0	09/2018	PRIMA EMISSIONE	SPIGARELLI	GATTI	CASSANI
Revisione	**Data**	**Oggetto revisione**	**Redatto**	**Verificato**	**Approvato**

REGIONE LIGURIA

#ItaliaSicura
Presidenza del Consiglio dei Ministri

COMUNE DI GENOVA

PIANO STRALCIO PER LE AREE METROPOLITANE E LE AREE URBANE CON ALTO LIVELLO DI POPOLAZIONE ESPOSTA AL RISCHIO DI ALLUVIONI

Presidenza del Consiglio dei Ministri

PRESIDENZA DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI
COMMISSARIO STRAORDINARIO
delegato per l'attuazione degli interventi inseriti nell'A.d.P. del 16.09.2010 e ss.ii.
(ex art. 10 del D.L. n. 91 del 24.06.2014)

Commissario straordinario
Dott. Giovanni TOTI

PROGETTISTI

CAPOGRUPPO MANDATARIA:

ROCKSOIL S.p.A.
CONSULENZA E ASSISTENZA TECNICA
nel campo della GEOINGEGNERIA

MANDANTI:

art ambiente risorse territorio

HYDRODATA INGEGNERIA DELLE RISORSE IDRICHE

Ing. Mario CANGIANO

Ing. Paolo GALLO

Ing. Francesco DE SANCTIS

Dott.ssa Francesca GIOMI

RESPONSABILE STRUTTURA COMMISSARIALE
Ing. Luca BERRUTI

RESPONSABILE UNICO PROCEDIMENTO
Ing. Stefano PINASCO

Progettista responsabile integrazioni prestazioni specialistiche e Direttore Tecnico della mandataria.
Rocksoil S.p.A.
Ing. Giovanna Cassani
Ord. Ingg. Milano N° 20997



Progettista/Progettisti responsabili elaborato
Rocksoil S.p.A.
Ing. Giovanna Cassani
Ord. Ingg. Milano N° 20997



Intervento/Opera

SECONDO LOTTO DEI LAVORI RELATIVI ALLA REALIZZAZIONE DELLA GALLERIA SCOLMATRICE DEL TORRENTE BISAGNO IN COMUNE DI GENOVA

PROGETTO ESECUTIVO

N° Progr. ----

Codice elaborato: BIS2E - R - PMS00 - RE04 - 0

Oggetto della tavola

PIANO DI MONITORAGGIO DI SUPERFICIE

Studio specifico di interferenza tra lo scavo e il "Forte San Giuliano"

Scala: -

Data: 14 SETT. 2018

Codice FILE: BIS2E-R-PMS00-RE04-0.DWG

I DISEGNI E LE INFORMAZIONI IN ESSI CONTENUTE SONO PROPRIETA' ESCLUSIVA DELLA STRUTTURA COMMISSARIALE E NON POSSONO ESSERE MODIFICATI, RIPRODOTTI, RESI PUBBLICI O UTILIZZATI PER USI DIFFERENTI DA QUELLI PER CUI SONO STATI REDATTI, SALVO AUTORIZZAZIONE SCRITTA.

INDICE

1 INTRODUZIONE 2
2 OPERE IN SOTTERRANEO – DESCRIZIONE GENERALE 3
3 CONTESTO INTERFERITO 7
3.1 Cenni generali sul complesso monumentale del Forte San Giuliano 7
3.2 Sopralluogo conoscitivo 9
4 CONTESTO GEOMECCANICO 14
4.1 Quadro conoscitivo generale 14
4.2 Scolmatore Fereggiano – tratta scavata in corrispondenza del Forte San Giuliano 16
4.2.1 Cenni generali 16
4.2.2 Estratti documentazione tecnica di riferimento 17
4.3 Sintesi del quadro geologico-geomeccanico 20
5 ANALISI DEGLI EFFETTI INDOTTI DALLO SCAVO DELLA GALLERIA 21
5.1 Inquadramento generale dell'attività 21
5.2 Sezioni di analisi 21
5.2.1 Sezione 1 – pk ≅ 0+194 – Caserma Nord Forte San Giuliano 22
5.2.2 Sezione 2 – pk ≅ 0+100 – Caserma Forte San Giuliano - Mensa 22
5.3 Caratteristiche fisico-meccaniche dell'ammasso roccioso 22
5.4 Condizioni Idrogeologiche 22
5.5 Procedura operativa di analisi 23
5.6 Analisi dei carichi 23
5.7 Modellazione dei rivestimenti 23
5.7.1 Modellazione dei bulloni 26
5.7.2 Modellazione dei prerivestimenti 26
5.7.3 Modellazione dei rivestimenti definitivi gettati in opera 26
5.8 Fasi di calcolo 26
5.8.1 Modellazione scavo galleria Fereggiano 26
5.8.2 Step di calcolo 27
5.9 Sezione 1 – Caserma Nord Forte San Giuliano 28
5.9.1 Descrizione sezione di calcolo 28
5.9.2 Risultati dell'analisi in assenza di falda 29
5.9.3 Risultati dell'analisi in presenza di falda 31
5.10 Sezione 2 – Caserma Forte San Giuliano - Mensa 33
5.10.1 Descrizione sezione di calcolo 34
5.10.2 Risultati dell'analisi in assenza di falda 35
5.10.3 Risultati dell'analisi in presenza di falda 38
5.11 Valutazione categoria di danno 41
5.11.1 Cenni teorici procedura operativa per la valutazione della categoria di danno 41
5.11.2 Sezione 1 – Caserma Nord Forte San Giuliano 45
5.11.3 Sezione 2 – Caserma Forte San Giuliano - Mensa 47
6 SISTEMA DI MONITORAGGIO 49
7 CONCLUSIONI 50

1 INTRODUZIONE

Il presente documento ha come oggetto l'approfondimento progettuale inerente il passaggio della galleria scolmatrice del torrente Bisagno in corrispondenza del complesso monumentale del Forte San Giuliano.

Lo scavo della galleria scolmatrice del torrente Bisagno risulta essere attaccato, per la tratta in disamina, sia da mare che da monte; in particolare i primi 40 m di galleria dall'imbocco ubicato al di sotto degli archi di C.so Italia saranno scavati con metodo tradizionale (num. 5 campi di scavo e consolidamento,) mentre la restante porzione di galleria interferente con il complesso monumentale del Forte sarà realizzata con sistema di scavo meccanizzato mediante impiego di fresa TBM (di tipo aperto, da roccia), procedendo appunto da monte (partenza fresa dal camerone di montaggio posto in sotterraneo, all'altezza del quartiere Terpi) fino all'incontro del fronte di attesa posto al termine della tratta scavata in tradizionale da mare. La tratta scavata con mezzi tradizionali presenta sviluppo tale da superare il passaggio al di sotto della carreggiata stradale di C.so Italia, intestandosi entro l'ammasso roccioso sul quale si imposta il volume residuale del terrapieno lato mare del Forte San Giuliano.

La valutazione dei possibili effetti indotti sui differenti manufatti ubicati entro il sedime limitato dai terrapieni del forte è stata condotta, in prima analisi, svolgendo calcolazioni numeriche su modelli ad elementi finiti. Nel seguito del documento sono pertanto illustrate le procedure operative attuate per la costruzione dei modelli stessi, l'interpretazione dei risultati da essi forniti e la conseguente valutazione del livello di danno atteso sui fabbricati interferiti.

Pur considerando la molteplicità delle assunzioni di natura conservativa riferite alle condizioni geomeccaniche dell'ammasso, alle assunzioni rispetto al piano di imposta delle fondazioni e alle condizioni idrogeologiche del contesto, le analisi riferite ai due edifici considerati (caserma nord ed edificio mensa) restituiscono categorie di danno pari a 0.

2 OPERE IN SOTTERRANEO – DESCRIZIONE GENERALE

L'impianto progettuale prevede che la galleria scolmatrice del Bisagno sia scavata per la maggior parte con sistema meccanizzato, impiegando una TBM da roccia di tipo aperto. Nello specifico, gli interventi in sotterraneo per il transito della portata scolmata dall'alveo Bisagno ed il recapito della medesima a mare, comprendono, da monte verso valle, un primo tratto di galleria naturale a sezione policentrica, scavata con metodo tradizionale (lunghezza 645.906 m), un camerone ed una camera di lancio necessarie all'assemblaggio della fresa TBM (lunghezza di tali elementi pari rispettivamente a 50 m e 120 m), un successivo tratto di galleria naturale scavato con sistema meccanizzato esteso sin quasi allo sbocco a mare dello scolmatore (lunghezza 5785.867 m), un settore finale di galleria naturale scavato con metodo tradizionale in corrispondenza del passaggio al di sotto di Corso Italia (lunghezza 48 m).

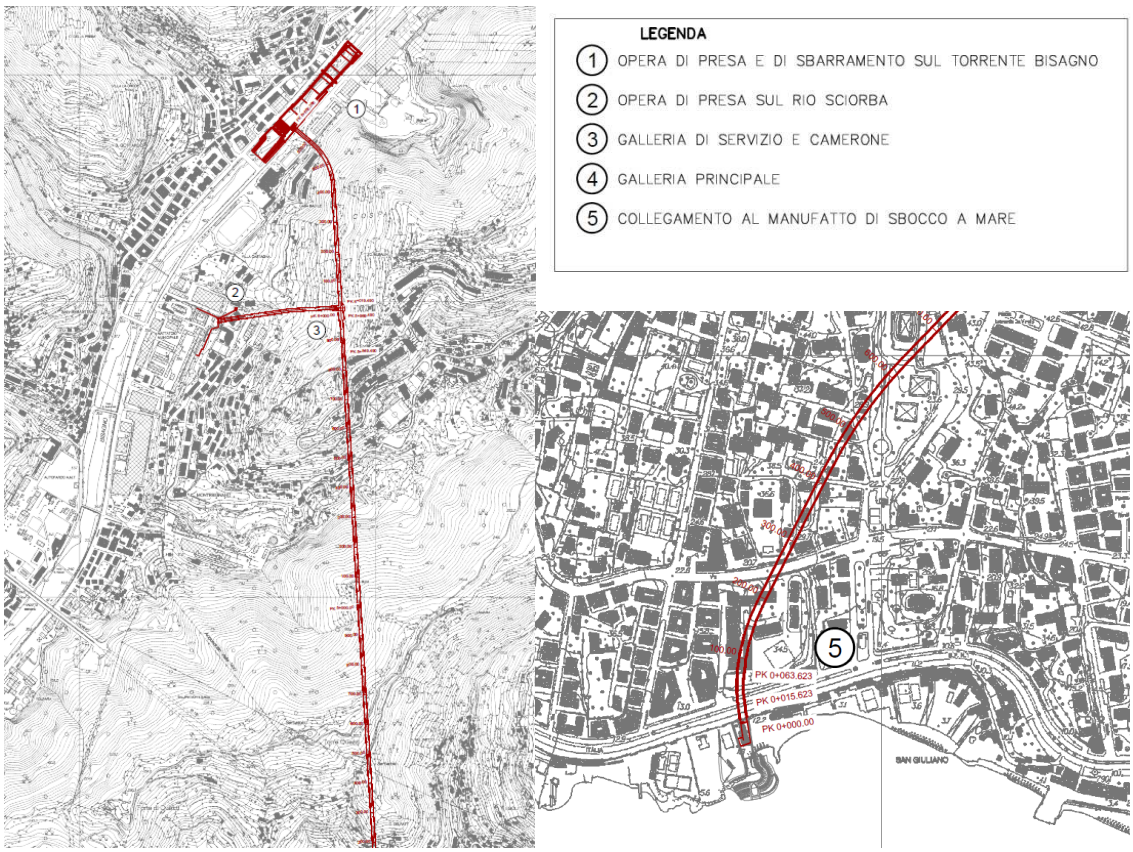


Figura 2-1 – Inquadramento generale dell'intervento

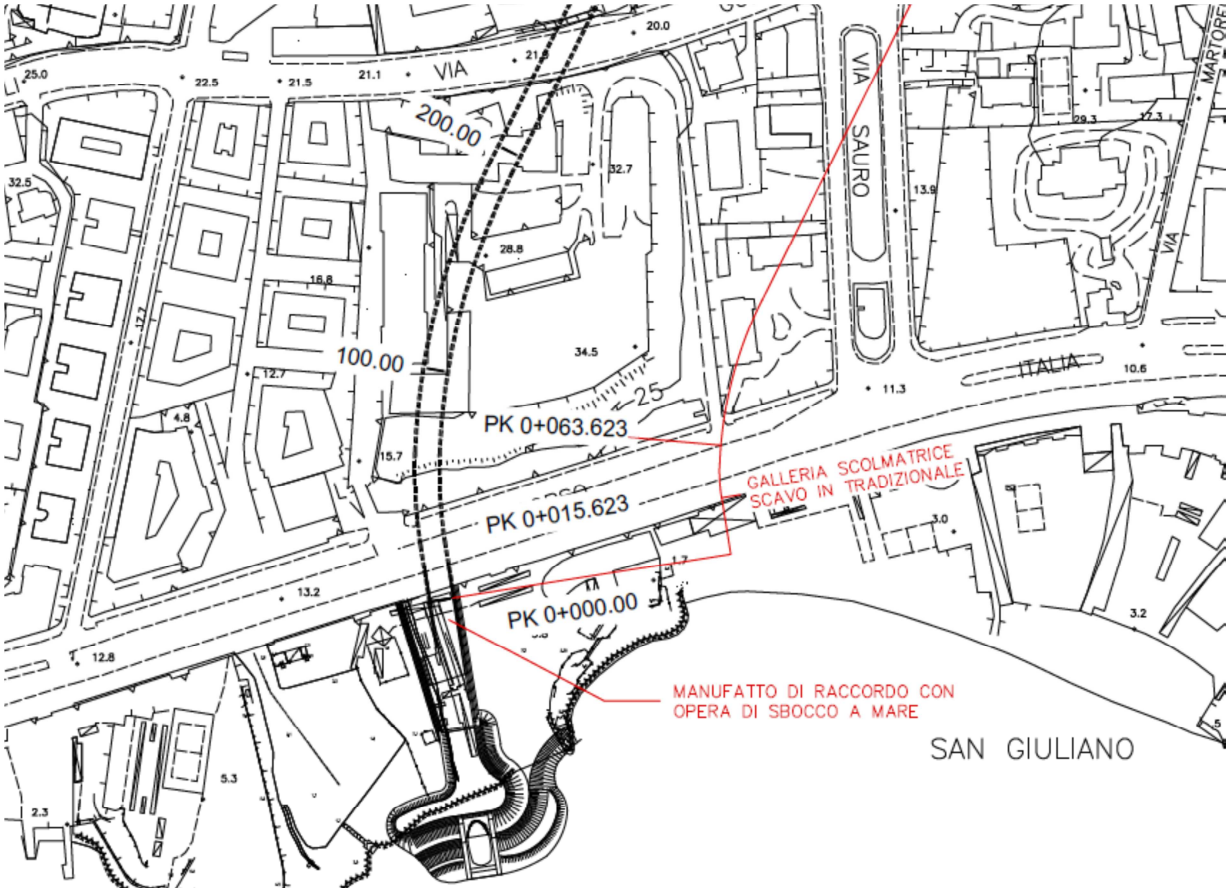


Figura 2-2 –inquadramento sbocco a mare con passaggio in corrispondenza del Forte San Giuliano

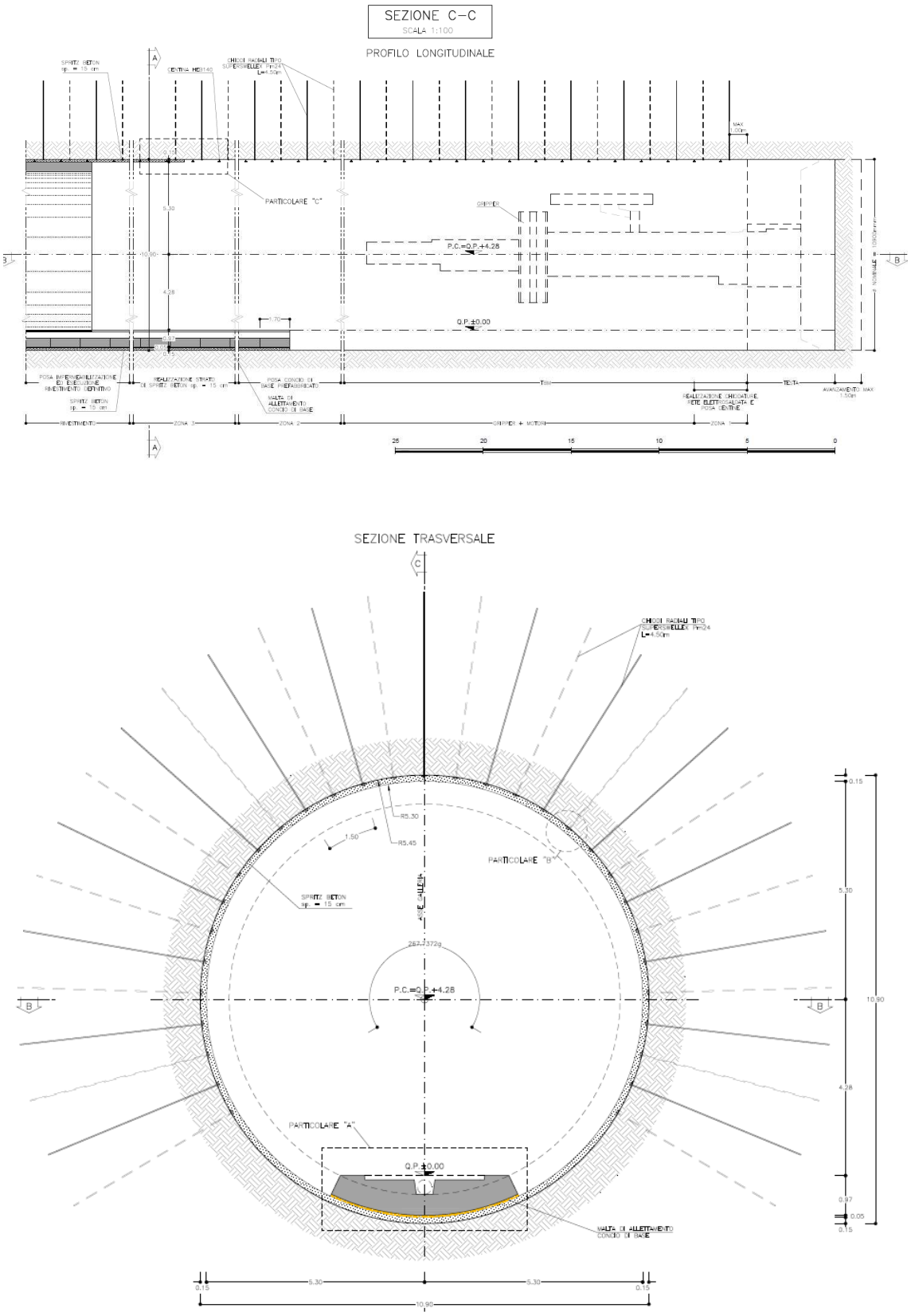


Figura 2-3 – Galleria scolmatrice – tratta scavata con sistema meccanizzato – Profilo longitudinale e sezione tipo interventi di sostegno provvisionale

In particolare lo scavo con fresa TBM si svilupperà per m 5785 dalla testata della camera di lancio per innestarsi sul breve tratto di galleria scavato con metodo tradizionale, da mare, al di sotto di C.so Italia e del Forte San Giuliano. Si raggiungono coperture massime dell'ordine dei 280 m in corrispondenza del rilievo di torre Quezzi. Gran parte della tratta cittadina presenta ricoprimenti prossimi ai 30 m, fatta eccezione per gli ultimi 2000 m verso lo sbocco a mare laddove lo spessore di roccia in calotta scende su valori prossimi ai 10 m in corrispondenza del complesso di edificazioni insistenti sull'area del forte San Giuliano. La scelta progettuale di intervenire, nell'ultimo tratto verso mare, con tecnica tradizionale di scavo è discesa dalla delicatezza del contesto, caratterizzato da modestissime coperture in corrispondenza dell'asse stradale di C.So Italia e del Forte San Giuliano, unitamente alla constatazione delle specifiche condizioni geomeccaniche dell'ammasso interessato dallo scavo nonché della natura dei materiali di riporto sotto il sedime di C.so Italia. Sono state infatti previste sezioni di avanzamento caratterizzate da interventi di consolidamento e preconsolidamento/presostegno al contorno ed al fronte, molto più efficacemente attuabili con metodo di scavo tradizionale piuttosto che con sistema meccanizzato.

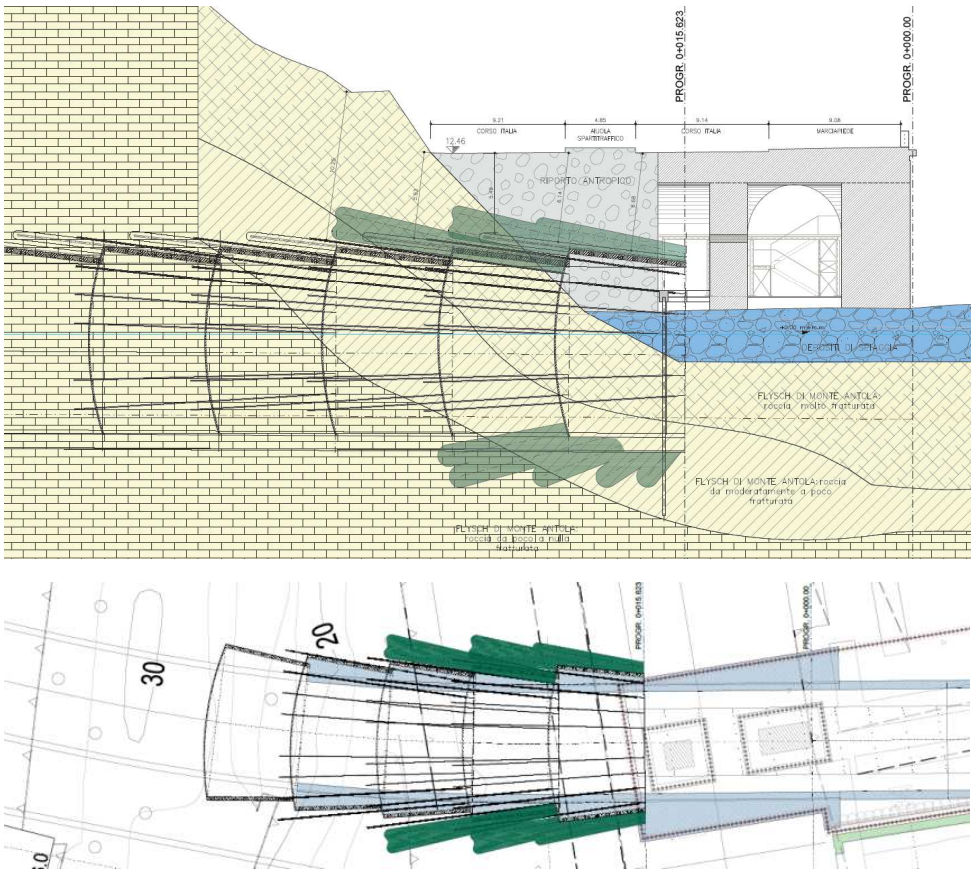


Figura 2-4 – Profilo longitudinale e stralcio planimetrico scavo in tradizionale galleria scolmatrice – tratta a mare (sotto attraversamento C.so Italia)

3 CONTESTO INTERFERITO

3.1 Cenni generali sul complesso monumentale del Forte San Giuliano

La galleria scolmatrice del torrente Bisagno, all'altezza del sotto-attraversamento del Forte San Giuliano, è sostanzialmente prossima allo sbocco a mare, passando la stessa al di sotto di Corso Italia (immediatamente a valle del terrapieno lato mare del complesso) e congiungendosi poco oltre al costruendo manufatto di raccordo con la galleria scolmatrice del Rio Fereggiano.

