Anas SpA

Direzione Centrale Progettazione

S.S. 1 "Nuova Aurelia"

Viabilità di accesso all'hub portuale di Savona

SVINCOLO DI MARGONARA

PROGETTO DEFINITIVO

PROGETTAZIONE: ANAS - DIREZIONE CENTRALE PROGETTAZIONE

I PROGETTISTI:
Ing. FULVIO MARIA SOCCODATO
Ordine Ing. di Roma n. 18861

Ing. ALESSANDRO MICHELI
Ordine Ing. di Roma n. 19654

IL GEOLOGO:
Geol. STEFANO SERANGELI
Ordine Geol. del Lazio n. 659

IL RESPONSABILE DEL S.I.A.
Ing. GINEVRA BERETTA
Ordine Ing. di Roma n. 20458

IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE
Geom. FABIO QUONDAM

VISTO: IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO :
Ing. NICOLA DINNELLA

PROTOCOLLO | DATA

GRUPPO DI PROGETTAZIONE ANAS
Ing. Giuseppe Danilo Malgeri – Responsabile di Progetto
Ing. Gianfranco Fusani – Strade
Ing. Francesco Primieri – Strade
Ing. Gabriele Giovannini – Cartografia
Ing. Attilio Petrillo – Idraulica
Ing. Pierluigi Fabbro – Interferenze
Geom. Valerio Altomare – Espropri
Ing. Luca Cedrone – Opere in sotterraneo
Ing. Rita Gandolfo – Opere in sotterraneo
Ing. Davide Luberti – Opere in sotterraneo
Geom. Alessandro Cortese – Opere in sotterraneo
Ing. Pia Iasiello – Geotecnica
Ing. Francesco Bezzi – Impianti
Arch. Roberto Roggi – Computi
Geom. Marco Spinucci – Computi
Geol. Giuseppe Cardillo – Caratterizzazione ambientale
RESPONSABILI DI UNITA'
Ing. Fulvio Maria Soccodato – Ingegneria Territorio
Ing. Alessandro Micheli – Ingegneria Geotecnica e Impianti
Ing. Achille Devitofranceschi – Ingegneria Opere Civili
Geom. Fabio Quondam – Ingegneria Computi, Stime e Capitolati
Geol. Serena Majetta – Caratterizzazione ambientale

OPERE IN SOTTERRANEO

RELAZIONE TECNICA GALLERIE

CODICE PROGETTO	NOME FILE	REVISIONE	SCALA:
PROGETTO: L0901A / LIV. PROG.: D / N. PROG.: 1301	P00_GN00_OST_RE01_A		
	CODICE ELAB.: P00GN00OSTRE01	A	–

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
C					
B					
A	EMISSIONE	Ottobre 2013	Ing. D. Luberti	Ing. R. Gandolfo	Ing. L. Cedrone

ANAS S.P.A.

PROVINCIA DI SAVONA

Viabilità di accesso all'hub portuale di Savona

SVINCOLO DI MARGONARA

PROGETTO DEFINITIVO

OPERE D'ARTE MAGGIORI – GALLERIE NATURALI

RAMPE SVINCOLO MARGONARA

RELAZIONE TECNICA GALLERIE NATURALI

INDICE

1 DESCRIZIONE DELL'OPERA 4
2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO....10
3 MATERIALI....11
4 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E DESCRIZIONE DELLE CRITICITÀ RILEVATE LUNGO I TRACCIATI....13
4.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO – STRUTTURALE GENERALE 13
4.2 DESCRIZIONE DEI TRACCIATI E CRITICITÀ RILEVATE 15
5 CARATTERIZZAZIONE DEGLI AMMASSI 18
6 DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTi....20
6.1 Sezioni di scavo rampe 20
6.2 Tratte in affiancamento....21
6.3 Zona di imbocco....24
6.4 Interventi di consolidamento da piano campagna....25
7 VERIFICA DELLE SEZIONI DI SCAVO E CONSOLIDAMENTO 27
7.1 Il codice di calcolo FLAC 7.0 27
7.2 Taratura del modello di calcolo....31
7.3 Verifica Camerone C1 31

1 DESCRIZIONE DELL'OPERA

Il progetto in esame consiste nella realizzazione di uno svincolo in località p.ta Margonara a partire dalla nuova viabilità di accesso all'Hub portuale di Savona. Lo svincolo, che si estende totalmente in galleria, consiste in una rampa di immissione nella carreggiata in direzione Albisola e di una rampa di uscita dalla carreggiata in direzione Savona sulla S:S. 1 Aurelia che in questa tratta è denominata Lungomare Matteotti, per mezzo di una rotatoria.

Entrambe le rampe si dipartono dalla Galleria naturale S. Paolo realizzata con scavo meccanizzato mediante TBM; saranno previste quindi due tratte di cameroni per consentire lo sfiocco dall'asse principale dei due nuovi assi. Un terzo camerone si trova in prossimità dell'imbocco in quanto le due rampe si ricongiungono per giungere affiancate nella zona di imbocco (Figura 1)

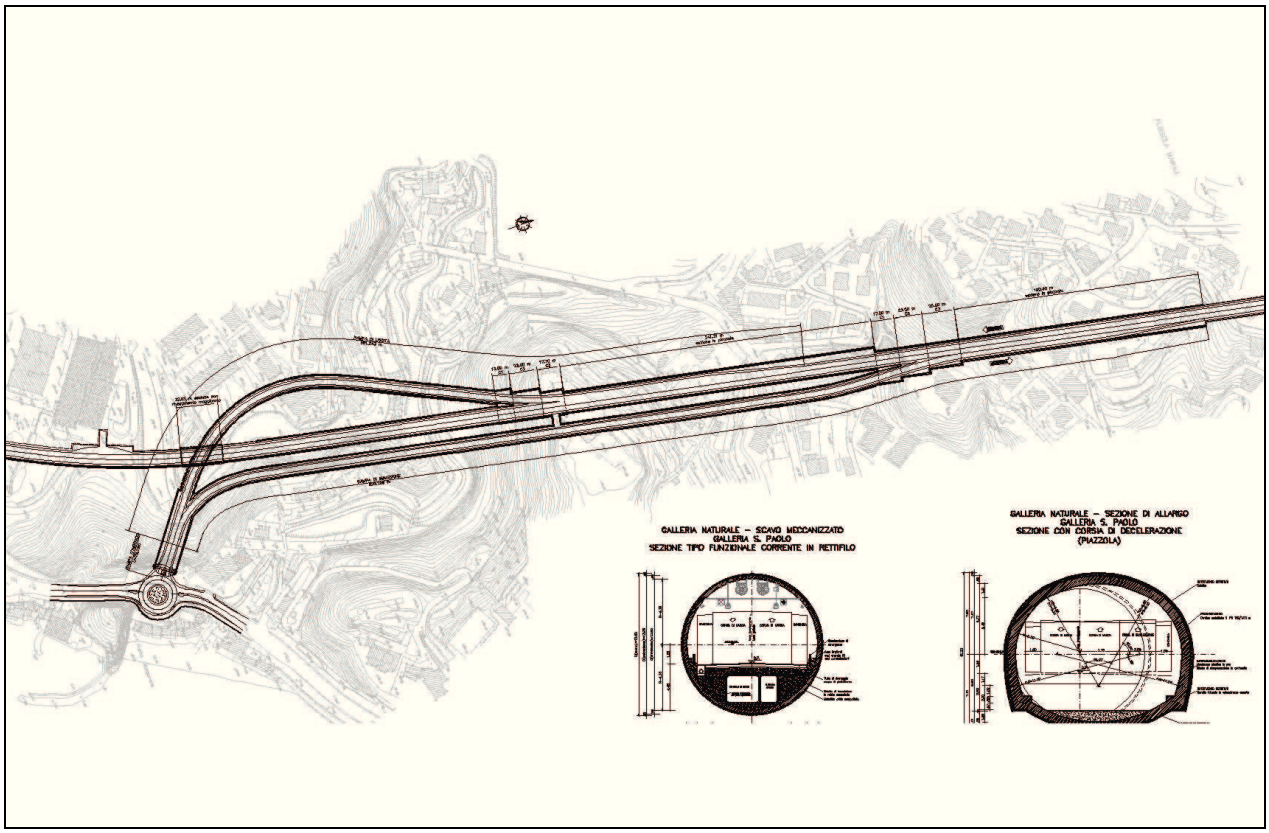


Figura 1. planimetria di progetto

Si descrivono di seguito le singole tratte:

Rampa di imbocco

Questo asse parte dall'asse della rotatoria in direzione N-NW ed alla progressiva km 0+012.10 imbocca in galleria naturale e termina alla progressiva km 0+029.10 mantenendo una sezione denominata sez tipo B (Figura 2) che prevede l'affiancamento delle due carreggiate.

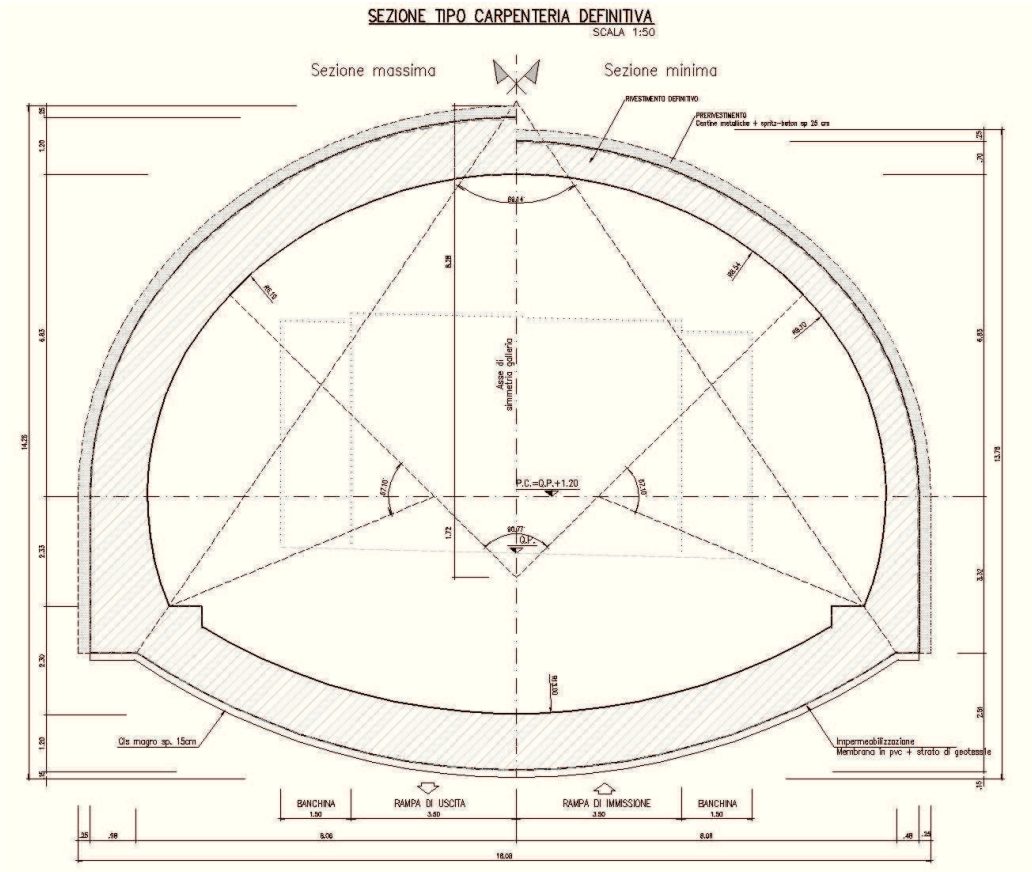


Figura 2.Sezione tipo B rampa di imbocco

L'imbocco sarà di tipo diretto ed è prevista la realizzazione di una dima di lunghezza pari a 4 m ed un portale artificiale di lunghezza pari a 4,6 m.

Al termine della rampa di imbocco inizia e termina il tracciamento della rampa di immissione ed uscita rispettivamente.

