

COMMITTENTE:



ALTA SORVEGLIANZA:



GENERAL CONTRACTOR:



INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE OBIETTIVO N. 443/01

TRATTA A.V. /A.C. TERZO VALICO DEI GIOVI PROGETTO ESECUTIVO

**GALLERIA NATURALE DI VALICO
GALLERIA A SINGOLO BINARIO**

**Tratta 4 – WBS GN14N, GN14R, GN15P, GN15R
Relazione di calcolo**

GENERAL CONTRACTOR	DIRETTORE DEI LAVORI
Consorzio Cociv Ing. A. Pelliccia	

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC.	OPERA/DISCIPLINA	PROGR.	REV.
I G 5 1	0 0	E	C V	C L	G N 0 0 0 0	0 0 1	A

Progettazione :

Rev	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Progettista Integratore	Data	IL PROGETTISTA
A00	Emissione	Rocksoil <i>A. Palomba</i>	26/02/2015	Rocksoil <i>A. Palomba</i>	26/02/2015	A. Palomba <i>A. Palomba</i>	27/02/2015	 Consorzio Collegamenti Integrati Veloci Dott. Ing. Aldo Mancarella Ordine Ingegneri Prov. TO n. 6271 R

n. Elab.:	File: IG5100ECVCLGN0000001A00
-----------	-------------------------------

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 	
	<p>IG5103ECVCLGN0000001A00</p>	<p>Foglio 3 di 166</p>

INDICE

INDICE.....		3
1. INTRODUZIONE.....		7
2. NORMATIVE E RACCOMANDAZIONI.....		10
3. MATERIALI IMPIEGATI.....		13
3.1. Gallerie naturali.....		13
4. DESCRIZIONE DEI METODI DI CALCOLO UTILIZZATI.....		16
4.1. Metodo delle curve caratteristiche.....		16
4.1.1. Aspetti generali.....		16
4.1.2. Consolidamento del fronte di scavo.....		19
4.1.3. Consolidamento al contorno (metodo "transfer-matrix").....		20
4.2. Analisi numeriche bidimensionali: FLAC 7.0.....		21
4.3. Analisi stabilità del fronte in gallerie superficiali.....		25
5. INQUADRAMENTO GEOLOGICO, IDROGEOLOGICO E GEOTECNICO.....		29
5.1. Inquadramento geologico-geomorfologico.....		32
5.1.1. Unità metamorfiche della "zona Sestri-Voltaggio" l.s.....		33
5.1.2. Unità del Bacino Terziario Piemontese.....		35
5.2. Condizioni geologiche attese in corrispondenza dell'opera.....		36
5.3. Inquadramento idrogeologico.....		40
5.4. Inquadramento Geotecnico.....		45
6. PREVISIONI SUL COMPORTAMENTO DEGLI AMMASSI ALLO SCAVO (FASE DI DIAGNOSI).....		48
6.1. Calcolo e determinazione delle categorie di comportamento allo scavo.....		49
6.1.1. Stabilità del fronte di scavo.....		50
6.1.2. Metodo delle Linee Caratteristiche.....		59
6.1.3. Considerazioni conclusive.....		71
6.2. Fenomeni di Squeezing.....		73
7. DESCRIZIONE DELLE SEZIONI TIPO (FASE DI TERAPIA).....		74
7.1. Tipologie di intervento in fase costruttiva.....		74
7.2. Sezioni tipo di avanzamento.....		76
8. INDIVIDUAZIONE DELLE SEZIONI DI CALCOLO E ANALISI DELLE SEZIONI TIPO DI SCAVO.....		78
8.1. Premessa.....		78
8.2. Verifiche di stabilità del fronte con metodi analitici.....		78
8.3. Verifiche con il metodo delle curve caratteristiche.....		83

8.4.	Modelli numerici di calcolo: Ipotesi di base.....	93
8.4.1.	Modellazione degli elementi geotecnici e strutturali.....	95
8.4.2.	Taratura modelli di calcolo.....	99
8.5.	Modello 1: Sezione tipo B0Lsb Copertura 300m	99
8.5.1.	Rivestimenti di prima fase e fasi di calcolo.....	101
8.6.	Modello 2: Sezione tipo B0/1sb Copertura 500m	102
8.6.1.	Rivestimenti di prima fase e fasi di calcolo.....	105
8.7.	Modello 3: Sezione tipo B1sb Copertura 500m	107
8.7.1.	Rivestimenti di prima fase e fasi di calcolo.....	109
8.8.	Modello 4: Sezione tipo B2/1sb copertura 500m	111
8.8.1.	Rivestimenti di prima fase e fasi di calcolo.....	112
8.9.	Modello 5: Sezione tipo C4 Copertura 500m.....	114
8.9.1.	Rivestimenti di prima fase e fasi di calcolo.....	115
8.10.	Modello 6: Sezione tipo B0-r Copertura 400m.....	117
8.10.1.	Rivestimenti di prima fase e fasi di calcolo.....	118
8.11.	Modello 7: Sezione tipo C2sb-r Copertura 300m.....	120
8.11.1.	Rivestimenti di prima fase e fasi di calcolo.....	121
8.12.	Modello 8: Area Sicura - Sezione tipo B0L Copertura 300m	122
8.12.1.	Rivestimenti di prima fase e fasi di calcolo.....	123
8.13.	Modello 9: Sezione tipo B0 Copertura 400m	125
8.13.1.	Rivestimenti di prima fase e fasi di calcolo.....	127
8.14.	Modello 10: Sezione tipo C4sb Copertura 150m	129
8.14.1.	Rivestimenti di prima fase e fasi di calcolo.....	130
9.	RISULTATI ANALISI NUMERICHE E VERIFICHE.....	132
9.1.	Rivestimenti di prima fase.....	132
9.2.	Verifiche Rivestimento definitivo in Calcestruzzo Armato.....	133
9.3.	Modello 1: Sezione Tipo B0Lsb	135
9.3.1.	Analisi deformativa.....	135
9.3.2.	Analisi Tensionale.....	137
9.4.	Modello 2: Sezione Tipo B0/1sb	138
9.4.1.	Analisi deformativa.....	138
9.4.2.	Analisi Tensionale.....	140
9.5.	Modello 4: Sezione Tipo B1sb	141
9.5.1.	Analisi deformativa.....	141
9.5.2.	Analisi Tensionale.....	143
9.6.	Modello 5: Sezione Tipo B2/1sb	144
9.6.1.	Analisi deformativa.....	144

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 
	<p style="text-align: center;">IG5103ECVCLGN0000001A00</p> <p style="text-align: right;">Foglio 5 di 166</p>

9.6.2.	Analisi Tensionale.....	146
9.7.	Modello 9: Sezione Tipo C4sb	147
9.7.1.	Analisi deformativa.....	147
9.7.2.	Analisi Tensionale.....	149
9.8.	Modello 2: Sezione Tipo B0-r.....	150
9.8.1.	Analisi deformativa.....	150
9.8.2.	Analisi Tensionale.....	152
9.9.	Modello 9: Sezione Tipo C2sb-r.....	153
9.9.1.	Analisi deformativa.....	153
9.9.2.	Analisi Tensionale.....	154
9.10.	Modello 1: Sezione Tipo B0L area sicura	156
9.10.1.	Analisi deformativa	156
9.10.2.	Analisi Tensionale.....	157
9.11.	Modello 2: Sezione Tipo B0 area sicura	159
9.11.1.	Analisi deformativa	159
9.11.2.	Analisi Tensionale.....	160
9.12.	Modello 9: Sezione Tipo C4sb area sicura	162
9.12.1.	Analisi deformativa	162
9.12.2.	Analisi Tensionale.....	163
10.	INTERFERENZA SCAVO-EDIFICI – CLASSIFICAZIONE DEL DANNO	165
11.	CONCLUSIONI	165
12.	ALLEGATI DI CALCOLO	166
12.1.	Linee caratteristiche.....	166
12.2.	Stabilità del fronte	166

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



IG5103ECVCLGN0000001A00

Foglio
6 di 166

<p>GENERAL CONTRACTOR</p>  <p>CODIV Consorzio Collegamenti Integrati Veloci</p>	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>
	<p style="text-align: center;">IG5103ECVCLGN0000001A00</p> <p style="text-align: right;">Foglio 7 di 166</p>

1. INTRODUZIONE

Oggetto della presente relazione è la descrizione delle principali problematiche legate allo scavo della galleria di Valico, le scelte progettuali effettuate con conseguente definizione delle sezioni tipo d'avanzamento e la verifica di tali sezioni, con riferimento alle condizioni critiche rappresentative presenti lungo lo sviluppo della galleria.

Il presente documento, introdotto nella WBS GN00, è relativo allo sviluppo di entrambi i binari tra le progressive PK 16+280 e PK 20+988 circa, relativo alle WBS GN14R - GN14R (binario pari) e GN15P – GN15R (binario dispari). Tale tratta, descritta nel seguito come “Tratta 4”, è realizzata mediante scavo tradizionale impiegando due canne a singolo binario di sezione policentrica poste ad interasse pari a 35m. Si deve inoltre considerare il tratto in prossimità della Finestra Val Lemme denominato “zona di esodo rapido”, nel quale in affianco alle due canne di linea verrà realizzato un cunicolo, collegato alla canna centrale di “area sicura” (avente sagoma allargata) mediante by-pass pedonali e carrabili.

L'opera in oggetto fa parte del tracciato della linea ferroviaria del “Terzo Valico dei Giovi” che si estende da Genova a Tortona. Il progetto nel suo complesso prevede la realizzazione di una galleria prevalentemente a doppia canna di 27 km a binario, dei quali 5.3km circa per fornice verranno eseguiti mediante scavo meccanizzato mentre il restante verrà scavato in tradizionale.

Il tracciato attraversa un insieme eterogeneo di unità geologico strutturali: si tratta infatti dell'area di contatto tra le estremità della catena alpina ad ovest e della catena appenninica settentrionale verso est. Tale zona, nota con il nome di Sestri-Voltaggio, è delimitata ad ovest dal Gruppo di Voltri e a est dalle unità liguri s.l. Queste macro unità tettoniche sono, infine, delimitate a nord dalle successioni sedimentarie del Bacino Terziario Ligure-Piemontese e dai depositi della Pianura Padana, anch'essi interessati dalla linea in progetto.

L'assetto strutturale si presenta articolato e complesso in quanto le tre grandi unità geologico-strutturali (Gruppo di Voltri, Zona Sestri-Voltaggio, Unità Liguri s.l.) oltre a presentare una marcata deformazione a carattere duttile sono organizzate in un sistema a falde tramite elementi strutturali a carattere regionale (come la linea Sestri-Voltaggio). A questo quadro strutturale già articolato si aggiunge la presenza di una estesa deformazione a carattere fragile.

Nel dettaglio le formazioni geologiche attraversate dalla Galleria di Valico nella tratta considerata sono elencate di seguito ordinate in base allo sviluppo delle progressive:

- **Metabasalti:** metabasalti da massicci a scistosi, talora con struttura a pillow, e fratturazione generalmente intensa. Si presentano con colorazioni che vanno dal verde scuro al bruno-violaceo nei punti in cui sono maggiormente alterati. Localmente contengono corpi filoniani e sono comunemente interessati, in affioramento, da una fitta maglia di giunti. Si è supposto, in base ai dati a disposizione, che tale formazione potesse essere intercettata durante lo scavo unicamente per brevi tratti nella parte iniziale della Tratta 4.
- **Argilloscisti filladici:** appartenenti alle Formazioni degli “Argilloscisti di Murta” (AGF) e degli “Argilloscisti di Costagiutta” (AGI); queste due formazioni rappresentano, nella nuova cartografia ufficiale, Foglio “Genova” n. 213-230 in scala 1:50.000, la ex Formazione delle

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 8 di 166

“Argilliti a Palombini del Passo della Bocchetta”. ***Dal punto vista geomeccanico le due formazioni sono completamente equivalenti alla ex formazione delle “Argille a Palombini del Passo della Bocchetta”.*** Nel seguito si impiegherà tale denominazione in analogia ai documenti della precedente fase progettuale.

- **Brecce della Costa di Cravara:** brecce eterometriche, da monogeniche a poligeniche, a supporto di clasti organizzate in bancate plurimetriche mal definite. I clasti presentano dimensioni decimetrico-metriche, a scarsa matrice è di colore grigiastro o verdastro. La composizione dei clasti è strettamente connessa alla natura del substrato; nel settore d'interesse dovrebbero essere intercettate a quota galleria unicamente nella zona di contatto tra le Argilliti a Palombini e la Formazione di Molare.
- **Formazione di Molare,** costituita dalle seguenti litofacies:
 - ruditica cementata a clasti calcarei dominanti (FMc): conglomerati poligenici e brecce a supporto di clasti, con clasti da centimetrici a metrici (1-2 m) costituiti da calcari, calcari dolomitizzati e subordinatamente da basalti, serpentiniti e metaofioliti. La scarsa matrice arenacea è di colore grigiastro. Localmente sono presenti livelli arenitici grossolani cementati.
 - ruditica parzialmente cementata (FMp): conglomerati e brecce poligenici con tessitura a supporto di clasti e/o di matrice, in strati e gruppi di strati da decimetrici a plurimetrici con locali livelli arenitici grossolani, nel complesso cementati in modo eterogeneo . I clasti, da centimetrici a metrici (fino a 2-3 m), sono costituiti da metaofioliti ed in subordine da calcari, dolomie e basalti. Localmente contengono megablocchi di metabasiti (di dimensioni fino a 10 m circa).

Lungo il tracciato le coperture variano da un minimo di circa 150 m ad un massimo di circa 500 m, quest'ultimo raggiunto all'interno della Formazione delle Argilliti a Palombini (PK 16+800 circa). All'interno della formazione di Molare la copertura massima risulta invece inferiore a 400m.

Alla data di stesura della presente relazione in tali formazioni risultano parzialmente scavati due cunicoli esplorativi (Val Lemme e Castagnola); l'esecuzione di gallerie sperimentali è stata infatti considerata il mezzo di indagine ottimale per investigare le reali caratteristiche geomeccaniche della formazione argillitica in esame e per valutarne correttamente la risposta allo scavo sotto le elevate coperture presenti.

Analizzando quanto verificatosi in corso d'opera durante lo scavo dei due cunicoli esplorativi è stato possibile operare una suddivisione delle formazioni attraversate in tre differenti gruppi geomeccanici. Le percentuali dei tre gruppi geomeccanici rilevate nel corso dello scavo dei cunicoli Val Lemme e Castagnola sono state le seguenti :

VAL LEMME: Gr.1 (22%) – Gr.2 (49%) – Gr.3 (29%)

CASTAGNOLA: Gr.1 (34%) – Gr.2 (61%) – Gr.3 (5%)

MEDIA DEI CUNICOLI : Gr.1 (28%) – Gr.2 (55%) – Gr.3 (17%)

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 
	<p style="text-align: center;">IG5103ECVCLGN0000001A00</p> <p style="text-align: right;">Foglio 9 di 166</p>

In base a quanto mediamente riscontrato in corso d'opera e alle valutazioni numeriche effettuate sono state definite le sezioni tipo d'avanzamento di seguito elencate.

Sezioni tipo Galleria di Valico a Singolo Binario – Tratta 4:

B0L sb, B0/1 sb, B0V sb, B1 sb, B2/1 sb, B2V sb, B4/1 sb, C2 sb, C4 sb

B0 sb-r, B0V sb-r, B2 sb-r, B2V sb-r, C1 sb-r, C2 sb-r

Sezioni tipo Galleria di Valico “area sicura” – Tratta 4:

B0L, B0, B0V, B1, B2, B2V, B4, C2, C4

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 
	<p>IG5103ECVCLGN0000001A00</p> <p>Foglio 10 di 166</p>

2. NORMATIVE E RACCOMANDAZIONI

Per il calcolo e per le verifiche delle opere strutturali si è fatto riferimento alle seguenti norme:

- Legge 5/11/1971 n. 1086

Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica.

- Legge n° 64 del 2 febbraio 1974

Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche.

- Circolare Ministero Lavori Pubblici n. 11951 del 14/2/1974

Legge 5 novembre 1971, n. 1086. Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica. Istruzioni per l'applicazione.

- Circolare Ministero Lavori Pubblici n. 20049 del 9/1/1980

Legge 5 novembre 1971 n. 1086 - Istruzioni relative ai controlli sul conglomerato cementizio adoperato per le strutture in cemento armato.

- Istruzioni C.N.R. 10012-81

Azioni sulle costruzioni.

- Decreto Ministero Lavori Pubblici 11/3/1988

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 e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione.

- Circolare Ministero Lavori Pubblici n. 30483 del 24/9/1988

Legge 2 febbraio 1974 art. 1-D.M. 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 e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione. Istruzioni per l'applicazione.

- Nota Ministero Lavori Pubblici n. 183 del 13/4/1989

D.M. 11.3.88. Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, la progettazione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione.

- Decreto Ministero Lavori Pubblici 14/02/1992

Norme tecniche per l'esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche.

- Circolare Ministero Lavori Pubblici 24/06/1993 n. 406/STC

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 	
	<p>IG5103ECVCLGN0000001A00</p>	<p>Foglio 11 di 166</p>

Istruzioni per l'applicazione delle Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche di cui al D. M. 14/02/1992.

- Decreto Ministero Lavori Pubblici 9/01/1996

Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche.

- Decreto Ministero Lavori Pubblici 16/01/1996

Norme tecniche relative ai "Criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi".

- Decreto Ministero Lavori Pubblici 16/01/1996

Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche

- Circolare Ministero Lavori Pubblici 15/10/1996 n. 252

Istruzioni per l'applicazione delle Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche di cui al D. M. 9/01/96.

- Circolare Ministero Lavori Pubblici 4/07/1996 n. 156AA.GG/STC

Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche relative ai criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi" di cui al decreto ministeriale 16 gennaio 1996.

- Circolare Ministero Lavori Pubblici 10/04/1997 n. 65/AA./GG.

Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche" di cui al D. M. 16/01/96.

- Decreto Ministero Lavori Pubblici 5/08/1999

Modificazioni al decreto ministeriale 9 gennaio 1996 contenente norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche.

- D.P.R. 6 Giugno 2001, n°380

Testo unico delle disposizioni legislative e regolamenti in materia edilizia

<p>GENERAL CONTRACTOR</p>  <p>CODIV Consorzio Collegamenti Integrati Veloci</p>	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	
	<p>IG5103ECVCLGN0000001A00</p>	<p>Foglio 12 di 166</p>

RACCOMANDAZIONI

- Eurocodice 1 UNI-EN-1991

Criteri generali di progettazione strutturale

- Eurocodice 2 UNI-EN-1992

Progettazione delle strutture in calcestruzzo

- Eurocodice 3 UNI-EN-1993

Progettazione delle strutture in acciaio

- Eurocodice 4 UNI-EN-1994

Progettazione delle strutture composte acciaio-calcestruzzo

- Eurocodice 7 UNI-EN-1997

Progettazione Geotecnica

- Eurocodice 8 UNI-EN-1998

Progettazione delle strutture per la resistenza sismica

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 13 di 166

3. MATERIALI IMPIEGATI

3.1. Gallerie naturali

Consolidamenti e rivestimenti provvisori

Spritz beton fibrorinforzato	<ul style="list-style-type: none"> - Resistenza media su carote $h/\phi = 1$ a 48 ore ≥ 13 MPa, a 28 gg $\geq 25/30^*$ MPa - dosaggio per fibre in acciaio ≥ 30 kg/m³ * 30MPa per sezioni tipo C2 sb - C4sb – C2r sb C1sb-r – C2 e C4
Acciaio per centine, piastre e collegamenti:	S275
Acciaio per catene	S275
Acciaio per armatura e rete elettrosaldata:	B450 C
Acciaio bulloni ad ancoraggio continuo	B450 C
Drenaggi	Tubi microfessurati in PVC <ul style="list-style-type: none"> - $\phi_{est} > 60$ mm, sp. 5 mm - Resistenza alla trazione 4.5 MPa, perforo 80 mm rivestiti con TNT - I primi 10m da boccaforo devono essere ciechi
Impermeabilizzazione in PVC	<ul style="list-style-type: none"> - teli sp. 2 ± 0.5 mm, - Resistenza a trazione ≥ 15 MPa - Allungamento a rottura $\geq 250\%$ - Resistenza alla lacerazione ≥ 100N/mm - Resistenza alla giunzione ≥ 10.5 MPa - Stabilità al calore = 70°C - Flessibilità a freddo = -30°C - Resistenza alle soluzioni acide alcaline = $\pm 20\%$ max allungamento - Comportamento al fuoco B2 - Resistenza alla pressione dell'acqua a 1 MPa per 10 ore : impermeabile

Tubi in VTR (caratteristiche del composito)	<ul style="list-style-type: none"> - Diametro esterno = 60 mm ad aderenza migliorata - Diametro di perforazione = 100-120 mm - Spessore medio = 10 mm - Densità ≥ 1.8 t/mc - Res. a trazione ≥ 600 MPa - Res. a taglio ≥ 100 MPa - Modulo elastico ≥ 30000 MPa - Contenuto in vetro ≥ 50 % - Resistenza a flessione ≥ 600 MPa - Resistenza allo scoppio ≥ 8 MPa - Perforazione eseguita a secco
Miscele cementizie per cementazione a bassa pressione	<p>Cemento 42.5R</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rapporto a/c = 0.5-0.7 - Fluidificante = 4 % di peso sul cemento - Resistenza a compressione a 48 ore > 5 MPa
Iniezioni di guaina	<p>Cemento R32.5 – R42.5</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rapporto a/c $\approx 1.5-2$ - Bentonite $\approx 5-8$ % sul peso di cemento - Densità ≈ 1.3 t/m³ - Rendimento volumetrico ≥ 95 % - Viscosità Marsh (ugello 4.7 mm) 30-35 sec.
Iniezione di consolidamento	<p>Cemento R42.5</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cemento a finezza di macinazione non inferiore a 4500 cm/g Blaine - Rapporto a/c $\approx 0.4-0.7$ - Bentonite < 2 % - Additivo fluidificante (Flowcable o simili) ≈ 4 % di peso del cemento - Viscosità Marsh (ugello 4.7 mm) 35-45 sec. - Densità ≈ 1.8 t/m³ - Rendimento volumetrico > 95 %

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 15 di 166

Parametri minimi del terreno consolidato	<ul style="list-style-type: none"> - Resistenza a compressione 48h > 1.0 MPa - Resistenza a compressione 7gg > 1.5 MPa - R.Q.D. 48h > 50% - R.Q.D. 7gg > 70%
--	--

Rivestimenti definitivi

Acciaio per armatura:	B450 C
Calcestruzzo strutturale calotta e piedritti	C25/30, Tipo CEM III-V, XC2, S4
Calcestruzzo strutturale arco rovescio	C25/30, Tipo CEM III-V, XC2, S3
Magrone di pulizia di sottofondo	Rm ≥ 15 MPa, Tipo CEM I-V

Per le sezioni non armate la classe di esposizione del calcestruzzo è X0.

Valori di verifica

Le verifiche strutturali sono condotte mediante il metodo delle tensioni ammissibili; nel seguito si indicano i valori di resistenza di progetto per i vari materiali.

Acciaio S275	$\sigma_{amm} = 190 \text{ MPa}$
Acciaio tubi S355	$\sigma_{amm} = 240 \text{ MPa}$
Acciaio B450 C	$\sigma_{amm} = 160 \text{ MPa (*)}$
Calcestruzzo proiettato $f_{cm} \geq 25 \text{ Mpa}$	$\sigma_{amm} = 25/1.3 = 19.2 \text{ MPa(**)}$
Calcestruzzo proiettato $f_{cm} \geq 30 \text{ Mpa}$	$\sigma_{amm} = 30/1.3 = 23.1 \text{ MPa(**)}$
Calcestruzzo strutturale armato Rck 30 Mpa	$\sigma_{amm} = 9.75 \text{ Mpa}$ $\tau_{c0} = 0.60 \text{ Mpa}$ $\tau_{c1} = 1.80 \text{ Mpa}$
Calcestruzzo strutturale non armato Rck 30 Mpa	$\sigma_{amm} = 7.5 \text{ Mpa}$ $\tau_{c0} = 0.60 \text{ Mpa}$

(*) In condizioni sismiche o in condizioni di esercizio con verifica a fessurazione $\sigma_{amm} = 255 \text{ Mpa}$

(**) Le verifiche tengono conto delle diverse fasi di maturazione dello spritz beton

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315"> <tr> <td>Foglio 16 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 16 di 166
Foglio 16 di 166		

4. DESCRIZIONE DEI METODI DI CALCOLO UTILIZZATI

I metodi di calcolo utilizzati per la verifica delle sezioni tipo delle gallerie naturali sono i seguenti:

- 1) Metodo delle curve caratteristiche;
- 2) Metodi numerici agli elementi finiti;
- 3) Analisi di stabilità del fronte (metodi numerici in forma chiusa)

Nei paragrafi successivi della presente relazione verranno spiegate le ipotesi principali su cui si basano i metodi sopra elencati.

I software di calcolo utilizzati per la progettazione della galleria oggetto della presente relazione sono i seguenti:

- **GV4-rev1/2003**: “Metodo convergenza-confinamento e similari” – Sial.Tec-Engineering-Bergamo
- **FLAC 7.0**: Programma ad elementi finiti – *Itasca Consulting*.

4.1. Metodo delle curve caratteristiche

4.1.1. Aspetti generali

Le curve caratteristiche consistono nel simulare lo scavo di una galleria nell'ipotesi di simmetria assiale e di stato di deformazione piana.

Per curve caratteristiche di una cavità si intendono delle curve che legano le pressioni di contenimento, esercitate in senso radiale sul bordo della galleria dalle opere di stabilizzazione e di rivestimento, agli spostamenti radiali al suo contorno (convergenze).

Lo scavo è rappresentato come una graduale riduzione di una pressione fittizia “p” applicata alle pareti della galleria, tramite cui si simula il progressivo deconfinamento della roccia prodotto dall'avvicinarsi del fronte di scavo alla sezione di calcolo e al successivo avanzamento del fronte stesso, cui corrisponde una convergenza radiale “u” crescente in funzione delle caratteristiche dell'ammasso.

Esse possono quindi essere utilizzate, oltre che per valutare il comportamento dell'ammasso allo scavo, anche per determinare lo stato di sollecitazione sui diversi interventi costituenti la galleria, mediante la sovrapposizione degli effetti delle curve caratteristiche della cavità e dei singoli interventi che la costituiscono.

Per ogni galleria è possibile costruire due curve caratteristiche principali:

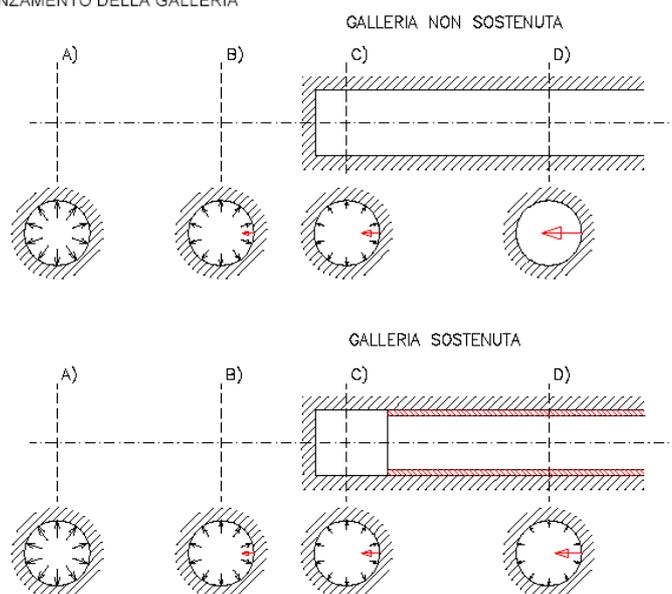
- quella valida presso il fronte di scavo, detta curva caratteristica del fronte, che tiene conto dell'effetto tridimensionale delle tensioni vicino ad esso e che permette di risalire, mediante considerazioni sulla resistenza del nucleo, all'entità della convergenza già subita dalla galleria nella sezione in corrispondenza al fronte di scavo,

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 17 di 166

- quella valida per qualsiasi sezione sufficientemente lontana dal fronte, detta curva caratteristica della cavità, per la quale lo stato di tensione può considerarsi piano.

In generale, ove la curva caratteristica non intersechi in un valore finito l'asse delle deformazioni radiali, la galleria risulta instabile senza adeguati interventi di stabilizzazione.

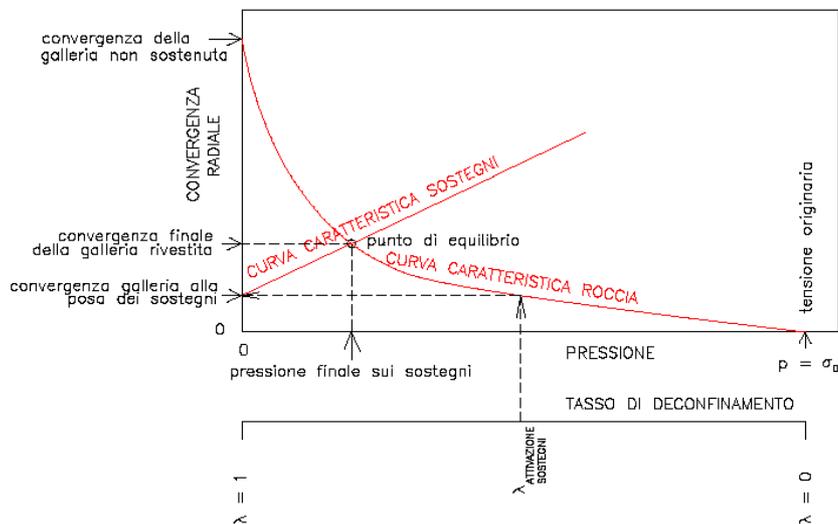
FIGURA 11. PROGRESSIVO DECONFINAMENTO DEL BORDO DI SCAVO PER SIMULARE L'AVANZAMENTO DELLA GALLERIA



Se la galleria è scavata in assenza di sostegni, il valore finale della pressione di confinamento è pari a 0; in caso contrario allo stato finale è presente una pressione di confinamento > 0 che rappresenta la pressione di equilibrio del cavo ottenuta dall'intersezione della curva caratteristica della cavità e dei rivestimenti impiegati. Quest'ultima curva, a sua volta, dipende dalle proprietà dei materiali impiegati e dalle deformazioni subite dall'ammasso prima della posa in opera dei sostegni provvisori e quindi, in ultima analisi, è legata al comportamento del fronte di scavo e al tipo di interventi previsti in avanzamento.

Mediante la sovrapposizione degli effetti delle curve "caratteristiche" della galleria, dei sostegni provvisori e definitivi e del fronte è possibile ridurre il problema tridimensionale in prossimità del fronte di scavo ad un problema bidimensionale; l'intersezione delle varie curve permette di determinare graficamente il comportamento della galleria allo scavo.

FIGURA 12. CURVE CARATTERISTICHE



La **curva caratteristica del rivestimento**, o curva di confinamento, è individuata dalla rigidità della struttura K_{st} e dallo spostamento radiale u_{d0} che si è già generato nell'intorno del cavo prima dell'installazione del supporto, messo in opera a distanza d_0 dal fronte di avanzamento della galleria.

Il valore della convergenza alla distanza di posa in opera del rivestimento, u_{d0} , viene determinato simulando l'effetto di deconfinamento dovuto allo scavo e all'allontanamento del fronte per mezzo di una pressione fittizia applicata alla parete della galleria. Tale pressione, inizialmente pari allo stato di sforzo originario, viene ridotta fino ad un valore P^* definito da un tasso di rilascio λ :

$$P^* = (1 - \lambda) \cdot \sigma_0$$

In tutti i casi è necessario valutare lo spostamento al fronte "uf" per risalire allo spostamento radiale alla distanza d_0 .

Tracciando la **curva caratteristica del fronte**, non solo si ricava il valore "uf", tenendo conto del tipo di preconsolidamento eventualmente effettuato in avanzamento dal fronte stesso, ma è anche possibile individuare a priori il comportamento della galleria, distinguendo tra fronte stabile (A), stabile a breve termine (B) ed instabile (C), secondo la classificazione A.De.Co.Rs già presentata nei paragrafi precedenti.

Noto lo spostamento al fronte e determinato l'andamento della curva di convergenza longitudinale della galleria tramite la funzione che fornisce il tasso di deconfinamento λ , si calcola il valore della convergenza radiale già subita dal cavo, prima della posa in opera del rivestimento; la curva di confinamento risulta a questo punto completamente definita.

La condizione di equilibrio, individuata dallo spostamento radiale u_{re} o dalla pressione radiale $P = P_e$, è determinata dall'intersezione della curva caratteristica del terreno e di quella del rivestimento. Tale

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 19 di 166

condizione risulta verificata se la pressione di equilibrio è inferiore alla resistenza massima propria del rivestimento.

In virtù dei sistemi di avanzamento proposti, volti a conservare le caratteristiche meccaniche del terreno indisturbato, limitando al minimo il rimaneggiamento e l'alterazione dello stesso conseguente alle operazioni di scavo, diviene estremamente importante sapere quanto il terreno è effettivamente in grado di incassare nelle sue condizioni naturali e indisturbate, prima di giungere alla rottura. La conoscenza delle caratteristiche di resistenza al taglio del terreno nelle sue condizioni naturali è indispensabile per determinare con discreta accuratezza il contributo al contenimento del cavo che i vari interventi adottati saranno in grado di fornire.

Il discorso così impostato sulla sensibilità del terreno dovrà essere poi allargato per mettere in conto anche l'eterogeneità strutturale dell'ammasso, che in rapporto alle coperture in gioco, è determinante nella parametrizzazione geotecnica dell'ammasso. Non essendo realmente praticabile l'ipotesi di una perfetta conoscenza delle condizioni del terreno ad ogni avanzamento sarà necessario individuare, anche facendo ipotesi di lavoro sulla base di esperienze maturate in casi analoghi, condizioni geotecniche standard in base alle quali svolgere i calcoli.

Si precisa inoltre che i calcoli svolti fanno riferimento a condizioni puramente statiche, considerando il consolidamento del fronte come un irrigidimento del nucleo e non come uno strumento di stabilizzazione del paramento, che pertanto rimane pur sempre una fonte di pericolo da tenere costantemente sotto controllo, evitando che le maestranze permangano entro il suo raggio di azione in particolare durante le operazioni di scavo.

Infatti quando il fronte è assoggettato all'opera di demolizione mediante utensili quali la sega dentata del pretaglio, il ripper, ecc. si vanno a modificare le condizioni iniziali, che quindi in tale contesto perdono la loro validità anche a prescindere dalla stabilità dimostrata dal fronte prima della sua demolizione.

4.1.2. Consolidamento del fronte di scavo

Nel caso di presenza di trattamenti di rinforzo del fronte (VTR, Jet-grouting ecc.) posti in opera in avanzamento, il loro effetto stabilizzante può utilmente essere tenuto in conto incrementando la resistenza coesiva dell'ammasso.

Infatti la chiodatura esercita un'azione di contenimento passivo del fronte, rappresentabile, nel caso di impiego di elementi strutturali in VTR, da una tensione di confinamento σ_3^{VTR} fittizia, funzione dei parametri tecnici del trattamento secondo le equazioni:

$$\sigma_3^{VTR}{}_A = \frac{\tau_A \cdot L_A \cdot 2p_A}{A_i}$$

$$\sigma_3^{VTR}{}_B = \frac{\sigma_T \cdot A_T}{A_i}$$

$$\sigma_3^{VTR} = \text{minimo} (\sigma_3^{VTR}{}_A, \sigma_3^{VTR}{}_B)$$

dove:

τ_a = tensione di aderenza ammasso-fondazione

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1546 318"> <tr> <td>Foglio 20 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 20 di 166
Foglio 20 di 166		

L_A = semi-lunghezza dell'elemento di rinforzo (si assume che mezzo elemento costituisca la fondazione)

$2p_A$ = perimetro della sezione reagente a sfilamento

σ_t = resistenza a trazione dell'elemento di rinforzo

A_i = area di influenza di un elemento strutturale

A_t = sezione dell'elemento resistente a trazione

L'effetto di σ_3^{VTR} può essere considerato come incremento di coesione dell'ammasso:

$$\Delta\sigma_C^{\text{Fronte}} = \frac{\sigma_3^{VTR}}{2} * \sqrt{K_p}$$

Se il fronte di scavo è rinforzato con trattamenti colonnari in jet-grouting, allora i parametri di coesione sono migliorati specificando un incremento della coesione di picco pari alla differenza tra la coesione dell'ammasso non trattato e quella dell'ammasso trattato; quest'ultima è valutata come media pesata della coesione originaria del terreno e di quella del trattamento:

$$\Delta c = c_{\text{ammasso trattato}} - c_{\text{ammasso}} = \frac{c_{\text{jet}} \cdot A_{\text{jet}} + c_{\text{ammasso}} \cdot A_{\text{ammasso}}}{A_{\text{tot}}} - c_{\text{ammasso}}$$

dove:

c_{jet} = coesione dei trattamenti colonnari in jet grouting

c_{ammasso} = coesione dell'ammasso senza trattamenti

A_{jet} , A_{ammasso} , A_{tot} = sono le aree, rispettivamente, dei trattamenti colonnari, della sezione di scavo al netto dei trattamenti e della sezione di scavo.

4.1.3. Consolidamento al contorno (metodo "transfer-matrix")

In particolare, per tenere in conto sia la caduta di resistenza graduale della roccia sia la presenza dei consolidamenti al contorno previsti per i materiali più scadenti, le analisi di terapia sono state effettuate con una tecnica di soluzione semi-analitica chiamata metodo "transfer-matrix", implementato nel programma GV4.

Questa procedura si basa sull'osservazione che in generale, per piccoli incrementi di tensione e deformazione, le equazioni costitutive in stato di deformazione piana in un generico punto della roccia possono essere linearizzate esprimendole in forma incrementale:

$$\Delta\sigma_r = D_{11}^{ep} \Delta\varepsilon_r + D_{12}^{ep} \Delta\varepsilon_\theta$$

$$\Delta\sigma_\theta = D_{21}^{ep} \Delta\varepsilon_r + D_{22}^{ep} \Delta\varepsilon_\theta$$

dove $\Delta\sigma_r$, $\Delta\sigma_\theta$, $\Delta\varepsilon_r$ e $\Delta\varepsilon_\theta$ rappresentano le variazioni di tensione e le corrispettive variazioni di deformazione, mentre i coefficienti D_{ij}^{ep} rappresentano gli elementi della matrice di rigidità elastoplastica D^{ep} che può variare da punto a punto della roccia essendo funzione della storia tensio-deformativa.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315"> <tr> <td>Foglio 21 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 21 di 166
Foglio 21 di 166		

Il programma discretizza la roccia attorno alla galleria in una sequenza di N anelli concentrici di raggio r_i , sufficientemente sottili da poter considerare D^{ep} costante all'interno di ognuno di essi.

In questo modo, in corrispondenza di una variazione Δp della pressione sul bordo dello scavo, sufficientemente piccola da consentire la linearizzazione delle equazioni costitutive incrementali, è possibile scrivere una coppia di equazioni costitutive $\Delta u-r$ e $\Delta \sigma-r$ per ognuno degli N anelli tramite delle costanti di integrazione. Imponendo la continuità dello spostamento e della tensione radiale sul confine comune di ognuna delle coppie adiacenti di anelli, una volta determinate le costanti del primo anello, è possibile ricostruire lo stato tensio-deformativo dell'intera discretizzazione.

Questo metodo permette quindi di definire degli anelli di materiale trattato intorno al cavo definito come un materiale elasto-plastico ideale (privo di caduta di resistenza), ottenendo così una distribuzione di tensioni e spostamenti ed una curva caratteristica della galleria che tengono in conto della disomogeneità radiale del terreno.

4.2. Analisi numeriche bidimensionali: FLAC 7.0

Le analisi tenso-deformative presentate nel seguito, sono state condotte impiegando il codice di calcolo FLAC 7.0 (Fast Lagrangian Analysis of Continua), sviluppato da ITASCA Consulting, il quale consente di affrontare problemi di meccanica del continuo determinando gli stati tensionali e deformativi in un dominio bidimensionale implementando il metodo alle differenze finite. Le caratteristiche del dominio in oggetto sono definite da leggi di comportamento di tipo elastico o plastico e da imposte condizioni al contorno. Tale metodo si basa sulla discretizzazione delle equazioni differenziali che governano il problema fisico in esame tramite la sostituzione delle derivate con quozienti di differenze finite. Le equazioni differenziali vengono così trasformate in equazioni algebriche da risolversi in successivi passi di calcolo. L'algoritmo di calcolo segue uno schema lagrangiano denominato "esplicito per integrazione diretta nel tempo" (explicit time marking), il quale è in grado di lavorare agilmente in presenza di sistemi con grandi deformazioni, con stati di collasso molto avanzati e in condizioni di instabilità (la possibilità di giungere al collasso non è infatti limitata da problemi di stabilità numerica, quale l'invertibilità di matrici). L'adattamento del metodo alle differenze finite a casi di griglia di forma qualunque segue l'approccio di Wilkins M.L..

La discretizzazione viene operata sovrapponendo alla porzione di continuo considerata un reticolo, in genere di maglie quadrilatera, in corrispondenza dei cui nodi (gridpoints) sono definite le grandezze in gioco. E' allora possibile approssimare la derivata prima di una funzione rispetto a una variabile indipendente con il rapporto tra la variazione subita dalla funzione stessa nel passare da un nodo ad uno contiguo e la corrispondente variazione della variabile indipendente.

Con riferimento alla figura seguente, può assumersi ad un certo istante t una delle seguenti equivalenze:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \approx \frac{u_{i+1,j}^t - u_{i,j}^t}{\Delta x},$$

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 22 di 166

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \approx \frac{u_{i+1,j}^t - u_{i-1,j}^t}{2\Delta x},$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \approx \frac{u_{i,j}^t - u_{i-1,j}^t}{\Delta x}.$$

In modo analogo si opera per le derivate rispetto ad y e per le derivate di ordine superiore. La legge costitutiva del materiale viene espressa nella seguente forma:

$$\sigma = E \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \Rightarrow \sigma'_{i,j} = E \cdot \frac{u'_{i-1,j} - u'_{i,j}}{\Delta x}$$

Il codice di calcolo FLAC usa uno schema di soluzione “esplicito condizionatamente stabile”, la cui sequenza di calcolo iterativo, illustrata schematicamente nella figura seguente, comprende i seguenti passi:

- per ogni nodo della griglia si valuta la massa m, la risultante delle forze esterne Fe (gravità, carichi esterni ...), la risultante delle forze interne Fi, calcolata per integrazione degli sforzi nelle zone collegate al nodo stesso, così che è possibile determinare la forza squilibrata agente sul nodo Fu (unbalanced force Fu=Fe-Fi);
- per ogni gridpoint si scrive l'equazione di Newton Fu=m•a , tramite la quale è possibile determinare l'accelerazione del nodo in esame; integrando due volte l'accelerazione si ottiene la velocità e lo spostamento incrementale di ogni nodo;
- dal campo di spostamenti incrementali, è possibile risalire al campo di deformazioni incrementali e quindi, attraverso il legame costitutivo dei materiali, al campo di variazioni degli sforzi nel reticolo;
- la variazione degli sforzi comporta la modifica, per ogni nodo della griglia, della risultante delle forze interne e conseguentemente la necessità di rideterminare la Fu, dando inizio ad un nuovo passo di calcolo. Il processo iterativo ha termine qualora si ottenga una forza squilibrata che abbia un valore minore di una tolleranza prestabilita.

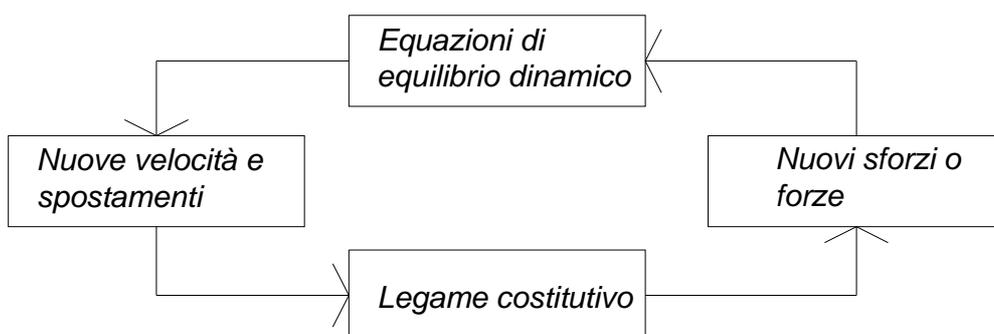


Figura 1– Fasi di computazione del codice di calcolo FLAC

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 	
	<p>IG5103ECVCLGN0000001A00</p>	<p>Foglio 23 di 166</p>

Il codice di calcolo consente di adottare un modello di comportamento del terreno elastoplastico di tipo strain-softening.

Si adottano due criteri di rottura: il criterio di Hoek e Brown e il criterio di Mohr – Coulomb.

Il criterio di Hoek e Brown permette di caratterizzare gli stati tensionali che conducono un ammasso roccioso alla rottura. Esso si basa sulla seguente relazione:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \cdot \left(m_b \cdot \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Dove σ_1 e σ_3 rappresentano rispettivamente la tensione principale maggiore e minore e m_b , s ed a sono costanti relative al materiale che possono essere facilmente correlate al GSI.

Descrivendo lo stato tensionale agente con i parametri σ_1 , σ_2 e σ_3 si può definire lo stato tensionale iniziale come:

$$\sigma_1^t = \sigma_1 + E_1 \cdot \Delta e_1 + E_2 \cdot (\Delta e_2 + \Delta e_3)$$

$$\sigma_2^t = \sigma_2 + E_1 \cdot \Delta e_2 + E_2 \cdot (\Delta e_1 + \Delta e_3)$$

$$\sigma_3^t = \sigma_3 + E_1 \cdot \Delta e_3 + E_2 \cdot (\Delta e_1 + \Delta e_2)$$

I parametri Δe_i sono composti da un contributo elastico e da un contributo plastico:

$$\Delta e_1 = \Delta e_1^e + \Delta e_1^p$$

$$\Delta e_2 = \Delta e_2^e + \Delta e_2^p$$

$$\Delta e_3 = \Delta e_3^e + \Delta e_3^p$$

Lo stato tensionale finale è invece descritto come:

$$\sigma_1^f = \sigma_1 = E_1 \cdot (\Delta e_1 - \Delta e_1^p) + E_2 \cdot (\Delta e_2 + \Delta e_3 - \Delta e_3^p)$$

$$\sigma_2^f = \sigma_2 = E_1 \cdot \Delta e_2 + E_2 \cdot (\Delta e_1 - \Delta e_1^p + \Delta e_3 - \Delta e_3^p)$$

$$\sigma_3^f = \sigma_3 = E_1 \cdot (\Delta e_3 - \Delta e_3^p) + E_2 \cdot (\Delta e_1 + \Delta e_2 - \Delta e_2^p)$$

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 24 di 166

Per ottenere infine:

$$\sigma_1^f = \sigma_1^t = E_1 \cdot \Delta e_1^p - E_2 \cdot \Delta e_3^p$$

$$\sigma_2^f = \sigma_2^t = E_2 \cdot (\Delta e_1^p + \Delta e_3^p)$$

$$\sigma_3^f = \sigma_3^t = E_1 \cdot \Delta e_3^p - E_2 \cdot \Delta e_1^p$$

Nelle formule precedentemente esposte $\Delta e_1, \Delta e_2$ e Δe_3 rappresentano la terna degli incrementi deformativi principali mentre $E_1 = K + 4G/3$ e $E_2 = K - 2G/3$.

Il criterio di rottura di Mohr-Coulomb può essere così descritto: in condizioni di strain-softening, i parametri di resistenza (coesione e angolo d'attrito interno) vengono gradualmente ridotti in funzione della deformazioni plastica sviluppata, secondo una legge di tipo lineare e adottando i parametri di picco e residui individuati nei capitoli successivi.

La funzione di plasticizzazione F definita dal criterio di rottura consente di individuare quelle zone di terreno in cui lo stato tensionale ha superato il limite al di sotto del quale il materiale mantiene un comportamento elastico e che sono quindi soggette a sollecitazioni tali da comportare deformazioni irreversibili nell'ammasso.

Per un generico stato di sforzo, individuato dalle tensioni principali $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, il criterio di rottura di Mohr-Coulomb, è rappresentato dalle seguenti equazioni lineari:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \pm 2 \cdot \left(c' \cdot \cos(\phi') + \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} \cdot \sin(\phi') \right)$$

$$\sigma_2 - \sigma_3 = \pm 2 \cdot \left(c' \cdot \cos(\phi') + \frac{(\sigma_2 + \sigma_3)}{2} \cdot \sin(\phi') \right)$$

$$\sigma_3 - \sigma_1 = \pm 2 \cdot \left(c' \cdot \cos(\phi') + \frac{(\sigma_3 + \sigma_1)}{2} \cdot \sin(\phi') \right)$$

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315"> <tr> <td>Foglio 25 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 25 di 166
Foglio 25 di 166		

Tale criterio è rappresentato, nello spazio delle tensioni principali, da una piramide a base esagonale non regolare avente, come asse, la trisettrice del primo ottante:

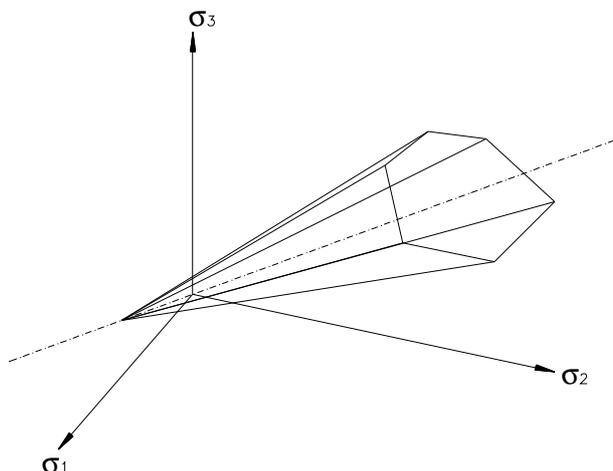


Figura 2 – Dominio di rottura di Mohr-Coulomb

Nel criterio di rottura di Mohr-Coulomb la resistenza al taglio non è influenzata dallo sforzo principale avente intensità intermedia; la resistenza del materiale è variabile in funzione dello stato di sforzo esistente.

4.3. Analisi stabilità del fronte in gallerie superficiali

Metodo di Tamez & Cornejo (1985)

La valutazione della stabilità del fronte di scavo può essere condotta mediante l'impiego di metodi analitici semplificati all'equilibrio limite. In particolare si fa riferimento alle teorie di Tamez e Cornejo che ipotizzano che esistano dei prismi di terreno in distacco secondo sezioni longitudinali, giungendo a definire un coefficiente di sicurezza FSF nei confronti della stabilità del fronte di scavo. Tali metodi consentono inoltre di tenere in conto degli interventi di preconsolidamento assumendo per il terreno trattato caratteristiche meccaniche incrementate rispetto a quelle del terreno naturale.

Si riporta nel seguito una breve sintesi di riepilogo del metodo adottato.

Il metodo dell'equilibrio limite proposto da Tamez tiene conto della riduzione dello stato di confinamento triassiale del nucleo di terreno oltre il fronte per mezzo di un meccanismo di rottura del tipo effetto volta, con il quale il volume di terreno gravante sulla corona della galleria è definito da un paraboloide, approssimato mediante tre solidi prismatici, come illustrato nelle figure seguenti.

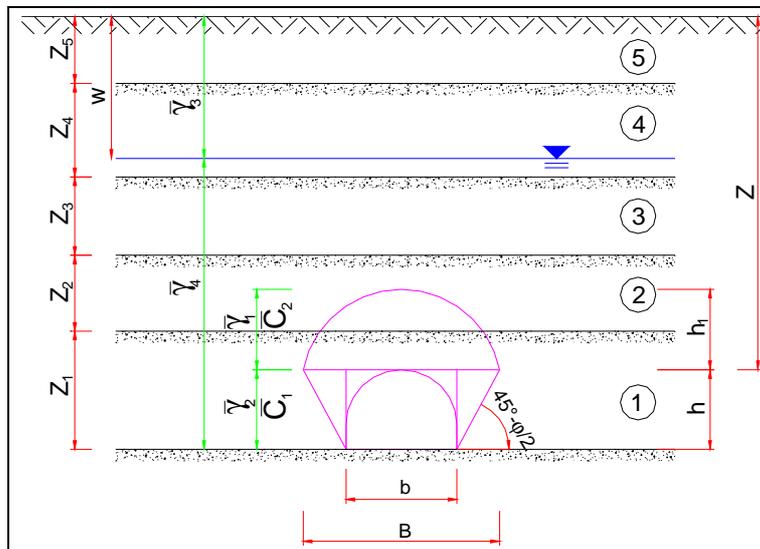


Figura 4-3 – Schema proposto da Tamez.

In questo modo si determinano le massime tensioni tangenziali che si possono sviluppare sulle facce di ogni prisma senza che avvengano scorrimenti (forze resistenti) e le forze di massa di ogni prisma (forze agenti). Il rapporto tra i momenti delle forze resistenti e delle forze agenti fornisce un coefficiente di sicurezza, denominato FSF (face security factor).

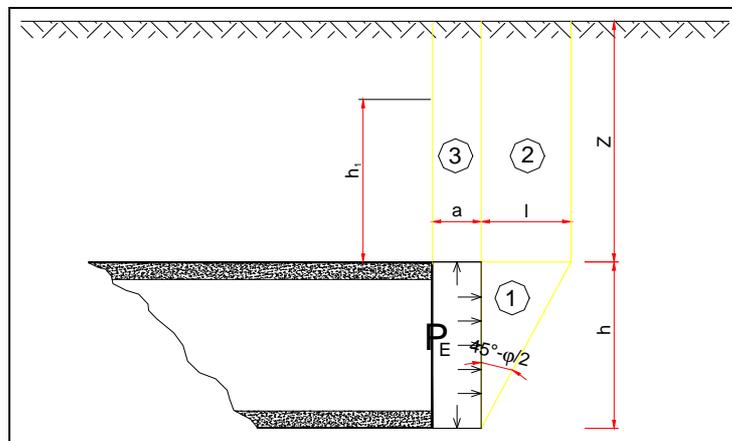


Figura 4-4 – Schema proposto da Tamez.

Anche per le analisi con il metodo dell'equilibrio limite è possibile tener conto di eventuali interventi di preconsolidamento del fronte mediante attraverso un incremento di coesione seguendo un approccio del tutto analogo a quanto illustrato per le linee caratteristiche.

Metodo di Broms e Bennermark (1967)

Un secondo metodo per valutare la stabilità del fronte è basato sulla definizione del rapporto di stabilità definito da Broms e Bennermark (1967) nella seguente maniera:

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE				
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" style="float: right; margin-left: 20px;"> <tr> <td>Foglio</td> <td>27 di</td> </tr> <tr> <td></td> <td>166</td> </tr> </table>	Foglio	27 di		166
Foglio	27 di				
	166				

$$N = \frac{\sigma_s + \gamma z - \sigma_T}{c_u}$$

dove:

- γ = peso dell'unità di volume del terreno
- z = profondità dell'asse della galleria
- σ_s = sovraccarico eventualmente presente in superficie
- σ_T = eventuale pressione di sostegno applicata al fronte
- c_u = resistenza al taglio, in condizioni non drenate, alla profondità della galleria.

Sulla base di prove di estrusione eseguite in laboratorio e d'osservazioni in sito, Broms e Bennermark (1967) hanno concluso che il valore del rapporto di stabilità critico N_c perché si manifesti il collasso è pari a circa 6. A conclusioni simili giunse Peck (1969).

Il rapporto di stabilità definito da Broms e Bennermark può ovviamente essere visto come un coefficiente di sicurezza, ma tenendo tuttavia in conto che un valore del rapporto di stabilità più elevato corrisponde ad un coefficiente di sicurezza più basso e pertanto il margine di sicurezza non è facilmente definibile.

La seguente tabella fornisce una indicazione della relazione fra il numero di stabilità e le deformazioni attese (P.B. Attewell in Geddes, 1978).

N	Deformazioni
< 1	Trascurabili
1 – 2	Elastiche
2 – 4	Elasto-plastiche
4-6	Plastiche
> 6	Collasso

Tabella 1 - Relazione fra il numero di stabilità e le deformazioni attese

Metodo del tasso di deconfinamento critico λ_E (Panet, 1990)

Il metodo convergenza-confinamento proposto da Panet permette di analizzare l'interazione fra l'ammasso roccioso ed il sostegno in funzione dell'avanzamento del fronte di scavo.

La sua applicazione agli ammassi rocciosi a debole resistenza suppone la definizione di un mezzo continuo equivalente al quale attribuire un comportamento elastoplastico rammollente. In questi ammassi, lo scavo di una galleria situata a profondità tali da sviluppare la resistenza massima (gallerie profonde $H > 2D$), provoca elevate convergenze legate alla formazione di una zona decompressa attorno al cavo.

Sotto queste ipotesi, il criterio di Panet consente di verificare le condizioni di stabilità del cavo in funzione del valore critico del tasso di deconfinamento (λ_e) del materiale (valore cui si manifestano

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	IG5103ECVCLGN0000001A00	Foglio 28 di 166

le prime plasticizzazioni). Tale indice, in relazione al criterio di rottura di Mohr-Coulomb, è funzione del coefficiente di spinta passiva K_p e del fattore di stabilità N secondo l'equazione:

$$\lambda_e = \frac{1}{K_p + 1} \left[K_p - 1 + \frac{2}{N} \right]$$

dove $N = \frac{2\sigma_z}{\sigma_c}$

Nel caso di una galleria priva di rivestimento, se $N < 1$, non si raggiunge mai la resistenza massima dell'ammasso roccioso. Raggiunto il limite di rottura ($N > 1$) l'autore suggerisce i seguenti valori limite del tasso di deconfinamento, ai quali corrispondono determinate condizioni di stabilità del fronte:

- se $0,6 < \lambda_e < 1$ il fronte di scavo è stabile; le pressioni raggiungono il valore massimo di resistenza dell'ammasso a tergo del fronte;
- se $0,3 < \lambda_e < 0,6$ il fronte di scavo è stabile a breve termine; al fronte di scavo le pressioni raggiungono il valore di resistenza massima prima in vicinanza del bordo poi verso il nucleo;
- se $\lambda_e < 0,3$ il fronte di scavo instabile; il fronte di scavo è in condizioni di instabilità per cui necessita di interventi preventivi di consolidamento.

5. INQUADRAMENTO GEOLOGICO, IDROGEOLOGICO E GEOTECNICO

L'opera in oggetto rientra nella realizzazione della Linea AV/AC Milano- Genova III Valico ed in particolare della galleria di Valico-tratta 4.

In particolare l'opera in oggetto di analisi consta di due canne e verrà considerata la tratta compresa tra le PK 16+275.5 e PK 20+998.5 con riferimento al binario pari e tra le PK 16+285.53 e PK 20+998.53 sul binario dispari.