L'inizio dei lavori di costruzione del Forte nelle sue forme originarie risale al 1819; il completamento è datato 1836. La conformazione dell'insediamento è del tipo terrapienato, ovvero con corpi di fabbrica volumetricamente incassati e parzialmente coperti alla vista, separati da un fossato rispetto ai terrapieni realizzati perimetralmente. Il complesso si componeva nello specifico di due caserme, una posta a nord, con relativo ingresso principale oggi affacciato su Via Gobetti (sistema di chiusura a ponte levatoio, tuttora presente) ed una posta a sud, a ridosso del terrapieno fronte costa. Erano presenti, quasi sull'intero sviluppo perimetrale, una galleria di scarpa e di controscarpa. Numerose alterazioni dei volumi originari sono intervenute nel corso degli anni, concentrandosi in particolare in concomitanza degli eventi bellici (postazioni piazzole contraeree realizzate sulla porzione superiore del terrapieno lato mare). La demolizione di buona parte dei muraglioni a sostegno dei terrapieni specie sui fronti sud/ovest, con lo smantellamento della galleria di controscarpa è stata necessaria altresì per la realizzazione del nuovo asse di Corso Italia, avvenuta nel 1913. Nel secondo dopoguerra si è insediata nel Forte la Regione CarabinieriLiguria. A seguito di un periodo di abbandono e successivi interventi di ristrutturazione, il forte è divenuto sede, dal 1995, del Comando Provinciale Carabinieri di Genova.



Figura 3-1 Forte San Giuliano –Vista generale

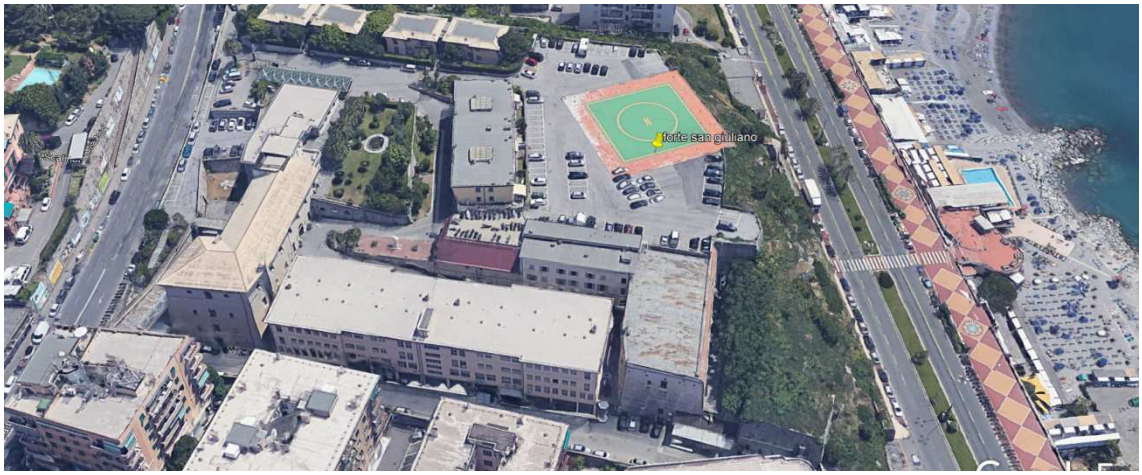


Figura 3-2 Forte San Giuliano –Vista aerea d'insieme (Google Earth)

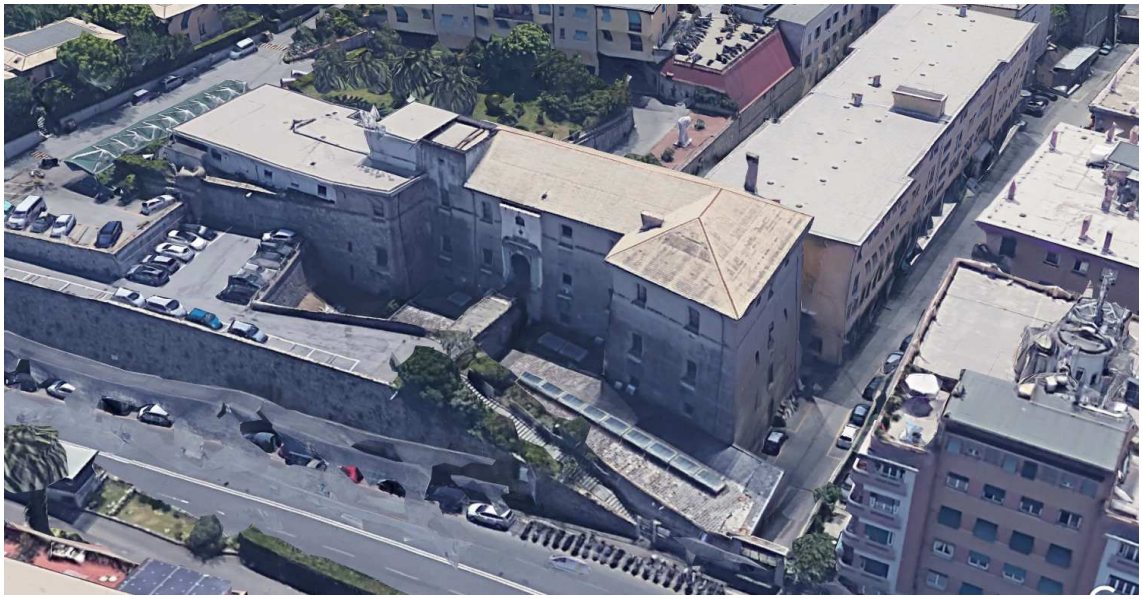


Figura 3-3 Forte San Giuliano –caserma nord, fossato e terrapieno (fronte Via Gobetti) - (Google Earth)



Figura 3-4 Forte San Giuliano –Caserma Sud e porzione residuale terrapieno lato Sud

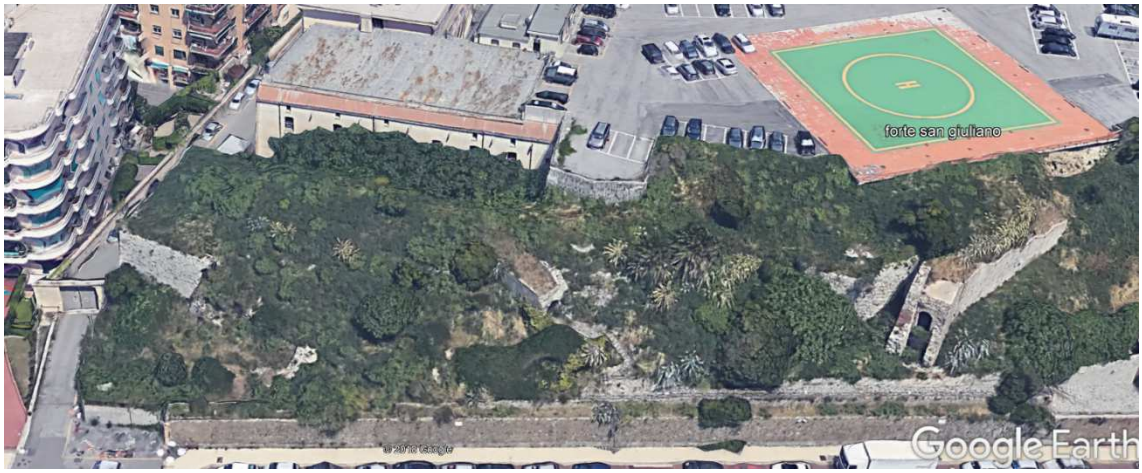


Figura 3-5 Forte San Giuliano –Vista aerea fronte mare, con vista delle porzioni rimanenti della galleria di controscarpa demolita per la realizzazione di Corso Italia (1913)

3.2 Sopralluogo conoscitivo

In data 20.12.2017 e successivamente in data 12.06.2018, sono stati condotti sopralluoghi presso il Forte, finalizzati ad una prima presa d'atto dello stato dei luoghi nell'ambito dell'attività di elaborazione progettuale degli interventi in oggetto. Nello specifico si sono visionati i fabbricati potenzialmente interferiti dall'attività di scavo della galleria scolmatrice, in quanto ubicati in corrispondenza del tracciato della medesima. Si riporta alla pagina che segue lo stralcio planimetrico della carta dei fabbricati interferiti, unitamente al profilo dell'opera ed alla tabella di censimento dei manufatti con indicazione del range di copertura per ciascuno di essi.

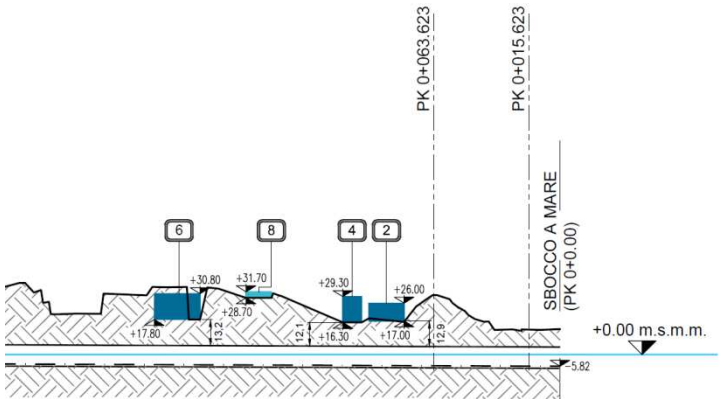
Si sono identificati i seguenti corpi di fabbrica principali del complesso del Forte, nella finalità di procedere ad una prima analisi dei possibili effetti indotti dallo scavo della galleria sugli stessi:

- num. 2: caserma sud (fronte terrapieno lato mare)
- num. 4: edificio in c.a. lato ovest (denominato edificio mensa)
- num. 6: caserma nord (fronte via Gobetti)
- num 8: volume semi interrato prospicente la rampa di collegamento livello di base – zona sommitale del forte.
- num. 9, 10, 11: edificazioni di più recente costruzione, posti sul piazzale sommitale del forte.

Si segnala come i volumi degli edifici identificati con codici 2, 4, 6 siano chiaramente individuabili dato il loro sostanziale sviluppo fuori terra (in particolare il piano di calpestio del piano terreno dei fabbricati num 2, 4, 6 presenta una quota prossima ai +16/17 m slm, a crescere lievemente da mare verso Via Gobetti) Di più difficile valutazione è la stima delle reali volumetrie del corpo interrato identificato con num. 8, rispetto al quale si ritiene opportuno procedere ad un approfondimento conoscitivo basato sul più puntuale rilievo degli spazi interni, ancorché non siano attese condizioni differenti da quelle direttamente esaminate nel seguito del presente documento, in termini di effetti in superficie dell'attività di scavo, ovvero di possibili eventuali risentimenti sulle pre-esistenze.In sede di sopralluogo è stata altresì comunicata alla scrivente la presenza di un sistema di spazi sotterranei dei quali è stata fornita una planimetria di inquadramento (proposta in figura alle pagine seguenti). Il complesso di cunicoli e vani collega evidentemente i terrapieni nord / sud originari, innestandosi nel sistema di gallerie di controscarpa presenti entro il terrapieno fronte mare. In prima analisi, non disponendo del rilievo dei suddetti spazi ne di indicazioni precise sull'ubicazione altimetrica dei medesimi, si sono stimate le quote di calpestio dei

medesimi osservando le finestrature visibili sul muro di controscarpa che delimita il settore di terrapieno nord entro il quale si svilupperebbe parte dei volumi sotterranei.





EDIFICI INTERFERENTI				
ID edificio	Civico	Colore legenda	Copertura	Note
1	Via del Forte di San Giuliano 22		< 15m	
2	Corso Italia 22		< 15m	
3	Via del Forte di San Giuliano 4		< 15m	
4	Via Piero Gobetti 5		< 15m	
5	Via del Forte di San Giuliano 2		< 15m	
6	Via Piero Gobetti 5		< 15m	
7	Via Giuseppe Parini 25		< 15m	
8	Via Piero Gobetti 5		15-30 m	
9	Via Piero Gobetti 5		15-30 m	
10	Via Piero Gobetti 5		15-30 m	
11	Via Piero Gobetti 5		15-30 m	

Figura 3-6 Forte San Giuliano –Inquadramento planimetrico edifici censiti potenzialmente interferenti con l'opera

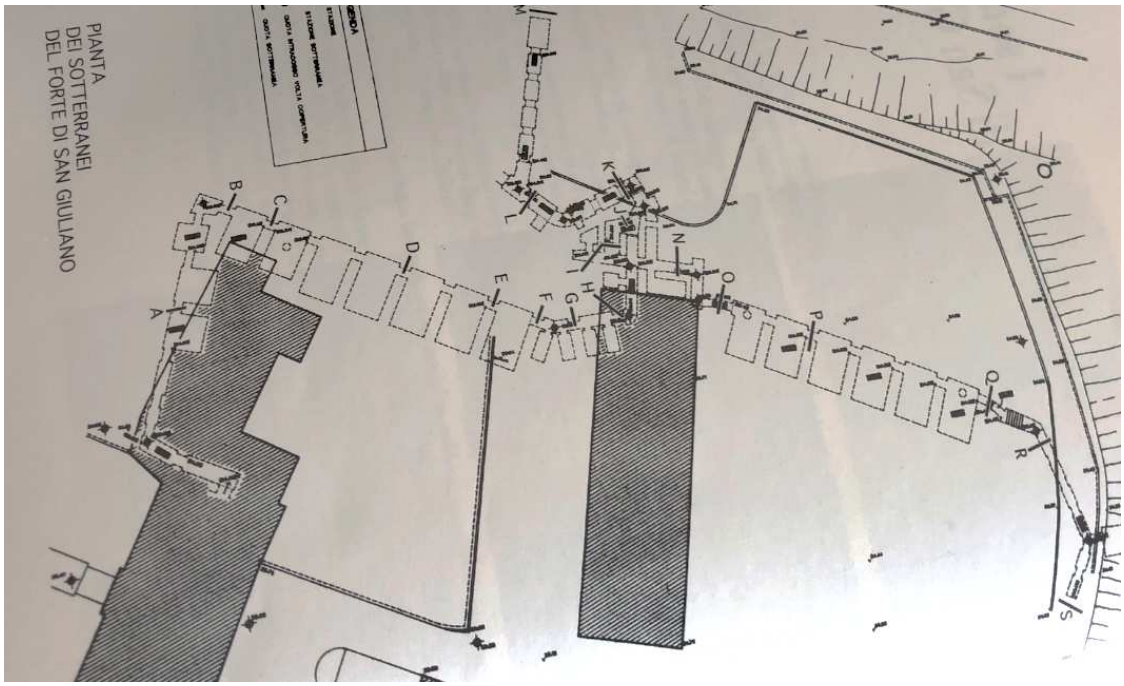


Figura 3-7 Forte San Giuliano –Planimetria cunicoli e spazi sotterranei

Alla tabella che segue si propongono le informazioni sintetiche ad oggi raccolte, demandando a successiva attività di approfondimento conoscitivo, qualora si rendessero necessarie integrazioni specifiche. Segue documentazione fotografica.

Edificio	2	2-Bis (bastione)	4	6	8	9	10	11
Anno costruz.	-	-	90	-	-	-	90	90
Piani interrati	0	?	dicono no	dicono no	-	-	0	0
Piani Fuori terra	2+1	2	3+1	3+1	tre corpi seminterrati rispettivamente di 1, 2, 3piani	2+1	2	2
H fuori terra	10m	7m	13m	13m	3m-6m-8m	9m	7m	7m
Muratura/C.A.	Muratura	Muratura	C.A.	Muratura	Muratura	C.A.	C.A.	C.A.
Orizzontamenti	volte in muratura	volte in muratura	latero-cementizi	volte in muratura	volte in muratura	latero-cementizi	latero-cementizi	latero-cementizi
Fondazioni	dirette	dirette	dirette	dirette	dirette	dirette	dirette	dirette
Lesioni	no	SI	no	no	no	no	no	no

Figura 3-8 Forte San Giuliano –tabella di riepilogo con informazioni essenziali riguardanti i corpi di fabbrica oggetto di sopralluogo (20.12.2017)

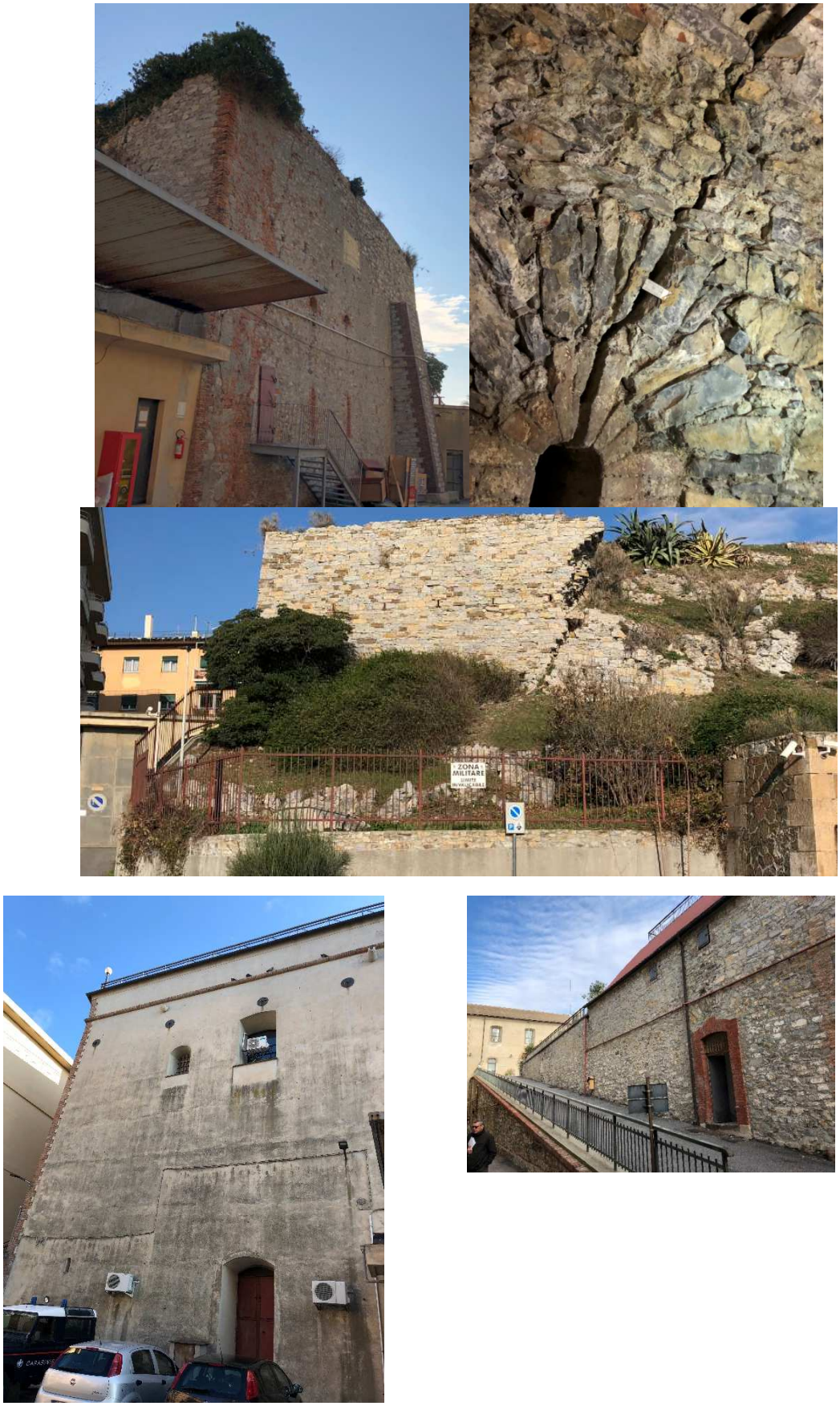


Figura 3-9 Forte San Giuliano –Corpi di fabbrica originari (caserma sud, muro terrapieno sud con relativo quadro fessurativo, edificio 8 lungo rampa di collegamento)



Figura 3-10 Forte San Giuliano –Corpi di fabbrica di più recente edificazione: a sinistra, in alto ed al centro l'edificio num. 4 (mensa), in basso l'edificio num. 9, a destra, in alto ed al centro, gli edifici 10 e 11.

4 CONTESTO GEOMECCANICO

4.1 Quadro conoscitivo generale

Il tracciato della galleria scolmatrice interessa, per la totalità del suo sviluppo in corrispondenza del Forte San Giuliano, l'ammasso costituito dalla Formazione del Flysch del Monte Antola tendenzialmente caratterizzato da grado di fratturazione medio.

Sebbene l'area compresa entro il sedime del Forte San Giuliano non sia stata oggetto di indagini geognostiche nel corso delle Campagne succedutesi negli anni nell'ambito dell'attività di progettazione degli interventi inerenti le gallerie scolmatrici del Bisagno e del Fereggiano, il contesto geomeccanico locale risulta inquadrabile per mezzo delle evidenze restituite dai sondaggi geognostici a carotaggio continuo perforatia valle di Corso Italia, lato sud, ed immediatamente a monte della carreggiata stradale di Via Gobetti, lato nord (sondaggio identificato con codice S8), dagli affioramenti dell'ammasso roccioso (lato mare) e, in ultimo ma non meno significativo, dalla serie di informazioni disponibili circa l'esecuzione del tratto di galleria scolmatrice del Rio Fereggiano ubicato in corrispondenza del Forte San Giuliano, tratto completato dall'impresa Italstrade nei primi anni '90.