Rampa di immissione

E' lunga 825.258 m e a partire dal termine della rampa di imbocco prosegue in affiancamento alla rampa di uscita, fino alla progressiva km 0+025.19 si mantiene la sezione tipo B. da tale punto inizia un camerone di sfiocco a sezione variabile fino alla progressiva km 0+040.00 dove la rampa prosegue con una sezione tipo in rampa (Figura 3). Alla progressiva km 0+570.38 inizia la tratta di interferenza con la Galleria Principale S. Paolo

Il progressivo affiancamento all'asse principale avverrà per mezzo di una serie di tre cameroni (da C1 a C3) di dimensioni decrescenti che verranno realizzati allargando la sezione corrente scavata con la TBM, le carpenterie sono descritte in Figura 4. Carpenteria cameroni

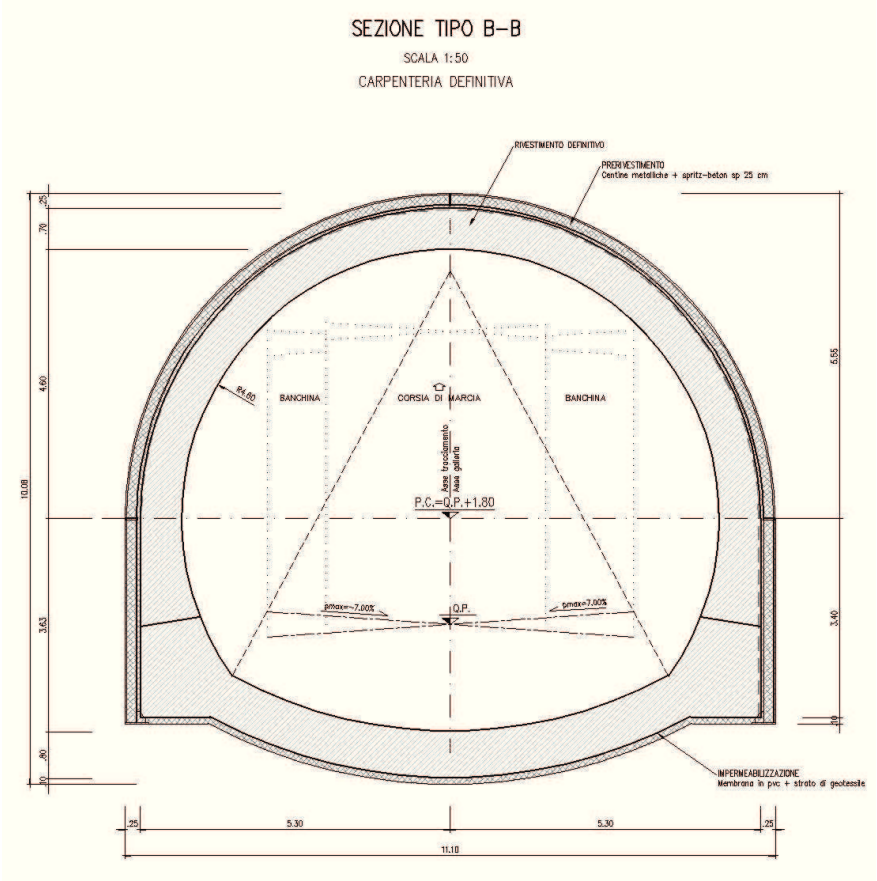


Figura 3. Carpenteria sezione in rampa

Al termine del camerone C3 l'affiancamento procederà con una sezione tipo in piazzola anch'essa realizzata in allargamento dalla sezione corrente con TBM, così come previsto dal progetto esecutivo dell'asse principale (vedi Figura 1). L'asse termina in corrispondenza della progressiva km 3+397.53 dell'asse della galleria S.Paolo.

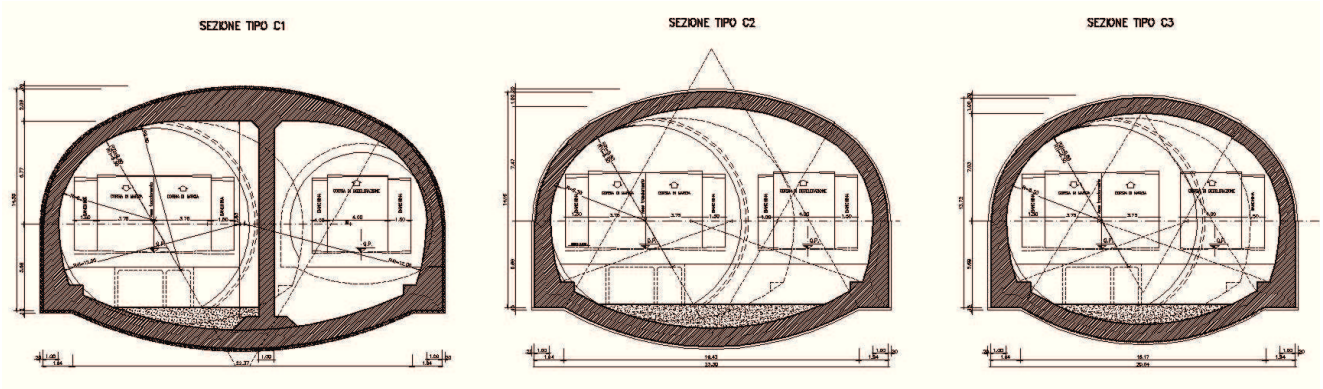


Figura 4. Carpenteria cameroni

Alla progressiva km 0+320 è prevista la realizzazione di un by-pass pedonale (Figura 5) tra la rampa e la via di fuga della galleria S. Paolo, che in quella tratta avrà la sezione del camerone C3.

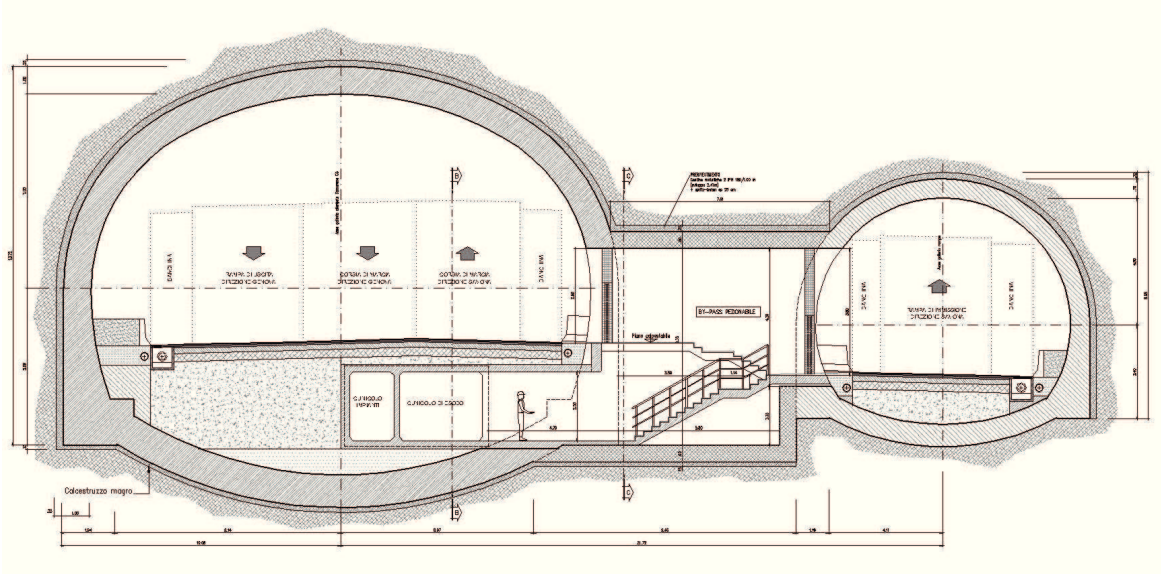


Figura 5. By-pass pedonale

Rampa di uscita

Inizia alla progressiva 3.087.95 dell'asse della galleria S.Paolo e si sviluppa per una lunghezza complessiva di 561.24 m terminando in corrispondenza della fine dell'asse della rampa di imbocco.

Così come per la rampa di immissione il progressivo allontanamento dall'asse principale obbliga un progressivo ampliamento delle sezioni di scavo, partendo da una tratta realizzata con la sezione della piazzola (Figura 1) e proseguendo con tre serie di cameroni (da C3 a C1) di dimensioni progressivamente crescenti fino al vero e proprio sfiocco alla progressiva km 0+239.01 (Figura 4) dopo la quale la rampa prosegue con la sezione descritta in Figura 3.

Tra le progressive km 0+476.40 e km 0+501.27 la galleria interferisce con la galleria S. Paolo sovrapassandola con distanza ridotta tra gli estradossi di calotta e arco rovescio, pertanto in tale tratta è prevista la demolizione del rivestimento in conci della galleria S. Paolo ed un piccolo allargamento della sezione di scavo per mettere in opera un rivestimento definitivo maggiorato prima della realizzazione della rampa (Figura 6).

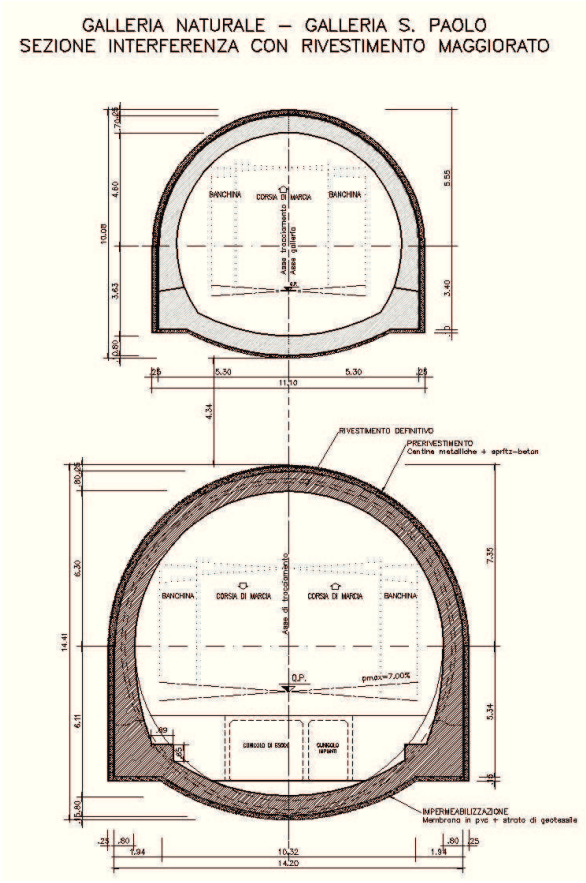


Figura 6. Carpenteria sezione maggiorata e interferenza con rampa di uscita

Alla progressiva km 0+520 la sezione in rampa lascia il posto al camerone a sezione variabile già descritto in precedenza, ed alla progressiva km 0+536.24 l'asse si ritrova in affiancamento alla rampa di immissione con sezione di imbocco tipo B (Figura 2).

Di seguito si riporta uno schema delle lunghezze delle tratte di applicazione delle differenti sezioni tipo adottate

SEZIONI	Lunghezze di applicazione (m)	L tot (m)
TIPO B (RAMPA IMBOCCO)	37 imbocco + rampe in affiancamento	37
CAMERONE A SEZIONE VARIABILE*	16	16
SEZIONE TIPO IN RAMPA	282 rampa uscita 428 rampa immissione	710
CAMERONE C1**	13 rampa uscita 17 rampa immissione	30
CAMERONE C2**	22 rampa uscita 22 rampa immissione	44
CAMERONE C3**	17,7 rampa uscita 25,5 rampa immissione	43,2
SEZIONE IN ALLARGO CORRENTE (PIAZZOLA)**	136 rampa uscita 194 rampa immissione	330

* La lunghezza è misurata sull'asse della rampa di uscita

** La lunghezza è misurata sull'asse principale della galleria S.PAOLO

2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

I principali riferimenti normativi sono i seguenti:

- Legge n° 1086 del 5 novembre 1971: “Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica”.
- D. M. LL. PP. 11 marzo 1988: "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione".
- Circ. LL. PP. 24 settembre 1988 n. 30483: "Istruzioni riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione".
- D. M. Infrastrutture 14 Gennaio 2008: “Nuove norme tecniche per le costruzioni”.
- Circ.Min. n°617 del 02/02/2009: “Istruzioni per l’applicazione delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008”.

Ad essi si aggiungono:

- Norma Italiana UNI 11104 del 2004 – Calcestruzzo – Specificazione, prestazione, produzione e conformità – Istruzioni complementari per l’applicazione della UNI EN 206-1.
- Norma Tecnica UNI EN 206-1:2006 – Calcestruzzo – Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità.
- Norma Italiana UNI 10834 del 1999 – Calcestruzzo proiettato
- D. M. Infrastrutture e Trasporti n° 6792 del 5 novembre 2001: “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade”.
- D. M. Infrastrutture e Trasporti n° 67/S del 22 aprile 2004: “Modifica del Decreto 5 novembre 2001, n° 6792, recante norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade”.
- D. L. n° 264 del 5 ottobre 2006: “Attuazione della direttiva 2004/54/CE in materia di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea”.
- Circ. ANAS n° 33/05 del 10 novembre 2005: “Sagome interne e principali dotazioni infrastrutturali delle gallerie stradali”.
- Linee Guida per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali secondo la normativa vigente, ANAS S.p.A., Condirezione Generale Tecnica – Direzione Centrale Programmazione, Ottobre 2009.

3 MATERIALI

I materiali impiegati per la costruzione risponderanno ai requisiti sotto elencati.

Per gli elementi in vetroresina:

- Elementi in vetroresina ottenuti da resina poliestere termoindurente rinforzata con fibra di vetro e con superficie esterna ad aderenza migliorata ottenuta per tornitura o riporto con resinatura di sabbia sferoidale al quarzo;
- Densità ≥ 1.90 t/m^3;
- resistenza a trazione ≥ 1000 MPa;
- resistenza a taglio ≥ 140 MPa;
- allungamento a rottura ≥ 2%
- contenuto in vetro ≥ 60%.

Per la malta di cementazione si prescrive:

- resistenza a compressione, a 48 h > 25.00 MN/m^2;
- cemento tipo I o II, 42.5 o 42.5R;
- rapporto acqua/cemento in peso = 1.00;
- aggiunta di bentonite in peso pari all'8% del peso in cemento.

Per i tubi di armatura si prescrive:

- tubi in acciaio di grado S 355.

Per la malta di cementazione si prescrive:

- resistenza a compressione, a 48 h > 25.00 MN/m^2;
- cemento tipo I o II, 42.5 o 42.5R;
- rapporto acqua/cemento in peso = 1.00;
- aggiunta di bentonite in peso pari all'8% del peso in cemento.