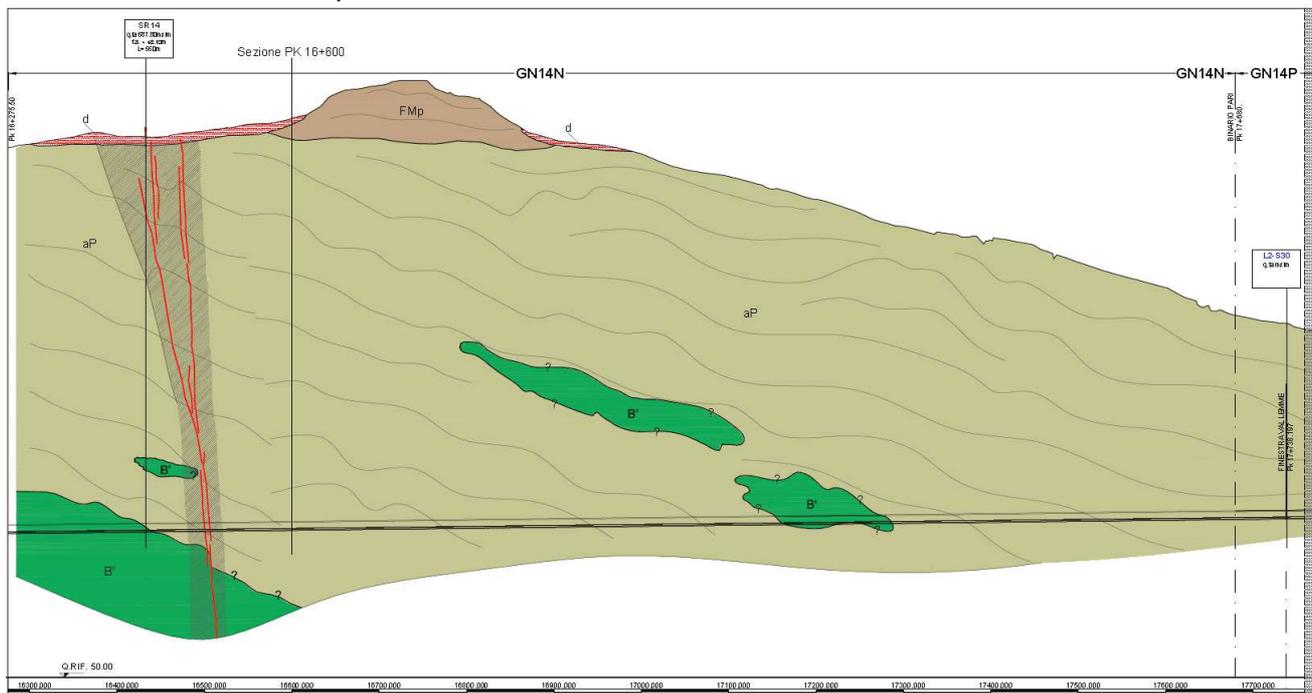


Figura 5 – Profilo longitudinale – binario pari tratto 1

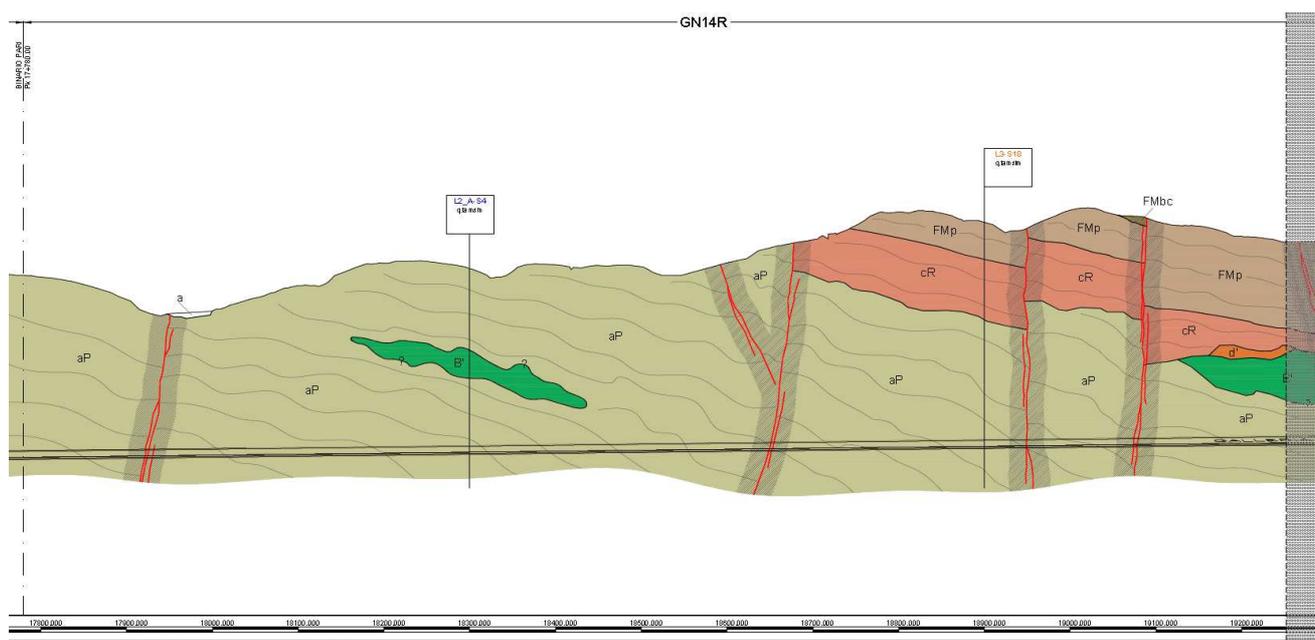


Figura 6 – Profilo longitudinale – binario pari tratto 2

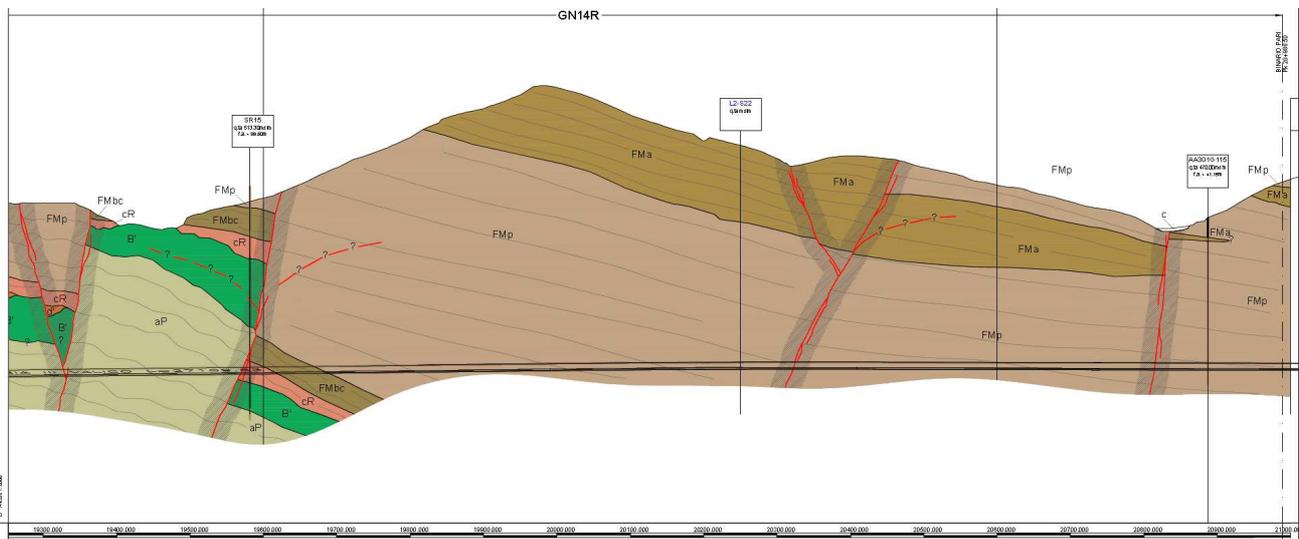
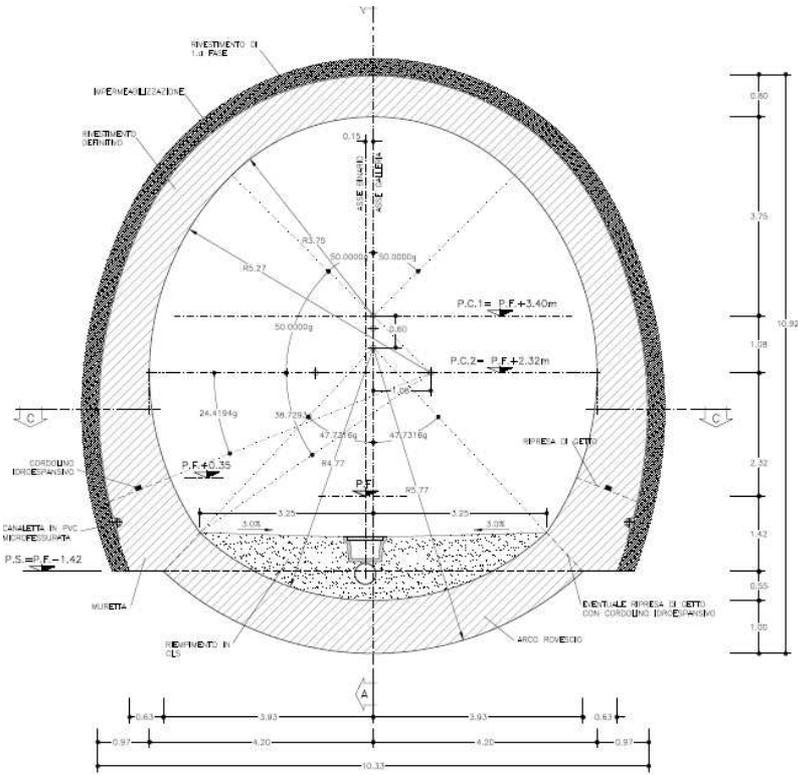
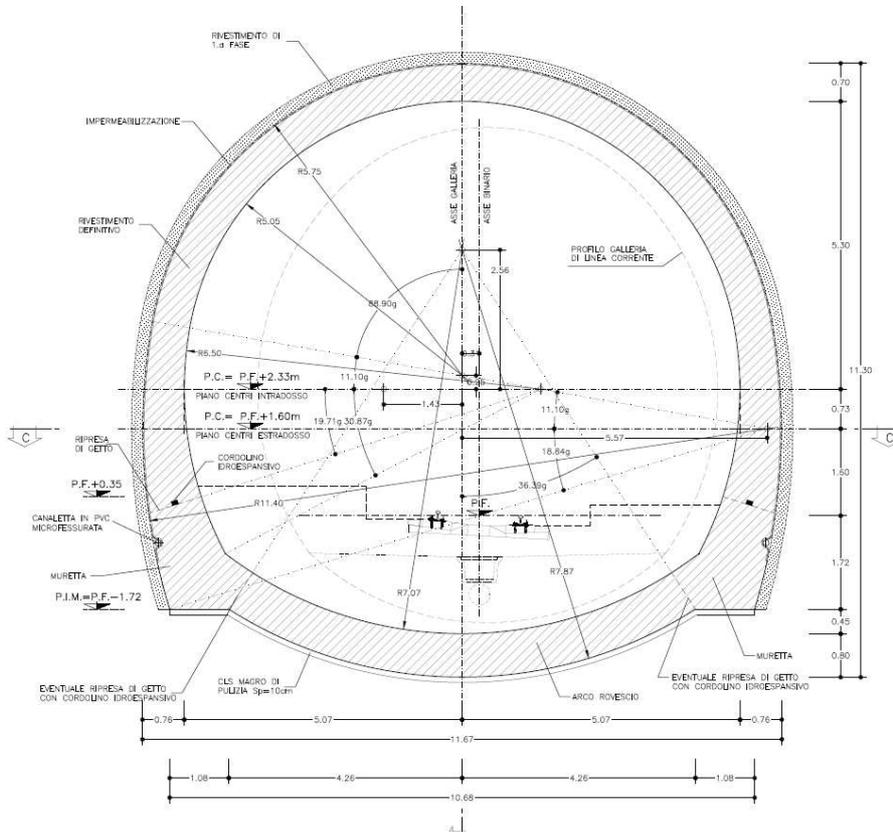


Figura 7 – Profilo longitudinale – binario pari tatto 3

Il tratto di galleria in esame presenta quindi una lunghezza di oltre 4700m per canna, con coperture massime di circa 500m. La sezione corrente adottata, per consentire il traffico ferroviario, è caratterizzata da un raggio interno in chiave calotta di 3.75m e da una larghezza massima misurata in intradosso pari a 8.40m. La sagoma esterna presenta invece geometria variabile in funzione della sezione tipo. Si deve inoltre considerare il tratto in prossimità della Finestra Val Lemme denominata “zona di esodo rapido”, nel quale in affianco alle due canne di linea verrà realizzato un cunicolo, collegato alla canna centrale di “area sicura” (avente sagoma allargata) mediante by-pass pedonali e carrabili.



Sezione corrente

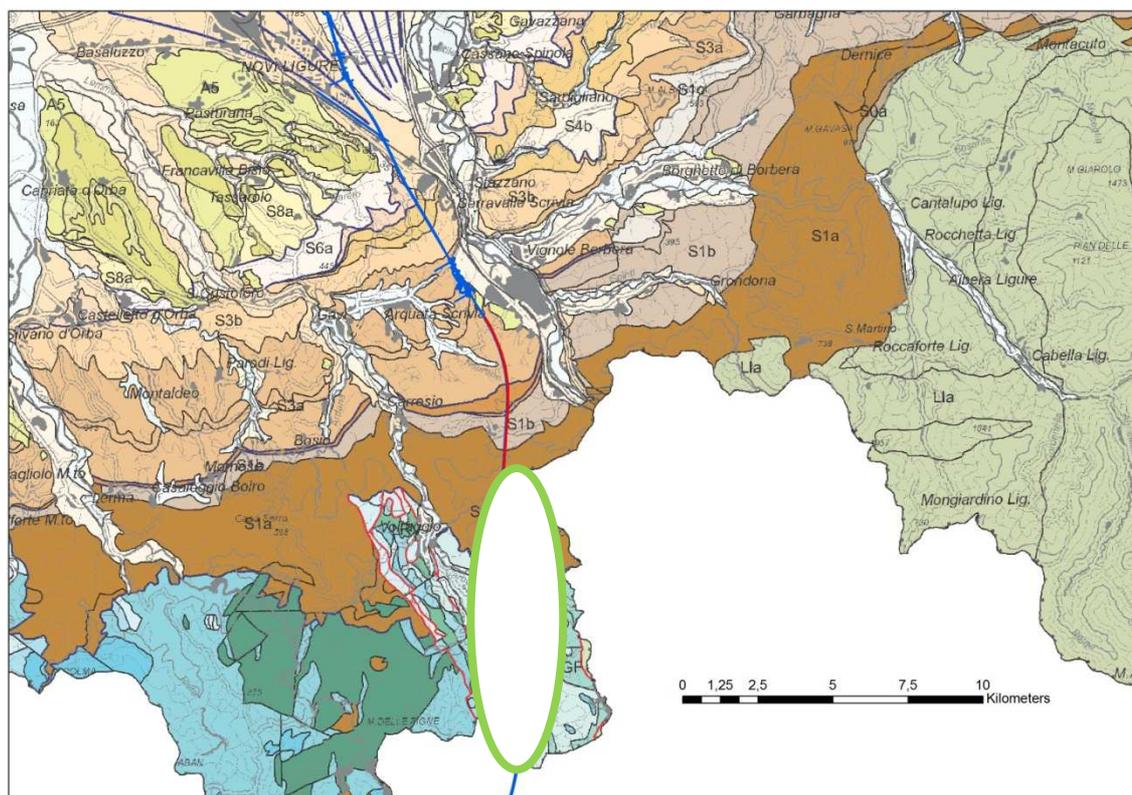


Sezione allargata

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE				
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 224 1532 315"> <tr> <td>Foglio</td> <td>32 di</td> </tr> <tr> <td></td> <td>166</td> </tr> </table>	Foglio	32 di		166
Foglio	32 di				
	166				

5.1. Inquadramento geologico-geomorfologico

La Galleria di Valico nella tratta in esame (“Tratta 4”) ricade nelle unità metamorfiche del “Gruppo di Voltri” *auct.* (Unità tettonometamorfica Figogna, cfr. Foglio 213-230 “Genova” della Carta Geologica d’Italia) e all’interno delle unità sedimentarie del Bacino Terziario Piemontese (Brecce della Costa di Cravara, cR e Formazione di Molare, FMP).



LEGENDA

Depositi alluvionali

A1/A6 depositi fluviali del bacino alessandrino (Pleistocene medio – Attuale)

Bacino Terziario Piemontese

S8a Successioni marnoso-siltose zancleane; S6a Successioni terrigene messiniane; S4c Evaporiti e successioni euxiniche messiniane; S4b Corpi arenaceo-conglomeratici tortoniano-messiniani; S4a Successioni marnose tortoniano-messiniane; S3b Successioni arenaceo-pelitiche ed arenacee serravalliano-tortoniane; S3a Successioni arenaceo-pelitiche e marnose burdigaliano-langhiane; S2a Successioni prevalentemente carbonatiche burdigaliane; S1d Depositi silicei aquitaniano-burdigaliani; S1b Successioni marnose rupeliano-aquitaniense; S1c Corpi lenticolari arenaceo-conglomeratici rupeliano-aquitaniense; S1a Successioni arenacee e arenaceo-pelitiche rupeliane.

Dominio Ligure-Piemontese (unità non metamorfiche) - Flysch ad Helminthoides dell’Appennino

L1a Formazione del M. Antola, Formazione di Bruggi-Selvapiana, Argilliti di Pagliaro (Campaniano-Maastrichtiano p.p.); L1c Flysch di Monte Cassio (Cretacico sup.-Eocene inf.?).

Zona a scaglie tettoniche – Zona Sestri-Voltaggio

Unità Figogna: AGI Argilloscisti di Costagiutta (Cretacico inf.); AGF Argilloscisti di Murta (Cretacico inf.).

Unità Cravasco-Voltaggio: CVOo metabasalti e metagabbri (Giurassico medio? – sup.?).

Figura 8. Estratto della nuova Carta Geologica del Piemonte in scala 1:250.000 (Piana et al., in prep.) con l’ubicazione del tracciato della linea AV/AC (in blu) e delle tratte oggetto del presente rapporto.

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315"> <tr> <td>Foglio 33 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 33 di 166
Foglio 33 di 166		

5.1.1. Unità metamorfiche della “zona Sestri-Voltaggio” l.s.

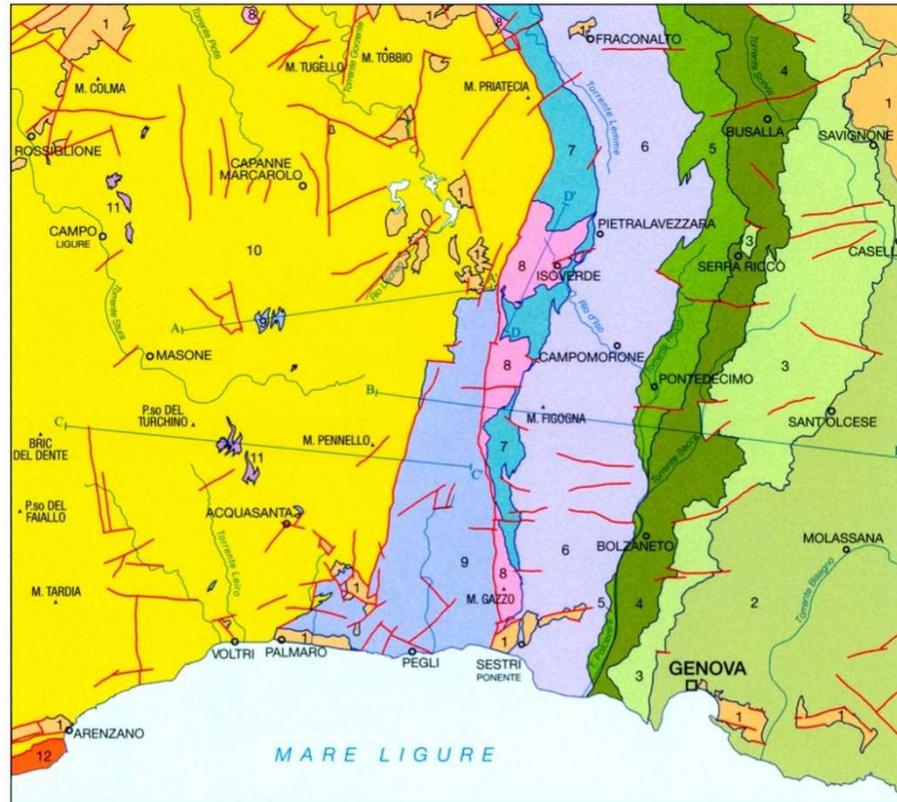
L'area di studio si colloca nella zona di giustapposizione tra i domini orogenici alpino e appenninico nota in letteratura come “nodo collisionale ligure” (Laubscher at. al., 1992); questo settore ad elevata complessità strutturale è stato recentemente oggetto di una revisione cartografica con la realizzazione del foglio CARG n° 213-230 “Genova” alla scala 1:50.000 (Capponi et al., 2009).

Nell'area del Foglio Genova è possibile distinguere, da W verso E, tre settori caratterizzati dall'associazione di unità di crosta oceanica e di mantello, unità di margine continentale e unità costituite da flysch (Figura 9):

- le **unità tettonometamorfiche Voltri e Palmaro-Caffarella** (“Gruppo di Voltri” *auct.*): sono costituite dalle associazioni pre-cenomaniane di ofioliti e metasedimenti carbonatici del dominio oceanico ligure-piemontese. I litotipi dell'Unità Voltri hanno registrato un picco metamorfico eclogitico mentre la riequilibratura metamorfica delle rocce dell'Unità Palmaro-Caffarella è limitata alla facies scisti-blu (Federico et al. 2004). La distinzione sicura tra i litotipi delle due unità è in genere possibile solo a scala microscopica, in base ai caratteri mineralogico-petrografici.
- la **Zona Sestri-Voltaggio** *auct.* (ZSV): è costituita da tre unità tettonometamorfiche, di cui due ofiolitiche (Cravasco-Voltaggio e Figogna) e una di margine continentale (Gazzo-Isoverde). Il livello del metamorfismo è progressivamente decrescente passando dalle unità Cravasco-Voltaggio e Gazzo-Isoverde (facies scisti blu) all'Unità Figogna (facies pumpellyite-actinolite).
- Il **dominio dei Flysch Appenninici**: è rappresentato dalle quattro unità tettoniche Mignanego, Montanesi, Ronco e Antola, sovrapposte con vergenza europea. Procedendo verso est, il grado metamorfico decresce da basso a bassissimo nelle prime tre unità fino ad arrivare a condizioni di diagenesi per l'Unità Antola.

A est, la Zona Sestri-Voltaggio è in contatto con le unità tettoniche di basso grado che compongono il dominio dei Flysch Appenninici. A ovest, essa è invece in contatto con le unità tettonometamorfiche Voltri e Palmaro-Caffarella, lungo una discontinuità regionale con direzione N-S, nota in bibliografia come *Linea Sestri-Voltaggio*; questo lineamento strutturale è classicamente ritenuto il limite fisico tra la catena alpina e quella appenninica, anche se le interpretazioni sulla sua natura sono spesso state tra loro discordanti: faglia trascorrente (Elter & Pertusati, 1973), sovrascorrimento (Cortesogno & Haccard, 1984) o faglia estensionale (Hoogerduijn Strating, 1994). Attualmente la ZSV è ritenuta un canale di concentrazione preferenziale della deformazione tettonica che, lungo di essa, si è ripetutamente scaricata in momenti diversi della storia evolutiva della catena e in regimi tettonici corrispondenti a livelli strutturali differenti (Capponi et al. 2009).

SCHEMA TETTONICO



- 1** DEPOSITI TARDO- E POST-OROGENICI
Successione del Bacino Terzario Piemontese, depositi pliocenici e quaternari
- 2** UNITÀ TETTONICA ANTOLA
Unità costituita da flysch, non metamorfica
- 3** UNITÀ TETTONICA RONCO
Unità costituita da flysch, a metamorfismo di anchizona
- 4** UNITÀ TETTONICA MONTANESI
Unità costituita da flysch, a metamorfismo di anchizona
- 5** UNITÀ TETTONICA MIGNANEGO
Unità costituita da flysch, a metamorfismo di anchizona
- 6** UNITÀ TETTONOMETAMORFICA FIGOGNA
Unità di crosta oceanica, a metamorfismo in facies pumpellyite-actinolite
- 7** UNITÀ TETTONOMETAMORFICA CRAVASCO - VOLTAGGIO
Unità di crosta oceanica, a metamorfismo in facies Scisti Blu (albite, clorite, Na-anfibolo, Na-piroseno, lawsonite, pumpellyite, epidoto), con retrocessione moderata
- 8** UNITÀ TETTONOMETAMORFICA GAZZO - ISOVERDE
Unità di margine continentale, a sovrainfronta metamorfica di alta pressione
- 9** UNITÀ TETTONOMETAMORFICA PALMARO - CAFFARELLA
Unità di crosta oceanica, a metamorfismo in facies Scisti Blu (giadete, Na-anfibolo, lawsonite), con retrocessione in facies Scisti Verdi più o meno pervasiva
- 10** UNITÀ TETTONOMETAMORFICA VOLTRI
Unità di crosta oceanica e di mantello, a metamorfismo in facies Scisti Blu con eclogiti e riequilibratura in facies Scisti Verdi spesso pervasiva
- 11** UNITÀ TETTONOMETAMORFICA ANGASSINO - TERMA
Unità di margine continentale, a sovrainfronta metamorfica di alta pressione
- 12** UNITÀ TETTONOMETAMORFICA ARENZANO
Costituita da un Complesso di margine continentale, monometamorfico, a sovrainfronta metamorfica alpina da alta pressione a Scisti Verdi e da un Complesso di margine continentale, polimetamorfico, a metamorfismo pre-alpino in facies Anfibolitica e sovrainfronta metamorfica alpina da alta pressione a Scisti Verdi
- Limite stratigrafico — Contatto tettonico — Faglia A—A' Traccia di sezione geologica

Figura 9. Schema tettonico dell'area interessata dal progetto (tratto dal foglio CARG "Genova").

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 35 di 166

Il tracciato della linea AC/AV Milano-Genova si sviluppa, in territorio ligure, a cavallo delle unità tettonometamorfiche Palmaro-Caffarella e Sestri-Voltaggio. A scala locale, il territorio in cui si colloca il sito di intervento e le zone limitrofe, è ubicato nell'areale di affioramento della ZSV e più precisamente entro la formazione dell'unità tettonometamorfica Figogna.

Le sigle delle unità descritte fanno riferimento alla legenda adottata nel Progetto Definitivo e successive modifiche in fase di Progetto Esecutivo, della linea Milano-Genova (2004); viene inoltre riportato (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) il corrispondente nome e codice adottato nella Cartografia Geologica Nazionale- CARG (Capponi et al. 2009).

<i>definizione PD (2004) e PE (2013)</i>		<i>definizione CARG (2009)</i>	
argille a Palombini del Passo della Bocchetta	aP	argiloscisti di Costagiutta	AGI
		argiloscisti di Murta	AGF
metacalcari di Erzelli	cE	metacalcari di Erzelli	ERZ
metasedimenti silicei della Madonna della Guardia	dM	Metasedimenti silicei della Madonna della Guardia	MHF
metabasalti	B'	metabasalti del Monte Figogna	MBF
Serpentiniti e serpentinoscisti	Se'	serpentiniti di Bric dei Corvi	SPF
metaoficalciti di Pietralavezzara	of'	metaoficalciti di Pietralavezzara	PLV

Tabella 5-1 - Corrispondenza tra la terminologia geologica adottata per l'unità Figogna, nel Foglio 213 Genova (Capponi et al., 2009), e la terminologia adottata nell'ambito del Progetto Definitivo e Progetto Esecutivo (2004).

Per la descrizione di dettaglio delle singole formazioni si rimanda alle relazioni geologiche delle WBS oggetto del presente elaborato.

5.1.2. Unità del Bacino Terziario Piemontese

Con il termine di "Bacino Terziario Ligure-Piemontese" viene indicato il complesso di sedimenti molassici terziari che costituiscono i rilievi collinari del settore sud orientale del Piemonte. Il margine meridionale del BTLP è costituito da una potente successione di rocce sedimentarie terrigene oligomioceniche relativamente poco deformate che riposa in discordanza su unità intensamente tettonizzate (le tre sopracitate macro-unità tettoniche), di pertinenza sia alpina che appenninica, che ne rappresentano il substrato.

Le diverse unità del BTLP sono contraddistinte da formazioni conglomeratiche, arenacee e marnose che hanno mediamente giacitura monoclinale debolmente inclinata con immersione verso Nord / Nord-Ovest. Alcuni settori sono interessati da una tettonica di tipo fragile con faglie subverticali dal rigetto anche pluridecimetico.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315"> <tr> <td>Foglio 36 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 36 di 166
Foglio 36 di 166		

Verso sud le unità del BTP poggiano in discordanza sulle unità metamorfiche del “Gruppo di Voltri” Auct. (unità tettonometamorfiche Figogna e Cravasco-Voltaggio; cfr. Foglio 213-230 “Genova” della Carta Geologica d’Italia), mentre a nord, verso la pianura alessandrina, esse sono sormontate dai depositi post-messiniani (Argille di Lugagnano/Argille Azzurre, Sabbie di Asti l.s. e “Villafranchiano” Auct.) e dai depositi alluvionali pleistocenico-olocenici del bacino di Alessandria, rappresentati in questo settore dai depositi del T. Scrivia (figura seguente).

Il tratto di linea oggetto del presente rapporto attraversa le successioni rupeliano-langhiane del Bacino Terziario Piemontese; in particolare, dal basso verso l’alto stratigrafico si trovano:

- la formazione di Molare,
- la formazione di Rigoroso,
- la formazione di Costa Montada,
- la formazione di Costa Areaa.

La descrizione delle formazioni di seguito riportata è relativa agli studi di dettaglio condotti in fase di Progetto Esecutivo, nelle aree oggetto d’intervento, implementati con informazioni provenienti dal Progetto Definitivo nonché dai dati presenti in letteratura.

Nella descrizione delle formazioni, per l’individuazione di unità gerarchicamente inferiori, è stato utilizzato il termine informale di “litofacies” piuttosto che quello di “membro”, per evitare un’eccessiva proliferazione terminologica. Per la descrizione di dettaglio si rimanda alle relazioni geologiche relative alle WBS afferenti alla tratta in oggetto.

5.2. Condizioni geologiche attese in corrispondenza dell’opera

Si riporta l’inquadramento geologico organizzato per ciascuna WBS facente parte della tratta in esame.

WBS GN14N

Nel tratto della Galleria di Valico compreso tra le PK 16+275,50 e 17+680,00 (WBS GN14N) è previsto l’attraversamento delle Argille a Palombini del Passo della Bocchetta (aP) e dei metabasalti (B’). L’unico sondaggio presente (SR14) interessa l’unità tettonometamorfica di Figogna.

Il tratto compreso tra le **PK16+275,50 e 16+425 ca**, attraversa i metabasalti (B’) dell’unità Figogna.

Il tratto compreso tra **la PK 16+425 e 17+680,00 ca**, attraversa le Argille a Palombini del passo della Bocchetta (aP).

Nel tratto compreso tra le **PK 17+150 e 17+300 ca**. è stata indicata la possibile presenza di un ulteriore intervallo costituito da metabasalti (B’).

Data l’originaria distribuzione disomogenea dei metabasalti all’interno delle Argille a Palombini del passo della Bocchetta (aP) e le ripetute fasi deformative cui essi sono stati soggetti non è possibile,

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00
	Foglio 37 di 166

soltanto dalle osservazioni superficiali, prevedere l'eventuale presenza degli stessi a quota galleria e la loro esatta posizione.

Le evidenze morfologiche di un sistema di faglie ben sviluppato con direzione circa est-ovest sono state verificate e confermate dai nuovi rilievi di terreno che hanno messo in luce l'esistenza di faglie di tipo trascorrente e di sistemi coniugati, sia all'interno delle successioni sedimentarie del Bacino Terziario Piemontese, sia nelle successioni metamorfiche.

In prossimità della **pk 16+500** l'opera intercetta una faglia ad alto angolo immergente verso N-NW come evidenziato dal sondaggio SR14.

Si riscontra la presenza di strutture tettoniche a basso angolo, con rigetto non valutabile. I piani a basso angolo sono maggiormente sviluppati, e presentano una maggiore persistenza laterale, soprattutto quando sviluppati all'interno della successione sedimentaria del Bacino Terziario Piemontese mentre all'interno delle unità metamorfiche la deformazione indotta da queste strutture è dispersa dalla scistosità principale.

Il grado di fratturazione è generalmente medio per le Argille a Palombini (aP) e medio-alto per i metabasalti (B') che hanno un comportamento reologico tipico di materiali più rigidi e che quindi presentano giunti a persistenza più elevata, che comunemente non si propagano all'interno delle Argille a Palombini.

WBS GN14R

Nel tratto della galleria di valico compreso tra le Pk 17+680,00 alla Pk 20+988,50 (WBS GN14R) è previsto l'attraversamento delle Argille a Palombini del Passo della Bocchetta (aP), delle Breccie della Costa di Cravara (cR) e della Formazione di Molare (Fmbc e FMp).

Il tratto compreso tra le **PK17+680,00 e 19+575 ca.**, attraversa le Argille a Palombini del passo della Bocchetta (aP)..

Il tratto compreso tra le **PK 19+575 ca. e 19+625 ca.** attraversa presumibilmente la formazione delle Breccie della Costa di Cravara (cR).

Il tratto compreso tra le **PK 19+625 ca. e 20+988,50 ca.** attraversa presumibilmente la litofacies ruditica poligenica (FMp) della Formazione di Molare caratterizzata da alternanze irregolari di livelli ruditici grossolani e livelli arenitici-microconglomeratici.

Si registra una presenza significativa di strutture disgiuntive (faglie normali, inverse e trascorrenti). Le evidenze morfologiche di un sistema di faglie ben sviluppato con direzione circa est-ovest sono state verificate e confermate dai nuovi rilievi di terreno che hanno messo in luce l'esistenza di faglie di tipo trascorrente e di sistemi coniugati, sia all'interno delle successioni sedimentarie del Bacino Terziario Piemontese, sia nelle successioni metamorfiche.

In prossimità della **pk 19+575** l'opera intercetta una faglia ad angolo medio-alto immergente verso S come evidenziato dal sondaggio SR15.

Si riscontra la presenza di alcune strutture tettoniche a basso angolo, con rigetto non valutabile, sia all'interno della formazione di Molare sia nella formazione di Rigoroso. I piani a basso angolo sono

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00
	Foglio 38 di 166

maggiormente sviluppati, e presentano una maggiore persistenza laterale, soprattutto quando sviluppati all'interno della successione sedimentaria del Bacino Terziario Piemontese mentre all'interno delle unità metamorfiche la deformazione indotta da queste strutture è dispersa dalla scistosità principale.

Le zone di taglio osservate hanno andamento subparallelo alla stratificazione. Il grado di fratturazione della roccia all'interno della zona di taglio è estremamente elevato e qualora una di tali zone dovesse essere intercettata dallo scavo potrebbe causare un notevole decadimento della qualità geotecnica dell'ammasso roccioso.

Il grado di fratturazione è generalmente medio per le Argille a Palombini (aP) e medio-alto per i metabasalti (B') .

WBS GN15P

Nel tratto della galleria di valico compreso tra le PK 16+285,53 e 17+690,03 (WBS GN15P) è previsto l'attraversamento delle Argille a Palombini del Passo della Bocchetta (aP) e dei metabasalti (B'). L'unico sondaggio (SR14) esistente nel settore di interesse, svolto nella fase Preliminare del Progetto, interessa esclusivamente i termini dell'unità tettonometamorfica Figogna.

Il tratto compreso tra le **PK16+285,53 e 16+450 ca**, attraversa i metabasalti (B') dell'unità Figogna. presenza di ematite.

Il tratto compreso tra **la PK 16+450 e 17+690,03 ca**, attraversa le Argille a Palombini del passo della Bocchetta (aP).

Nel tratto compreso tra le **PK 17+175 e 17+275 ca**. è stata indicata la possibile presenza di un ulteriore intervallo costituito da metabasalti (B').

Le evidenze morfologiche di un sistema di faglie ben sviluppato con direzione circa est-ovest sono state verificate e confermate dai nuovi rilievi di terreno che hanno messo in luce l'esistenza di faglie di tipo trascorrente e di sistemi coniugati, sia all'interno delle successioni sedimentarie del Bacino Terziario Piemontese, sia nelle successioni metamorfiche.

In prossimità della **pk 16+525** l'opera intercetta una faglia ad alto angolo immergente verso N-NW come evidenziato dal sondaggio SR14.

Sono state inoltre osservate e caratterizzate strutture a basso angolo. I piani a basso angolo sono maggiormente sviluppati, e presentano una maggiore persistenza laterale, soprattutto quando sviluppati all'interno della successione sedimentaria del Bacino Terziario Piemontese mentre all'interno delle unità metamorfiche la deformazione indotta da queste strutture è dispersa dalla scistosità principale.

Il grado di fratturazione è generalmente medio per le Argille a Palombini (aP) e medio-alto per i metabasalti (B') che hanno un comportamento reologico tipico di materiali più rigidi e che quindi presentano giunti a persistenza più elevata, che comunemente non si propagano all'interno delle Argille a Palombini.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315"> <tr> <td>Foglio 39 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 39 di 166
Foglio 39 di 166		

WBS GN15R

Nel tratto della galleria di valico compreso tra le PK 17+690,03 e 20+998,53 (WBS GN15R) è previsto l'attraversamento delle Argille a Palombini del Passo della Bocchetta (aP), delle Breccie della Costa di Cravara (cR) e della Formazione di Molare (Fmbc e FMp).

Il tratto compreso tra le **PK17+690,03 e 19+575 ca.**, attraversa le Argille a Palombini del passo della Bocchetta (aP).

Il tratto compreso tra le **PK 19+575 ca. e 19+675 ca.** attraversa presumibilmente la formazione delle Breccie della Costa di Cravara (cR).

Il tratto compreso tra le **PK 19+675 ca. e 19+775 ca.** attraversa presumibilmente la litofacies ruditica poligenica (FMp) della Formazione di Molare caratterizzata da alternanze irregolari di livelli ruditici grossolani e livelli arenitici-microconglomeratici.

Si registra una significativa presenza di strutture disgiuntive (faglie normali, inverse e trascorrenti), Le evidenze morfologiche di un sistema di faglie ben sviluppato con direzione circa est-ovest sono state verificate e confermate dai nuovi rilievi di terreno che hanno messo in luce l'esistenza di faglie di tipo trascorrente e di sistemi coniugati, sia all'interno delle successioni sedimentarie del Bacino Terziario Piemontese, sia nelle successioni metamorfiche.

In prossimità della **pk 19+575** l'opera intercetta una faglia ad angolo medio-alto immergente verso S come evidenziato dal sondaggio SR15.

Sono state inoltre osservate e caratterizzate strutture tettoniche a basso angolo. I piani a basso angolo sono maggiormente sviluppati, e presentano una maggiore persistenza laterale, soprattutto quando presenti all'interno della successione sedimentaria del Bacino Terziario Piemontese mentre all'interno delle unità metamorfiche la deformazione indotta da queste strutture è dispersa dalla scistosità principale.

Le zone di taglio osservate hanno andamento subparallelo alla stratificazione ed una potenza minima apparente di 70-80 m. All'interno della zona di taglio le superfici di stratificazione sono completamente obliterate; si osserva una ripetizione di superfici di movimento, principali e associate.

Il grado di fratturazione della roccia all'interno della zona di taglio è estremamente elevato e qualora una di tali zone dovesse essere intercettata dallo scavo potrebbe causare un notevole decadimento della qualità geotecnica dell'ammasso roccioso. Il grado di fratturazione è generalmente medio per le Argille a Palombini (aP) e medio-alto per i metabasalti (B') che hanno un comportamento reologico tipico di materiali più rigidi e che quindi presentano giunti a persistenza più elevata, che comunemente non si propagano all'interno delle Argille a Palombini.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315"> <tr> <td>Foglio 40 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 40 di 166
Foglio 40 di 166		

5.3. Inquadramento idrogeologico

L'area di studio è stata suddivisa su base litologica in diversi complessi idrogeologici a permeabilità differente, distinguendo lungo l'asse delle gallerie settori con comportamento idrogeologico omogeneo. Si possono distinguere due diversi contesti:

1. Ammasso roccioso in normale stato di fratturazione
2. Zone di faglia

Il contesto di tipo 1 è quello largamente dominante; la permeabilità è indotta dalla presenza di un reticolo di fratture poco persistenti lateralmente (metri-decametri), o al più da faglie discrete con zona di tettonizzazione cataclastica di spessore modesto (dell'ordine del metro) e persistenza anch'essa modesta (metri-decametri). Ciò significa che a scala decimetrica o metrica talora si possono avere permeabilità anche piuttosto elevate.

Il contesto di tipo 2 è subordinato e correlato alla presenza di zone di faglia cataclastiche principali di spessore pluri-metrico fino a decametrico, in cui oltre a una densità di fratturazione molto elevata, possono essere presenti anche livelli di brecce tettoniche (materiale pseudo-poroso). In questo contesto la permeabilità è generalmente piuttosto alta.

Si procede alla descrizione di depositi inerenti all'opera oggetto della presente relazione. Per ulteriori approfondimenti si rimanda alla relazione geologica.

Dall'esame delle carote dei sondaggi disponibili emerge che a profondità maggiori di 10-20m generalmente i litotipi che costituiscono le formazioni di molare (FMp, FMbc, Fma, cR) presentano un grado di cementazione molto elevato. Pertanto il tipo di permeabilità dominante è quella per fratturazione, mentre la permeabilità per porosità può essere considerata irrilevante. I test idraulici disponibili sull'intera area di progetto all'interno di questo complesso indicano per l'ammasso roccioso al di fuori delle zone di faglia, conducibilità idrauliche prevalenti variabili tra 1×10^{-7} e 1×10^{-8} m/s. Si riscontrano conducibilità maggiori (indicativamente fino a 1×10^{-6} m/s) o minori (indicativamente fino a 1×10^{-9} m/s). Per questi elementi tettonici, che generalmente costituiscono anche i principali elementi idrogeologici dell'ammasso roccioso, sono state stimate delle conducibilità idrauliche piuttosto ridotte, dell'ordine dei $1 \times 10^{-6}/1 \times 10^{-8}$ m/s.

I litotipi relativi le argille a palombini (aP, dM, d'', f, Mn, Se'') fanno parte di unità metamorfiche ove la permeabilità è sostanzialmente legata al grado di fratturazione dell'ammasso roccioso, a sua volta dipendente dalla reologia del tipo di roccia considerato. I test idraulici disponibili sull'intera area di progetto indicano per l'ammasso roccioso al di fuori delle zone di faglia, conducibilità idrauliche prevalenti variabili tra 1×10^{-7} e 1×10^{-8} m/s, meno frequentemente tendenti 1×10^{-6} m/s. Si riscontrano valori per la conducibilità fino a 1×10^{-10} m/s. Dall'osservazione dei sondaggi si riscontrano una serie di dati che rappresentano la permeabilità dell'ammasso roccioso detensionato nei primi metri al di sotto della superficie (indicativamente da 5 fino a 20 m); tali dati mostrano conducibilità molto più elevate, comprese tra 1×10^{-5} e 1×10^{-7} m/s. Si riscontra nelle zone di faglia una certa dispersione dei valori, anche se si può osservare che la conducibilità nelle faglie è distribuita in un intervallo tra 10^{-6}

<p>GENERAL CONTRACTOR</p>  <p>Consorzio Collegamenti Integrati Veloci</p>	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>
	<p>IG5103ECVCLGN0000001A00</p> <p>Foglio 41 di 166</p>

e 10^{-7} m/s nelle prove eseguite a profondità più basse (fino a 100 m), mentre l'intervallo si sposta tra 10^{-7} e 10^{-9} m/s man mano che la profondità aumenta.

I litotipi del complesso dei basalti (B', B'') presentano un comportamento reologico generalmente più fragile rispetto a quello dei litotipi della maggior parte degli altri complessi. I test idraulici disponibili sull'intera area di progetto indicano per l'ammasso roccioso al di fuori delle zone di faglia, conducibilità idrauliche prevalenti variabili tra 1×10^{-6} e 1×10^{-7} m/s. Localmente si sono riscontrate anche conducibilità minori (fino a 1×10^{-8} m/s), valori che possono essere correlati a un basso stato di fratturazione o a una scarsa apertura delle fratture legata alla elevata copertura topografica. Nelle zone di faglia non sono stati eseguiti test idraulici. Per questi elementi tettonici sono comunque state stimate delle conducibilità idrauliche dell'ordine dei $1 \times 10^{-4}/1 \times 10^{-7}$ m/s.

Sorgenti e sistemi di flusso

Per quanto riguarda le WBS GN 14N e GN 15 P si sono individuate 21 sorgenti di cui 12 non captate, 6 captate e 3 di cui non si conosce l'utilizzo. Si registrano temperature medie tra 6 e 10°C, un valore medio di conducibilità pari a 280 μ S/cm e una portata medio nell'ordine di 0,2 l/s. Relativamente le WBS GN 14 R e GN 15 R si sono individuate 77 sorgenti di cui 34 non captate, 39 captate e 4 di cui non si conosce l'utilizzo. Si registreno temperature medie nell'ordine di 6 e 10°C e una portata media nell'ordine di 1 l/s.

Per maggiori informazioni sulle interferenze in superficie si rimanda alla relazione geologica-idrogeologica relativa alla Tratta in esame.

Afflussi in galleria

La stima degli afflussi in fase di scavo è stata effettuata sulla base di diversi parametri quali la conducibilità idraulica dei vari complessi idrogeologici precedentemente descritti, il carico idraulico, la presenza di zone di faglia e fratturazione, la presenza di zone carsificate o con fenomeni di dissoluzione del carbonato.

E' bene precisare che nella descrizione che segue le portate descritte sono quelle transitorie, ovverosia quelle che si verificano nelle prime ore/giorni dallo scavo. Poiché le portate di una galleria variano in funzione della sezione drenante considerata, ovverosia della tratta considerata, nell'ambito del presente studio si è scelto di riferirsi alle portate drenate su 10m di galleria. I valori delle portate sono stati inoltre stimati assumendo che la galleria drena liberamente, in assenza di rivestimenti impermeabilizzanti o operazioni di riduzione della permeabilità (es. iniezioni di malte cementizie o resine).

Anche per i carichi idraulici è bene precisare che quelli descritti nel seguito sono dei carichi idraulici stimati per le condizioni idrogeologiche imperturbate, ovverosia prima dell'inizio degli scavi. A seguito degli scavi, i carichi tenderanno poi a diminuire in maniera consistente. Se la galleria viene lasciata libera di drenare senza operazioni di riduzione della permeabilità al contorno, i valori di carico idraulico a costruzione terminata e rivestimenti ultimati, potranno indicativamente attestarsi su valori compresi tra lo 0% e il 30% del valore iniziale imperturbato. E' bene precisare che già in

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315"> <tr> <td>Foglio 42 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 42 di 166
Foglio 42 di 166		

corso di scavo, via via che il fronte avanza tenderà ad incontrare condizioni di carico idraulico già parzialmente differenti da quella naturale, a causa del drenaggio innescato dalla tratta già eseguita retrostante il fronte. Va altresì rimarcato che i valori di carico idraulico qui riferiti sono quelli da tenere in conto qualora si intendesse procedere alla realizzazione di un rivestimento non drenante, poiché verosimilmente, in assenza di drenaggio, in tempi più o meno prolungati a seconda della permeabilità e della ricarica dalla superficie (mesi/anni) il carico idraulico naturale tenderebbe in linea di massima a ripristinarsi.

WBS GN 14N

La tratta di scavo identificata con le pk 16+275/16+437 si sviluppa all'interno di rocce basaltiche. L'ammasso roccioso presenta una permeabilità per fratturazione di grado medio, con un discreto grado di connettività idraulica. Il carico idraulico imperturbato è stato stimato in un intervallo di 350-450 m. Sono state ipotizzate portate in galleria comprese tra 0.4 e 2 l/s*10 m in fase di scavo.

Nella tratta compresa tra le pk 16+480/16+521 è prevista l'intersezione con una zona di faglia all'interno degli argilloscisti, rilevata nel sondaggio SR14 e con spessore incerto. Si ipotizza un grado di connettività abbastanza basso, un carico idraulico imperturbato pari a circa 350 m e portate nell'ordine di 0.4-2 l/s*10 m in fase di scavo.

Nella tratta compresa tra le pk 16+437/16+480 e pk 16+521/17+680 non è prevista l'intersezione con discontinuità importanti. Il grado di permeabilità atteso è perciò da basso a molto basso. I carichi idraulici imperturbati stimati sono variabili in questa zona, tra 450 e 200 m. Le portate massime transitorie stimate sono riferibili all'intervallo 0.16-0.4 l/s*10 m, con eventuale presenza di portate inferiori

WBS GN 14 R

Nei settori tra le progressive pk 17+768/17+901, pk 17+945/18+629, pk 18+670/18+929, pk 18+970/19+054, pk 19+098/19+308, pk 19+353/19+547 non è prevista l'intersezione con discontinuità importanti. Il grado di permeabilità atteso è perciò da basso a molto basso. I carichi idraulici imperturbati stimati sono variabili nell'intervallo tra 100 e 250 m. Le portate massime transitorie stimate sono riferibili all'intervalli di valori 0.16-0.4 l/s*10 m.

Nelle tratte comprese tra le progressive pk 17+901/17+945, pk 18+629/18+670, pk 18+929/18+970, pk 19+054/19+098, pk 19+308/19+353, pk 19+547/19+569 è prevista l'intersezione con alcune delle numerose zone di faglia presenti all'interno degli argilloscisti. Si ipotizza che il grado di connettività sia abbastanza basso. Il carico idraulico imperturbato stimato è compreso tra 100 e 250 m, non sono disponibili dati da sondaggio sul livello d'acqua. Sono state ipotizzate portate riferibili all'intervallo 0.4-2 l/s*10 m in fase di scavo.

Nella tratta compresa tra le progressive pk 19+569/19+575 è prevista l'intersezione con una zona di faglia dedotta dai dati di terreno e dal sondaggio SR15. È stata stimata una permeabilità molto bassa ($K < 10^{-8}$ m/s). La connettività in questi contesti viene supposta molto bassa. Il carico idraulico stimato è compreso tra 150 e 250 m considerando lo stato imperturbato. Si ipotizzano portate riferibili all'intervallo 0-0.16 l/s*10 m in fase di scavo.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315"> <tr> <td>Foglio 43 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 43 di 166
Foglio 43 di 166		

La tratta compresa tra le pk 19+575/19+591 è stata distinta perché situata nella zona di danneggiamento della faglia individuata dal sondaggio SR15. Il litotipo predominante sono le brecce di Costa Cravara, in questo caso brecce monogeniche a elementi di basalto. La permeabilità per fratturazione di questo tipo di roccia è elevata e con un discreto grado di connettività idraulica. Il carico idraulico imperturbato stimato è compreso tra 150 e 250 m. Si ipotizzano portate massime superiori a 2 l/s*10 m in fase di scavo.

La tratta di scavo compresa tra le progressive pk 19+591/19+677 si sviluppa all'interno delle Brecce di Costa Cravara. Si evidenzia una permeabilità per fratturazione abbastanza elevata con un discreto grado di connettività idraulica. Il carico idraulico imperturbato è stato stimato tra i 150 e i 250 m. Si ipotizzano durante lo scavo portate riferibili all'intervallo 0.4-2 l/s*10 m con locali passaggi all'intervallo 0.16-0.4 l/s*10 m dipendenti dal grado di fratturazione presente nell'ammasso roccioso.

Le tratte relative alle progressive pk 19+684/20+301, pk 20+343/20+794, pk 20+835/20+988 si trovano all'interno della Formazione di Molare. Ad entrambe è stato attribuito un grado di permeabilità basso ed una conseguente modesta connettività delle fratture. Il carico idraulico imperturbato è stimato piuttosto elevato, compreso tra i 200 e i 300 m. Le portate massime transitorie stimate sono riferite all'intervallo compreso tra 0.16-0.4 l/s*10 m.

Nelle tratte di scavo comprese tra le progressive pk 19+591/19+684, pk 20+301/20+343, pk 20+794/20+835 è ipotizzata l'intersezione con due zone di faglia all'interno della Formazione di Molare (litofacies ruditea parzialmente cementata-FMp). Si può supporre una permeabilità moderata e una connettività delle fratture limitata. Il carico idraulico imperturbato è stimato piuttosto elevato, compreso tra i 200 e i 300 m. Le portate massime transitorie stimate sono riferite all'intervallo 0.4-0.2 l/s*10 m con possibili riduzioni locali.

WBS GN 15 P

La tratta di scavo che si estende tra le progressive pk 16+286/16+430 si sviluppa all'interno di rocce basaltiche che presentano quindi una permeabilità piuttosto elevata anche al di fuori delle zone di faglia. L'ammasso roccioso presenta una permeabilità per fratturazione di grado medio, con un discreto grado di connettività idraulica. Il carico idraulico imperturbato è stato stimato piuttosto elevato, compreso in un intervallo di 350-450 m, ipotizzando un livello d'acqua prossimo alla superficie all'interno degli argilloscisti soprastanti i basalti. Sono state ipotizzate portate comprese tra 0.4 e 2 l/s*10 m in fase di scavo.

Nella tratta compresa tra le progressive pk 16+481/16+521 è prevista l'intersezione con una zona di faglia all'interno degli argilloscisti, rilevata nel sondaggio SR14 e con spessore incerto. Cautelativamente si può ipotizzare che all'interno della zona di faglia si possano incontrare sporadiche zone ad elevata permeabilità intervallate da frequenti zone a permeabilità moderata. Sembra ragionevole ipotizzare che il grado di connettività sia abbastanza basso. Il carico idraulico imperturbato stimato è piuttosto elevato, pari a circa 350 m. Sono state ipotizzate portate riferibili all'intervallo 0.4-2 l/s*10 m in fase di scavo con eventuale riscontro di valori inferiori dovuti alla presenza di probabili zone meno permeabili legate alla presenza di rocce di faglia a granulometria fine.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315"> <tr> <td>Foglio 44 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 44 di 166
Foglio 44 di 166		

Nel settore compreso tra le progressive pk 16+430/16+481 e pk 16+521/21+000 non è prevista l'intersezione con discontinuità importanti. Il grado di permeabilità atteso è perciò da basso a molto basso con corrispondente connettività ridotta, fatta eccezione per la presenza di lenti di basalti di estensione e posizione incerta che potrebbero portare a locali aumenti del grado di permeabilità (medio-alta). I carichi idraulici stimati imperturbati sono variabili in questa zona, tra 450 e 200 m. Le portate massime transitorie stimate sono riferibili all'insieme 0.16-0.4 l/s*10 m in fase di scavo.

WBS GN 15 R

Nei settori compresi tra le progressive pk 17+790/17+906, pk 17+949/18+615, pk 18+658/18+918, pk 18+964/19+055, pk 19+095/19+285, pk 19+330/19+535 non è prevista l'intersezione con discontinuità importanti. Il grado di permeabilità atteso è perciò da basso a molto basso con corrispondente connettività ridotta, fatta eccezione per la presenza di lenti di basalti. I carichi idraulici imperturbati stimati sono variabili nell'intervallo tra 100 e 250 m. Le portate massime transitorie stimate sono riferibili all'intervallo 0.16-0.4 l/s*10 m.

Nelle tratte relative alle progressive pk 17+906/17+949, pk 18+615/18+658, pk 18+918/18+694, pk 19+055/19+095, pk 19+285/19+330, pk 19+535/19+558 è prevista l'intersezione con alcune delle numerose zone di faglia presenti all'interno degli argilloscisti. Cautelativamente si può stimare che all'interno delle zone di faglia si possano incontrare sporadiche zone ad elevata permeabilità intervallate da frequenti zone a permeabilità moderata. Sembra ragionevole ipotizzare che il grado di connettività sia abbastanza basso, anche nei settori dove la permeabilità è maggiore. Il carico idraulico imperturbato stimato è compreso tra 100 e 250 m, non sono disponibili dati da sondaggio sul livello d'acqua. Sono state ipotizzate portate in fase transitoria riferibili all'intervallo 0.4-2 l/s*10 m con riduzioni locali riscontrabili alla presenza di probabili

Nella tratta relative le progressive pk 19+558/19+570 è prevista l'intersezione con una zona di faglia dedotta dai dati di terreno e dal sondaggio SR15. È stata stimata una permeabilità molto bassa ($K < 10^{-8}$ m/s), data la presenza di materiale a granulometria molto fine interpretato come roccia di faglia. La connettività in questi contesti viene supposta molto bassa. Il carico idraulico imperturbabile stimato è compreso tra 150 e 250 m. Si sono state ipotizzate portate riferibili a valori compresi nell'intervallo 0-0.16 l/s*10 m durante lo scavo.

La tratta compresa tra le progressive pk 19+570/19+591 è stata distinta perché situata nella zona di danneggiamento della faglia individuata dal sondaggio SR15. Il litotipo predominante sono le brecce di Costa Cravara, in questo caso brecce monogeniche a elementi di basalto. La permeabilità per fratturazione di questo tipo di roccia è elevata e con un discreto grado di connettività idraulica. Il carico idraulico imperturbato stimato è compreso tra 150 e 250 m. Si sono ipotizzate portate superiori a 2 l/s*10 m durante lo scavo.

La tratta di scavo compresa tra le progressive pk 19+591/19+677 si sviluppa all'interno delle Brecce di Costa Cravara che, in questa zona, si presentano come brecce monogeniche a elementi di basalto. Esse sono quindi caratterizzate da una permeabilità per fratturazione abbastanza elevata anche al di fuori delle zone di faglia, analoga a quella dei basalti, con un discreto grado di connettività idraulica. Il carico idraulico imperturbato è stato stimato tra i 150 e i 250 m. Sono state ipotizzate portate massime transitorie riferibili all'intervallo 0.4-2 l/s*10 m con valori locali relativi

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 232 1532 315"> <tr> <td>Foglio 45 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 45 di 166
Foglio 45 di 166		

all'intervallo 0.16-0.4 l/s*10 m, dipendenti dal grado di fratturazione presente nell'ammasso roccioso.

Le tratte relative le progressive pk 19+677/20+279, pk 20+324/20+799, pk 20+844/21+000 si trovano all'interno della Formazione di Molare, in particolare nelle litofacies brecciosa (FMbc) e ruditica parzialmente cementata (FMp). Ad entrambe è stato attribuito un grado di permeabilità basso. Il carico idraulico imperturbato è stimato piuttosto elevato, compreso tra i 200 e i 300 m. Le portate massime transitorie stimate sono riferite all'intervallo di valori compreso tra 0.16-0.4 l/s*10 m.

Nelle tratte di scavo comprese tra le progressive pk 20+279/20+324, pk 20+799/20+844 è ipotizzata l'intersezione con due zone di faglia all'interno della Formazione di Molare (litofacies ruditica parzialmente cementata-FMp). Si può supporre una permeabilità moderata e una connettività delle fratture limitata. Il carico idraulico imperturbato è stimato piuttosto elevato, compreso tra i 200 e i 300 m. Le portate massime transitorie stimate sono riferite all'intervallo 0.4-0.2 l/s*10 m in fase di scavo. Per ulteriori approfondimenti si rimanda alla relazione geologica-idrogeologica relativa alla Tratta 4.

5.4. Inquadramento Geotecnico

Per la descrizione geotecnica della formazione interagente con l'opera in esame si sono presi a riferimento i dati e le considerazioni già svolte nel corso degli studi precedenti.

Sulla base dei dati raccolti, scaturiti dai rilievi strutturali, dalle colonne stratigrafiche ricavate dai sondaggi, nonché dai rilievi del fronte di scavo durante l'avanzamento del cunicolo esplorativo, è stato possibile effettuare una suddivisione dell'ammasso roccioso in 3 gruppi geomeccanici (gruppi 1, 2 e 3).

L'omogeneità e l'assimilabilità nell'ambito di ciascun gruppo sono state definite in base a criteri litologici (composizione mineralogica e petrografica, percentuale di *palombino* relativamente alla matrice argillitica, grado di alterazione

I principali fattori considerati per l'individuazione di tali gruppi sono:

- Criteri litologici (composizione mineralogica e petrografica, percentuale di *palombino* relativamente alla matrice argillitica, grado di alterazione, eventuale presenza di acqua)
- Criteri strutturali (caratteristiche delle strutture di separazione, indice RDQ, intensità della foliazione, intensità della tettonizzazione come ad esempio la presenza di struttura a pieghe fino alla microscala,
- Criteri litomeccanici (con riferimento ad una prima valutazione delle proprietà fisiche, di resistenza e deformabilità).

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 46 di 166

In sintesi il **Gruppo 3** può essere considerato rappresentativo del comportamento dell'ammasso roccioso delle zone a bassa copertura o in corrispondenza di importanti strutture geologiche (es. faglie, nuclei di pieghe, sovrascorrimenti, ecc.); il **Gruppo 1**, al contrario, può essere considerato rappresentativo delle condizioni migliori d'ammasso roccioso.

Parametri ed ipotesi di calcolo

Si è scelto in fase di progettazione esecutiva di suddividere all'interno delle Argille a Palombini i gruppi geomeccanici 2 e 3 in due ulteriori sottogruppi così da ottenere una maggiore correlazione con quanto richiesto dall'applicabilità delle sezioni tipo. Per un maggiore approfondimento sui parametri si rimanda alla relazione geomeccanica relativa all'opera in oggetto. Per quanto riguarda la Formazione di Molare si sono invece suddivisi i gruppi in base al grado di cementazione.

I parametri di calcolo utilizzati sono presentati nella seguente tabella assumendo i valori sotto riportati in base al criterio di rottura di Hoek e Brown. Laddove non sarà impiegato direttamente tale modello costitutivo verranno utilizzati i parametri secondo il modello di Mohr Coulomb, ottenuti mediante linearizzazione dei valori di Hoek e Brown alle differenti coperture. In ogni caso i parametri puntuali verranno presentati per le singole analisi.

Formazione e	γ	ν	E_{op}	σ_c	m_i	GSI
	[kN/m ³]	[-]	[GPa]	[MPa]	[-]	[-]
GR1	27	0,25-0,3	3.0÷7.8	30÷40	15÷20	45÷55
GR2a	27	0,25-0,3	1.5÷2.0	10÷12	20÷25	40÷45
GR2b	27	0,25-0,3	1.0÷1.5		15÷20	35÷40
GR3a	26	0.3	0.6÷1.2	5÷7	19	30÷35
GR3b	26	0.3			19	25÷30

Tabella 5-2. Argille a Palombini: Range di variabilità

Formazione	γ	ν	E_{RM}	σ_c	m_i	GSI
	[kN/m ³]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]
Molare cementazione elevata	26	0,3	2600÷5000 (3800)	20÷30	18÷24 (21)	50÷55
Molare cementazione modesta/scarsa			900÷2600 (1750)	7÷20		40÷50
Zona di faglia/ Piani di taglio			240÷900 (570)	5÷7		35÷40

Tabella 5-3. Formazione di molare: Range di variabilità

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 	
	<p>IG5103ECVCLGN0000001A00</p>	<p>Foglio 47 di 166</p>

Le portate indicate dall'inquadramento idrogeologico e valutate all'interno della relazione geologica ed idrogeologica, risultano piuttosto limitate già in fase di scavo nonostante le cautelative ipotesi di calcolo: verranno quindi adottati drenaggi in avanzamento capaci di captare tali portate consentendo in ultimo di limitare le pressioni idrostatiche al fronte.

