Classe IV) in un mezzo continuo equivalente di caratteristiche migliori (Classe III).

IIA – PROFILO LONGITUDINALE IN ASSE – SCHEMA GEOSTRUTTURALE



## 4) rotatoria sotterranea: modello numerico 3D



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

Durante le fasi di analisi sono state via via applicate sul contorno delle cavità specifiche pressioni di confinamento atte a simulare la presenza degli interventi di rivestimento di prima fase (chiodature e betoncino). Queste pressioni (e la conseguente tipologia delle chiodature, in termini di lunghezza e intensità) sono state definite iterativamente per ridurre le plasticizzazioni e le deformazioni dell'ammasso, soprattutto in corrispondenza del pilastro centrale, partendo da un set di interventi minimo.

## 4) rotatoria sotterranea

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

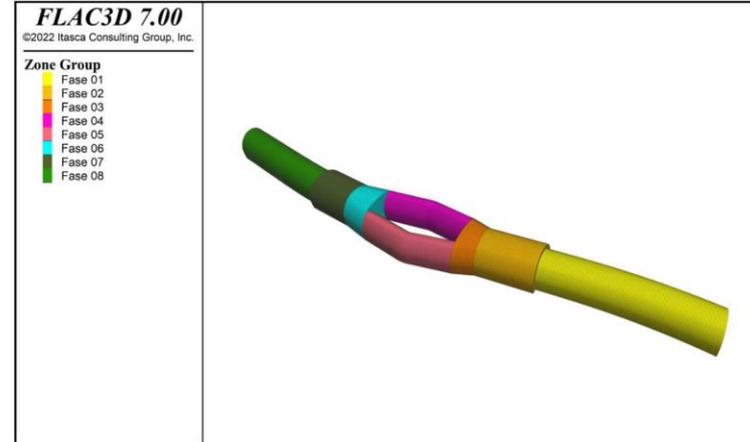
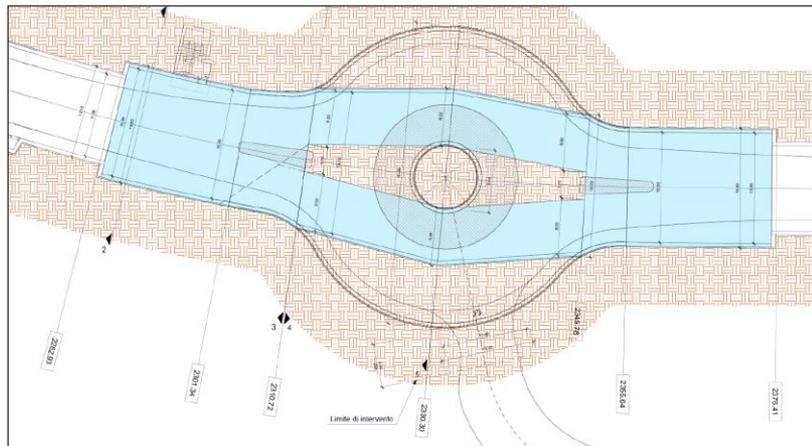
**Fase 1:** Scavo della galleria principale, da est verso ovest, applicando la sezione tipo 2Sp con larghezza interna di 11.8 m.