Nell'ambito delle analisi in oggetto al presente documento, si sono considerate in particolare le risultanze fornite dal sondaggio S8 (condotto nel 1989 per conto dell'Impresa Italstrade incaricata della realizzazione della galleria scolmatrice del Fereggiano), in ragione della vicinanza ai corpi di fabbrica posti nel settore nord del Complesso del Forte (caserma nord, edificio mensa).Come sopra accennato, sono stati altresìprese in esame, per l'implementazione delle analisi di cui al presente documento, la documentazione as-built relativa alle sezioni tipo di scavo e consolidamento della galleria Fereggiano scavata da Italstrade, dalle quali risalire indirettamente alla qualità meccanica dell'ammasso roccioso, l'indicazione delle convergenze mediamente registrate in fase di scavo, i riscontri raccolti in corso d'opera (documentazione archiviata presso l'Ufficio Contenziosi del Comune di Genova) relativamente la variabilità dell'ammasso (individuazione di locali specifiche condizioni geomeccaniche), la propagazione delle vibrazioni generate dalla fresa, la natura e l'entità dei fenomeni idrici.

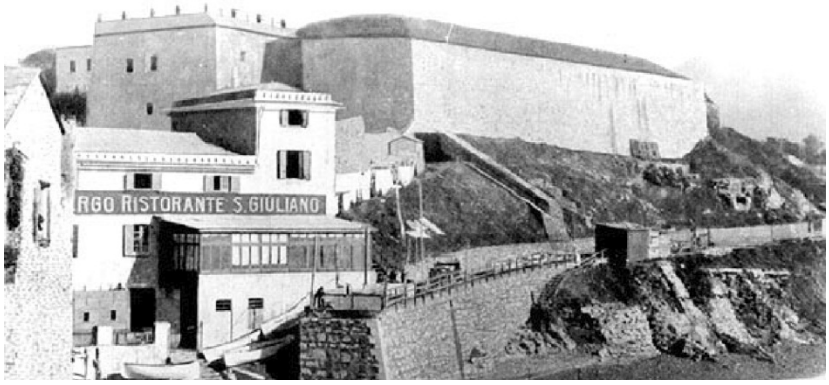




Figura 4-1 Fotografie storiche Forte San Giuliano (antecedenti alla realizzazione di C.so Italia): si osserva l'ammasso roccioso affiorante sul quale si impostano i terrapieni del forte (lato mare)

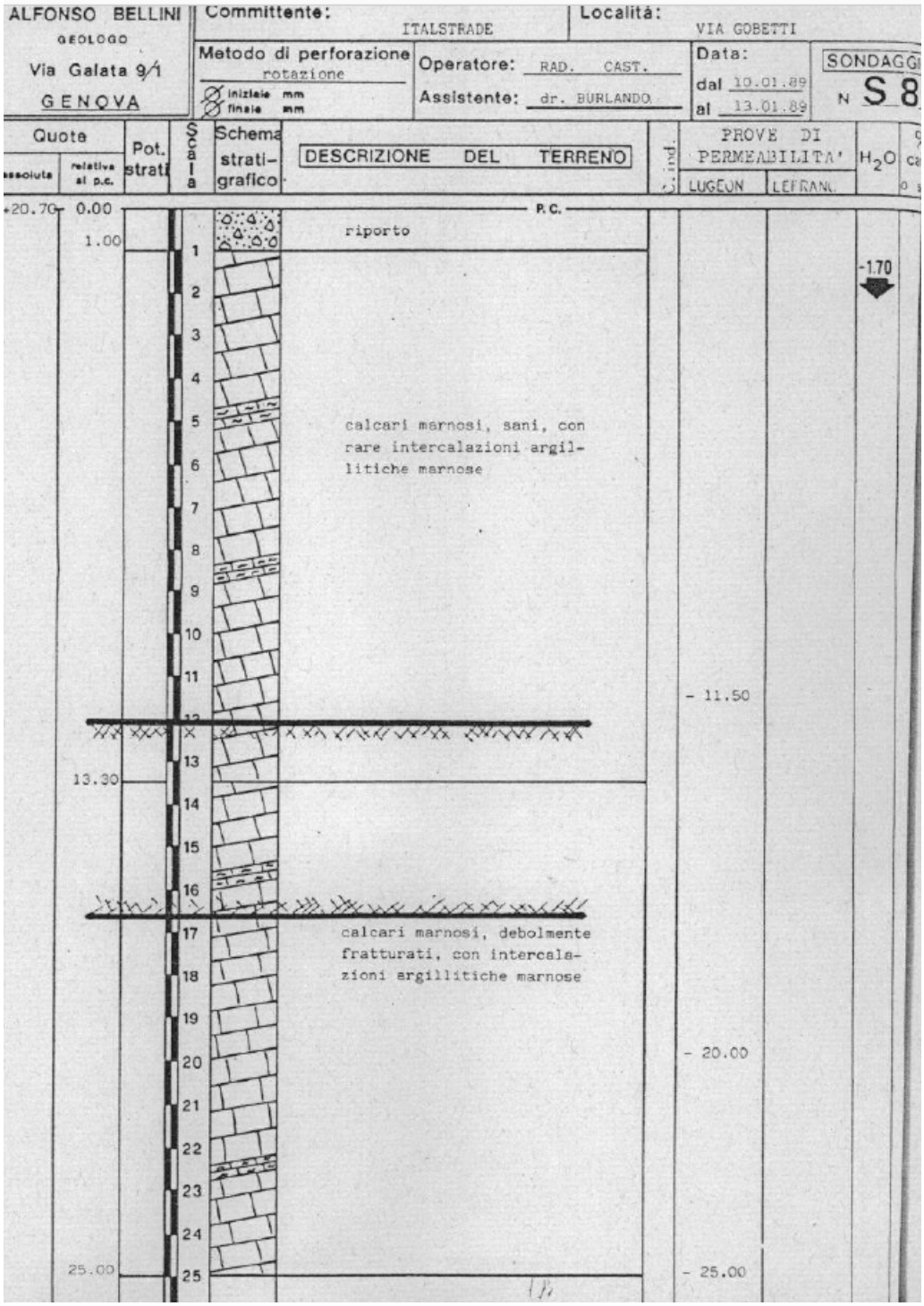


Figura 4-2 Scheda stratigrafica sondaggio S8 –(1989)

4.2 Scolmatore Fereggiano – tratta scavata in corrispondenza del Forte San Giuliano

4.2.1 Cenni generali

Il progetto del deviatore del torrente Fereggiano è stato predisposto nell'anno 1989 dalla società Italstrade S.p.A., facente parte del Consorzio C.I.L.T., come stralcio della progettazione del deviatore del Bisagno, per la quale era stato conferito alla stessa Italstrade specifico incarico da parte del Comune di Genova.

I lavori sono stati consegnati in data 17 luglio 1991. La relativa ultimazione era prevista il 15 maggio 1992 (tempo previsto: 300 giorni). Le attività di scavo in sotterraneo sono iniziate nel novembre 1991, e si sono protratte con regolarità fino all'inizio di giugno 1992. In data 05 giugno 1992 il finanziamento del 1° stralcio si è esaurito senza che fosse disponibile il finanziamento per il secondo. In data 17 giugno è stata ordinata la sospensione dei lavori disponendo contestualmente la messa in sicurezza del cantiere e dell'opera. La progressiva di scavo della galleria a tale data era di m. 909,40.

Le informazioni tecniche reperibili nel Progetto Definitivo 2014 del 1° Lotto dei lavori (relativi appunto al completamento dello scolmatore del Fereggiano), discendono dalla documentazione tecnico-amministrativa compilata dalla D.L., dalla documentazione disponibile presso l'Ufficio Contenziosi del Comune di Genova (corrispondenza intercorsa fra lo stesso Comune e l'impresa Italstrade, copia completa dei progetti del 1989, di variante e di contabilità, corrispondenza intercorsa con le Commissioni di Collaudo, relazioni tecniche a firma del consulente geologo prof. Alfonso Bellini), dalla documentazione relativa ai Rilievi di dettaglio condotti nell'ambito della predisposizione del Progetto Definitivo 2014 del 1° Lotto dei lavori (Galleria scolmatrice Rio Fereggiano).

Si evincono in particolare gli interventi messi in atto (sezioni tipo) per lo scavo dei primi metri di galleria realizzati con tecnica di avanzamento tradizionale (indicativamente sino alla progressiva 0+107 misurata dal fronte spiaggia degli arconi di Cso Italia) edella successiva tratta condotta con fresa aperta da roccia, sottopassando appunto la gran parte del complesso monumentale del Forte San Giuliano.

Lo scavo in tradizionale esteso per circa 107 m a monte degli arconi di C.so Italia, ha previsto la messa in opera di interventi di sostegno e consolidamento più significativi nell'ambito dei primi 40 m (tratta corrispondente a quella scavata con metodo tradizionale nell'ambito del Progetto oggetto della presente Nota), ovvero la realizzazione di infilaggi metallici al contorno, locale consolidamento del fronte, rispetto ad alle più ordinarie modalità di avanzamento attuate nella rimanente tratta (centinatura corrente e spritz beton). Con riferimento allo scavo attuato con fresa, le lavorazioni hanno previsto un generale avanzamento mediante l'installazione di semplice chiodatura radiale e spritz beton, salvo 2 locali passaggi (di sviluppo nell'ordine dei 20 m cad) presso i quali sono state poste in opera centine metalliche; tali ultimi interventi risultano essere stati attuati esattamente in corrispondenza del tratto scavato entro il sedime del Forte.

Quanto sopra consente di delineare un quadro geomeccanico sufficientemente rappresentativo dello scenario atteso per lo scavo della galleria scolmatrice del Bisagno, il cui tracciato corre – in tale specifico settore, sostanzialmente parallelo a quello della esistente galleria Italstrade, mantenendosi alla distanza di poche decine di metri.

Ai paragrafi che seguono, per completezza di trattazione, sono forniti gli estratti significativi stralciati dalla documentazione compresa nel PD Fereggiano 2014.

4.2.2 *Estratti documentazione tecnica di riferimento*

4.2.2.1 *Relazione DL sul 2° SAL*

Dalla relazione del Direttore dei Lavori sul 2° SAL i lavori eseguiti risultano essere:

- scavo in galleria dalla pk 17.50 alla pk 107,83 (estensione 90,33 m) secondo la sezione tipo 1;
- scavo in galleria dalla pk 107,83 alla pk 909,40 (estensione 801,57m) secondo la sezione tipo 2;
- opere di restituzione a mare e scogliera;
- in contabilità vengono inseriti il 50% dei 720 conci stoccati a piè d'opera in cor-rispondenza dell'imbocco lato mare della galleria. Non vengono invece inserite le opere non ultimate e ritenute non funzionali (berlinese di sostegno muro Via Ammarengo, pali di fondazione della rampa di accesso all'alveo).

SEZIONE TIPO 1

- da pk 0,00 a pk 17,50: attraversamento dell'arco di Corso Italia (non in scavo);
- da pk 17,50 a pk 23,50: avanzamento in sezione policentrica con n° 25 infilaggi in zona di calotta lunghezza 12 m, sovrapposizione 6,00 m (lunghezza campo 6,00 m). Tubi 88,9 mm sp 8,8 mm, passo 32 cm. Prerivestimento con centine doppie IPN 160, e 15 cm di sprizt beton Rck 300. Soletta inferiore spessore 50 cm in cls Rck 250 armata con rete elettrosaldata 10 maglia 15x15 superiore ed inferiore;
- da pk 23,50 a pk 41,83: avanzamento in sezione policentrica con n° 25 infilaggi in zona di calotta, lunghezza 9 m, sovrapposizione 3,00 m (lunghezza campo 6,00 m). Tubi 88,9 mm sp 8,8 mm, passo 48 cm. E' inoltre presente un consolidamento al fronte mediante n° 20 elementi in VTR 100 mm lunghezza 12 m. Prerivestimento con centine doppie IPN 160 e 15 cm di sprizt beton. Soletta cls Rck 250 armata con rete elettrosaldata 10 maglia 15x15 superiore ed inferiore.
- da pk 41,83 a pk 107,83: avanzamento in sezione policentrica con centine doppie IPN 160 e 15 cm di spritz beton. Soletta cls Rck 250 armata con rete elettrosaldata 10 maglia 15x15 superiore ed inferiore.

Erano previsti n° 2 fori Φ 70-90mm L = 1,00 m passo 1,00 m per intasamento calotta.

Gli scavi di questa tratta si sono protratti fra il novembre 1991 ed i primi di febbraio 1992. Complessivamente trattasi di circa 67 giorni lavorativi, con una media di avanza-mento di 1,61 m/g.

SEZIONE TIPO 2

- da pk 107,83 a pk 909,90: avanzamento con sezione circolare mediante fresa full face (TBM) aperta. Spessore spritz beton 10 cm. Presenza di concio di base in c.a.
- Fra pk. 107,83 e pk. 115,93 adozione di ancoraggi in roccia al contorno (n° 9 al metro lunghezza 2,60 m). Fra pk. 115,93 e pk. 139,93 adozione di centine me-talliche.
- Fra pk. 139,93 e pk. 179,56 adozione di ancoraggi in roccia.
- Fra pk. 179,56 e pk. 198,56 adozione di centine.
- Fra pk. 198,56 e pk. 244,03 adozione di ancoraggi in roccia. Non sono disponibili informazioni particolareggiate sulle tratte successive, ma dalle informazioni reperite risulta che lo scavo si sia sviluppato prevalentemente con l'ausilio di ancoraggi in roccia e, localmente, con centine metalliche.

  Erano previsti n° 2 fori Φ 70-90mm L = 1,00 m passo 1,00 m per intasamento calotta.

Gli scavi di questa tratta si sono protratti fra i primi di febbraio 1992 ed il 13 giugno 1992. Complessivamente trattasi di circa 84 giorni lavorativi, con una media di avanza-mento di 9,5 m/g. La massima produzione si è registrata nel mese di maggio con 400 m di avanzamento complessivi, per una produzione media di 20 m/g.Dopo la sospensione lavori la galleria è rimasta per oltre un anno con il solo

pre-rivestimento. Risalgono alla primavera - estate del 1993 una serie di lettere del Comune di Genova che sollecitano l'impresa a provvedere con la posa dei rivestimenti definitivi, come peraltro suggerito dalla Commissione di Collaudo, al fine di mettere in sicurezza l'opera.

La consegna dei lavori all'impresa Italstrade per il getto del rivestimento definitivo nei tratti a sezione tipo 2 è avvenuta in data 04.10.1993; l'ultimazione lavori è del 31.01.1994.La consegna dei lavori alla stessa Italstrade per il getto del rivestimento definitivo nei tratti a sezione tipo 1 è avvenuta in data 01.02.1994; l'ultimazione lavori è del 05.08.1994.

4.2.2.2 Documentazione reperibile presso l'Ufficio Contenziosi del Comune di Genova

Presso l'Ufficio Contenziosi del Comune di Genova è archiviata la corrispondenza intercorsa fra lo stesso Comune e l'impresa Italstrade, copia completa dei progetti del 1989, di variante e di contabilità, la corrispondenza intercorsa con le Commissioni di Collaudo, alcune relazioni tecniche a firma del consulente geologo prof. Alfonso Bellini, documentazione tecnica riguardante le misure di convergenza in galleria, lo studio delle miscele di calcestruzzo per i rivestimenti definitivi ecc. In particolare da tale documentazione è stato possibile rilevare come:

- lo scavo con sezione tipo 1 era previsto per il superamento di materiali sciolti in zona d'imbocco; l'avanzamento in tradizionale doveva poi proseguire ulteriormente fino al momento in cui la fresa fosse disponibile. Il ritardato avvio dei lavori (conseguente, a quanto risulta, da una mancata/ritardata disponibilità delle aree in zona d'imbocco) ha fatto si che la fresa (ILBAU) fosse disponibile in an-ticipo rispetto alle previsioni. Lo scavo con sezione tipo 2 inizia pertanto alla progressiva pk 99,58 (erano 817 m nella prima versione progettuale);

- non è stato eseguito il contestuale avanzamento in galleria da nord (scavo da due imbocchi) in quanto in contropendenza (possibile accumulo d'acqua al fronte) ed anche perché ritenuto pericoloso (possibili allagamenti della galleria a seguito di un eventuale straripamento del Fereggiano);

- il prof. A. Bellini in una relazione redatta a giustificazione dei ritardi accumulati dall'impresa segnala:

  a) le lamentele dei residenti, che durante le ore notturne avvertono il ronzio provocato dalla TBM in fase di avanzamento; ciò ha reso necessario avanzare su 2 turni invece che su 3 (sospensione del turno notturno e conseguente riduzione della produttività);

  b) vibrazioni avvertite in superficie, che sembrano trasmettersi lungo gli strati. Pur se il monitoraggio eseguito esclude possibili lesioni a carico degli edifici, viene ridotta la spinta sulla testa fresante determinando, con ciò, un calo di produzione;

  c) il materiale si presenta generalmente fratturato; ciò impone frequenti interruzioni dell'avanzamento allo scopo di procedere con la posa di chiodi e spritz beton, specie in zona di calotta;

  d) i motivi sopra elencati hanno determinato un avanzamento massimo di circa 15 m al giorno, contro una potenzialità prevista di 30 m al giorno;

- ulteriori documenti del Prof. Bellini segnalano la presenza di un maggiore grado di fratturazione nel tratto fino a via Gobetti (progressiva 200 m circa) e, nella stessa tratta, un incremento della frazione pelitica in seno al Flysch di Monte An-tola, che passa da un valore previsto di circa il

10% fino al 25%. L'aumento di tale frazione influisce negativamente sul comportamento dell'ammasso;

- un ulteriore miglioramento del quadro fessurativo della roccia si registra a partire dalla progressiva pk 500;

- durante lo scavo vengono riscontrate diffuse condizioni di stillicidio. Le maggio-ri venute d'acqua sono ubicate alle progressive pk 155 – 160; pk 270 – 290; pk 350 – 360; 365 – 370; 440; 605; a pk 670 si registra una cospicua presenza di acqua ferruginosa. Stillicidio diffuso si registra inoltre fra le pk 450 – 600. Il Prof. Bellini fa inoltre rilevare come i fori delle chiodature costituiscano vie pre-ferenziali per le venute in galleria, e come la presenza d'acqua determini un peg-gioramento nel comportamento dell'ammasso;

- le misure di convergenza reperite non costituiscono, con buona probabilità, la to-talità di quelle eseguite. Le notizie frammentarie raccolte mostrano convergenze comprese fra 0,2 – 0,4 cm, o inferiori a tali valori. I picchi massimi registrati sono nell'ordine di 1,0 – 1,3 cm. Da fine lavori alla posa del rivestimento definitivo non sono segnalate significative convergenze, anche se non mancano rilasci e splaccamenti;

- al di la degli interventi previsti in progetto sul fronte di scavo della sezione tipo 1, alcuni documenti citano ulteriori e non meglio identificati interventi di consolidamento eseguiti dall'interno del cavo, e dall'esterno, nella tratta di attraversa-mento di Corso Italia. Non sono stati reperiti disegni con particolari riguardanti un'eventuale stabilizzazione o consolidamento delle arcate di Corso Italia, e/o delle relative fondazioni.

Dopo la sospensione dei lavori del giugno 1992 si susseguono periodici sopralluoghi del Prof. Bellini e visite della commissione di collaudo. In particolare il verbale della commissione di collaudo del giorno 12.02.1993 segnala:

- la presenza, nei tratti scavati con sezione tipo 2, del solo rivestimento di prima fase costituito da spritz beton (di spessore non uniforme) rete elettrosaldata □ □ 10x10, chiodi tipo swellex; la rete non è continua, non era prevista e non è stata contabilizzata;
- nel tratto scavato con sezione tipo 1 il prerivestimento è costituito da centine doppie e spritz beton (oltre ai consolidamenti in calotta).
- non sono evidenti segni di collasso a carico dei prerivestimenti

In data 18.02.1993 la commissione di collaudo inoltra alla Direzione Lavori una lettera in cui fa presente che la stabilizzazione del cavo richiede la posa del rivestimento definitivo, che dovrebbe essere posto in opera entro 3 – 4 mesi dalla data.

Altre note della commissione di collaudo e del Prof. Bellini, emesse prima e dopo la data di cui sopra, invocano la messa in sicurezza dell'opera mediante il getto dei rivestimenti definitivi.

Il Prof. Bellini segnala la presenza di alcuni rilasci in corrispondenza delle tratte scavate da più tempo, che diventano meno evidenti laddove la roccia è "più giovane". Se ne de-duce che "le condizioni con il tempo tenderanno presumibilmente a peggiorare, ed è quindi necessario procedere al più presto con la posa dei rivestimenti".

Tali rilasci sembrano, dalle descrizioni riportate e dalle fotografie allegate, generalmente modesti e localizzati (generalmente sui fianchi e in zona di chiave). Non mancano comunque fenomeni più importanti localizzati, con maggiore frequenza, laddove sono presenti manifestazioni idriche. In corrispondenza delle tratte ammalorate si procede alla posa di ulteriori chiodature localizzate e/o rete e spritz beton.

4.2.2.3 *Rilievo di dettaglio condotto in sede di progettazione definitiva del completamento della galleria scolmatrice del Rio Fereggiano*

Uno specifico rilievo di dettaglio è stato svolto lungo l'intera galleria esistente allo scopo di verificare e descrivere, macroscopicamente ed in abbinamento/integrazione alla campagna di prove, lo stato dei rivestimenti, il relativo grado di alterazione e/o fessurazione, la presenza di venute d'acqua ecc.