In fase definitiva tali afflussi risulteranno ancora inferiori; avendo provveduto ad inserire opportuni elementi atti ad abbattere l'eventuale carico idraulico (come i pannelli drenanti da adottarsi nei peggiori contesti geologici) e a convogliare le acque captate le analisi sono state condotte in assenza di carico idraulico agente sui rivestimenti definitivi: la galleria in esame è stata infatti considerata, in conformità alla fase di Progetto Definitivo, drenante.

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315"> <tr> <td>Foglio 48 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 48 di 166
Foglio 48 di 166		

6. PREVISIONI SUL COMPORTAMENTO DEGLI AMMASSI ALLO SCAVO (FASE DI DIAGNOSI)

L'apertura di una cavità in un materiale caratterizzato da un campo di tensioni naturali preesistente indisturbato, dovuto essenzialmente a carichi litostatici e a sforzi tettonici, porta ad una generale ridistribuzione degli sforzi, sia in direzione trasversale che longitudinale, con conseguente incremento delle tensioni al contorno della galleria e già oltre il fronte di scavo.

Si genera così un nuovo campo tensionale che tende a far evolvere l'ammasso intorno al cavo verso una nuova situazione di equilibrio diversa da quella naturale, dando luogo a fenomeni deformativi.

Sulla base delle conoscenze dei terreni interessati dalle gallerie, è possibile, elaborando anche le esperienze maturate in lavori analoghi, svolgere delle previsioni sul comportamento dei terreni allo scavo al fine di definire gli interventi di stabilizzazione e gli schemi di avanzamento.

Queste previsioni sono strettamente connesse con lo studio dello stato tenso-deformativo instauratosi nell'ammasso al contorno della galleria e indotto dalle operazioni di scavo.

La previsione delle modalità di avanzamento in sotterraneo è stata principalmente condotta secondo l'approccio del "Metodo per l'Analisi delle Deformazioni Controllate nelle Rocce e nei Suoli (ADECO-RS)". Sulla base dei dati raccolti in fase di studio geologico e di caratterizzazione geomeccanica degli ammassi da attraversare, sono state effettuate le previsioni di comportamento tenso-deformativo della galleria in assenza di interventi ed in particolare modo la previsione sul "comportamento deformativo del fronte di scavo", il quale riveste notevole importanza nella definizione delle condizioni di stabilità, a breve e lungo termine, e degli interventi più idonei per garantirle. Il comportamento del fronte è principalmente condizionato da:

- le caratteristiche di resistenza e deformabilità dell'ammasso connesse con le varie strutture geologiche che interessano le gallerie;
- il comportamento del materiale nel breve e lungo termine: rigonfiamento, squeezing, fluage e rilasci tensionali;
- i carichi litostatici corrispondenti alle coperture in gioco;
- la forma e le dimensioni della sezione di scavo;
- lo schema di avanzamento e la tipologia dello scavo.

Il comportamento del fronte di scavo, al quale è legato quello della cavità, può essere sostanzialmente di tre tipi: "stabile", "stabile a breve termine" e "instabile", come di seguito brevemente illustrato.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315"> <tr> <td>Foglio 49 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 49 di 166
Foglio 49 di 166		

Gallerie a fronte stabile (CASO A)

Se il fronte di scavo è stabile, ciò significa che lo stato tensionale al contorno della cavità in prossimità del fronte si mantiene in campo prevalentemente elastico e i fenomeni deformativi osservabili sono di piccola entità e tendono ad esaurirsi rapidamente. In questo caso anche il comportamento del cavo sarà stabile (rimanendo prevalentemente in campo elastico) e quindi non si rendono necessari interventi preventivi di consolidamento. Saranno sufficienti, nel breve termine, interventi di confinamento delle pareti di scavo, e nel lungo termine, la realizzazione del rivestimento definitivo.

Gallerie a fronte stabile a breve termine (CASO B)

Questa condizione si verifica quando lo stato tensionale indotto dall'apertura della cavità supera le caratteristiche di resistenza meccanica del materiale al fronte, che assume un comportamento di tipo elasto-plastico. I fenomeni deformativi connessi con tale redistribuzione delle tensioni sono più accentuati che nel caso precedente e producono nell'ammasso roccioso al fronte una decompressione che porta ad una riduzione della resistenza interna. Questa decompressione deve essere opportunamente regimata, nel breve termine, mediante adeguati interventi di preconsolidamento al fronte (e talora al contorno del cavo), in grado di contenere l'ammasso e condurlo verso condizioni di stabilità; diversamente lo stato tenso-deformativo può evolvere verso condizioni di instabilità del cavo. Il rivestimento definitivo costituirà il margine di sicurezza a lungo termine.

Gallerie a fronte instabile (CASO C)

L'instabilità progressiva del fronte di scavo è attribuibile ad una accentuazione dei fenomeni deformativi nel campo plastico, che risultano immediati, più rilevanti e si manifestano prima ancora che avvenga lo scavo, oltre il fronte stesso. Di conseguenza tali deformazioni producono una decompressione più spinta nell'ammasso roccioso al fronte e portano ad un decadimento rapido e progressivo delle caratteristiche meccaniche d'ammasso. Questo tipo di decompressione più accentuata deve essere contenuta prima dell'arrivo del fronte di scavo e richiede pertanto interventi di preconsolidamento sistematici in avanzamento che consentiranno di creare artificialmente quell'effetto arco capace di far evolvere la situazione verso configurazioni di equilibrio stabile nel breve termine e, con l'aggiunta del rivestimento definitivo, anche nel lungo termine.

6.1. Calcolo e determinazione delle categorie di comportamento allo scavo

Si vuole adesso determinare il comportamento dell'ammasso allo scavo per le suddivisioni operate sui litotipi precedentemente esaminati, in funzione anche dei carichi litostatici dovuti alle differenti coperture riscontrate lungo il tracciato della galleria in oggetto.

Per ogni singolo gruppo sarà possibile ottenere diverse classi di comportamento allo scavo in funzione delle diverse coperture in esame. Nella successiva fase di terapia, in cui si definiranno gli interventi necessari per l'avanzamento nelle diverse classi di comportamento, ad una stessa classe

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 50 di 166

di comportamento potranno corrispondere diverse sezioni tipo, adeguate alle caratteristiche geologiche e fisiche di ogni formazione.

Nella fase di diagnosi, sulla base degli elementi raccolti nella fase conoscitiva, vengono sviluppate le previsioni sul comportamento deformativo del fronte e del cavo in assenza di interventi, al fine di giungere all'individuazione di tratte a comportamento omogeneo, suddivise nelle tre categorie di comportamento precedentemente descritte.

Gli strumenti numerici adottati per la determinazione del comportamento dell'ammasso allo scavo sono stati:

- Analisi di stabilità del fronte (metodi di analisi empirici in forma chiusa);
- Metodo delle Linee Caratteristiche.

6.1.1. Stabilità del fronte di scavo

Sezione a singolo binario - Argilliti a palombini

Per quanto riguarda le analisi di stabilità del fronte, queste sono state condotte per coperture pari a 150m, 300m e alle massime coperture. Nel seguito sono riepilogate le analisi svolte e i risultati ottenuti per tutti e tre metodi considerati. Nelle analisi sotto indicate, in modo da poter comparare i risultati, si è proceduto a valutare la stabilità al fronte adottando una sezione tipo con altezza pari a 11,2m, larghezza pari a 10,9 m e sfondi pari ad un metro per tutte le formazioni considerate: tale sagoma risulta media rispetto a quella che si dovrà impiegare per la galleria a singolo binario. In fase di terapia si è poi proceduto a differenziare le altezze di scavo, le larghezze delle sezioni e gli sfondi di avanzamento per ogni sezione tipo oggetto di analisi.

ANALISI STABILITA' DEL FRONTE - FASE DI DIAGNOSI - Tamez & Cornejo								
Analisi	Formazione	Copertura (m)	D _{eq} (m)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	φ (°)	SF	FS ₃
AN1	Ap-GR1	150	10,70	27	770	40	4,01	15,13
AN2	Ap-GR1	300	10,70	27	1175	39	3,63	13,55
AN3	Ap-GR1	500	10,70	27	1550	38	3,31	12,26
AN4	Ap-GR2a	150	10,70	27	450	38	3,02	11,42
AN5	Ap-GR2a	300	10,70	27	725	33	2,86	9,78
AN6	Ap-GR2a	500	10,70	27	1000	29	2,68	8,40
AN7	Ap-GR2b	150	10,70	27	390	33	2,78	9,65
AN8	Ap-GR2b	300	10,70	27	590	29	2,60	8,21
AN9	Ap-GR2b	500	10,70	27	800	25	2,44	6,94
AN10	Ap-GR3a	150	10,70	26	320	30	2,57	8,44
AN11	Ap-GR3a	300	10,70	26	490	26	2,43	7,17
AN12	Ap-GR3a	500	10,70	26	680	22	2,31	6,05
AN13	Ap-GR3b	150	10,70	26	250	27	2,31	7,11
AN14	Ap-GR3b	300	10,70	26	390	23	2,23	6,05
AN15	Ap-GR3b	500	10,70	26	540	19	2,14	5,03

Tabella 6-1. Argille a palombini: riepilogo analisi Tamez & Cornejo in fase di diagnosi

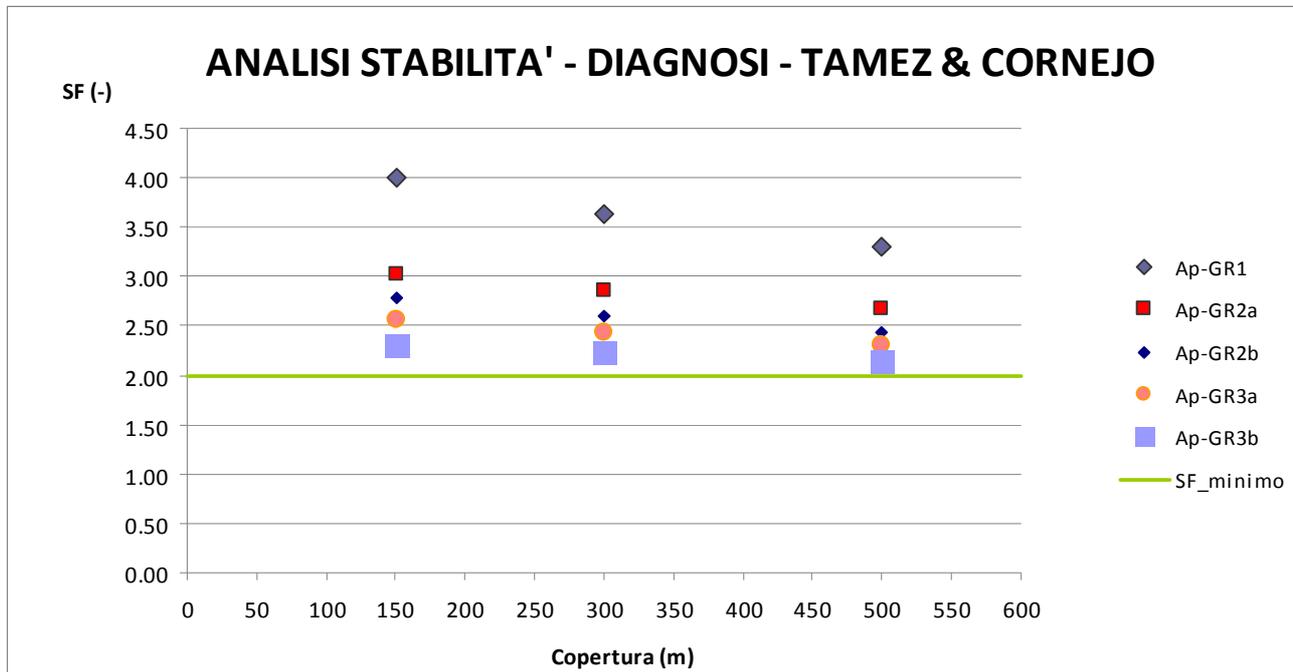


Figura 10 – Risultati analisi di stabilità - Fase di diagnosi - Tamez & Cornejo

ANALISI STABILITA' DEL FRONTE - FASE DI DIAGNOSI									
Analisi	Formazio ne	Copertura (m)	z_0 (m)	γ (kN/m ³)	GSI (-)	σ_{ci} (MPa)	m_i	Stability Ratio	λ_e
AN1	Ap-GR1	150	155.60	27	50	35000	17.50	1.39	0.901
AN2	Ap-GR1	300	305.60	27	50	35000	17.50	2.72	0.766
AN3	Ap-GR1	500	505.60	27	50	35000	17.50	4.50	0.701
AN4	Ap-GR2a	150	155.60	27	42	12000	20.00	4.91	0.694
AN5	Ap-GR2a	300	305.60	27	42	12000	20.00	9.65	0.592
AN6	Ap-GR2a	500	505.60	27	42	12000	20.00	15.96	0.517
AN7	Ap-GR2b	150	155.60	27	37	10000	17.50	7.43	0.606
AN8	Ap-GR2b	300	305.60	27	37	10000	17.50	14.60	0.520
AN9	Ap-GR2b	500	505.60	27	37	10000	17.50	24.15	0.447
AN10	Ap-GR3a	150	155.60	26	33	7000	19.00	11.13	0.545
AN11	Ap-GR3a	300	305.60	26	33	7000	19.00	21.86	0.464
AN12	Ap-GR3a	500	505.60	26	33	7000	19.00	36.16	0.392
AN13	Ap-GR3b	150	155.60	26	28	5000	19.00	18.30	0.484
AN14	Ap-GR3b	300	305.60	26	28	5000	19.00	35.95	0.408
AN15	Ap-GR3b	500	505.60	26	28	5000	19.00	59.48	0.337

Tabella 6-2. Argille a palombini: riepilogo analisi in fase di diagnosi Broms & Bennermark e Panet

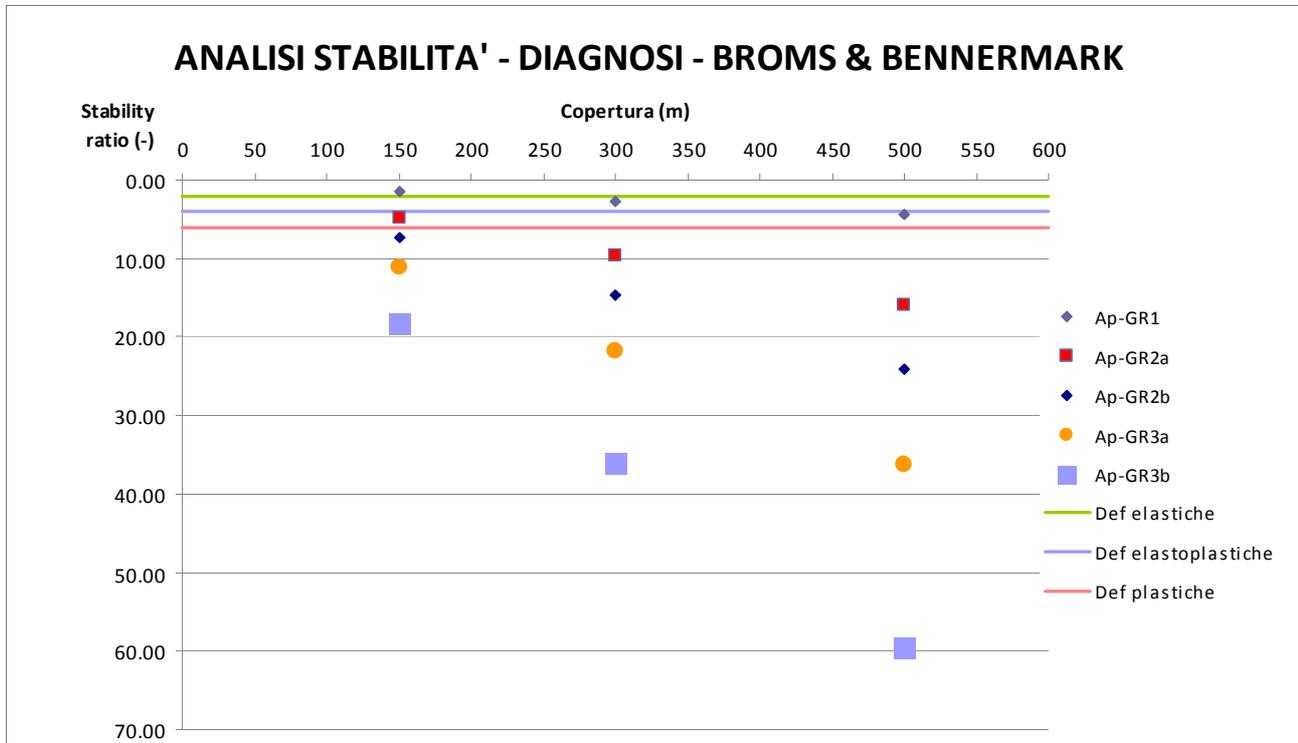


Figura 11 – Risultati analisi di stabilità - Fase di diagnosi - Broms & Bennermark

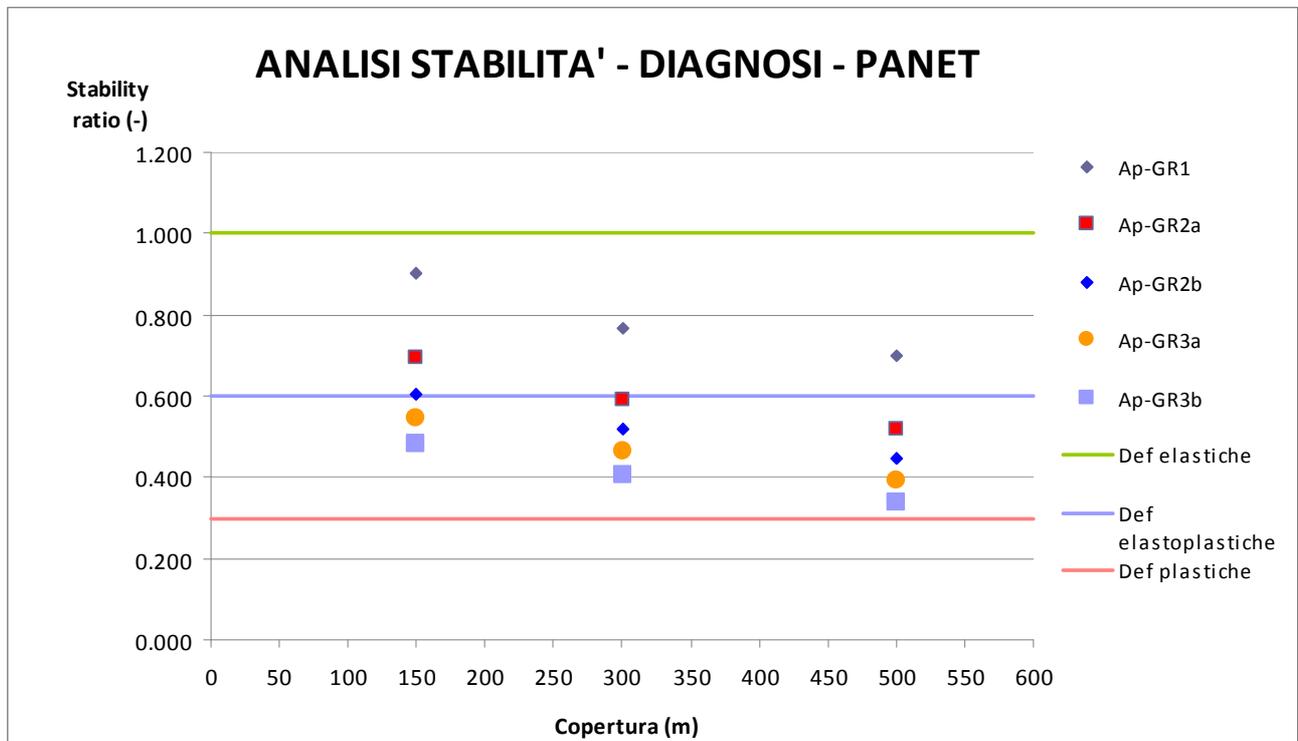


Figura 12 – Risultati analisi di stabilità - Fase di diagnosi – Panet

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 53 di 166

Sezione a singolo Binario - Formazioni di molare

Per quanto riguarda le analisi di stabilità del fronte per la Formazione di molare, queste sono state condotte per coperture pari a 200m, 300m e alle massime coperture. Nel seguito sono riepilogate le analisi svolte e i risultati ottenuti per tutti e tre i metodi considerati. Nelle analisi sotto indicate, in modo da poter comparare i risultati, si è proceduto a valutare la stabilità al fronte adottando una sezione tipo con altezza pari a 11,2m, larghezza pari a 10,9 m e sfondi pari ad un metro per tutte le formazioni considerate, corrispondente alla sagoma media che dovrà essere impiegata per la galleria a singolo binario. In fase di terapia si è poi proceduto a differenziare le altezze di scavo, le larghezze delle sezioni e gli sfondi di avanzamento per ogni sezione tipo oggetto di analisi.

ANALISI STABILITA' DEL FRONTE - FASE DI DIAGNOSI - Tamez & Cornejo								
Analisi	Formazione	Copertura (m)	D_{eq} (m)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	φ (°)	SF	FS_3
AN1	Mol-GR1	200	10.70	26	770	43	3.62	14.55
AN2	Mol-GR1	300	10.70	26	990	40	3.41	13.10
AN3	Mol-GR1	400	10.70	26	1190	38	3.28	12.17
AN4	Mol-GR2	200	10.70	26	635	39	3.25	12.37
AN5	Mol-GR2	300	10.70	26	820	36	3.09	11.15
AN6	Mol-GR2	400	10.70	26	990	34	2.98	10.36
AN7	Mol-Fag	200	10.70	26	405	30	2.60	8.45
AN8	Mol-Fag	300	10.70	26	520	27	2.50	7.53
AN9	Mol-Fag	400	10.70	26	620	25	2.42	6.91

Tabella 6-3. Formazioni di molare: riepilogo analisi Tamez & Cornejo in fase di diagnosi

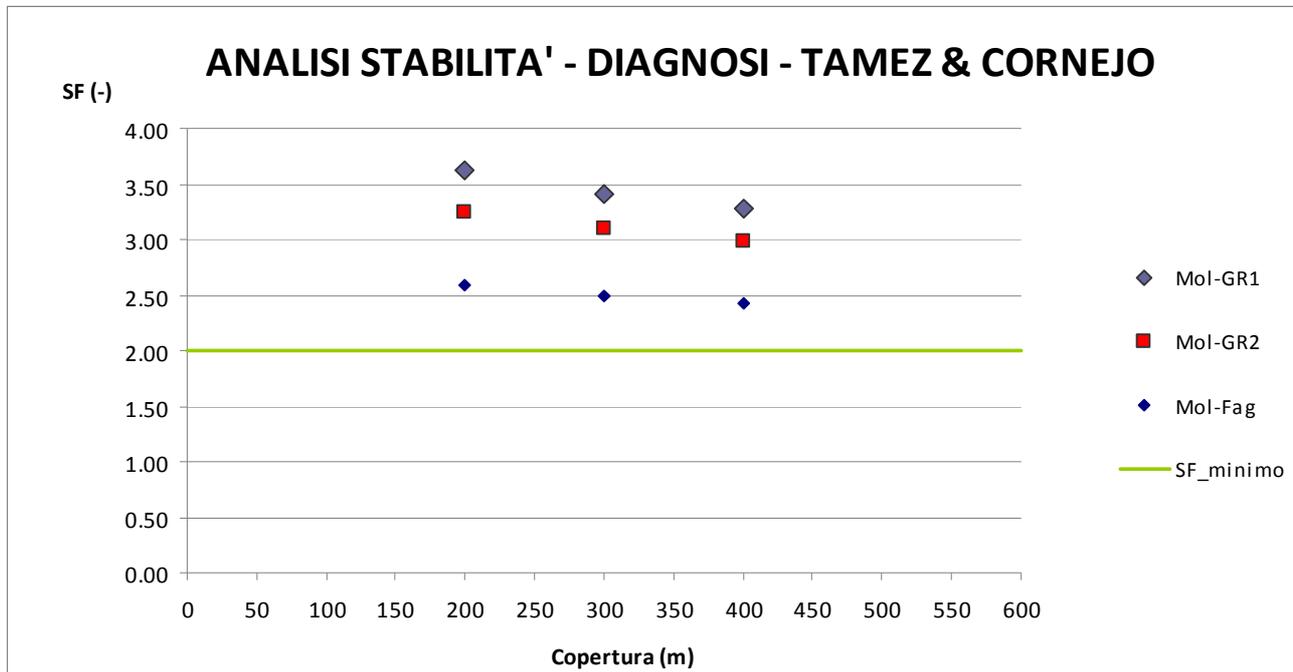


Figura 13 – Risultati analisi di stabilità - Fase di diagnosi - Tamez & Cornejo

ANALISI STABILITA' DEL FRONTE - FASE DI DIAGNOSI

Analisi	Formazio ne	Copertura (m)	z_0 (m)	γ (kN/m ³)	GSI (-)	σ_{ci} (MPa)	m_i	Stability Ratio	λ_e
AN1	Mol-GR1	200	205.60	26	50	20000	21.00	2.84	0.794
AN2	Mol-GR1	300	305.60	26	50	20000	21.00	4.22	0.727
AN3	Mol-GR1	400	405.60	26	50	20000	21.00	5.60	0.684
AN4	Mol-GR2	200	205.60	26	47	13800	21.00	4.52	0.711
AN5	Mol-GR2	300	305.60	26	47	13800	21.00	6.72	0.649
AN6	Mol-GR2	400	405.60	26	47	13800	21.00	8.92	0.609
AN7	Mol-Fag	200	205.60	26	37	6000	21.00	14.26	0.535
AN8	Mol-Fag	300	305.60	26	37	6000	21.00	21.20	0.480
AN9	Mol-Fag	400	405.60	26	37	6000	21.00	28.14	0.443

Tabella 6-4. Formazione di molare: riepilogo analisi in fase di diagnosi Broms & Bennermark e Panet

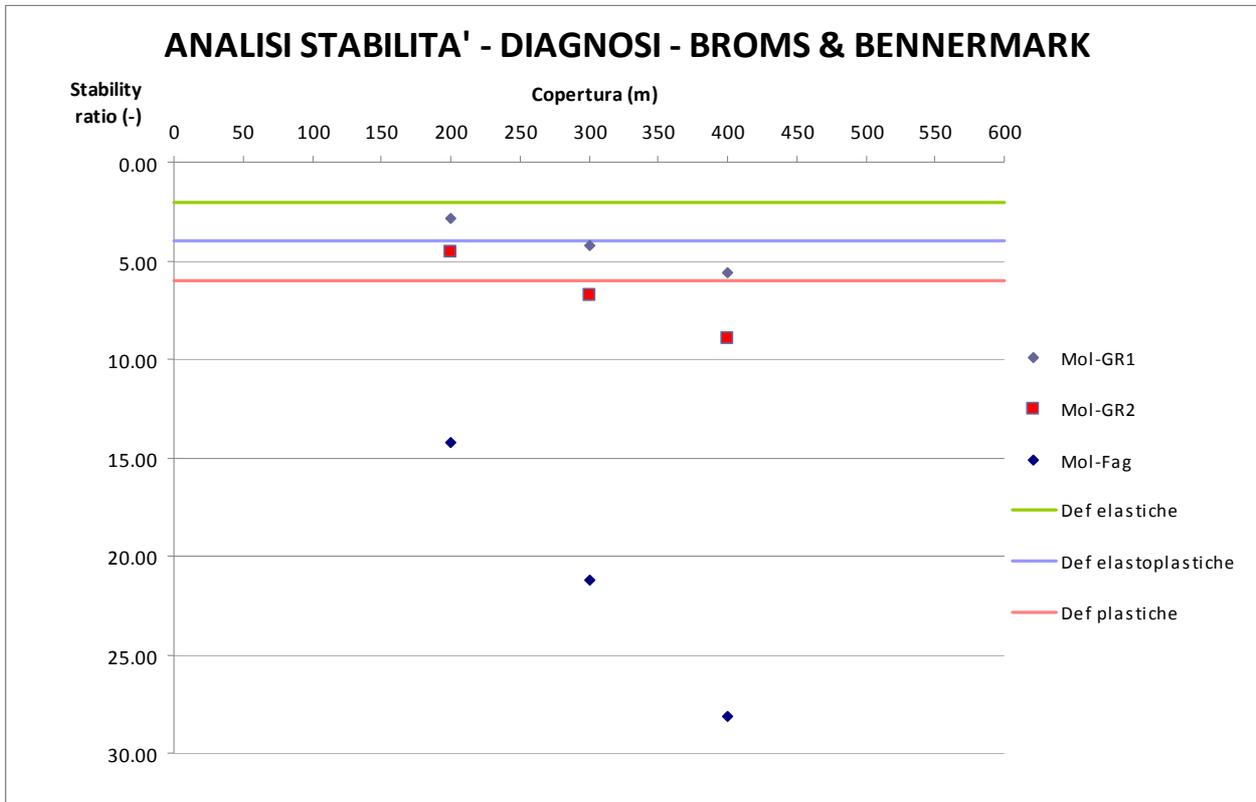


Figura 14 – Risultati analisi di stabilità - Fase di diagnosi - Broms & Bennermark

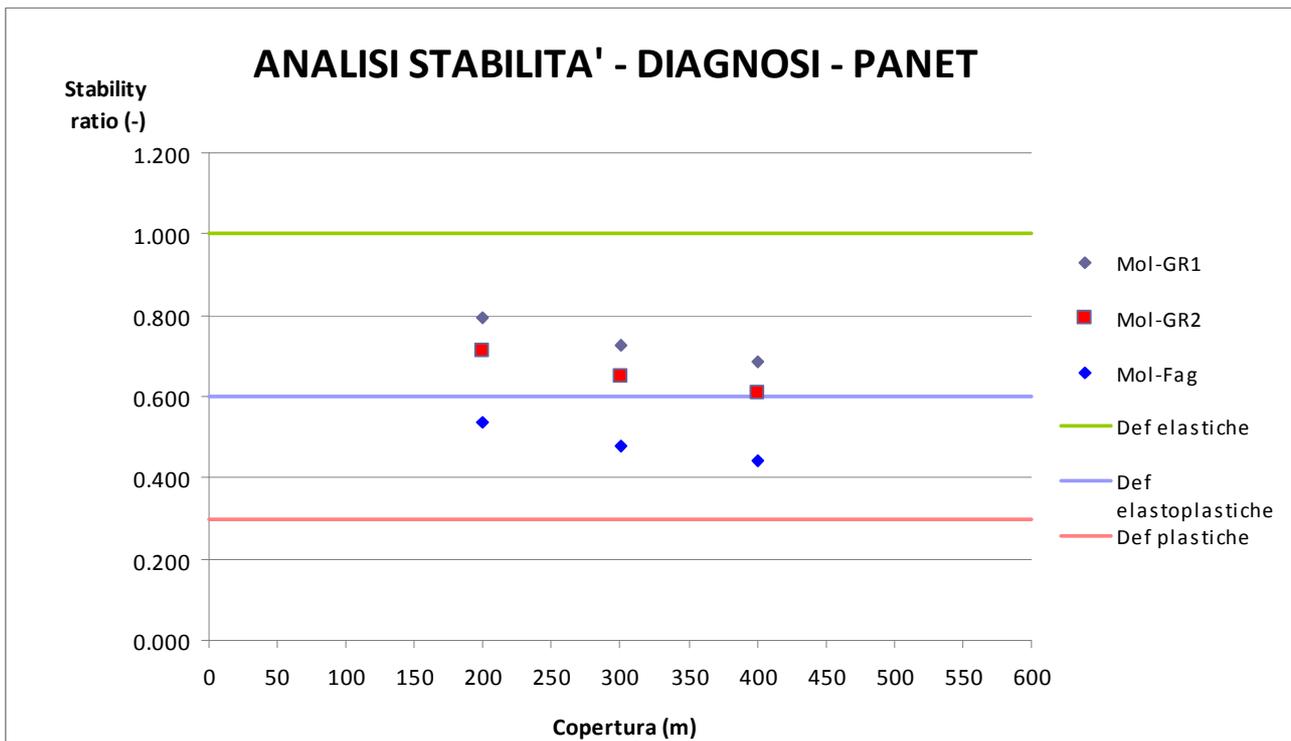


Figura 15 – Risultati analisi di stabilità - Fase di diagnosi – Panet

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 56 di 166

Sezione "Area sicura"

Per quanto riguarda le analisi di stabilità del fronte per la sezione avente area di scavo maggiore denominata "Area sicura", sezione che verrà applicata in prossimità dell'innesto con la Finestra Val Lemme, queste sono state condotte per coperture pari a 150m e alle massime coperture raggiunte nella tratta di applicazione della stessa. In tale settore lo scavo avverrà unicamente nelle Argilliti a Palombini. Nel seguito sono riepilogate le analisi svolte e i risultati ottenuti per tutti e tre i metodi considerati. Nelle analisi sotto indicate, in modo da poter comparare i risultati, si è proceduto a valutare la stabilità al fronte adottando una sezione tipo con altezza pari a 10,7 m, larghezza pari a circa 12,7 m e sfondi pari ad un metro per tutte le formazioni considerate. In fase di terapia si è poi proceduto a differenziare le altezze di scavo, le larghezze delle sezioni e gli sfondi di avanzamento per ogni sezione tipo oggetto di analisi.

ANALISI STABILITA' DEL FRONTE - FASE DI DIAGNOSI - Tamez & Cornejo								
Analisi	Formazione	Copertura (m)	D_{eq} (m)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	φ (°)	SF	FS ₃
AN1	Ap-GR1	150	12.57	27	770	40	4.11	16.41
AN2	Ap-GR1	300	12.57	27	1175	39	3.78	15.48
AN3	Ap-GR1	400	12.57	27	1450	39	3.69	15.14
AN4	Ap-GR2a	150	12.57	27	450	38	3.13	12.94
AN5	Ap-GR2a	400	12.57	27	850	30	2.82	10.01
AN6	Ap-GR2b	150	12.57	27	390	33	2.87	10.94
AN7	Ap-GR2b	400	12.57	27	700	27	2.59	8.61
AN8	Ap-GR3a	150	12.57	26	320	30	2.64	9.56
AN9	Ap-GR3b	150	12.57	26	250	27	2.37	8.05

Tabella 6-5. Argille a palombini: riepilogo analisi Tamez & Cornejo in fase di diagnosi

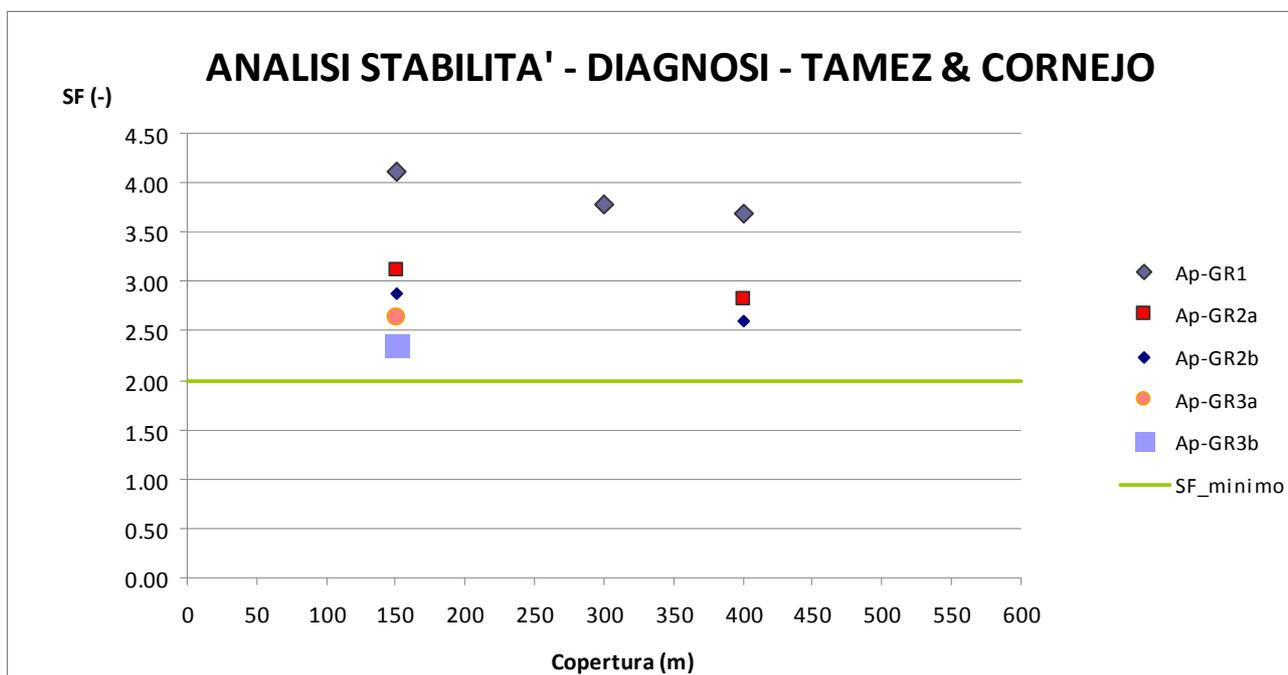


Figura 16 – Risultati analisi di stabilità - Fase di diagnosi - Tamez & Cornejo

ANALISI STABILITA' DEL FRONTE - FASE DI DIAGNOSI									
Analisi	Formazione	Copertura (m)	z_0 (m)	γ (kN/m ³)	GSI (-)	σ_{cl} (MPa)	m_i	Stability Ratio	λ_e
AN1	Ap-GR1	150	155.35	27	50	35000	17.50	1.38	0.901
AN2	Ap-GR1	300	305.35	27	50	35000	17.50	2.72	0.766
AN3	Ap-GR1	400	405.35	27	50	35000	17.50	3.61	0.732
AN4	Ap-GR2a	150	155.35	27	42	12000	20.00	4.90	0.694
AN5	Ap-GR2a	400	405.35	27	42	12000	20.00	12.80	0.539
AN6	Ap-GR2b	150	155.35	27	37	10000	17.50	7.42	0.606
AN7	Ap-GR2b	400	405.35	27	37	10000	17.50	19.36	0.482
AN8	Ap-GR3a	150	155.35	26	33	7000	19.00	11.11	0.545
AN9	Ap-GR3b	150	155.35	26	28	5000	19.00	18.28	0.484

Tabella 6-6. Argilliti a Palombini: riepilogo analisi in fase di diagnosi Broms & Bennermark e Panet

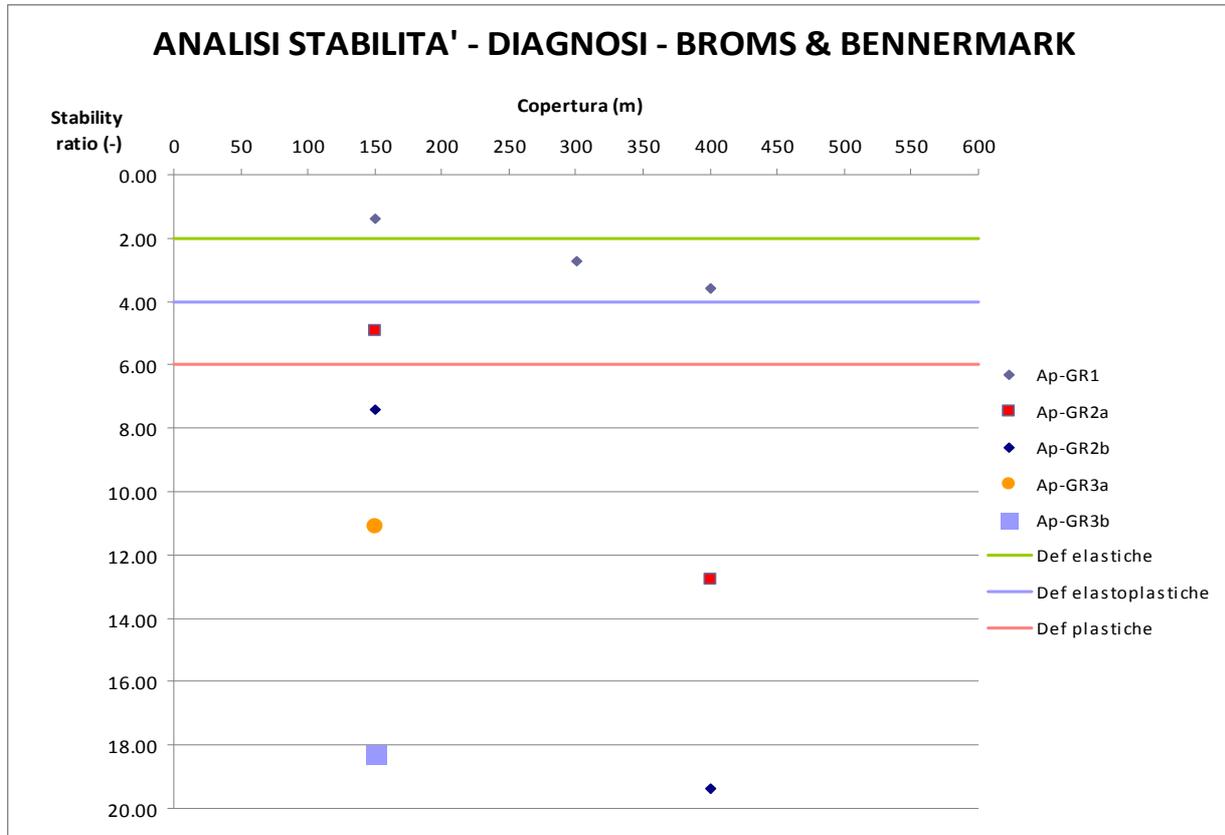


Figura 17 – Risultati analisi di stabilità - Fase di diagnosi - Broms & Bennermark

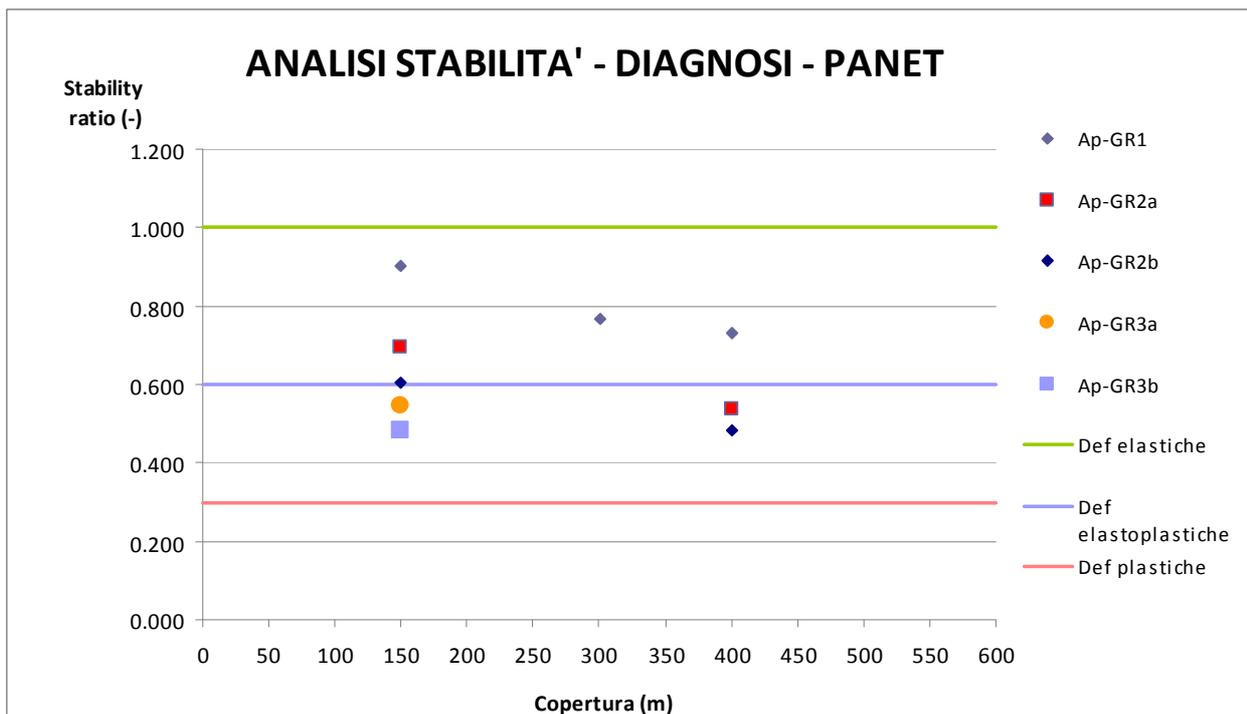


Figura 18 – Risultati analisi di stabilità - Fase di diagnosi - Panet

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315"> <tr> <td>Foglio 59 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 59 di 166
Foglio 59 di 166		

Esame critico dei risultati e considerazioni conclusive

L'analisi permette di valutare le condizioni di stabilità del fronte di scavo della galleria nei diversi contesti geotecnici in funzione delle coperture. Sintetizzando le analisi relative alle Argilliti a palombini, si nota come il metodo di Tamez Cornejo indichi per tutte le analisi effettuate un fattore di sicurezza maggiore del valore minimo, sebbene con riferimento al Gruppo Geomeccanico 3b i risultati sono prossimi al valore limite. In linea generale quindi secondo tale formulazione non si svilupperanno fenomeni di instabilità globale del fronte, ma gli interventi al fronte saranno comunque necessari per contenere gli effetti deformativi. Tale aspetto è particolarmente evidente osservando i risultati delle analisi effettuate secondo i metodi di Broms & Bennermark e Panet, i quali indicano per i contesti geomeccanici GR2a per altezze di copertura superiori ai 300m, GR2b, GR3a e GR3b ingenti deformazioni plastiche o addirittura configurano la possibilità di collasso del fronte in assenza di interventi.

Per quanto riguarda la Formazione di molare si continua a riscontrare che tramite l'analisi di stabilità condotta con il metodo di Tamez Cornejo il fattore di sicurezza si mantiene sempre superiore alla soglia minima anche se si ottengono per la zona di faglia coefficienti prossimi alla soglia limite. La necessità di apportare interventi atti al contenimento degli effetti deformativi è giustificata dai risultati emersi dalle analisi condotte secondo i criteri di Broms & Bennermark e Panet dove si evidenziano scenari di collasso al fronte in assenza di interventi particolarmente evidenti per la zona di faglia e deformazioni in campo plastico per la zona molare a cementazione modesta. Tali effetti sono accentuati una volta analizzata la condizione di massima copertura.

6.1.2. Metodo delle Linee Caratteristiche

Le "linee caratteristiche" di una cavità sono delle curve che legano le pressioni di contenimento esercitate in senso radiale sul contorno della galleria dalle opere di stabilizzazione agli spostamenti radiali sul contorno stesso (convergenze). Per ogni galleria si possono determinare due linee caratteristiche principali:

- La linea caratteristica del fronte, valida presso il fronte di scavo, che tiene conto dell'effetto tridimensionale delle tensioni vicino ad esso e che permette di risalire all'entità della convergenza già subita dalla galleria in corrispondenza del fronte di scavo;
- La linea caratteristica del cavo, valida per qualsiasi sezione sufficientemente lontana dal fronte per la quale lo stato tensionale possa considerarsi piano.

Il Metodo delle Linee Caratteristiche è valido nei casi in cui si ritenga lecito ipotizzare che l'andamento delle sollecitazioni indotte dallo scavo, sotto l'azione delle spinte di montagna, sia di tipo idrostatico; ciò si verifica generalmente per coperture $H > 3D$ (D =diametro di scavo della galleria); valori di copertura inferiori conducono a un risultato poco rappresentativo dell'effettivo comportamento dell'ammasso roccioso.

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 
	<p>IG5103ECVCLGN0000001A00</p> <p>Foglio 60 di 166</p>

Le analisi sono state condotte per tutte le formazioni incontrate lungo il tracciato della galleria e sono state effettuate per i valori di 150m, 300m e alla massima copertura per la quale risulta presente il contesto geomeccanico analizzato.

Sulla base delle elaborazioni effettuate, è possibile esprimere delle considerazioni sul comportamento dell'ammasso allo scavo, con particolare riguardo alla prevedibile entità dei fenomeni deformativi del fronte e del cavo e all'estensione dell'eventuale fascia di materiale al contorno della cavità in cui il livello tensionale supera il limite elastico.

In generale, ove le linee caratteristiche non intersecano per un valore finito l'asse delle deformazioni radiali, la galleria risulta instabile senza adeguati interventi di contenimento. Si possono verificare altresì casi in cui il metodo porta a prevedere deformazioni radiali finite tali da non essere ritenute compatibili con la stabilità e la funzionalità dell'opera, oppure un'estensione della fascia d'ammasso a comportamento plastico non accettabile. Dall'esame dell'andamento della curva caratteristica è possibile quindi definire il comportamento del fronte di scavo come "stabile", "stabile a breve termine", o "instabile".

Si sono costruite le linee caratteristiche relative alle situazioni a diverso comportamento geomeccanico. Il loro andamento, calcolato sulla base dei parametri geomeccanici caratteristici dei materiali attraversati, è riportato nelle figure allegare alla presente relazione.

La definizione delle categorie di comportamento secondo il Metodo ADECO viene effettuata procedendo alla valutazione comparata e sistematica di tre fattori:

- Entità del fenomeno deformativo al fronte e a scavo avvenuto;
- Entità della fascia plasticizzata al fronte e a scavo avvenuto;
- Andamento della linea caratteristica (forma e ampiezza del tratto elastico e plastico).

In particolare, in questo caso, sulla base delle caratteristiche dei materiali si è considerato in linea generale per la definizione della classe di comportamento quanto di seguito:

- Se la convergenza prevista al fronte è inferiore a 0.5-0.6% del raggio il comportamento è di classe A, se la convergenza prevista al fronte è inferiore a 1.0-1.5% del raggio il comportamento è di classe B, altrimenti di classe C;
- Se la fascia plastica risulta non rilevante (inferiore a 0.5 volte il raggio) il comportamento è di classe A, se la fascia plastica è inferiore a 1-2 volte il raggio il comportamento è di classe B, altrimenti di classe C;
- Si valuta la forma della linea caratteristica del cavo; in classe A questa è quasi interamente lineare (tratto elastico); in classe B compare una parte curva (tratto plastico) ma non rilevante; in classe C il tratto curvo è rilevante e generalmente, a pressione nulla, con convergenze del cavo non compatibili con lo scavo.

I parametri di calcolo sono riportati nelle tabelle (ins. Riferimenti) con adeguata suddivisione nei confronti delle altezze di copertura e dei gruppi geomeccanici.

È necessario inoltre specificare che l'utilizzo del metodo "transfer-matrix" (cfr. 4.1.3), che permette di tenere in conto la presenza del preconsolidamento al contorno, riporta valori di convergenze e

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	IG5103ECVCLGN0000001A00	Foglio 61 di 166

spostamenti al fronte e in galleria generalmente più bassi rispetto ai risultati calcolati con le classiche soluzioni in forma chiusa di letteratura e anche rispetto ai valori evidenziati da scavi in materiali simili. In ogni caso comunque questa differenza è percentualmente contenuta e non influenza la classificazione del comportamento dell'ammasso. Le verifiche in fase di terapia pertanto sono state condotte tutte con il metodo "transfer-matrix" per coerenza numerica, nel tentativo di evidenziare l'effetto degli interventi, rimandando per una valutazione più realistica degli effetti deformativi di fronte e scavo alle analisi numeriche.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
IG5103ECVCLGN0000001A00		Foglio 62 di 166

Argilliti a palombini

RISULTATI ANALISI LC - FASE DI DIAGNOSI											
Formazione geologica	Copertura (m)	R _m (m)	H/D _{medio} (m)	U _{rad} (cm)	R _{pl} (m)	R _{pl} /R _m	U _{fronte} (cm)	U _{fronte} /R _m	R _{pl fronte} (m)	R _{pl fronte} /R _m	Comportamento
Ap - GR1	150	5,35	14,0	0,7	6,90	1,29	0,31	0,1%	5,84	1,09	A-B
	300	5,35	28,0	1,8	7,72	1,44	0,73	0,1%	6,17	1,15	B
	500	5,35	46,7	3,8	8,68	1,62	1,46	0,3%	6,53	1,22	B
Ap - GR2a	150	5,35	14,0	3,7	8,84	1,65	1,39	0,3%	6,58	1,23	B
	300	5,35	28,0	10,1	10,70	2,00	3,55	0,7%	7,26	1,36	B
	500	5,35	46,7	24,1	13,47	2,52	7,86	1,5%	8,10	1,51	B-C
Ap - GR2b	150	5,35	14,0	7,8	11,21	2,10	2,65	0,5%	7,36	1,38	B
	300	5,35	28,0	24,5	14,75	2,76	7,61	1,4%	8,43	1,58	B-C
	500	5,35	46,7	72,5	20,77	3,88	19,61	3,7%	9,98	1,87	C
Ap - GR3a	150	5,35	14,0	12,6	14,05	2,63	3,93	0,7%	8,21	1,53	B-C
	300	5,35	28,0	41,1	18,99	3,55	11,54	2,2%	9,55	1,79	C
	500	5,35	46,7	160,1	30,99	5,79	36,14	6,8%	12,11	2,26	C
Ap - GR3b	150	5,35	14,0	28,9	19,99	3,74	7,80	1,5%	9,75	1,82	C
	300	5,35	28,0	127,5	31,77	5,94	28,20	5,3%	12,24	2,29	C
	500	5,35	46,7	537,8	54,97	10,27	104,94	19,6%	16,68	3,12	C

Tabella 6-7. Argille a palombini – Fase di diagnosi: metodo delle linee caratteristiche

Dove:

- R_m= raggio (in fase di diagnosi si è assunto un raggio medio pari a 6.5m ad eccezione delle analisi relative all'innesto)
- γ=peso specifico di volume
- c_p=coesione di picco
- c_r=coesione residua
- φ_p=angolo d'attrito di picco
- φ_r=angolo d'attrito residuo
- E =modulo elastico
- ν=coefficiente di Poisson
- U_{rad}=spostamento radiale del cavo
- U_{fronte}=spostamento al fronte
- R_{pl}=raggio plastico del cavo
- R_{pl fronte}=raggio plastico al fronte

In particolare, secondo le formulazioni di Lombardi (1985), il valore di U_{fronte} indica la convergenza del cavo presso il fronte (ovvero la preconvergenza del nucleo).

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 63 di 166

Analisi parametriche Argilliti a palombini

Si è svolta un'analisi parametrica al fine di valutare il valore della convergenza radiale al fronte ottenuto al variare dei parametri caratterizzanti i differenti gruppi geomeccanici. All'interno di ogni intervallo prestabilito si ipotizzano tre variazioni del parametro in esame. I valori soggetti all'analisi parametrica sono la tensione originaria della roccia (introdotta in funzione della copertura), i parametri elastici dell'ammasso (modulo elastico e coefficiente di Poisson) e i parametri di resistenza (coesione e angolo attrito interno). Per ogni intervallo di copertura le analisi svolte sono pari a 27 e il numero totale di analisi per gruppo geomeccanico è pari a 81. I seguenti grafici mostrano il numero di analisi facenti parte un determinato intervallo di valore della convergenza radiale al fronte.

Si riportano di seguito gli intervalli di valore considerati nelle analisi:

Argille a Palombini - Intervalli dei parametri calcolo (Linearizzazione Modello Mohr-Coulomb)								
Formazione	Profondità	ϕ_p	ϕ_r	c_p	c_r	γ	ν	E_{op}
	[m]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kN/m ³]	[-]	[MPa]
GR1	150 + 250	38 + 40	30 + 32	770 + 1050	690 + 950	27	0.25 + 0.30	3000 + 7800
	250 + 350	38 + 40	30 + 32	1050 + 1300	950 + 1170			
	400 + 500	38 + 40	30 + 32	1450 + 1550	1300 + 1400			
GR2a	150 + 250	34 + 38	28 + 30	450 + 650	400 + 550	27	0.25 + 0.30	1500 + 2000
	250 + 350	31 + 34	28 + 30	650 + 800	550 + 700			
	400 + 500	28 + 30	26 + 27	850 + 1000	750 + 850			
GR2b	150 + 250	30 + 33	24 + 26	390 + 540	340 + 450	27	0.25 + 0.30	1000 + 1500
	250 + 350	28 + 30	24 + 26	530 + 650	450 + 550			
	400 + 500	25 + 27	22 + 24	700 + 800	600 + 700			
GR3a	150 + 250	28 + 30	22 + 24	320 + 440	270 + 370	26	0.3	600 + 1200
	250 + 350	25 + 27	22 + 24	440 + 540	370 + 450			
	400 + 500	22 + 24	19 + 21	580 + 680	500 + 580			
GR3b	150 + 250	24 + 27	20 + 22	250 + 350	200 + 300	26	0.3	600 + 1200
	250 + 350	21 + 24	18 + 20	350 + 430	300 + 360			
	400 + 500	19 + 21	16 + 17	450 + 540	400 + 450			

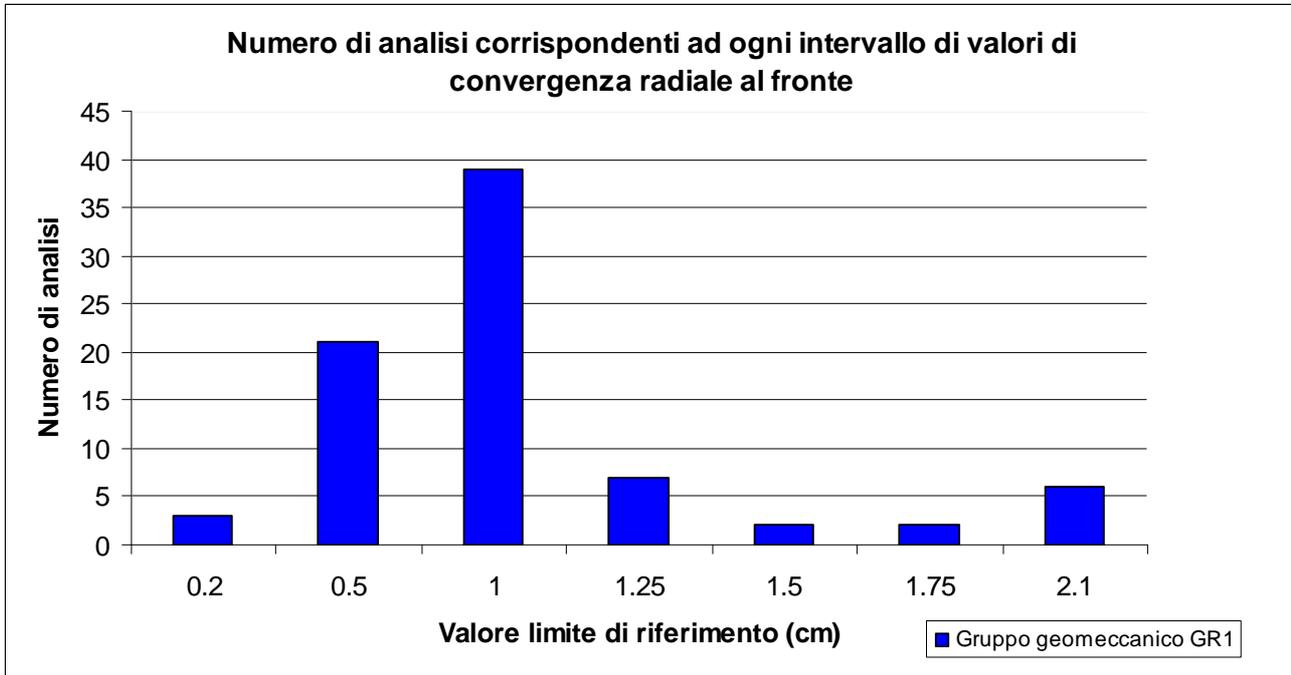
NOTA: la presente tabella riporta gli intervalli dei parametri relativi ai gruppi geomeccanici delle argille a palombini adottati per le analisi parametriche

Tabella 6-8. Argilliti a palombini: parametri

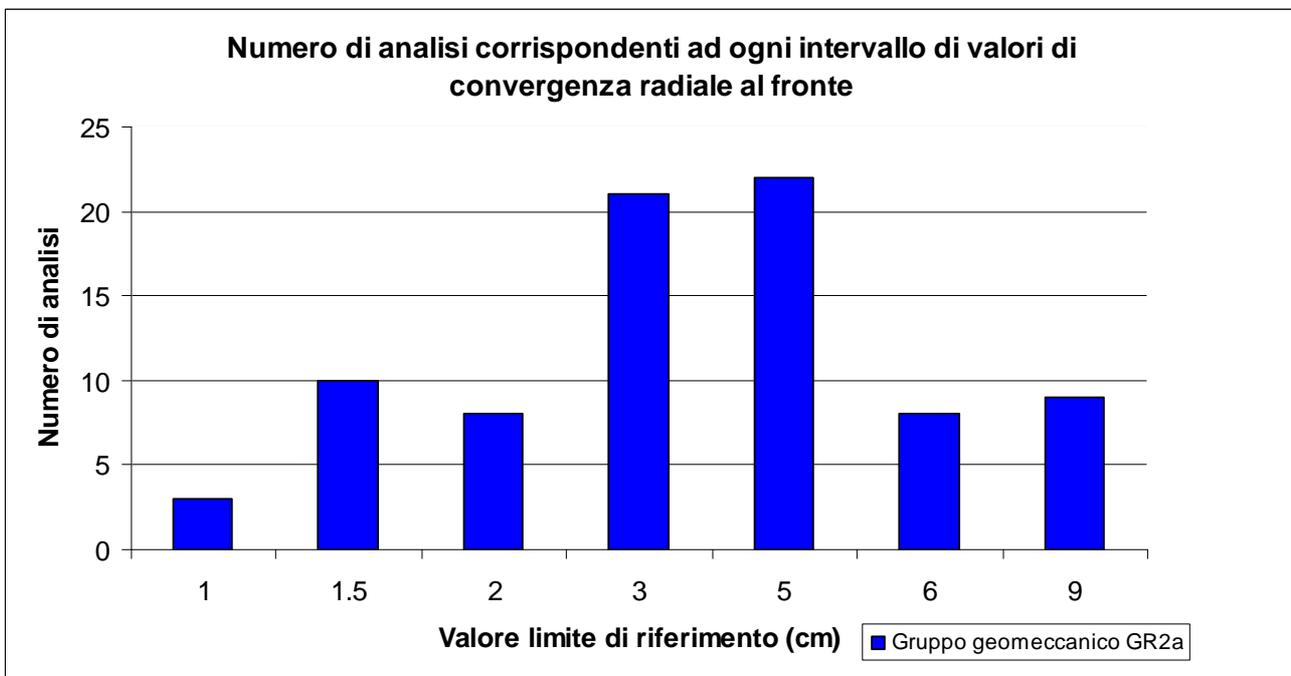
Per ciascun gruppo geomeccanico analizzato si ricavano degli intervalli di valori di convergenza radiale al fronte ai quali viene associato una percentuale di ricorrenza relativa alle analisi numeriche svolte. Si è calcolato il valore medio di ogni intervallo e si sono raggruppati i valori in intervalli significativi al fine di valutare la variabilità del valore di convergenza per ogni gruppo geomeccanico. Si sono svolte 27 analisi per ogni range di copertura riportato nella tabella precedente per un totale di 81 analisi per ogni gruppo geomeccanico.