Calcestruzzo proiettato fibrorinforzato, con riferimento alla norma UNI 10834, si prescrive:

- sviluppo di resistenza:
- resistenza a 12 h ≥ 6.00 MN/m^2;

- resistenza a 24 h ≥ 10.00 MN/m^2;
- resistenza a 48 h ≥ 14.00 MN/m^2;
- resistenza a 28 gg ≥ 30.00 MN/m^2;
- diametro massimo inerte: 12.5 mm;
- dosaggio in fibre ≥ 35 kg/m^3;
- classe di tenacità: energia assorbita per deformazione ≥ 500 J

Acciai:

- Centina, calastrelli, occhielli: profilati laminati a caldo in acciaio di grado S 275;
- piatti di base e di unione: lamiere laminate a caldo in acciaio di grado S 275;
- catene di collegamento: barre in acciaio di grado B450C;
- bulloni per unioni: acciaio di classe 8.8 (UNI 3740:1974).
-

Bulloni di ancoraggio

- Armatura in barra nervata di acciaio con resistenza a snervamento ≥ 835 MN/m^2, resistenza a rottura ≥ 1030 MN/m^2;
- Ancoraggio tramite cartucce di resina.
-

Impermeabilizzazione

Per l'impermeabilizzazione si prescrive:

- per lo strato di compensazione:
  - geotessile, tessuto non tessuto, in filo continuo di polipropilene agugliato meccanicamente;
  - peso unitario ≥ 400 g/m^2 (UNI EN ISO 9864:2005);
- per la membrana impermeabile:
  - membrana in PVC-P atossico, in due strati coestrusi aventi colore contrastante ma costituenti un corpo omogeneo;
  - spessore = 2 mm ± 0.5% (UNI EN 1849-2);
  -

Calcestruzzo

Per il rivestimento di tratti di galleria realizzati con tecnica di scavo tradizionale, con riferimento alle norme UNI 206-1:2006 e UNI 11101:2004, si prescrive:

- classe di esposizione: XC2;
- classe di resistenza: C 28/35;

- rapporto massimo acqua/cemento: 0.55;
- classe di cemento: CEM III – CEM IV;
- contenuto minimo di cemento: 320 kg/m^3;
- classe di consistenza S4;
- diametro massimo inerte: 25 mm.

Armatura per rivestimento definitivo

- Barre in acciaio di grado B450C;
- copriferro minimo 5 cm.

4 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E DESCRIZIONE DELLE CRITICITÀ RILEVATE LUNGO I TRACCIATI

4.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO – STRUTTURALE GENERALE

L'area di studio appartiene al grande edificio della catena alpina. Si tratta un poderoso insieme di ammassi rocciosi sotto forma di strutture tettoniche che dalla posizione originaria sono state impilate l'una sull'altra in seguito a movimenti della crosta terrestre.

In particolare l'area in esame costituisce una porzione delle Alpi liguri, a loro volta suddivisibili in alcune falde o unità tettoniche; nella zona in esame sono presenti unità appartenenti al solo Dominio Brianzonese. Questi ammassi, dopo il movimento di traslazione che li ha spostati dove ora si trovano, sono stati innalzati ed erosi per un lungo periodo e, successivamente, su di essi si sono depositati sedimenti marini. Parte del territorio è infine stato coperto da sedimenti recenti frutto dell'erosione e della deposizione operata dal mare e dai corsi d'acqua.

Di seguito vengono introdotte e descritte le principali unità litologiche presenti lungo i tracciati:

PARAGNEISS (Ordoviciano – Siluriano)

Sono rocce a tessitura finemente scistosa, talora altamente micacei, spesso costituiti da metapeliti e meta-areniti associate e spesso intercalate alle anfiboliti.

Si sono generate per metamorfismo prealpino di alta temperatura di originarie litologie prevalentemente arenacee. I paragneiss sono caratterizzati dall'alternanza di banderelle di spessore millimetrico di quarzo e feldspati e in particolare di miche (biotite e muscovite) che conferiscono una sensibile fissilità alla roccia.

Non sempre i paragneiss sono facilmente distinguibili sul terreno dagli ortogneiss a grana fine dai quali si differenziano per l'abbondante contenuto di miche. In affioramento l'ammasso roccioso si presenta in genere facilmente disgregabile per alterazione profonda, mentre in profondità le caratteristiche meccaniche tendono a migliorare, anche se la fratturazione rimane persistente per la complessa storia tettonica che l'ammasso ha subito. La "Carta Geologica d'Italia" considera questa unità come facente parte della Formazione degli "Gneiss di Albissola".

Dal punto di vista idrogeologico, come tipologia di acquifero si è in presenza di ammassi litoidi con permeabilità generalmente molto bassa, però la fratturazione spinta può condurre al formarsi di zone preferenziali con permeabilità maggiore, ma sempre modesta.

La geometria dell'acquifero è influenzata dal grado di fratturazione e disgregazione superficiale delle formazioni. L'azione erosiva delle acque di percolazione ha ulteriormente destrutturato gli ammassi nelle zone interessate da movimenti tettonici aumentandone il grado di fratturazione. Le sorgenti possono essere alimentate da falde superficiali limitate alla fascia detritica e di alterazione superficiale.

Dunque in corrispondenza dei tratti in scavo sopra il livello medio marino, dato il basso grado di permeabilità riscontrato, c'è da attendersi alternanze di tratte asciutte mediamente estese, con zone umide e/o bagnate più estese e talvolta zone meno estese con limitate venute d'acqua tipo stillicidi. Nel caso delle tratte in scavo sotto il livello medio marino, oltre alle zone a maggiore grado di fratturazione rilevate in corrispondenza di sistemi di faglie va segnalata la possibilità di venute d'acqua locali.

ARGILLE DI ORTOVERO (Pliocene)

Sono depositi sabbiosi, marnosi-limosi-argillosi grigio-azzurri di mare aperto con livelli arenaceo-marnosi di giacitura suborizzontale o debolmente inclinati e limitati da sottili livelli conglomeratici o, in corrispondenza delle principali linee tettoniche, da accumuli caotici di frana sottomarina.

Sono caratterizzati da un contenuto in $CaCO_3$ variabile, in genere modesto, localmente ricchi in fossili. A volte si osservano sottili livelli sabbiosi e passaggi con elevata presenza di sostanza organica. I livelli più esterni ed alterati sono costituiti da un limo sabbioso con argilla di colore ocra, a spessore variabile in funzione delle condizioni fisico-chimiche di dettaglio in cui la formazione si trova.

I principali corpi sedimentari seguono la disposizione delle linee tettoniche distensive costituite da faglie disposte circa E-W e N-S, mentre i lembi sommitali colmano insenature che dovevano costituire le foci dei corsi d'acqua pliocenici.

Ad Albissola Marina le Argille di Ortovero affiorano lungo la valle su cui sale la Via Filippo Gentile, dal mare fino ad una quota di 40 metri circa.

Dal punto di vista idrogeologico si tratta di una formazione a bassissima permeabilità, salvo la possibilità di rinvenire falde sospese nei livelli sabbiosi.

4.2 DESCRIZIONE DEI TRACCIATI E CRITICITÀ RILEVATE

Si descrivono di seguito i tracciati delle rampe dal punto di vista delle litologie interessate e si evidenziano le tratte in cui si rilevano le maggiori criticità dal punto di vista realizzativo.

Rampa di imbocco - Rampa di immissione

L'imbocco della galleria naturale avverrà in roccia, nella formazione dei paragneiss, sarà pertanto un attacco diretto e gli scavi saranno opportunamente protetti da una dima

Per tutta la lunghezza della rampa di imbocco e per i primi metri della rampa di immissione la sezione di scavo sarà la tipo B (carreggiate affiancate) che prevede un ombrello di infilaggi metallici in calotta e un consolidamento del fronte mediante elementi in VTR. Di seguito è prevista la realizzazione di un camerone a sezione variabile per consentire l'allontanamento dell'asse della rampa di immissione da quello della rampa di uscita. Dalla progressiva km 0+040.00 la rampa prosegue indipendente con una sezione di scavo denominata R-B1 che prevede l'avanzamento con un preconsolidamento del fronte mediante elementi in VTR ed un presostegno del cavo mediante centine e spritz-beton. Tra le progressive km 0+145 e km 0+168 la galleria sarà interessata da una tratta con coperture inferiori ai 10 m in presenza di edifici; verranno pertanto eseguiti interventi di consolidamento dall'alto per mezzo di iniezioni cementizie armate con elementi in VTR. Una ulteriore critità si presente tra le progressive km 0+222 e km 0+243, dove le basse coperture coincidono con il sottoattraversamento del Rio Termine le cui alluvioni sabbiose e ghiaiose, seppur di modesto spessore, ricoprono il substrato gneissico; in questa tratta la roccia si presenta maggiormente fratturata a causa di una lineazione tettonica e la presenza del torrente fa prevedere l'eventualità di venute di acqua durante l'avanzamento; anche in questo caso si prevede la realizzazione di interventi di consolidamento dall'alto per mezzo di iniezioni cementizie armate con elementi in VTR.

Alla progressiva km 0+417 la presenza di una faglia ribassa il substrato roccioso che è sovrastato da una coltre argillosa ascrivibile alle argille di Ortovero che si mantengono nella zona di calotta per circa 70 m mentre il contatto scende gradualmente alla zona di piedritto fino alla progressiva km 0+550 dove una nuova faglia risolleva il basamento roccioso. Per la tratta in argille si applica la sezione di scavo R-C2 che prevede il consolidamento del fronte e del cavo mediante elementi in VTR.

Una ulteriore zona di basse coperture si presenta a causa di una incisione orografica proprio nella tratta in cui la sezione in rampa lascia il posto al camerone C1 alla progressiva km 0+570. Anche in questa area sono previsti interventi di consolidamento dall'alto al fine di garantire la stabilità dela zona di calotta soprattutto data l'ampiezza della superficie di scavo dei cameroni.

La tratta dei cameroni, lunga circa 65m, verrà realizzata in allargamento dalla sezione scavata con TBM, prevedendo opportuni consolidamenti radiali dell'ammasso, in un'unica fase per il camerone di sezione minore (C3) e in due successive fasi per le sezioni C2 e C1.

Infine, dalla progressiva km 0+636.00 fino al termine dell'asse la galleria procederà con la sezione tipo in piazzola già prevista dal progetto esecutivo della galleria S. Paolo, in una area urbanizzata con coperture che si mantengono al di sopra dei 30 m dall'estradosso della calotta.

Rampa di uscita

L'asse di questa rampa inizia in prossimità della progressiva km 3+088 della galleria S. Paolo, dove gli scavi interessano le argille di Ortovero circa da metà fronte fino in calotta, mentre la parte bassa del fronte verrà scavata nel substrato roccioso dei paragneiss. Per questa prima tratta la sezione sarà quella tipo in piazzola già prevista dal progetto esecutivo della galleria S. Paolo, così come per la ramapa di immissione e le coperture si mantengono tra i 20 e i 40 m circa. Nonostante le coperture, data la natura dei terreni, sarà opportuno in questa area monitorare i fabbricati interferenti con la pianta del tracciato nelle fasi di realizzazione degli allargamenti.

Alla progressiva km 0+126 una faglia solleva il basamento cristallino e la galleria prosegue in questa formazione per il resto del suo sviluppo. Tra le progressive km 0+186 e km 0+239 si trova la zona dei cameroni necessari allo sfiocco della rampa con coperture variabili tra i 30 e i 50 m, realizzati con le stesse modalità già descritte in precedenza.

Successivamente l'opera prosegue con la sezione tipo in Rampa fino al ricongiungimento dell'asse con quello della rampa di immissione nel camerone a sezione variabile alla progressiva km 0+520.

Una criticità si presenta, anche per questo asse, nel sottoattraversamento del Rio Termine in quanto la presenza di detrito del corso d'acqua e le scarse coperture non garantiscono la stabilità del cavo; verranno pertanto eseguiti anche in questa tratta degli interventi di consolidamento da piano campagna mediante iniezioni di malte cementizie armate con elementi in VTR.

idrogeologia

La zona in corrispondenza del rio Termine risulta interessata da più sistemi di faglie, pertanto si prevede la presenza di venute d'acqua e/o stillicidi in tali tratte.

Per questa la tratta della rampa di immissione che si sviluppa al di sotto del livello medio marino è importante considerare delle puntuali venute d'acqua, in corrispondenza di allineamenti di fratturazione, al momento non rilevabili dai dati delle indagini, ma che possono mettere in contatto lo scavo con il mare.

5 CARATTERIZZAZIONE DEGLI AMMASSI

La caratterizzaizone delle due formazioni interessate dalle opere in progetto è basata sui dati raccolti per il progetto esecutivo della galleria Naturale S.Paolo, con particolare riferimento alla campagna geognostica del progetto definitivo (2001) e alla campagna geognostica del progetto esecutivo (2010).

La caratterizzazione geomeccanica degli amassi rocciosi è stata indagata mediante l'applicazione del criterio di rottura non lineare di Hoek-Brown1,

Sulla base delle analisi riportate nella Relazione tecnica di calcolo del progetto esecutivo della galleria naturale S. Paolo si assume, per la formazione dei Paragneiss i seguenti parametri:

Gneiss a minore grado di fratturazione

GSI = 50-55

γ kN/m^3 = 26-27

c' KPa = 1000-1300

ϕ'(°)= 70-71

E MPa = 16000-21000

ν=0.21-0.22

Gneiss fratturato

GSI = 40-45

γ KN/m^3 = 25-26

c' KPa = 500-640

1 HOEK E., DIEDERICHS M.S., CORKUM B. – "Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition", Proc. North American Rock Mechanics Society – Meeting in Toronto, 2002.