I rilievi eseguiti mostrano:

- la presenza di quadri fessurativi praticamente lungo buona parte della galleria. Sono rappresentati da fessure trasversali all'asse, poste a distanze non regolari, estese lungo tutto o buona parte del perimetro, e fessure longitudinali poste ora in zona di calotta, ora sul fianco destro, ora in quello sinistro, caratterizzate da una continuità metrica (da 2 m a 20 m). Quelle in calotta sono centrali, quelle la-terali sono disposte fra i 30° e 45-50°;
- le fessure si presentano talvolta in una sola area (calotta o fianchi), talvolta in due aree (generalmente calotta ed un fianco) più raramente sia in calotta che su entrambi i fianchi;
- nella maggior parte dei casi le fessure sono classificate lievi, ma anche quelle classificate medie sono rappresentate con buona frequenza lungo tutta l'opera. Le fessure importanti sono subordinate, generalmente comprese fra le pk 100 – 200, ed attorno alla pk 300, spesso isolate (ovvero raramente si trovano conci contigui solcati da fessurazioni importanti);
- in linea generale le fessure sono particolarmente concentrate nel tratto compreso fra le pk 100 – pk 200, tendono poi a diminuire progressivamente procedendo verso l'interno, specie a partire dalla pk 470 circa e dalla pk 780 circa;
- l'acqua in galleria, quantificata complessivamente in circa 0,4 l/sec e raccolta in una canaletta centrale, proviene per la maggior parte da stillicidi concentrati in corrispondenza di alcuni giunti, da un'unica venuta, peraltro assai modesta, at-torno alla pk 807,50 circa, e del tratto prossimo al fronte di scavo dove termina il rivestimento definitivo;
- lungo lo sviluppo dell'opera sono segnalate fessure dalle quali fuoriesce umidità, o una modestissima quantità d'acqua, rese evidenti dalla presenza di concrezioni biancastre;
- dai fori di alcuni sondaggi eseguiti nel 2013 si registra una modesta venuta d'acqua, che dopo alcuni giorni è diminuita in maniera sensibile;
- i fori dei sondaggi eseguiti nel 1997 sono generalmente tappati da concrezioni calcaree accumulatesi nel tempo; solo in pochi casi (specie il foro S6 eseguito in calotta) perdura un debole stillicidio;
- zone umide o con stillicidi localizzati si susseguono a zone asciutte, evidenziando la presenza di una falda idrica contenuta all'interno di un ammasso roccioso compartimentato, caratterizzato da valori di permeabilità variabili in funzione della composizione litologica e del grado di fratturazione. Nelle tratte maggior-mente permeabili l'acqua rimane confinata all'esterno dei rivestimenti, venendo a giorno in corrispondenza dei giunti o, più raramente, di alcune fessurazioni. Laddove presente sgorga in corrispondenza dei recenti carotaggi eseguiti (C10+C11 alla pk 170, C20 alla pk 410,). Le pressioni riscontrate sono sempre modeste.

4.3 Sintesi del quadro geologico-geomeccanico

Dalle indagini geognostiche pregresse e dalla documentazione esaminata relativamente alla realizzazione della tratta della Galleria del Fereggiano eseguita in adiacenza alla nuova opera in costruzione si rileva come l'ammasso sia costituito integralmente dal Flysch del Monte Antola, ovvero da calcare marnoso con intercalazioni argillitiche marnose. In particolare l'ammasso interessato dallo scavo della galleria Fereggiano (progetto Italstrade) è risultato essere generalmente fratturato; necessitandosi pertanto la posa di chiodi e spritz beton, specie in zona di calotta, nell'ambito della tratta a valle di Via Gobetti. E' stato rilevato altresì un incremento della frazione pelitica in seno al Flysch di Monte Antola, con attestazione attorno al 25. Con riferimento alle manifestazioni idriche si sono mediamente registrati stillicidi diffusi salvo locali maggiori venute d'acqua.

5 ANALISI DEGLI EFFETTI INDOTTI DALLO SCAVO DELLA GALLERIA

5.1 Inquadramento generale dell'attività

Scopo dell'attività di analisi è la valutazione degli effetti dello scavo della galleria in superficie, ovvero sui manufatti presenti entro il complesso del Forte di San Giuliano: gli effetti si intendono in termini di cedimenti indotti sul piano di fondazione dei fabbricati stessi, adottando l'impostazione di analisi "green field", senza pertanto contemplare l'interazione tra le opere strutturali ed il terreno di sedime. Il piano di imposta delle fondazioni, con approccio cautelativo, è stato abbassato di 1.50 m rispetto al piano campagna rilevato (in mancanza di informazioni precise alla data di redazione del presente documento).

Come esposto al precedente capitolo, la qualità geomeccanica dell'ammasso interagente con lo scavo e con le pre-esistenze in superficie, è stata definita sulla scorta della campagne di indagini e prove di laboratorio condotte nel corso dell'iter progettuale complessivo (dal PP al PE), con particolare riferimento alla formazione litoide del Flysch del Monte Antola, valutando tuttavia locali affinamenti basati sui riscontri diretti disponibili dall'attività di scavo della galleria Fereggiano condotta da Italstrade. Sulla scorta del quadro descrittivo fornito dall'esame della documentazione tecnico-amministrativa prodotta dalla DL, degli elaborati frutto delle consulenze specialistiche commissionate dal Comune (geol. Bellini), si sono ipotizzate condizioni geomeccaniche tali da costituire, con buon margine, una rappresentazione cautelativa delle reali condizioni in situ.

Le analisi sono state elaborate implementando scenari idrogeologici rappresentativi di condizioni estreme, ovvero in assenza ed in presenza di falda; in tale ultimo caso l'analisi accoppiata è stata condotta considerando l'instaurarsi di moti di filtrazione in regime stazionario, assumendo valori di conducibilità idraulica dell'ammasso coerente con le determinazioni sperimentali (si vedano precisazioni nel seguito).

Calcolato per via numerica il regime deformativo atteso al piano di imposta delle fondazioni si è proceduto alla valutazione della categoria di danno associata alla deformazione unitaria massima di allungamento, coerentemente con l'approccio di Mair, Taylor e Burland (in particolare si individuate le zone di hogging e sagging nei profili di spostamento verticale restituiti dall'analisi numerica).L'attribuzione della categoria di danno (con relativa intensità) in funzione della deformazione limite di trazione calcolata come sopra è stata condotta in accordo alla classificazione elaborata da Boscarding e Cording (1989).

La procedura di valutazione della categoria di danno sopra descritta è stata primariamente applicata sugli esiti delle analisi numeriche simulanti la presenza di falda (analisi accoppiata, regime di pressioni interstiziali associato alla rete di flusso ammasso-galleria propria delle condizioni stazionarie), stante la maggior gravosità degli scenari restituiti in termini di spostamenti attesi sul piano fondazionale.

Pur considerando la molteplicità delle assunzioni di natura conservativa sopra illustrate e riferite alle condizioni geomeccaniche dell'ammasso, alle assunzioni rispetto al piano di imposta delle fondazioni e alle condizioni idrogeologiche del contesto, le analisi riferite ai due edifici considerati (caserma nord ed edificio mensa, rispettivamente num 6 e num 4) restituiscono categorie di danno pari a 0.

5.2 Sezioni di analisi

Ai fini della valutazione dell'interferenza tra gli scavi condotti in sotterraneo per la realizzazione della galleria naturale scavata con metodo tradizionale e meccanizzato del canale dello Scolmatore del Bisagno ed i fabbricati del Forte San Giuliano presenti in superficie, sono state individuate le seguenti sezioni di analisi eseguite in corrispondenza dei punti ritenuti più significativi per l'interferenza esaminata:

5.2.1 *Sezione 1 – pk ≅0+194 – Caserma Nord Forte San Giuliano*

La sezione di analisi studia lo scavo della galleria in prossimità del passaggio al di sotto del complesso principale del Forte San Giuliano (entrata via Gobetti) risalente a metà '800 (identificato con il numero 6 nella planimetria del Progetto Esecutivo).

Cautelativamente, in assenza di un rilievo completo dei fabbricati e dei locali interrati compresi nel terrapieno, nei modelli di calcolo è stato deciso di abbassare il profilo del piano campagna sottostante gli edifici fino al piano di fondazione, considerato a -1.50 da piano campagna. La copertura effettiva in asse galleria risulta ridotta e pari a 15.5 m.

La galleria del canale del Fereggiano corre accanto alla galleria dello Scolmatore del Bisagno (distanza tra i rispettivi assi pari a 39.5 m). Nella analisi numerica è stato simulato lo scavo della galleria del Fereggiano per rappresentare al meglio lo stato tenso-deformativo dell'ammasso antecedente allo scavo della presente galleria.

5.2.2 *Sezione 2 – pk ≅0+100 – Caserma Forte San Giuliano - Mensa*

La sezione di analisi si caratterizza per la bassa copertura (10.5 m da piano di imposta delle fondazioni supposto a -1.50 m da p.c.) e lo scavo al di sotto degli edifici denominati "mensa" del complesso del Forte San Giuliano (identificati con il numero 4 e 2 nella planimetria del Progetto Esecutivo). Entrambi gli edifici sono realizzati in c.a. con solai in latero-cemento.

La galleria del canale del Fereggiano corre accanto alla galleria dello Scolmatore del Bisagno (distanza tra i rispettivi assi pari a 17.2 m). Durante l'analisi numerica è stato simulato lo scavo della galleria del Fereggiano per rappresentare al meglio lo stato tenso-deformativo dell'ammasso antecedente allo scavo della presente galleria.

5.3 Caratteristiche fisico-meccaniche dell'ammasso roccioso

Entrambe le sezioni presentano uno strato omogeneo di formazione rocciosa del Flysch del Monte Antola sovrastata nella parte destra da un terrapieno originario della struttura del Forte.

Si considera un coefficiente di spinta a riposo pari a 1.

	γ	v	UCS	GSI	Erm	mi	MR
	[kN/m3]	[-]	[MPa]	[-]	[MPa]	[-]	[-]
FMA	26	0.25	20	35	907	12	400

5.4 Condizioni Idrogeologiche

Si dispone di un solo rilevamento piezometrico nei pressi dell'area di interesse: sondaggio S8 condotte nell'89 da ITALSTRADE a monte di Via Gobetti. La falda acquifera era stata intercertteta alla profondità di 1.70 da p.c. Il profilo della falda restituito dalla documentazione geologica pregressa prevede tuttavia un repentino abbassamento della superficie piezometrica immediatamente a valle di Via Gobetti: pertanto, l'assunzione della soggiacenza in corrispondenza delle sezioni di calcolo è stata derivata coerentemente con suddetto profilo.

Le prove Lugeon, condotte nel sondaggio S8, hanno rilevato una conducibilità idraulica variabile con la profondità da $1*10^{-6}$ m/s (0 - 10m di profondità), a $5*10^{-7}$ m/s (10 - 20m di profondità), a $1*10^{-7}$ m/s oltre i 20 m per la formazione del Flysch del Monte Antola. Suddetti valori sono stati considerati tal quali per la modellazione degli effetti indotti dallo scavo della galleria sulla acquifero circostante.Le analisi sono state svolte ipotizzando due scenari distinti: l'assenza di acqua all'interno della formazione rocciosa e la presenza di una falda acquifera alla quota di 15 e 12 m s.l.m. rispettivamente per le sezioni 1 e 2.

In particolare, in presenza di acqua sono state svolte analisi accoppiata considerando moti di filtrazione in regime stazionari utilizzando il software Phase2 con le seguenti condizioni al contorno:

- Total head sui bordi laterali del dominio (15m e 12m s.l.m);
- Pressione relativa dell'acqua interstiziale nulla al fronte della galleria del Fereggiano durante lo scavo fino al getto del rivestimento definitivo;
- Pressione relativa nulla al fronte della galleria dello Scolmatore del Bisagno durante lo scavo fino al getto del rivestimento definitivo.

5.5 Procedura operativa di analisi

Le sezioni sopra individuate come rappresentative del tratto in esame sono state analizzate mediante un modello ad elementi finiti. L'analisi numerica su modelli bidimensionali è articolata secondo stage successivi di calcolo, a simulare le fasi di scavo e posa in opera degli interventi di sostegno provvisorio e definitivo del cavo.

Si sono introdotte, secondo la consueta procedura operativa, un sistema di forze fittizie di scavo agenti in direzione ortogonale al profilo di scavo medesimo, di entità progressivamente ridotta secondo una taratura che tiene in conto la risposta elastica del materiale litoide in quasi tutto il percorso di scarico, supponendo un relax al fronte del 25 % e l'istallazione dei prerivestimenti (bulloni e centine) in corrispondenza del 60 % di relax del cavo.

Gli elementi strutturali che costituiscono rivestimenti definitivi e prerivestimenti sono stati modellati coerentemente alle loro reali caratteristiche geometriche.

5.6 Analisi dei carichi

- Fabbricati in muratura:

$$0.15*\gamma_{cls}*H+q*n°piani$$

(dove 0.15 è il coefficiente vuoto per pieno scelto per questa tipologia di edificio, γ_{cls}=26 kN/m^2,q=5 kPa (carichi d'esercizio)). H è l'altezza dell'edificio, comprensiva della profondità di imposta delle fondazioni.

- Fabbricati in c.a.:

$$5 *n°solai+q*n°piani$$

(dove 5 kPa è l'ipotizzato peso proprio di un solaio in laterocemento e q=5 kPa (carichi d'esercizio))

- Terrapieno:

	γ	v	φ'	c'	φ'res	c' res	E
	[kN/m3]	[-]	[°]	[kPa]	[°]	[kPa]	[MPa]
Terrapieno	22	0.3	35	5	30	0	100
Muro di sostegno	25	0.15	45	10	0	0	30000

5.7 Modellazione dei rivestimenti

In accordo con il Progetto Esecutivo, è stata scelta cautelativamente una sezione tipo centinata con il massimo passo centina (MAc1).

Per tutti i dettagli della sezione si veda la relazione tecnica di riferimento, di seguito vengono riportate le caratteristiche e gli spessori degli interventi inseriti nel modello di calcolo:

Spritz beton		
Classe	c28/35	
Rck	35	MPa
Spessore	0.15	m
fctk	2.33	MPa
E	32588	MPa

Swellex/Split-set bolt		
Tensile capacity	0.2	MN
Residual tensile capacity	0	MN
Area tributary	480.42	mm2
E_bolt	210	GPa
Bond strength	0.2	MN/m
Residual Bond Strength	0.2	MN/m
Bond Shear Stiffness	150	MN/m/m
Out-of-plane spacing	1.5	m
Face plates	attached	
Pre-tensioning	0	
Pre-tensionin force	costant in install stage	
Bolt Model	Plastic	
Allow Joint to shear bolt	yes	
Length	4.5	m

Centine - HEB140		
J	1.51E-05	m^4
Area	0.004296	m^2
Section depth	0.14	m
Compressive Strength	275	MPa
Tensile Strength	275	MPa
passo	1.5	m
E	210000	MPa

Rivestimento definitivo		
Classe	c35/45	
Rck	45	MPa
Spessore	0.55	m
fctk	2.66	MPa
E	34500	MPa
v	0.2	-

Tabella 5-1 - Tabelle riassuntive interventi sezione FSG

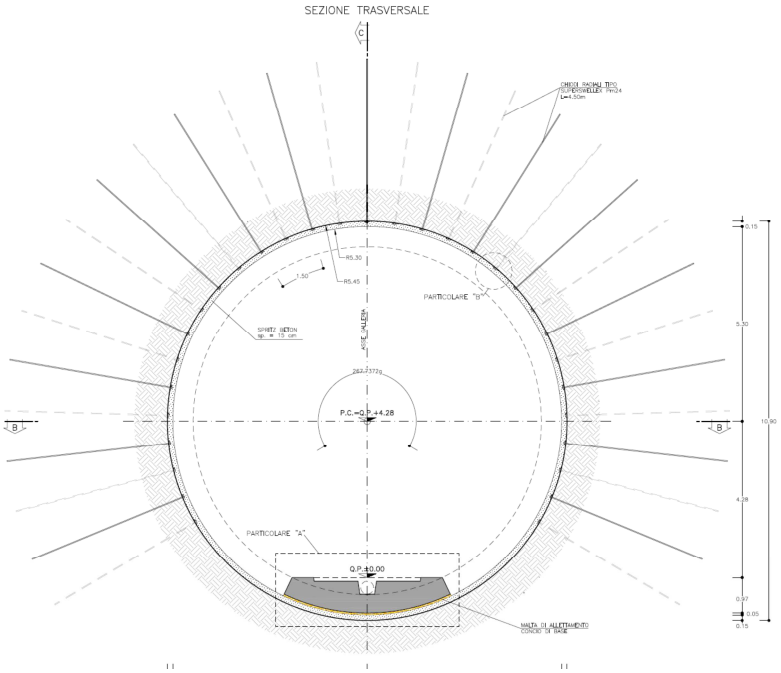


Figura 5-1 - Sezione tipo MAc1 (scavo)

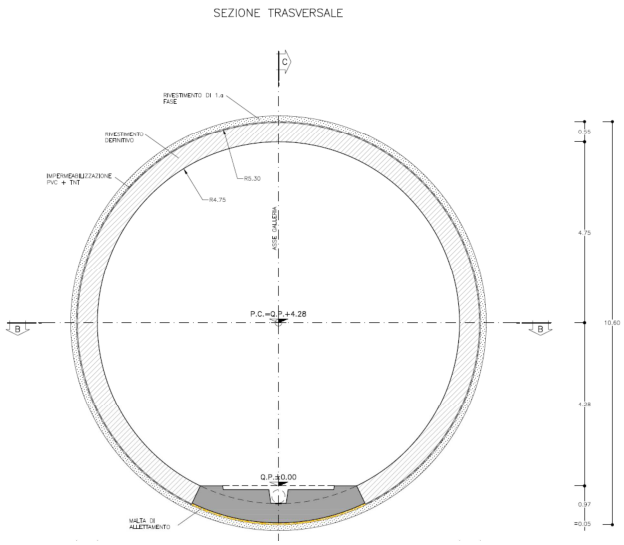


Figura 5-2 – Sezione tipo MAc1 (carpenteria)

5.7.1 *Modellazione dei bulloni*

I bulloni sono stati modellati come elementi monodimensionali ad attrito del tipo fullybonded. Il software Phase 2 implementa nello specifico la tipologia Shear Bolt (Swellex/Split Sets), basata sull'equazione di equilibrio del bullone da roccia completamente ancorato di Farmer (1975) e Hyett (1996).

$$AE_b \frac{d^2 u_x}{dx^2} + F_s = 0$$

Farmer, I.W. (1975), Stress distribution along a resin grouted rock anchor, Int. J. of Rock Mech. And Mining Sci&Geomech. Abst., 12, 347-351. Hyett A.J. Moosavi M. and Bawden W.F. (1996), Load distribution along fully grouted bolts, with emphasis on cable bolt reinforcement, Int. J. Numer and Analytical meth. In Geomech, 20, 517-544

Dove F_s è la forza di taglio per unità di lunghezza, A è l'area del bullone e E_b è il modulo elastico del bullone.

5.7.2 *Modellazione dei prerivestimenti*

I pre-rivestimenti del cavo costituiti da uno o più strati di spritz beton inglobanti, eventualmente, le centine, sono modellati come elementi beam solidali al profilo di scavo e, pertanto, agli elementi shell riproducenti l'ammasso al contorno dello scavo medesimo. In presenza di rivestimenti costituiti da spritz e centine, il software di calcolo Phase 2 calcola autonomamente le caratteristiche di rigidezza equivalenti del rivestimento così composto, considerando in particolare il passo di installazione delle centine metalliche e l'evoluzione temporale delle proprietà meccaniche dello spritz beton. Il software calcola altresì l'aliquota di carico tramessa dall'ammasso, nei differenti step di calcolo, ai singoli componenti del rivestimento provvisorio (centine / spritz), corrispondentemente ai rapporti di rigidezza dei medesimi. La trattazione dettagliata di tale approccio di calcolo è contenuta nella relazione generale di calcolo.

5.7.3 *Modellazione dei rivestimenti definitivi gettati in opera*

I rivestimenti definitivi, ai fini della valutazione dei fenomeni di interazione con l'ammasso, sono stati modellati con elementi shell, secondo l'effettivo spessore previsto.

5.8 Fasi di calcolo

5.8.1 *Modellazione scavo galleria Fereggiano*

La sezione del Fereggiano è stata inserita nel modello di calcolo per riprodurre quanto più fedelmente lo stato di sforzo tenso-deformativo esistente in sito antecedente allo scavo della galleria dello Scolmatore del Bisagno. Lo scavo del Fereggiano è stato riprodotto ipotizzando un rilassamento del 50% al fronte seguito dall'installazione dei prerivestimenti (bulloni in corrispondenza dell'85% di relax e getto dello spritz-beton al 100% relax) e del rivestimento definitivo (total relax).

Si riportano le caratteristiche della sezione tipo della galleria del Fereggiano inserita nel modello numerico:

- uno scavo di larghezza pari a 6,00 m;
- prerivestimento costituito da 10 cm di spritz beton fibrorinforzato Rck 300;
- ancoraggi radiali passivi in numero di 9 a metro, lunghezza 2,70 m (hp: φ=24mm, acciaio B450C);
- rivestimento definitivo in calcestruzzo fibrorinforzato Rck 300, spessore 30 cm.

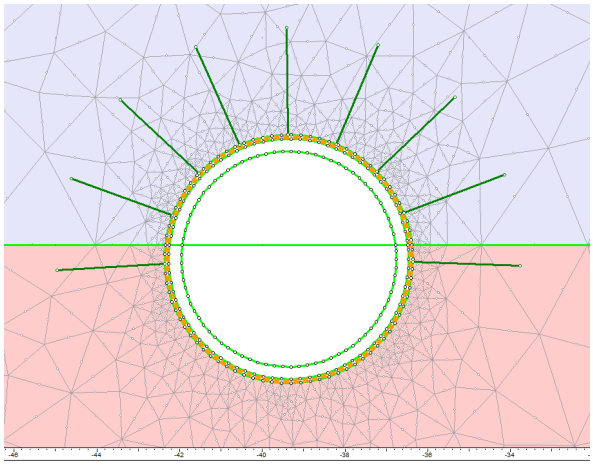


Figura 5-3 – Sezione scavo e prerivestimenti Fereggiano

5.8.2 Step di calcolo

Si propone, a seguire, la sequenza tipica degli step di calcolo per le sezioni in oggetto:

1. Inizializzazione dello stato tensionale entro l'ammasso
2. (Galleria Fereggiano) - Rimozione del terreno all'interno del profilo di scavoe contestuale applicazione, sul contorno, delle forze fittizie di scavo (pressioni), di entità pari allo stato tensionale locale in situ, in corrispondenza del profilo di scavo medesimo – al termine di tale step di calcolo è imposto il reset del campo di spostamento entro l'ammasso, definendo pertanto il tasso tenso-deformativo all'interno dell'ammasso di riferimento.
3. (Galleria Fereggiano) - Apertura del fronte di scavo, con relativa riduzione delle forze fittizie di scavo (50 % relax). Pressione dell'acqua nulla sul contorno del cavo nelle analisi di filtrazione.
4. (Galleria Fereggiano) –Installazione degli ancoraggi radiali (85% relax);
5. (Galleria Fereggiano) - Getto spritz-beton (total relax);
6. (Galleria Fereggiano) - Installazione rivestimento definitivo (condizione di lungo termine). Rimozione della condizione al contorno idraulica di pressione relativa nulla sul cavo in ragione dell'impermeabilizzazione prevista della galleria.
7. Rimozione del terreno all'interno del profilo di scavo dello Scolmatore del Bisagno e contestuale applicazione, sul contorno, delle forze fittizie di scavo (pressioni), di entità pari allo stato tensionale locale in situ, in corrispondenza del profilo di scavo medesimo – al termine di tale step di calcolo è imposto il reset del campo di spostamento entro l'ammasso, mantenendo il tasso tenso-deformativo all'interno dell'ammasso di riferimento.
8. Apertura del fronte di scavo, con relativa riduzione delle forze fittizie di scavo (25 % relax). Pressione dell'acqua nulla sul contorno del cavo nelle analisi di filtrazione.
9. Installazione degli ancoraggi radiali (superswellex pm24) e centine metalliche (60% relax);
10. Getto spritz-beton;
11. Maturazione spritz-beton (98% relax);
12. Installazione rivestimento definitivo(total relax) e condizione di lungo termine con decadimento del rivestimento di prima fase. Rimozione della condizione al contorno idraulica di pressione relativa nulla sul cavo in ragione dell'impermeabilizzazione prevista della galleria.