**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.

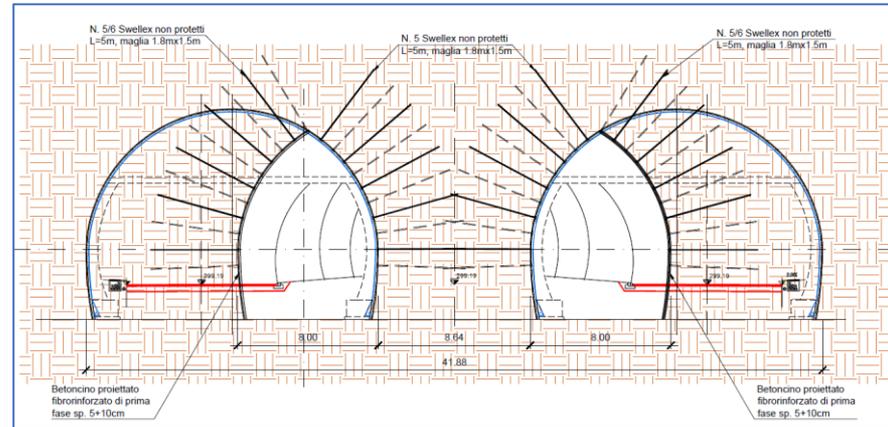
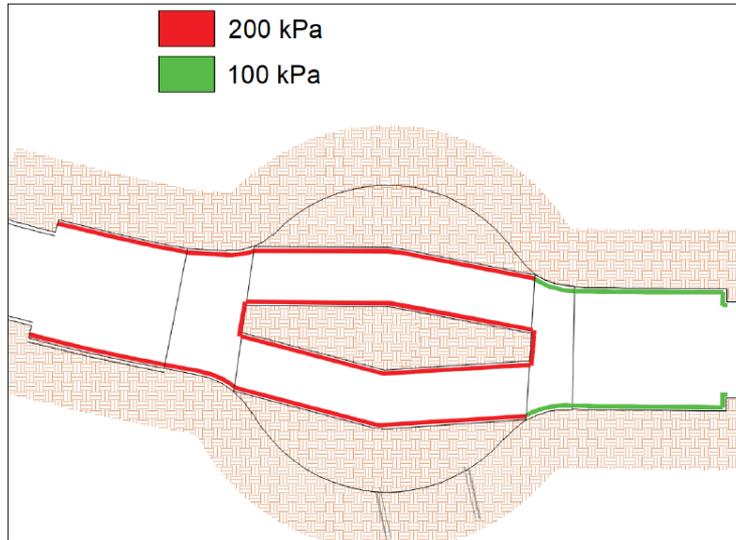
**Fasi 4 e 5:** Scavo dei due cunicoli laterali di larghezza massima pari a 8 m lasciando un setto di roccia tra i due cunicoli di spessore variabile da circa 3.50 m fino a 8.50 m.