Si riportano di seguito i grafici relativi ad ogni gruppo geomeccanico delle Argilliti a palombini.

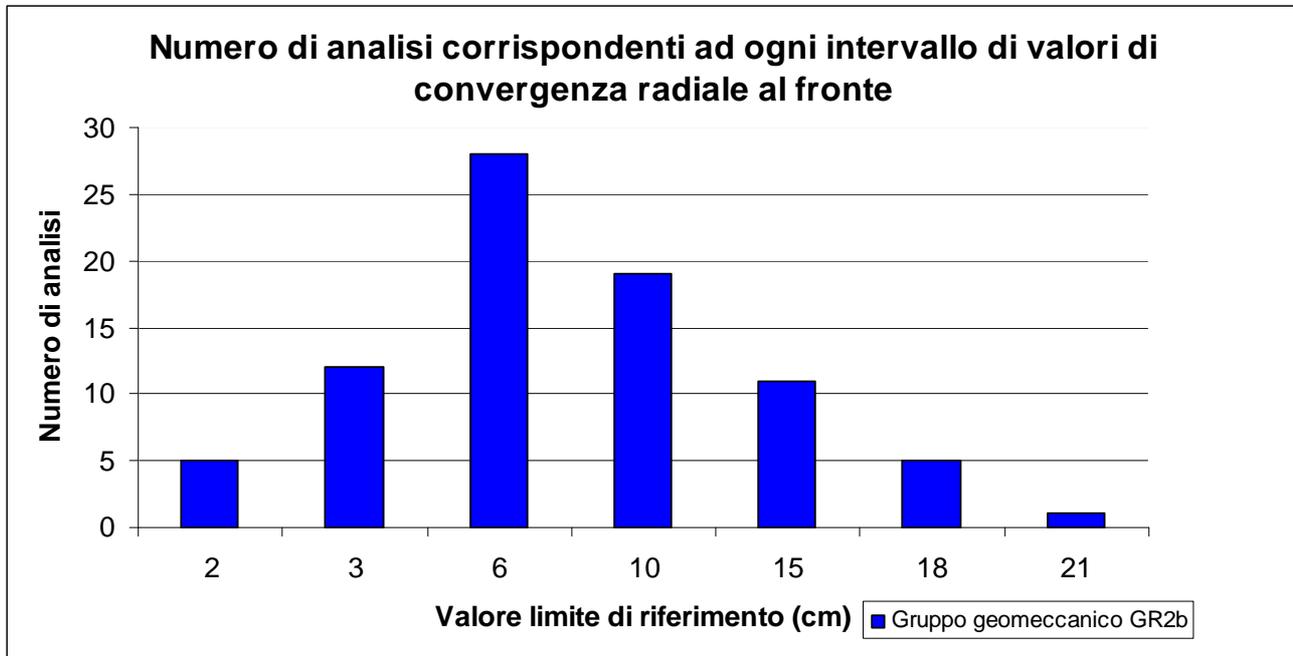
Gruppo geomeccanico GR1



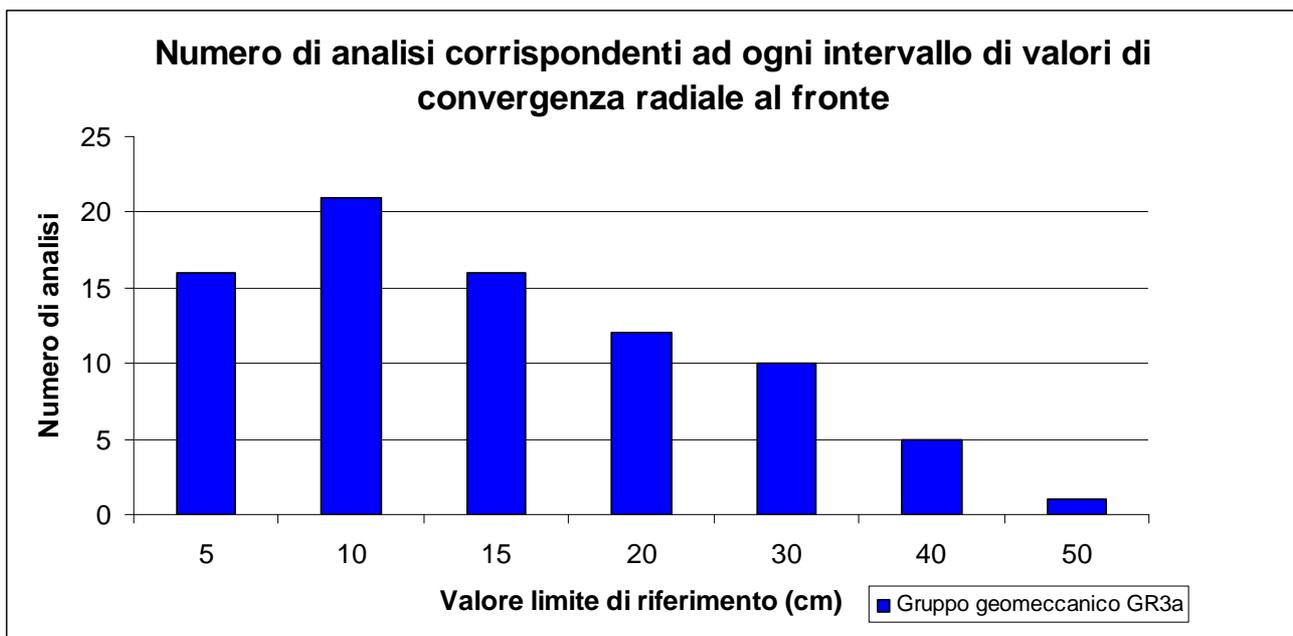
Gruppo geomeccanico GR2a



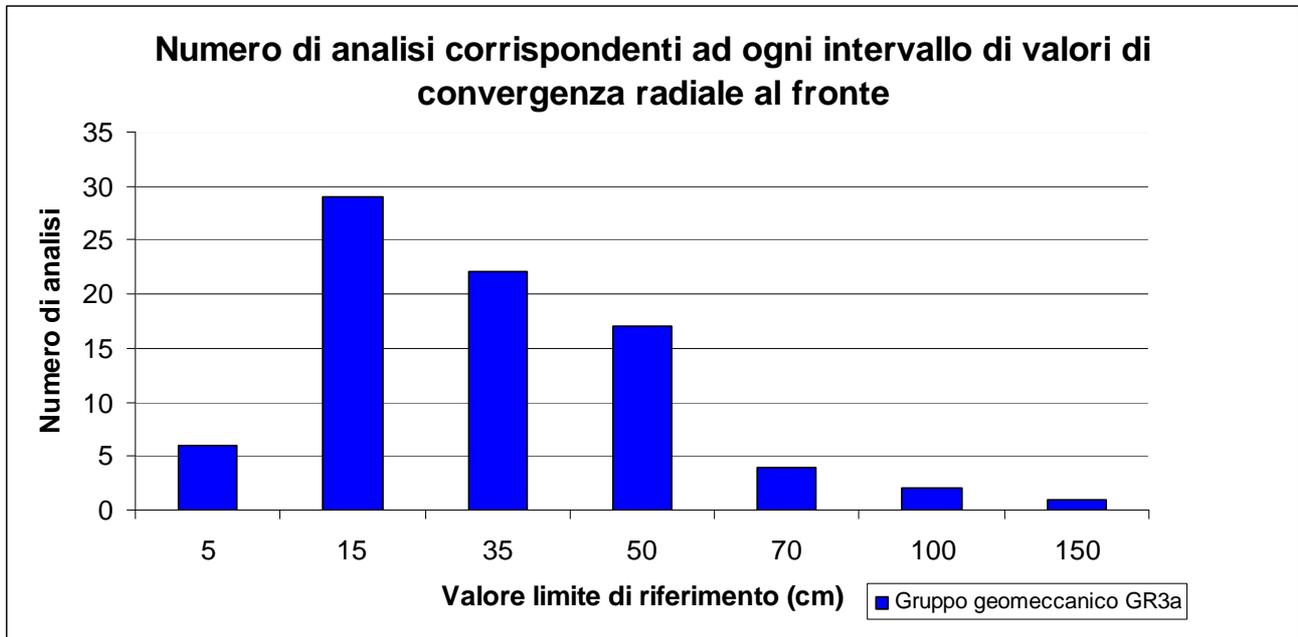
Gruppo geomeccanico GR2b



Gruppo geomeccanico GR3a



Gruppo geomeccanico GR3b



Per le considerazioni relative alle analisi parametriche si rimanda al paragrafo 6.1.3.

Formazione del molare

RISULTATI ANALISI LC - FASE DI DIAGNOSI											
Formazione geologica	Copertura (m)	R _m (m)	H/D _{medio} (m)	U _{rad} (cm)	R _{pl} (m)	R _{pl} /R _m	U _{fronte} (cm)	U _{fronte} /R _m	R _{pl fronte} (m)	R _{pl fronte} /R _m	Comportamento
Molare <i>Cementazione elevata</i>	200	5.35	18.7	1.8	6.62	1.27	0.81	0.2%	5.88	1.10	B
	300	5.35	28.0	3.2	7.62	1.42	1.33	0.2%	6.17	1.15	B
	400	5.35	37.4	4.9	8.41	1.57	1.93	0.4%	6.45	1.21	B
Molare <i>Cementazione modesta/scarsa</i>	200	5.35	18.7	3.3	7.91	1.48	1.36	0.3%	6.27	1.17	B
	300	5.35	28.0	6.2	9.24	1.73	2.35	0.4%	6.73	1.26	B
	400	5.35	37.4	10.1	10.61	1.98	3.58	0.7%	7.17	1.34	B
Zona di faglia / Piani di taglio	200	5.35	18.7	25.7	14.64	2.74	7.70	1.4%	8.34	1.56	B-C
	300	5.35	28.0	64.4	20.22	3.78	16.38	3.1%	9.74	1.82	C
	400	5.35	37.4	134.8	26.67	4.99	29.85	5.6%	11.13	2.08	C

Tabella 6-9. Formazioni di molare: fase di diagnosi – linee caratteristiche

Dove:

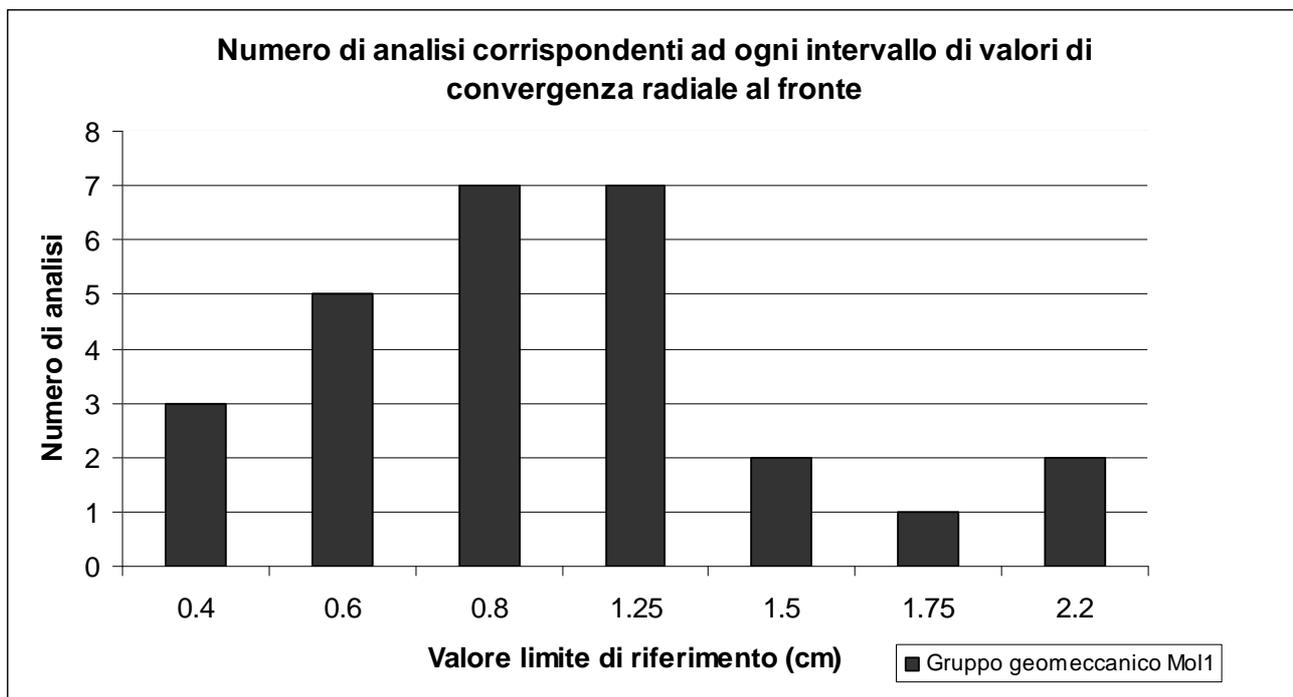
- R_m= raggio (in fase di diagnosi si è assunto un raggio medio pari a 5.35m)
- γ= peso specifico di volume
- c_p=coesione di picco
- c_r=coesione residua
- φ_p=angolo d'attrito di picco
- φ_r=angolo d'attrito residuo
- E =modulo elastico
- ν=coefficiente di Poisson
- U_{rad}=spostamento radiale del cavo
- U_{fronte}=spostamento al fronte
- R_{pl}=raggio plastico del cavo
- R_{pl fronte}=raggio plastico al fronte

In particolare, secondo le formulazioni di Lombardi (1985), il valore di U_{fronte} indica la convergenza del cavo presso il fronte (ovvero la preconvergenza del nucleo).

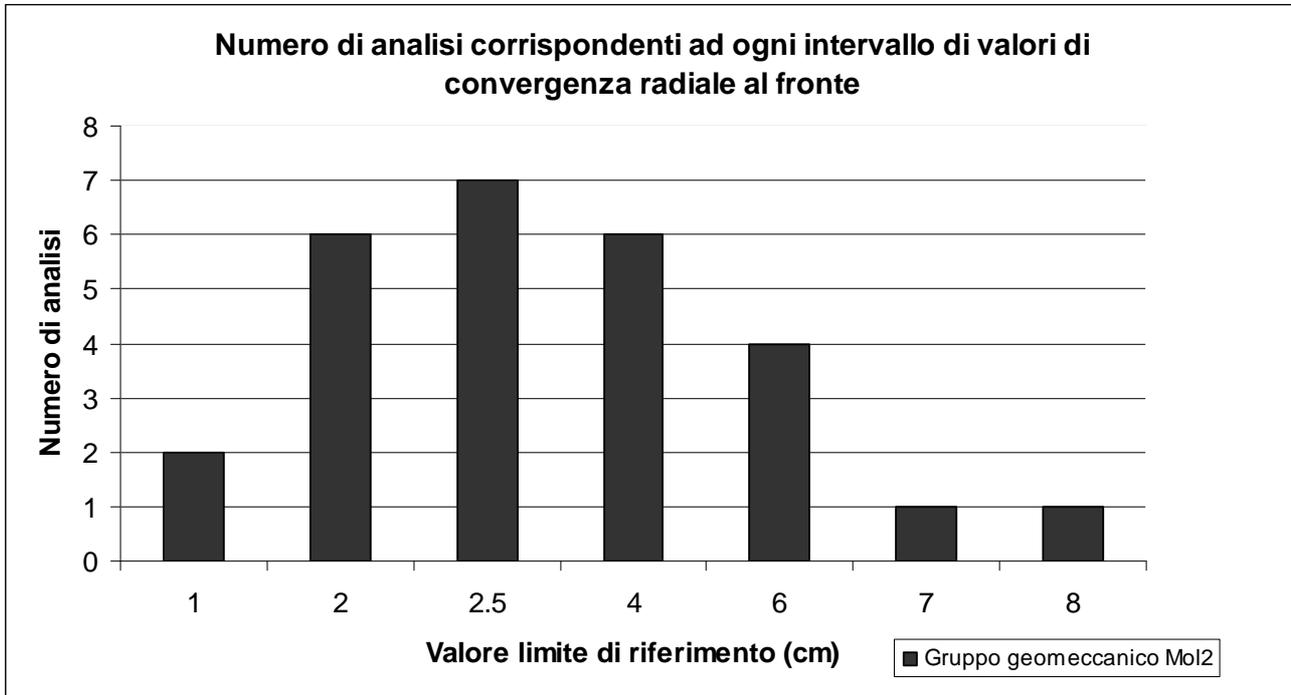
Analisi parametriche formazioni di molare

Relativamente le formazioni di molare si è svolta un'analisi parametrica per ognuno dei tre gruppi geomeccanici presenti dove si sono fatti variare i parametri di calcolo tra l'altezza minima e massima di copertura. Si sono svolte 27 analisi per ogni Facies.

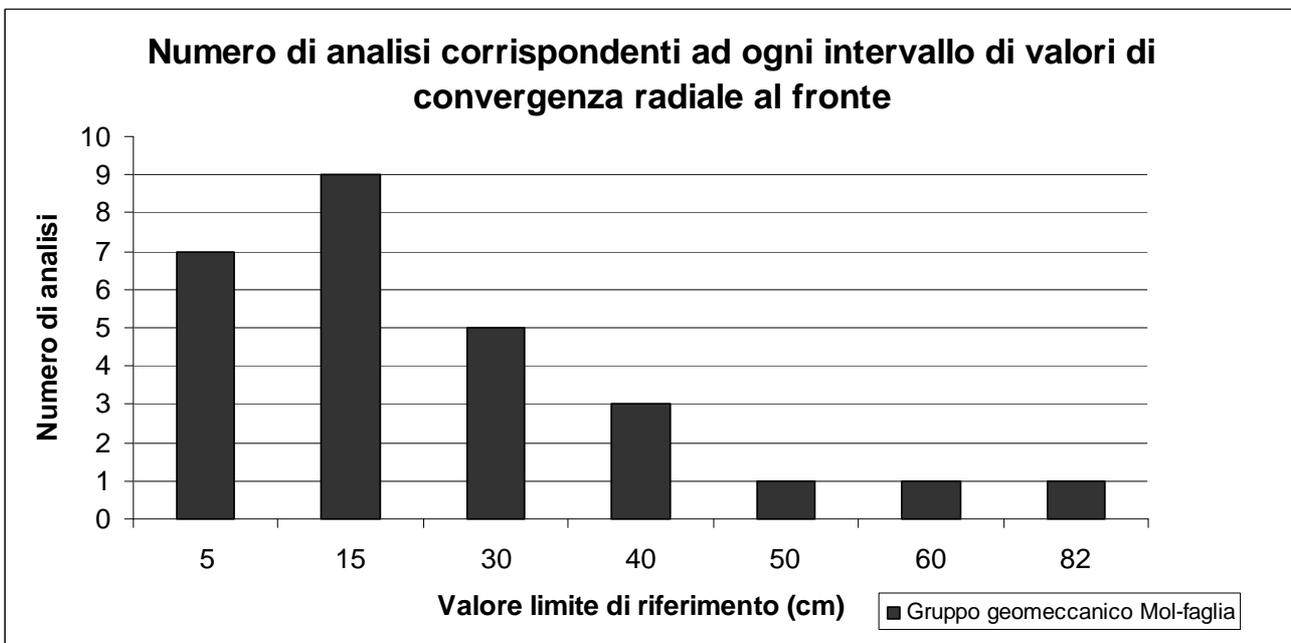
Molare - cementazione elevata



Molare – cementazione modesta



Molare – Zona di faglia



Per le considerazioni relative alle analisi parametriche si rimanda al paragrafo finale 6.1.3.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 70 di 166

Area Sicura - Val Lemme

RISULTATI ANALISI LC - FASE DI DIAGNOSI

Formazione geologica	Copertura (m)	R _m (m)	H/D _{medio} (m)	U _{rad} (cm)	R _{pl} (m)	R _{pl} /R _m	U _{fronte} (cm)	U _{fronte} /R _m	R _{pl fronte} (m)	R _{pl fronte} /R _m	Comportamento
Ap - GR1	150	6.2	12.1	0.9	7.99	1.29	0.36	0.1%	6.77	1.09	A-B
	300	6.2	24.2	2.1	8.95	1.44	0.85	0.1%	7.15	1.15	A-B
	400	6.2	32.3	3.0	9.23	1.49	1.19	0.2%	7.26	1.17	B
Ap - GR2a	150	6.2	12.1	4.3	10.25	1.65	1.61	0.3%	7.63	1.23	B
	400	6.2	32.3	20.0	14.62	2.36	6.69	1.1%	9.09	1.47	B-C
Ap - GR2b	150	6.2	12.1	9.0	12.99	2.10	3.07	0.5%	8.53	1.38	B
	400	6.2	32.3	48.1	19.79	3.19	14.14	2.3%	10.52	1.70	C
Ap - GR3a	150	6.2	12.1	14.6	16.28	2.63	4.56	0.7%	9.51	1.53	B-C
Ap - GR3b	150	6.2	12.1	33.5	23.20	3.74	9.04	1.5%	11.30	1.82	B-C

Dove:

- R_m= raggio (in fase di diagnosi si è assunto un raggio medio pari a 5.35m)
- γ= peso specifico di volume
- c_p=coesione di picco
- c_r=coesione residua
- φ_p=angolo d'attrito di picco
- φ_r=angolo d'attrito residuo
- E =modulo elastico
- ν=coefficiente di Poisson
- U_{rad}=spostamento radiale del cavo
- U_{fronte}=spostamento al fronte
- R_{pl}=raggio plastico del cavo
- R_{pl fronte}=raggio plastico al fronte

In particolare, secondo le formulazioni di Lombardi (1985), il valore di U_{fronte} indica la convergenza del cavo presso il fronte (ovvero la preconvergenza del nucleo).

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315"> <tr> <td>Foglio 71 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 71 di 166
Foglio 71 di 166		

6.1.3. Considerazioni conclusive

Le analisi condotte, con riferimento ai risultati ottenuti dalle Linee Caratteristiche hanno permesso di assegnare a ciascun contesto geomeccanico uno dei tre comportamenti del fronte allo scavo menzionati nei paragrafi precedenti; verranno nel seguito discusse le principali formazioni geomeccaniche analizzate. L'analisi parametrica impostata sulla variazione di parametri caratterizzanti l'ammasso roccioso per determinate altezze di copertura ha permesso di identificare la variazione della convergenza radiale in ciascun gruppo.

Argilliti a Palombini (GR1)

Le analisi condotte, con riferimento alla linee caratteristiche in assenza di interventi, hanno evidenziato sempre almeno un comportamento allo scavo di tipo "fronte stabile a breve termine" (categoria B) con convergenze radiali molto limitate e uno spostamento del cavo in assenza di interventi inferiore ai 4cm; i fenomeni di plasticizzazione attorno allo scavo sono limitati a circa 1.1-1.2 volte il raggio. Al termine dell'analisi parametrica relativa alla fase di diagnosi si è registrato un significativo numero di analisi dalle quali si rilevano valori di convergenza radiale nell'intorno di 1cm.

Dalle analisi svolte risulta necessario operare unicamente un adeguato confinamento delle pareti dello scavo e di contrastare tempestivamente i fenomeni deformativi del cavo mediante l'utilizzo di sistemi di priverivestimento di adeguata rigidezza.

Argilliti a Palombini (GR2a)

Le analisi condotte, con riferimento alla linee caratteristiche in assenza di interventi, hanno evidenziato un comportamento allo scavo generalmente di tipo B, sebbene il cavo presenti all'aumentare della copertura spostamenti non trascurabili. Le Linee caratteristiche evidenziano degli spostamenti radiali al fronte massimi dell'ordine di circa 8cm, mentre in corrispondenza della copertura massima la deformazione del cavo superiore supera i 20cm; i fenomeni di plasticizzazione si estendono per una fascia prossima a 1.5 volte il raggio di scavo. L'analisi parametrica genera un significativo numero di analisi (circa 40) con valori di convergenza radiale che si assestano nell'intervallo 2cm-5cm. Da quanto discusso attraverso il Metodo delle Linee Caratteristiche appare evidente la necessità di operare un adeguato confinamento delle pareti dello scavo e di contrastare tempestivamente i fenomeni deformativi del cavo mediante l'utilizzo di sistemi di priverivestimento di adeguata rigidezza; alla massima copertura il comportamento è prossimo alla categoria C. Si ritiene opportuno prevedere anche la possibilità di effettuare interventi di preconsolidamento del fronte, volti ad incrementare il valore di resistenza del nucleo.

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315"> <tr> <td>Foglio 72 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 72 di 166
Foglio 72 di 166		

Argilliti a Palombini (GR2b)

Le analisi condotte, con riferimento alla linee caratteristiche in assenza di interventi, hanno evidenziato generalmente un comportamento allo scavo intermedio tra quello di tipo B/C (fronte stabile a breve termine/instabile). Infatti le linee caratteristiche evidenziano degli spostamenti radiali al fronte che nelle peggiori delle condizioni analizzate raggiungono i 20cm alla massima copertura ed una deformazione del cavo molto importante; i fenomeni di plasticizzazione si estendono per una fascia prossima a 1,5 – 2 volte il raggio di scavo. Il comportamento all'aumentare della copertura tende ad essere sempre maggiormente assimilabile a quello della categoria "C". Si consideri però che sono stati impiegati anche nelle analisi al alte coperture i valori medi relativi al suddetto gruppo geomeccanico. Le precedenti considerazioni sono altresì giustificate da un analisi parametrica dalla quale si evince un aumento dei valori di convergenza radiale rispetto al gruppo GR2a nell'ordine di qualche centimetro. Da quanto discusso attraverso il Metodo delle Linee Caratteristiche appare evidente la necessità di operare un adeguato confinamento delle pareti dello scavo e di contrastare tempestivamente i fenomeni deformativi del cavo mediante l'utilizzo di sistemi di priverivestimento di adeguata rigidità e di prevedere interventi di preconsolidamento del fronte, volti ad incrementare il valore di resistenza del nucleo.

Argilliti a Palombini (GR3a e GR3b)

Le analisi condotte, con riferimento alla linee caratteristiche in assenza di interventi, hanno evidenziato un comportamento classificabile come a "fronte instabile"(categoria C).

Le Linee caratteristiche evidenziano infatti delle deformazioni al fronte superiore ed una convergenza del cavo che raggiungono valori metrici per le massime coperture (non compatibili con la stabilità dell'opera); i fenomeni di plasticizzazione raggiungono estensioni nell'ordine di 1,5 – 3 volte il raggio di scavo. Relativamente le analisi parametriche si osserva relativamente al gruppo GR3a un considerevole numero di analisi relativo agli intervalli 5-10 cm e 10-15 cm anche se si registra un numero di analisi pari a circa 10 per quanto riguarda intervalli di valori di convergenza che arrivano a valori nell'intorno dei 20 cm e 30 cm. Il gruppo geomeccanico GR3b è caratterizzato da intervalli di valori di convergenza che raggiungono valori di 30 cm e 50 cm nei quali è possibile collocare un numero di analisi cospicuo sebbene l'intervallo iniziale (5-15 cm) racchiuda circa 30 analisi sulle totali.

Da quanto discusso attraverso il Metodo delle Linee Caratteristiche appare evidente la necessità di prevedere interventi di preconsolidamento del fronte, volti ad incrementare il valore di resistenza del nucleo, e del contorno dello scavo, per favorire la creazione di un effetto arco.

Appare inoltre evidente la necessità di operare un adeguato confinamento delle pareti dello scavo e di contrastare tempestivamente i fenomeni deformativi del cavo mediante l'utilizzo di sistemi di priverivestimento di adeguata rigidità ed eventualmente con il getto ravvicinato al fronte dei rivestimenti definitivi.

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315"> <tr> <td>Foglio 73 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 73 di 166
Foglio 73 di 166		

Formazione di molare (cementazione elevata)

Le analisi condotte, con riferimento alla linee caratteristiche in assenza di interventi, hanno evidenziato un comportamento di tipo B. Gli spostamenti radiali per la massima copertura analizzata raggiungono un valore massimo pari a 5 cm. Si evince che i fenomeni di plasticizzazione si propagano per una zona pari a 1.1 – 1.2 il raggio, si ritiene dunque opportuno identificare il comportamento di questo raggruppamento geomeccanico come stabile a breve termine. L'analisi parametrica evidenzia due range di spostamenti ai quali si possono riferire circa 7 analisi cadauno, gli intervalli sono quelli tra 0.6cm – 0.8cm e tra 0.8cm – 1.25cm.

L'utilizzo di sistemi di priverivestimento di adeguata rigidità ed un preconsolidamento del fronte utile ad incrementare il valore di resistenza del nucleo permettono di instaurare un valido sistema di rinforzo tale da contrastare i fenomeni di instabilità.

Formazione di molare (cementazione modesta)

Le linee caratteristiche in fase di diagnosi descrivono un comportamento di instabilità a breve termine per tutte le altezze di copertura oggetto di analisi. Si segnalano spostamenti radiali al fronte significativi che raggiungono i 3.5 cm una volta raggiunta la massima altezza di copertura. La fascia di plasticizzazione si estende per una zona pari a 1.2 – 1.3 volte il raggio. La valutazione dei risultati provenienti dall'analisi parametrica evidenziano un significativo numero di analisi con valori assegnabili ad intervalli di spostamento tra i 2,5cm e i 6cm.

Si rendono necessari interventi di rinforzo tali da garantire la stabilità necessaria.

Zona di faglia

Il terzo gruppo geomeccanico analizzato è caratterizzato da un comportamento instabile come si denota dai notevoli spostamenti radiali e dalla rilevante estensione della zona di plasticizzazione. All'aumentare della copertura si registra uno spostamento radiale massimo nell'ordine del metro, uno spostamento massimo al fronte pari a 30cm e una estensione massima della zona di plasticizzazione nell'ordine di 2 volte il raggio. I valori di convergenza radiali derivanti dall'analisi parametriche sono contraddistinti da un ingente numero di analisi racchiuse tra gli intervalli di spostamento 5cm – 15cm e 15cm – 30 cm.

I parametri precedentemente analizzati descrivono un quadro di chiara instabilità evidenziando la chiara necessità di provvedere con interventi di stabilizzazione volti ad incrementare il valore di resistenza del nucleo e del contorno dello scavo al fine di favorire la creazione di un effetto arco.

6.2. Fenomeni di Squeezing

Per le considerazioni a riguardo dei fenomeni di squeezing si rimanda alla relazione geotecnica relativa alla tratta in esame.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315"> <tr> <td>Foglio 74 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 74 di 166
Foglio 74 di 166		

7. DESCRIZIONE DELLE SEZIONI TIPO (FASE DI TERAPIA)

Sulla base delle analisi condotte nella fase di diagnosi, si presentano gli aspetti che hanno guidato la definizione degli interventi, allo scopo di garantire condizioni di stabilità del fronte e del cavo. Per la descrizione delle sezioni tipo di avanzamento, i campi di impiego e le relative percentuali di applicazione previste lungo il tracciato si rimanda alla Relazione Tecnica e alle Linee Guida.

7.1. Tipologie di intervento in fase costruttiva

Nei capitoli precedenti sono stati definiti tre tipi di comportamento d'ammasso allo scavo che prevedono l'impiego di opportuni interventi scelti in base alle caratteristiche geotecniche/geomeccaniche dei terreni interessati dagli scavi, determinando così la scelta delle sezioni tipo più adatte.

Per quanto riguarda le sezioni tronco-coniche (B0Vsb / B2Vsb / B0Vsb-r / B0V / B2V), queste non verranno analizzate numericamente nel seguito in quanto dimensionate direttamente dalle rispettive sezioni a carpenteria non variabile (B0Lsb e B0/1sb, B2/1sb, B0sb-r, B0L e B0, B2), avendo queste ultime interventi analoghi o inferiori ed essendo applicate nei medesimi contesti geomeccanici. Si precisa inoltre che gli infilaggi metallici non iniettati, previsti per le sezioni B0Vsb, B0V e B0Vsb-r, sono da considerarsi unicamente mezzi d'opera e come tali non comporterebbero alcuna variazione nelle analisi.

CASO A) fronte stabile:

I fenomeni deformativi avvengono in campo elastico; il materiale ha comportamento di tipo lapideo per cui si possono ipotizzare locali fenomeni di instabilità al contorno riconducibili per lo più al distacco gravitativo di blocchi o volumi rocciosi, individuati dall'intreccio di superfici di discontinuità preesistenti nell'ammasso oppure create dai fenomeni di distensione prodotti dalle modalità di scavo. Il probabile comportamento allo scavo tipo A, "a fronte stabile", consente di prevedere, quali interventi di prima fase, interventi di solo contenimento del cavo quali la realizzazione di uno strato di spritz-beton a seguito della messa in opera di bulloni radiali o centine in funzione del grado di discontinuità dell'ammasso. I carichi gravanti sulla struttura in questi contesti geomeccanici sono prevalentemente di tipo gravitativo, funzione della frequenza dei giunti e delle fratture ed in particolare modo della resistenza al taglio delle superfici di discontinuità. Il rilascio di tali solidi di carico, in categorie di comportamento tipo A, non avviene generalmente all'apertura del cavo bensì in un secondo tempo quale conseguenza del richiamo di umidità al contorno dello scavo, della circolazione d'acqua nelle fratture, dall'alterazione della roccia a contatto con gli agenti atmosferici, nonché dalle sollecitazioni dinamiche conseguenti alle vibrazioni prodotte durante le operazioni di scavo con esplosivo.

E' pertanto opportuno stabilizzare i suddetti cunei mediante la messa in opera di bulloni metallici radiali di tipo passivo, ad ancoraggio puntuale in presenza di modesti gradi di separazione d'ammasso, o ad ancoraggio continuo per gradi di separazione maggiori, e realizzare un guscio di spritz-beton a protezione della superficie di scavo ed a contenimento del cavo.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 230 1532 315"> <tr> <td>Foglio 75 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 75 di 166
Foglio 75 di 166		

CASO B) fronte stabile a breve termine:

Si possono ipotizzare fenomeni di instabilità più o meno diffusi al contorno del cavo dovuti alla plasticizzazione dell'ammasso roccioso e conseguenti fenomeni deformativi (convergenze radiali) di ordine centimetrico.

Tali deformazioni, se non regimate mediante opportuni e tempestivi interventi di preconsolidamento e/o di consolidamento, possono innescare decompressioni progressivamente crescenti all'interno dell'ammasso roccioso sviluppando di conseguenza carichi maggiori sia nel breve termine che nel lungo termine.

Come interventi di preconsolidamento si possono utilizzare:

- chiodi in vetroresina al fronte per aumentare le caratteristiche di resistenza del nucleo;
- drenaggi al contorno in caso di presenza d'acqua per lo scarico delle pressioni interstiziali.

Gli interventi di consolidamento lungo la cavità consistono principalmente in:

- prerivestimento costituito da spritz-beton;
- centine metalliche.

Questi interventi di preconsolidamento e consolidamento concorreranno a formare diverse sezioni tipo (descritte in seguito) che si differenziano tra di loro in funzione delle formazioni geologiche incontrate.

CASO C) fronte instabile:

I fenomeni deformativi, in assenza di interventi, sono di entità maggiore rispetto al caso precedente e possono causare la rottura e il collasso del cavo a causa dell'instabilità del fronte di scavo. Per un avanzamento in galleria privo fenomeni deformativi incontrollabili, è indispensabile operare "preconsolidamenti" lanciati oltre il fronte di scavo che garantiscano sia la tenuta del fronte stesso che quella della fascia di terreno perimetrale al cavo.

Questi preconsolidamenti possono essere di diversa natura, in funzione delle differenti caratteristiche geologiche delle formazioni attraversate lungo il tracciato:

- jet-grouting sub-orizzontale;
- anello consolidato da iniezioni cementizie;
- chiodi in vetroresina al fronte;
- drenaggi.

Sono inoltre necessari interventi di consolidamento al contorno del cavo in modo da fornire il necessario contenimento nel breve termine. Questi interventi possono essere il rivestimento di 1^a fase con spritz-beton e centine metalliche.

In previsione di un comportamento tipo C, al fine di effettuare un controllo dello stato deformativo al fronte, appare consigliabile l'esecuzione di un preconsolidamento sistematico del fronte mediante

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315"> <tr> <td>Foglio 76 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 76 di 166
Foglio 76 di 166		

elementi strutturali o tubi in vetroresina ad aderenza migliorata, tali da irrigidire il nucleo di scavo e ridurre i valori di estrusione del fronte e conseguentemente di preconvergenza del cavo. Tale operazione consentirebbe di mantenere le proprietà del materiale prossime alle condizioni di picco, o al limite di ridurre il decadimento. Le deformazioni al fronte si traducono infatti in decompressione al contorno del cavo con decremento della resistenza d'ammasso e incremento delle spinte sui pririvestimenti.

Andrà inoltre prevista la realizzazione dei pririvestimenti a seguito di ogni singolo sfondo di avanzamento, mediante posa in opera di centine metalliche ed un congruo strato di spritz-beton. Sempre per la categoria di comportamento C occorre inoltre prevedere la possibilità di stabilizzare il piede della centina mediante il getto di arco rovescio e murette a distanze anche inferiori ai 2 diametri dal fronte di scavo.

7.2. Sezioni tipo di avanzamento

Le sezioni tipo caratteristiche del Progetto Esecutivo relativamente alle sezioni a singolo binario da applicarsi all'interno delle Argilliti a Palombini sono le seguenti: B0Lsb, B0V/sb, B0/1sb, B1sb, B2Vsb, B2/1sb, B4/1sb, C4sb e C2sb. In relazione alla Formazione di molare le sezioni da impiegare per la galleria a singolo binario sono denominate B0sb-r, B0Vsb-r, B2sb-r, C1sb-r e C2sb-r. Infine, per quanto riguarda l'area sicura le sezioni previste sono B0L, B0V, B0, B1, B2V, B2, B4, C4 e C2. L'applicazione delle sezioni tipo è indicata in termini percentuali nei profili geomeccanici, mentre per quanto riguarda i criteri mediante i quali adottare la corretta sezione tipo si rimanda alle Linee Guida. I criteri per la loro applicazione sono stati determinati in funzione dalla litologia degli ammassi attraversati, delle caratteristiche geomeccaniche dello stato tensionale in situ, ovvero del valore di copertura (H), e delle geometrie di scavo; i seguenti fattori hanno infatti permesso di definire il comportamento del fronte di scavo, in termini deformativi (entità dei valori di pre-convergenza ed estrusione, evoluzione in campo elastico o elasto-plastico) e quindi le condizioni di stabilità: "stabile" – categoria A – "stabile a breve termine" – categoria B – "instabile" – categoria C.

Argilliti a Palombini

Laddove si individua un comportamento del fronte di tipo "stabile a breve termine", si procede con la sezione B; in questo caso l'avanzamento sarà condotto per le sezioni a singolo binario e per l'area sicura Val Lemme rispettivamente mediante le sezioni tipo B0Lsb – B0L, B0V/sb – B0V, B0/1sb – B0, B1sb – B1, B2Vsb – B2V, B2sb – B2, B4/1sb – B4 a seconda del grado di separazione manifestato localmente dell'ammasso e alla copertura. Nel caso di comportamento di tipo instabile "C" sono invece previste rispettivamente le sezioni C4sb – C4 e C2sb – C2. Oltre al contenimento del cavo operato dal rivestimento di prima fase, mediante centine metalliche inglobate in uno strato di spritz-beton, è prevista per le sezioni di tipo B1 e B4 una bullonatura radiale mentre per le sezione di tipo B2 si utilizza un preconsolidamento del fronte mediante l'impiego di elementi in VTR. In corrispondenza di materiali che presentano minori capacità di autosostentamento, ovvero quelli assimilabili al Gruppo geomeccanico 3, dove viene evidenziato un comportamento del fronte di tipo

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315"> <tr> <td>Foglio 77 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 77 di 166
Foglio 77 di 166		

“instabile” è sempre prevista la realizzazione in avanzamento di opportuni interventi di consolidamento al contorno e di preconsolidamento del fronte di scavo. In presenza di un ammasso particolarmente fratturato si prevede l’adozione della sezione di tipo C2 le cui metodologie di consolidamento consentono di mantenere il più possibile indisturbate le condizioni tenso – deformative dell’ammasso. Ciò è reso possibile dallo stato di coazione indotto nel terreno da iniezioni ad alta pressione o dall’espansione di opportune miscele. Qualora le caratteristiche dell’ammasso risultino migliori si prevede l’utilizzo della sezione di tipo C4, per la quale il consolidamento al contorno è effettuato attraverso VTR cementati. Per tutte le sezioni adottate, lo scavo a piena sezione consente inoltre – in funzione del comportamento deformativi del cavo - di chiudere il rivestimento del cavo con il getto di murette e arco rovescio a distanza ravvicinata dal fronte, e di procedere successivamente in tempi brevi al completamento del rivestimento definitivo con il getto del rivestimento di calotta, limitando consistentemente i fenomeni deformativi. Per maggiori informazioni in merito all’applicazione e alle modalità esecutive delle sezioni tipo sopra indicate si faccia riferimento alle Linee Guida e al profilo geomeccanico.

Formazione di Molare

Laddove si individua un comportamento del fronte di tipo “stabile a breve termine”, si procede con la sezione B; in questo caso l’avanzamento sarà condotto mediante le sezioni tipo B0sb-r – B0Vsb-r e B2sb-r – B2Vsb-r a seconda del grado di separazione manifestato localmente dell’ammasso. Nel caso di comportamento di tipo instabile “C” sono invece previste rispettivamente le sezioni C2sb-r e C1sb-r, quest’ultima da applicarsi unicamente laddove la tipologia di ammasso presenti una conformazione tale da rendere possibile la realizzazione di una coronella in jet-grouting. Oltre al contenimento del cavo operato dal rivestimento di prima fase, mediante centine metalliche inglobate in uno strato di spritz-beton, è previsto per le sezioni tipo B2sb-r e B2Vsb-r un intervento di preconsolidamento del fronte mediante l’impiego di elementi in VTR. In corrispondenza di materiali che presentano minori capacità di autosostentamento, ovvero quelli aventi un grado di cementazione limitato, dove viene evidenziato un comportamento del fronte di tipo “instabile” è sempre prevista la realizzazione in avanzamento di opportuni interventi di consolidamento al contorno e di preconsolidamento del fronte di scavo. Le metodologie di consolidamento adottate consentono di mantenere il più possibile indisturbate le condizioni tenso – deformative dell’ammasso. Ciò è reso possibile dallo stato di coazione indotto nel terreno da iniezioni ad alta pressione o dall’espansione di opportune miscele. Per tutte le sezioni adottate, lo scavo a piena sezione consente inoltre – in funzione del comportamento deformativi del cavo - di chiudere il rivestimento del cavo con il getto di murette e arco rovescio a distanza ravvicinata dal fronte, e di procedere successivamente in tempi brevi al completamento del rivestimento definitivo con il getto del rivestimento di calotta, limitando consistentemente i fenomeni deformativi.

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315"> <tr> <td>Foglio 78 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 78 di 166
Foglio 78 di 166		

8. INDIVIDUAZIONE DELLE SEZIONI DI CALCOLO E ANALISI DELLE SEZIONI TIPO DI SCAVO

8.1. Premessa

Nei seguenti paragrafi sono riportati i risultati delle analisi numeriche che hanno permesso di investigare il regime tenso-deformativo nei rivestimenti strutturali previsti in progetto.

Questo è stato raggiunto tramite tre approcci differenti:

1. Stabilità del fronte
2. Metodo delle Linee Caratteristiche
3. Analisi agli elementi finiti

Le analisi di stabilità del fronte hanno consentito di cogliere le caratteristiche deformative del fronte in funzione della copertura e del materiale di scavo e quindi di predimensionare, qualora le analisi ne avessero evidenziato la necessità, gli interventi di preconsolidamento del fronte.

Il Metodo delle Linee Caratteristiche ha permesso di cogliere approssimativamente l'entità delle sollecitazioni e delle convergenze nel prerivestimento e nel rivestimento definitivo, rappresentando una fase di predimensionamento degli interventi di sostegno e di guidare le scelte circa le sezioni di galleria da sottoporre ad analisi più accurate.

L'analisi agli elementi finiti ha permesso invece di indagare più dettagliatamente per le condizioni più rappresentative il regime tensionale e deformativo nelle strutture e nell'ammasso circostante, nelle principali fasi esecutive fino alla completa realizzazione dell'opera, consentendo quindi di valutare l'evoluzione del comportamento dell'opera nel breve, medio e lungo termine.

8.2. Verifiche di stabilità del fronte con metodi analitici

Nelle successive tabelle sono riportati i principali dati di input ed i risultati ottenuti per quanto riguarda le analisi di stabilità del fronte di scavo, effettuate in base alle formazioni incontrate lungo il tracciato della galleria alle differenti coperture in cui tali condizioni si presentano. In allegato sono inseriti tutti i valori impiegati nel calcolo.

Gli interventi sono stati tenuti in conto considerando la variabilità media e la massima lunghezza dello sfondo prevista per ciascuna sezione tipo. I parametri utilizzati per il terreno sono i medesimi impiegati nel calcolo in fase di diagnosi e vengono sotto riportati in tabella per comodità di lettura. Per le sezioni aventi consolidamento al contorno si è tenuto in conto ddi tale intervento considerando in fase di terapia uno strato di terreno trattato sopra la calotta indicato come "coronella"; i parametri impiegati nel calcolo per tale strato sono coerenti a quelli utilizzati nelle successive analisi (Linee caratteristiche e analisi numeriche).

ANALISI STABILITA' DEL FRONTE - FASE DI TERAPIA - Tamez & Cornejo

Analisi	Formazione	Sezione tipo	Copertura (m)	D _{eq} (m)	N° VTR	T _{aderenza} (kPa)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	φ (°)	Sfondo (m)	SF	FS ₃
AN1	Ap-GR1	B0Lsb	150	10.70	0	0	27	770	40	4.2	2.72	4.57
AN2	Ap-GR1	B0Lsb	300	10.70	0	0	27	1175	39	4.2	2.46	4.10
AN3	Ap-GR1	B0/1sb	300	10.70	0	0	27	1175	39	3.6	2.59	4.59
AN4	Ap-GR1	B0/1sb	500	10.70	0	0	27	1550	38	3.6	2.37	4.15
AN5	Ap-GR2a	B1sb	150	10.70	0	0	27	450	38	1.2	2.92	9.68
AN6	Ap-GR2a	B1sb	300	10.70	0	0	27	725	33	1.2	2.77	8.29
AN7	Ap-GR2a	B1sb	500	10.70	0	0	27	1000	29	1.2	2.59	7.11
AN8	Ap-GR2a	B2/1sb	150	10.70	60	250	27	450	38	1	3.42	11.42
AN9	Ap-GR2a	B2/1sb	300	10.70	60	250	27	725	33	1	3.03	9.78
AN10	Ap-GR2a	B2/1sb	500	10.70	60	250	27	1000	29	1	2.77	8.40
AN11	Ap-GR2b	B4/1sb	150	10.70	60	220	27	390	33	1	3.10	9.65
AN12	Ap-GR2b	B4/1sb	300	10.70	60	220	27	590	29	1	2.74	8.21
AN13	Ap-GR2b	B4/1sb	500	10.70	60	220	27	800	25	1	2.51	6.94
AN14	Ap-GR3a	C4sb	150	10.70	70	150	26	320	30	1	2.81	8.45
AN15	Ap-GR3a	C4sb	300	10.70	70	150	26	490	26	1	2.54	7.18
AN16	Ap-GR3a	C4sb	500	10.70	70	150	26	680	22	1	2.37	6.05
AN17	Ap-GR3b	C2sb	150	10.70	55	150	26	250	27	1	2.48	7.14
AN18	Ap-GR3b	C2sb	300	10.70	55	150	26	390	23	1	2.31	6.06
AN19	Ap-GR3b	C2sb	500	10.70	55	150	26	540	19	1	2.17	4.85

Tabella 8-1. Argille a palombini: riepilogo analisi Tamez & Cornejo in fase di terapia

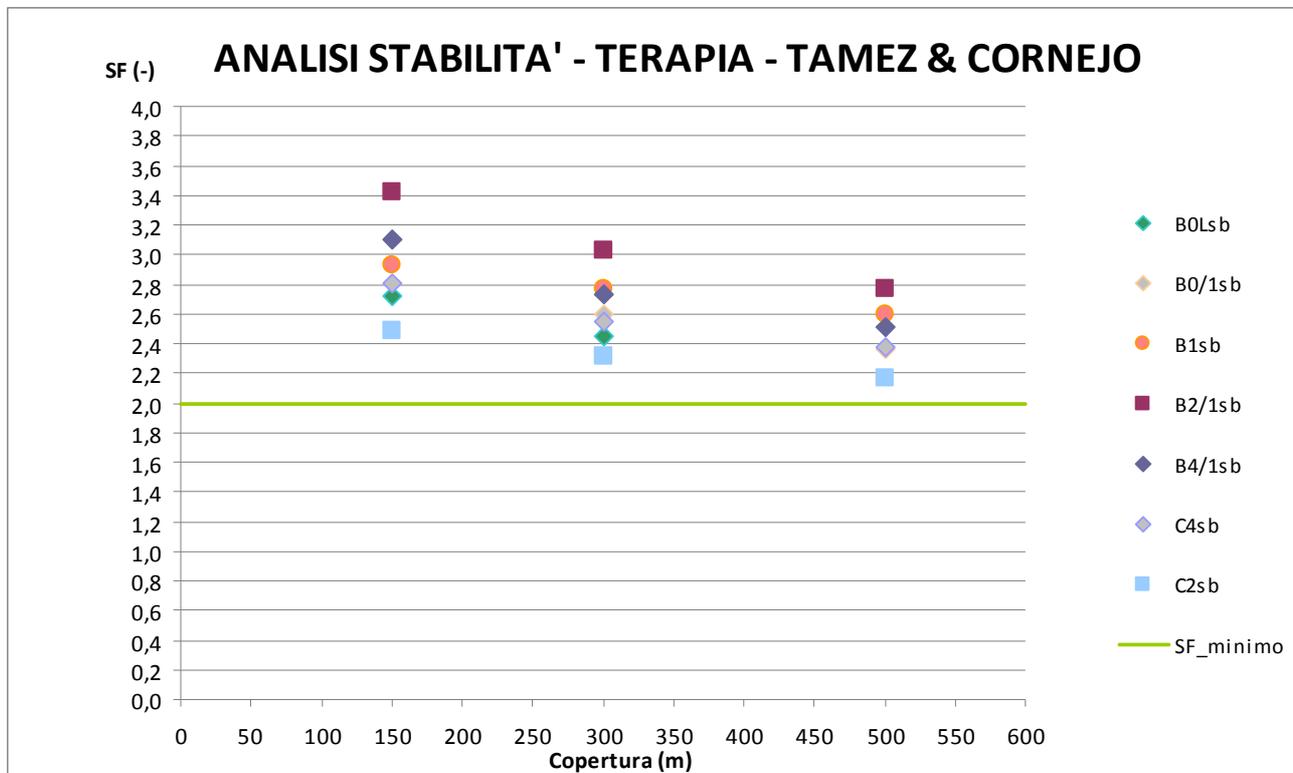


Figura 19 –Argille a palombini: Risultati analisi di stabilità - Fase di terapia

Come si evince dal grafico sopra riportato, tutte le sezioni tipo previste grazie agli interventi previsti in fase di terapia presentano un fattore di sicurezza maggiore di 2 consentendo inoltre un buon

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 80 di 166

marginale di sicurezza rispetto al valore minimo da ottenere. Si vogliono però segnalare situazioni prossime al valore limite per quanto riguarda le analisi relative al gruppo geomeccanico 3b con un valore di sicurezza che si avvicina al valore limite una volta raggiunta la massima altezza di copertura. Si noti che le sezioni di tipo B0 presentano fattori di sicurezza inferiori alle sezioni di tipo B1 e B4/1 (applicati in contesti geomeccanici migliori) in quanto si sono adottati valori di sfondo massimo superiori.

La tabella seguente riporta i risultati di analisi di stabilità al fronte per la formazione di molare. Anche in questo caso l'intervento di consolidamento al contorno relativo alla sezione C2-r è stato modellato tramite una coronella i cui parametri sono coerenti con quelli utilizzati nelle successive analisi numeriche.

ANALISI STABILITA' DEL FRONTE - FASE DI TERAPIA - Tamez & Cornejo												
Analisi	Formazione	Sezione tipo	Copertura (m)	D_{eq} (m)	N° VTR	$\tau_{aderenza}$ (kPa)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	φ (°)	Sfondo (m)	SF	FS_3
AN1	Mol-GR1	B0sb-r	200	10.70	0	0	26	770	43	4.2	2.46	4.40
AN2	Mol-GR1	B0sb-r	300	10.70	0	0	26	990	40	4.2	2.32	3.96
AN3	Mol-GR1	B0sb-r	400	10.70	0	0	26	1190	38	4.2	2.22	3.68
AN4	Mol-GR2	B2sb-r	200	10.70	45	120	26	635	39	2.1	2.86	6.44
AN5	Mol-GR2	B2sb-r	300	10.70	45	120	26	820	36	2.1	2.69	5.80
AN6	Mol-GR2	B2sb-r	400	10.70	45	120	26	990	34	2.1	2.58	5.39
AN7	Mol-Fag	C2sb-r	200	10.70	40	120	26	405	30	1	2.67	8.46
AN8	Mol-Fag	C2sb-r	300	10.70	40	120	26	520	27	1	2.55	7.54
AN9	Mol-Fag	C2sb-r	400	10.70	40	120	26	620	25	1	2.46	6.92

Tabella 8-2. Formazioni di molare: riepilogo analisi Tamez & Cornejo in fase di terapia

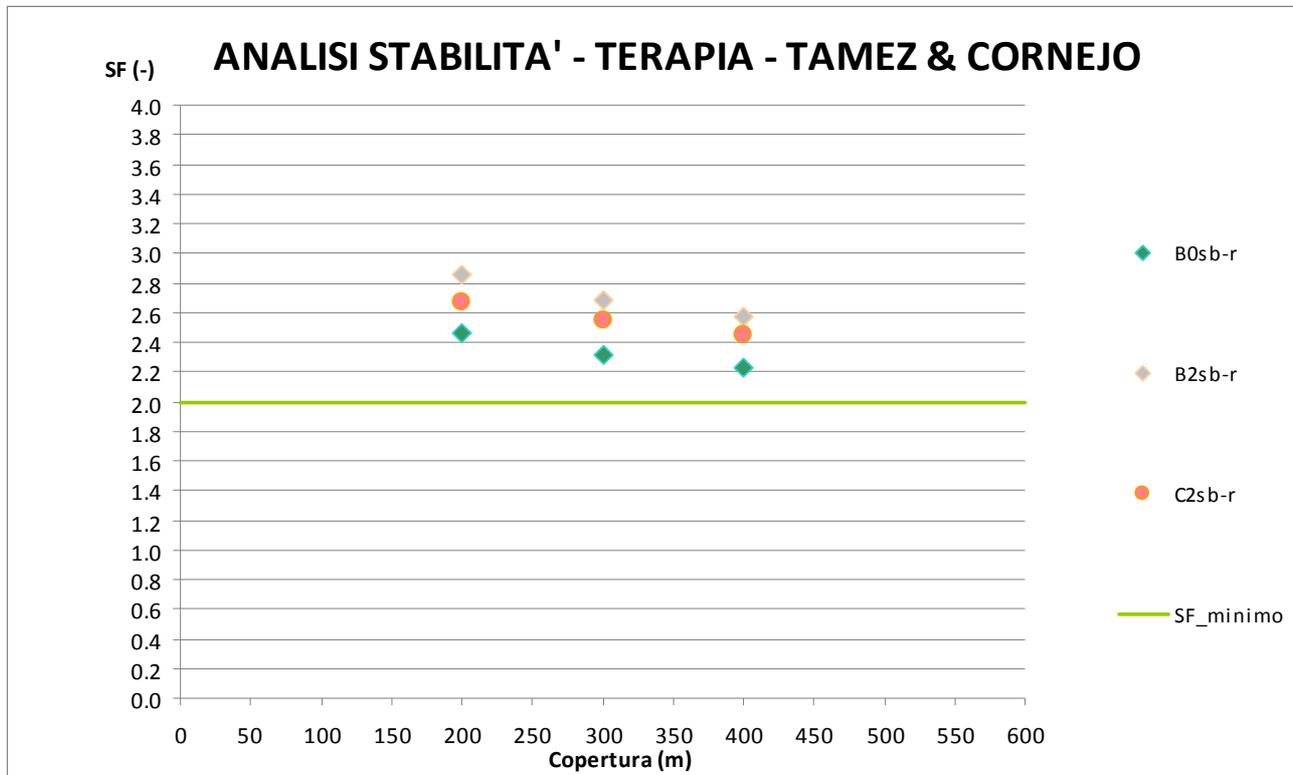


Figura 20 – Formazioni di molare: Risultati analisi di stabilità - Fase di terapia

ANALISI STABILITA' DEL FRONTE - FASE DI TERAPIA - Tamez & Cornejo

Analisi	Formazione	Sezione tipo	Copertura (m)	D_{eq} (m)	N° VTR	$\tau_{aderenza}$ (kPa)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	φ (°)	Sfondo (m)	SF	FS ₃
AN1	Ap-GR1	B0L	150	12.57	0	0	27	770	40	4.2	2.76	4.55
AN2	Ap-GR1	B0L	300	12.57	0	0	27	1175	39	4.2	2.53	5.01
AN3	Ap-GR1	B0	400	12.57	0	0	27	1450	39	3.6	2.61	4.87
AN4	Ap-GR2a	B1	150	12.57	0	0	27	450	38	1.2	3.02	10.94
AN5	Ap-GR2a	B1	400	12.57	0	0	27	850	30	1.2	2.73	8.46
AN6	Ap-GR2a	B2	150	12.57	60	250	27	450	38	1	3.41	12.94
AN7	Ap-GR2a	B2	400	12.57	60	250	27	850	30	1	2.92	10.01
AN8	Ap-GR2b	B4	150	12.57	60	220	27	390	33	1	3.10	10.94
AN9	Ap-GR2b	B4	400	12.57	60	220	27	700	27	1	2.67	8.61
AN10	Ap-GR3a	C4	150	12.57	70	150	26	320	30	1	2.82	9.57
AN11	Ap-GR3b	C2	150	12.57	55	150	26	250	27	1	2.49	8.09

Tabella 8-3. Area sicura Val Lemme: riepilogo analisi Tamez & Cornejo in fase di terapia

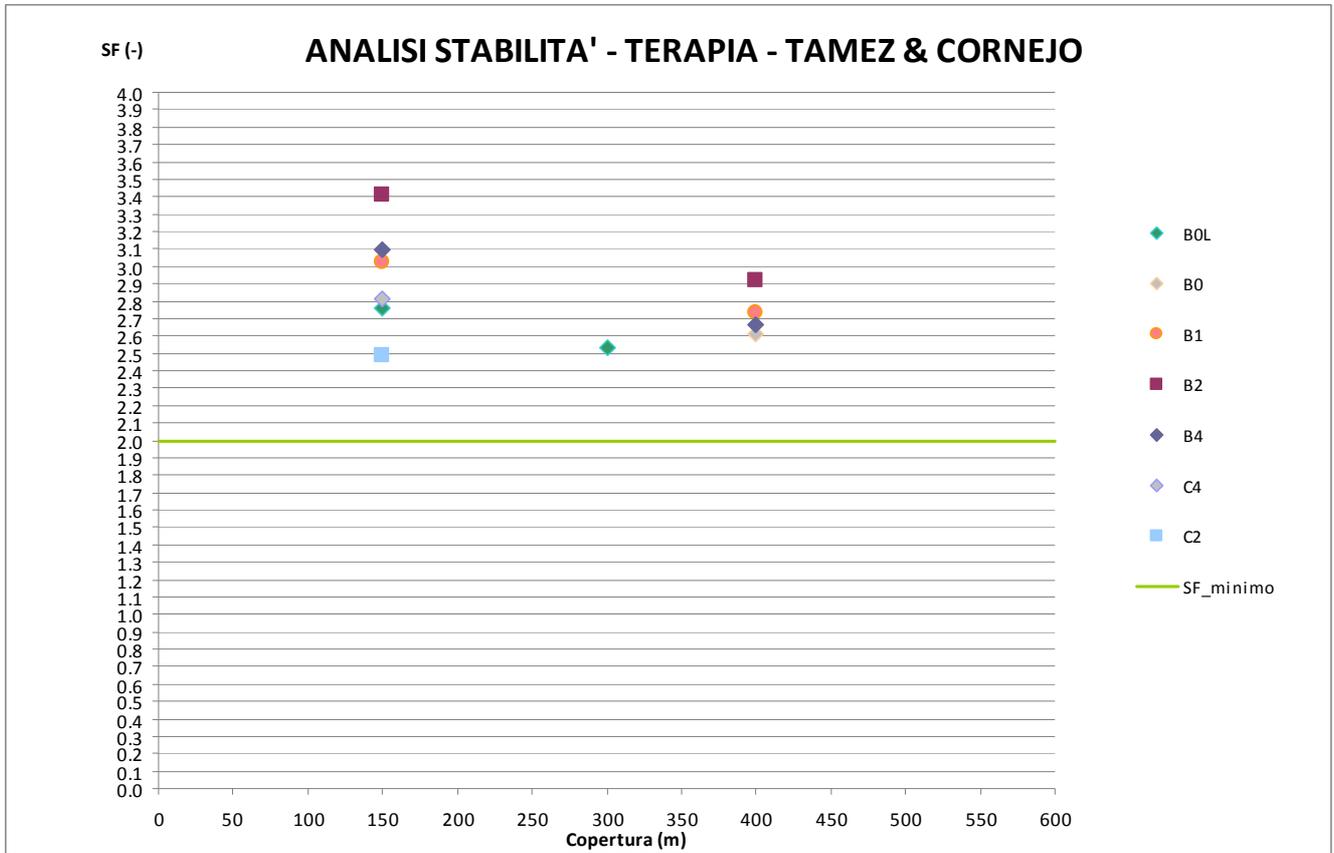


Figura 21 – Area sicura Val Lemme: Risultati analisi di stabilità - Fase di terapia

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 83 di 166

8.3. Verifiche con il metodo delle curve caratteristiche

Nel seguito vengono indicati gli interventi previsti per la realizzazione della galleria in oggetto per ogni sezione tipo ed i risultati ottenuti dalle analisi mediante le linee caratteristiche in fase di terapia.