5.9 Sezione 1 – Caserma Nord Forte San Giuliano

5.9.1 Descrizione sezione di calcolo

La sezione di analisi studia lo scavo della galleria scolmatrice in prossimità del passaggio al di sotto del complesso principale del Forte San Giuliano (entrata via Gobetti).

Nella presente analisi è stato supposto un affondamento del piano di fondazioni dell'edificio principale di 1.50 m. Cautelativamente, si è mantenuta la stessa quota di fondazioni anche per l'edificio attiguo (Edificio 6bis). Pertanto la copertura effettiva in asse galleria risulta ridotta e pari a 15.5 m.

Ad Ovest dell'edificio si trova un terrapieno originario della struttura del Forte le cui caratteristiche meccaniche sono state indicate nel paragrafo precedente.

I carichi equivalenti del complesso di edifici in sezione sono stati computati come indicato nel precedente paragrafo:

- 0.11 MPa (Edificio 6). Laddove l'edificio raggiunge l'altezza di 24 m (si veda Figura seguente), il carico equivalente raggiunge il valore di 0.13 MPa;
- 0.055 MPa (Edificio 6 bis).

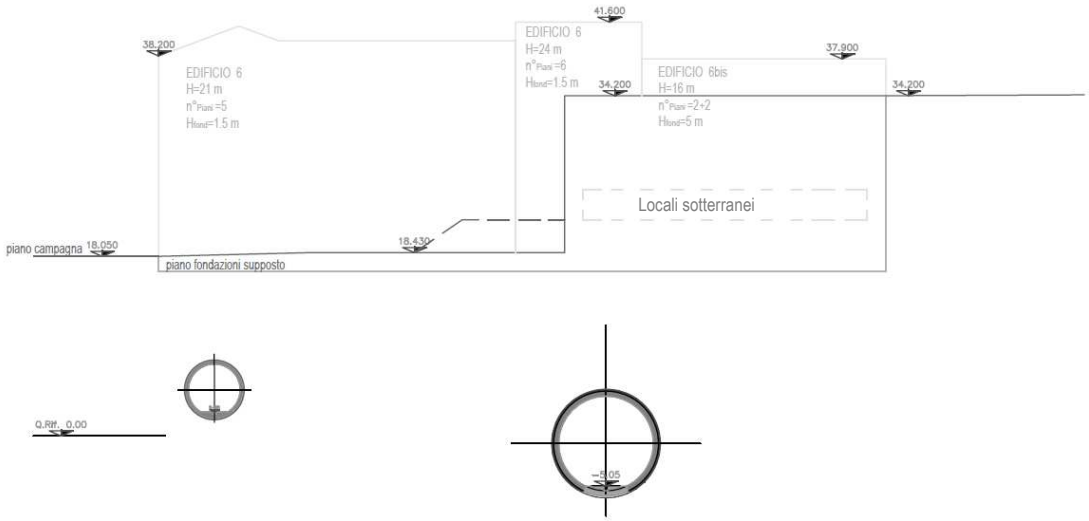


Figura 5-4 – Dettaglio sezione di calcolo (sezione 1)

Le condizioni al contorno imposte sono le seguenti:

- spostamenti laterali impediti lungo i bordi laterali del dominio ;
- spostamenti verticali e laterali impediti lungo il bordo inferiore del dominio;
- spostamenti laterali impediti in corrispondenza delle facciate laterali dell'edificio.

La stratigrafia della sezione in esame comprende prevalentemente la formazione rocciosa del Flysch del Monte Antola e il terrapieno superficiale a destra della galleria. La distinzione tra FMA (1), (2), (3) è utilizzata al solo scopo di assegnare diverse conducibilità idrauliche alla formazione rocciosa ($k=1*10^{-6}$ m/s per lo strato di FMA (1), $k=5*10^{-7}$ m/s per lo strato di FMA (2), $k=1*10^{-7}$ m/s per lo strato di FMA (3)).

Il modello di calcolo ha dimensioni 73m*145m ed è stato discretizzato con una mesh triangolare di 6 nodi per elemento (n° nodi: 10396, n° elementi 5145).

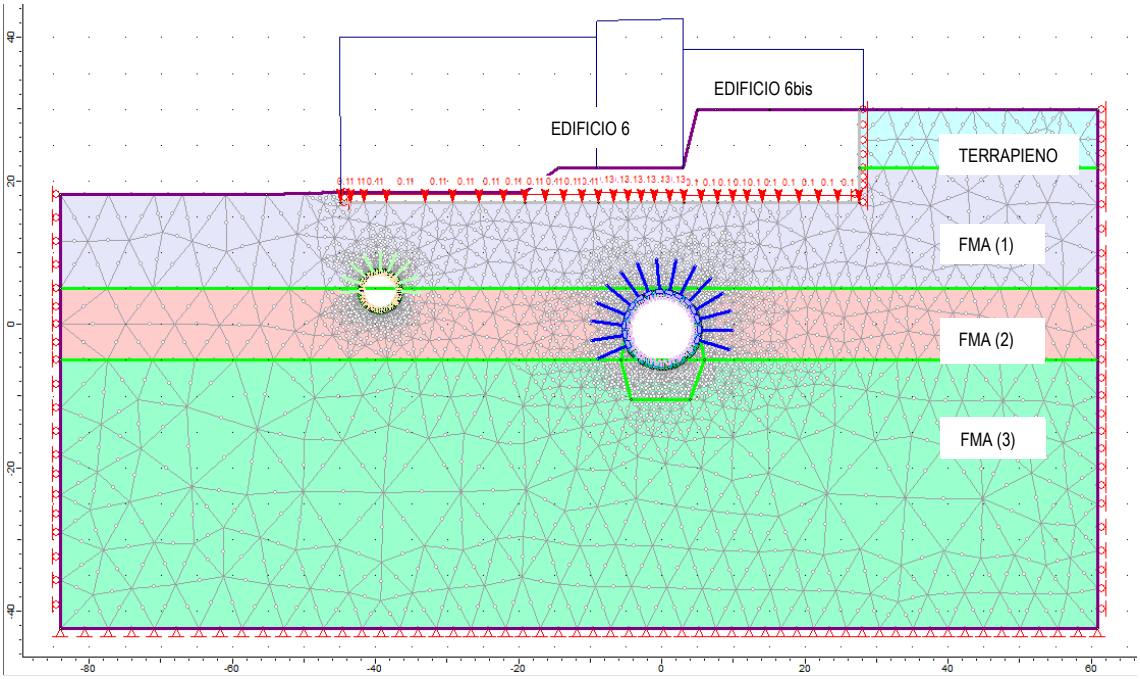


Figura 5-5 – Sezione di calcolo (sezione 1)

5.9.2 Risultati dell'analisi in assenza di falda

Si riportano i risultati dell'analisi in termini di plasticizzazioni e spostamenti in corrispondenza della fase di relax 100%, considerato lo stage più sfavorevole dal punto di vista delle deformazioni interessanti l'ammasso e i conseguenti cedimenti superficiali. Non vengono riportate le verifiche strutturali dei prerivestimenti e dei rivestimenti definitivi della galleria in quanto esulano gli scopi di questo documento.

Non si rilevano fenomeni di plasticizzazione al contorno del cavo, indice di una risposta prettamente elastica dell'ammasso roccioso.

La risposta media deformativa del cavo sostenuto dai prerivestimenti è di circa 4 mm e il campo di spostamenti verticali misurato per il piano di fondazioni raggiunge valori massimi di 1.2 mm.

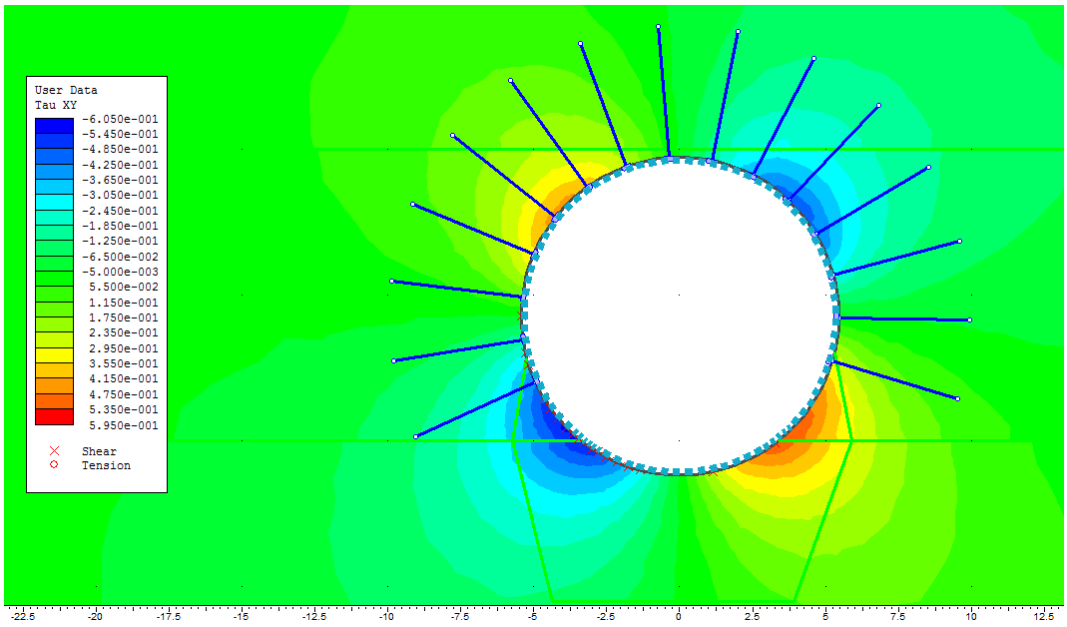


Figura 5-6 - Sforzi di taglio con indicazione dei punti plasticizzati

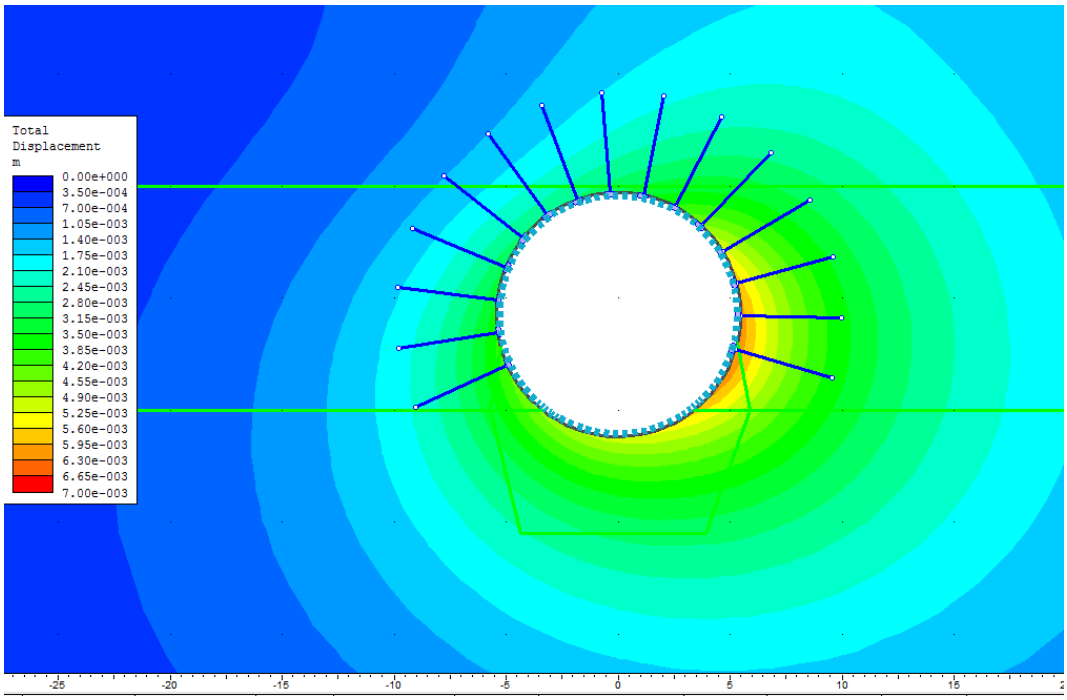


Figura 5-7–Convergenza del cavo (Total displacement)

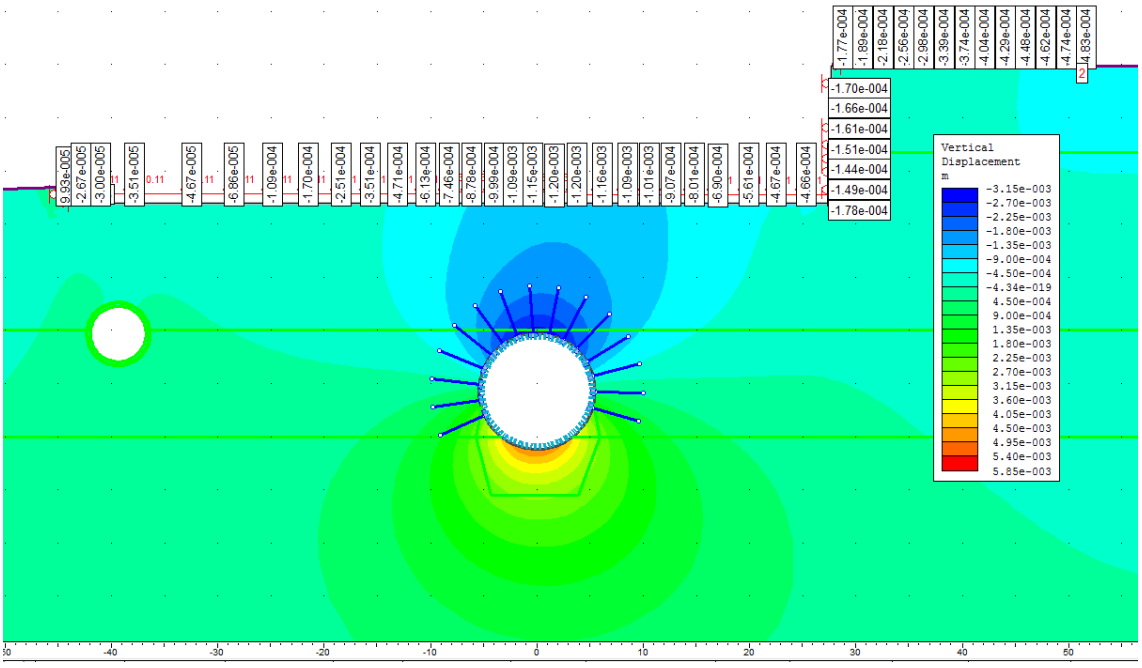


Figura 5-8 Andamento dei cedimenti sul piano di fondazioni

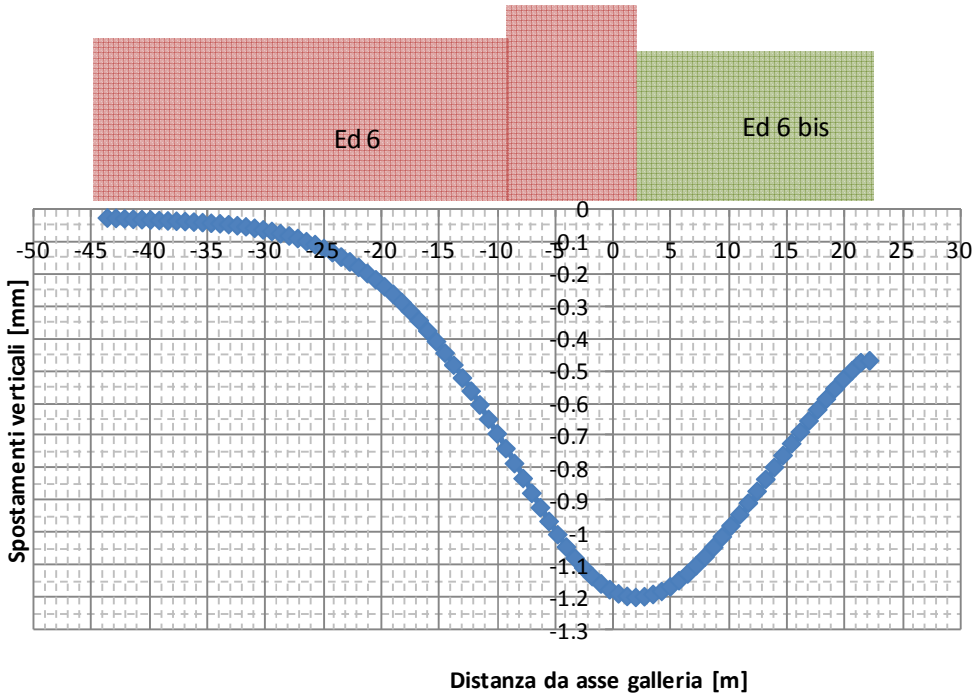


Figura 5-9 – Andamento quantitativo dei cedimenti sul piano di fondazioni

5.9.3 *Risultati dell'analisi in presenza di falda*

Si riportano i risultati dell'analisi in termini di plasticizzazioni e spostamenti in corrispondenza della fase di relax 100%, considerato lo stage più sfavorevole dal punto di vista delle deformazioni interessanti l'ammasso e i conseguenti cedimenti superficiali. Non vengono riportate le verifiche strutturali dei prerivestimenti e dei rivestimenti definitivi della galleria in quanto esulano gli scopi di questo documento.

Durante lo scavo della galleria è stata imposta come detto in precedenza la condizione di pressione relativa nulla sul cavo non rivestito. La Figura seguente mostra l'andamento delle pressioni dell'acqua alla fine dello stage di rilassamento del cavo.

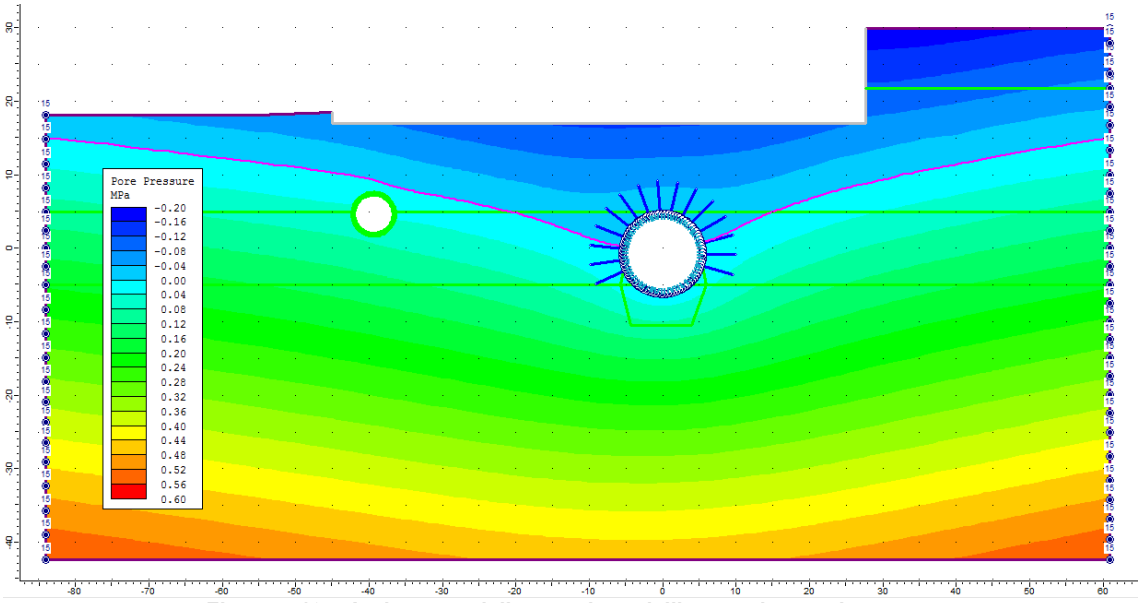


Figura 5-10 – Andamento della pressione dell'acqua durante lo scavo

Similarmente a quanto ottenuto nell'analisi in assenza di falda acquifera, non si rilevano fenomeni di plasticizzazione al contorno del cavo, indice di una risposta prettamente elastica dell'ammasso roccioso.

La risposta media deformativa del cavo sostenuto dai pre-rivestimenti è di circa 5 mm, pur tuttavia l'abbassamento del livello di falda determina una variazione del regime di pressioni interstiziali e conseguente campo tensionale efficace litostatico (in aumento) cui si associano locali incrementi delle convergenze nella pozione superiore del cavo. Tale condizione, numericamente, si traduce in maggiori cedimenti del p.c., comunque limitati a 5.5 mm.