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



# 4) rotatoria sotterranea

FASI ESECUTIVE DELLA ROTATORIA E FASI DI CALCOLO DELL'ANALISI NUMERICA: FASI 1 ÷ 8



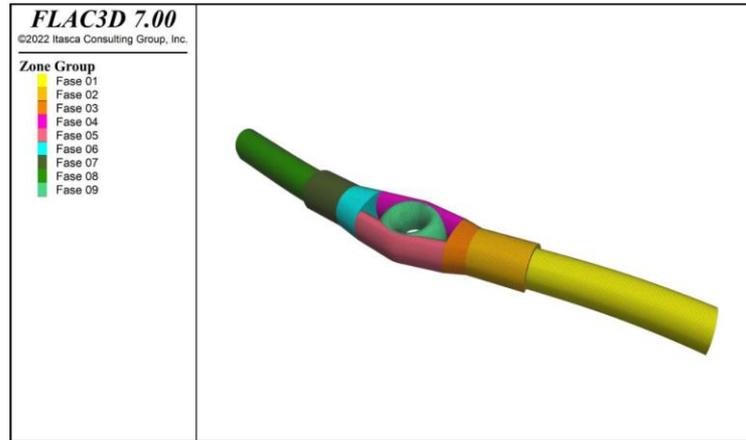
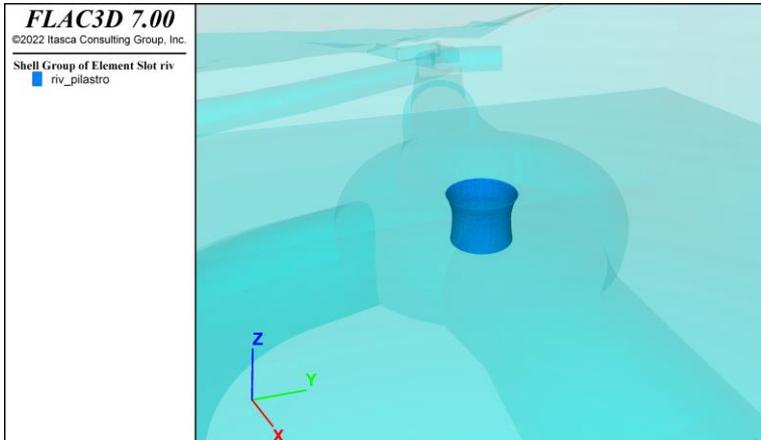
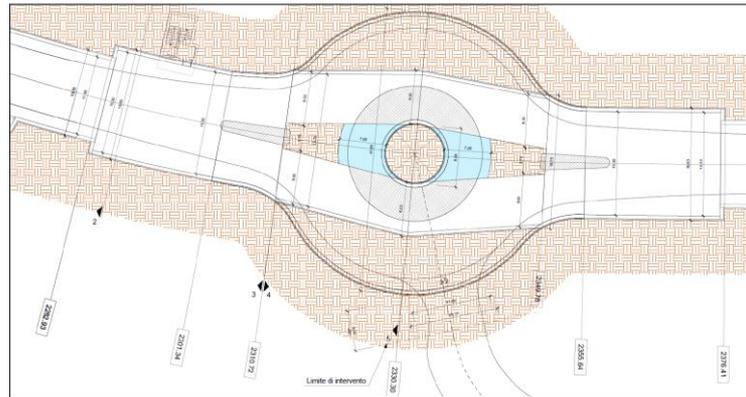
## 4) rotatoria sotterranea

### 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).

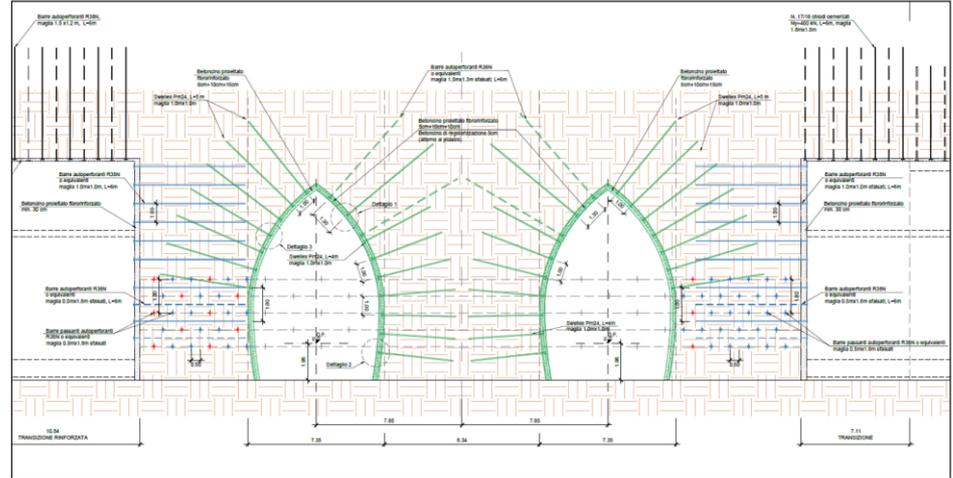
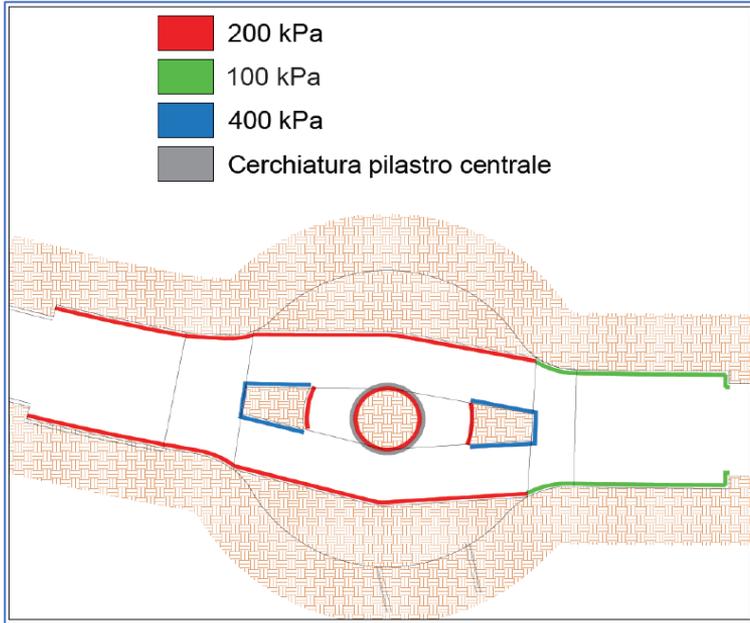
A seguito dello scavo dei cunicoli trasversali si identificano il pilastro centrale in roccia a pianta circolare e due setti laterali in roccia a pianta trapezia.