$\phi'(°)$= 67-69

E MPa = 8000-11000

ν=0.22

Gneiss fratturato alterato decompresso

GSI = 15-28

γ KN/m^3 = 25-26

c' KPa = 110-270

$\phi'(°)$= 60-67

E MPa = 900-4000

ν=0.24

Limi argillosi (Argille di Ortovero)

Per i limi consistenti si considerano i seguenti parametri geomeccanici:

- γ KN/m^3 = 18-20
- c' KPa = 50-100
- ϕ' (°) = 25-28
- E MPa = 50-80
- ν = 0.30

6 DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTi

Si descrivono di seguito le sezioni di scavo adottate per le singole tratte precedentemente esposte.

6.1 Sezioni di scavo rampe

Sezione tipo R-A

La sezione, realizzata a piena sezione, prevede i seguenti interventi:

- Presostegno al contorno del cavo mediante 2 centine IPN 180 accoppiate passo 1 m e spritz beton fibrorinforzato sp. 25 cm;
- Eventuali 3+3 dreni L=20 m;
- Impermeabilizzazione completa del cavo mediante teli in PVC.
- Rivestimento definitivo arco rovescio e murette, sp. 0.80 m armato;
- Rivestimento definitivo calotta e piedritti sp. 0.70 m armato;

Sezione tipo R-B1

La sezione, realizzata a piena sezione, prevede i seguenti interventi:

- Preconsolidamento del fronte mediante n°38 elementi strutturali in VTR cementati con miscele cementizie L=23 m e sovrapposizione 11,5 m;
- Presostegno al contorno del cavo mediante 2 centine IPN 180 accoppiate passo 1 m e spritz beton fibrorinforzato sp. 25 cm;
- Eventuali 3+3 dreni L=20 m;
- Impermeabilizzazione completa del cavo mediante teli in PVC.
- Rivestimento definitivo arco rovescio e murette, sp. 0.80 m armato;
- Rivestimento definitivo calotta e piedritti sp. 0.70 m armato;

Sezione tipo R-C2

La sezione, realizzata a piena sezione, prevede i seguenti interventi:

- Preconsolidamento del fronte mediante n°44 elementi strutturali in VTR cementati con miscele cementizie L=18 m e sovrapposizione 9 m;
- Preconsolidamento del contorno del cavo mediante n°50 elementi strutturali in VTR cementati con miscele cementizie L=18 m e sovrapposizione 9 m;
- Preconsolidamento della zona di imposta delle murette mediante 5+5 elementi strutturali in VTR cementati con miscele cementizie L=18 m e sovrapposizione 9 m;
- Presostegno al contorno del cavo mediante 2 centine IPN 180 accoppiate passo 1 m e spritz beton fibrorinforzato sp. 25 cm;
- Eventuali 3+3 dreni L=20 m;
- Impermeabilizzazione completa del cavo mediante teli in PVC.
- Rivestimento definitivo arco rovescio e murette, sp. 0.80 m armato;
- Rivestimento definitivo calotta e piedritti sp. 0.70 m armato;

6.2 Tratte in affiancamento

Sezione tipo in allargo (piazzola)

La sezione in esame verrà realizzata in allargamento a partire dalla sezione circolare scavata con TBM, previo consolidamento radiale dell'ammasso roccioso, secondo le seguenti modalità:

- Consolidamento radiale dell'ammasso al contorno mediante inclusioni passive radiali armate con tubi in VTR ϕ 60 mm sp. 10 mm con 2 valvole a ml, secondo le seguenti geometrie: n. 10 iniezioni L= 6.0 m; n. 4 iniezioni L= 8 m; n. 5 iniezioni L= 10 m; interasse longitudinale 1,5 m;
- Demolizione del rivestimento in conci e allargamento alla nuova sagoma;
- presostegno del contorno del cavo mediante 2 centine IPN 180 accoppiate passo 1 m e spritz beton fibrorinforzato sp. 25 cm;
- Impermeabilizzazione completa del cavo mediante teli in PVC.
- Getto del rivestimento definitivo di murette e arco rovescio armati sp. 0.80 m

- Getto del rivestimento definitivo di piedritti e calotta armati sp. 0.80 m.

Sezione tipo Camerone C3

La sezione in esame verrà realizzata in allargamento a partire dalla sezione circolare scavata con TBM, previo consolidamento radiale dell'ammasso roccioso, secondo le seguenti modalità:

- Consolidamento radiale dell'ammasso al contorno mediante iniezioni di miscele cementizie armate con tubi in VTR ϕ 60 mm sp. 10 mm con 2 valvole a ml, secondo le seguenti geometrie: n. 9 iniezioni L= 6.0 m; n. 4 iniezioni L= 10 m; n. 5 iniezioni L= 13 m; interasse longitudinale 1,7 m;
- Demolizione del rivestimento in conci e allargamento alla nuova sagoma;
- sostegno del contorno del cavo mediante 2 centine IPN 180 accoppiate passo 1 m e spritz beton fibrorinforzato sp. 25 cm;
- Impermeabilizzazione completa del cavo mediante teli in PVC.
- Getto del rivestimento definitivo di murette e arco rovescio armati sp. 1.00 m
- Getto del rivestimento definitivo di piedritti e calotta armati sp. 1.20 m.

Sezione tipo Camerone C2

La sezione in esame verrà realizzata in allargamento a partire dalla sezione allargata del camerone C3, previa ulteriore fase di consolidamento radiale dell'ammasso roccioso, secondo le seguenti modalità:

- Consolidamento radiale dell'ammasso al contorno mediante iniezioni di miscele cementizie armate con tubi in VTR ϕ 60 mm sp. 10 mm con 2 valvole a ml, secondo le seguenti geometrie: n. 12 iniezioni L= 10.0 m; n. 8 iniezioni L= 6 m; interasse longitudinale 1,7 m;
- Demolizione del rivestimento provvisorio costituito da centine e spritz beton e allargamento alla nuova sagoma;
- sostegno del contorno del cavo mediante 9/10chiodi radiali tipo Superswellex L=8.00 m ed interasse longitudianle pari a 2 m; spritz beton fibrorinforzato sp. 30 cm;

- Impermeabilizzazione completa del cavo mediante teli in PVC.
- Getto del rivestimento definitivo di murette e arco rovescio armati sp. 1.00 m
- Getto del rivestimento definitivo di piedritti e calotta armati sp. 1.20 m.

Sezione tipo Camerone C1

La sezione in esame verrà realizzata in allargamento a partire dalla sezione allargata del camerone C3, previa ulteriore fase di consolidamento radiale dell'ammasso roccioso, secondo le seguenti modalità:

- Consolidamento radiale dell'ammasso al contorno mediante iniezioni di miscele cementizie armate con tubi in VTR ϕ 60 mm sp. 10 mm con 2 valvole a ml, secondo le seguenti geometrie: n. 7 iniezioni L= 10.0 m; n. 5 iniezioni L= 13 m; n. 6 iniezioni L= 13 m; interasse longitudinale 1,7 m;
- Demolizione del rivestimento provvisorio costituito da centine e spritz beton e allargamento alla nuova sagoma;
- sostegno del contorno del cavo mediante 9/10chiodi radiali tipo Superswellex L=8.00 m ed interasse longitudianle pari a 2 m; spritz beton fibrorinforzato sp. 30 cm;
- Impermeabilizzazione completa del cavo mediante teli in PVC.
- Getto del rivestimento definitivo di murette e arco rovescio armati sp. 1.20 m
- Getto del rivestimento definitivo di piedritti e calotta di spessore variabile e realizzazione di un setto verticale .

*Sezione tipo Camerone C2**

La sezione in esame verrà realizzata in allargamento a partire dalla sezione allargata del camerone C3, previa ulteriore fase di consolidamento radiale dell'ammasso roccioso, secondo le seguenti modalità:

- Consolidamento radiale dell'ammasso al contorno mediante barre in VTR ϕ 60 mm sp. 10 mm con 2 valvole a ml, inettate con miscele espansive secondo le seguenti geometrie: n. 12 iniezioni L= 10.0 m; n. 8 iniezioni L= 6 m; interasse longitudinale 1,7 m;
- RImozione del rivestimento provvisorio costituito da centine e spritz beton e allargamento alla nuova sagoma;

- sostegno del contorno del cavo mediante centine HEB 220 passo 1.25 m e spritz beton fibrorinforzato sp. 25 cm;
- Impermeabilizzazione completa del cavo mediante teli in PVC.
- Getto del rivestimento definitivo di murette e arco rovescio armati sp. 1.00 m

Getto del rivestimento definitivo di piedritti e calotta armati sp. 1.20 m.

*Sezione tipo Camerone C1**

La sezione in esame verrà realizzata in allargamento a partire dalla sezione allargata del camerone C3, previa ulteriore fase di consolidamento radiale dell'ammasso roccioso, secondo le seguenti modalità:

- Consolidamento radiale dell'ammasso al contorno mediante barre in VTR ϕ 60 mm sp. 10 mm con 2 valvole a ml, inettate con miscele espansive, secondo le seguenti geometrie: n. 7 iniezioni L= 10.0 m; n. 5 iniezioni L= 13 m; n. 6 iniezioni L= 13 m; interasse longitudinale 1,7 m;
- Rimozione del rivestimento provvisorio costituito da centine e spritz beton e allargamento alla nuova sagoma;
- sostegno del contorno del cavo mediante centine HEB 220 passo 1.25 m e spritz-beton fibrorinforzato sp. 25 cm;
- Impermeabilizzazione completa del cavo mediante teli in PVC.
- Getto del rivestimento definitivo di murette e arco rovescio armati sp. 1.20 m
- Getto del rivestimento definitivo di piedritti e calotta di spessore variabile e realizzazione di un setto verticale.

6.3 Zona di imbocco

Sezione tipo B

La sezione, realizzata a piena sezione, prevede i seguenti interventi:

- Preconsolidamento del fronte mediante n°56 elementi strutturali in VTR cementati con miscele cementizie L=15 m e sovrapposizione 6 m;

- Preconsolidamento del contorno del cavo mediante n°39 tubi metallici f 127 mm sp. 10 mm valvolati e cementati in foro con miscele espansive L=15 m e sovrapposizione 6 m;
- Presostegno al contorno del cavo mediante 2 centine IPN 200 accoppiate passo 1 m e spritz beton fibrorinforzato sp. 25 cm;
- Eventuali 3+3 dreni L=20 m;
- Impermeabilizzazione mediante teli in PVC.
- Rivestimento definitivo arco rovescio e murette, sp. 1.20 m armato;
- Rivestimento definitivo calotta e piedritti sp. 0.7-1.20 m armato;

Sezione tipo Camerone a geometria variabile

Questa sezione verrà realizzata per consentire lo sfiocco delle due rampe a partire dalla zona di imbocco verso la galleria S. Paolo. Dopo un preconsolidamento del fronte di scavo mediante 56 elementi strutturali in VTR cementati con miscele cementizie L=18 m inizierà lo scavo a sezione variabile, la geometria passa da una sezione minima assimilabile alla sezione tipo B della rampa di imbocco con superficie di scavo pari a 205 mq, ad una sezione massima con superficie di scavo pari a 347 mq. I primi 11 metri di avanzamento saranno sostenuti da due centine IPN 220 accoppiate e spritz beton sp. 25 cm, mentre per gli ultimi 5 m è previsto un consolidamento radiale mediante chiodi di tipo superswellex L=8 m. Dalla sezione di maggior dimensione le due rampe verranno scavate separatamente secondo le geometrie precedentemente descritte.

6.4 Interventi di consolidamento da piano campagna

Nelle tratte a basse coperture sono previsti una serie di consolidamenti realizzati mediante iniezioni tramite elementi in VTR. I tubi in VTR hanno un diametro di 70mm di lunghezza variabile in funzione della geometria dei luoghi, dotati di 5 cavità per l'iniezione della malta e sono manicottabili, come illustrato nella Figura 7

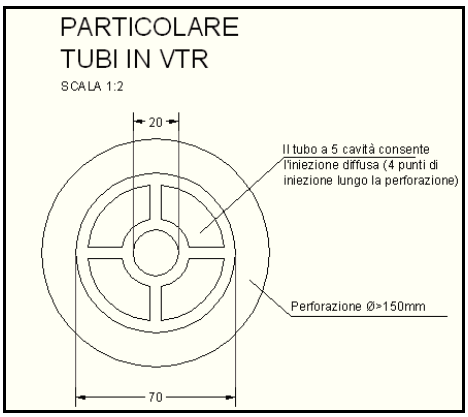


Figura 7: Particole del tubo in VTR

Il consolidamento prevede l'iniezione della malta attraverso i tubi in VTR disposti a interasse di di 1.00m x 1.00 a quinconce.

7 VERIFICA DELLE SEZIONI DI SCAVO E CONSOLIDAMENTO

7.1 Il codice di calcolo FLAC 7.0

Tutte le analisi numeriche sono state svolte utilizzando il programma di calcolo numerico FLAC 7.0 (Fast Lagrangian Analysis of Continua), codice di calcolo per l'analisi di problemi piani riguardanti il comportamento meccanico di mezzi continui (terreni, rocce) e di strutture interagenti. I materiali sono rappresentati da elementi quadrilateri, o zone, che formano una griglia (mesh) che può essere configurata dall'utente per cogliere opportunamente la forma dell'oggetto da modellare. A ciascuna zona si assegnano le proprietà fisiche e meccaniche che ne caratterizzeranno il comportamento nell'analisi. I vertici di ogni zona costituiscono i nodi della griglia, alle cui coordinate è riferita la formulazione Lagrangiana adottata per l'analisi del continuo.