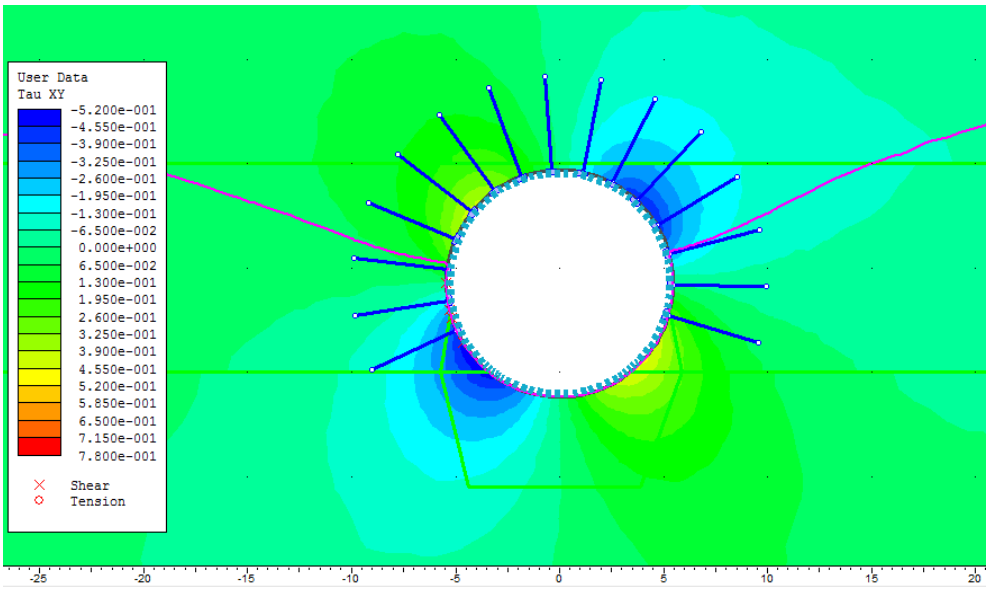


Figura 5-11 - Sforzi di taglio con indicazione dei punti elasticizzati

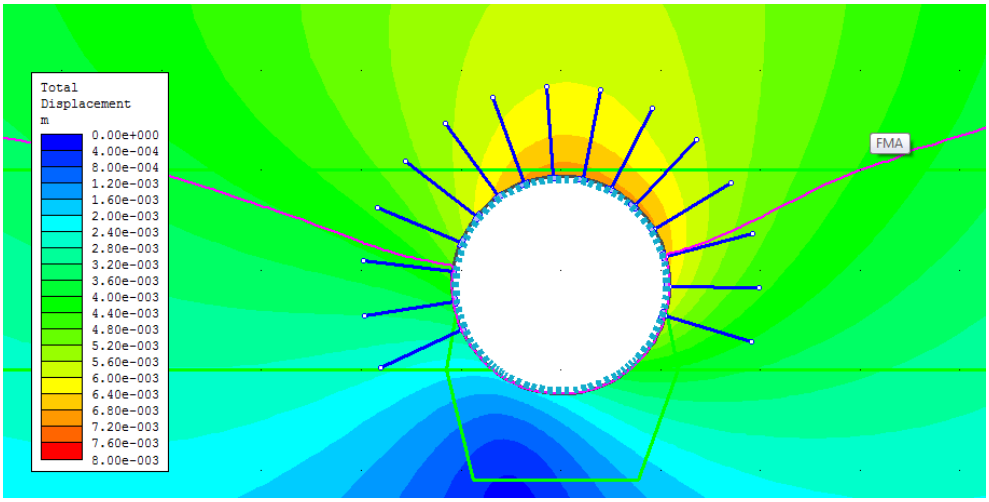


Figura 5-12 – Convergenza del cavo (Total displacement)

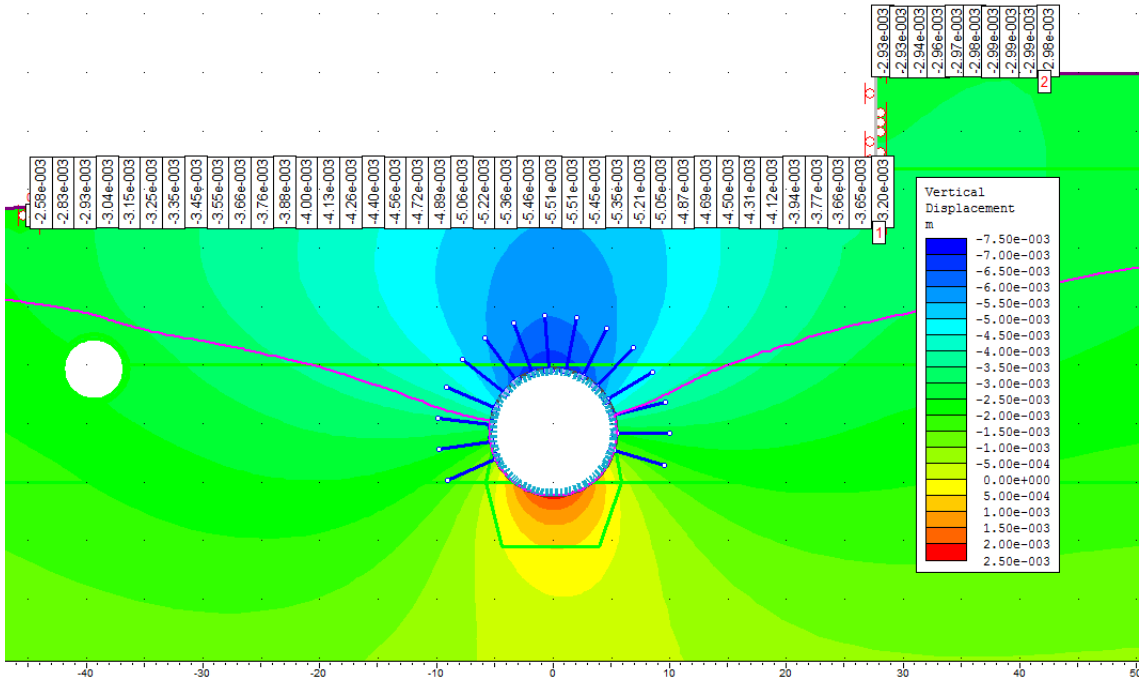


Figura 5-13 Andamento dei cedimenti sul piano di fondazioni

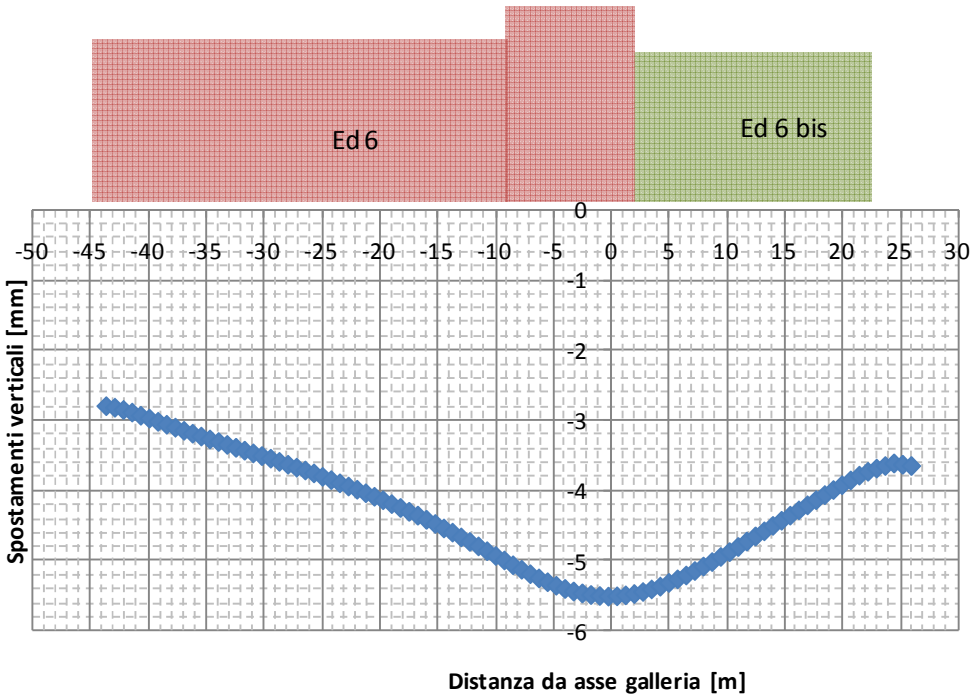


Figura 5-14 – Andamento quantitativo dei cedimenti sul piano di fondazioni

5.10 Sezione 2 – Caserma Forte San Giuliano - Mensa

5.10.1 Descrizione sezione di calcolo

La sezione di analisi studia lo scavo della galleria scolmatrice in prossimità del passaggio al di sotto del complesso del Forte San Giuliano (Edificio 2 e 4).

Nella presente analisi è stato supposto, così come fatto nella sezione di calcolo precedente, un affondamento del piano di fondazioni degli edifici di 1.50 m. Pertanto, la copertura effettiva in asse galleria risulta ridotta e pari a 10.5 m.

A monte dell' Edificio 2 si trova il terrapieno già individuato nelle altre sezioni le cui caratteristiche meccaniche sono state indicate nel paragrafo precedente.

I carichi equivalenti degli edifici 4 e 2 sono stati computati come indicato nel precedente paragrafo:

- 0.055 MPa (Edificio 4);
- 0.055 MPa (Edificio 2).

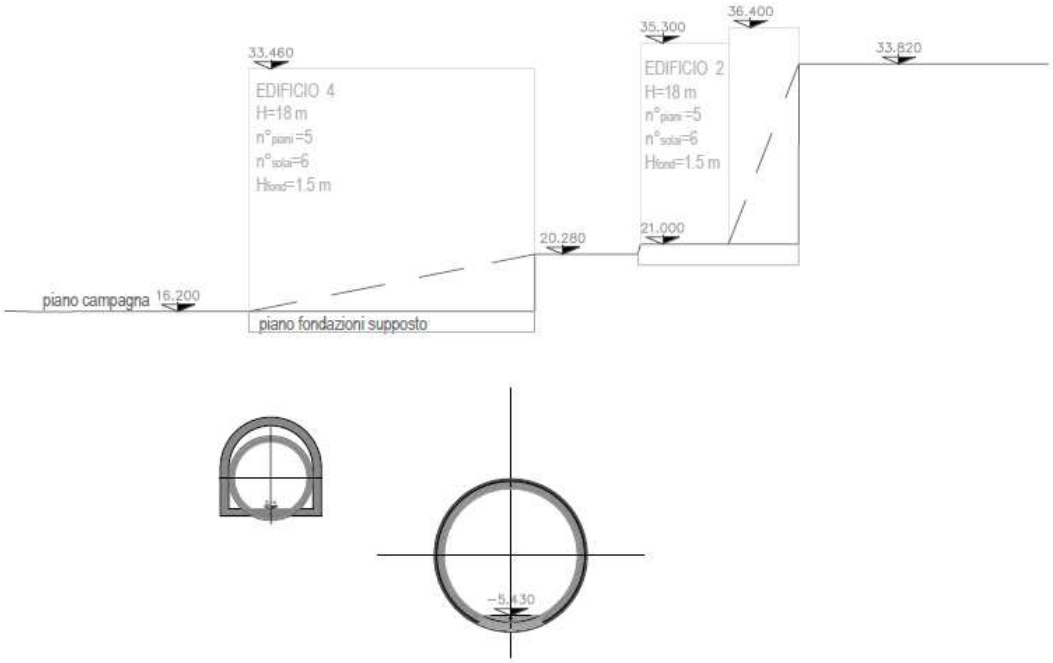


Figura 5-15 – Dettaglio sezione di calcolo (sezione 2)

Le condizioni al contorno imposte sono le seguenti:

- spostamenti laterali impediti lungo i bordi laterali del dominio ;
- spostamenti verticali e laterali impediti lungo il bordo inferiore del dominio;
- spostamenti laterali impediti in corrispondenza degli spigoli verticali degli edifici.

La stratigrafia della sezione in esame comprende prevalentemente la formazione rocciosa del Flysch del Monte Antola e il terrapieno superficiale a destra della galleria (contenuto da un muro di sostegno). La distinzione tra FMA (1), (2), (3) è utilizzata al solo scopo di assegnare diverse conducibilità idrauliche alla formazione ($k=1*10^{-6}$ m/s per lo strato di FMA (1), $k=5*10^{-7}$ m/s per lo strato di FMA (2), $k=1*10^{-7}$ m/s per lo strato di FMA (3)).

Il modello di calcolo ha dimensioni 73m*145m ed è stato discretizzato con una mesh triangolare di 6 nodi per elemento (n° nodi: 8021, n° elementi 3860).

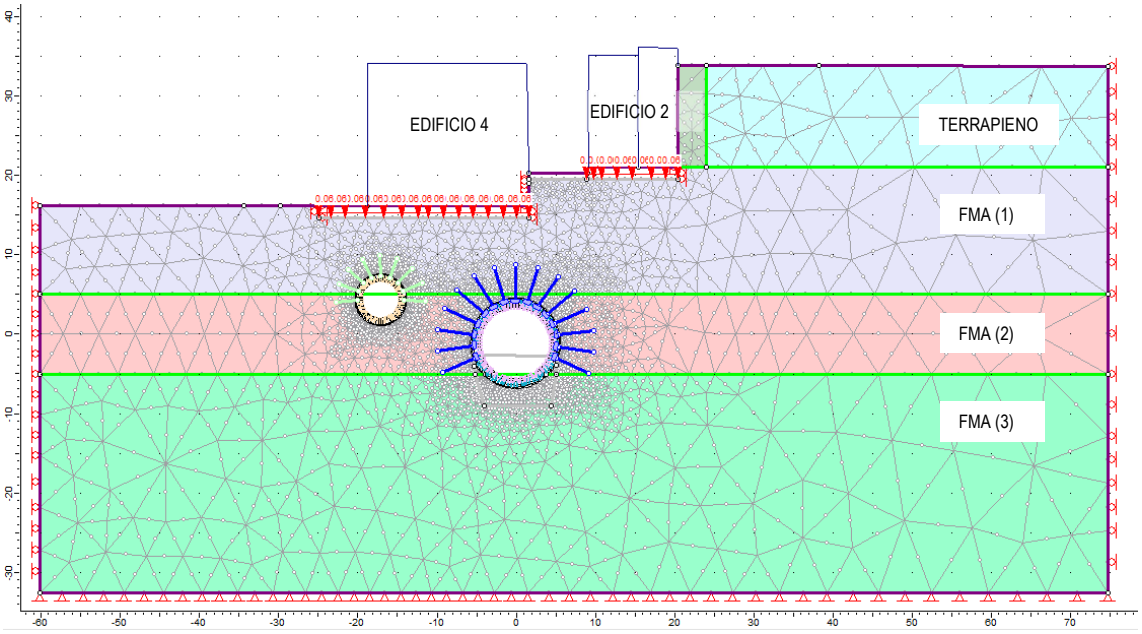


Figura 5-16 – Sezione di calcolo (sezione 2)

5.10.2 Risultati dell'analisi in assenza di falda

Si riportano i risultati dell'analisi in termini di plasticizzazioni e spostamenti in corrispondenza della fase di relax 100%, considerato lo stage più sfavorevole dal punto di vista delle deformazioni interessanti l'ammasso e i conseguenti cedimenti superficiali. Non vengono riportate le verifiche strutturali dei prerivestimenti e dei rivestimenti definitivi della galleria in quanto esulano gli scopi di questo documento.

Si rilevano solo puntuali fenomeni di plasticizzazione sul contorno del cavo, localizzati prevalentemente in arco rovescio e connessi al superamento della resistenza a taglio.

La risposta media deformativa del cavo sostenuto dai pre-rivestimenti è 2 mm. I corrispondenti in superficie, determinati numericamente, sono inferiori al millimetro.

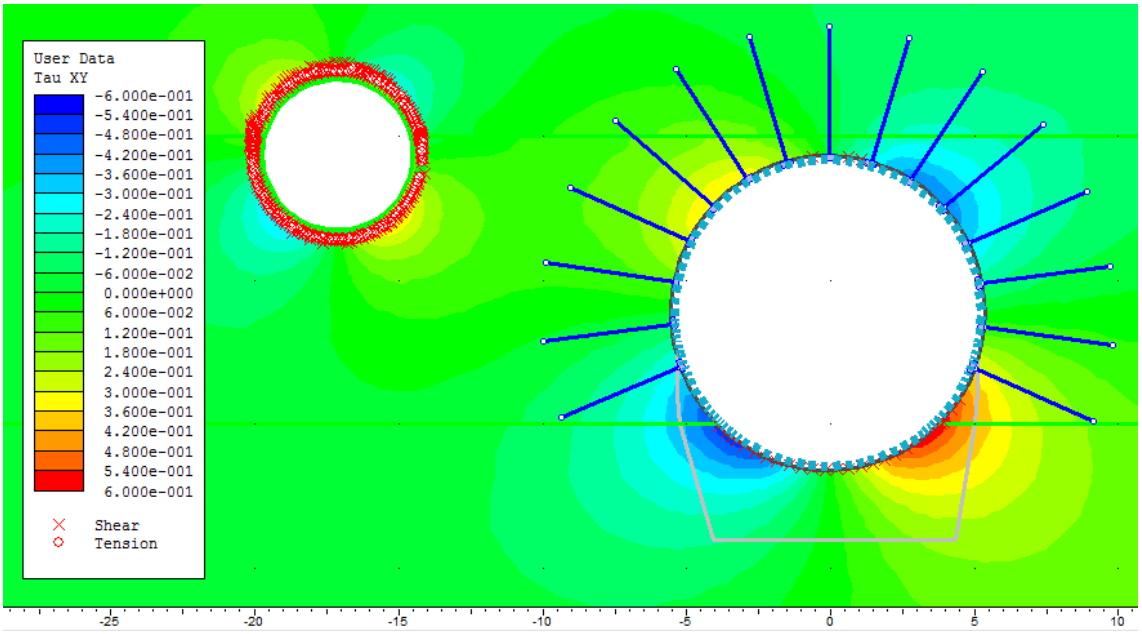


Figura 5-17 - Sforzi di taglio con indicazione dei punti plasticizzati

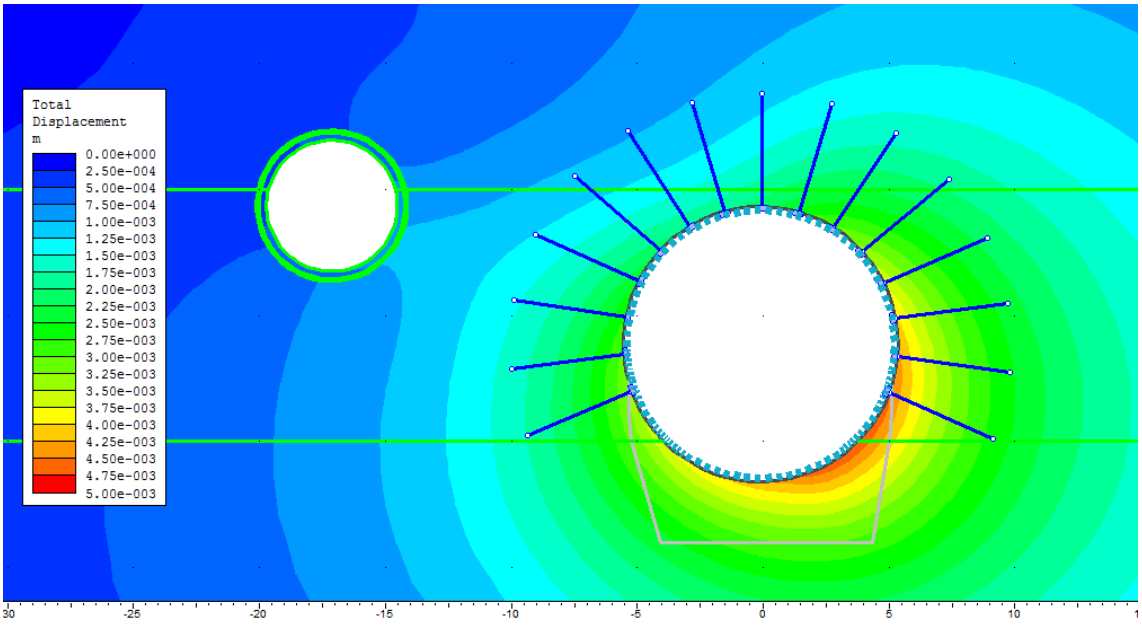


Figura 5-18 – Convergenza del cavo (Total displacement)

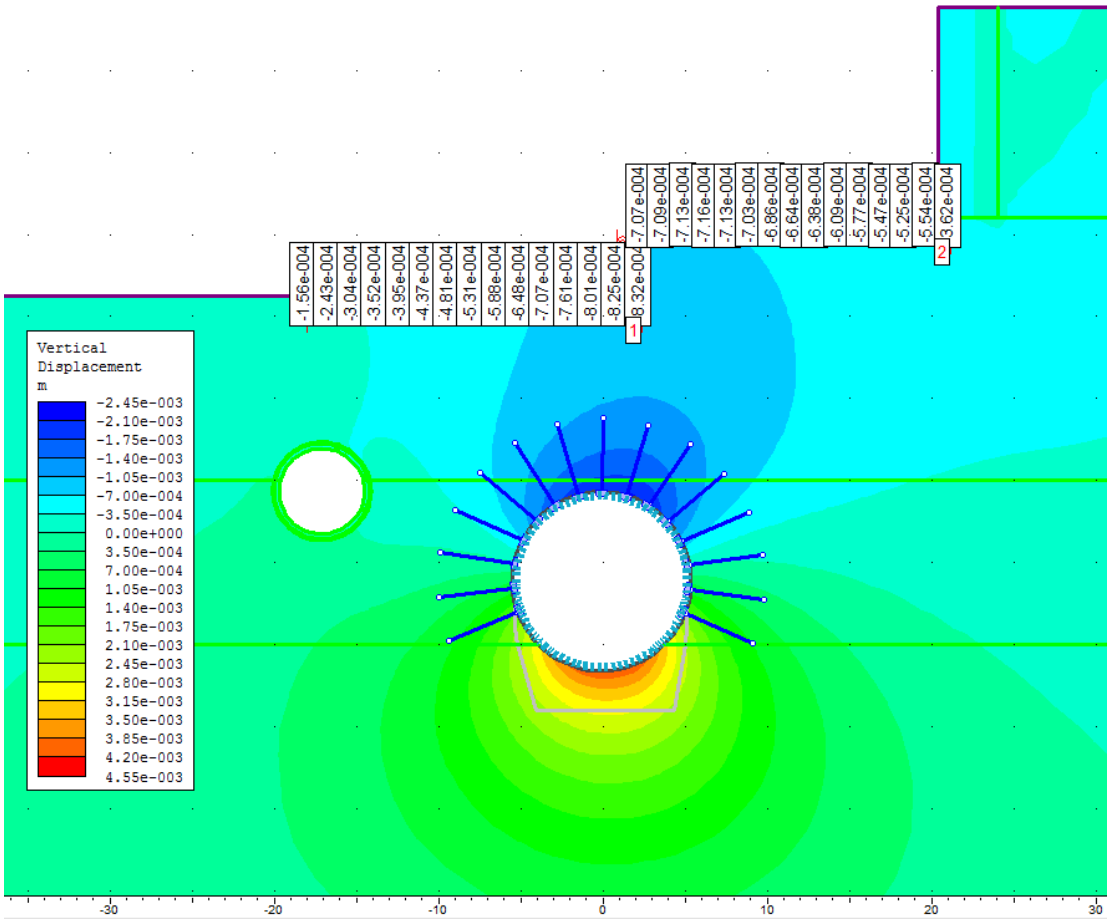


Figura 5-19 Andamento dei cedimenti in superficie

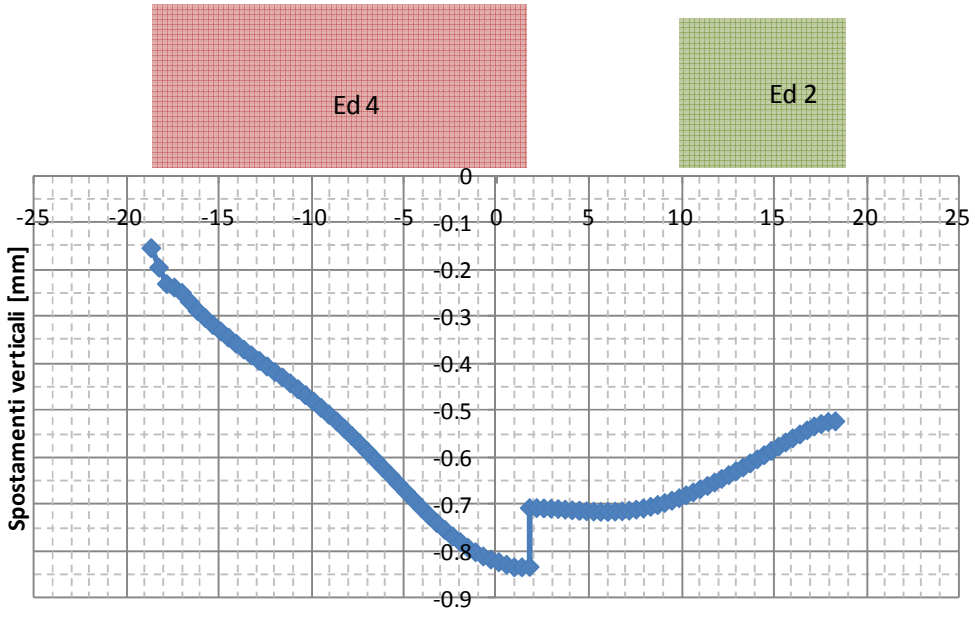


Figura 5-20 – Andamento quantitativo dei cedimenti sul piano di fondazioni

5.10.3 *Risultati dell'analisi in presenza di falda*

Si riportano i risultati dell'analisi in termini di plasticizzazioni e spostamenti in corrispondenza della fase di relax 100%, considerato lo stage più sfavorevole dal punto di vista delle deformazioni interessanti l'ammasso e i conseguenti cedimenti superficiali. Non vengono riportate le verifiche strutturali dei prerivestimenti e dei rivestimenti definitivi della galleria in quanto esulano gli scopi di questo documento.