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.



# 4) rotatoria sotterranea

FASI ESECUTIVE DELLA ROTATORIA E FASI DI CALCOLO DELL'ANALISI NUMERICA: FASE 9

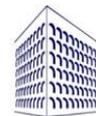
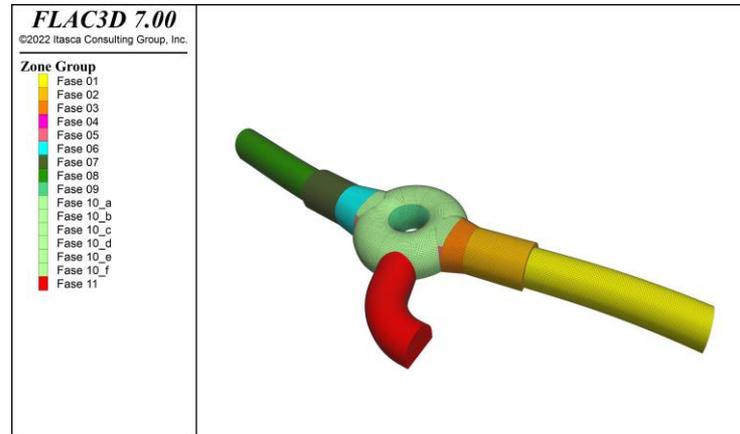
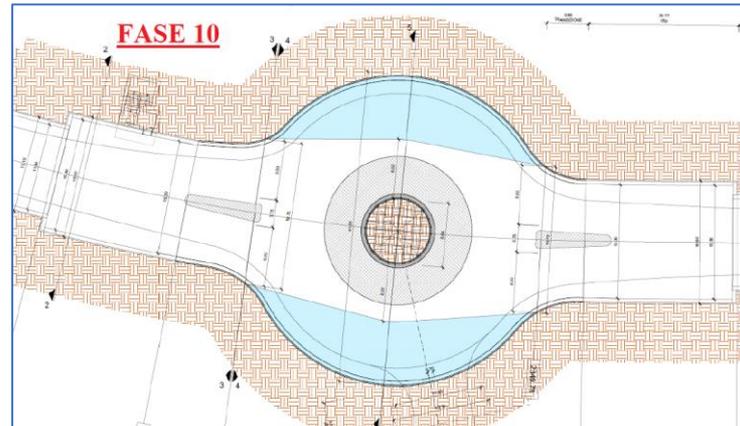
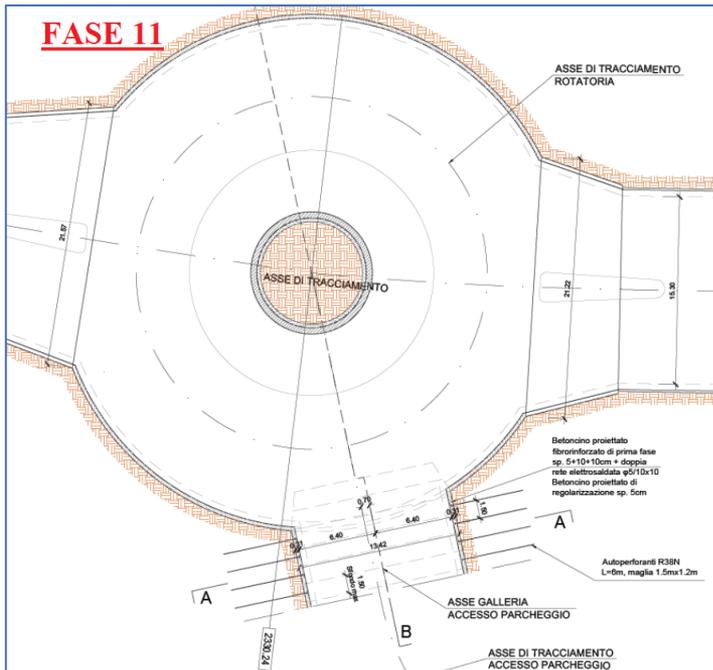