Argille a Palombini

PRERIVESTIMENTI					
SEZIONE TIPO	Variabilità	centine	passo	Sfondi	spritz beton
	[-]	[-]	[m]	[m]	[cm]
B0Lsb	Media	2xIPN160	1,4	4,2	20
B0/1sb	Media	HEB180	1,2	3,6	25
B1sb	Media	2xIPN220	1,2	1,2	30
B2/1sb	Media	HEB200	1	1	30
B4/1sb	Media	2xIPN240	1	1	30
C2sb	Media	HEB240	1	1	30
C4sb	Media	HEB240	1	1	30

Tabella 8-4 – Fase di terapia: prerivestimenti

CONSOLIDAMENTI FRONTE					
SEZIONE TIPO	Variabilità	TIPO	N°	L-interventi	L-sovrapp
	[-]	[-]	[-]	[m]	[m]
B0Lsb	Media	-	-	-	-
B0/1sb	Media	-	-	-	-
B1sb	Media	-	-	-	-
B2/1sb	Media	VTR - CEM	60	24	6-12
B4/1sb	Media	VTR - CEM	60	24	6-12
C2sb	Media	VTR - CEM	55	24	6-12
C4sb	Media	VTR - CEM	70	24	6-12

Tabella 8-5 – Fase di terapia: consolidamenti al fronte

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
IG5103ECVCLGN0000001A00		Foglio 84 di 166

INTERVENTI CONTORNO							
SEZIONE TIPO	Variabilità	TIPO	N°		L-interventi	L-sovrapp	Maglia
	[-]	[-]	[-]		[m]	[m]	
B0Lsb	Media	-	-		-	-	-
B0/1sb	Media	-	-		-	-	-
B1sb	Media	BULLONI - F24	-		5.50 - 6.50	-	1.20 x 2.0
B2/1sb	Media	-	-		-	-	-
B4/1sb	Media	BULLONI - F28	-		5.50 - 6.50	-	1.00 x 2.00
C2sb	Media	VTR - VAL	55		24	6-12	-
		VTR Piede VAL	6+6		24	6-12	-
C4sb	Media	VTR - CEM	70		24	6-12	-
		VTR Piede CEM	6+6		24	6-12	-

Tabella 8-6 – Fase di terapia: consolidamenti al contorno

RIVESTIMENTI							
SEZIONE TIPO	Variabilità	Classe cls Rck	Sp. AR	Sp. CAL	Fronte - murette	Fronte-AR	Fronte-definitivo
	[-]	[MPa]	[cm]	[cm]			
B0Lsb	Media	25	80	60	9Φ	12Φ	15Φ
B0/1sb	Media	25	90	70	9Φ	12Φ	15Φ
B1sb	Media	25	100	80	9Φ	12Φ	15Φ
B2/1sb	Media	30	100	80	3Φ	5Φ	9Φ
B4/1sb	Media	30	100	80	3Φ	5Φ	9Φ
C2sb	Media	30	100	90	3Φ	3Φ	9Φ
C4sb	Media	30	100	90	3Φ	3Φ	9Φ

Tabella 8-7 – Fase di terapia: distanze getti

Può essere prevista la presenza di un puntone nelle sezioni C2 e C4 nel caso non vengano eseguiti i consolidamenti al piede della centina.

Per quanto riguarda le sezioni tipo C2 i consolidamenti al contorno sono stati tenuti in conto attraverso una coronella di terreno consolidato avente le seguenti caratteristiche:

- modulo elastico pari a 2 volte il valore relativo al terreno non trattato
- RQD = 50% (a 48 h) – 70% (a 7 giorni)
- $\sigma_{cm} = 1$ MPa (parametro minimo richiesto a 48h per il terreno trattato) – 1.5 (a 7 giorni)

In considerazione di tali proprietà sono stati ricavati i parametri di Hoek e Brown della coronella che risultano essere pari a quelli del terreno non trattato ad eccezione del GSI e del modulo elastico che subiscono un incremento:

- modulo elastico pari a 2 volte il valore relativo al terreno non trattato
- $\sigma_{ci} =$ Pari al valore del terreno non trattato

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
IG5103ECVCLGN0000001A00		Foglio 85 di 166

- GSI = 50
- $m_i = 19$

Si è così ottenuta la resistenza a compressione uniassiale σ_c del terreno trattato pari a 0.31 MPa.

Per quanto riguarda le sezioni tipo C4 i consolidamenti al contorno dati da VTR cementati sono stati tenuti in conto attraverso una coronella di terreno consolidato avente le seguenti caratteristiche:

- modulo elastico pari al valore del terreno non trattato
- σ_{ci} = Pari al valore del terreno non trattato
- GSI = 40
- $m_i = 19$

Si è così ottenuta la resistenza a compressione uniassiale σ_c della coronella pari a 0.25 MPa.

Per quanto riguarda le analisi eseguite in Mohr-Coulomb i valori relativi alla coronella impiegati per le sezioni C2 e C4 sono i medesimi di quelli indicati nel seguito per le analisi ad elementi finiti.

I principali risultati in termini deformativi e tensionali ottenuti in fase di terapia sono riassunti nelle seguenti tabelle. Si ricorda che si impiegheranno i parametri medi del range impiegando un criterio di rottura di tipo Hoek -Brown. È necessario inoltre specificare che l'utilizzo del metodo "transfer-matrix" (cfr. 4.1.3), che permette di tenere in conto la presenza del preconsolidamento al contorno, riporta valori di convergenze e spostamenti al fronte e in galleria generalmente più bassi rispetto ai risultati calcolati con le classiche soluzioni in forma chiusa di letteratura e anche rispetto ai valori evidenziati da scavi in materiali simili. In ogni caso comunque questa differenza è percentualmente contenuta e non influenza la classificazione del comportamento dell'ammasso. Le verifiche in fase di terapia pertanto sono state condotte tutte con il metodo "transfer-matrix" per coerenza numerica, nel tentativo di evidenziare l'effetto degli interventi, rimandando per una valutazione più realistica degli effetti deformativi di fronte e scavo alle analisi numeriche.

RISULTATI ANALISI LC - FASE DI TERAPIA													
Sezione tipologica	Formazione geologica	Copertura	RISULTATI ANALISI LC - FASE DI TERAPIA				Prerivestimenti				Rivestimenti definitivi		
			R_m (m)	U_{fronte} (cm)	$R_{pi\ fronte}$ (m)	$R_{pi\ fronte}/R_m$	$U_{messa\ opera}$ (cm)	σ_{spritz} (MPa)	σ_{cort} (MPa)	$ConV_{rad,prev}$ (cm)	U_{eq} (cm)	$R_{pi,eq}$ (m)	σ_{cs}^* (MPa)
B0Lsb	AP - GR1	150	5.05	0.26	5.39	1.07	0.48	0.44	4.25	0.09	0.58	6.05	0.13
		300	5.05	0.58	5.60	1.11	1.08	1.04	10.06	0.22	1.31	6.53	0.24
B0/1sb	AP - GR1	300	5.2	0.60	5.77	1.11	1.07	1.22	11.58	0.26	1.33	6.69	0.45
		500	5.2	1.11	6.00	1.15	2.00	2.38	22.58	0.50	2.52	7.21	0.93
B1sb	AP - GR2a	150	5.34	1.08	6.19	1.16	1.45	2.83	26.65	0.61	2.08	6.99	1.23
		300	5.34	2.78	6.81	1.28	3.60	6.95	65.30	1.51	5.14	9.44	3.06
		500	5.34	6.25	8.05	1.51	7.73	13.87	130.30	2.72	10.82	9.77	6.17
B2/1sb	AP - GR2a	150	5.34	0.84	5.63	1.05	1.22	3.46	32.52	0.75	1.99	6.85	1.54
		300	5.34	2.14	6.26	1.17	2.95	8.36	78.57	1.82	4.82	7.87	3.79
		500	5.34	4.80	7.05	1.32	6.34	16.28	152.96	3.53	9.97	9.12	7.46
B4/1sb	AP - GR2b	150	5.34	1.15	5.97	1.12	1.86	5.14	48.33	1.11	3.00	7.46	2.42
		300	5.34	3.82	6.87	1.29	4.93	11.74	110.31	2.55	7.55	8.72	5.59
		500	5.34	9.85	8.08	1.51	11.76	19.20	190.00	6.44	18.32	10.99	9.21
C4sb	AP - GR3a	150	5.43	1.73	6.49	1.20	2.79	7.59	59.48	1.39	4.21	8.73	1.96
		300	5.43	5.59	7.74	1.43	8.38	15.63	122.53	2.88	11.32	10.60	4.62
		500	5.43	14.34	9.11	1.68	20.53	23.10	190.00	9.81	28.89	13.65	6.88
C2sb	AP - GR3b	150	5.43	2.76	7.18	1.32	3.76	8.38	65.71	1.54	5.34	9.31	3.05
		300	5.43	10.27	8.59	1.58	13.15	16.85	132.08	3.10	16.32	12.11	6.14
		500	5.43	35.06	9.89	1.82	28.23	23.10	190.00	9.52	37.85	14.35	7.93

Tabella 8-8 – Argille a palombini: Riassunto analisi linee caratteristiche

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315" style="float: right;"> <tr> <td>Foglio 86 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 86 di 166
Foglio 86 di 166		

Dove:

- R_m = raggio (nelle analisi svolte con le linee caratteristiche si è utilizzato un raggio medio tra il raggio di scavo in calotta ed il raggio equivalente all'area di scavo)
- ν =coefficiente di Poisson
- U_{fronte} =spostamento al fronte
- $U_{messa\ in\ opera}$ =spostamento alla messa in opera del prerivestimento
- U_{eq} =spostamento all'equilibrio (rivestimenti definitivi)
- $R_{pl\ fronte}$ =raggio plastico al fronte
- R_{eq} =raggio plastico all'equilibrio (rivestimenti definitivi)
- σ_{spritz}^* =tensione nello spritz beton
- σ_{cent}^* =tensione nelle centine metalliche
- σ_{cls}^* =tensione nei rivestimenti definitivi

* Le schematizzazione del calcolo (ad esempio la mancanza della maturazione dello spritz beton), i parametri impiegati relativi alle sezioni medie in tutte le analisi portano ad avere tensioni su tali elementi superiori ai limiti dei materiali alle massime coperture: per le verifiche di tali sezioni tipo si rimanda direttamente alle più accurate analisi numeriche inserite nel seguito. Nelle altre situazioni le linee caratteristiche hanno invece evidenziato uno stato tensionale sia per quanto riguarda i rivestimenti di prima fase che per i rivestimenti definitivi compatibile con i materiali adottati in progetto

Le Linee caratteristiche hanno evidenziato un valore di convergenza radiale dei prerivestimenti piuttosto elevata (7-8cm fino a raggiungere i 20cm per il gruppo geomeccanico GR3b alla massima copertura) e spostamenti che raggiungono i 30cm. I valori sono ritenuti accettabili date le alte coperture analizzate.

A integrazione di quanto precedentemente esposto si sottolinea che comunque, alle massime coperture e nei contesti di peggiori caratteristiche geotecniche, andrà sempre previsto un adeguato sistema di controllo e monitoraggio dei prerivestimenti al fine di valutare i tassi di lavoro effettivi ed il mantenimento degli adeguati margini di sicurezza richiesti delle caratteristiche di resistenza dei materiali impiegati.

I valori delle convergenze calcolati dovranno essere poi valutati ed amplificati con opportuni coefficienti per tenere in conto dei reali fattori non schematizzabili numericamente al fine di definire quelle soglie di convergenza necessarie al monitoraggio delle sezioni e all'applicazione delle variabilità.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 87 di 166

Formazione di molare

Le sezioni relative la formazione di molari sono identificate come B0-r, B2-r, C2-r. Si prevede l'impiego della sezione C1-r solamente nel caso in cui risultasse necessario un consolidamento al contorno tramite jet-grouting. Relativamente alle sezioni tipo afferenti ai gruppi geomeccanici della formazione di molari sono di seguito riportati gli interventi eseguiti durante la realizzazione della galleria in oggetto.

PRERIVESTIMENTI					
SEZIONE TIPO	Variabilità	centine	passo	Sfondi	spritz beton
	[-]	[-]	[m]	[m]	[cm]
B0sb-r	Media	2xIPN160	1,4	4,2	20
B2sb-r	Media	2xIPN180	1,2	1,2	25
C1sb-r	Media	HEB180	1	1	25
C2sb-r	Media	2xIPN200	1	1	25

Tabella 8-9 – Fase di terapia: prerivestimenti

CONSOLIDAMENTI FRONTE					
SEZIONE TIPO	Variabilità	TIPO	N°	L-interventi	L-sovrapp
	[-]	[-]	[-]	[m]	[m]
B0sb-r	Media	-	-	-	-
B2sb-r	Media	VTR - CEM	45	24	6-12
C1sb-r	Media	VTR - CEM	40	24	12
C2sb-r	Media	VTR - CEM	40	24	6-12

Tabella 8-10 – Fase di terapia: consolidamenti al fronte

INTERVENTI CONTORNO								
SEZIONE TIPO	Variabilità	TIPO	N°			L-interventi	L-sovrapp	Maglia
	[-]	[-]	[-]			[m]	[m]	
B0sb-r	Media	-	-			-	-	-
B2sb-r	Media	-	-			-	-	-
C1sb-r	Media	JET GROUTING	61			18	6	-
C2sb-r	Media	VTR - VAL	40			24	6-12	-
		VTR Piede VAL	6+6			24	6-12	-

Tabella 8-11 – Fase di terapia: consolidamenti al contorno

RIVESTIMENTI							
SEZIONE TIPO	Variabilità	Classe cls Rck	Sp. AR	Sp. CAL	Fronte - muretti	Fronte-AR	Fronte-definitivo
	[-]	[MPa]	[cm]	[cm]			
B0sb-r	Media	30	100	80	9Φ	12Φ	15Φ
B2sb-r	Media	30	100	90	3Φ	5Φ	9Φ
C1sb-r	Media	30	100	85	2Φ	3Φ	9Φ
C2sb-r	Media	30	100	90	3Φ	3Φ	9Φ

Tabella 8-12 – Fase di terapia: distanze getti

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 88 di 166

Per quanto riguarda le sezioni tipo C2 i consolidamenti al contorno sono stati tenuti in conto attraverso una coronella di terreno consolidato avente le seguenti caratteristiche:

- modulo elastico pari a 2 volte il valore relativo al terreno non trattato
- RQD = 50% (a 48 h) – 70% (a 7 giorni)
- $\sigma_{cm} = 1$ MPa (parametro minimo richiesto a 48h per il terreno trattato) – 1.5 (a 7 giorni)

In considerazione di tali proprietà sono stati ricavati i parametri di Hoek e Brown della coronella che risultano essere pari a quelli del terreno non trattato ad eccezione del GSI e del modulo elastico che subiscono un incremento:

- modulo elastico pari a 2 volte il valore relativo al terreno non trattato
- σ_{ci} = Pari al valore del terreno non trattato
- GSI = 50
- $m_i = 21$

Si è così ottenuta la resistenza a compressione uniaassiale σ_c del terreno trattato pari a 0.37 MPa.

I principali risultati in termini deformativi e tensionali ottenuti in fase di terapia sono riassunti nella seguente tabella. Si ricorda che si impiegheranno i parametri minimi del range impiegando un criterio di rottura di tipo Hoek –Brown per quanto riguarda la facies della Formazione di molare a cementazione elevata e i parametri medi del range ottenuto con il medesimo criterio per quanto riguarda i restanti gruppi. È necessario inoltre specificare che l'utilizzo del metodo “transfer-matrix” (cfr. 4.1.3), che permette di tenere in conto la presenza del preconsolidamento al contorno, riporta valori di convergenze e spostamenti al fronte e in galleria generalmente più bassi rispetto ai risultati calcolati con le classiche soluzioni in forma chiusa di letteratura e anche rispetto ai valori evidenziati da scavi in materiali simili. In ogni caso comunque questa differenza è percentualmente contenuta e non influenza la classificazione del comportamento dell'ammasso. Le verifiche in fase di terapia pertanto sono state condotte tutte con il metodo “transfer-matrix” per coerenza numerica, nel tentativo di evidenziare l'effetto degli interventi e poter meglio comparare le diverse analisi, rimandando per una valutazione più realistica degli effetti deformativi di fronte e scavo alle analisi numeriche.

RISULTATI ANALISI LC - FASE DI TERAPIA							Prerivestimenti				Rivestimenti definitivi		
Sezione tipologica	Formazione geologica	Copertura	R _m (m)	U _{fronte} (cm)	R _{pl fronte} (m)	R _{pl fronte} /R _m	U _{mess} opera (cm)	σ_{spritz} (MPa)	σ_{cent} (MPa)	Conv _{rad,prev} (cm)	U _{eq} (cm)	R _{pl,eq} (m)	σ_{dis} * (MPa)
B0sb-r	Mol - GR1	200	5.24	0.81	5.68	1.08	1.22	1.79	17.26	0.39	1.61	6.20	0.52
		300	5.24	1.35	5.93	1.13	2.68	2.98	28.67	0.65	2.69	6.69	0.87
		400	5.24	2.00	6.16	1.18	2.98	4.35	41.83	0.94	3.95	7.16	1.28
B2sb-r	Mol - GR2	200	5.37	1.21	5.88	1.09	1.49	4.34	41.29	0.96	2.47	6.65	1.40
		300	5.37	2.13	6.27	1.17	2.59	7.03	66.89	1.55	4.18	7.28	2.29
		400	5.37	3.30	6.64	1.24	3.95	10.02	95.28	2.21	6.21	7.89	3.27
C2sb-r	Mol - Fag	200	5.37	5.16	6.86	1.28	5.63	12.41	98.35	2.28	7.98	7.80	4.65
		300	5.37	11.00	7.83	1.46	11.54	18.64	147.73	3.43	15.06	9.15	6.94
		400	5.37	19.84	8.81	1.64	20.26	23.10	190.00	5.86	26.22	10.79	8.51

Tabella 8-13 Formazioni di molare: Riassunto analisi linee caratteristiche

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	IG5103ECVCLGN0000001A00	Foglio 89 di 166

Dove:

- R_m = raggio (nelle analisi svolte con le linee caratteristiche si è utilizzato un raggio medio tra il raggio di scavo in calotta ed il raggio equivalente all'area di scavo)
- ν =coefficiente di Poisson
- U_{fronte} =spostamento al fronte
- $U_{messa\ in\ opera}$ =spostamento alla messa in opera del prerinvestimento
- U_{eq} =spostamento all'equilibrio (rivestimenti definitivi)
- $R_{pl\ fronte}$ =raggio plastico al fronte
- R_{eq} =raggio plastico all'equilibrio (rivestimenti definitivi)
- $\sigma_{spritzz}^*$ =tensione nello spritz beton
- σ_{cent}^* =tensione nelle centine metalliche
- σ_{cls}^* =tensione nei rivestimenti definitivi

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 90 di 166

Area sicura Val Lemme

Le sezioni relative all'area sicura Val Lemme sono identificate come B0L, B0V, B0, B1, B2V, B2, B4, C4 e C2. Sono di seguito riportati gli interventi eseguiti durante la realizzazione della galleria in oggetto.

PRERIVESTIMENTI					
SEZIONE TIPO	Variabilità	centine	passo	Sfondi	spritz beton
	[-]	[-]	[m]	[m]	[cm]
B0L	Media	2xIPN160	1.4	4.2	20
B0V	Media	HEB200	1	2	30
B0	Media	2xIPN180	1.2	3.6	25
B1	Media	2xIPN220	1.2	1.2	30
B2V	Media	HEB240	1	1	30
B2	Media	HEB200	1	1	30
B4	Media	2xIPN240	1	1	30
C2	Media	HEB240	1	1	30
C4	Media	HEB240	1	1	30

Tabella 8-14 – Fase di terapia: prerivestimenti

CONSOLIDAMENTI FRONTE					
SEZIONE TIPO	Variabilità	TIPO	N°	L-interventi	L-sovrapp
	[-]	[-]	[-]	[m]	[m]
B0L	Media	-	-	-	-
B0V	Media	-	-	-	-
B0	Media	-	-	-	-
B1	Media	-	-	-	-
B2V	Media	VTR - CEM	70	24	12
B2	Media	VTR - CEM	60	24	12
B4	Media	VTR - CEM	60	24	12
C2	Media	VTR - CEM	55	24	12
C4	Media	VTR - CEM	70	24	12

Tabella 8-15 – Fase di terapia: consolidamenti al fronte

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
IG5103ECVCLGN0000001A00		Foglio 91 di 166

INTERVENTI CONTORNO								
SEZIONE TIPO	Variabilità	TIPO	N°			L-interventi	L-sovrapp	Maglia
	[-]	[-]	[-]			[m]	[m]	
B0L	Media	-	-			-	-	-
B0V	Media	INFILAGGI MET	31			15	3	-
B0	Media	-	-			-	-	-
B1	Media	BULLONI - F24	-			6.50	-	1.20 x 2.0
B2V	Media	INFILAGGI MET	25			15	3	-
B2	Media	-	-			-	-	-
B4	Media	BULLONI - F28	-			6.50	-	1.00 x 2.00
C2	Media	VTR - VAL	65			24	12	-
		VTR Piede VAL	6+6			24	12	-
C4	Media	VTR - CEM	69			24	12	-
		VTR Piede CEM*	6+6			24	12	-

Tabella 8-16 – Fase di terapia: consolidamenti al contorno

RIVESTIMENTI							
SEZIONE TIPO	Variabilità	Classe cls Rck	Sp. AR	Sp. CAL	Fronte - muretti	Fronte-AR	Fronte-definitivo
	[-]	[MPa]	[cm]	[cm]			
B0L	Media	30	80	60	9Φ	12Φ	15Φ
B0V	Media	30	100	80	9Φ	12Φ	15Φ
B0	Media	30	90	70	9Φ	12Φ	15Φ
B1	Media	30	100	80	9Φ	12Φ	15Φ
B2V	Media	30	100	80	3Φ	5Φ	9Φ
B2	Media	30	100	80	3Φ	5Φ	9Φ
B4	Media	30	100	80	3Φ	5Φ	9Φ
C2	Media	30	100	90	3Φ	3Φ	9Φ
C4	Media	30	100	90	3Φ	3Φ	9Φ

Tabella 8-17 – Fase di terapia: distanze getti

Le coronelle di terreno consolidato adottate per simulare gli interventi di consolidamento al contorno sono state introdotte come già precedentemente esposto relativamente alle sezioni C4 e C2 per le argille a palombini.

RISULTATI ANALISI LC - FASE DI TERAPIA							Prerivestimenti				Rivestimenti definitivi		
Sezione tipologica	Formazione geologica	Copertura	R _m (m)	U _{fronte} (cm)	R _{pl} fronte (m)	R _{pl} fronte/R _m	U _{massa opera} (cm)	σ _{spritz} (MPa)	σ _{casei} (MPa)	Conv _{rad.preniv} (cm)	U _{eq} (cm)	R _{pl,eq} (m)	σ _{ca} * (MPa)
B0L	AP - GR1	150	5.97	0.31	6.37	1.07	0.55	0.51	4.92	0.12	0.68	7.15	0.14
		300	5.97	0.69	6.62	1.11	1.24	1.20	11.62	0.30	1.55	7.72	0.38
B0	AP - GR1	400	6.13	0.97	6.87	1.12	1.69	1.87	17.97	0.47	2.17	8.05	0.67
		150	6.27	1.26	7.27	1.16	1.39	3.11	29.52	0.80	2.47	8.25	1.34
B1	AP - GR2a	400	6.27	5.35	8.64	1.38	6.57	11.73	111.34	3.02	9.67	10.68	5.19
		150	6.27	1.03	5.63	0.90	1.39	3.72	35.33	0.95	2.38	8.11	1.65
B2	AP - GR2a	400	6.27	4.36	7.05	1.12	5.48	13.53	128.48	3.48	9.06	10.39	6.17
		150	6.27	1.76	7.35	1.17	2.27	5.34	50.69	1.37	3.68	8.94	2.51
B4	AP - GR2b	400	6.27	8.57	9.15	1.46	9.96	17.22	163.53	4.44	14.56	11.57	8.23
		150	6.27	2.15	7.70	1.23	3.23	8.08	63.94	1.73	4.99	10.19	2.10
C2	AP - GR3a	150	6.27	3.51	6.45	1.03	4.52	8.94	70.72	1.92	6.48	10.99	3.25
		150	6.27	3.51	6.45	1.03	4.52	8.94	70.72	1.92	6.48	10.99	3.25

Tabella 8-18 Area sicura Val Lemme: Riassunto analisi linee caratteristiche

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	IG5103ECVCLGN0000001A00	Foglio 92 di 166

Dove:

- R_m = raggio (nelle analisi svolte con le linee caratteristiche si è utilizzato un raggio medio tra il raggio di scavo in calotta ed il raggio equivalente all'area di scavo)
- ν = coefficiente di Poisson
- U_{fronte} = spostamento al fronte
- $U_{messa\ in\ opera}$ = spostamento alla messa in opera del prerinvestimento
- U_{eq} = spostamento all'equilibrio (rivestimenti definitivi)
- $R_{pl\ fronte}$ = raggio plastico al fronte
- R_{eq} = raggio plastico all'equilibrio (rivestimenti definitivi)
- $\sigma_{spritzz}^*$ = tensione nello spritz beton
- σ_{cent}^* = tensione nelle centine metalliche
- σ_{cls}^* = tensione nei rivestimenti definitivi

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 93 di 166

8.4. Modelli numerici di calcolo: Ipotesi di base

Nei seguenti paragrafi verranno descritti i modelli di calcolo impiegati per il dimensionamento dei rivestimenti di prima fase e definitivi. In particolare si svolgeranno le seguenti analisi numeriche relative alle sezioni tipo ritenute più significative:

- B0Lsb, B0/1sb, B1sb, B2/1sb, C4sb per quanto riguarda lo scavo nelle Argilliti a Palombini.
- B0sb-r, C2sb-r per quanto riguarda lo scavo nelle Formazioni di Molare.
- B0L, B0, C4 per quanto riguarda lo scavo nelle Argilliti a Palombini nell'area sicura Val Lemme.

Tutte le analisi verranno effettuate alla massima copertura in chiave calotta alla quale tali sezioni sono previste, tenendo in conto anche dell'effetto dovuto allo scavo della seconda canna ed eventualmente del cunicolo in affiancamento; le condizioni analizzate sono ritenute le più critiche lungo il tracciato e quindi quelle dimensionanti per la strutture in esame.

Al fine di definire le condizioni di carico sui rivestimenti (di prima fase e definitivi), è stato fatto ricorso alla modellazione numerica bidimensionale, condotta impiegando il codice di calcolo FLAC 7.0. Obiettivo delle analisi numeriche è la simulazione dello scavo impostando le varie fasi costruttive secondo il comportamento dell'ammasso, l'applicazione dei carichi, i tempi di maturazione dello spritz-beton e le distanze d'applicazione dal fronte. Terminata la fase di analisi numerica si ottiene una simulazione dell'interazione terreno-struttura per tutte le sezioni tipo previste nel progetto.

Il rivestimento definitivo viene posto in opera alla distanza di progetto, gravandosi del carico residuo di sua competenza e del carico che risultava gravante sul sostegno di prima fase, considerato cautelativamente non più resistente nel lungo termine. Nelle sezioni aventi interventi di consolidamento al contorno, tale intervento non viene più considerato agente nella fase di lungo termine, ripristinando le condizioni naturale dell'ammasso.

Sezioni a singolo binario – doppia canna

ANALISI	SEZIONE TIPO	FORMAZIONE GEOLOGICA PREVALENTE	Copertura [m]
1	B0Lsb	Ap-GR1	300
2	B0/1sb	Ap-GR1	500
3	B1sb	Ap-GR2a	500
4	B2/1sb	Ap-GR2a	500
5	C4sb	Ap-GR3a	500
6	B0sb-r	Mol-GR1	400
7	C2sb-r	Mol-Fag	300

Tabella 8-19 - Descrizione dei modelli numerici impiegati

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 94 di 166

Sezioni Area sicura – doppia canna più cunicolo in affiancamento

ANALISI	SEZIONE TIPO	FORMAZIONE GEOLOGICA PREVALENTE	Copertura [m]
8	B0L	Ap-GR1	300
9	B0	Ap-GR1	400
10	C4	Ap-Gr3a	150

Tabella 8-20 - Descrizione dei modelli numerici impiegati area sicura

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 95 di 166

8.4.1. Modellazione degli elementi geotecnici e strutturali

Parametri Geotecnici

Per quanto riguarda la modellazione della le argilliti a Palombini si è ritenuto opportuno utilizzare un modello costitutivo di tipo Mohr - Coulomb utilizzando i seguenti parametri, ottenuti linearizzando i parametri di Hoek & Brown in funzione dello stato tensionale medio presente al contorno del cavo.

Argille a Palombini - Parametri di calcolo (Linearizzazione Modello Mohr-Coulomb)									
Formazione	Modello di calcolo	Valori	ϕ_p	ϕ_r	c_p	c_r	γ	ν	E_{sp}
			[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kN/m ³]	[-]	[MPa]
GR1	B0Lsb	medi	39	31	1175	1060	27	0.3	5400
	B0/1sb	medi	39	31	1175	1060			
GR2a	B1sb	medi	29	27	1000	850	27	0.3	1750
	B2/1sb	max	30	29	1000	900			
GR3a	C4sb	max	25	23	700	600	26	0.3	1100

Argille a Palombini - Parametri di calcolo area sicura Val Lemme (Linearizzazione Modello Mohr-Coulomb)									
Formazione	Modello di calcolo	Valori	ϕ_p	ϕ_r	c_p	c_r	γ	ν	E_{sp}
			[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kN/m ³]	[-]	[MPa]
GR1	B0L	medi	39	31	1175	1060	27	0.3	5400
	B0	medi	39	31	1175	1060			
GR3a	C4	max	30	24	320	270	26	0.3	1100

Tabella 8-21 - Parametri di calcolo argille a palombini

Relativamente alla formazione Hoek e Brown si è ritenuto opportuno utilizzare un modello costitutivo di tipo Hoek e Brown caratterizzato dai seguenti parametri.

Formazione di molare - parametri di calcolo (modello Hoek e Brown)									
Formazione	Modello	Valori	σ_c	m_i	GSI	a	γ	ν	E_{sp}
			[MPa]	[-]	[-]	[-]	[kN/m ³]	[-]	[MPa]
<i>Molare</i> cementazione elevata	B0sb-r	minimi	20	21	50	0.506	26	0.3	2600
<i>Molare</i> zona di faglia	C2sb-r	max	7	24	40	0.511	26	0.3	900

Formazione di molare - parametri di calcolo (modello Hoek e Brown)							
Formazione	Modello	Valori	m_{bp}	s_p	m_{br}	s_r	
			[-]	[-]	[-]	[-]	
<i>Molare</i> cementazione elevata	B0sb-r	minimi	3.521	0.0039	2.569	0.0021	
<i>Molare</i> zona di faglia	C2sb-r	max	2.467	0.001	1.488	0.0004	

Tabella 8-22 - Parametri di calcolo formazione di molare

Nelle analisi numeriche si è supposto un coefficiente di spinta a riposo del terreno (K0) unitario.

Consolidamento al contorno

Gli interventi di consolidamento al contorno del cavo sono simulati nelle elaborazioni numeriche in termini di incremento delle caratteristiche di resistenza e di deformabilità nella fascia di terreno trattato. Tali valori si sono ottenuti secondo le medesime osservazioni esposte in precedenza per l'analisi della fase di terapia delle linee caratteristiche.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 230 1532 315"> <tr> <td>Foglio 96 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 96 di 166
Foglio 96 di 166		

Per quanto riguarda le sezioni tipo C2 i parametri di Hoek e Brown della coronella risultano essere pari a quelli del terreno non trattato ad eccezione del GSI e del modulo elastico che subiscono un incremento:

- modulo elastico adottato nella modellazione (E) pari a 2 volte quello del terreno non trattato (E_{op})
- σ_{ci} pari a quello del terreno non trattato
- GSI = 50
- m_i pari a quello del terreno non trattato

Le sezioni tipo C4 è caratterizzata da consolidamenti al contorno realizzati mediante VTR cementati; tali interventi vengono tenuti in conto attraverso una coronella di terreno consolidato per la quale si incrementa unicamente il valore del GSI:

- modulo elastico adottato nella modellazione (E) pari a quello del terreno non trattato (E_{op})
- σ_{ci} pari a quello del terreno non trattato
- GSI = 40
- m_i pari a quello del terreno non trattato

Condizioni idrogeologiche

In base a quanto presentato nel quadro idrogeologico e con riferimento al paragrafo 5.4 non si è considerato agente il carico idraulico.

Modellazione degli elementi strutturali

Il calcestruzzo utilizzato per i rivestimenti definitivi della galleria naturale è stato modellato come un materiale elastico lineare. Questo modello rappresenta la legge di Hooke dell'elasticità isotropa lineare e richiede due parametri di rigidità elastici, che sono il modulo di Young E, ed il coefficiente di Poisson ν , pari a $E=31220$ MPa e $\nu=0.2$.

Nella modellazione di sezioni non armate, al fine di simulare i getti separati di arco rovescio e murette rispetto a calotte e piedritti, si sono predisposti elementi di interfaccia non reagenti a trazione. Nei modelli di calcolo relativi a sezioni armate la presenza di armature di richiamo giustifica l'assenza di codesti elementi di interfaccia.

Per quanto riguarda i rivestimenti di prima fase si è provveduto ad omogenizzare le centine e lo spritz – beton ottenendo un modulo elastico ed uno spessore equivalente tramite la seguente formulazione:

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE				
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" style="float: right; margin-left: 20px;"> <tr> <td>Foglio</td> <td>97 di</td> </tr> <tr> <td></td> <td>166</td> </tr> </table>	Foglio	97 di		166
Foglio	97 di				
	166				

$$E_{om} = \frac{\left[E_{sb} \cdot s + \left(\frac{E_{cen}}{E_{sb}} - 1 \right) \cdot E_{sb} \cdot \frac{A_{cen}}{d} \right]^{3/2}}{\sqrt{E_{sb} \cdot s^3 + 12 \cdot \left(\frac{E_{cen}}{E_{sb}} - 1 \right) \cdot E_{sb} \cdot \frac{I_{cen}}{d}}}$$

$$s_{om} = \frac{\sqrt{E_{sb} \cdot s^3 + 12 \cdot \left(\frac{E_{cen}}{E_{sb}} - 1 \right) \cdot E_{sb} \cdot \frac{I_{cen}}{d}}}{E_{sb} \cdot s + \left(\frac{E_{cen}}{E_{sb}} - 1 \right) \cdot E_{sb} \cdot \frac{A_{cen}}{d}}$$

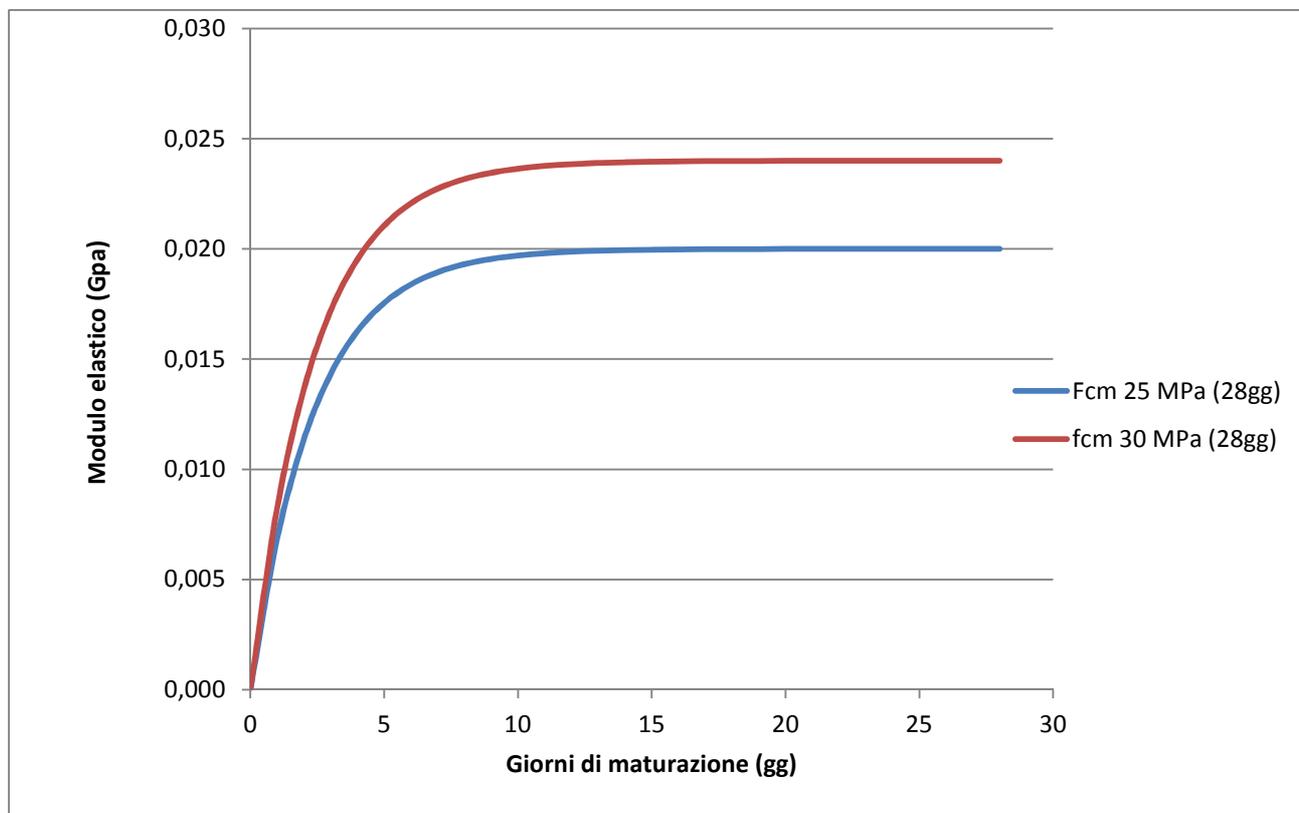
Dove:

- E Modulo elastico dello spritz beton impiegato
- E_{cen} Modulo elastico delle centine metalliche
- I_{cen} Modulo di inerzia delle centine metalliche
- A_{cen} Area delle centine metalliche
- s Spessore di spritz beton impiegato
- d Passo delle centine metalliche

Per simulare le fasi di maturazione dello spritz-beton si è utilizzata la seguente formulazione che mostra la variazione del modulo elastico in funzione del tempo trascorso dalla messa in opera.

$$E_{sb,t} = E_{28} \cdot (1 - e^{-0.42t})$$

Dove con E_{28} si indica il modulo elastico dello spritz-beton dopo 28 giorni di maturazione e con t il tempo trascorso in giorni. Di seguito si riporta la curva di maturazione ottenuta attraverso tale formulazione:



In particolare si sono utilizzati nei modelli di calcolo 3 differenti moduli elastici per il calcestruzzo relativi a 0,5, 3 e 28 giorni, i cui valori sono nel seguito riportati. Come si nota dal grafico già a partire da 10 giorni di maturazione il modulo elastico risulta pressochè pari al valore finale, per cui risulta verosimile non variare le caratteristiche del supporto a partire da tale istante temporale.

Spritz beton fcm = 25 MPa a 28gg

Maturazione	E_t	F_{cm}
[gg]	[Gpa]	[MPa]
0.5	3.788	4 (*)
3	14.327	14
28	20.000	25

(*)Valori medi stimati in assenza di prove dirette

Spritz beton fcm = 30 MPa a 28gg

Maturazione	E_t	F_{cm}
[gg]	[Gpa]	[MPa]
0.5	4.546	4 (*)

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" style="float: right; margin-left: auto;"> <tr> <td>Foglio 99 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 99 di 166
Foglio 99 di 166		

3	17.192	16
28	24.000	30

(*)Valori medi stimati in assenza di prove dirette

8.4.2. Taratura modelli di calcolo

Per simulare il progressivo allontanamento del fronte di scavo dalla sezione di verifica e la contemporanea posa in opera dei sostegni con un'analisi bidimensionale, è necessario introdurre numericamente l'"effetto fronte", rilassando progressivamente le forze di scavo.

L'introduzione del concetto di "effetto fronte" nel calcolo richiede la definizione di una legge di rilassamento del nucleo in grado di simulare il progressivo incremento della deformazione della cavità, con conseguente diminuzione della pressione esercitata sui rivestimenti. Tale concetto risulta adeguatamente espresso in termini analitici dalla curva $1-\lambda = \sigma_r/\sigma_0$ di Panet, che rappresenta in termini di sforzi radiali il passaggio dal comportamento tridimensionale a quello piano. L'adozione della sola curva λ , così come comunemente espressa quale criterio di riduzione delle caratteristiche elastiche e di resistenza del nucleo nel corso dell'analisi, non sempre produce i dovuti risultati tenso-deformativi, né per confronto con quanto ottenuto in base alla teoria delle Curve Caratteristiche o a simulazioni con modelli assialsimmetrici, né per confronto con quanto effettivamente rilevato in corso d'opera. Tale curva deve essere quindi tarata in funzione delle caratteristiche geomeccaniche del materiale, dello stato tensionale in sito e del criterio di rottura del materiale.

La riduzione così ottenuta va applicata al termine della time geostatica. Si ha pertanto:

$$R_{\text{forze, fronte}} = R_{\text{PANET, fronte}} \cdot \alpha$$

$$\text{con } \alpha = (\text{Rid.}\%) / R_{\text{PANET, fronte}} \%$$

Una volta determinata la riduzione iniziale, le riduzioni alle Time successive verranno determinate proporzionalmente all'andamento della curva $1-\lambda$ di Panet in funzione della distanza dal fronte.

Si ha pertanto:

$$R_{\text{forze}} = R_{\text{forze, fronte}} + \beta \cdot (R_{\text{PANET}} - R_{\text{PANET, fronte}})$$

in cui il termine $\beta = (100\% - \text{Rid.}\%) / (100\% - R_{\text{PANET, fronte}}\%)$ tiene conto delle percentuali di riduzione residue, dopo il rilassamento del fronte.

I valori adottati nelle varie time di calcolo per ogni sezione tipo sono riportati nella descrizione dei singoli modelli a cui si rimanda.

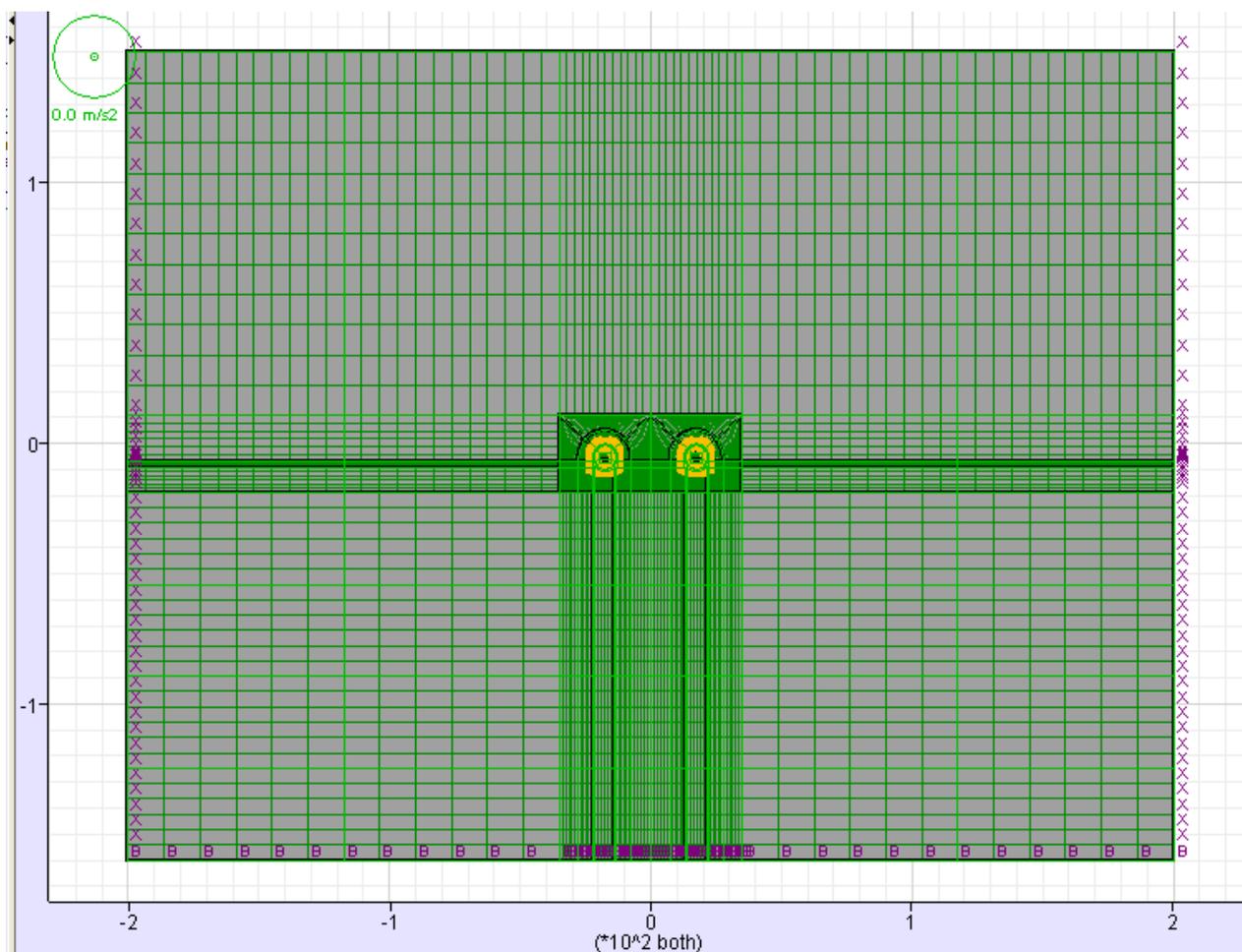
8.5. Modello 1: Sezione tipo B0Lsb Copertura 300m

Il terreno è stato modellato attraverso un unico strato con una copertura in chiave calotta di circa 300m, avente le caratteristiche del Gruppo geomeccanico 1 delle Argilliti a Palombini

precedentemente riportate. Le analisi sono state eseguite in campo elasto-plastico utilizzando un modello costitutivo di tipo “*strain softening*”.

I rivestimenti di prima fase sono stati modellati tramite elementi beam disposti lungo l'estradosso della galleria, in modo da simulare l'omogenizzazione delle centine e del calcestruzzo proiettato variando la rigidezza dell'elemento in funzione della maturazione dello spritz beton. Al contrario i rivestimenti definitivi sono stati modellati in base alla loro reale geometria; col fine di poter valutare le azioni interne, sono stati integrati gli sforzi ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$) valutati dal modello di calcolo lungo le sezioni, in modo da giungere alle azioni sollecitanti per il dimensionamento strutturale.

Si è utilizzato un modello “Plane strain” bidimensionale costituito da una maglia rettangolare di dimensioni pari a 400 x 310 m. Nel seguito si riporta quindi la mesh di calcolo utilizzata per il dimensionamento della galleria naturale, costituita da n° 20304 zone.



Le dimensioni della mesh di elementi finiti sono fissate in maniera tale da evitare che il problema in esame risulti influenzato dalle condizioni di vincolo al contorno. Per quanto concerne le condizioni di vincolo applicate, queste constano essenzialmente in un doppio vincolo allo spostamento al contorno inferiore e spostamento orizzontale impedito lungo i bordi laterali. La formulazione del

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE				
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" style="float: right; margin-left: 20px;"> <tr> <td>Foglio</td> <td>101 di</td> </tr> <tr> <td></td> <td>166</td> </tr> </table>	Foglio	101 di		166
Foglio	101 di				
	166				

vincolo laterale permette dunque lo sviluppo di tensioni normali di compressione ma non di tensioni di taglio agenti in direzione verticale. Tali tensioni sono invece generate al contorno inferiore.

Nel corso delle prime fasi dell'analisi numerica si è provveduto ad imporre al modello lo stato di sforzo esistente in sito prima dell'inizio dello scavo delle gallerie. Per quanto riguarda la condizione iniziale denominata "Geostatico" si sono inizializzati gli sforzi in direzione verticale in modo da assegnare il carico geostatico alle varie quote del modello. Gli sforzi in direzione orizzontale vengono invece determinati in funzione degli sforzi in direzione verticale attraverso il coefficiente di spinta a riposo (K_0). Dato che tale procedura è utilizzata unicamente con lo scopo di creare le condizioni iniziali per l'analisi in corso, non si tratta di una reale fase di calcolo; al termine di tale procedura vengono quindi azzerati gli spostamenti in ogni punto del modello.

L'analisi si basa su una successione di fasi di calcolo "Time", descritte nel seguito, le quali permettono di descrivere i differenti interventi costruttivi e di schematizzare le differenti condizioni di carico.

8.5.1. Rivestimenti di prima fase e fasi di calcolo

La simulazione delle fasi fa riferimento ad una velocità di avanzamento variabile fra 2.5m/g e 3m/g, tipiche per lo scavo in questo tipo di materiale per sezioni aventi aree di scavo comparabili, da cui derivano le caratteristiche di deformabilità dello spritz beton impiegate. Si riportano le caratteristiche principali delle sezioni omogenizzate composte da centine e spritz - beton nel calcolo.

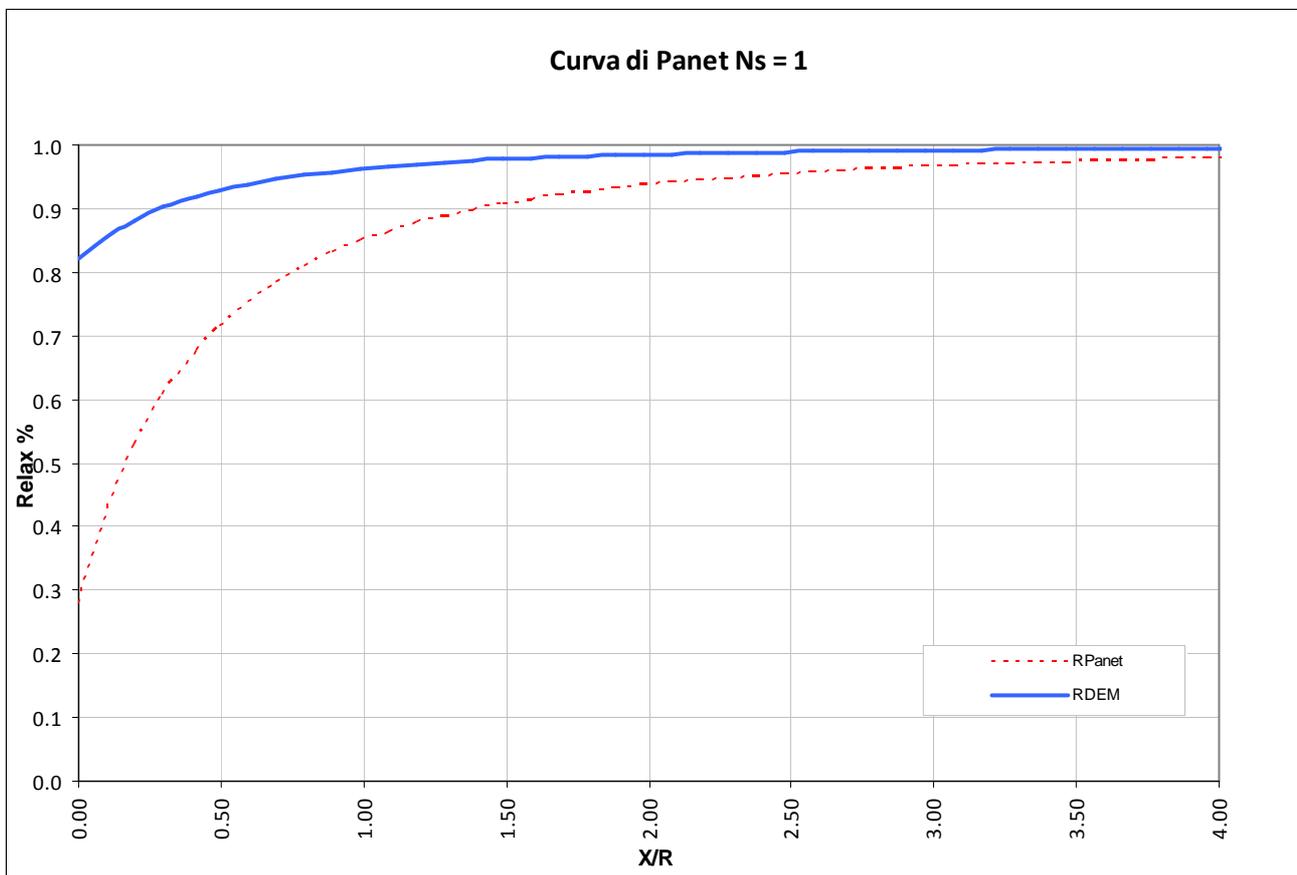
Centina	IPN 160
n°	2.0
Passo [m]	1.4
E [Gpa]	210.0

Spritz - Beton	
E_{28gg} [Gpa]	20
Spessore [m]	0.2

Maturazione	E_{om}	s_{om}	EA	EI
[gg]	[Gpa]	[m]	[KN]	[KN*m ²]
0.5	6.789	0.2105	1429324	5280
3	17.158	0.2041	3502719	12165
28	22.746	0.2031	4618826	15871
28	22.746	0.2031	4618826	15871

Di seguito si riportano le fasi di calcolo ed i valori di "Relax" utilizzati, oltre alle caratteristiche dei rivestimenti di prima fase utilizzati in tali fasi.

LAVORO		RIFERIMENTO PRIMA CANNA										RIFERIMENTO SECONDA CANNA									
Sezione		INIZIO STAGE					FINE STAGE					INIZIO STAGE					FINE STAGE				
TIME	DESCRIZIONE	Xfronte [m]	R(FEM)	Xfronte [m]	R(FEM)	MATURAZIONE SPRITZ BETON	Xfronte [m]	R(FEM)	Xfronte [m]	R(FEM)	MATURAZIONE SPRITZ BETON	Xfronte [m]	R(FEM)	Xfronte [m]	R(FEM)	MATURAZIONE SPRITZ BETON					
Geostatico	Geostatico	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-					
Time 1	Fronte di scavo prima canna	0	0.0%	0	82.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-					
Time 2	Avanzamento mezzo sfondo	0	82.0%	2.1	91.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-					
Time 3	Installazione prriverstimento e avanzamento	2.1	91.0%	5	96.0%	0.5 gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-					
Time 4	Maturazione sb e avanzamento	5	96.0%	15	97.0%	3gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-					
Time 5	Maturazione sb e avanzamento	15	97.0%	50	99.0%	28gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-					
Time 6	Fronte di scavo seconda canna					28gg	0	0.0%	0	82.0%	-	0	82.0%	0	91.0%	-					
Time 7	Avanzamento mezzo sfondo					28gg	0	82.0%	2.1	91.0%	-	2.1	91.0%	5	96.0%	0.5 gg					
Time 8	Installazione prriverstimento e avanzamento					28gg	2.1	91.0%	5	96.0%	0.5 gg	5	96.0%	15	97.0%	3gg					
Time 9	Maturazione sb e avanzamento					28gg	5	96.0%	15	97.0%	3gg	15	97.0%	50	99.0%	28gg					
Time 10	Maturazione sb e avanzamento					28gg	15	97.0%	50	99.0%	28gg										
Time 11	Getto arco rovescio prima canna	≈ 9 diametri	99.0%	≈ 15 diametri	99.5%	28gg															
Time 12	Completamento prima canna	≈ 15 diametri	99.5%	> 15 diametri	100.0%	28gg															
Time 13	Getto arco rovescio seconda canna					28gg	≈ 9 diametri	99.0%	≈ 15 diametri	99.5%	28gg										
Time 14	Completamento seconda canna					28gg	≈ 15 diametri	99.5%	> 15 diametri	100.0%	28gg										
Time 15	Lungo termine			+∞	100.0%	-			+∞	100.0%	-										



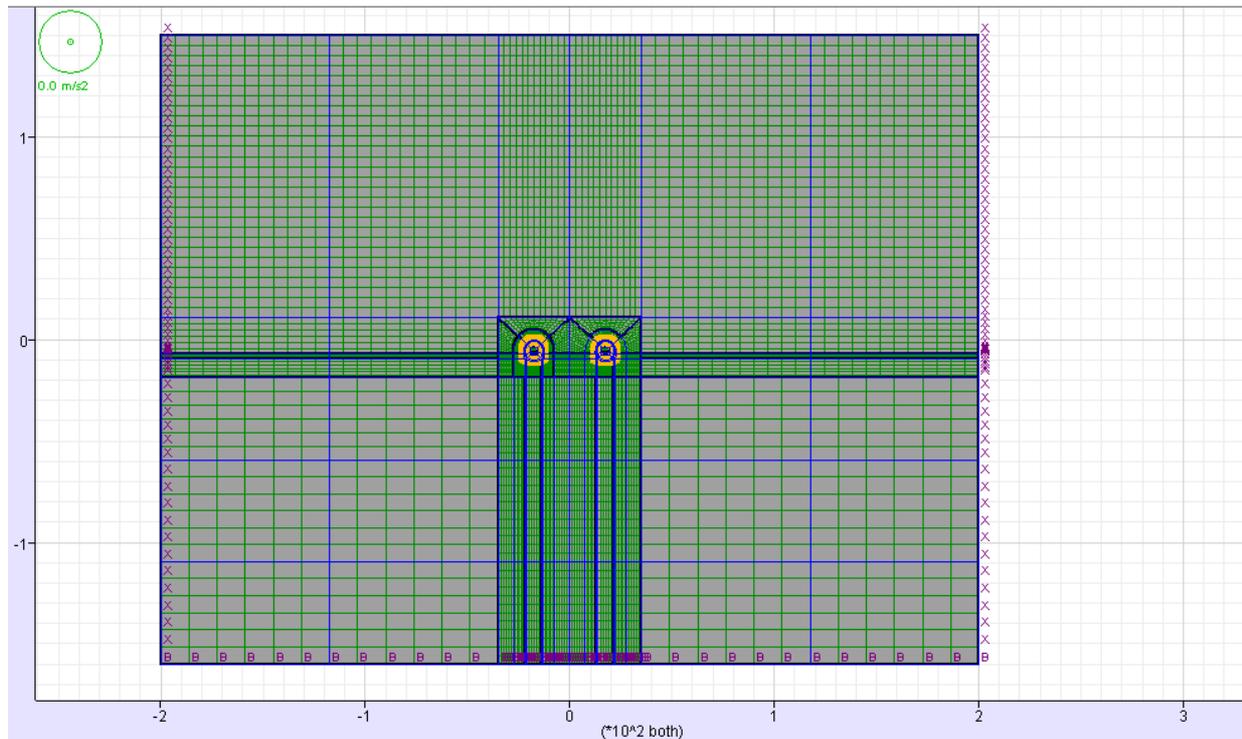
8.6. Modello 2: Sezione tipo B0/1sb Copertura 500m

Il terreno è stato modellato attraverso un unico strato con una copertura in chiave calotta di circa 500m, avente le caratteristiche del Gruppo geomeccanico 1 delle Argilliti a Palombini precedentemente riportate. Le analisi sono state eseguite in campo elasto-plastico utilizzando un modello costitutivo di tipo "strain softening".