Nell'analisi Lagrangiana gli incrementi di spostamento vengono sommati alle coordinate di ciascun nodo, cosicché la griglia si muove e si deforma insieme al materiale che rappresenta. Al contrario nella formulazione Euleriana gli spostamenti e le deformazioni del materiale sono riferiti ad una griglia fissa.

Sia i metodi agli elementi finiti che i metodi alle differenze finite hanno lo scopo di tradurre un sistema di equazioni differenziali in un sistema di equazioni algebriche. Il metodo agli elementi finiti ha come punto centrale la definizione delle funzioni di forma che descrivono la variazione delle grandezze che interessano il problema (tensioni, deformazioni) attraverso ciascun elemento. Nel metodo alle differenze finite si prescinde da questa definizione delle funzioni di forma, e le equazioni algebriche vengono scritte direttamente in termini di variabili di campo (spostamenti,velocità e accelerazioni) definite nei nodi della mesh.

Inoltre, per la risoluzione di un problema, il metodo agli elementi finiti sfrutta l'assemblaggio delle matrici di rigidezza di ogni elemento in una matrice di rigidezza globale. L'operazione di assemblaggio non è, invece, necessaria nei metodi di avanzamento esplicito.

Il codice di calcolo FLAC si basa su un metodo di calcolo alle differenze finite, con un algoritmo risolutivo di tipo esplicito.

Anche quando l'obiettivo è quello di trovare una soluzione in campo statico, FLAC risolve le equazioni di equilibrio dinamico, comunemente denominate "equazioni di moto" che, per un mezzo continuo, assumono la forma:

$$m\frac{d\dot{u}}{dt} = F$$

da cui:

$$\rho \cdot \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial t} = \frac{\partial \sigma'_{ij}}{\partial x_i} + \rho g_i$$

in cui

ρ : densità

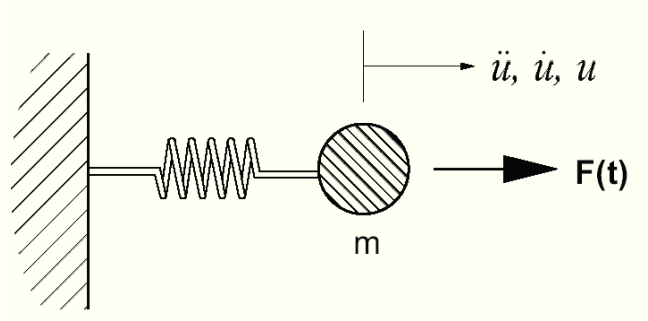
xi : vettore posizione

u : vettore velocità

gi : componente dell'accelerazione di gravità

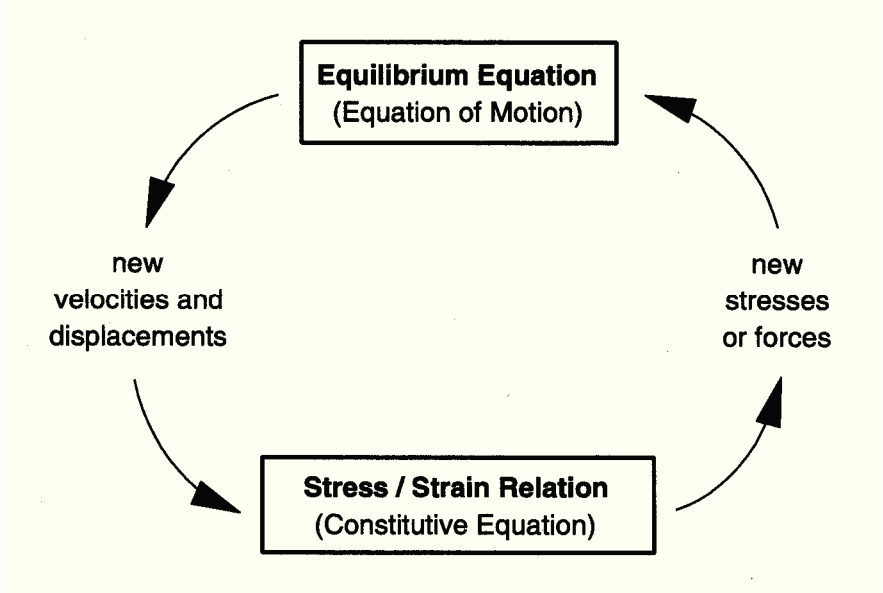
σ'ij : tensore degli sforzi

Il pedice i denota che le componenti sono espresse secondo gli assi di un sistema di riferimento cartesiano.



L'approccio tramite le equazioni dinamiche del moto permette di essere certi che l'algoritmo numerico sia stabile anche nel caso in cui il sistema fisico non dovesse risultare staticamente in equilibrio, seguendo passo dopo passo l'evolversi delle condizioni di equilibrio dinamico.

All'interno del singolo passo di calcolo (step), l'algoritmo risolutivo si articola secondo il ciclo indicato nella figura seguente. Ad ogni nuovo step, vengono risolte le equazioni di equilibrio, in cui si assumono fisse le tensioni e le forze in tutti i punti, ottenendo i valori corrispondenti delle velocità e degli spostamenti; questi vengono successivamente inseriti nelle equazioni dei legami costitutivi per i diversi materiali, in cui si assumono fisse le velocità, ottenendo così valori aggiornati per le tensioni. L'intervallo di tempo corrispondente al singolo ciclo di calcolo è considerato piccolo abbastanza da rendere accettabile l'approssimazione di tensioni e velocità incrementali "congelate" sul singolo step di calcolo. Il ciclo viene ripetuto finché non si arriva alla convergenza, oppure ad altra opportuna condizione prefissata.



La convergenza dell'equilibrio viene valutata tramite il massimo valore di forze sbilanciate presente ai nodi della griglia, che viene confrontato con un valore di tolleranza preimpostato nel codice di calcolo e definibile dall'operatore.

L'approccio esplicito elimina la necessità di reiterare il calcolo dello stato di sforzo nell'elemento quando si utilizzino legami costitutivi non lineari, come avviene nel metodo implicito FEM (finite element method).

Per contro, essendo l'intervallo di tempo corrispondente al singolo ciclo di calcolo molto piccolo, sono necessari a tale scopo un gran numero di passi.

Per questo motivo il metodo esplicito risulta preferibile nell'analisi di sistemi a comportamento non lineare, o dove sia rilevante aggiornare la geometria del continuo in relazione all'accumularsi delle deformazioni.

Il codice di calcolo alle differenze finite è stato adottato per la verifica e il dimensionamento delle strutture provvisorie e definitive previste per l'allargamento della galleria in questione, in particolare per la realizzazione del camerone C1.

Tale sezione è stata verificata considerando l'attraversamento di un banco di Argille di Ortovero posto al di sopra della formazione di Gneiss a biotite e muscovite.

L'analisi è stata sviluppata per analizzare il comportamento del cavo e verificare l'adeguatezza del prerivestimento e del rivestimento definitivo previsto.

Nell'analisi il terreno viene modellato come un mezzo continuo elastico perfettamente plastico con criterio di resistenza di Mohr-Coulomb e legge di flusso non associata (dilatanza nulla), a cui vengono assegnate le caratteristiche meccaniche (angolo d'attrito, coesione, modulo elastico e coefficiente di Poisson) e fisiche (densità) proprie dei terreni interessati dallo scavo, descritte nei paragrafi successivi.

Lo scavo della galleria viene simulato rilasciando (in modo uniforme) un sistema di forze equivalenti applicate sul contorno del profilo di scavo; in questo modo si simula "l'effetto fronte" (come descritto più approfonditamente nel seguito) con la possibilità di valutare le azioni sulle strutture di rivestimento al progredire degli avanzamenti.

Il metodo di analisi alle differenze finite consiste nella discretizzazione delle equazioni differenziali che governano il problema fisico in esame sostituendo alle derivate un rapporto tra termini finiti. In tal modo le equazioni differenziali si trasformano in equazioni algebriche da risolversi in passi successivi di calcolo. L'algoritmo di calcolo segue uno schema lagrangiano "esplicito" per integrazione diretta nel tempo , in grado di lavorare agevolmente (e molto velocemente) per sistemi con grandi deformazioni, con stati di collasso molto avanzati e in condizioni di instabilità.

La discretizzazione viene operata sovrapponendo alla porzione di continuo considerata una griglia, a maglie quadrilatere, in cui in corrispondenza dei nodi sono definite le grandezze in gioco. In tal caso la derivata prima di una funzione, rispetto ad una variabile indipendente, si può sostituire con il rapporto tra la variazione subita dalla funzione nel passare da un nodo ad uno contiguo e la corrispondente variazione della variabile indipendente. Per ogni nodo della griglia si valuta la massa m, la risultante delle forze esterne Fe (gravità, carichi esterni, ecc..), la risultante delle forze interne Fi ,calcolata per integrazione degli sforzi nelle zone collegate da uno stesso nodo, e la forza sbilanciata agente sul nodo Fu (unbalance force Fu=Fe-Fi); affinché il sistema sia in equilibrio la forza sbilanciata deve essere nulla. In genere, il processo iterativo termina quando la forza sbilanciata arriva ad un valore minore di una tolleranza prestabilita, posta pari a 0.01kN.

Il rivestimento (di prima fase e definitivo) è stato modellato mediante elementi strutturali (Beam) a comportamento elastico lineare.

7.2 Taratura del modello di calcolo

Le analisi sono state condotte in condizioni di deformazione piana (PLAIN STRAIN), ma con accorgimenti tali da considerare il progressivo passaggio dal problema tridimensionale (vicino al fronte) a quello piano (lontano dal fronte).

Lo scavo della galleria viene simulato rimuovendo gli elementi della mesh all'interno della sagoma di scavo e rilasciando (in modo uniforme) un sistema di forze equivalenti applicate sul contorno del profilo di scavo. È stata applicata una legge di riduzione delle forze di scavo secondo quanto espresso dalla relazione analitica di Panet, $1 - \lambda = f(x / R)$, che tiene conto della variazione del tasso di confinamento in funzione della distanza della sezione di calcolo dal fronte. In questo modo il problema tridimensionale dello scavo della galleria viene ricondotto ad un problema piano, con la possibilità di valutare le azioni sulle strutture di rivestimento al progredire degli avanzamenti.

I valori del rilascio adottati nelle varie fasi sono stati ricavati attraverso le curve di Panet considerando il parametro Ns=1, a vantaggio di sicurezza per le verifiche a lungo termine dei rivestimenti definitivi della galleria allargata.

7.3 Verifica Camerone C1

L'analisi condotta è relativa ad una sezione con circa 25m di copertura, dove lo scavo avviene all'interno del banco di Argille di Ortovero.

L'analisi è stata condotta allo scopo di determinare le sollecitazioni risultanti sul rivestimento di prima fase e sul rivestimento definitivo.

Al fine di ridurre gli effetti di bordo è stata considerata una porzione di continuo con un'estensione rispetto all'asse della galleria, di circa 200m in direzione laterale, e 100m in verticale; la copertura assunta è di 25m. La griglia è costituita da 35000 elementi, le cui dimensioni sono state opportunamente ridotte, per ottenere un adeguato grado di dettaglio, in prossimità dell'area di scavo. Il contorno del modello è stato vincolato mediante carrelli orizzontali lungo i bordi laterali ed inferiormente mediante carrelli in entrambe le direzioni.

Nella seguente tabella sono riportati i parametri adottati nell'analisi numerica per i terreni naturali (parametri medi all'interno del range definito in fase di caratterizzazione dell'ammasso roccioso):

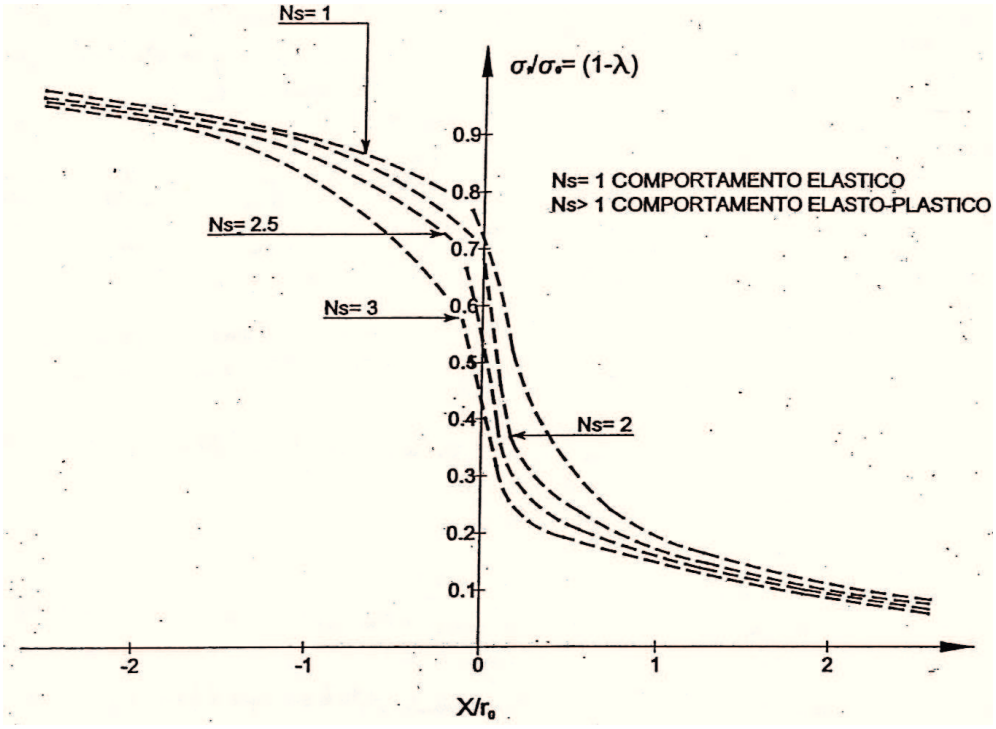
Litotipo	γ kN/m3	c' kPa	φ °	v	E MPa	k0
Argille di Ortovero	19	75	26.5	0.3	65	0.7
Gneiss a biotite e muscovite fratturati	26	600	67	0.22	8000	0.7

Le fasi di realizzazione della galleria esistente, demolizione della stessa, scavo e di installazione degli elementi strutturali della galleria allargata simulate nelle analisi sono le seguenti:

Fase 1	Fase litostatica.
Fase 2	**Scavo sezione corrente (scavo meccanizzato)**: rilascio in corrispondenza del fronte (cavo non sostenuto);
Fase 3	Installazione conci di rivestimento in c.a. prefabbricato spessore 35 cm
Fase 4	Consolidamento radiale dall'interno della galleria mediante iniezioni di miscele cementizie
Fase 5	**Scavo di allargamento fino alla sezione C3**: rilascio in corrispondenza del fronte (cavo non sostenuto);
Fase 6	Installazione centine 2 IPN 180/1.0 e spritz-beton spessore 25 cm In questa fase si ipotizzano resistenti le sole centine.