# 4) rotatoria sotterranea

## 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.



## 4) rotatoria sotterranea

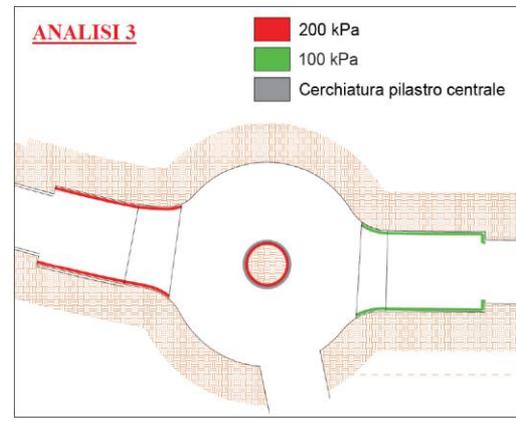
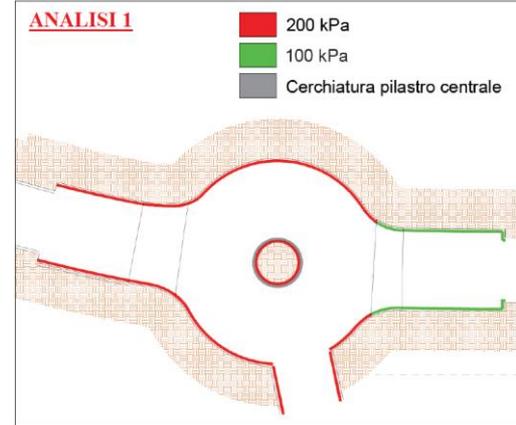
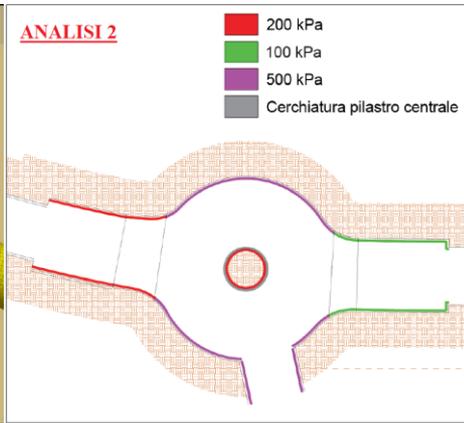
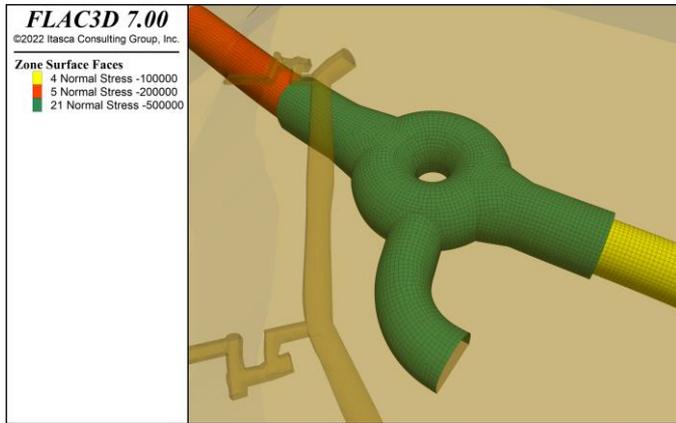
### FASI ESECUTIVE DELLA ROTATORIA E FASI DI CALCOLO DELL'ANALISI NUMERICA: FASI 10 E 11