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 	
	<p>IG5103ECVCLGN0000001A00</p>	<p>Foglio 103 di 166</p>

I rivestimenti di prima fase sono stati modellati tramite elementi beam disposti lungo l'estradosso della galleria, in modo da simulare l'omogenizzazione delle centine e del calcestruzzo proiettato variando la rigidità dell'elemento in funzione della maturazione dello spritz beton. Al contrario i rivestimenti definitivi sono stati modellati in base alla loro reale geometria; col fine di poter valutare le azioni interne, sono stati integrati gli sforzi ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$) valutati dal modello di calcolo lungo le sezioni, in modo da giungere alle azioni sollecitanti per il dimensionamento strutturale.

Si è utilizzato un modello di tipo *Plane strain* a maglia rettangolare di dimensioni 400 x 310. Nel seguito si riporta quindi la mesh di calcolo utilizzata per la galleria naturale, costituita da n° 22608 zone.



Le dimensioni della mesh di elementi finiti sono fissate in maniera tale da evitare che il problema in esame risulti influenzato dalle condizioni di vincolo al contorno. Per quanto concerne le condizioni di vincolo applicate, queste constano essenzialmente in un doppio vincolo allo spostamento al contorno inferiore e spostamento orizzontale impedito lungo i bordi laterali. La formulazione del vincolo laterale permette dunque lo sviluppo di tensioni normali di compressione ma non di tensioni di taglio agenti in direzione verticale. Tali tensioni sono invece generate al contorno inferiore.

Nel corso delle prime fasi dell'analisi numerica si è provveduto ad imporre al modello lo stato di sforzo esistente in sito prima dell'inizio dello scavo delle gallerie. Per quanto riguarda la condizione iniziale denominata "*Geostatico*" si sono inizializzati gli sforzi in direzione verticale in modo da assegnare il carico geostatico alle varie quote del modello. Gli sforzi in direzione orizzontale vengono invece determinati in funzione degli sforzi in direzione verticale attraverso il coefficiente di spinta a riposo (K_0). Dato che tale procedura è utilizzata unicamente con lo scopo di creare le condizioni iniziali per l'analisi in corso, non si tratta di una reale fase di calcolo; al termine di tale procedura vengono quindi azzerati gli spostamenti in ogni punto del modello.

L'analisi si basa su una successione di fasi di calcolo "*Time*", descritte nel seguito, le quali permettono di descrivere i differenti interventi costruttivi e di schematizzare le differenti condizioni di carico.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 105 di 166

8.6.1. Rivestimenti di prima fase e fasi di calcolo

La simulazione delle fasi fa riferimento ad una velocità di avanzamento variabile fra 2.3/g e 2.8m/g, tipiche per lo scavo in questo tipo di materiale, da cui derivano le caratteristiche di deformabilità dello spritz beton impiegate. Si riportano le caratteristiche principali delle sezioni omogenizzate composte da centine e spritz – beton nel calcolo.

Centina	HE 180 B
n°	1.0
Passo [m]	1.2
E [Gpa]	210.0

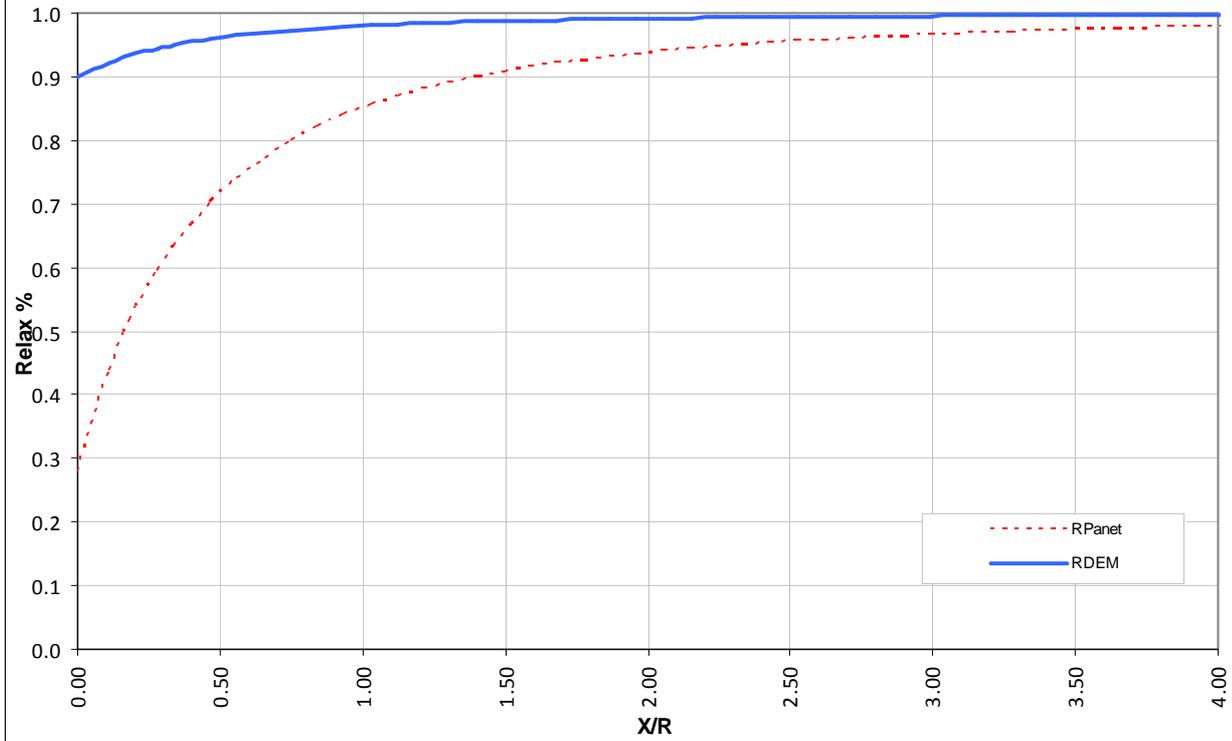
Spritz - Beton	
E _{28gg} [Gpa]	20
Spessore [m]	0.25

Maturazione [gg]	E _{om} [Gpa]	S _{om} [m]	EA [KN]	EI [KN*m ²]
0.5	8.002	0.2585	2068355	11516
3	18.318	0.2536	4645702	24902
28	23.874	0.2527	6033087	32107
28	23.874	0.2527	6033087	32107

Di seguito si riportano le fasi di calcolo ed i valori di “Relax” utilizzati, oltre alle caratteristiche dei rivestimenti di prima fase utilizzati in tali fasi.

LAVORO		COCIV - TRATTA AV/AC TERZO VALICO DEI GIOVI									
Sezione		B0/1									
TIME	DESCRIZIONE	RIFERIMENTO PRIMA CANNA					RIFERIMENTO SECONDA CANNA				
		INIZIO STAGE		FINE STAGE		MATURAZIONE SPRITZ BETON	INIZIO STAGE		FINE STAGE		MATURAZIONE SPRITZ BETON
		Xfronte [m]	R(FEM)	Xfronte [m]	R(FEM)		Xfronte [m]	R(FEM)	Xfronte [m]	R(FEM)	
Geostatico	Geostatico	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 1	Fronte di scavo prima canna	0	0.0%	0	90.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 2	Avanzamento mezzo sfondo	0	90.0%	1.8	96.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 3	Installazione priverivestimento e avanzamento	1.8	96.0%	4	96.5%	0.5 gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 4	Maturazione sb e avanzamento	4	96.5%	12	97.0%	3gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 5	Maturazione sb e avanzamento	12	97.0%	50	99.0%	28gg	-∞	0.0%	0	0.0%	-
Time 6	Fronte di scavo seconda canna					28gg	0	0.0%	0	90.0%	-
Time 7	Avanzamento mezzo sfondo					28gg	0	90.0%	1.8	96.0%	-
Time 8	Installazione priverivestimento e avanzamento					28gg	1.8	96.0%	4	96.5%	0.5 gg
Time 9	Maturazione sb e avanzamento					28gg	4	96.5%	12	97.0%	3gg
Time 10	Maturazione sb e avanzamento					28gg	12	97.0%	50	99.0%	28gg
Time 11	Getto arco rovescio prima canna	≈ 9 diametri	99.0%	≈ 15 diametri	99.5%	28gg					28gg
Time 12	Completamento prima canna	≈ 15 diametri	99.5%	> 15 diametri	100.0%	28gg					28gg
Time 13	Getto arco rovescio seconda canna					28gg	≈ 9 diametri	99.0%	≈ 15 diametri	99.5%	28gg
Time 14	Completamento seconda canna					28gg	≈ 15 diametri	99.5%	> 15 diametri	100.0%	28gg
Time 15	Lungo termine			+++	100.0%	-			+++	100.0%	-

Curva di Panet Ns = 1



GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315"> <tr> <td>Foglio 107 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 107 di 166
Foglio 107 di 166		

8.7. Modello 3: Sezione tipo B1sb Copertura 500m

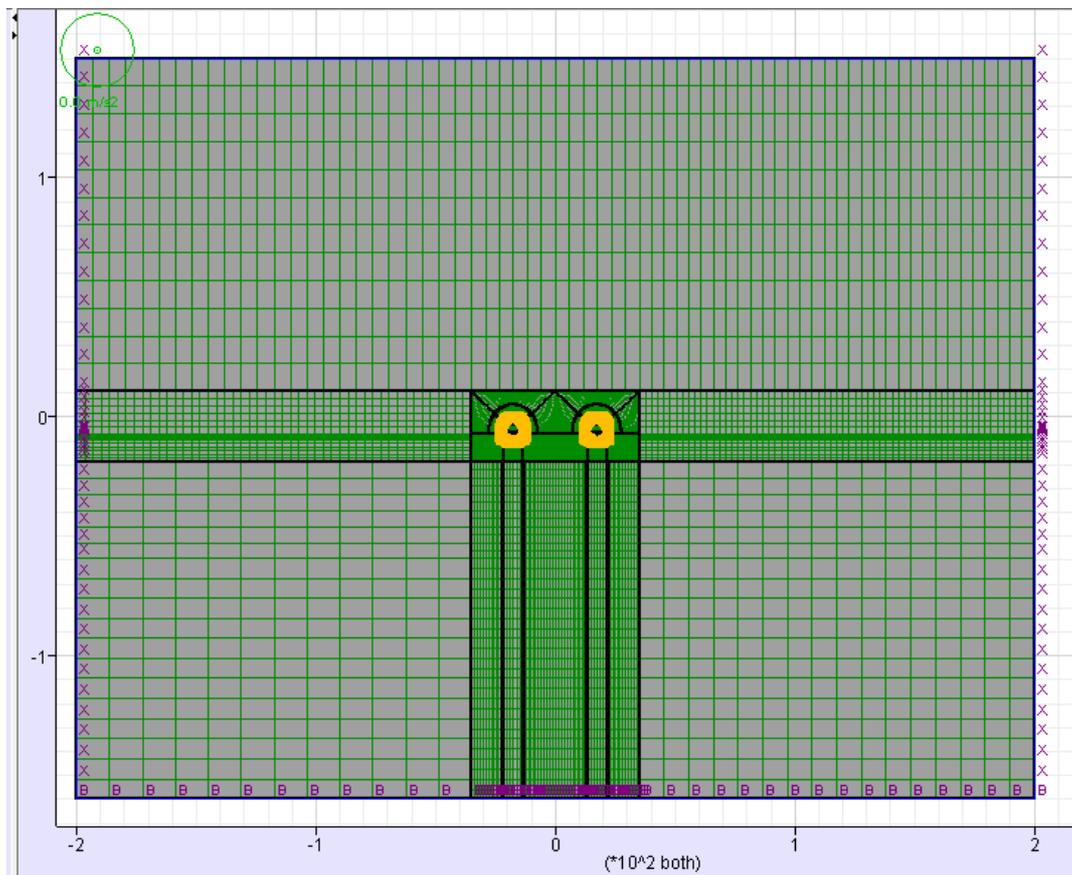
Il terreno è stato modellato attraverso un unico strato con una copertura in chiave calotta di circa 500m, avente le caratteristiche del Gruppo geomeccanico 2a delle Argilliti a palombini precedentemente riportate. Le analisi sono state eseguite in campo elasto-plastico utilizzando un modello costitutivo di tipo “*strain softening*”.

I rivestimenti di prima fase sono stati modellati tramite elementi beam disposti lungo l'estradosso della galleria, in modo da simulare l'omogenizzazione delle centine e del calcestruzzo proiettato variando la rigidità dell'elemento in funzione della maturazione dello spritz beton. Al contrario i rivestimenti definitivi sono stati modellati in base alla loro reale geometria; col fine di poter valutare le azioni interne, sono stati integrati gli sforzi ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$) valutati dal modello di calcolo lungo le sezioni, in modo da giungere alle azioni sollecitanti per il dimensionamento strutturale.

Si sono introdotte le chiodature radiali tramite elementi in dotazione al software di calcolo denominati “cable”, agenti unicamente assialmente, ai quali sono state assegnate le seguenti caratteristiche:

Bulloni	Resistenza a compressione (kN)
Φ24/1.2m	115

Si è utilizzato un modello di tipo *Plane strain* costituita da una maglia rettangolare di dimensioni 400 m x 310 m. Nel seguito si riporta quindi la mesh di calcolo utilizzata per la galleria naturale, costituita da n° 22488 zone.



Le dimensioni della mesh di elementi finiti sono fissate in maniera tale da evitare che il problema in esame risulti influenzato dalle condizioni di vincolo al contorno. Per quanto concerne le condizioni di vincolo applicate esse constano essenzialmente in un doppio vincolo allo spostamento al contorno inferiore e spostamento orizzontale impedito alle posizioni laterali. La formulazione del vincolo laterale permette dunque lo sviluppo di tensioni normali di compressione ma non di tensioni di taglio agenti in direzione verticale. Tali tensioni sono invece generate al contorno inferiore.

Nel corso delle prime fasi dell'analisi numerica si è provveduto ad imporre al modello lo stato di sforzo esistente in sito prima dell'inizio dello scavo delle gallerie. Per quanto riguarda la condizione iniziale denominata "Geostatico" si sono inizializzati gli sforzi in direzione verticale in modo da assegnare il carico geostatico alle varie quote del modello. Gli sforzi in direzione orizzontale vengono invece determinati in funzione degli sforzi in direzione verticale attraverso il coefficiente di spinta a riposo (K_0). Dato che tale procedura è utilizzata unicamente con lo scopo di creare le condizioni iniziali per l'analisi in corso, non si tratta di una reale fase di calcolo; al termine di tale procedura vengono quindi azzerati gli spostamenti in ogni punto del modello.

L'analisi si basa su una successione di fasi di calcolo "Time", descritte nel seguito, le quali permettono di descrivere i differenti interventi costruttivi e di schematizzare le differenti condizioni di carico.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
IG5103ECVCLGN0000001A00		Foglio 109 di 166

8.7.1. Rivestimenti di prima fase e fasi di calcolo

L'analisi si basa su una successione di fasi di calcolo (time), che permettono di descrivere i differenti interventi costruttivi e di schematizzare le differenti condizioni di carico.

La simulazione delle fasi fa riferimento ad una velocità di avanzamento variabile fra 1.5m/g e 2.0 m/g, tipiche per lo scavo in questo tipo di materiale, da cui derivano le caratteristiche di deformabilità dello spritz beton impiegate. Si riportano le caratteristiche principali delle sezioni omogenizzate composte da centine e spritz – beton nel calcolo.

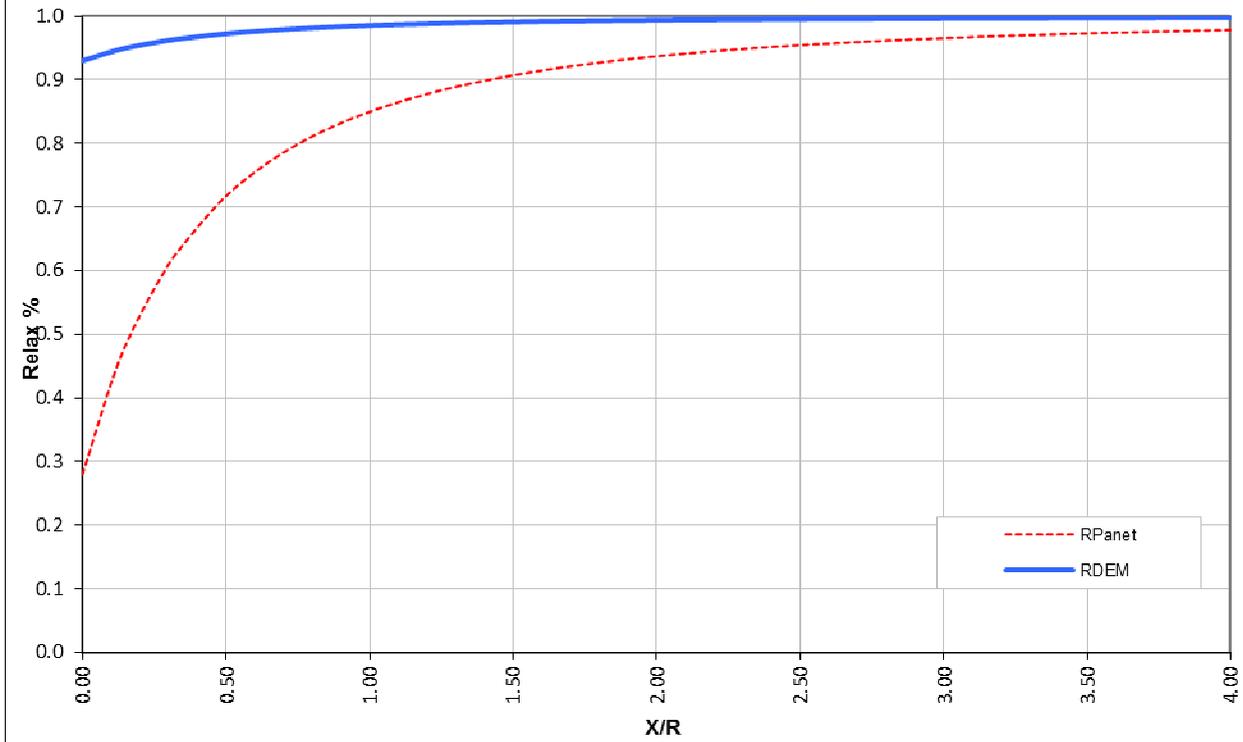
Centina	IPN 220
n°	2.0
Passo [m]	1.2
E [Gpa]	210.0

Spritz - Beton	
E _{28gg} [Gpa]	20
Spessore [m]	0.3

Maturazione	E _{om}	S _{om}	EA	EI
[gg]	[Gpa]	[m]	[KN]	[KN*m ²]
0.5	8.240	0.3027	2494055	19041
3	18.551	0.3011	5586257	42215
28	24.101	0.3009	7250787	54690
28	24.101	0.3009	7250787	54690

Di seguito si riportano le fasi di calcolo ed i valori di relax utilizzati, oltre alle caratteristiche dei rivestimenti di prima fase utilizzati in tali fasi.

LAVORO		COCIV - TRATTA AV/AC TERZO VALICO DEI GIOVI									
Sezione		B1 - 500m									
TIME	DESCRIZIONE	RIFERIMENTO PRIMA CANNA					RIFERIMENTO SECONDA CANNA				
		INIZIO STAGE		FINE STAGE		MATURAZIONE SPRITZ BETON	INIZIO STAGE		FINE STAGE		MATURAZIONE SPRITZ BETON
xfronte [m]	R(FEM)	xfronte [m]	R(FEM)	xfronte [m]	R(FEM)		xfronte [m]	R(FEM)	xfronte [m]	R(FEM)	
Geostatico	Geostatico	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 1	Fronte di scavo prima canna	0	0.0%	0	93.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 2	Avanzamento mezzo sfondo	0	93.0%	0.6	95.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 3	Installazione prerivestimento e avanzamento	0.6	95.0%	2.5	96.0%	0.5 gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 4	Maturazione sb e avanzamento	2.5	96.0%	5	96.5%	3gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 5	Installazione chiodature e avanzamento	5	96.5%	10	97.0%	3gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 6	Maturazione sb e avanzamento	10	97.0%	50	99.0%	28gg	-∞	0.0%	0	0.0%	-
Time 7	Fronte di scavo seconda canna					28gg	0	0.0%	0	93.0%	-
Time 8	Avanzamento mezzo sfondo					28gg	0	93.0%	0.6	95.0%	-
Time 9	Installazione prerivestimento e avanzamento					28gg	0.6	95.0%	2.5	96.0%	0.5 gg
Time 10	Maturazione sb e avanzamento					28gg	2.5	96.0%	5	96.5%	3gg
Time 11	Installazione chiodature e avanzamento					28gg	5	96.5%	10	97.0%	3gg
Time 12	Maturazione sb e avanzamento					28gg	10	97.0%	50	99.0%	28gg
Time 13	Getto arco rovescio prima canna	≈ 9 diametri	99.0%	≈ 15 diametri	99.5%	28gg					28gg
Time 14	Completamento prima canna	≈ 15 diametri	99.5%	> 15 diametri	100.0%	28gg					28gg
Time 15	Getto arco rovescio seconda canna					28gg	≈ 9 diametri	99.0%	≈ 15 diametri	99.5%	28gg
Time 16	Completamento seconda canna					28gg	≈ 15 diametri	99.5%	> 15 diametri	100.0%	28gg
Time 17	Lungo termine			∞	100.0%	-			∞	100.0%	-

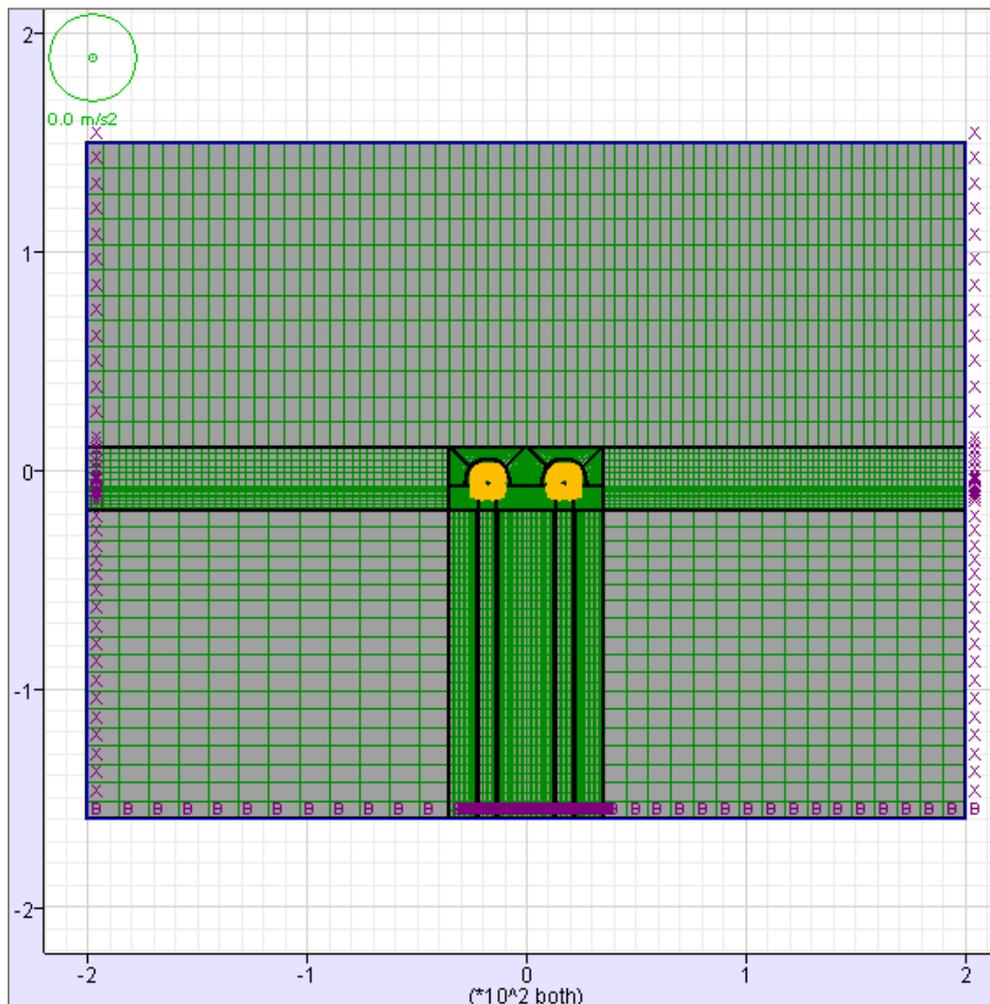
Curva di Panet $N_s = 1$ 

8.8. Modello 4: Sezione tipo B2/1sb copertura 500m

Il terreno è stato modellato attraverso un unico strato con una copertura in chiave calotta di circa 500m, avente le caratteristiche del Gruppo geomeccanico 2a delle Argilliti a palombini precedentemente riportate. Le analisi sono state eseguite in campo elasto-plastico utilizzando un modello costitutivo di tipo "strain softening".

I rivestimenti di prima fase sono stati modellati tramite elementi beam disposti lungo l'estradosso della galleria, in modo da simulare l'omogenizzazione delle centine e del calcestruzzo proiettato variando la rigidezza dell'elemento in funzione della maturazione dello spritz beton. Al contrario i rivestimenti definitivi sono stati modellati in base alla loro reale geometria; col fine di poter valutare le azioni interne, sono stati integrati gli sforzi ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$) valutati dal modello di calcolo lungo le sezioni, in modo da giungere alle azioni sollecitanti per il dimensionamento strutturale.

Si è utilizzato un modello di tipo *Plane strain* costituita da una maglia rettangolare di dimensioni 400 m x 310 m. Nel seguito si riporta quindi la mesh di calcolo utilizzata per la galleria naturale, costituita da n° 22488 zone.



GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE				
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 224 1532 315"> <tr> <td>Foglio</td> <td>112 di</td> </tr> <tr> <td></td> <td>166</td> </tr> </table>	Foglio	112 di		166
Foglio	112 di				
	166				

Le dimensioni della mesh di elementi finiti sono fissate in maniera tale da evitare che il problema in esame risulti influenzato dalle condizioni di vincolo al contorno. Per quanto concerne le condizioni di vincolo applicate esse constano essenzialmente in un doppio vincolo allo spostamento al contorno inferiore e spostamento orizzontale impedito alle posizioni laterali. La formulazione del vincolo laterale permette dunque lo sviluppo di tensioni normali di compressione ma non di tensioni di taglio agenti in direzione verticale. Tali tensioni sono invece generate al contorno inferiore.

Nel corso delle prime fasi dell'analisi numerica si è provveduto ad imporre al modello lo stato di sforzo esistente in sito prima dell'inizio dello scavo delle gallerie. Per quanto riguarda la condizione iniziale denominata "Geostatico" si sono inizializzati gli sforzi in direzione verticale in modo da assegnare il carico geostatico alle varie quote del modello. Gli sforzi in direzione orizzontale vengono invece determinati in funzione degli sforzi in direzione verticale attraverso il coefficiente di spinta a riposo (K_0). Dato che tale procedura è utilizzata unicamente con lo scopo di creare le condizioni iniziali per l'analisi in corso, non si tratta di una reale fase di calcolo; al termine di tale procedura vengono quindi azzerati gli spostamenti in ogni punto del modello.

L'analisi si basa su una successione di fasi di calcolo "Time", descritte nel seguito, le quali permettono di descrivere i differenti interventi costruttivi e di schematizzare le differenti condizioni di carico.

8.8.1. Rivestimenti di prima fase e fasi di calcolo

L'analisi si basa su una successione di fasi di calcolo (time), che permettono di descrivere i differenti interventi costruttivi e di schematizzare le differenti condizioni di carico.

La simulazione delle fasi fa riferimento ad una velocità di avanzamento variabile fra 1.3m/g e 1.6 m/g, tipiche per lo scavo in questo tipo di materiale, da cui derivano le caratteristiche di deformabilità dello spritz beton impiegate. Si riportano le caratteristiche principali delle sezioni omogenizzate composte da centine e spritz – beton nel calcolo.

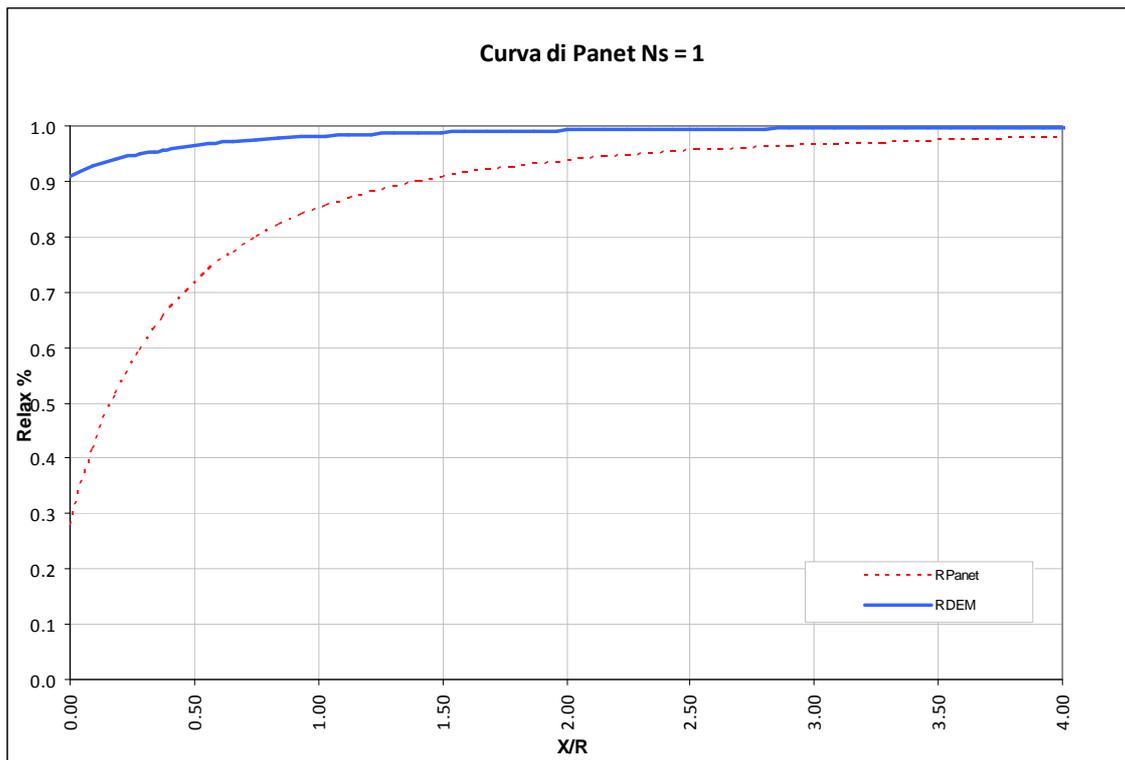
Centina	HE 200 B
n°	1.0
Passo [m]	1.0
E [Gpa]	210.0

Spritz - Beton	
E _{28gg} [Gpa]	20
Spessore [m]	0.3

Maturazione	E _{om}	S _{om}	EA	EI
[gg]	[Gpa]	[m]	[KN]	[KN*m ²]
0.5	9.230	0.2976	2746595	20270
3	19.490	0.2989	5825891	43381
28	25.013	0.2992	7483474	55822
28	25.013	0.2992	7483474	55822

Di seguito si riportano le fasi di calcolo ed i valori di relax utilizzati, oltre alle caratteristiche dei rivestimenti di prima fase utilizzati in tali fasi.

LAVORO		COCIV - TRATTA AV/AC TERZO VALICO DEI GIOVI									
Sezione		B2/1									
TIME	DESCRIZIONE	RIFERIMENTO PRIMA CANNA					RIFERIMENTO SECONDA CANNA				
		INIZIO STAGE		FINE STAGE		MATURAZIONE SPRITZ BETON	INIZIO STAGE		FINE STAGE		MATURAZIONE SPRITZ BETON
		Xfronte [m]	R(FEM)	Xfronte [m]	R(FEM)		Xfronte [m]	R(FEM)	Xfronte [m]	R(FEM)	
Geostatico	Geostatico	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 1	Fronte di scavo prima canna	0	0.0%	0	91.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 2	Avanzamento mezzo sfondo	0	91.0%	0.5	93.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 3	Installazione prerinvestimento e avanzamento	0.5	93.0%	2	94.5%	0.5 gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 4	Maturazione sb e avanzamento	2	94.5%	9	97.0%	3 gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 5	Maturazione sb e avanzamento	9	97.0%	≈ 5 diametri	98.5%	28 gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 6	Getto arco rovescio prima canna	≈ 5 diametri	98.5%	> 5 diametri	99.5%	28 gg	-∞	0.0%	0	0.0%	-
Time 7	Fronte di scavo seconda canna					28 gg	-∞	0.0%	0	91.0%	-
Time 8	Avanzamento mezzo sfondo					28 gg	0	91.0%	0.5	93.0%	-
Time 9	Installazione prerinvestimento e avanzamento					28 gg	0.5	93.0%	2	94.5%	0.5 gg
Time 10	Maturazione sb e avanzamento					28 gg	2	94.5%	9	97.0%	3 gg
Time 11	Maturazione sb e avanzamento					28 gg	9	97.0%	≈ 5 diametri	98.5%	28 gg
Time 13	Completamento prima canna	≈ 9 diametri	99.5%	+∞	100.0%	28 gg					28 gg
Time 12	Getto arco rovescio seconda canna					28 gg	≈ 5 diametri	98.5%	≈ 9 diametri	99.5%	28 gg
Time 14	Completamento seconda canna					28 gg	≈ 9 diametri	99.5%	+∞	100.0%	28 gg
Time 15	Lungo termine			+∞	100.0%	-			+∞	100.0%	-



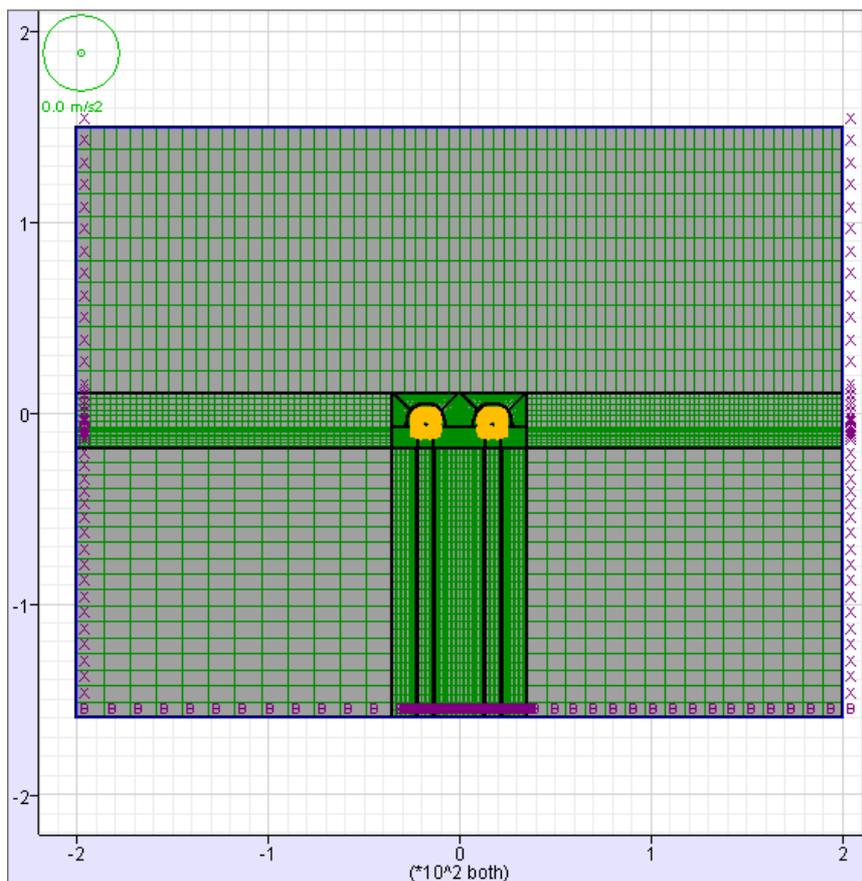
8.9. Modello 5: Sezione tipo C4 Copertura 500m

Il terreno è stato modellato attraverso un unico strato con una copertura in chiave calotta di circa 500m, avente le caratteristiche del Gruppo geomeccanico 3a delle Argilliti a palombini precedentemente riportate. Per quanto riguarda il consolidamento al contorno, esso è stato tenuto in conto utilizzando i parametri del terreno consolidato nella coronella di terreno trattata, impiegando i parametri indicati nei paragrafi precedenti.

Le analisi sono state eseguite in campo elasto-plastico utilizzando un modello costitutivo di tipo "strain softening".

I rivestimenti di prima fase sono stati modellati tramite elementi beam disposti lungo l'estradosso della galleria, in modo da simulare l'omogenizzazione delle centine e del calcestruzzo proiettato variando la rigidezza dell'elemento in funzione della maturazione dello spritz beton. Al contrario i rivestimenti definitivi sono stati modellati in base alla loro reale geometria; col fine di poter valutare le azioni interne, sono stati integrati gli sforzi ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$) valutati dal modello di calcolo lungo le sezioni, in modo da giungere alle azioni sollecitanti per il dimensionamento strutturale.

Si è utilizzato un modello di tipo *Plane strain* costituita da una maglia rettangolare di dimensioni 400 m x 310 m.. Nel seguito si riporta quindi la mesh di calcolo utilizzata per la galleria naturale, costituita da 27216 zone.



GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE				
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315"> <tr> <td>Foglio</td> <td>115 di</td> </tr> <tr> <td></td> <td>166</td> </tr> </table>	Foglio	115 di		166
Foglio	115 di				
	166				

Le dimensioni della mesh di elementi finiti sono fissate in maniera tale da evitare che il problema in esame risulti influenzato dalle condizioni di vincolo al contorno. Per quanto concerne le condizioni di vincolo applicate, esse sono definite come “Standard fixities” all’interno del programma PLAXIS e constano essenzialmente in un doppio vincolo allo spostamento al contorno inferiore e spostamento orizzontale impedito alle posizioni laterali. La formulazione del vincolo laterale permette dunque lo sviluppo di tensioni normali di compressione ma non di tensioni di taglio agenti in direzione verticale. Tali tensioni sono invece generate al contorno inferiore.

Nel corso delle prime fasi dell’analisi numerica si è provveduto ad imporre al modello lo stato di sforzo esistente in sito prima dell’inizio dello scavo delle gallerie. Per quanto riguarda la condizione iniziale denominata “Geostatico” si sono inizializzati gli sforzi in direzione verticale in modo da assegnare il carico geostatico alle varie quote del modello. Gli sforzi in direzione orizzontale vengono invece determinati in funzione degli sforzi in direzione verticale attraverso il coefficiente di spinta a riposo (K_0). Dato che tale procedura è utilizzata unicamente con lo scopo di creare le condizioni iniziali per l’analisi in corso, non si tratta di una reale fase di calcolo; al termine di tale procedura vengono quindi azzerati gli spostamenti in ogni punto del modello. L’analisi si basa su una successione di fasi di calcolo “Time”, descritte nel seguito, le quali permettono di descrivere i differenti interventi costruttivi e di schematizzare le differenti condizioni di carico.

8.9.1. Rivestimenti di prima fase e fasi di calcolo

L’analisi si basa su una successione di fasi di calcolo (time), che permettono di descrivere i differenti interventi costruttivi e di schematizzare le differenti condizioni di carico.

La simulazione delle fasi fa riferimento ad una velocità di avanzamento variabile fra 0.8 m/g e 1.2 m/g, tipiche per lo scavo in questo tipo di materiale, da cui derivano le caratteristiche di deformabilità dello spritz beton impiegate. Si riportano le caratteristiche principali delle sezioni omogenizzate composte da centine e spritz – beton nel calcolo.

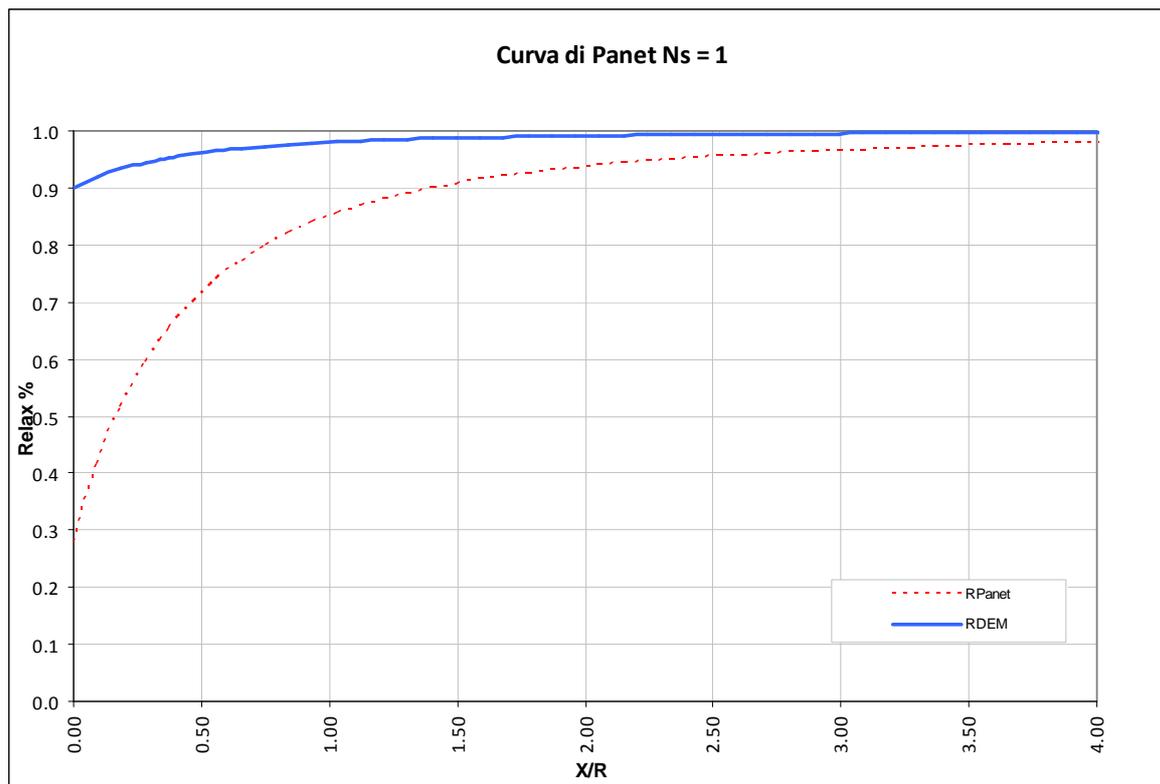
Centina	HE 240 B
n°	1.0
Passo [m]	1.0
E [Gpa]	210.0

Spritz - Beton	
E_{28gg} [Gpa]	24
Spessore [m]	0.3

Maturazione	E_{om}	S_{om}	EA	EI
[gg]	[Gpa]	[m]	[KN]	[KN*m ²]
0.5	10.534	0.3362	3541606	33363
2	19.269	0.3204	6173111	52798
5	26.444	0.3147	8321067	68662
28	29.289	0.3131	9171546	74943

Di seguito si riportano le fasi di calcolo ed i valori di relax utilizzati, oltre alle caratteristiche dei rivestimenti di prima fase utilizzati in tali fasi.

LAVORO		COCIV - TRATTA AV/AC TERZO VALICO DEI GIOVI									
Sezione		C4sb 500m									
TIME	DESCRIZIONE	RIFERIMENTO PRIMA CANNA					RIFERIMENTO SECONDA CANNA				
		INIZIO STAGE		FINE STAGE		MATURAZIONE SPRITZ BETON	INIZIO STAGE		FINE STAGE		MATURAZIONE SPRITZ BETON
		Xfronte [m]	R(FEM)	Xfronte [m]	R(FEM)		Xfronte [m]	R(FEM)	Xfronte [m]	R(FEM)	
Geostatico	Geostatico	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 1	Fronte di scavo prima canna	0	0.0%	0	90.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 2	Avanzamento mezzo sfondo	0	90.0%	0.5	92.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 3	Installazione prerinvestimento e avanzamento	0.5	92.0%	1.5	93.0%	0.5 gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 4	Maturazione sb e avanzamento	1.5	93.0%	5	94.5%	3 gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 5	Maturazione sb e avanzamento	5	94.5%	≈ 3 diametri	95.5%	28 gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 6	Getto arco rovescio prima canna	≈ 3 diametri	95.5%	≈ 50m	97.5%	28 gg	-∞	0.0%	≈ -3 diametri	0.0%	-
Time 7	Getto calotta e piedritti prima canna, influenza scavo seconda canna	≈ 50m	97.5%	> 9 diametri	100.0%	28 gg	≈ -3 diametri	0.0%	≈ -1 diametro	60.0%	-
Time 8	Fronte di scavo seconda canna					28 gg	≈ -1 diametro	60.0%	0	88.0%	-
Time 9	Avanzamento mezzo sfondo					28 gg	0	88.0%	0.5	89.5%	-
Time 10	Installazione prerinvestimento e avanzamento					28 gg	0.5	89.5%	1.5	90.5%	0.5 gg
Time 11	Maturazione sb e avanzamento					28 gg	1.5	90.5%	5	91.5%	3 gg
Time 12	Maturazione sb e avanzamento					28 gg	5	91.5%	≈ 3 diametri	93.0%	28 gg
Time 13	Getto arco rovescio seconda canna					28 gg	≈ 3 diametri	93.0%	≈ 9 diametri	96.0%	28 gg
Time 14	Completamento seconda canna					28 gg	≈ 9 diametri	96.0%	> 9 diametri	100.0%	28 gg
Time 15	Lungo termine		100.0%	+∞	100.0%	-	> 9 diametri	100.0%	+∞	100.0%	-



GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE				
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315"> <tr> <td>Foglio</td> <td>117 di</td> </tr> <tr> <td></td> <td>166</td> </tr> </table>	Foglio	117 di		166
Foglio	117 di				
	166				

8.10. Modello 6: Sezione tipo B0-r Copertura 400m

Il terreno è stato modellato attraverso un unico strato con una copertura in chiave calotta di circa 400m, avente le caratteristiche della Formazione di Molare – cementazione elevata precedentemente riportate. Le analisi sono state eseguite in campo elasto-plastico utilizzando un modello costitutivo del terreno di tipo Hoek e Brown.

Si è utilizzato un modello di tipo *Plane strain* a maglia rettangolare di dimensioni 400 x 310. Nel seguito si riporta quindi la mesh di calcolo utilizzata per la galleria naturale, costituita da n° 19656 zone.

I rivestimenti di prima fase sono stati modellati tramite elementi beam disposti lungo l'estradosso della galleria, in modo da simulare l'omogenizzazione delle centine e del calcestruzzo proiettato variando la rigidezza dell'elemento in funzione della maturazione dello spritz beton. Al contrario i rivestimenti definitivi sono stati modellati in base alla loro reale geometria; col fine di poter valutare le azioni interne, sono stati integrati gli sforzi ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$) valutati dal modello di calcolo lungo le sezioni, in modo da giungere alle azioni sollecitanti per il dimensionamento strutturale.



Le dimensioni della mesh di elementi finiti sono fissate in maniera tale da evitare che il problema in esame risulti influenzato dalle condizioni di vincolo al contorno. Per quanto concerne le condizioni di vincolo applicate, queste constano essenzialmente in un doppio vincolo allo spostamento al contorno inferiore e spostamento orizzontale impedito lungo i bordi laterali. La formulazione del vincolo laterale permette dunque lo sviluppo di tensioni normali di compressione ma non di tensioni di taglio agenti in direzione verticale. Tali tensioni sono invece generate al contorno inferiore.

Nel corso delle prime fasi dell'analisi numerica si è provveduto ad imporre al modello lo stato di sforzo esistente in sito prima dell'inizio dello scavo delle gallerie. Per quanto riguarda la condizione iniziale denominata "Geostatico" si sono inizializzati gli sforzi in direzione verticale in modo da assegnare il carico geostatico alle varie quote del modello. Gli sforzi in direzione orizzontale

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 118 di 166

vengono invece determinati in funzione degli sforzi in direzione verticale attraverso il coefficiente di spinta a riposo (K_0). Dato che tale procedura è utilizzata unicamente con lo scopo di creare le condizioni iniziali per l'analisi in corso, non si tratta di una reale fase di calcolo; al termine di tale procedura vengono quindi azzerati gli spostamenti in ogni punto del modello.

L'analisi si basa su una successione di fasi di calcolo "Time", descritte nel seguito, le quali permettono di descrivere i differenti interventi costruttivi e di schematizzare le differenti condizioni di carico.

8.10.1. Rivestimenti di prima fase e fasi di calcolo

La simulazione delle fasi fa riferimento ad una velocità di avanzamento variabile fra 2.5/g e 3m/g, tipiche per lo scavo in questo tipo di materiale, da cui derivano le caratteristiche di deformabilità dello spritz beton impiegate. Si riportano le caratteristiche principali delle sezioni omogenizzate composte da centine e spritz – beton nel calcolo.

Centina	IPN 160
n°	2.0
Passo [m]	1.2
E [Gpa]	210.0

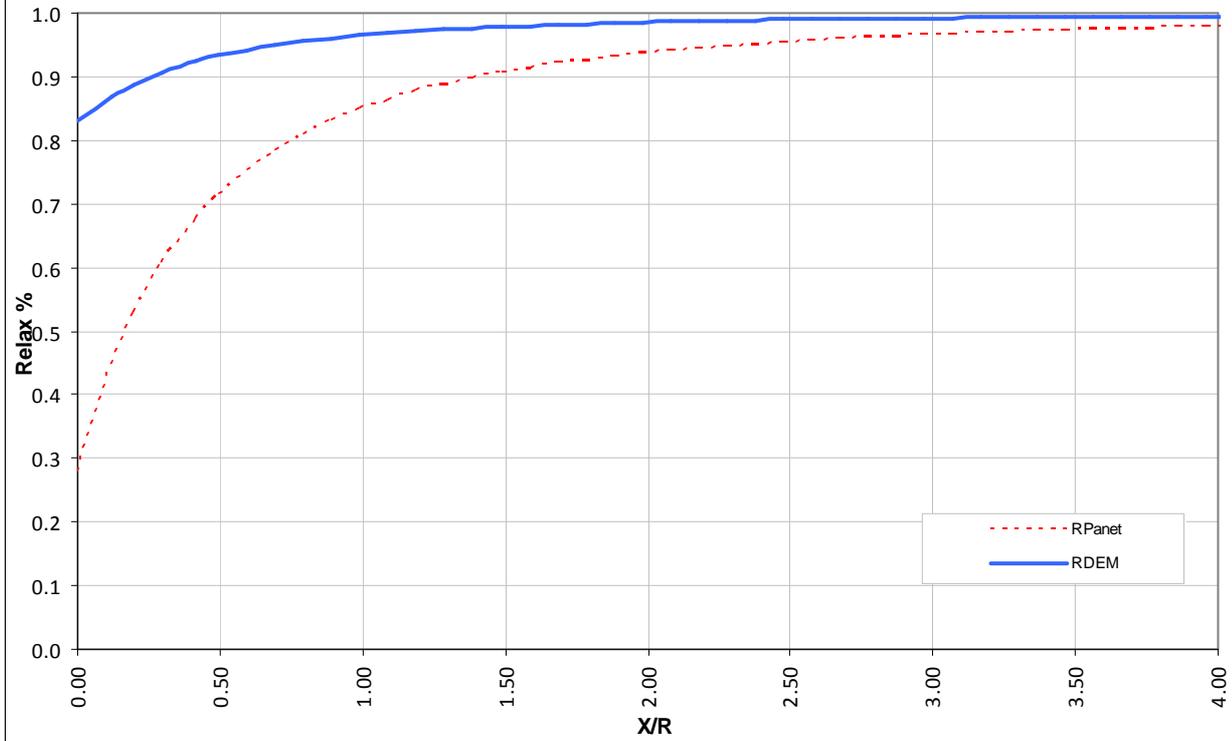
Spritz - Beton	
E_{28gg} [Gpa]	20
Spessore [m]	0.2

Maturazione [gg]	E_{om} [Gpa]	S_{om} [m]	EA [KN]	EI [KN*m ²]
0.5	7.291	0.2114	1541267	5739
3	17.631	0.2047	3608942	12601
28	23.205	0.2035	4721969	16294
28	23.205	0.2035	4721969	16294

Di seguito si riportano le fasi di calcolo ed i valori di "Relax" utilizzati, oltre alle caratteristiche dei rivestimenti di prima fase utilizzati in tali fasi.

LAVORO		RIFERIMENTO PRIMA CANNA					RIFERIMENTO SECONDA CANNA				
Sezione		INIZIO STAGE		FINE STAGE		MATURAZIONE SPRITZ BETON	INIZIO STAGE		FINE STAGE		MATURAZIONE SPRITZ BETON
TIME	DESCRIZIONE	Xfronte [m]	R(FEM)	Xfronte [m]	R(FEM)		Xfronte [m]	R(FEM)	Xfronte [m]	R(FEM)	
Geostatico	Geostatico	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 1	Fronte di scavo prima canna	0	0.0%	0	83.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 2	Avanzamento mezzo sfondo	0	83.0%	2.1	92.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 3	Installazione prerivestimento e avanzamento	2.1	92.0%	5	96.0%	0.5 gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 4	Maturazione sb e avanzamento	5	96.0%	15	97.0%	3gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 5	Maturazione sb e avanzamento	15	97.0%	50	99.0%	28gg	-∞	0.0%	0	0.0%	-
Time 6	Fronte di scavo seconda canna					28gg	0	0.0%	0	83.0%	-
Time 7	Avanzamento mezzo sfondo					28gg	0	83.0%	2.1	92.0%	-
Time 8	Installazione prerivestimento e avanzamento					28gg	2.1	92.0%	5	96.0%	0.5 gg
Time 9	Maturazione sb e avanzamento					28gg	5	96.0%	15	97.0%	3gg
Time 10	Maturazione sb e avanzamento					28gg	15	97.0%	50	99.0%	28gg
Time 11	Getto arco rovescio prima canna	≈ 9 diametri	99.0%	≈ 15 diametri	99.5%	28gg					28gg
Time 12	Completamento prima canna	≈ 15 diametri	99.5%	> 15 diametri	100.0%	28gg					28gg
Time 13	Getto arco rovescio seconda canna					28gg	≈ 9 diametri	99.0%	≈ 15 diametri	99.5%	28gg
Time 14	Completamento seconda canna					28gg	≈ 15 diametri	99.5%	> 15 diametri	100.0%	28gg
Time 15	Lungo termine			+∞	100.0%	-			+∞	100.0%	-

Curva di Panet Ns = 1



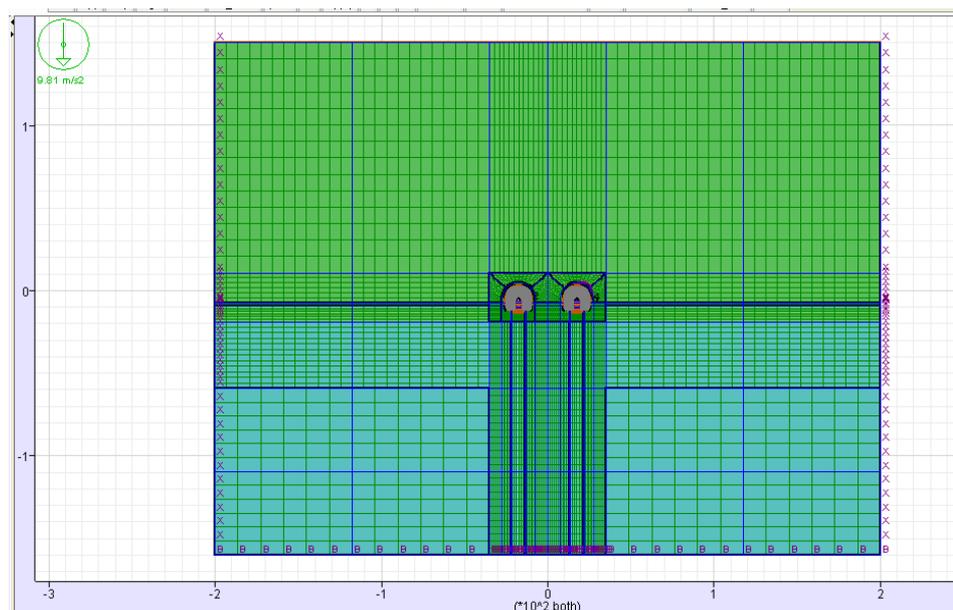
GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00	Foglio 120 di 166

8.11. Modello 7: Sezione tipo C2sb-r Copertura 300m

Il terreno è stato modellato attraverso un unico strato con una copertura in chiave calotta di circa 300m, avente le caratteristiche della Formazione di Molare – zona di faglia precedentemente riportate. Le analisi sono state eseguite in campo elasto-plastico utilizzando un criterio di rottura del terreno di tipo Hoek e Brown.

I rivestimenti di prima fase sono stati modellati tramite elementi beam disposti lungo l'estradosso della galleria, in modo da simulare l'omogenizzazione delle centine e del calcestruzzo proiettato variando la rigidezza dell'elemento in funzione della maturazione dello spritz beton. Al contrario i rivestimenti definitivi sono stati modellati in base alla loro reale geometria; col fine di poter valutare le azioni interne, sono stati integrati gli sforzi ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$) valutati dal modello di calcolo lungo le sezioni, in modo da giungere alle azioni sollecitanti per il dimensionamento strutturale.

Si è utilizzato un modello di tipo *Plane strain* a maglia rettangolare di dimensioni 400 x 310. Nel seguito si riporta quindi la mesh di calcolo utilizzata per la galleria naturale, costituita da n° 19656 zone.



Le dimensioni della mesh di elementi finiti sono fissate in maniera tale da evitare che il problema in esame risulti influenzato dalle condizioni di vincolo al contorno. Per quanto concerne le condizioni di vincolo applicate, queste constano essenzialmente in un doppio vincolo allo spostamento al contorno inferiore e spostamento orizzontale impedito lungo i bordi laterali. La formulazione del vincolo laterale permette dunque lo sviluppo di tensioni normali di compressione ma non di tensioni di taglio agenti in direzione verticale. Tali tensioni sono invece generate al contorno inferiore.

Nel corso delle prime fasi dell'analisi numerica si è provveduto ad imporre al modello lo stato di sforzo esistente in sito prima dell'inizio dello scavo delle gallerie. Per quanto riguarda la condizione iniziale denominata "Geostatico" si sono inizializzati gli sforzi in direzione verticale in modo da assegnare il carico geostatico alle varie quote del modello. Gli sforzi in direzione orizzontale vengono invece determinati in funzione degli sforzi in direzione verticale attraverso il coefficiente di

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 121 di 166

spinta a riposo (K_0). Dato che tale procedura è utilizzata unicamente con lo scopo di creare le condizioni iniziali per l'analisi in corso, non si tratta di una reale fase di calcolo; al termine di tale procedura vengono quindi azzerati gli spostamenti in ogni punto del modello.

L'analisi si basa su una successione di fasi di calcolo "Time", descritte nel seguito, le quali permettono di descrivere i differenti interventi costruttivi e di schematizzare le differenti condizioni di carico.

8.11.1. Rivestimenti di prima fase e fasi di calcolo

La simulazione delle fasi fa riferimento ad una velocità di avanzamento variabile fra 0.8 m/g e 1.4m/g, tipiche per lo scavo in questo tipo di materiale, da cui derivano le caratteristiche di deformabilità dello spritz beton impiegate. Si riportano le caratteristiche principali delle sezioni omogenizzate composte da centine e spritz – beton nel calcolo.