Fase 7	Piena maturazione spritz beton (Rck=25 MPa)
Fase 8	Consolidamento radiale dall'interno della galleria mediante iniezioni di miscele cementizie
Fase 9	**Scavo di allargamento fino alla sezione C1**: rilascio in corrispondenza del fronte (cavo non sostenuto);
Fase 10	Installazione prerivestimento costituito da spritz-beton spessore 30 cm In questa fase si una maturazione parziale dello spritz beton (Rck=14MPa).
Fase 11	Piena maturazione spritz beton (Rck=30 MPa) Installazione arco rovescio e murette sp. 120cm
Fase 12	Maturazione arco rovescio e murette Installazione calotta e piedritti spessore 100 cm
Fase 13	Decadimento del prerivestimento del camerone C3 e delle caratteristiche del terreno consolidato al contorno dello scavo

Nelle prime fasi viene schematizzata la realizzazione della galleria esistente scavata in meccanizzato. Successivamente viene schematizzata la realizzazione dell'allargamento della galleria fino alla sezione C3 previo consolidamento del terreno mediante miscele cementizie. Le percentuali di rilascio delle forze di scavo, adottate nel calcolo numerico, sono state ottenute utilizzando la curva di Panet con fattore di stabilità NS=1.0; ciò è stato definito a vantaggio di sicurezza per le verifiche strutturali a lungo termine del rivestimento definitivo della galleria allargata.



A valle dell'installazione del prerivestimento del camerone C3 viene schematizzata una seconda fase di interventi di consolidamento radiale mediante miscele cementizie.

Successivamente viene modellata la demolizione del prerivestimento del camerone C3, lo scavo di allargamento fino alla sezione C1 e la posa dei rivestimenti provvisori e definitivi.

I rivestimenti della galleria allargata (Camerone C1) sono stati verificati per le condizioni di carico riportate nel DM 2008 sia nei riguardi degli stati limite ultimi che nei riguardi degli stati limite di esercizio, mediante il metodo dei coefficienti parziali di sicurezza sulle azioni e sulle resistenze (DM2008 6.2.3).

Le combinazioni di calcolo adottate sono schematizzate nella seguente tabella:

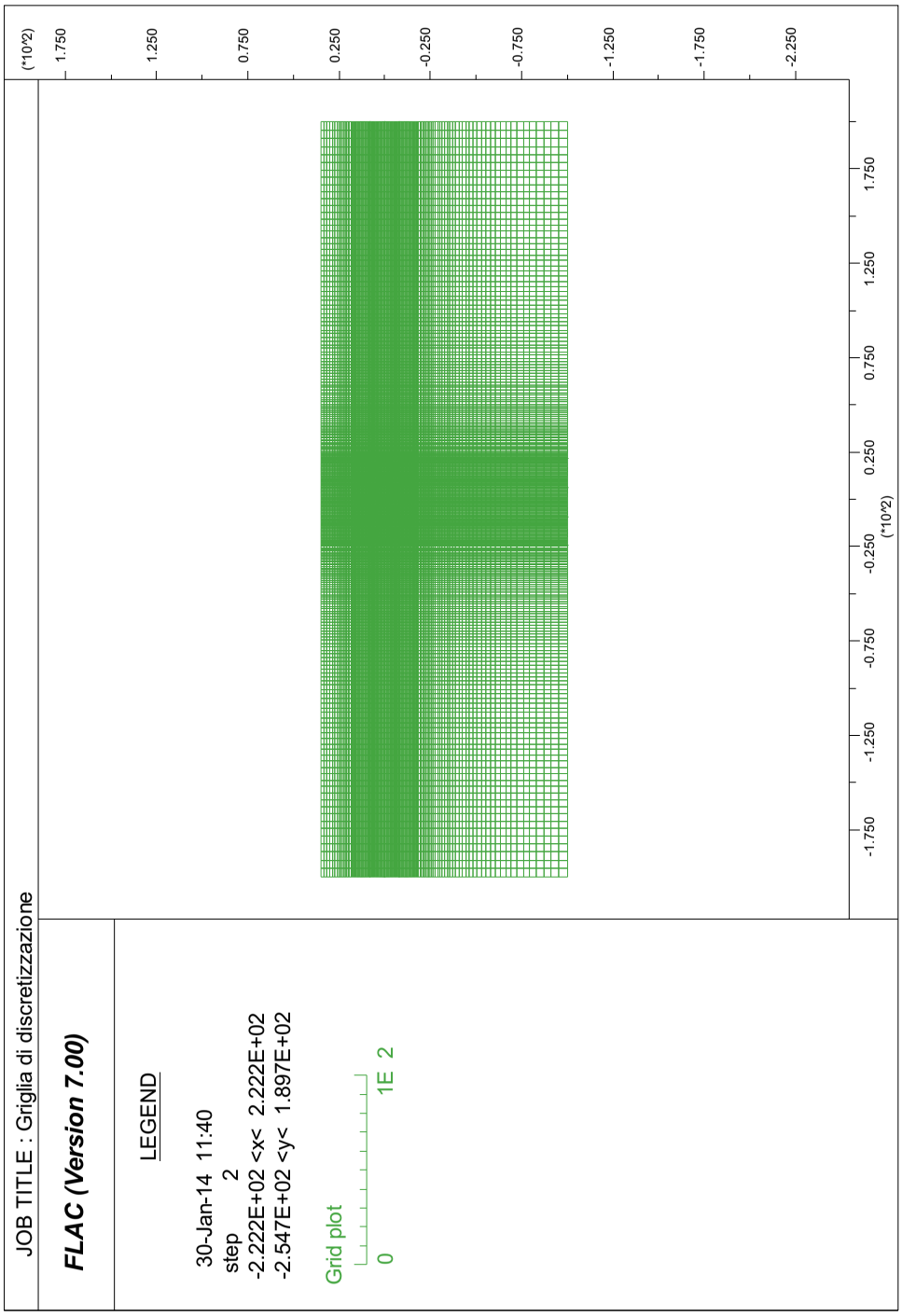
SLU	CASO	AZIONI γ_F				PROPRIETA' TERRENO γ_M			RESISTENZE γ_R		
		PERMANENTI		*VARIABILI*		*tanΦ'*	*c'*	c_u	q_B	δ	K_p
		SFAV.	***FAV.***	***SFAV.***	***FAV.***						
A1+M1	1	1.3	1	1.5	0	1	1	1	1	1	1

A2+M2	2	1	1	1.3	0	1.25	1.25	1.4	1	1	1

Nella combinazione 1 (A1 + M1) si è preferito ricorrere all'incremento delle caratteristiche di sollecitazione ricavate dalla combinazione agli stati limite di esercizio (tutti i coefficienti pari ad 1) mediante il coefficiente moltiplicativo $\gamma F = 1.3$, piuttosto che modellare una nuova condizione di carico nel modello di calcolo.

Di seguito sono riportati i risultati ritenuti più significativi (le forze sono espresse in kN, le lunghezze e gli spostamenti in m).

FASE 1 - LITOSTATICO



Griglia di discretizzazione

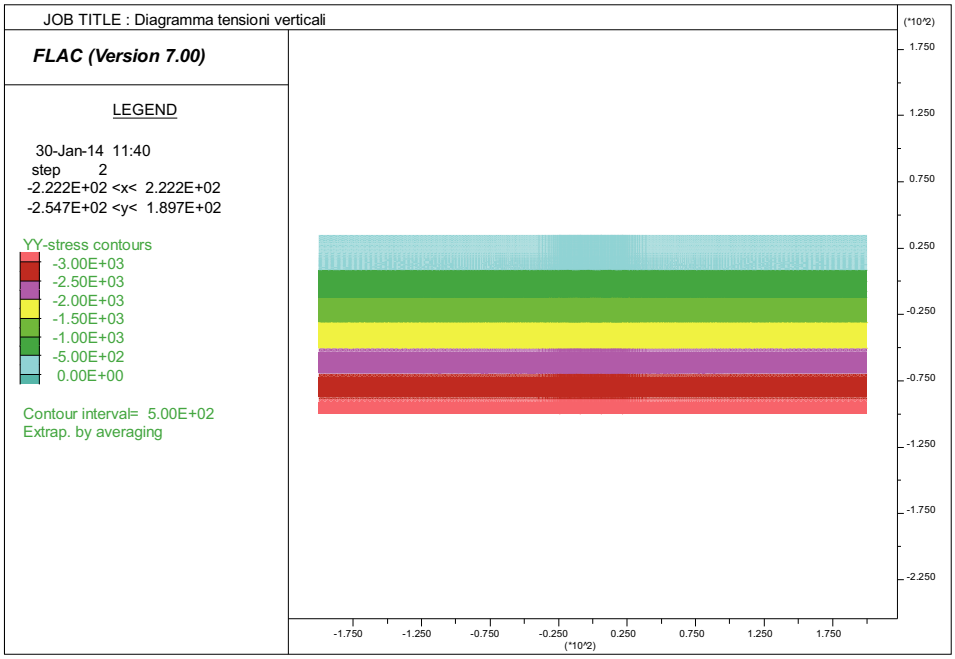


Diagramma delle tensioni verticali

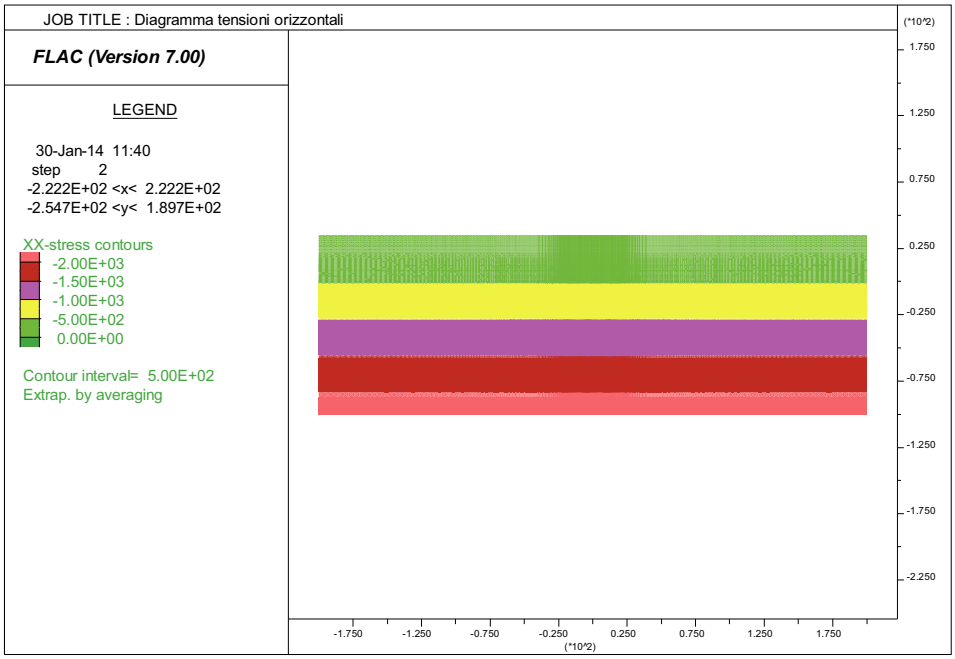
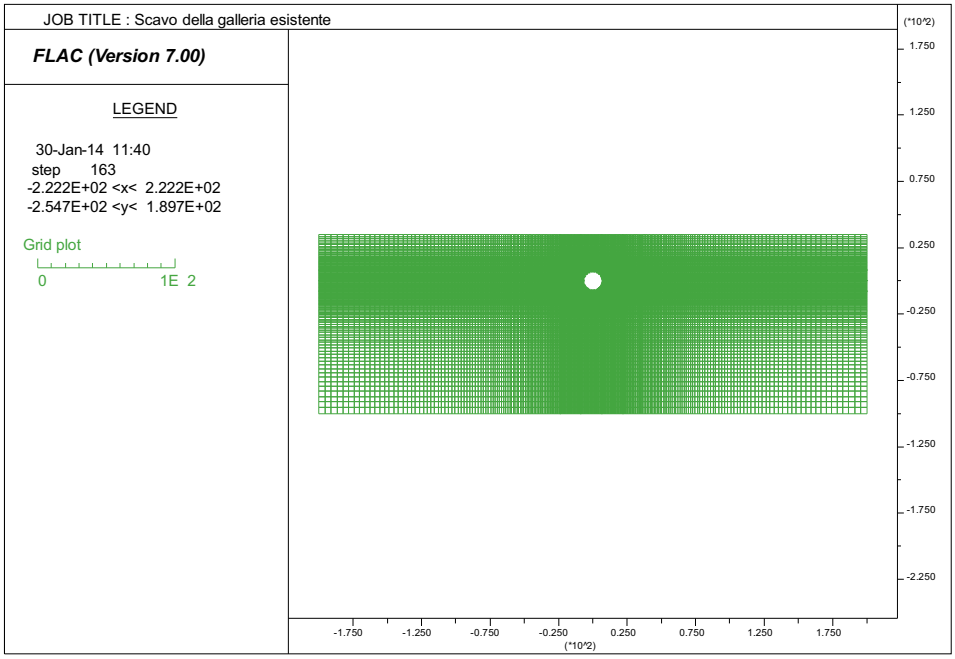
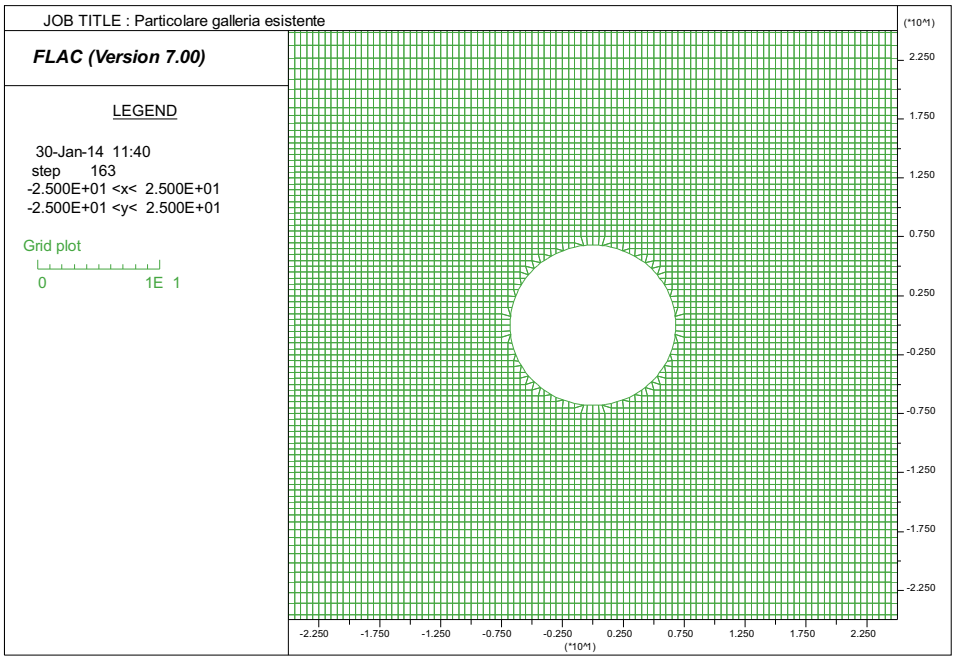