Le Fasi 10 e 11 sono state svolte in tre distinte modalità, in modo da esplorare diverse risposte dell'ammasso e diverse condizioni di sollecitazione delle strutture definitive (si veda Fase 12).

**Analisi 1:** sul contorno dello scavo di allargo della rotatoria e della galleria di accesso al parcheggio sotterraneo è applicata una pressione di confinamento minima pari a 200 kPa, in modo da massimizzare le convergenze e le plasticizzazioni.

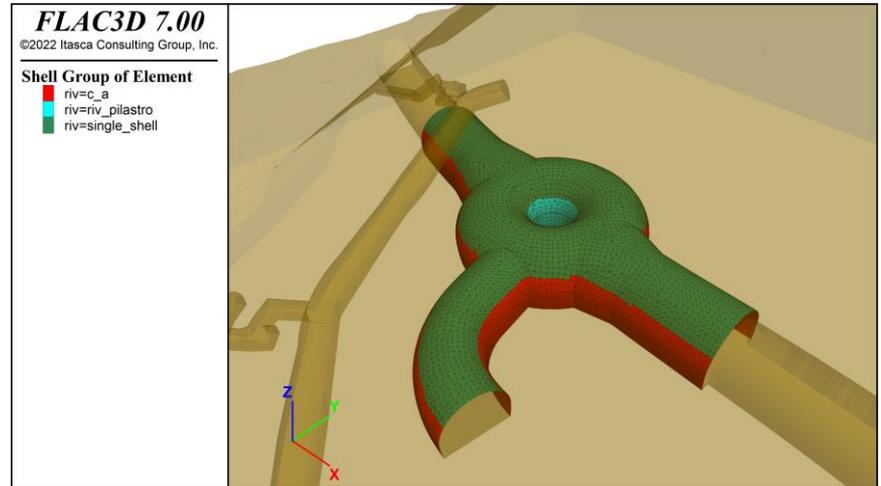
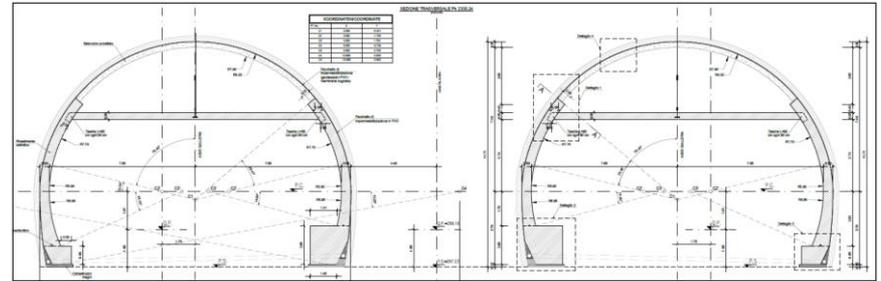
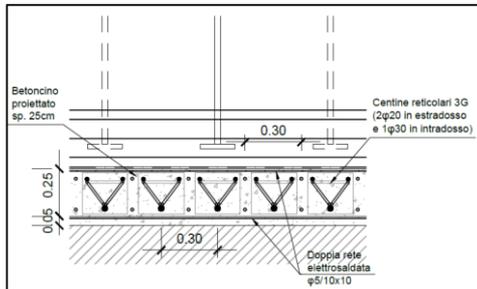
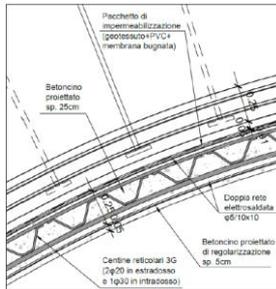
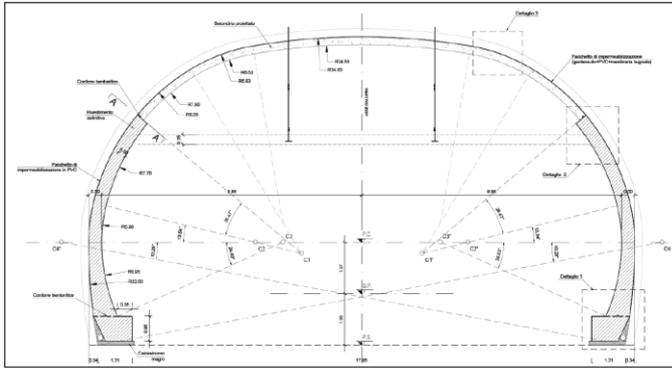
**Analisi 2:** sul contorno dello scavo di allargo della rotatoria e della galleria di accesso al parcheggio sotterraneo viene applicata una pressione di confinamento pari a 500 kPa, in modo da massimizzare le sollecitazioni sui rivestimenti definitivi nella Fase 12.