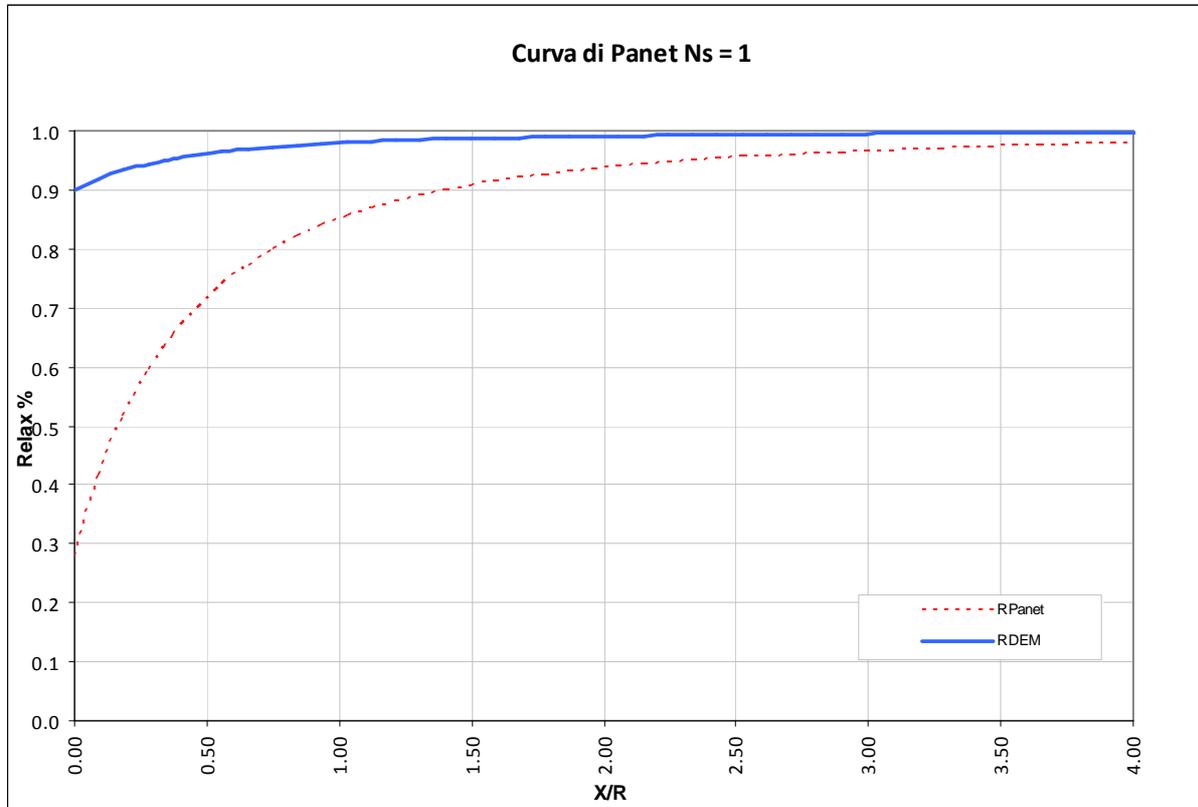
Centina	IPN 200
n°	2.0
Passo [m]	1.0
E [Gpa]	210.0

Spritz - Beton	
E_{28gg} [Gpa]	24
Spessore [m]	0.25

Maturazione	E_{om}	S_{om}	EA	EI
[gg]	[Gpa]	[m]	[KN]	[KN*m ²]
0.5	9.458	0.2653	2508927	14713
3	21.774	0.2565	5586031	30638
28	28.414	0.2549	7242434	39211
28	28.414	0.2549	7242434	39211

Di seguito si riportano le fasi di calcolo ed i valori di "Relax" utilizzati, oltre alle caratteristiche dei rivestimenti definitivi utilizzati in tali fasi.

LAVORO		COCIV - TRATTA AV/AC TERZO VALICO DEI GIOVI									
Sezione		C2sb-r									
TIME	DESCRIZIONE	RIFERIMENTO PRIMA CANNA				RIFERIMENTO SECONDA CANNA					
		INIZIO STAGE		FINE STAGE		MATURAZIONE SPRITZ BETON	INIZIO STAGE		FINE STAGE		MATURAZIONE SPRITZ BETON
		Xfronte [m]	R(FEM)	Xfronte [m]	R(FEM)		Xfronte [m]	R(FEM)	Xfronte [m]	R(FEM)	
Geostatico	Geostatico	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 1	Fronte di scavo prima canna	0	0.0%	0	90.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 2	Avanzamento mezzo sfondo	0	90.0%	0.5	92.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 3	Installazione prerinvestimento e avanzamento	0.5	92.0%	1.5	93.5%	0.5 gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 4	Maturazione sb e avanzamento	1.5	93.5%	5	94.5%	3gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 5	Maturazione sb e avanzamento	5	94.5%	≈ 3 diametri	95.5%	28gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 6	Getto arco rovescio prima canna	≈ 3 diametri	95.5%	≈ 50m	96.5%	28gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 7	Getto calotta e piedritti prima canna	≈ 50m	96.5%	> 9 diametri	100.0%	28gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 8	Fronte di scavo seconda canna					28gg	-∞	0.0%	0	90.0%	-
Time 9	Avanzamento mezzo sfondo					28gg	0	90.0%	0.5	92.0%	-
Time 10	Installazione prerinvestimento e avanzamento					28gg	0.5	92.0%	1.5	93.5%	0.5 gg
Time 11	Maturazione sb e avanzamento					28gg	1.5	93.5%	5	94.5%	3gg
Time 12	Maturazione sb e avanzamento					28gg	5	94.5%	≈ 3 diametri	95.5%	28gg
Time 13	Getto arco rovescio seconda canna					28gg	≈ 3 diametri	95.5%	≈ 9 diametri	96.5%	28gg
Time 14	Completamento seconda canna					28gg	≈ 9 diametri	96.5%	> 9 diametri	100.0%	28gg
Time 15	Lungo termine			+∞	100.0%	-			+∞	100.0%	-



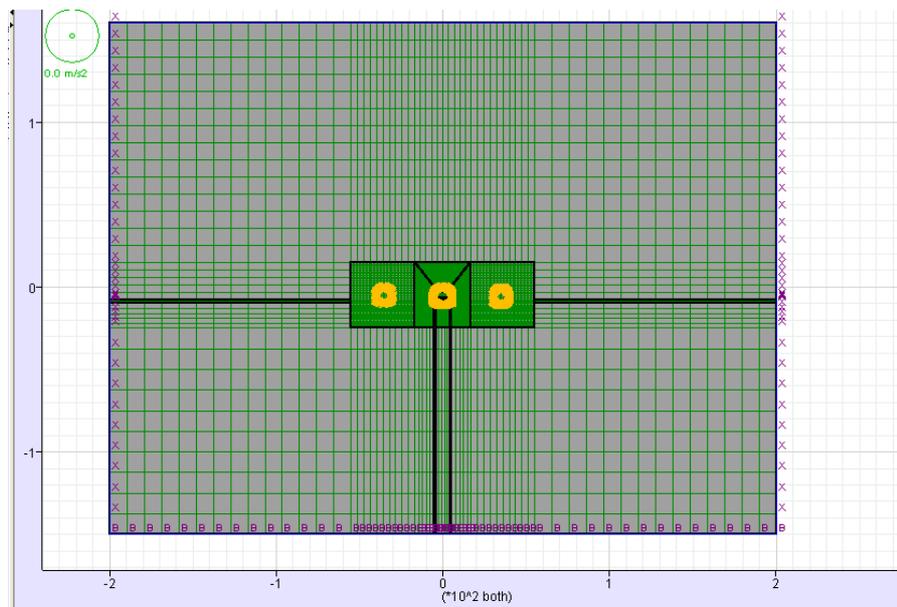
8.12. Modello 8: Area Sicura - Sezione tipo B0L Copertura 300m

Il terreno è stato modellato attraverso un unico strato con una copertura in chiave calotta di circa 300m, avente le caratteristiche del Gruppo geomeccanico 1 delle Argilliti a Palombini precedentemente riportate. Le analisi sono state eseguite in campo elasto-plastico utilizzando un modello costitutivo di tipo “*strain softening*”.

Per quanto riguarda i modelli relativi all'area sicura si è modellata la canna centrale, oggetto di analisi, impiegando elementi beam disposti lungo l'estradosso della galleria, in modo da simulare l'omogenizzazione delle centine e del calcestruzzo proiettato variando la rigidità dell'elemento in funzione della maturazione dello spritz beton. Al contrario i rivestimenti definitivi sono stati modellati in base alla loro reale geometria; col fine di poter valutare le azioni interne, sono stati integrati gli sforzi ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$) valutati dal modello di calcolo lungo le sezioni, in modo da giungere alle azioni sollecitanti per il dimensionamento strutturale.

Al contrario la seconda canna, avente geometria delle sezioni a singolo binario, e il cunicolo in affiancamento sono stati modellati mediante elementi beam sia per quanto riguarda i prerinvestimenti che i rivestimenti definitivi.

Si è utilizzato un modello “Plane strain” bidimensionale costituito da una maglia rettangolare di dimensioni pari a 400 x 310 m. Nel seguito si riporta quindi la mesh di calcolo utilizzata per il dimensionamento della galleria naturale, costituita da n° 11282 zone.



Le dimensioni della mesh di elementi finiti sono fissate in maniera tale da evitare che il problema in esame risulti influenzato dalle condizioni di vincolo al contorno. Per quanto concerne le condizioni di vincolo applicate, queste constano essenzialmente in un doppio vincolo allo spostamento al contorno inferiore e spostamento orizzontale impedito lungo i bordi laterali. La formulazione del vincolo laterale permette dunque lo sviluppo di tensioni normali di compressione ma non di tensioni di taglio agenti in direzione verticale. Tali tensioni sono invece generate al contorno inferiore.

Nel corso delle prime fasi dell’analisi numerica si è provveduto ad imporre al modello lo stato di sforzo esistente in sito prima dell’inizio dello scavo delle gallerie. Per quanto riguarda la condizione iniziale denominata “Geostatico” si sono inizializzati gli sforzi in direzione verticale in modo da assegnare il carico geostatico alle varie quote del modello. Gli sforzi in direzione orizzontale vengono invece determinati in funzione degli sforzi in direzione verticale attraverso il coefficiente di spinta a riposo (K_0). Dato che tale procedura è utilizzata unicamente con lo scopo di creare le condizioni iniziali per l’analisi in corso, non si tratta di una reale fase di calcolo; al termine di tale procedura vengono quindi azzerati gli spostamenti in ogni punto del modello.

L’analisi si basa su una successione di fasi di calcolo “Time”, descritte nel seguito, le quali permettono di descrivere i differenti interventi costruttivi e di schematizzare le differenti condizioni di carico.

8.12.1. Rivestimenti di prima fase e fasi di calcolo

La simulazione delle fasi fa riferimento ad una velocità di avanzamento variabile fra 2 m/g e i 3m/g, tipiche per lo scavo in questo tipo di materiale per sezioni aventi aree di scavo comparabili, da cui derivano le caratteristiche di deformabilità dello spritz beton impiegate. Si riportano le caratteristiche

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
IG5103ECVCLGN0000001A00		Foglio 124 di 166

principali delle sezioni omogenizzate composte da centine e spritz – beton nel calcolo. Tali valori sono riferiti a tutte e tre le sezioni (area sicura, singolo binario, cunicolo in affiancamento).

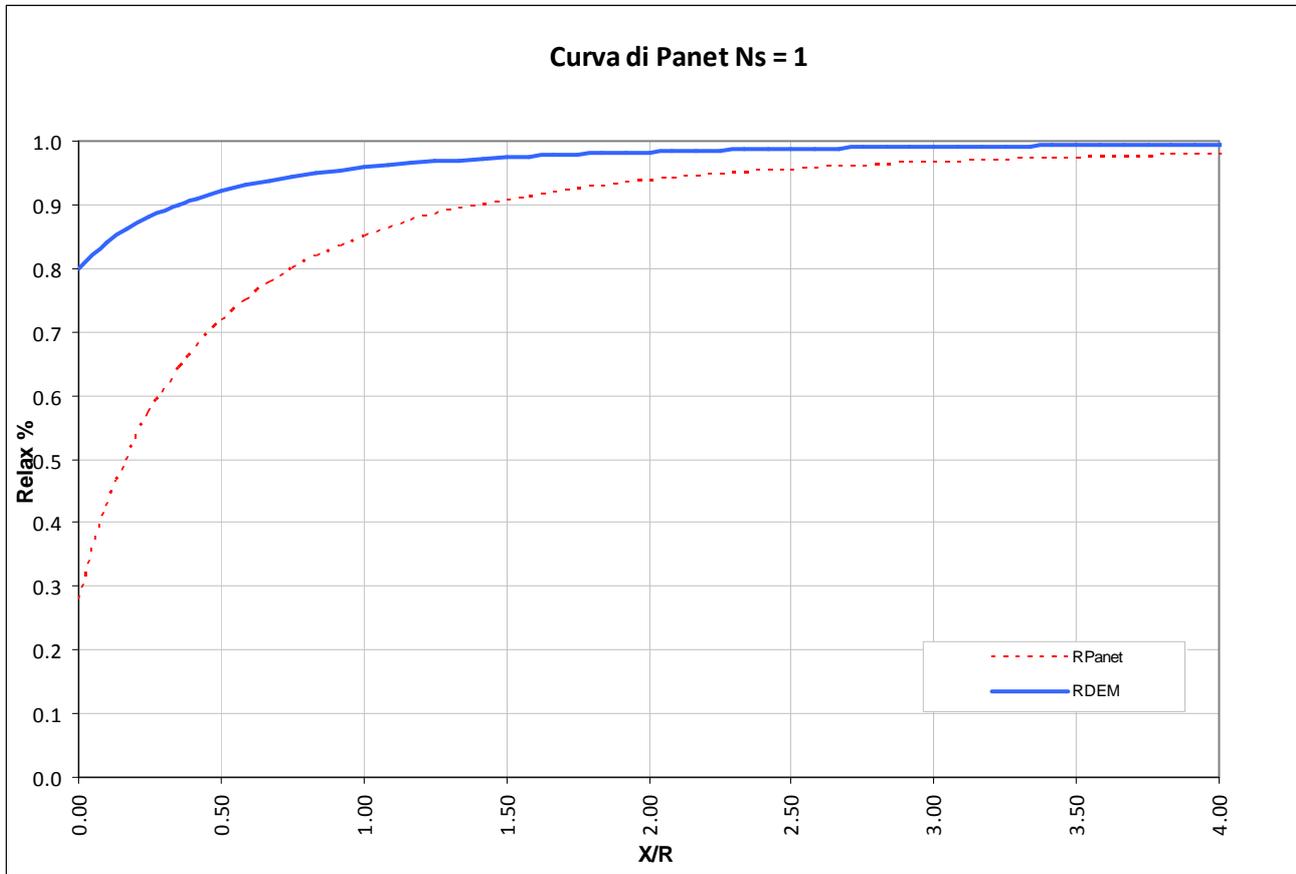
Centina	IPN 160
n°	2.0
Passo [m]	1.4
E [Gpa]	210.0

Spritz - Beton	
E _{28gg} [Gpa]	20
Spessore [m]	0.2

Maturazione	E _{om}	S _{om}	A	I
[gg]	[Gpa]	[m]	[m]	[m4]
0.5	6.789	0.2105	2.105E-01	7.777E-04
3	17.158	0.2041	2.041E-01	7.090E-04
28	22.746	0.2031	2.031E-01	6.978E-04
28	22.746	0.2031	2.031E-01	6.978E-04

Di seguito si riportano le fasi di calcolo ed i valori di “Relax” utilizzati, oltre alle caratteristiche dei rivestimenti di prima fase utilizzati in tali fasi.

LAVORO		RIFERIMENTO PRIMA CANNA					RIFERIMENTO SECONDA CANNA				
Sezione		INIZIO STAGE		FINE STAGE		MATURAZIONE SPRITZ BETON	INIZIO STAGE		FINE STAGE		MATURAZIONE SPRITZ BETON
COCIV - TRATTA AV/AC TERZO VALICO DEI GIOVI AREA SICURA BOL - 300m		Xfronte [m]	R(FEM)	Xfronte [m]	R(FEM)		Xfronte [m]	R(FEM)	Xfronte [m]	R(FEM)	
Geostatico	Geostatico	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 1	Fronte di scavo prima canna	0	0.0%	0	80.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 2	Avanzamento mezzo sfondo	0	80.0%	2.1	89.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 3	Installazione prerinvestimento e avanzamento	2.1	89.0%	5	94.0%	0.5 gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 4	Maturazione sb e avanzamento	5	94.0%	15	95.0%	3gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 5	Maturazione sb e avanzamento	15	95.0%	50	97.0%	28gg	-∞	0.0%	0	0.0%	-
Time 6	Fronte di scavo seconda canna					28gg	0	0.0%	0	82.0%	-
Time 7	Avanzamento mezzo sfondo					28gg	0	82.0%	2.1	91.0%	-
Time 8	Installazione prerinvestimento e avanzamento					28gg	2.1	91.0%	5	96.0%	0.5 gg
Time 9	Maturazione sb e avanzamento					28gg	5	96.0%	15	97.0%	3gg
Time 10	Maturazione sb e avanzamento					28gg	15	97.0%	50	98.0%	28gg
Time 11	Getto arco rovescio prima canna	≈ 9 diametri	97.0%	≈ 15 diametri	98.0%	28gg					28gg
Time 12	Completamento prima canna	≈ 15 diametri	98.0%	> 15 diametri	100.0%	28gg					28gg
Time 13	Getto arco rovescio seconda canna					28gg	≈ 9 diametri	98.0%	≈ 15 diametri	99.0%	28gg
Time 14	Completamento seconda canna					28gg	≈ 15 diametri	99.0%	> 15 diametri	100.0%	28gg
RIFERIMENTO CUNICOLO DI ESODO RAPIDO											
Time 15	Fronte di scavo cunicolo	0	0.0%	0	82.0%	-					
Time 16	Avanzamento mezzo sfondo	0	82.0%	2.1	91.0%	-					
Time 17	Installazione prerinvestimento e avanzamento	2.1	91.0%	5	96.0%	0.5 gg					
Time 18	Maturazione sb e avanzamento	5	96.0%	15	97.0%	3gg					
Time 19	Maturazione sb e avanzamento	15	97.0%	≈ 9 diametri	98.0%	28gg					
Time 20	Getto arco rovescio cunicolo	≈ 9 diametri	98.0%	≈ 15 diametri	99.0%	28gg					
Time 21	Completamento cunicolo	≈ 15 diametri	99.0%	> 15 diametri	100.0%	28gg					
Time 22	Fase di lungo termine		100.0%		100.0%	-					



8.13. Modello 9: Sezione tipo B0 Copertura 400m

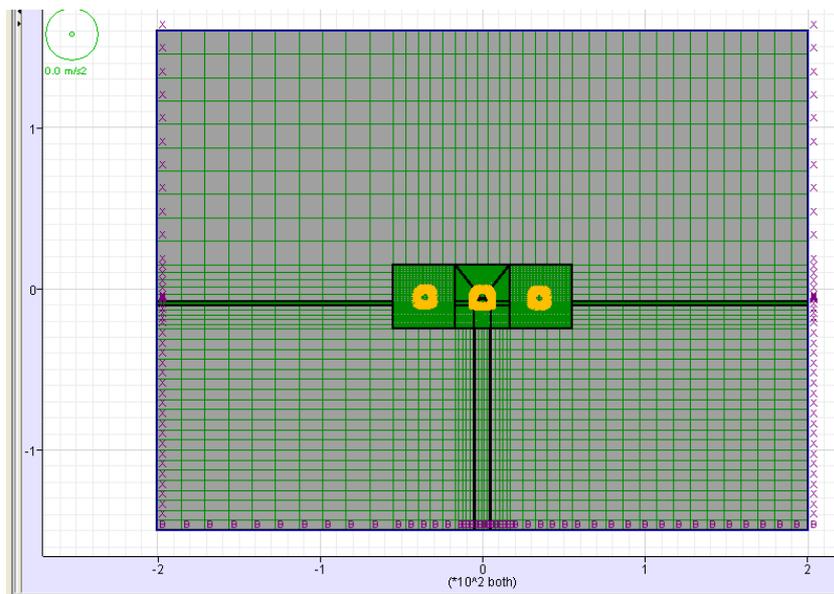
Il terreno è stato modellato attraverso un unico strato con una copertura in chiave calotta di circa 400m, avente le caratteristiche del Gruppo geomeccanico 1 delle Argilliti a Palombini precedentemente riportate. Le analisi sono state eseguite in campo elasto-plastico utilizzando un modello costitutivo di tipo "strain softening".

Per quanto riguarda i modelli relativi all'area sicura si è modellata la canna centrale, oggetto di analisi, impiegando elementi beam disposti lungo l'estradosso della galleria, in modo da simulare l'omogenizzazione delle centine e del calcestruzzo proiettato variando la rigidità dell'elemento in funzione della maturazione dello spritz beton. Al contrario i rivestimenti definitivi sono stati modellati in base alla loro reale geometria; col fine di poter valutare le azioni interne, sono stati integrati gli sforzi ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$) valutati dal modello di calcolo lungo le sezioni, in modo da giungere alle azioni sollecitanti per il dimensionamento strutturale.

Al contrario la seconda canna, avente geometria delle sezioni a singolo binario, e il cunicolo in affiancamento sono stati modellati mediante elementi beam sia per quanto riguarda i prerinvestimenti che i rivestimenti definitivi.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 224 1532 315"> <tr> <td>Foglio 126 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 126 di 166
Foglio 126 di 166		

Si è utilizzato un modello “Plane strain” bidimensionale costituito da una maglia rettangolare di dimensioni pari a 400 x 310 m. Nel seguito si riporta quindi la mesh di calcolo utilizzata per il dimensionamento della galleria naturale, costituita da n° 9640 zone.



Le dimensioni della mesh di elementi finiti sono fissate in maniera tale da evitare che il problema in esame risulti influenzato dalle condizioni di vincolo al contorno. Per quanto concerne le condizioni di vincolo applicate, queste constano essenzialmente in un doppio vincolo allo spostamento al contorno inferiore e spostamento orizzontale impedito lungo i bordi laterali. La formulazione del vincolo laterale permette dunque lo sviluppo di tensioni normali di compressione ma non di tensioni di taglio agenti in direzione verticale. Tali tensioni sono invece generate al contorno inferiore.

Nel corso delle prime fasi dell’analisi numerica si è provveduto ad imporre al modello lo stato di sforzo esistente in sito prima dell’inizio dello scavo delle gallerie. Per quanto riguarda la condizione iniziale denominata “Geostatico” si sono inizializzati gli sforzi in direzione verticale in modo da assegnare il carico geostatico alle varie quote del modello. Gli sforzi in direzione orizzontale vengono invece determinati in funzione degli sforzi in direzione verticale attraverso il coefficiente di spinta a riposo (K_0). Dato che tale procedura è utilizzata unicamente con lo scopo di creare le condizioni iniziali per l’analisi in corso, non si tratta di una reale fase di calcolo; al termine di tale procedura vengono quindi azzerati gli spostamenti in ogni punto del modello.

L’analisi si basa su una successione di fasi di calcolo “Time”, descritte nel seguito, le quali permettono di descrivere i differenti interventi costruttivi e di schematizzare le differenti condizioni di carico.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 127 di 166

8.13.1. Rivestimenti di prima fase e fasi di calcolo

La simulazione delle fasi fa riferimento ad una velocità di avanzamento variabile fra 2 m/g e i 3m/g, tipiche per lo scavo in questo tipo di materiale per sezioni aventi aree di scavo comparabili, da cui derivano le caratteristiche di deformabilità dello spritz beton impiegate. Si riportano le caratteristiche principali delle sezioni omogenizzate composte da centine e spritz – beton nel calcolo. Tali valori sono riferiti alla sezione di area sicura.

Centina	IPN 180
n°	2.0
Passo [m]	1.2
E [Gpa]	210.0

Spritz - Beton	
E _{28gg} [Gpa]	20
Spessore [m]	0.25

Maturazione	E _{om}	s _{om}	A	I
[gg]	[Gpa]	[m]	[m]	[m4]
0.5	7.628	0.2499	2.499E-01	1.300E-03
3	17.970	0.2499	2.499E-01	1.301E-03
28	23.538	0.2500	2.500E-01	1.301E-03
28	23.538	0.2500	2.500E-01	1.301E-03

Per la sezione a singolo binario e per il cunicolo si sono invece impiegati i seguenti valori

Centina	HE 180 B
n°	1.0
Passo [m]	1.2
E [Gpa]	210.0

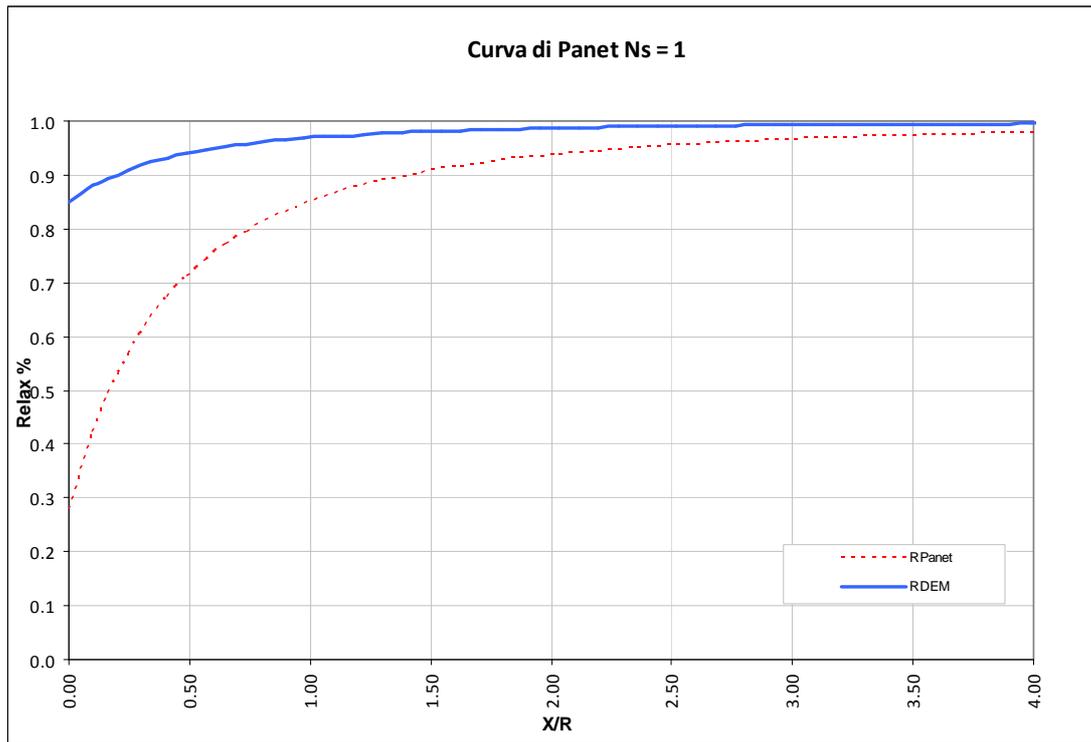
Spritz - Beton	
E _{28gg} [Gpa]	20
Spessore [m]	0.25

Maturazione	E _{om}	s _{om}	A	I
[gg]	[Gpa]	[m]	[m]	[m4]
0.5	8.002	0.2585	2.585E-01	1.439E-03
3	18.318	0.2536	2.536E-01	1.359E-03
28	23.874	0.2527	2.527E-01	1.345E-03
28	23.874	0.2527	2.527E-01	1.345E-03

Di seguito si riportano le fasi di calcolo ed i valori di “Relax” utilizzati, oltre alle caratteristiche dei rivestimenti di prima fase utilizzati in tali fasi.



LAVORO		RIFERIMENTO PRIMA CANNA					RIFERIMENTO SECONDA CANNA				
Sezione		INIZIO STAGE		FINE STAGE		MATURAZIONE SPRITZ BETON	INIZIO STAGE		FINE STAGE		MATURAZIONE SPRITZ BETON
TIME	DESCRIZIONE	Xfronte [m]	R(FEM)	Xfronte [m]	R(FEM)		Xfronte [m]	R(FEM)	Xfronte [m]	R(FEM)	
Geostatico	Geostatico	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 1	Fronte di scavo prima canna	0	0.0%	0	85.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 2	Avanzamento mezzo sfondo	0	85.0%	1.8	90.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 3	Installazione prerivestimento e avanzamento	1.8	90.0%	5	94.0%	0.5 gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 4	Maturazione sb e avanzamento	5	94.0%	15	95.0%	3gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 5	Maturazione sb e avanzamento	15	95.0%	50	97.0%	28gg	-∞	0.0%	0	0.0%	-
Time 6	Fronte di scavo seconda canna					28gg	0	0.0%	0	85.0%	-
Time 7	Avanzamento mezzo sfondo					28gg	0	85.0%	1.8	90.0%	-
Time 8	Installazione prerivestimento e avanzamento					28gg	1.8	90.0%	5	94.0%	0.5 gg
Time 9	Maturazione sb e avanzamento					28gg	5	94.0%	15	95.0%	3gg
Time 10	Maturazione sb e avanzamento					28gg	15	95.0%	50	96.0%	28gg
Time 11	Getto arco rovescio prima canna	≈ 9 diametri	97.0%	≈ 15 diametri	97.5%	28gg				97.5%	28gg
Time 12	Completamento prima canna	≈ 15 diametri	97.5%	> 15 diametri	100.0%	28gg					28gg
Time 13	Getto arco rovescio seconda canna					28gg	≈ 9 diametri	96.0%	≈ 15 diametri	98.0%	28gg
Time 14	Completamento seconda canna					28gg	≈ 15 diametri	98.0%	> 15 diametri	100.0%	28gg
RIFERIMENTO CUNICOLO DI ESODO RAPIDO											
Time 15	Fronte di scavo cunicolo	0	0.0%	0	85.0%	-					
Time 16	Avanzamento mezzo sfondo	0	85.0%	2.1	91.0%	-					
Time 17	Installazione prerivestimento e avanzamento	2.1	91.0%	5	95.0%	0.5 gg					
Time 18	Maturazione sb e avanzamento	5	95.0%	15	96.5%	3gg					
Time 19	Maturazione sb e avanzamento	15	96.5%	≈ 9 diametri	98.0%	28gg					
Time 20	Getto arco rovescio cunicolo	≈ 9 diametri	98.0%	≈ 15 diametri	99.0%	28gg					
Time 21	Completamento cunicolo	≈ 15 diametri	99.0%	> 15 diametri	100.0%	28gg					
Time 22	Fase di lungo termine		100.0%		100.0%	-					



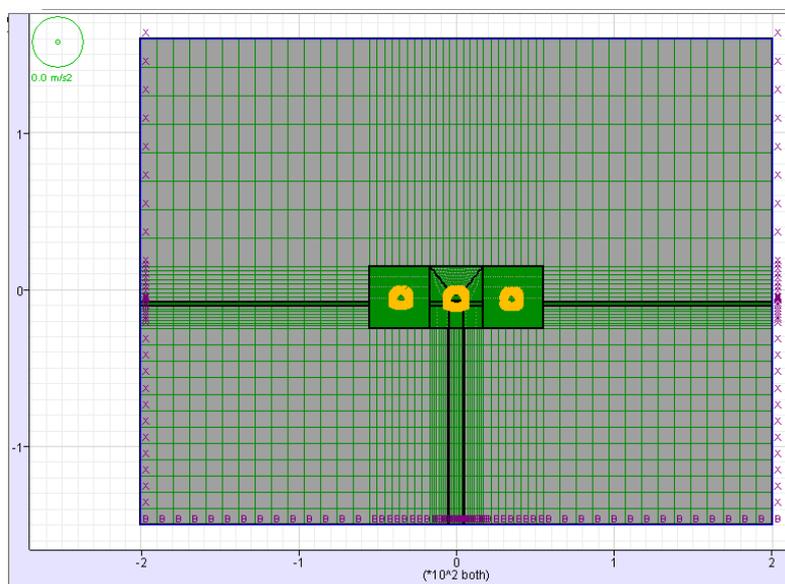
GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00	Foglio 129 di 166

8.14. Modello 10: Sezione tipo C4sb Copertura 150m

Il terreno è stato modellato attraverso un unico strato con una copertura in chiave calotta di circa 150m, ovvero la massima copertura alla quale è prevista tale sezione, avente le caratteristiche del Gruppo geomeccanico 3a delle Argilliti a Palombini precedentemente riportate. Le analisi sono state eseguite in campo elasto-plastico utilizzando un modello costitutivo di tipo “*strain softening*”.

Per quanto riguarda i modelli relativi all’area sicura si è modellata la canna centrale, oggetto di analisi, impiegando elementi beam disposti lungo l’estradosso della galleria, in modo da simulare l’omogenizzazione delle centine e del calcestruzzo proiettato variando la rigidezza dell’elemento in funzione della maturazione dello spritz beton. Al contrario i rivestimenti definitivi sono stati modellati in base alla loro reale geometria; col fine di poter valutare le azioni interne, sono stati integrati gli sforzi ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$) valutati dal modello di calcolo lungo le sezioni, in modo da giungere alle azioni sollecitanti per il dimensionamento strutturale.

Si è utilizzato un modello “Plane strain” bidimensionale costituito da una maglia rettangolare di dimensioni pari a 400 x 310 m. Nel seguito si riporta quindi la mesh di calcolo utilizzata per il dimensionamento della galleria naturale, costituita da n° 9456 zone.



Le dimensioni della mesh di elementi finiti sono fissate in maniera tale da evitare che il problema in esame risulti influenzato dalle condizioni di vincolo al contorno. Per quanto concerne le condizioni di vincolo applicate, queste constano essenzialmente in un doppio vincolo allo spostamento al contorno inferiore e spostamento orizzontale impedito lungo i bordi laterali. La formulazione del vincolo laterale permette dunque lo sviluppo di tensioni normali di compressione ma non di tensioni di taglio agenti in direzione verticale. Tali tensioni sono invece generate al contorno inferiore.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE				
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" style="float: right;"> <tr> <td>Foglio</td> <td>130 di</td> </tr> <tr> <td></td> <td>166</td> </tr> </table>	Foglio	130 di		166
Foglio	130 di				
	166				

Nel corso delle prime fasi dell'analisi numerica si è provveduto ad imporre al modello lo stato di sforzo esistente in sito prima dell'inizio dello scavo delle gallerie. Per quanto riguarda la condizione iniziale denominata "Geostatico" si sono inizializzati gli sforzi in direzione verticale in modo da assegnare il carico geostatico alle varie quote del modello. Gli sforzi in direzione orizzontale vengono invece determinati in funzione degli sforzi in direzione verticale attraverso il coefficiente di spinta a riposo (K_0). Dato che tale procedura è utilizzata unicamente con lo scopo di creare le condizioni iniziali per l'analisi in corso, non si tratta di una reale fase di calcolo; al termine di tale procedura vengono quindi azzerati gli spostamenti in ogni punto del modello.

L'analisi si basa su una successione di fasi di calcolo "Time", descritte nel seguito, le quali permettono di descrivere i differenti interventi costruttivi e di schematizzare le differenti condizioni di carico.

8.14.1. Rivestimenti di prima fase e fasi di calcolo

La simulazione delle fasi fa riferimento ad una velocità di avanzamento variabile fra 0.8 m/g e i 1.3m/g, tipiche per lo scavo in questo tipo di materiale per sezioni aventi aree di scavo comparabili, da cui derivano le caratteristiche di deformabilità dello spritz beton impiegate. Si riportano le caratteristiche principali delle sezioni omogenizzate composte da centine e spritz – beton nel calcolo. Tali valori sono riferiti a tutte e tre le sezioni tipo (area sicura, singolo binario, cunicolo).

Centina	HE 240 B
n°	1.0
Passo [m]	1.0
E [Gpa]	210.0

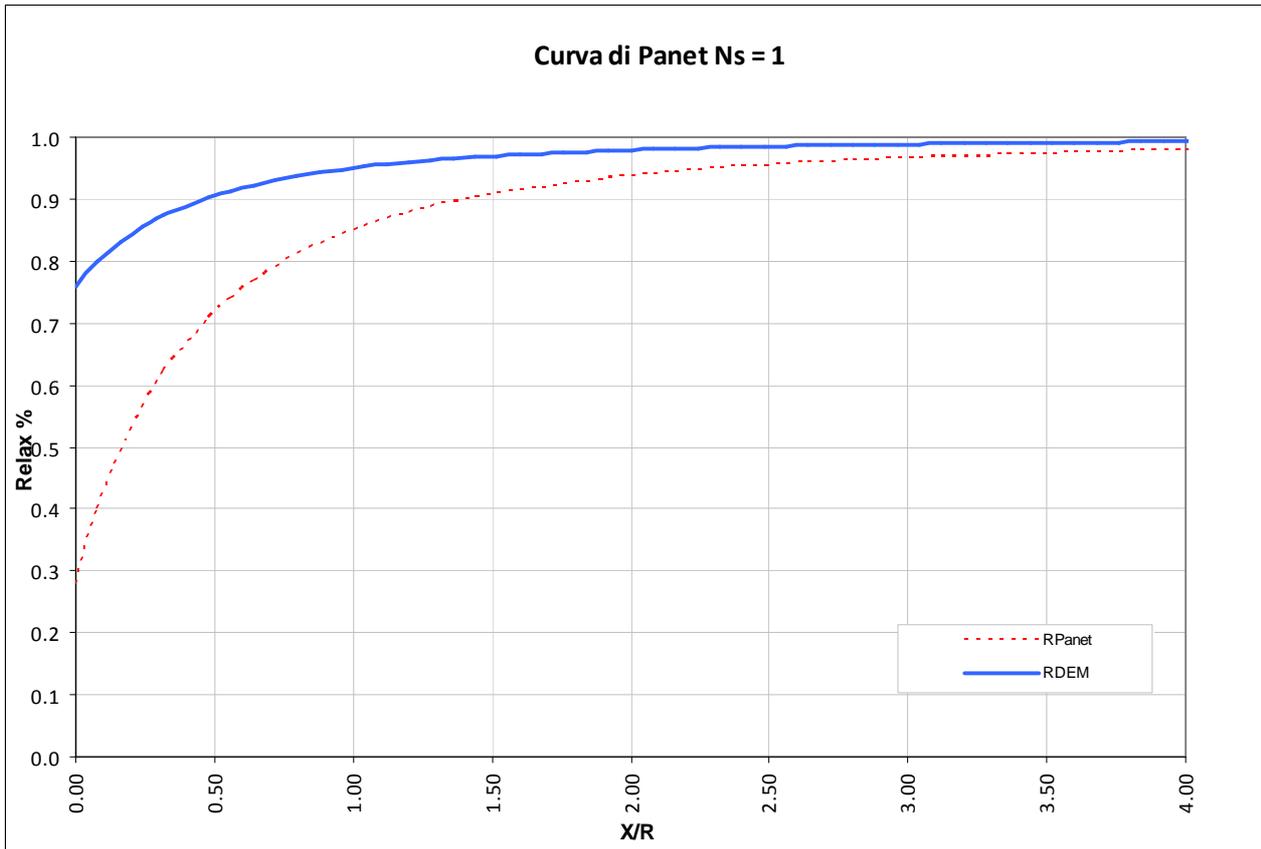
Spritz - Beton	
E_{28gg} [Gpa]	24
Spessore [m]	0.3

Maturazione	E_{om}	s_{om}	A	I
[gg]	[Gpa]	[m]	[m]	[m4]
0.5	10.534	0.3362	3.362E-01	3.167E-03
3	22.701	0.3172	3.172E-01	2.660E-03
28	29.289	0.3131	3.131E-01	2.559E-03
28	29.289	0.3131	3.131E-01	2.559E-03

Di seguito si riportano le fasi di calcolo ed i valori di "Relax" utilizzati, oltre alle caratteristiche dei rivestimenti di prima fase utilizzati in tali fasi.



LAVORO		RIFERIMENTO PRIMA CANNA					RIFERIMENTO SECONDA CANNA				
Sezione		INIZIO STAGE		FINE STAGE		MATURAZIONE SPRITZ BETON	INIZIO STAGE		FINE STAGE		MATURAZIONE SPRITZ BETON
TIME	DESCRIZIONE	Xfronte [m]	R(FEM)	Xfronte [m]	R(FEM)		Xfronte [m]	R(FEM)	Xfronte [m]	R(FEM)	
Geostatico	Geostatico	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 1	Fronte di scavo prima canna	0	0.0%	0	76.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 2	Avanzamento mezzo sfondo	0	76.0%	0.5	81.0%	-	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 3	Installazione prerivestimento e avanzamento	0.5	81.0%	1.5	85.0%	0.5 gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 4	Maturazione sb e avanzamento	1.5	85.0%	5	89.0%	3gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 5	Maturazione sb e avanzamento	5	89.0%	≈ 3 diametri	92.0%	28gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 6	Getto arco rovescio prima canna	≈ 3 diametri	92.0%	≈ 50m	94.0%	28gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 7	Getto calotta e piedritti prima canna	≈ 50m	94.0%	> 9 diametri	100.0%	28gg	-∞	0.0%	-∞	0.0%	-
Time 8	Fronte di scavo seconda canna					28gg	-∞	0.0%	0	75.0%	-
Time 9	Avanzamento mezzo sfondo					28gg	0	75.0%	0.5	80.0%	-
Time 10	Installazione prerivestimento e avanzamento					28gg	0.5	80.0%	1.5	85.0%	0.5 gg
Time 11	Maturazione sb e avanzamento					28gg	1.5	85.0%	5	89.0%	3gg
Time 12	Maturazione sb e avanzamento					28gg	5	89.0%	≈ 3 diametri	92.0%	28gg
Time 13	Getto arco rovescio seconda canna					28gg	≈ 3 diametri	92.0%	≈ 9 diametri	94.0%	28gg
Time 14	Completamento seconda canna					28gg	≈ 9 diametri	94.0%	> 9 diametri	100.0%	28gg
RIFERIMENTO CUNICOLO DI ESODO RAPIDO											
Time 15	Fronte di scavo cunicolo	0	0.0%	0	75.0%	-					
Time 16	Avanzamento mezzo sfondo	0	85.0%	0.5	80.0%	-					
Time 17	Installazione prerivestimento e avanzamento	2.1	91.0%	1.5	85.0%	0.5 gg					
Time 18	Maturazione sb e avanzamento	5	95.0%	5	89.0%	3gg					
Time 19	Maturazione sb e avanzamento	15	96.5%	≈ 3 diametri	92.0%	28gg					
Time 20	Getto arco rovescio cunicolo	≈ 9 diametri	98.0%	≈ 9 diametri	94.0%	28gg					
Time 21	Completamento cunicolo	≈ 15 diametri	99.0%	> 9 diametri	100.0%	28gg					
Time 22	Lungo termine			+∞	100.0%	-					



GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315"> <tr> <td>Foglio 132 di 166</td> </tr> </table>	Foglio 132 di 166
Foglio 132 di 166		

9. RISULTATI ANALISI NUMERICHE E VERIFICHE

9.1. Rivestimenti di prima fase

I rivestimenti di prima fase sono realizzati impiegando centine metalliche e spritz- beton, per i quali sono previsti i seguenti valori ammissibili:

Acciaio S 275	$\sigma_{amm}=190$ MPa $\tau_{amm}=109.7$ MPa
Calcestruzzo proiettato (fcm \geq 25 MPa a 28gg) fcm* \geq 4 MPa a 0.5 gg fcm \geq 13 MPa a 2 gg fcm* \geq 16 MPa a 5 gg fcm \geq 25 MPa a 28 gg	$\sigma_{amm} = 3.1$ MPa a 0.5gg $\sigma_{amm} = 10$ MPa a 2gg $\sigma_{amm} = 12.3$ MPa a 5gg $\sigma_{amm} = 19.2$ MPa a 28gg
Calcestruzzo proiettato (fcm \geq 30 MPa a 28gg) fcm* \geq 4 MPa a 0.5 gg fcm \geq 13 MPa a 2 gg fcm* \geq 18 MPa a 5 gg fcm \geq 30 MPa a 28 gg	$\sigma_{amm} = 3.1$ MPa a 0.5gg $\sigma_{amm} = 10$ MPa a 2gg $\sigma_{amm} = 13.8$ MPa a 5gg $\sigma_{amm} = 23.1$ MPa a 28gg

(*) Valori medi stimati in assenza di prove dirette

Per la verifiche tensionali relative ai rivestimenti di prima fase vengono utilizzate le sollecitazioni calcolate durante gli step di calcolo effettuato nei modelli numerici, assumendo un diverso valore di modulo elastico per lo spritz beton a seconda della maturazione dello stesso. Il fattore di omogenizzazione tra acciaio e spritz beton è stato assunto pari al reale rapporto tra i moduli elastici dei materiali: risulta quindi variabile in funzione della maturazione del calcestruzzo.

In particolare il diagramma relativo al prerinvestimento viene costruito considerando una sezione in calcestruzzo armato di spessore pari allo spessore di spritz beton e un armatura pari all'area delle ali della centina (AFTES "Recommendations for the DESIGN OF SPRAYED CONCRETE FOR UNDERGROUND SUPPORT" – 09/11/2000)

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE				
	IG5103ECVCLGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 315" style="float: right;"> <tr> <td>Foglio</td> <td>133 di</td> </tr> <tr> <td></td> <td>166</td> </tr> </table>	Foglio	133 di		166
Foglio	133 di				
	166				

$$\sigma_c \leq \sigma_{amm}$$

$$\sigma_s \leq \sigma_{amm}$$

Per quanto riguarda le sollecitazioni taglianti, si assume in via cautelativa che queste devono essere affidate unicamente alle ali delle centine (A_{tw}), senza alcun contributo da parte dello spritz-beton.

La verifica verrà quindi fatta valutando che la τ dovuta all'azione di taglio sia inferiore al valore ammissibile.

$$\tau = T / A_{tw} \leq \tau_{amm}$$

9.2. Verifiche Rivestimento definitivo in Calcestruzzo Armato

I rivestimenti definitivi della galleria naturale sono realizzati in calcestruzzo armato ordinario, con conglomerato cementizio di classe $R_{ck}=30$ MPa e barre di tipo B450 C ad aderenza migliorata, a cui corrispondono le seguenti tensioni ammissibili:

Acciaio B450 C	$\sigma_{amm}=160$ MPa (*)
Calcestruzzo strutturale armato Rck 30 MPa	$\sigma_{amm}=9.75$ MPa $\tau_{c0} = 0.60$ MPa $\tau_{c1} = 1.80$ MPa
Calcestruzzo strutturale non armato Rck 30 Mpa	$\sigma_{amm}=7.5$ MPa $\tau_{c0} = 0.60$ MPa

(*) In condizioni sismiche o in condizioni di esercizio con verifica a fessurazione $\sigma_{amm}=255$ Mpa

Le verifiche di pressoflessione, come già precedentemente descritto, vengono svolte utilizzando le sollecitazioni ricavate dai beam inseriti in corrispondenza della mezzaria della struttura. La verifica a fessurazione è stata svolta secondo il D.M.L.P. 09/07/96.

Secondo tale normativa, in funzione della classe di esposizione (ambiente poco aggressivo), si ritengono accettabili aperture fessurative minori di 0.2 mm. In questo caso poichè il copriferro minimo è pari a $4 \text{ cm} > 1.5 \cdot c_{min}$ (con $c_{min} = 2.5$ cm), è ammesso un aumento del limite di apertura delle fessure. Il limite di apertura w_k sarà pari a

$$0.2 \cdot 1.5 = 0.3 \text{ mm.}$$

Si considera quindi:

$$M_f II = W_i \cdot f_{cfm}$$

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 	
	<p>IG5103ECVCLGN0000001A00</p>	<p>Foglio 134 di 166</p>

dove

$$f_{ctm} = 1.2 \cdot 0.27 (R_{ck})^{2/3} \quad (\text{N/mm}^2)$$

L'apertura delle fessure vale:

$$w_k = 1.7 \cdot w_m = 1.7 \cdot s_{rm} \cdot \epsilon_{sm}$$

dove:

$$s_{rm} = 2(c+s/10) + k_2 k_3 \Phi / \rho_r$$

$$\epsilon_{sm} = \sigma_s / E_s (1 - \beta_1 \beta_2 (\sigma_{sr} / \sigma_s)^2)$$

per la sezione in esame si ha:

$c =$	copri ferro netto armatura tesa
$s =$	interasse tra i ferri
$k_2 = 0.4$	per barre ad aderenza migliorata
$k_3 = 0.125$	per diagramma delle s triangolare, dovuto a flessione o pressoflessione
$\Phi =$	diametro delle barre
$\rho_r =$	$A_s / A_{c \text{ eff}}$
$\sigma_s =$	tensione dell'acciaio calcolata nella sezione fessurata per la combinazione di azioni considerata
$\sigma_{sr} =$	tensione dell'acciaio calcolata nella sezione fessurata per la sollecitazione corrispondente al raggiungimento della resistenza a trazione f_{ctm} nella fibra di calcestruzzo più sollecitata nella sezione interamente reagente.
$\beta_1 = 1$	per barre ad aderenza migliorata
$\beta_2 = 0.5$	nel caso di azioni di lunga durata o ripetute.

Le verifiche di taglio vengono svolte in corrispondenza di tutte le aste con le quali si è discretizzata la struttura. Le tensioni tangenziali sono calcolate come:

$$\tau = \frac{T}{0.9 \cdot b \cdot d}$$

con:

T = taglio agente sulla sezione;

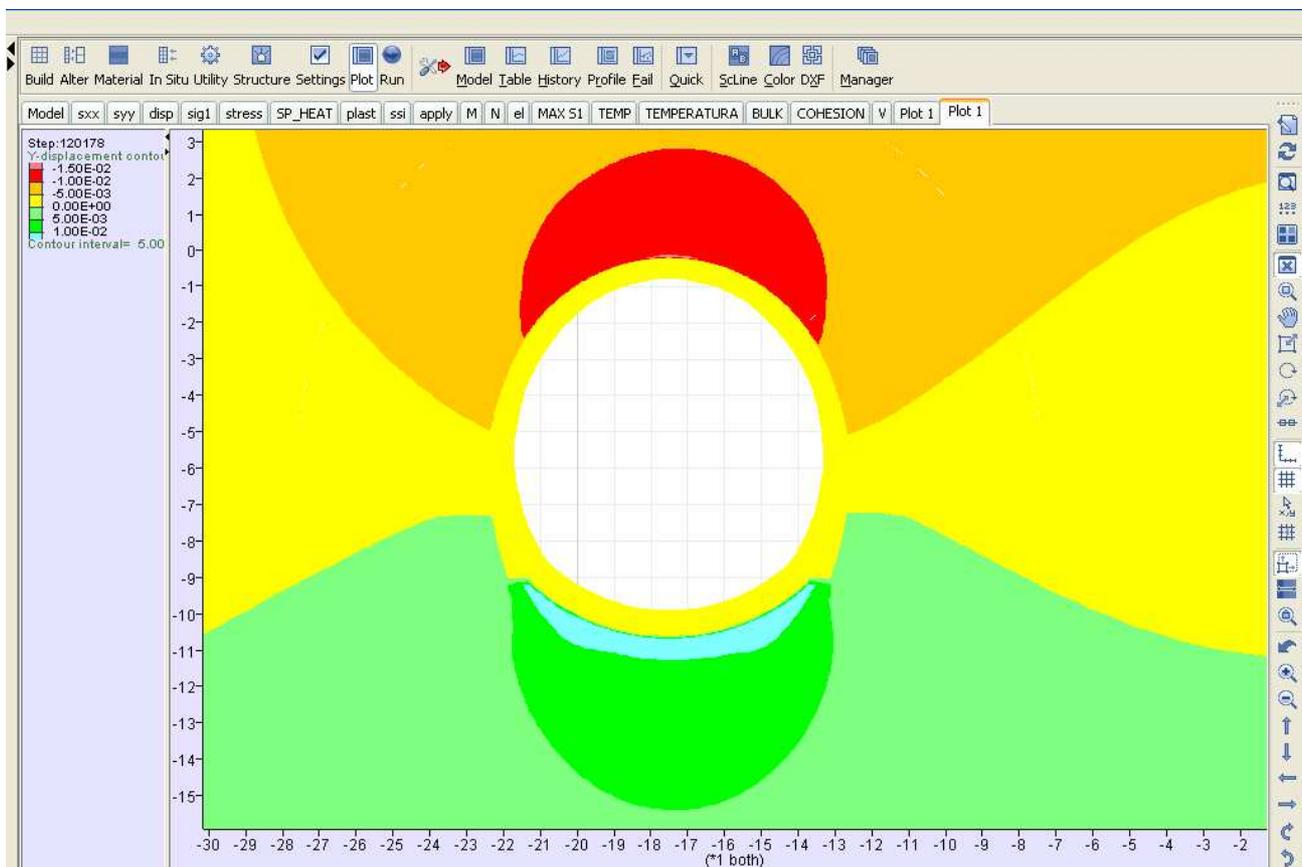
b = larghezza della sezione (1 m)

d = altezza utile della sezione

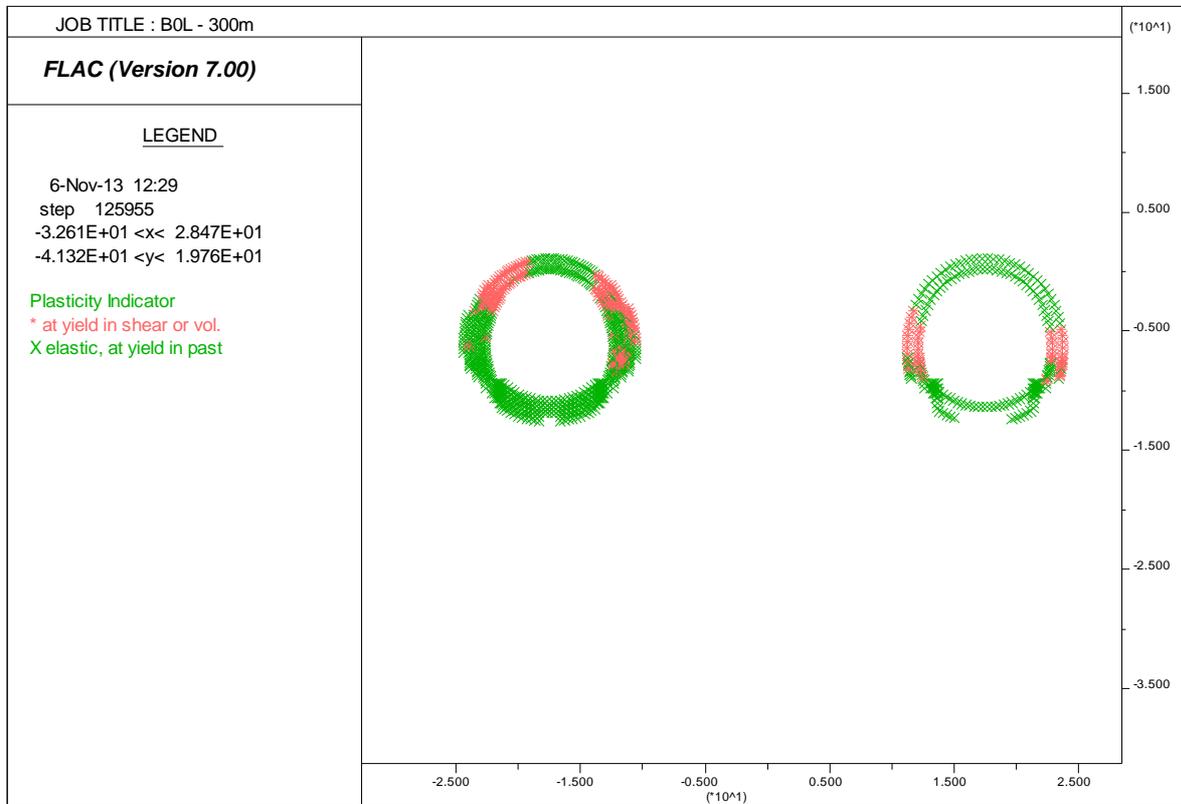
9.3. Modello 1: Sezione Tipo B0Lsb

9.3.1. Analisi deformativa

I risultati più significativi ottenuti dalla presente analisi sono riassunti nelle tabelle contenute nel presente paragrafo. Il modello ha indicato spostamenti contenuti con deformazioni del cavo in lungo termine dell'ordine di 1 - 1.5 cm.



Nel corso della simulazione delle fasi esecutive della galleria naturale prima di effettuare la riduzione dei parametri (fase di LT), i fenomeni di plasticizzazione nel terreno al contorno della cavità risultano piuttosto limitati; come si può vedere nella figura sottostante, infatti, risulta plasticizzata unicamente una fascia di 1-1.5m attorno al cavo.



Per quanto riguarda il prerivestimento, la convergenza media rilevata risulta inferiore al centimetro. Il rivestimento definitivo è caratterizzato invece da una deformazione media dell'ordine del millimetro.

SEZIONE	Preconvergenza (time 2)	Δ spostamento prerivestimenti (time 14-2)	Δ spostamento rivestimento definitivo (time 15-12)
	[cm]	[cm]	[cm]
Chiave calotta Verticale	1.1	0.3	< 0.1
Piano centri Orizzontale	1.1	0.5	< 0.1
Chiave arco rovescio Verticale	1.1	-	< 0.1

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 137 di 166

9.3.2. Analisi Tensionale

I rivestimenti di prima fase utilizzati sono descritti nella seguente tabella

Spessore spritz beton (m)	Centine (-)	Numero (-)	Passo (m)
0.2	IPN 160	2	1.4

Lo stato di sollecitazione nel prerivestimento risulta di lieve entità, con momenti flettenti che raggiungono i 10 KN*m/m ed azioni assiali prossime ai 280 KN/m;

Nella tabella sottostante viene riportato lo stato tensionale sia sulle ali delle centine che sullo spritz beton unicamente le condizioni più gravose in base a quanto valutato nei vari step di calcolo. Le sollecitazioni relative a tutti i beam e le relative tensioni valutate sui materiali sono riportate in allegato.

FASE	H	N [KN/m]	M [KNm/m]	σ_c [Mpa]	σ_c limite [Mpa]	σ_s [Mpa]	σ_s limite [Mpa]	V [KN/m]	τ [Mpa]	τ limite [Mpa]
0.5gg	0.2	-96.6	1.9	-0.460	3.08	-23.5	190.0	27.9	18.6	109.7
3gg	0.2	-27.0	-4.8	-0.960	10.77	18.6	190.0	35.0	23.4	109.7
28gg	0.2	-82.9	9.8	-2.205	19.23	25.4	190.0	67.0	44.7	109.7

Lo spritz-beton è caratterizzato da una tensione massima di compressione prossima ai 2 MPa, mentre l'acciaio si carica con una tensione massima pari a circa 25 MPa. La tensione tangenziale massima sulle ali delle centine risulta inferiore al valore limite. Come si nota tutte le verifiche risultano soddisfatte.

In corrispondenza dell'arco rovescio le sollecitazioni raggiungono valori di momento dell'ordine di 33 KNm/m ed azioni assiali dell'ordine dei 310 KN/m. In corrispondenza della calotta le sollecitazioni raggiungono valori di momento dell'ordine di 10 KNm/m ed azioni assiali dell'ordine dei 321 KN/m. La sezione B0L è stata verificata non armata.

FERRI ARMATURA PRINCIPALE		
	Intradosso	Estradosso
Arco rovescio	–	–
Calotta	–	–

In sintesi vengono indicate le condizioni più gravose per le diverse parti strutturali (arco rovescio e calotta) della sezione in esame in base a quanto valutato nella fase di lungo termine nella quale si verificano le sollecitazioni maggiori.

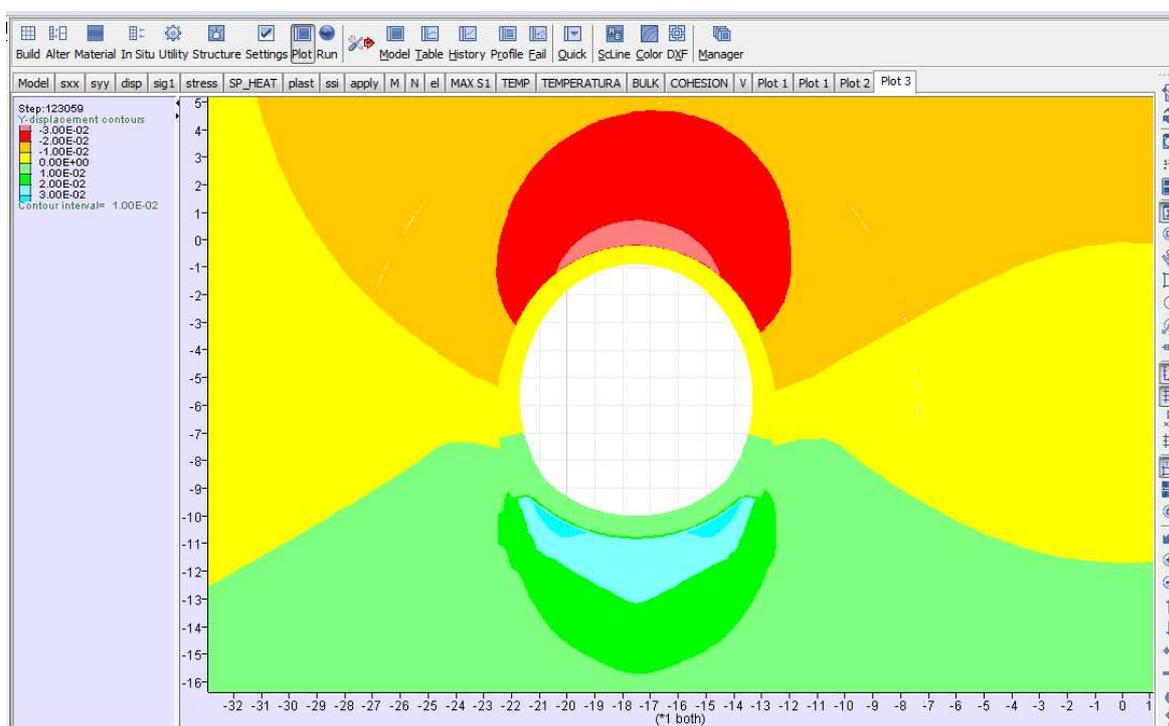
Elemento	N	M	σ_c	V	τ	N°
[-]	[KN/m]	[KNm/m]	[Mpa]	[KN/m]	[Mpa]	N°
AR	-309.533	-32.481	-0.688	-57.971	-0.080	1
PIEDRITTO	-435.786	-12.742	-0.857	66.616	0.095	2
CALOTTA	-321.081	9.995	-0.676	51.918	0.085	3

Come si nota, tutte le verifiche risultano soddisfatte. Poiché si verifica ovunque $\tau < \tau_{c0}$ non è necessario disporre armatura specifica a taglio.