Diagramma delle tensioni orizzontali

FASE 2 – SCAVO DELLA GALLERIA ESISTENTE

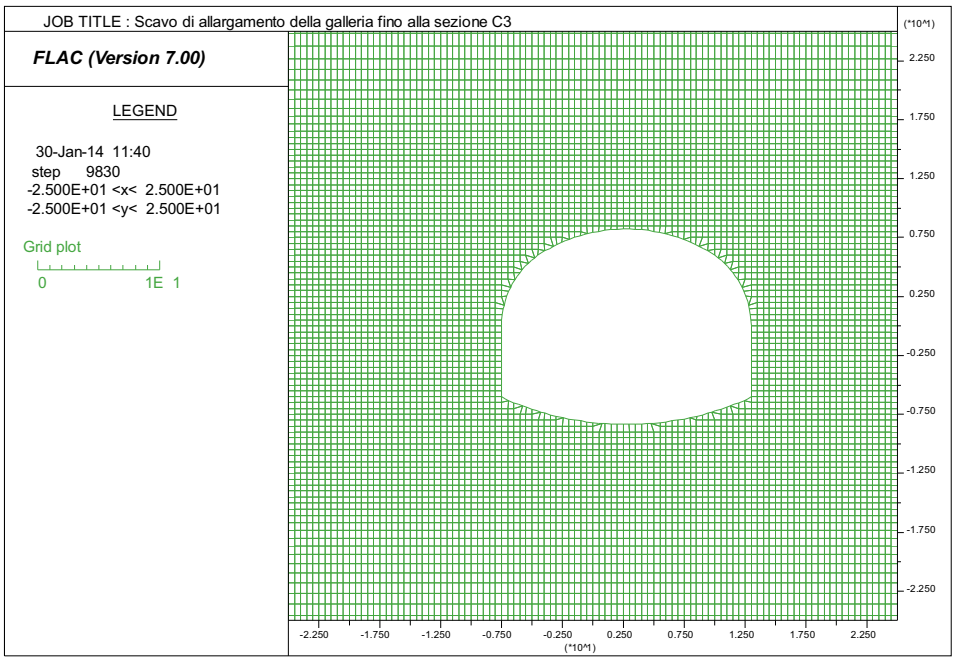


Scavo della galleria esistente



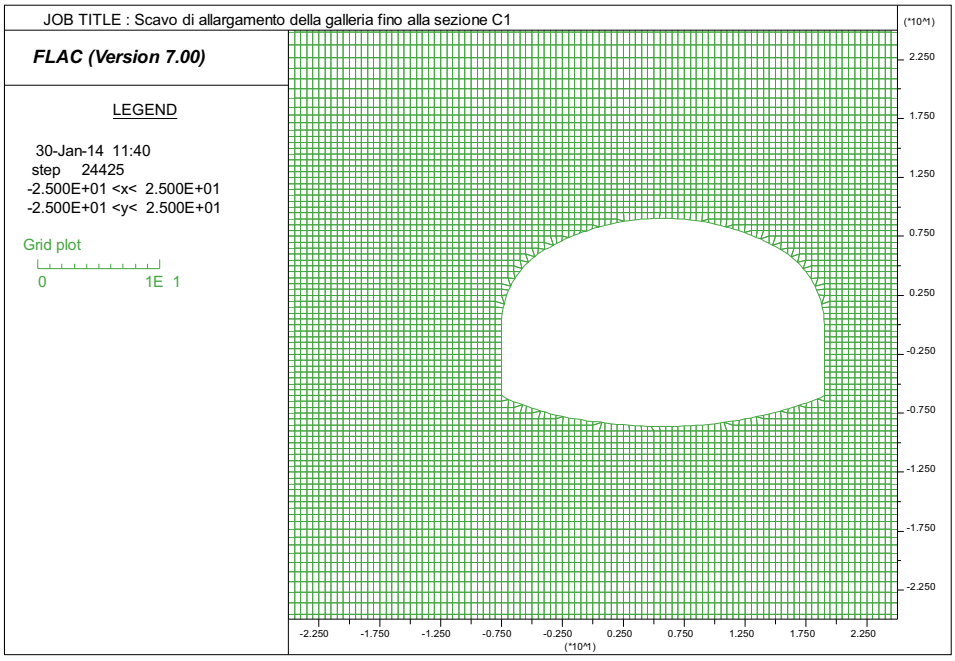
Particolare della galleria esistente

FASE 5 – SCAVO ALLARGAMENTO DELLA GALLERIA FINO ALLA SEZIONE C3



Scavo dell'allargamento della galleria fino alla sezione C3

FASE 9 – SCAVO ALLARGAMENTO DELLA GALLERIA FINO ALLA SEZIONE C1



Scavo dell'allargamento della galleria fino alla sezione C1

FASE 10 – INSTALLAZIONE RIVESTIMENTO PROVVISORIO CAMERONE C1

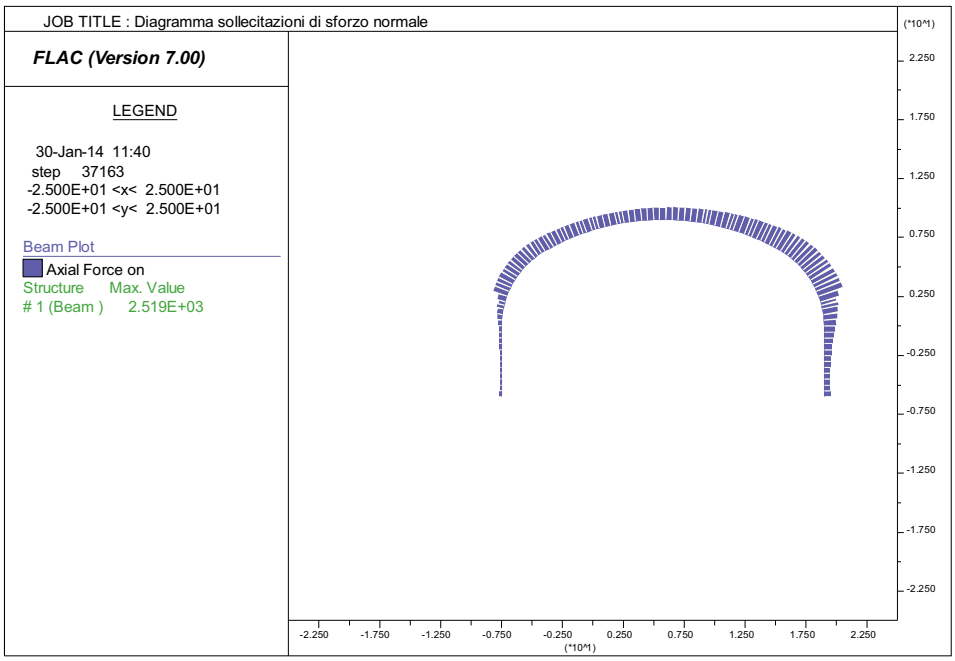


Diagramma delle sollecitazioni di sforzo assiale

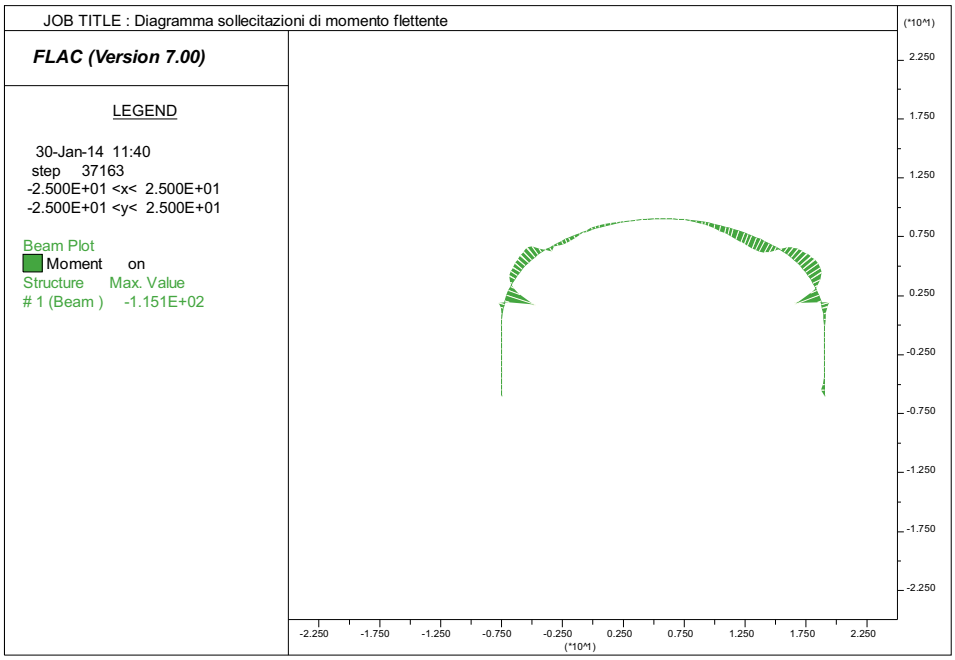


Diagramma delle sollecitazioni di momento flettente