**Analisi 3:** sul contorno dello scavo di allargo della rotatoria e della galleria di accesso al parcheggio sotterraneo non viene applicata alcuna pressione di confinamento, per massimizzare le sollecitazioni sulla cerchiatura del pilastro centrale.



# 4) rotatoria sotterranea

**Fase 12:** Installazione dei rivestimenti definitivi (elementi strutturali di tipo shell) e rimozione di tutte le pressioni di confinamento applicate che simulano i rivestimenti di prima fase.



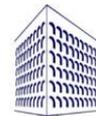
## 4) rotatoria sotterranea: scavo gallerie laterali



## 4) rotatoria sotterranea: scavo cunicoli trasversali



## 4) rotatoria sotterranea: profilatura pilastro centrale



## 4) rotatoria sotterranea: cerchiatura pilastro centrale



## 4) rotatoria sotterranea: cerchiatura pilastro centrale



## 4) rotatoria sotterranea: demolizione setti laterali



Inizio costruzione Secondo Lotto: aprile 2021

Completamento scavo galleria artificiale e tratta in roccia e inizio scavi galleria naturale in materiale sciolto: aprile 2022

Previsione completamento scavi in sotterraneo: aprile 2025

Avanzamento medio scavo in roccia 25 m/sett.

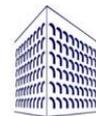
Avanzamento medio scavo in terreno sciolto 0,5 m/g (sotto le scuole) ÷ 1 m/g (sotto via Goethe)

Lavoro all'aperto su 8 h/g, 5 gg/settimana

Lavoro in sotterraneo su 24 h/g, 6 gg/sett., attività rumorose solo per 8 h/g

A oggi, restano da realizzare:

- circa 300 m di scavo di galleria in materiale sciolto, con 2 piazzole di sosta
- 4 uscite di sicurezza (due nel tratto in roccia, due nel tratto in terreno alluvionale)
- il completamento della rotatoria sotterranea (Fasi 10, 11, 12)
- il completamento delle iniezioni e l'allargo della sezione 4Sp.



GRAZIE PER L'ATTENZIONE