Durante lo scavo della galleria è stata imposta come detto in precedenza la condizione di pressione nulla sul cavo non rivestito. La Figura seguente mostra l'andamento delle pressioni alla fine dello stage di rilassamento del cavo.

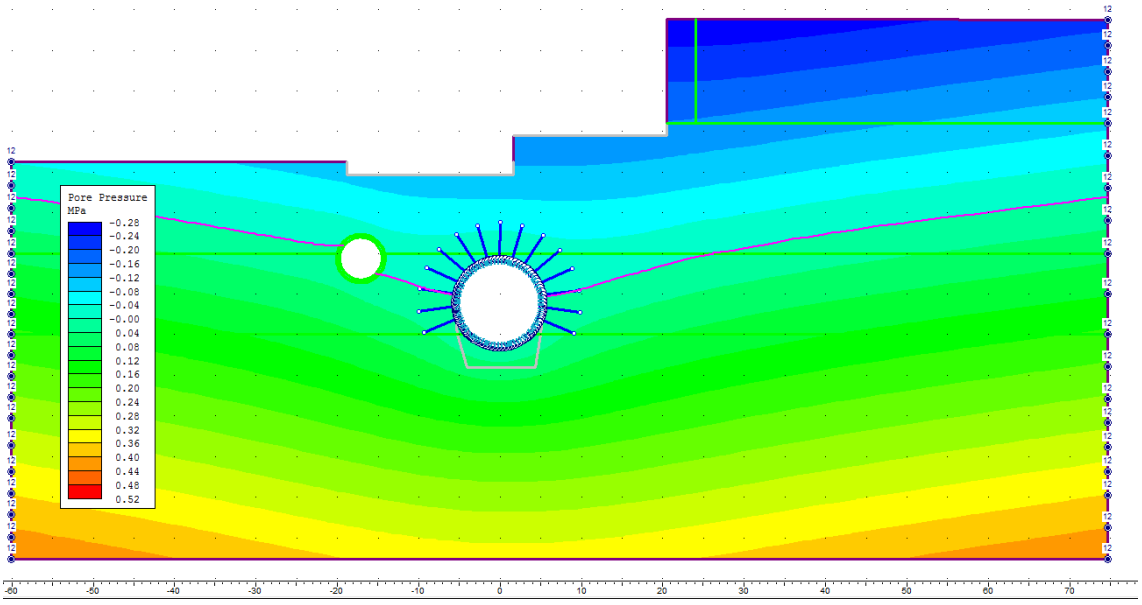


Figura 5-21 – Andamento pressione dell'acqua durante lo scavo

L'estensione delle plasticizzazioni al contorno del cavo è molto simile a quella ottenuta in assenza di falda acquifera, con locali fenomeni di plasticizzazione prevalentemente localizzati in arco rovescio e connessi al superamento della resistenza al taglio.

La risposta media deformativa del cavo sostenuto dai pre-rivestimenti è di 3 mm. Analogamente a quanto rilevato per la precedente sezione di analisi, l'abbassamento del livello di falda determina una variazione del regime di pressioni interstiziali e conseguente campo tensionale efficace litostatico (in aumento) cui si associano locali incrementi delle convergenze nella pozione superiore del cavo. Tale condizione, numericamente, si traduce in maggiori cedimenti del p.c., comunque limitati a 4 mm.

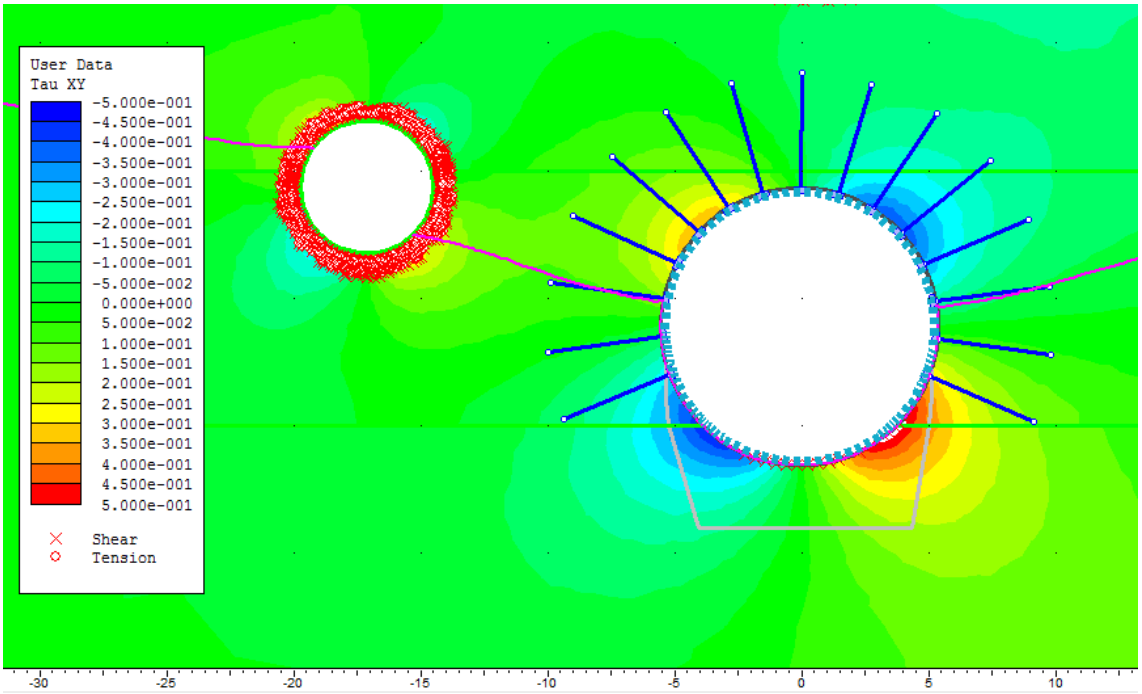


Figura 5-22 - Sforzi di taglio con indicazione dei punti plasticizzati

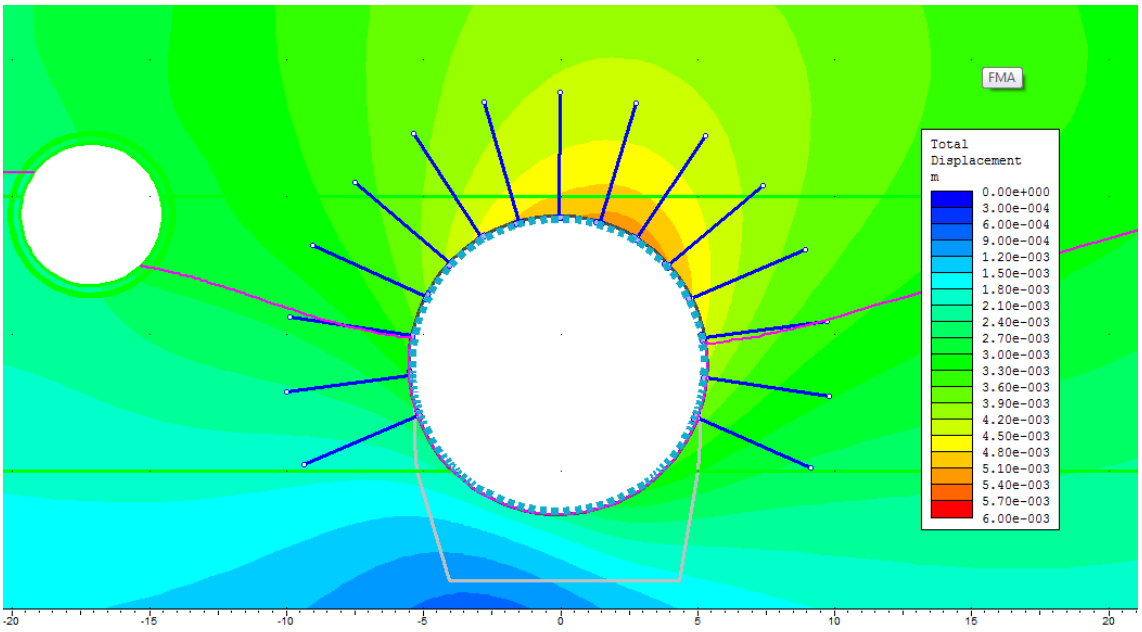


Figura 5-23 – Convergenza del cavo (Total displacement)

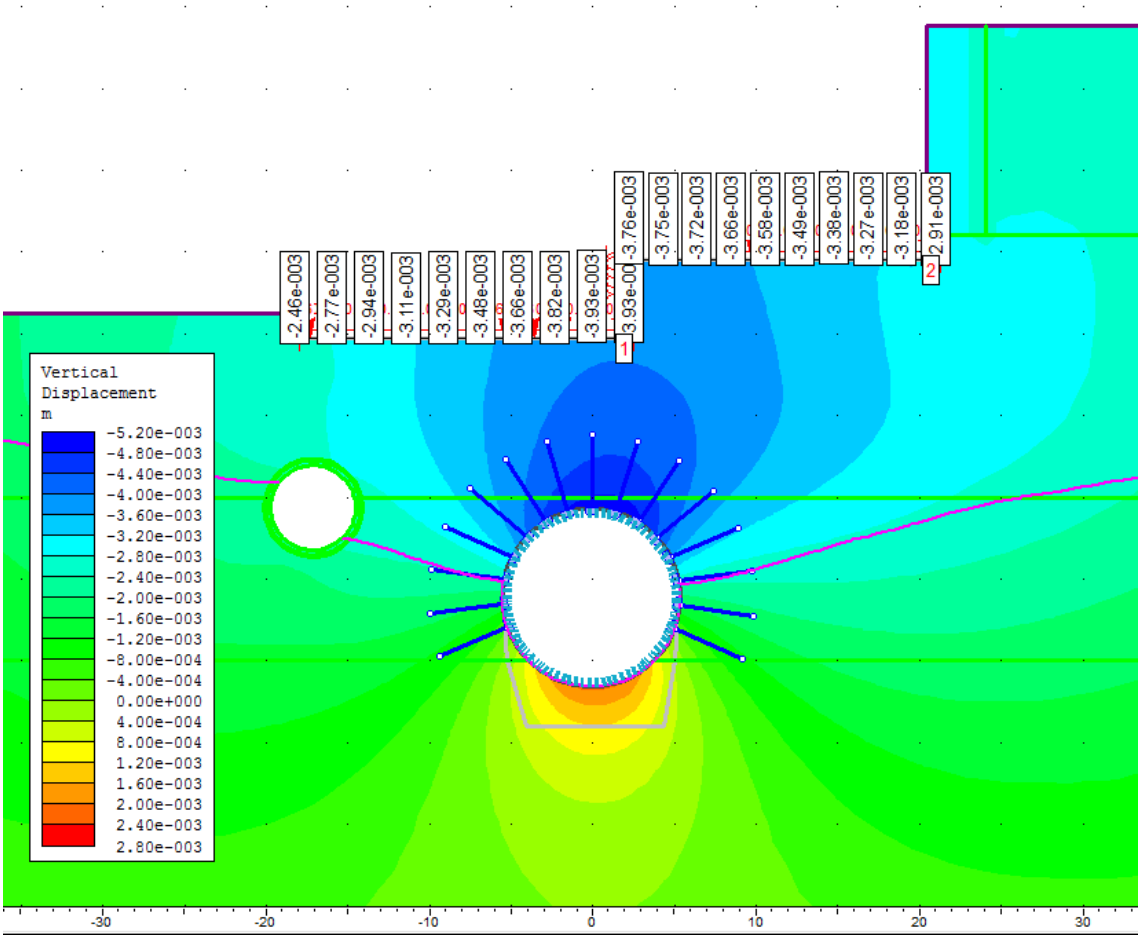


Figura 5-24 Andamento dei cedimenti sul piano di fondazioni

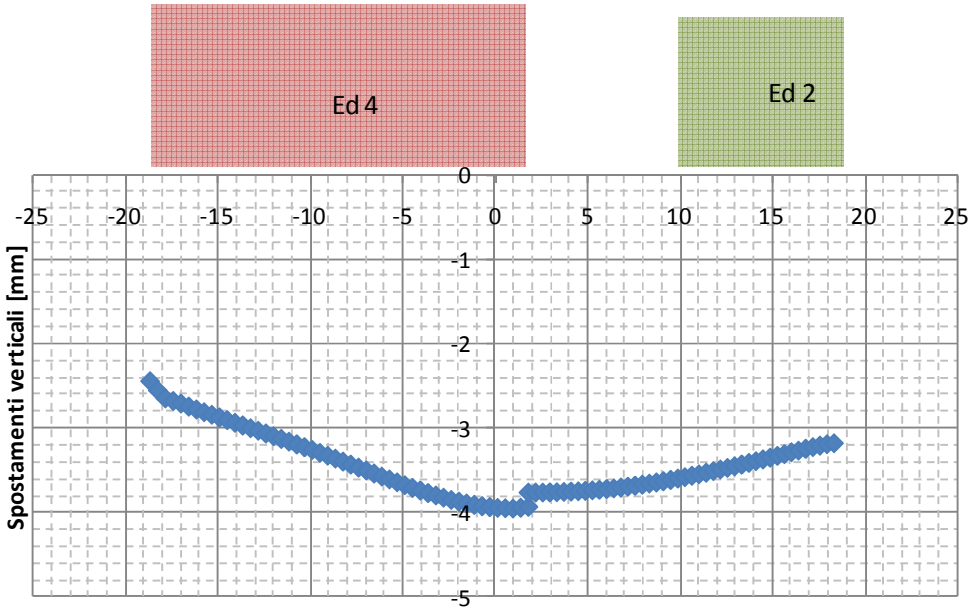


Figura 5-25 – Andamento quantitativo dei cedimenti sul piano di fondazioni

5.11 Valutazione categoria di danno

Partendo dalle curve di cedimento ricavate numericamente, in questa sezione si è proceduto all'individuazione delle zone di hogging and sagging e alla valutazione della categoria di danno attesa per ciascun fabbricato.

5.11.1 Cenni teorici procedura operativa per la valutazione della categoria di danno

La procedura per l'individuazione della categoria di danno è quella suggerita da letteratura (Mair e Taylor e Burland – *Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunneling*). Come indicato in Mair, Taylor e Burland, la categoria di danno è correlata con la deformazione unitaria massima di allungamento ε_{max}.

La determinazione di tale deformazione può essere individuata assimilando l'edificio ad un corpo elastico di altezza H, lunghezza L, momento d'inerzia I e rapporto tra moduli elastici E/G pari a 12.5 per il cemento armato e a 2.6 per la muratura. Nell'analisi svolta cautelativamente gli edifici misti muratura-c.a. sono stati considerati con un valore di E/G pari a 2.6, assimilati quindi a edifici in muratura.

Il bacino di subsidenza può essere suddiviso in due zone distinte in base alle modalità di deformazione del piano campagna, come rappresentato in Figura 5-26 – Zona di hogging e sagging .

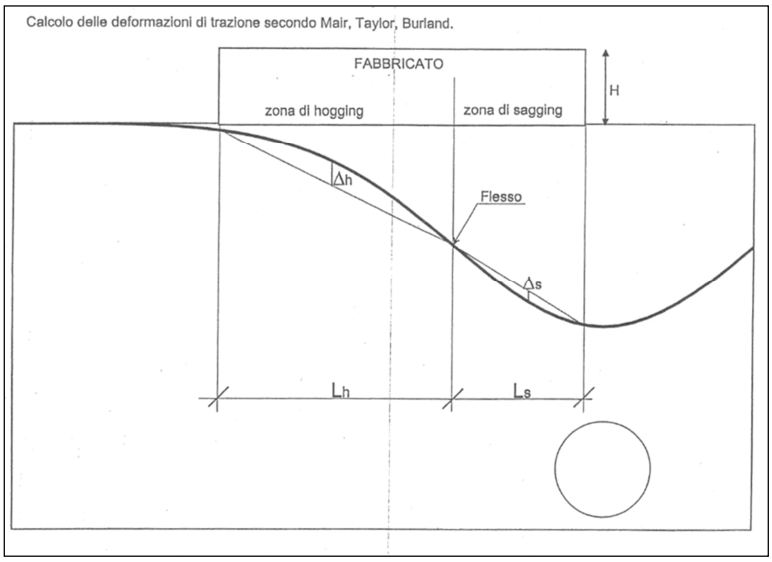


Figura 5-26 – Zona di hogging e sagging

- Zona di hogging(concavità della deformata orientata verso il basso):
  momento d'inerzia edificio⇒ $I=H^3/3$
  distanza asse neutro dal lembo teso = H
- Zona di sagging(concavità della deformata orientata verso l'alto):
  momento d'inerzia edificio ⇒ $I=H^3/12$
  distanza asse neutro dal lembo teso = H/2

Il punto di inflessione dello spostamento, (i), divide quindi l'edificio nelle due zone sopra indicate.

Nella zona di hogging (-i > y > i) dove l'asse neutro è pari ad H, tutti gli sforzi dovuti alla flessione sono di trazione, mentre nella zona di sagging, dove l'asse neutro si assume pari ad H/2, la flessione induce sforzi sia di compressione che di trazione.

Definita l'inflessione massima Δ/L, così come indicato dagli Autori, è possibile risalire alle deformazioni unitarie massime per trazione.

Per quanto dovuto a sollecitazioni di flessione, le deformazioni si sviluppano parallelamente all'asse dell'edificio e valgono:

$$\varepsilon_b = \left(\frac{\Delta}{L}\right) \times \frac{1}{\left[\left(\frac{L}{12t}\right) + \left(\frac{3EI}{2tLHG}\right)\right]}$$

dove t = (H;H/2) secondo se ci si trova in zona Hogging o Sagging.

Invece per le deformazioni dovute taglio si ha:

$$\varepsilon_d = \left(\frac{\Delta}{L}\right) \times \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{HL^2G}{18EI}\right)\right]}$$

Si considera inoltre il contributo dovuto alle deformazioni orizzontali (ε_h) che verrà combinato con la deformazione di flessione e taglio.

$\varepsilon_{bt} = \varepsilon_h + \varepsilon_b$

$$\varepsilon_{dt} = 0.35\varepsilon_h + \sqrt{\left((0.65\varepsilon_h)^2 + \varepsilon_d{}^2\right)}$$

Si ottiene quindi la massima deformazione di trazione ε_{max} pari al valore massimo tra ε_{bt} e ε_{dt}

€ Si riportano nel seguito le tabelle di sintesi di Boscarding e Cording (1989).