FASE 11 – INSTALLAZIONE ARCO ROVESCIO E MURETTE CAMERONE C1

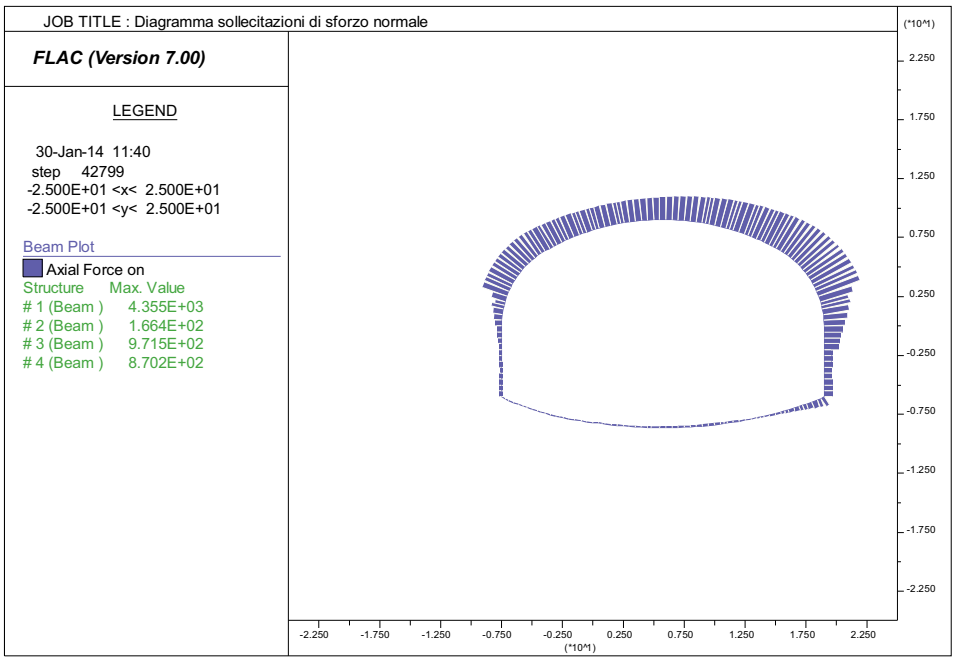


Diagramma delle sollecitazioni di sforzo assiale

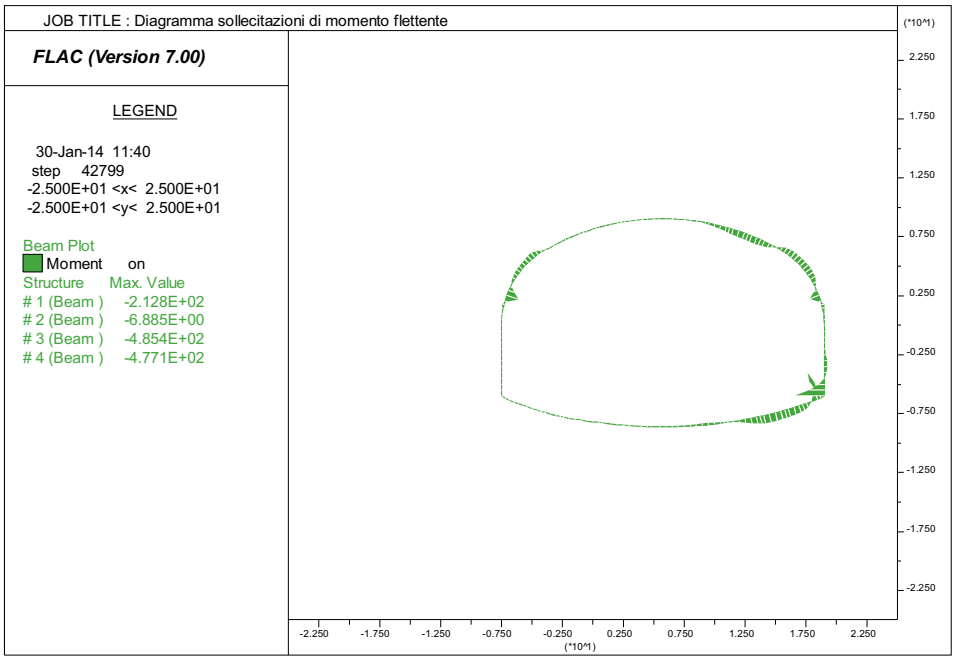


Diagramma delle sollecitazioni di momento flettente

FASE 13 – DECADIMENTO PRERIVESTIMENTO CAMERONE C1

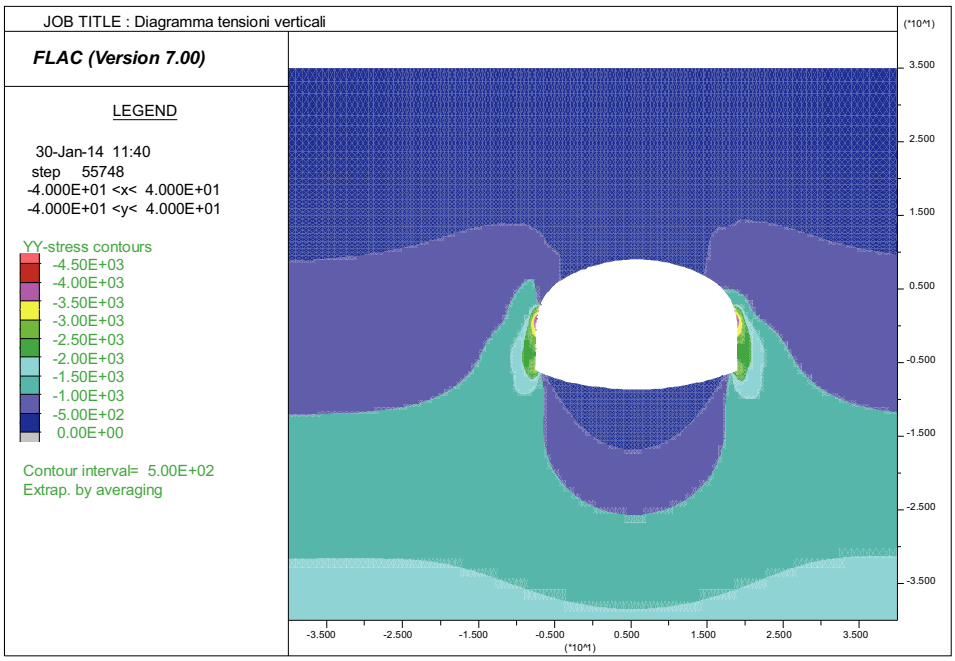


Diagramma delle tensioni verticali

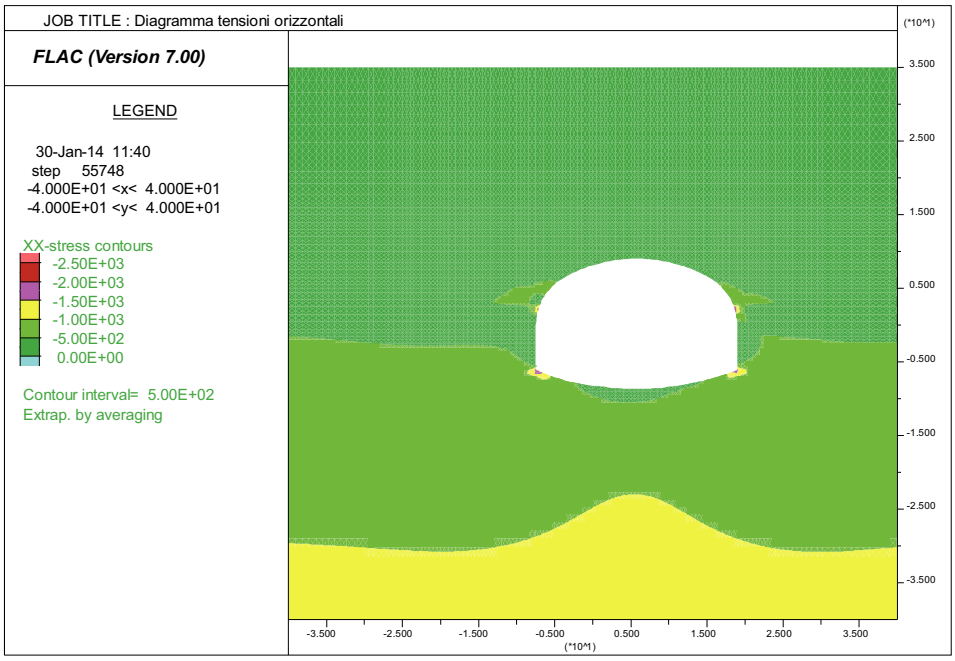


Diagramma delle tensioni orizzontali

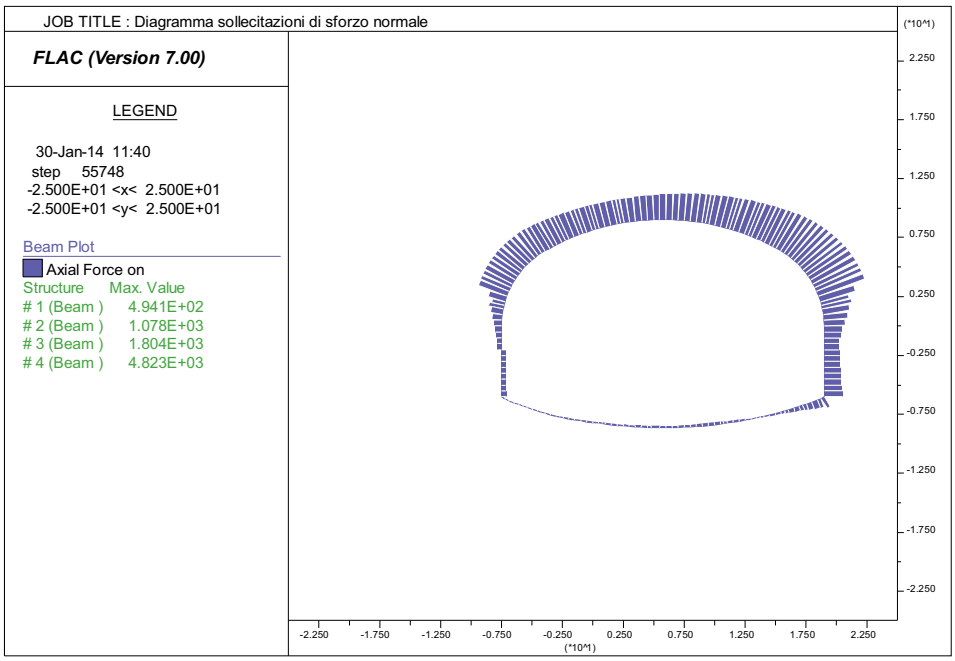


Diagramma delle sollecitazioni di sforzo assiale

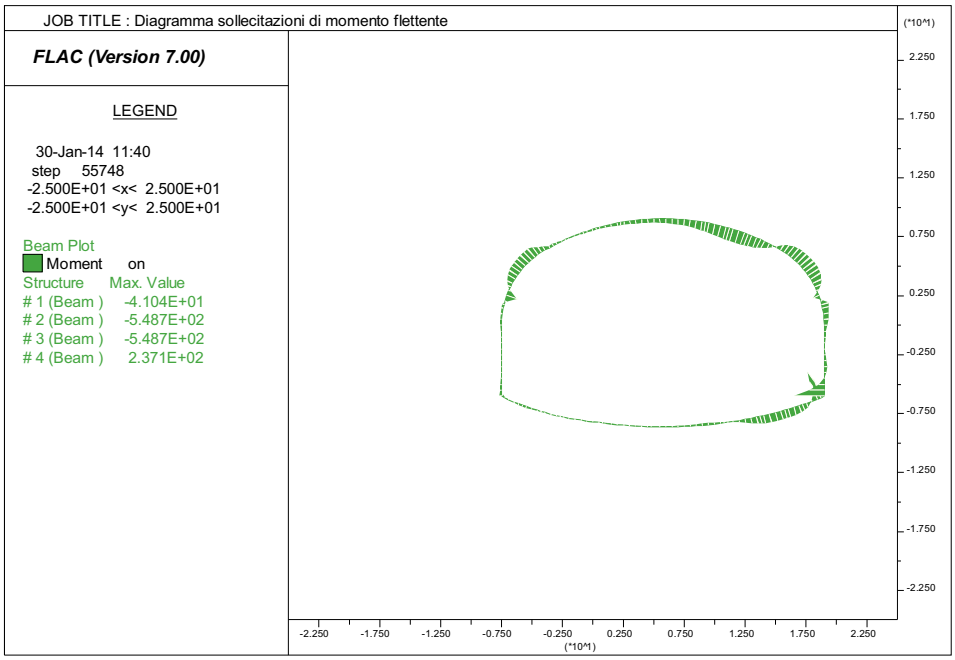


Diagramma delle sollecitazioni di momento flettente

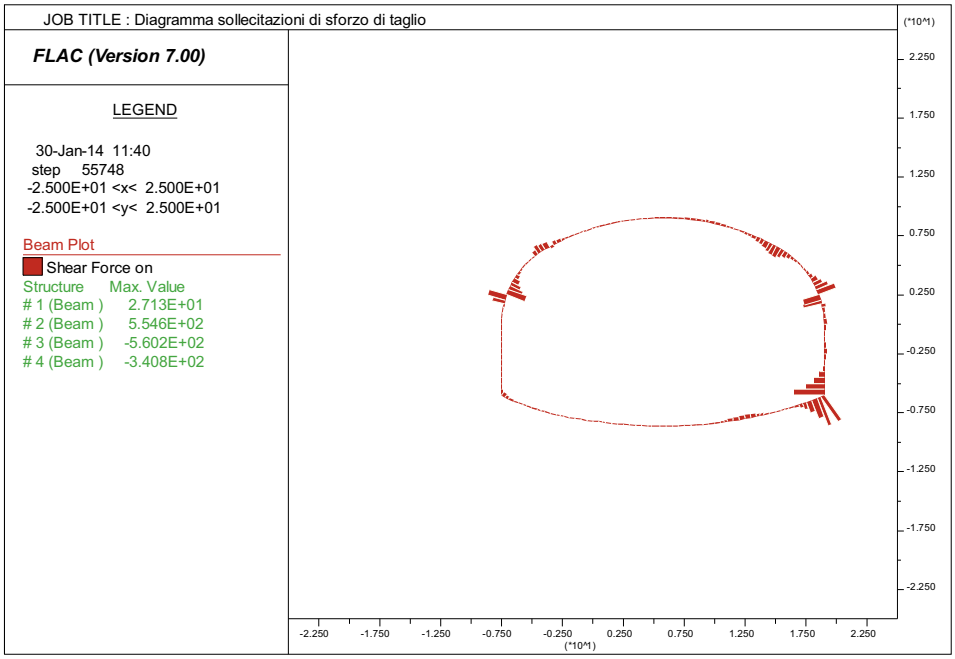


Diagramma delle sollecitazioni di sforzo di taglio