Categoria del danno	Intensità del danno	Deformazione limite di trazione ε_{lim} (%)
0	Trascurabile	0÷0.05
1	Molto lieve	0.05÷0.075
2	Lieve	0.075÷0.15
3	Moderata	0.15÷0.3
4	Severa	0.3÷0.45
5	Molto severa	>0.45

Tabella 5-2 - Boscardin e Cording, 1989

Categoria del danno	Intensità del danno	Descrizione
0	Trascurabile	Fessure capillari con aperture ≤ 0.1mm.
1	Molto lieve	Fessure sottili cui si rimedia facilmente con lavori di pitturazione. Il danno è limitato agli intonaci delle pareti interne. Fessure alle parti esterne rilevabili con attento esame. Tipica apertura delle lesioni ≤ 1mm.
2 bassa 2 alta	Lieve Meno Lieve	Fessure facilmente stuccabili, ripitturazione necessaria. Le fessure ricorrenti possono essere mascherate con opportuni rivestimenti. Fessure anche visibili all'esterno; può essere necessaria qualche ripresa della spillatura per garantire l'impermeabilità. Possibili difficoltà nell'apertura di porte e finestre. Tipica apertura delle lesioni ≤ 5m.
3	Moderata	Le fessure richiedono cuci e scuci della muratura. Anche all'esterno necessari interventi sulla muratura. Possibile blocco di porte e finestre. Rottura di tubazioni. Spesso l'impermeabilità non è garantità. Tipica apertura delle lesioni 5 ÷ 15 mm, oppure molte lesioni ≤ 3.
4	Severa	Necessarie importanti riparazioni, compresa demolizione e ricostruzione di parti di muri, specie al di sopra di porte e finestre. I telai di porte e finestre si distorcono; percepibile pendenza di pavimenti. Muri inclinati o spanciati; qualche perdita d'appoggio di travi. Tubazioni distrutte. Tipica apertura delle lesioni 15 ÷ 25 mm, dipendente anche dal numero di lesioni.
5	Molto severa	Richiesti importanti lavori con parziale e totale demolizione e ricostruzione. Le travi perdono l'appoggio, i muri si inclinano fortemente e richiedono puntellatura. Pericolo di instabilità. Tipica apertura delle lesioni superiori a 25 mm, dipendente anche dal numero di lesioni.

Tabella 5-3 - Boscardin e Cording, 1989

La categoria di *danno ammissibile* per un fabbricato dipende dalle caratteristiche dell'edificio stesso, ovvero dalla metodologia costruttiva (strutture in c.a./acciaio o muratura), dallo stato di conservazione (stato buono o precario) e dalla destinazione d'uso.

Particolare attenzione deve essere posta per gli edifici di pregio, specie quelli di natura storico-monumentale come il forte San Giuliano.

Alla luce di un'attenta analisi delle interferenze presenti lungo la tratta in esame, l'analisi dei cedimenti è stata finalizzata agli edifici ritenuti più significativi e più critici per posizione e volume, per lo studio proposto(Edificio 6, Edificio 4).

Per questi edifici è ritenuta ammissibile la classe di danno 0.

Osservazioni:

La metodologia impiegata per le analisi di interferenza si basa sulle seguenti ipotesi:

- gli spostamenti e le deformazioni indotte sugli edifici sono assunte pari a quelle corrispondenti alla condizione "*green-field*";
- la rigidezza degli edifici analizzati è considerata nulla; in realtà le opere di fondazione interagiscono con il terreno riducendo il rapporto di inflessione e le deformazioni orizzontali ottenute nella condizione "*green-field*";
- nessuna distinzione tra fondazioni su plinti, su trave e su platea che presentano chiaramente comportamenti differenti soprattutto nei confronti degli spostamenti orizzontali;

L'approccio risulta sicuramente conservativo, determinando quindi classi di danno che possono essere assunte come condizioni superiori, affinabili verso classi inferiori in virtù di modelli più approfonditi.

5.11.2 *Sezione 1 – Caserma Nord Forte San Giuliano*

Si riportano le curve di subsidenza ricavate numericamente mediante l'utilizzo del programma Phase2 e le tabelle di sintesi dei risultati in cui si evidenziano i valori ottenuti in termini di cedimento massimo dell'edificio, deformazioni massime nelle zone di hogging (zona tesa) e sagging (zona compressa) e relativa classe di danno.

Con riferimento alla sezione 1,la categoria di danno è stata stimata per il solo edificio 6, realizzato in muratura, su cui vige il vincolo architettonico di Bellezza puntuale e Area Bellezze d'Insieme. Non è stata calcolata la categoria di danno del fabbricato 6 bis (in Sezione 1 parte destra dell'edificio) perché sicuramente inferiore alla precedente vista la lontananza delle fondazioni dall'impronta di scavo e la modesta altezza.

Il bacino di subsidenza è stato determinato a partire dall'analisi ad elementi finiti condotta sulla sezione di calcolo descritta nei paragrafi precedenti che rappresenta le condizioni più critiche per l'edificio e considera l'effettiva posizione della galleria. Gli spostamenti verticali sono stati estratti lungo la base dell'edificio durante lo stage di total relax del cavo sostenuto soltanto dai prerivestimenti e in condizioni di pressione dell'acqua nulla lungo il contorno della galleria, in quanto massimizzante per l'interferenza tra scavo e edificio.

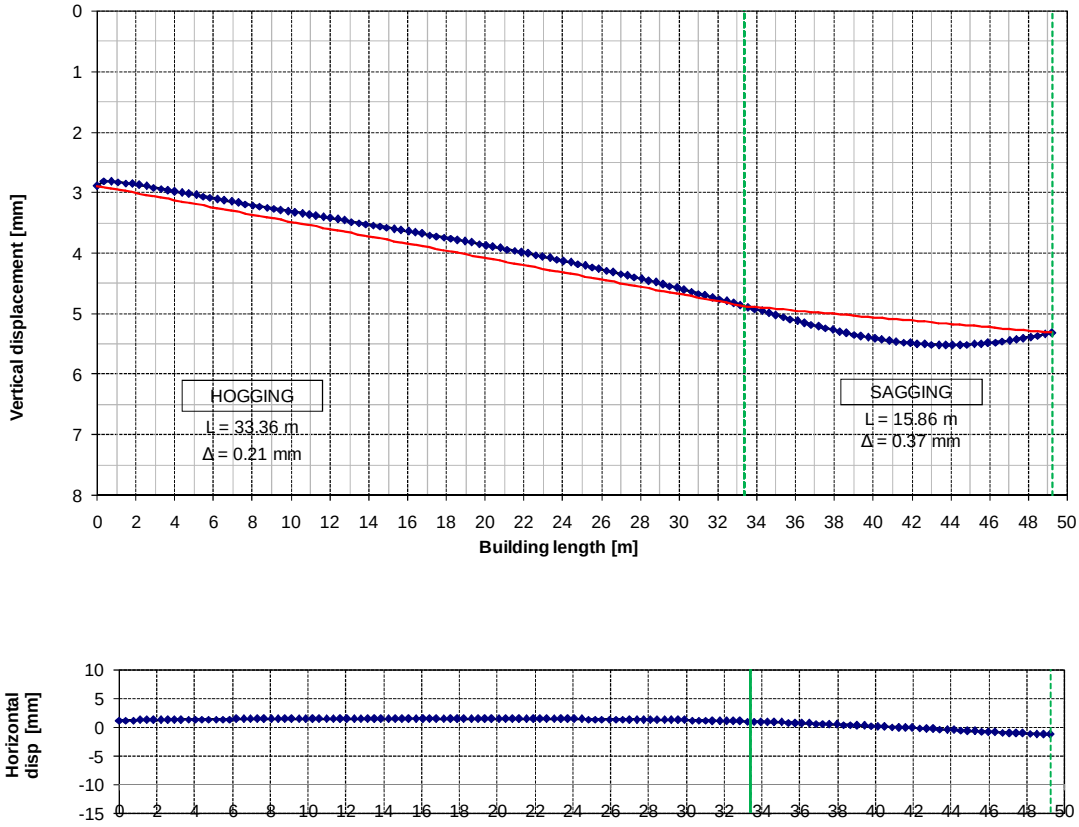


Tabella 5-4 – Grafico spostamenti verticali (in alto) e orizzontali (in basso) e indicazione punto di flesso per l'edificio 6

STRAINS DUE TO GROUND SETTLEMENTS		
	HOGGING	**SAGGING**
Length L (m)	33.37	15.86
Maximum deflection, Δ_{max} (mm)	0.21	0.38
Deflection ratio (Δ/L)max	0.00064%	0.00237%

ASSESSMENT OF POTENTIAL DAMAGE		
Height, H (m)	22.5	22.5
E/G	2.6	2.6
	HOGGING	SAGGING
Neutral axis t (m)	22.5	11.25
Second moment of area I (m^4)	3796.88	949.22
Maximum bending strain, ε_b	0.00064%	0.00228%
Maximum diagonal strain, ε_d	0.00056%	0.00210%
Horizontal ground strain, ε_h	0.00000%	0.00000%
Maximum tensile strain, ε_{max}	0.00064%	0.00228%
DAMAGE CATEGORY	0	0

RANKINE	
Maximum settlement [mm]	5.52
Max angular distortion β	1/6831

Tabella 5-5 – Tabelle di sintesi Sezione 1

Le deformazioni massime a cui è soggetto il fabbricato risultano essere inferiori allo 0.0006% nella zona di hogging e 0.0023% nella zona di sagging. Questi valori comportano una corrispondente classe di danno 0 secondo la classificazione di Boscardin e Cording.

5.11.3 *Sezione 2 – Caserma Forte San Giuliano - Mensa*

Si riportano le curve di subsidenza ricavate numericamente mediante l'utilizzo del programma Phase2 e le tabelle di sintesi dei risultati in cui si evidenziano i valori ottenuti in termini di cedimento massimo dell'edificio, deformazioni massime nelle zone di hogging (zona tesa) e sagging (zona compressa) e relativa classe di danno.

Con riferimento alla sezione 2,la categoria di danno è stata stimata per il solo edificio 4, realizzato in c.a., su cui vige il vincolo architettonico di Area Bellezze d'Insieme. Non è stata calcolata la categoria di danno del fabbricato 2 (in Sezione 2a destra della galleria) perché sicuramente inferiore alla precedente vista la maggiore copertura e la lontananza delle fondazioni dall'impronta di scavo.

Il bacino di subsidenza è stato determinato a partire dall'analisi ad elementi finiti condotta sulla sezione di calcolo descritta nei paragrafi precedenti che rappresenta le condizioni più critiche per l'edificio e considera l'effettiva posizione della galleria. Gli spostamenti verticali sono stati estratti lungo la base dell'edificio durante lo stage di total relax del cavo sostenuto soltanto dai prerivestimenti e in condizioni di pressione dell'acqua nulla lungo il contorno della galleria, in quanto massimizzante per l'interferenza tra scavo e edificio.

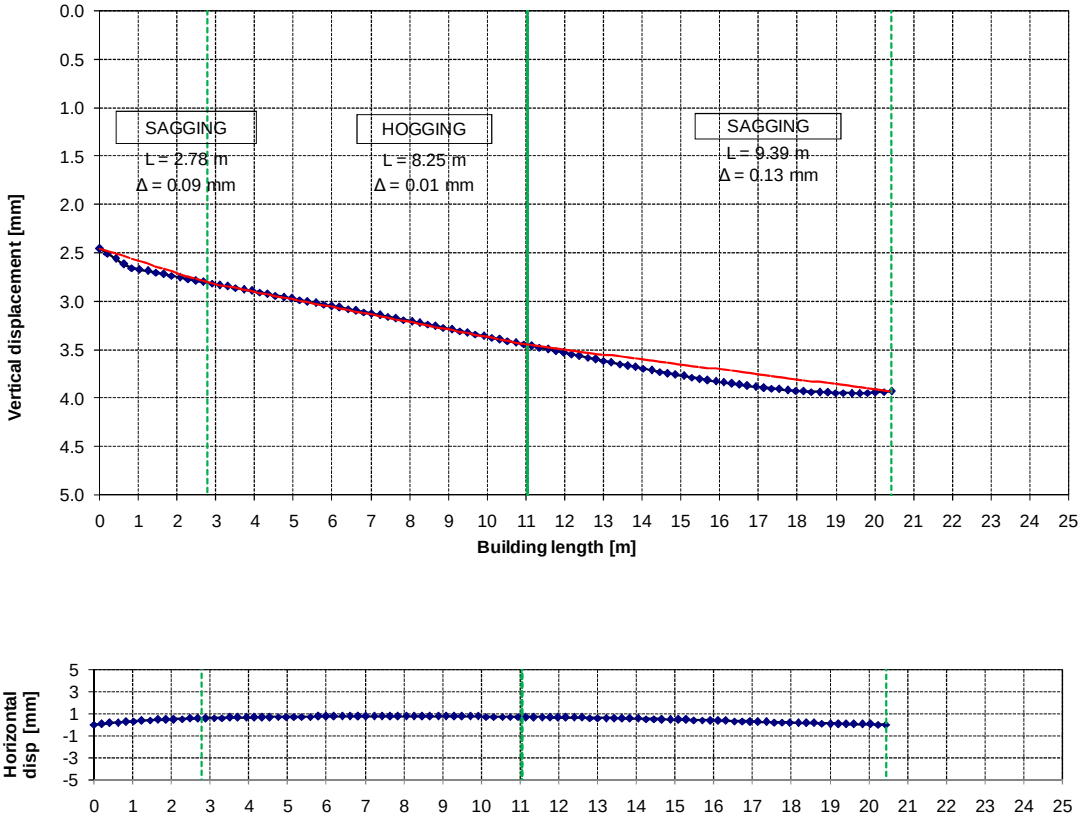


Tabella 5-6 – Grafico spostamenti verticali (in alto) e orizzontali (in basso) e indicazione punto di flesso per l'edificio 4

STRAINS DUE TO GROUND SETTLEMENTS			
	SAGGING	**HOGGING**	**SAGGING**
Length L (m)	2.79	8.26	9.39
Maximum deflection, Δmax (mm)	0.10	0.01	0.13
Deflection ratio (Δ/L)max	0.00347%	0.000%	0.00140%
ASSESSMENT OF POTENTIAL DAMAGE			
Height, H (m)	18	18	18
E/G	12.5	12.5	12.5
	SAGGING	HOGGING	SAGGING
Neutral axis t (m)	9	18	9
Second moment of area I (m4)	527.64	2110.54	527.64
Maximum bending strain, εb	0.00017%	0.000%	0.00022%
Maximum diagonal strain, εd	0.00347%	0.000%	0.00138%
Horizontal ground strain, εh	0.01992%	0.002%	0.00000%
Maximum tensile strain, εmax	0.02038%	0.002%	0.00138%
DAMAGE CATEGORY	0	0	0

RANKINE	
Maximum settlement [mm]	3.95
Max angular distortion β	1/5336

Tabella 5-7 – Tabelle di sintesi Sezione 2

Le deformazioni massime a cui è soggetto il fabbricato risultano essere inferiori allo 0.002% nella zona di hogging e 0.02% nella zona di sagging. Questi valori comportano una corrispondente classe di danno 0 secondo la classificazione di Boscardin e Cording.

6 SISTEMA DI MONITORAGGIO

Le analisi precedentemente descritte hanno evidenziato un basso livello di rischio legato al passaggio degli scavi per la realizzazione della nuova opera. Nondimeno sarà previsto un puntuale sistema di monitoraggio che consentirà di verificare, con l'avanzamento della attività di scavo, la mobilitazione di un quadro deformativo coerente con le previsioni di progetto. Sarà previsto altresì un sistema di misurazione delle vibrazioni indotte per effetto del passaggio della testa fresante e/o dell'impiego degli ordinari mezzi di abbattimento dell'ammasso, limitatamente alla tratta di galleria scavata con metodo tradizionale avanzando dall'imbocco sotto Corso Italia.

Su tutti i fabbricati compresi entro il sedime del Forte sarà installato un sistema di controllo topografico, con posizionamento di aste graduate. Il monitoraggio topografico sarà esteso anche alle porzioni di terrapieno poste a protezione del Forte San Giuliano e alla carreggiata di Corso Italia, dove si provvederà alla predisposizione di 3 sezioni di monitoraggio topografico (costituite da 5 capisaldi topografici ciascuna) perpendicolari al tracciato degli scavi.

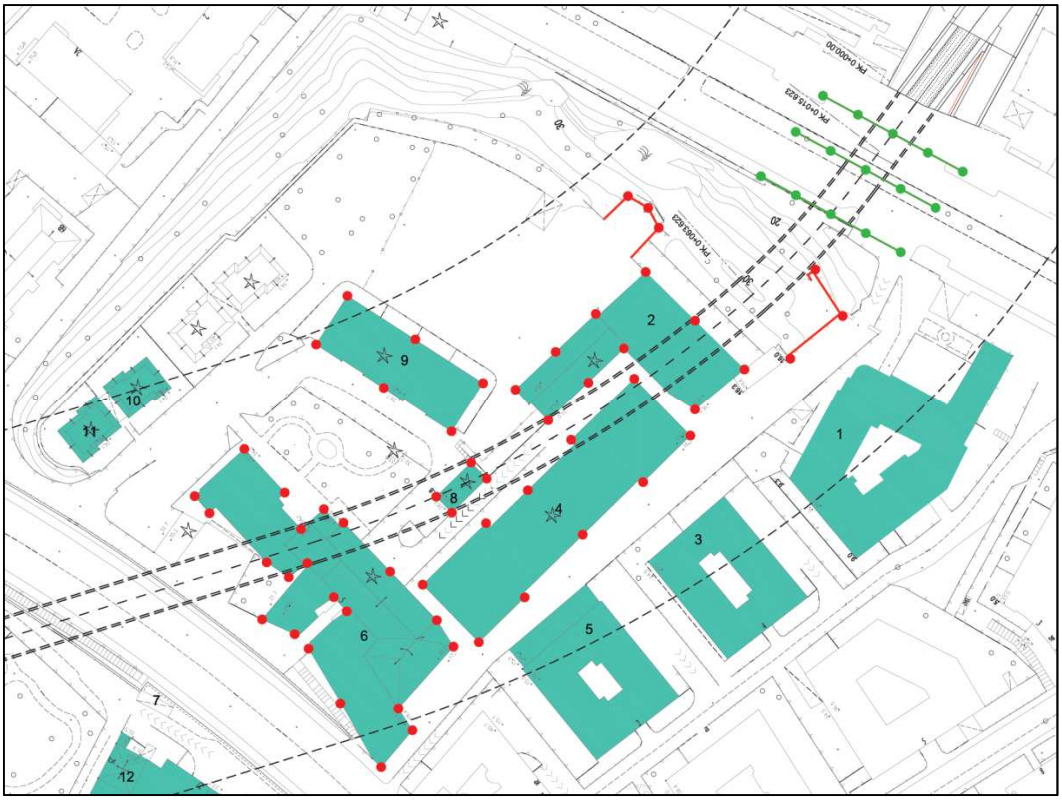


Figura 5 24 – Galleria Scolmatrice – Imbocco lato mare – Sistema di monitoraggio previsto in corrispondenza del passaggio al di sotto del Forte San Giuliano

7 CONCLUSIONI

Il presente documento ha come oggetto l'approfondimento progettuale inerente il passaggio della galleria scolmatrice del torrente Bisagno in corrispondenza del complesso monumentale del Forte San Giuliano. La valutazione dei possibili effetti indotti sui differenti manufatti ubicati entro il sedime limitato dai terrapieni del forte è stata condotta, in prima analisi, svolgendo calcolazioni numeriche su modelli ad elementi finiti.

Sebbene l'area compresa entro il sedime del Forte San Giuliano non sia stata oggetto di indagini geognostiche nel corso delle Campagne succedutesi negli anni nell'ambito dell'attività di progettazione degli interventi inerenti le gallerie scolmatrici del Bisagno e del Fereggiano, il contesto geomeccanico locale risulta inquadrabile per mezzo delle evidenze restituite dai sondaggi geognostici a carotaggio continuo perforati a valle di Corso Italia, lato sud, ed immediatamente a monte della carreggiata stradale di Via Gobetti, lato nord (sondaggio identificato con codice S8), dagli affioramenti dell'ammasso roccioso (lato mare) e, in ultimo ma non meno significativo, dalla serie di informazioni disponibili circa l'esecuzione del tratto di galleria scolmatrice del Rio Fereggiano ubicato in corrispondenza del Forte San Giuliano, tratto completato dall'impresa Italstrade nei primi anni '90. Dalle indagini geognostiche pregresse e dalla documentazione esaminata relativamente alla realizzazione della tratta della Galleria del Fereggiano eseguita in adiacenza alla nuova opera in costruzione si rileva come l'ammasso sia costituito integralmente dal Flysch del Monte Antola, ovvero da calcare marnoso con intercalazioni argillitiche marnose. In particolare l'ammasso interessato dallo scavo della galleria Fereggiano (progetto Italstrade) è risultato essere generalmente fratturato; necessitandosi pertanto la posa di chiodi e spritz beton, specie in zona di calotta, nell'ambito della tratta a valle di Via Gobetti. E' stato rilevato altresì un incremento della frazione pelitica in seno al Flysch di Monte Antola, con attestazione attorno al 25. Con riferimento alle manifestazioni idriche si sono mediamente registrati stillicidi diffusi salvo locali maggiori venute d'acqua.

La valutazione degli effetti dell'attività di scavo in superficie, ovvero sui manufatti presenti entro il complesso del Forte di San Giuliano, in termini di cedimenti indotti è stata attuata adottando l'impostazione di analisi "green field", come conosciuta in ambito tecnico. Sulla scorta del quadro descrittivo fornito dall'esame della documentazione tecnico-amministrativa prodotta dalla DL costruzione galleria Fereggiano (Italstrade), degli elaborati frutto delle consulenze specialistiche successivamente commissionate dal Comune, si sono ipotizzate condizioni geomeccaniche tali da costituire, con buon margine, una rappresentazione cautelativa delle reali condizioni in situ.Le analisi sono state elaborate implementando scenari idrogeologici rappresentativi di condizioni estreme, ovvero in assenza ed in presenza di falda.

Calcolato per via numerica il regime deformativo sul piano di imposta delle fondazioni, si è proceduto alla valutazione della categoria di danno associata alla deformazione unitaria massima di allungamento, coerentemente con l'approccio di Mair, Taylor e Burland (in particolare si sono – con discrezionalità del progettista - individuate le zone di hogging e sagging nei profili di spostamento verticale restituiti dall'analisi numerica). L'attribuzione della categoria di danno (con relativa intensità) in funzione della deformazione limite di trazione calcolata come sopra è stata condotta in accordo alla classificazione elaborata da Boscarding e Cording (1989). La procedura di valutazione della categoria di danno sopra descritta è stata primariamente applicata agli esiti delle analisi numeriche simulanti la presenza di falda (analisi accoppiata, regime di pressioni interstiziali associato alla rete di flusso ammasso-galleria propria delle condizioni stazionarie), stante la maggior gravosità degli scenari restituiti in termini di spostamenti attesi sul piano fondazionale.

Pur considerando la molteplicità delle assunzioni di natura conservativa sopra illustrate e riferite alle condizioni geomeccaniche dell'ammasso, alla modellazione numerica del processo di scavo della galleria e alle condizioni idrogeologiche del contesto, le analisi riferite ai due edifici considerati (caserma nord ed edificio mensa, rispettivamente num 6 e num 4) restituiscono categorie di danno pari a 0.