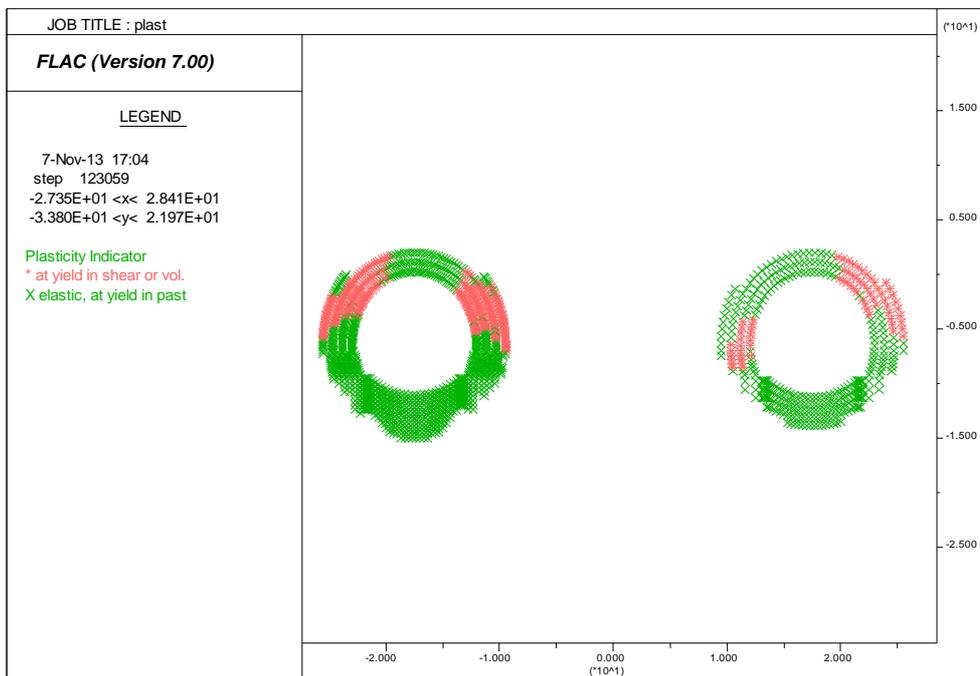
9.4. Modello 2: Sezione Tipo B0/1sb

9.4.1. Analisi deformativa

I risultati più significativi ottenuti dalla presente analisi sono riassunti nelle tabelle contenute nel presente paragrafo. Il modello ha indicato spostamenti contenuti in rapporto alla copertura con deformazioni del cavo in lungo termine nell'ordine di 3 cm.



Nel corso della simulazione delle fasi esecutive della galleria naturale prima di effettuare la riduzione dei parametri (fase di LT), i fenomeni di plasticizzazione nel terreno al contorno della cavità risultano piuttosto limitati; come si può vedere nella figura sottostante, infatti, risulta plasticizzata unicamente una fascia di circa 2-3 m attorno al cavo.



Per quanto riguarda il prerivestimento, la convergenza media rilevata risulta inferiore al centimetro. Il rivestimento definitivo è caratterizzato invece da una deformazione media dell'ordine del millimetro.

SEZIONE	Preconvergenza (time 2)	Δ spostamento prerivestimenti (time 14-2)	Δ spostamento rivestimento definitivo (time 15-12)
	[cm]	[cm]	[cm]
Chiave calotta Verticale	2.6	0.9	<0.1
Piano centri Orizzontale	2.7	0.7	<0.1
Chiave arco rovescio Verticale	2.2	-	<0.1

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 140 di 166

9.4.2. Analisi Tensionale

I rivestimenti di prima fase utilizzati sono descritti nella seguente tabella

Spessore spritz beton (m)	Centine (-)	Numero (-)	Passo (m)
0.25	HEB180	1	1.2

Lo stato di sollecitazione nel prerivestimento risulta di lieve entità, con momenti flettenti che raggiungono i 60 KN*m/m ed azioni assiali prossime ai 45 KN/m;

Nella tabella sottostante viene riportato lo stato tensionale sia sulle ali delle centine che sullo spritz beton unicamente le condizioni più gravose in base a quanto valutato nei vari step di calcolo. Le sollecitazioni relative a tutti i beam e le relative tensioni valutate sui materiali sono riportate in allegato.

FASE	H	N [KN/m]	M [KNm/m]	σ_c [Mpa]	σ_c limite [Mpa]	σ_s [Mpa]	σ_s limite [Mpa]	V [KN/m]	τ [Mpa]	τ limite [Mpa]
0.5gg	0.25	-28.5	-3.3	-0.210	3.08	-8.6	190.0	-30.6	-23.1	109.7
3gg	0.25	-38.7	6.5	-0.751	10.77	9.0	190.0	-59.7	-45.0	109.7
28gg	0.25	-34.7	60.3	-7.683	19.23	150.4	190.0	142.7	107.6	109.7

Lo spritz-beton è caratterizzato da una tensione massima di compressione prossima ai 7 MPa, mentre l'acciaio si carica con una tensione massima pari a circa 150 MPa. La tensione tangenziale massima sulle ali delle centine risulta inferiore al valore limite. Come si nota tutte le verifiche risultano soddisfatte.

Il rivestimento definitivo mostra in calotta sollecitazioni flettenti massime dell'ordine di 30 KNm/m ed azioni assiali inferiori a 800 KN/m. In corrispondenza dell'arco rovescio si raggiungono valori di momento dell'ordine dei 50 KNm/m ed azioni assiali che arrivano a 720 KN/m. La sezione B0/1 è stata verificata non armata.

FERRI ARMATURA PRINCIPALE		
	Intradosso	Estradosso
Arco rovescio	–	–
Calotta	–	–

In sintesi vengono indicate le condizioni più gravose per le diverse parti strutturali (arco rovescio e calotta) della sezione in esame in base a quanto valutato nella fase di lungo termine nella quale si verificano le sollecitazioni maggiori.

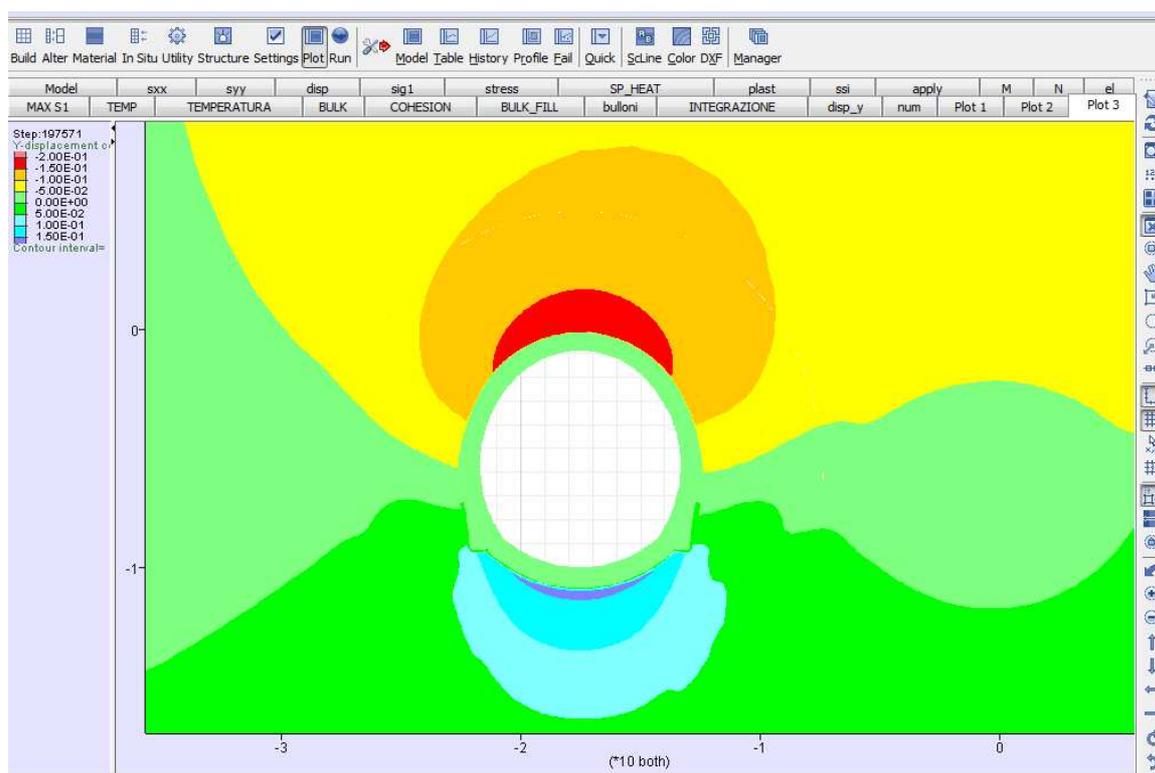
Elemento	N	M	σ_c	V	τ	N°
[-]	[KN/m]	[KNm/m]	[Mpa]	[KN/m]	[Mpa]	N°
AR	-718.840	-53.242	-1.188	-70.481	-0.087	1
PIEDRITTO	-920.789	-25.546	-1.518	219.426	0.290	2
CALOTTA	-790.560	29.242	-1.422	89.153	0.127	3

Come si nota, tutte le verifiche risultano soddisfatte. Poiché si verifica ovunque $\tau < \tau_{c0}$ non è necessario disporre armatura specifica a taglio.

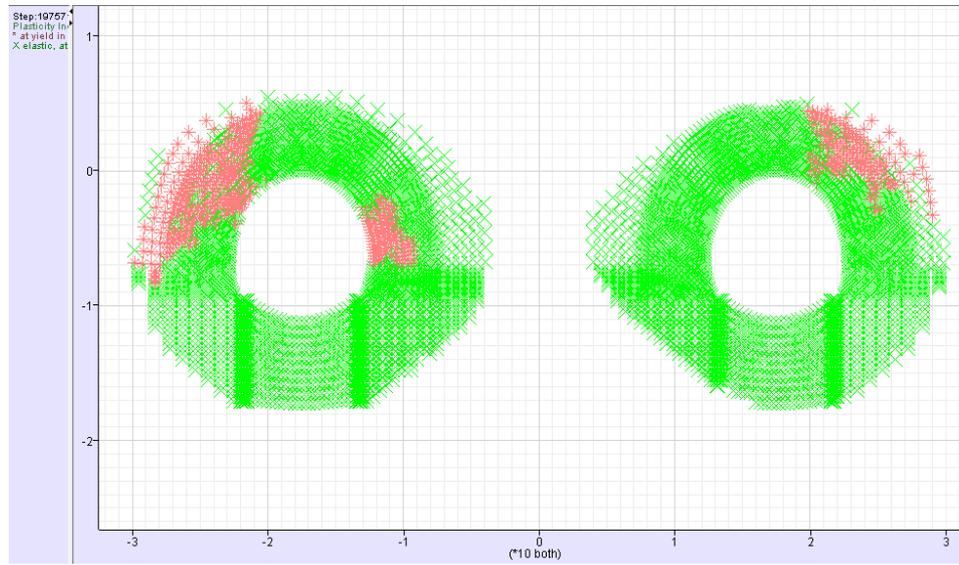
9.5. Modello 4: Sezione Tipo B1sb

9.5.1. Analisi deformativa

I risultati più significativi ottenuti dalla presente analisi sono riassunti nelle tabelle contenute nel presente paragrafo. Il modello ha indicato deformazioni del cavo in lungo prossime ai 5-6 cm.



Nel corso della simulazione delle fasi esecutive della galleria naturale prima di effettuare la riduzione dei parametri (fase di LT), i fenomeni di plasticizzazione nel terreno al contorno della cavità risultano piuttosto limitati; come si evince dalla figura sottostante, infatti, risulta plasticizzata unicamente una fascia di circa 4-5 cm attorno al cavo.



Il prerivestimento è caratterizzato da valori di convergenza massima inferiori al centimetro; Il rivestimento definitivo è caratterizzato da una deformazione di ordine millimetrico.

SEZIONE / spostamento	Preconvergenza (phase 2)	Δ spostamento prerivestimenti (phase 16-2)	Δ spostamento rivestimento definitivo (phase 17-14)
	[cm]	[cm]	[cm]
Chiave calotta Verticale	1.0	0.3	<0.1
Piano centri Orizzontale	1.3	0.5	<0.1
Chiave arco rovescio Verticale	2.9	-	<0.1

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 143 di 166

9.5.2. Analisi Tensionale

I rivestimenti di prima fase utilizzati sono descritti nella seguente tabella.

Spessore spritz beton (m)	Centine (-)	Numero (-)	Passo (m)
0.30	IPN 220	2	1.2

Lo stato di sollecitazione nel prerivestimento risulta di media entità, con momenti flettenti che raggiungono i 150 KN*m/m ed azioni assiali piuttosto elevate che raggiungono i 3700 KN/m;

Nella tabella sottostante viene riportato lo stato tensionale sia sulle ali delle centine che sullo spritz beton unicamente le condizioni più gravose in base a quanto valutato nei vari step di calcolo. Le sollecitazioni relative a tutti i beam e le relative tensioni valutate sui materiali sono riportate in allegato.

FASE	H	N [KN/m]	M [KNm/m]	σ_c [Mpa]	σ_c limite [Mpa]	σ_s [Mpa]	σ_s limite [Mpa]	V [KN/m]	τ [Mpa]	τ limite [Mpa]
0.5gg	0.3	-607.8	-14.0	-1.619	3.08	-82.0	190.0	105.4	34.1	109.7
3gg	0.3	-897.4	26.2	-3.868	10.77	-50.6	190.0	141.6	45.8	109.7
28gg	0.3	-3705.0	151.1	-19.227	19.23	-174.8	190.0	-264.6	-85.7	109.7

Lo spritz-beton è caratterizzato da una tensione massima di compressione di circa 19 MPa, mentre l'acciaio si carica con una tensione massima prossima a 175 MPa. Come si nota tutte le verifiche risultano soddisfatte.

Il rivestimento definitivo in arco rovescio risulta sollecitato con momenti flettenti dell'ordine di 50 KNm/m. Le azioni assiali sono nell'intorno di 720 KN/m. La sezione B1 è stata verificata non armata.

FERRI ARMATURA PRINCIPALE		
	Intradosso	Estradosso
Arco rovescio	—	—
Calotta	—	—

In sintesi vengono indicate le condizioni più gravose per le diverse parti strutturali (arco rovescio e calotta) della sezione in esame in base a quanto valutato nella fase di lungo termine nella quale si verificano le sollecitazioni maggiori.

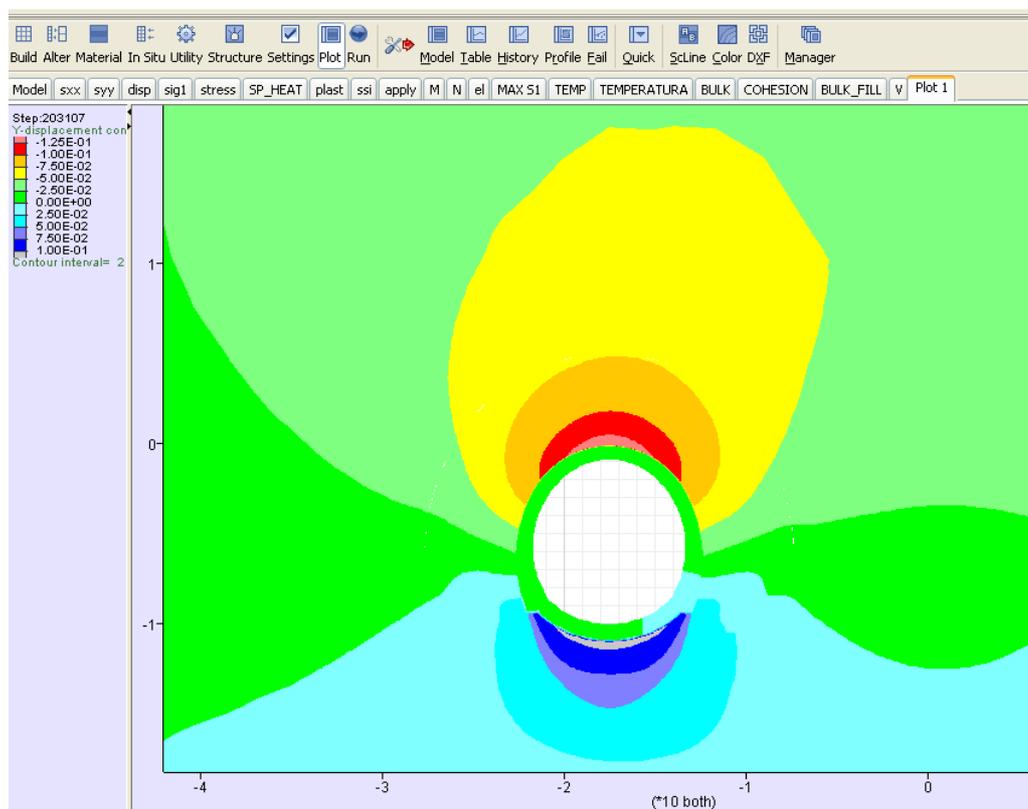
Elemento	N	M	σ_c	V	τ	N°
[-]	[KN/m]	[KNm/m]	[Mpa]	[KN/m]	[Mpa]	N°
AR	-718.840	-53.242	-1.188	-70.481	-0.087	1
PIEDRITTO	-920.789	-25.546	-1.518	219.426	0.290	2
CALOTTA	-790.560	29.242	-1.422	89.153	0.127	3

Come si nota, tutte le verifiche risultano soddisfatte. Poiché si verifica ovunque $\tau < \tau_{c0}$ non è necessario disporre armatura specifica a taglio.

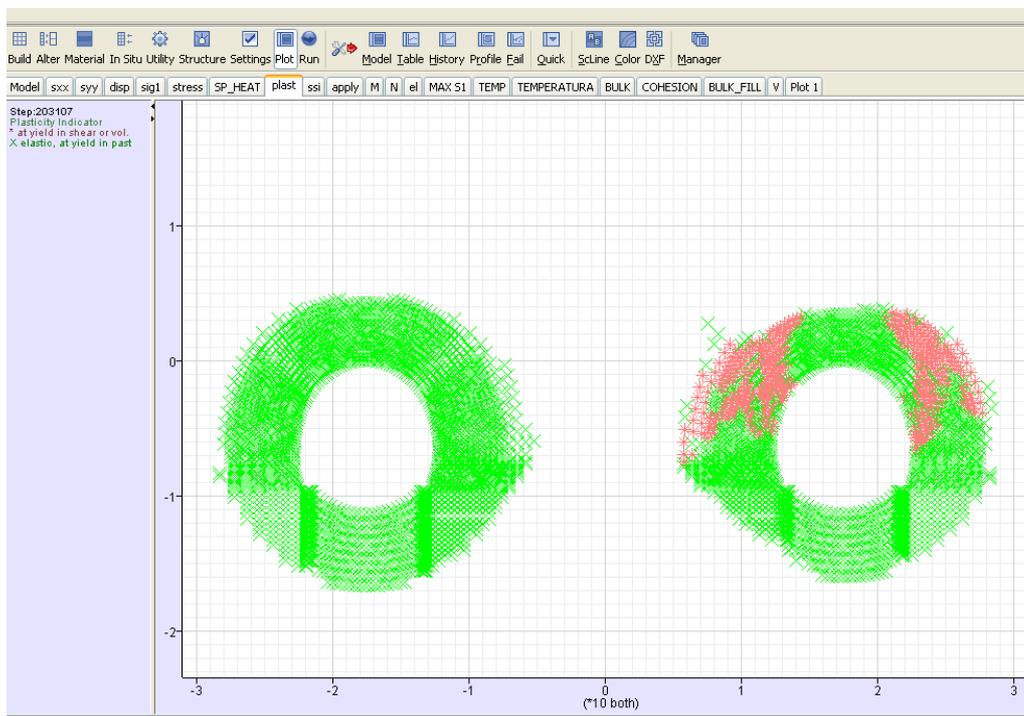
9.6. Modello 5: Sezione Tipo B2/1sb

9.6.1. Analisi deformativa

I risultati più significativi ottenuti dalla presente analisi sono riassunti nelle tabelle contenute nel presente paragrafo. Il modello ha indicato deformazioni massime del cavo in lungo termine attorno ai 15 cm.



Nel corso della simulazione delle fasi esecutive della galleria naturale prima di effettuare la riduzione dei parametri (fase di LT), i fenomeni di plasticizzazione nel terreno al contorno della cavità risultano presenti in una fascia larga circa 5 m adiacente alla galleria.



Il prerivestimento è caratterizzato da valori di convergenza massima prossima ai 2-3 cm. Il rivestimento definitivo è caratterizzato da una deformazione massima dell'ordine di circa 1mm.

SEZIONE / spostamento	Preconvergenza (phase 2)	Δ spostamento prerivestimenti (phase 14-2)	Δ spostamento rivestimento definitivo (phase 15-12)
	[cm]	[cm]	[cm]
Chiave calotta Verticale	10.3	3.7	<0.1
Piano centri Orizzontale	9.1	3.1	<0.1
Chiave arco rovescio Verticale	6.7	-	<0.1

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 146 di 166

9.6.2. Analisi Tensionale

I rivestimenti di prima fase utilizzati sono descritti nella seguente tabella

Spessore spritz beton (m)	Centine (-)	Numero (-)	Passo (m)
0.3	HEB 200	1	1.0

Lo stato di sollecitazione nel prerivestimento risulta di media entità, con momenti flettenti che raggiungono i 90 KN*m/m con azioni assiali piuttosto elevate prossime ai 3200 KN/m.

Nella tabella sottostante viene riportato lo stato tensionale sia sulle ali delle centine che sullo spritz beton unicamente le condizioni più gravose in base a quanto valutato nei vari step di calcolo. Le sollecitazioni relative a tutti i beam e le relative tensioni valutate sui materiali sono riportate in allegato.

FASE	H	N [kN/m]	M [kNm/m]	σ_c [Mpa]	σ_c limite [Mpa]	σ_s [Mpa]	σ_s limite [Mpa]	V [kN/m]	τ [Mpa]	τ limite [Mpa]
0.5gg	0.3	-696.1	28.8	-1.948	3.08	-90.0	190.0	129.3	69.1	109.7
3gg	0.3	-89.8	71.8	-5.448	10.77	102.8	190.0	199.9	106.8	109.7
28gg	0.3	-3221.0	94.3	-13.945	19.23	-126.0	190.0	202.1	108.0	109.7

Lo spritz-beton è caratterizzato da una tensione massima di compressione di circa 14 MPa, mentre l'acciaio si carica con una tensione massima prossima a 130MPa. Come si nota tutte le verifiche risultano soddisfatte.

Il rivestimento definitivo in arco rovescio risulta maggiormente sollecitato rispetto alla zona di calotta dal punto di vista flessionale con sollecitazioni flettenti dell'ordine di 200 KNm/m. Le azioni assiali sono nell'intorno di 3200 KN/m. La sezione B2sb è stata verificata non armata.

FERRI ARMATURA PRINCIPALE		
	Intradosso	Estradosso
Arco rovescio	–	–
Calotta	–	–

In sintesi vengono indicate le condizioni più gravose per le diverse parti strutturali (arco rovescio e calotta) della sezione in esame in base a quanto valutato nella fase di lungo termine nella quale si verificano le sollecitazioni maggiori.

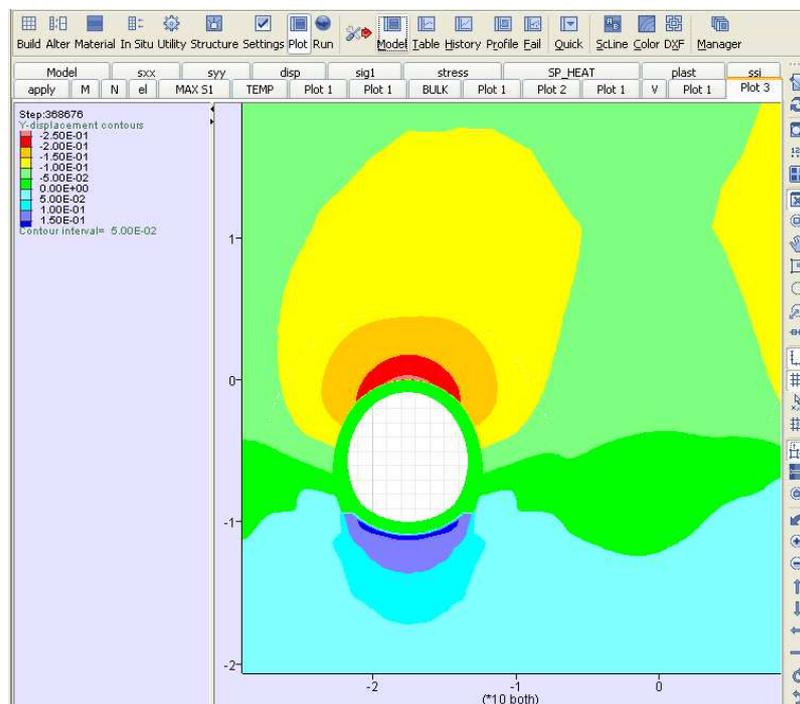
Elemento	N	M	σ_c	V	τ	N°
[-]	[KN/m]	[KNm/m]	[Mpa]	[KN/m]	[Mpa]	N°
AR	-3241.470	-202.727	-4.462	-303.512	-0.340	1
PIEDRITTO	-1254.881	-72.380	-2.015	-95.822	-0.125	2
CALOTTA	-1032.191	52.760	-1.650	59.439	0.079	3

Come si nota, tutte le verifiche risultano soddisfatte. Poiché si verifica ovunque $\tau < \tau_{c0}$ non è necessario disporre armatura specifica a taglio.

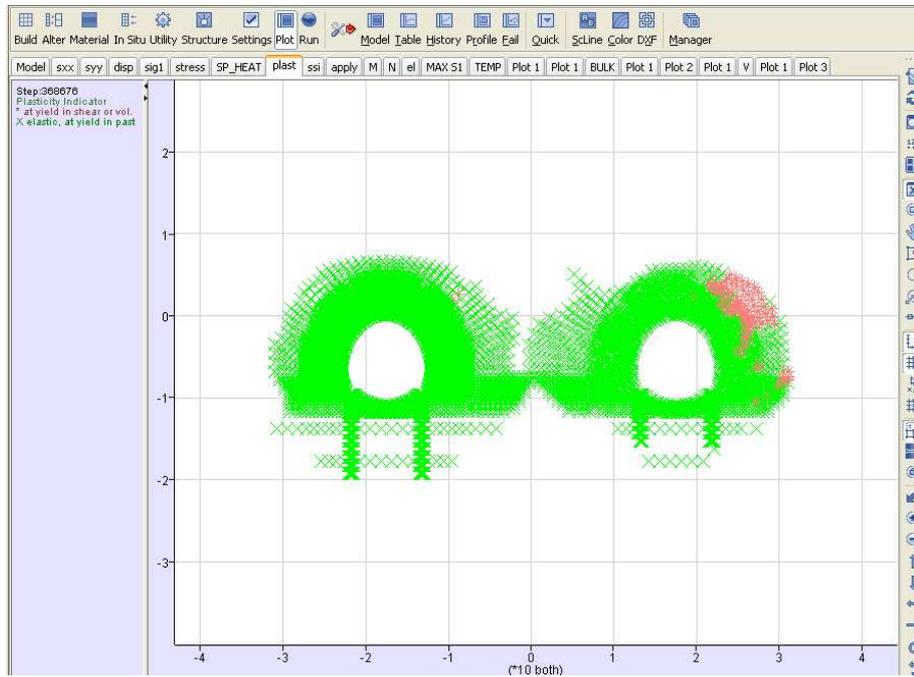
9.7. Modello 9: Sezione Tipo C4sb

9.7.1. Analisi deformativa

I risultati più significativi ottenuti dalla presente analisi sono riassunti nelle tabelle contenute nel presente paragrafo. Il modello ha indicato deformazioni massime del cavo in lungo termine dell'ordine di 30cm.



Nel corso della simulazione delle fasi esecutive della galleria naturale prima di effettuare la riduzione dei parametri (fase di LT), i fenomeni di plasticizzazione nel terreno al contorno della cavità risultano presenti in una fascia nell'intorno del cavo con una estensione di circa 6m.



Il priverivestimento è caratterizzato da valori di convergenza totale massima prossima ai 4cm. Il rivestimento definitivo è caratterizzato da una deformazione massima pari a circa 1mm.

SEZIONE	Preconvergenza (phase 2)	Δ spostamento priverivestimenti (phase 14-2)	Δ spostamento rivestimento definitivo (phase 15-7)
	[cm]	[cm]	[cm]
Chiave calotta Verticale	21.8	5.1	<0.1
Piano centri Orizzontale/verticale	18.9	4.7	<0.1
Chiave arco rovescio Verticale	12.1	-	<0.1

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 149 di 166

9.7.2. Analisi Tensionale

I rivestimenti di prima fase utilizzati sono descritti nella seguente tabella

Spessore spritz beton (m)	Centine (-)	Numero (-)	Passo (m)
0.3	HEB 240	1	1.0

Lo stato di sollecitazione nel prerinvolgimento risulta di entità molto elevata, con momenti flettenti che raggiungono i 100 KN*m/m con azioni assiali molto elevate prossime ai 6000 KN/m.

Nella tabella sottostante viene riportato lo stato tensionale sia sulle ali delle centine che sullo spritz beton considerando unicamente le condizioni più gravose in base a quanto valutato nei vari step di calcolo. Le sollecitazioni relative a tutti i beam e le relative tensioni valutate sui materiali sono riportate in allegato.

FASE	H	N [KN/m]	M [KNm/m]	σ_c [Mpa]	σ_c limite [Mpa]	σ_s [Mpa]	σ_s limite [Mpa]	V [KN/m]	τ [Mpa]	τ limite [Mpa]
0.5gg	0.3	-781.2	-21.1	-1.440	3.08	-74.1	190.0	-189.4	-75.9	109.7
3gg	0.3	-2058.0	70.1	-7.717	10.77	-102.5	190.0	-267.4	-107.1	109.7
28gg	0.3	-4049.0	-217.4	-20.335	23.08	-187.0	190.0	-267.9	-107.3	109.7

Lo spritz-beton è caratterizzato da una tensione massima di compressione di circa 20 MPa, mentre l'acciaio si carica con una tensione massima prossima a 187 MPa. La tensione massima tangenziale valutata durante le fasi di calcolo è pari a 107 MPa. Come si nota tutte le verifiche risultano soddisfatte, anche nelle condizioni limite sopra indicate.

Il rivestimento definitivo di calotta risulta sollecitato con momenti flettenti nell'intorno di 280 kNm/m ed azioni assiali nell'ordine di 6800 kNm/m. L'arco rovescio presenta momenti flettenti di circa 250 kNm/m e azioni assiali di circa 8500 kNm/m.

I ferri utilizzati per l'armatura principale sono riassunti in tabella.

FERRI ARMATURA PRINCIPALE		
	Intradosso	Estradosso
Arco rovescio	Φ24/20	Φ24/20
Calotta	Φ24/20	Φ24/20

In sintesi vengono indicate le sezioni più gravose in base a quanto valutato nei vari step di calcolo per le diverse parti strutturali (arco rovescio e calotta) della sezione in esame. Nella tabella sotto viene riportato lo stato tensionale e l'apertura della fessura qualora il momento agente risultasse superiore al momento di fessurazione.

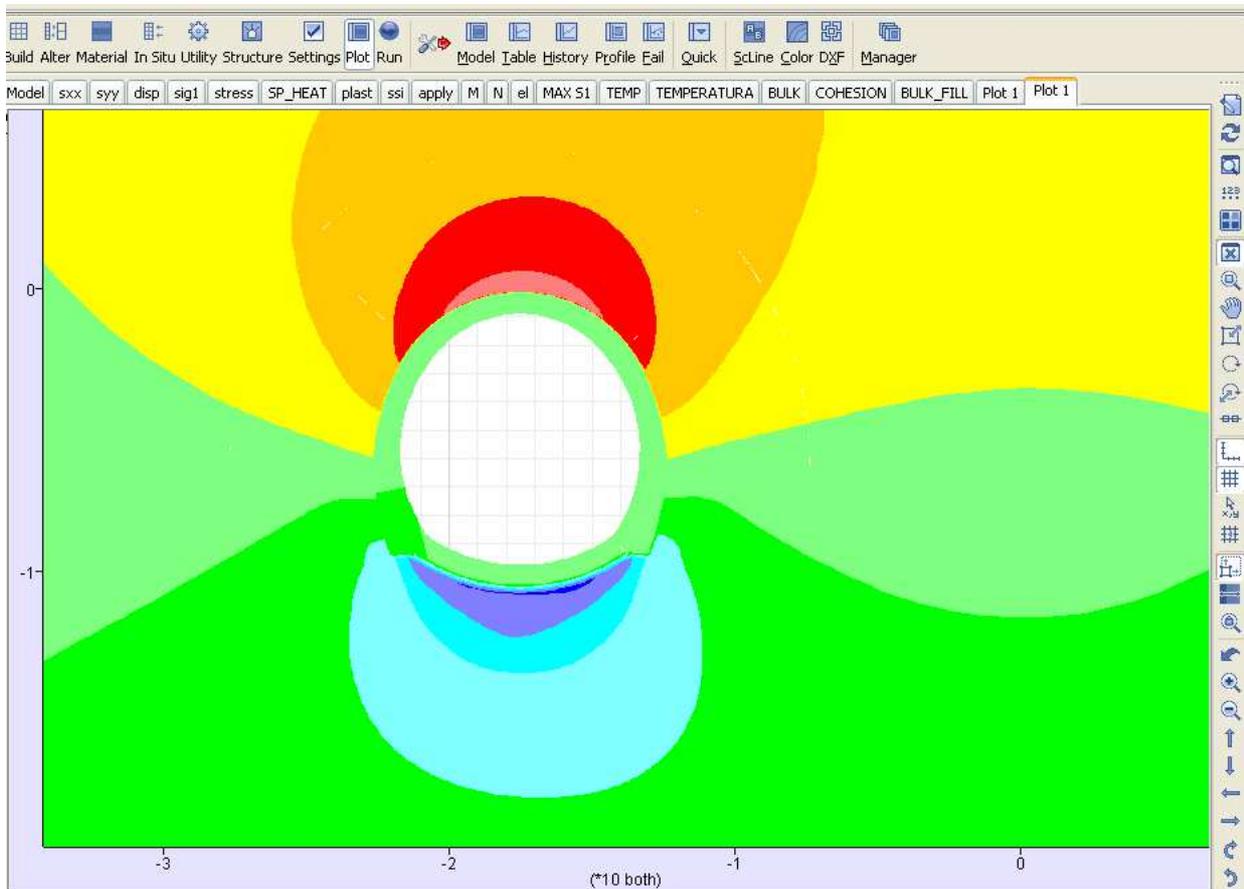
H	N	M	σ_c	σ_s	V	τ
[m]	[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[kN]	[MPa]
AR	-8513.94	-256.3	-9.38	-138.0	-477.792	-0.6
PIEDRITTO	-7295.46	-210.3	-8.00	-117.7	-455.000	-0.6
CALOTTA	-6835.92	283.4	-8.06	-117.6	435.615	0.6

Come si nota, tutte le verifiche risultano soddisfatte. Poiché si verifica ovunque $\tau < \tau_{c0}$ non è necessario disporre armatura specifica a taglio; l'armatura sarà quella minima prescritta da normativa.

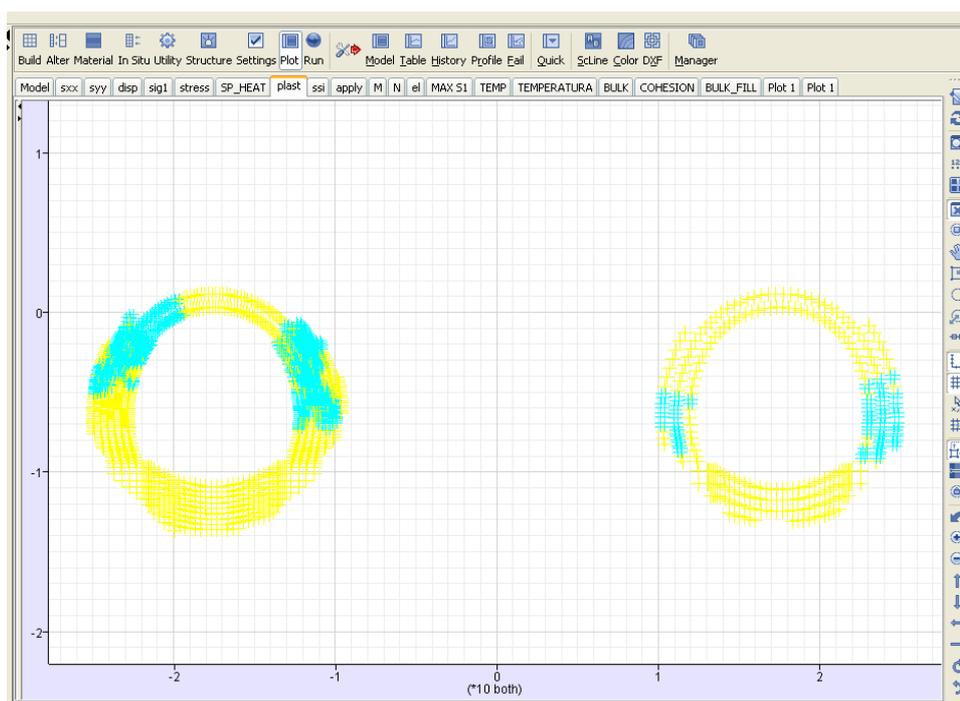
9.8. Modello 2: Sezione Tipo B0-r

9.8.1. Analisi deformativa

I risultati più significativi ottenuti dalla presente analisi sono riassunti nelle tabelle contenute nel presente paragrafo. Il modello ha indicato spostamenti contenuti in rapporto alla copertura con deformazioni del cavo in lungo termine nell'ordine di 4 cm.



Nel corso della simulazione delle fasi esecutive della galleria naturale prima di effettuare la riduzione dei parametri (fase di LT), i fenomeni di plasticizzazione nel terreno al contorno della cavità risultano piuttosto limitati; come si può vedere nella figura sottostante, infatti, risulta plasticizzata unicamente una fascia di circa 2-3 m attorno al cavo.



Per quanto riguarda il priverstimento, la convergenza media rilevata risulta nell' interno del centimetro. Il rivestimento definitivo è caratterizzato invece da una deformazione media dell'ordine del millimetro.

SEZIONE	Preconvergenza (time 2)	Δ spostamento priverstimenti (time 14-2)	Δ spostamento rivestimento definitivo (time 15-12)
	[cm]	[cm]	[cm]
Chiave calotta Verticale	3.1	1.1	<0.1
Piano centri Orizzontale	3.1	1.0	<0.1
Chiave arco rovescio Verticale	2.6	-	<0.1

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 152 di 166

9.8.2. Analisi Tensionale

I rivestimenti di prima fase utilizzati sono descritti nella seguente tabella

Spessore spritz beton (m)	Centine (-)	Numero (-)	Passo (m)
0.20	IPN160	2	1.2

Lo stato di sollecitazione nel prerinvestimento risulta di lieve entità, con momenti flettenti che raggiungono i 60 KN*m/m ed azioni assiali prossime ai 700 KN/m;

Nella tabella sottostante viene riportato lo stato tensionale sia sulle ali delle centine che sullo spritz beton unicamente le condizioni più gravose in base a quanto valutato nei vari step di calcolo. Le sollecitazioni relative a tutti i beam e le relative tensioni valutate sui materiali sono riportate in allegato.

FASE	H	N [kN/m]	M [kNm/m]	σ_c [Mpa]	σ_c limite [Mpa]	σ_s [Mpa]	σ_s limite [Mpa]	V [kN/m]	τ [Mpa]	τ limite [Mpa]
0.5gg	0.2	-299.3	4.8	-1.251	3.08	-64.6	190.0	-84.3	-48.2	109.7
3gg	0.2	-432.1	-7.4	-2.703	10.77	-36.5	190.0	-103.0	-59.0	109.7
28gg	0.2	-968.5	-19.6	-6.743	19.23	-64.5	190.0	-158.5	-90.7	109.7

Lo spritz-beton è caratterizzato da una tensione massima di compressione prossima ai 6-7 MPa, mentre l'acciaio si carica con una tensione massima pari a circa 65MPa. La tensione tangenziale massima sulle ali delle centine risulta inferiore al valore limite. Come si nota tutte le verifiche risultano soddisfatte.

Il rivestimento definitivo mostra in calotta sollecitazioni flettenti massime dell'ordine di 30 KNm/m ed azioni assiali inferiori ai 1100 KN/m. In corrispondenza dell'arco rovescio si raggiungono valori di momento dell'ordine dei 120 KNm/m ed azioni assiali che arrivano a 560 KN/m. La sezione B0-r è stata verificata non armata.

FERRI ARMATURA PRINCIPALE		
	Intradosso	Estradosso
Arco rovescio	–	–
Calotta	–	–

In sintesi vengono indicate le condizioni più gravose per le diverse parti strutturali (arco rovescio e calotta) della sezione in esame in base a quanto valutato nella fase di lungo termine nella quale si verificano le sollecitazioni maggiori.

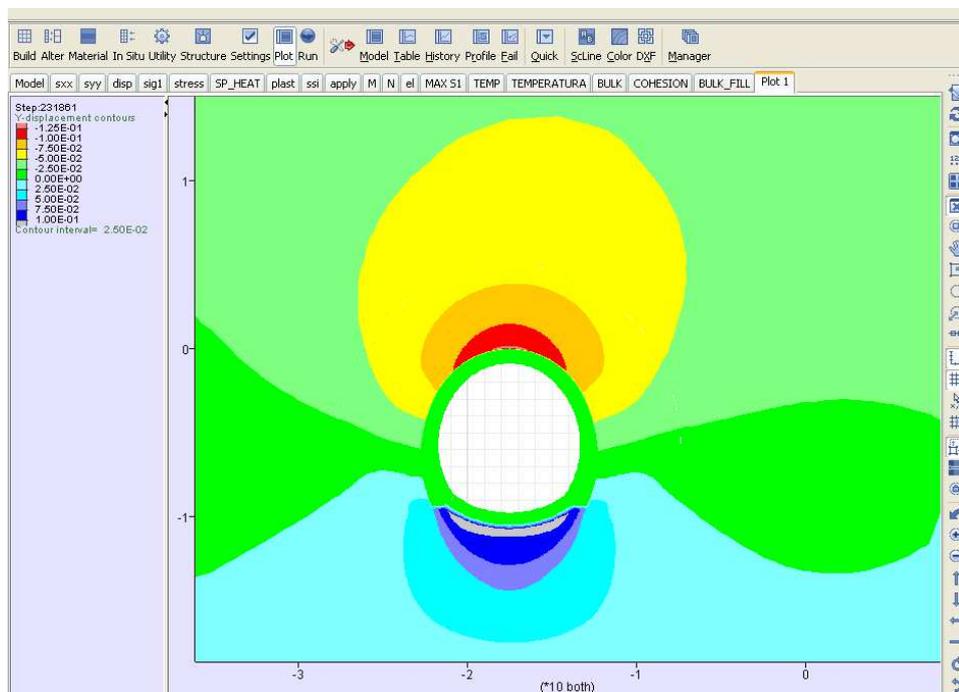
Elemento	N	M	σ_c	V	τ	N°
[-]	[KN/m]	[KNm/m]	[Mpa]	[KN/m]	[Mpa]	N°
AR	-555.262	-119.347	-1.307	-118.032	-0.132	1
PIEDRITTO	-1116.873	-38.202	-1.637	244.514	0.273	2
CALOTTA	-1107.852	30.735	-1.648	126.820	0.160	3

Come si nota, tutte le verifiche risultano soddisfatte. Poiché si verifica ovunque $\tau < \tau_{c0}$ non è necessario disporre armatura specifica a taglio.

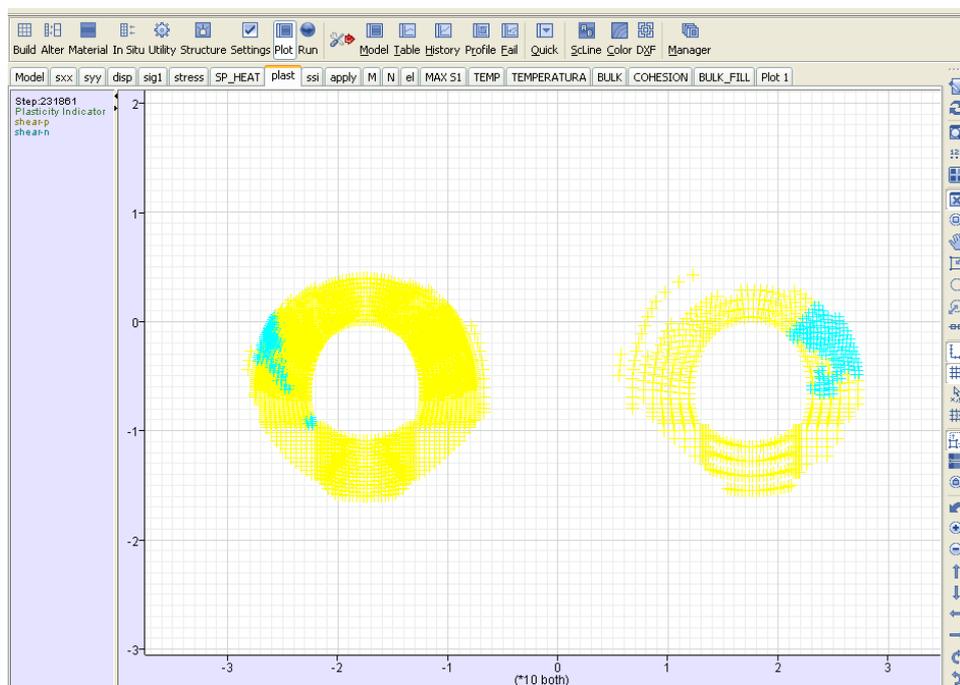
9.9. Modello 9: Sezione Tipo C2sb-r

9.9.1. Analisi deformativa

I risultati più significativi ottenuti dalla presente analisi sono riassunti nelle tabelle contenute nel presente paragrafo. Il modello ha indicato deformazioni massime del cavo in lungo termine dell'ordine di 14cm.



Nel corso della simulazione delle fasi esecutive della galleria naturale prima di effettuare la riduzione dei parametri (fase di LT), i fenomeni di plasticizzazione nel terreno al contorno della cavità risultano presenti in una fascia nell'intorno del cavo con una estensione di circa 5m.



Il prerivestimento è caratterizzato da valori di convergenza totale massima prossima ai 4cm. Il rivestimento definitivo è caratterizzato da una deformazione massima pari a circa 1mm.

SEZIONE	Preconvergenza (phase 2)	Δ spostamento prerivestimenti (phase 14-2)	Δ spostamento rivestimento definitivo (phase 15-7)
	[cm]	[cm]	[cm]
Chiave calotta Verticale	12.5	3.6	<0.1
Piano centri Orizzontale/verticale	10.6	1.8	<0.1
Chiave arco rovescio Verticale	9.5	-	<0.1

9.9.2. Analisi Tensionale

I rivestimenti di prima fase utilizzati sono descritti nella seguente tabella

Spessore spritz beton (m)	Centine (-)	Numero (-)	Passo (m)
0.3	IPN 200	2	1.0

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 155 di 166

Lo stato di sollecitazione nel prerivestimento raggiunge momenti flettenti che raggiungono i 40 KN*m/m con azioni assiali molto elevate prossime ai 2000 KN/m.

Nella tabella sottostante viene riportato lo stato tensionale sia sulle ali delle centine che sullo spritz beton considerando unicamente le condizioni più gravose in base a quanto valutato nei vari step di calcolo. Le sollecitazioni relative a tutti i beam e le relative tensioni valutate sui materiali sono riportate in allegato.

FASE	H	N [kN/m]	M [kNm/m]	σ_c [Mpa]	σ_c limite [Mpa]	σ_s [Mpa]	σ_s limite [Mpa]	V [kN/m]	τ [Mpa]	τ limite [Mpa]
0.50g	0.25	-732.7	-4.1	-1.846	3.08	-83.3	190.0	66.4	21.3	109.7
3g	0.25	-1158.0	-14.6	-4.911	10.77	-56.9	190.0	-102.6	-32.9	109.7
28g	0.25	-2106.0	-37.3	-10.250	23.08	-83.5	190.0	-164.5	-52.7	109.7

Lo spritz-beton è caratterizzato da una tensione massima di compressione di circa 11 MPa, mentre l'acciaio si carica con una tensione massima prossima a 80 MPa. La tensione massima tangenziale valutata durante le fasi di calcolo è pari a 53 MPa. Come si nota tutte le verifiche risultano soddisfatte, anche nelle condizioni limite sopra indicate.

Il rivestimento definitivo di calotta e l'arco rovescio mostrano azioni flettenti massime nell'intorno di 690 kNm/m per quanto riguarda l'arco rovescio e di 130 kNm/m per quanto riguarda la calotta. Le azioni assiali sono caratterizzate da valori nell'intorno di 4700 KN/m per la calotta e di circa 3300 kN/m per l'arco rovescio.

I ferri utilizzati per l'armatura principale sono riassunti in tabella.

FERRI ARMATURA PRINCIPALE		
	Intradosso	Estradosso
Arco rovescio	Φ24/20	Φ24/20
Calotta	Φ24/20	Φ24/20

In sintesi vengono indicate le sezioni più gravose in base a quanto valutato nei vari step di calcolo per le diverse parti strutturali (arco rovescio e calotta) della sezione in esame. Nella tabella sotto viene riportato lo stato tensionale e l'apertura della fessura qualora il momento agente risultasse superiore al momento di fessurazione.

H	N	M	σ_c	σ_s	V	τ
[m]	[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[kN]	[MPa]
AR	-3343.97	-692.0	-6.84	-94.9	-478.627	-0.6
PIEDRITTO	-5795.82	-139.7	-6.60	-97.2	467.894	0.6
CALOTTA	-4711.02	131.7	-5.20	-76.5	457.659	0.6

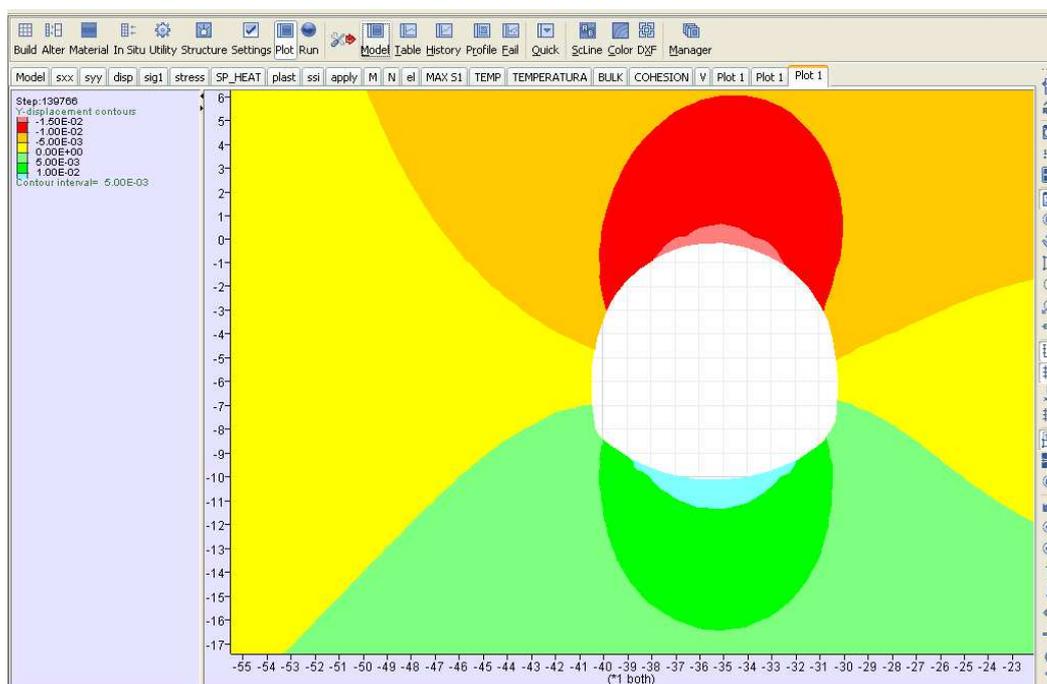
Come si nota, tutte le verifiche risultano soddisfatte. Poiché si verifica ovunque $\tau < \tau_{c0}$ non è necessario disporre armatura specifica a taglio; l'armatura sarà quella minima prescritta da normativa.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00	Foglio 156 di 166

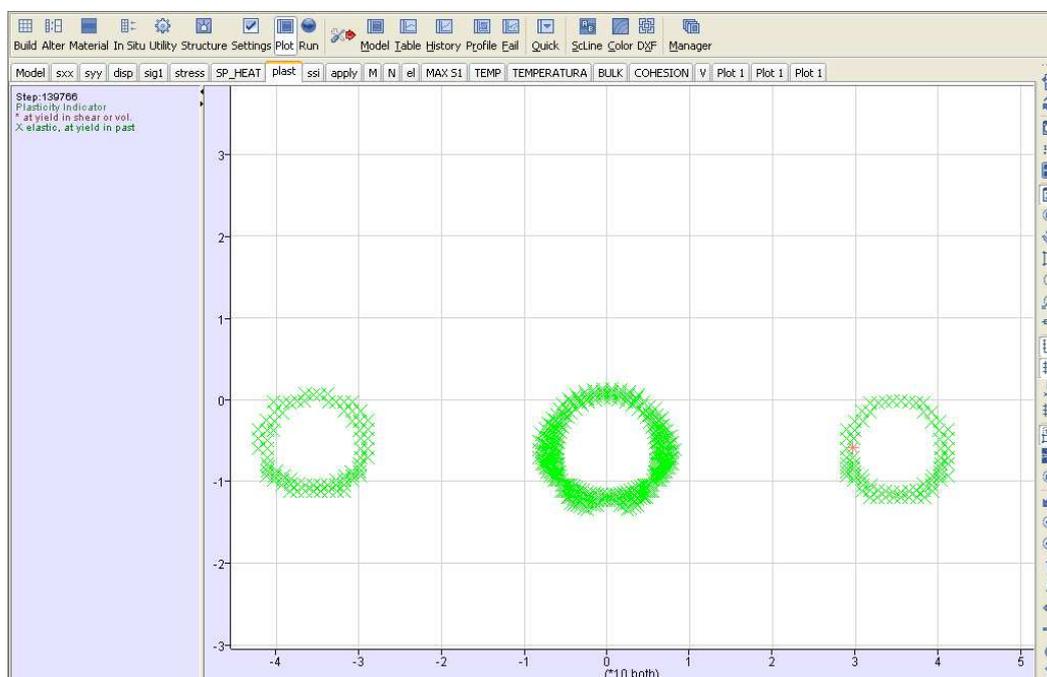
9.10. Modello 1: Sezione Tipo B0L area sicura

9.10.1. Analisi deformativa

I risultati più significativi ottenuti dalla presente analisi sono riassunti nelle tabelle contenute nel presente paragrafo. Il modello ha indicato spostamenti contenuti con deformazioni del cavo in lungo termine dell'ordine di 2 cm.



Nel corso della simulazione delle fasi esecutive della galleria naturale prima di effettuare la riduzione dei parametri (fase di LT), i fenomeni di plasticizzazione nel terreno al contorno della cavità risultano piuttosto limitati; come si può vedere nella figura sottostante, infatti, risulta plasticizzata unicamente una fascia di 2 m attorno al cavo.



Per quanto riguarda il prerivestimento, la convergenza media rilevata risulta inferiore al centimetro. Il rivestimento definitivo è caratterizzato invece da una deformazione media dell'ordine del millimetro.

SEZIONE	Preconvergenza (time 2)	Δ spostamento prerivestimenti (time 14-2)	Δ spostamento rivestimento definitivo (time 22-12)
	[cm]	[cm]	[cm]
Chiave calotta Verticale	1.2	0.6	0.2
Piano centri Orizzontale	1.1	0.5	< 0.1
Chiave arco rovescio Verticale	1.1	-	< 0.1

9.10.2. Analisi Tensionale

I rivestimenti di prima fase utilizzati sono descritti nella seguente tabella

Spessore spritz beton (m)	Centine (-)	Numero (-)	Passo (m)
0.2	IPN 160	2	1.4

Lo stato di sollecitazione nel prerivestimento risulta di lieve entità, con momenti flettenti che raggiungono i 10 KN*m/m ed azioni assiali prossime ai 18 KN/m;

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 158 di 166

Nella tabella sottostante viene riportato lo stato tensionale sia sulle ali delle centine che sullo spritz beton unicamente le condizioni più gravose in base a quanto valutato nei vari step di calcolo. Le sollecitazioni relative a tutti i beam e le relative tensioni valutate sui materiali sono riportate in allegato.

FASE	H	N [kN/m]	M [kNm/m]	σ_c [Mpa]	σ_c limite [Mpa]	σ_s [Mpa]	σ_s limite [Mpa]	V [kN/m]	τ [Mpa]	τ limite [Mpa]
0.5gg	0.2	-4.5	3.6	-0.333	3.08	21.7	190.0	7.3	4.8	109.7
3gg	0.2	-8.1	-4.9	-0.936	10.77	27.2	190.0	-9.9	-6.6	109.7
28gg	0.2	-18.3	12.7	-2.849	19.23	71.1	190.0	-26.7	-17.8	109.7

Lo spritz-beton è caratterizzato da una tensione massima di compressione prossima ai 2 MPa, mentre l'acciaio si carica con una tensione massima pari a circa 70 MPa. La tensione tangenziale massima sulle ali delle centine risulta inferiore al valore limite. Come si nota tutte le verifiche risultano soddisfatte.

Il rivestimento definitivo mostra in corrispondenza dell'arco rovescio momenti flettenti nell'ordine di 30 kNm/m ed azioni assiali dell'ordine dei 300 kN/m. In calotta si hanno azioni assiali di trazione nell'ordine di 230 kN/m e di compressione nell'ordine di 410 kN/m, i momenti flettenti raggiungono i 60 kNm/m.

FERRI ARMATURA PRINCIPALE		
	Intradosso	Estradosso
Arco rovescio	$\Phi 20/20$	$\Phi 20/20$
Calotta	$\Phi 20/20$	$\Phi 20/20$

In sintesi vengono indicate le condizioni più gravose per le diverse parti strutturali (arco rovescio e calotta) della sezione in esame in base a quanto valutato nella fase di lungo termine nella quale si verificano le sollecitazioni maggiori.

H	N	M	σ_c	σ_s	V	τ
[m]	[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[kN]	[MPa]
AR	-309.53	-32.5	-0.63	-8.8	-57.971	-0.1
PIEDRITTO	-435.79	-12.7	-0.79	-11.3	66.616	0.1
CALOTTA	-409.34	-3.7	-0.62	-9.2	51.918	0.1
CALOTTA*	233,3	61,5	-0.33	142,1	129.3	0.2

*Si riporta la verifica a trazione nella sezione in calotta

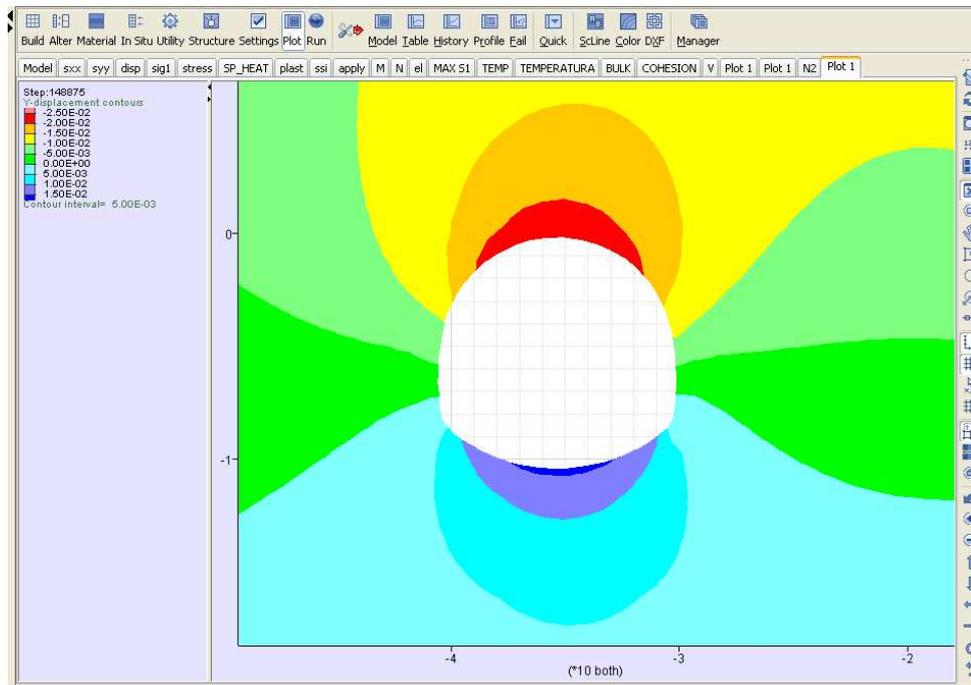
Come si nota, tutte le verifiche risultano soddisfatte. Poiché si verifica ovunque $\tau < \tau_{c0}$ non è necessario disporre armatura specifica a taglio; l'armatura sarà quella minima prescritta da normativa.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 159 di 166

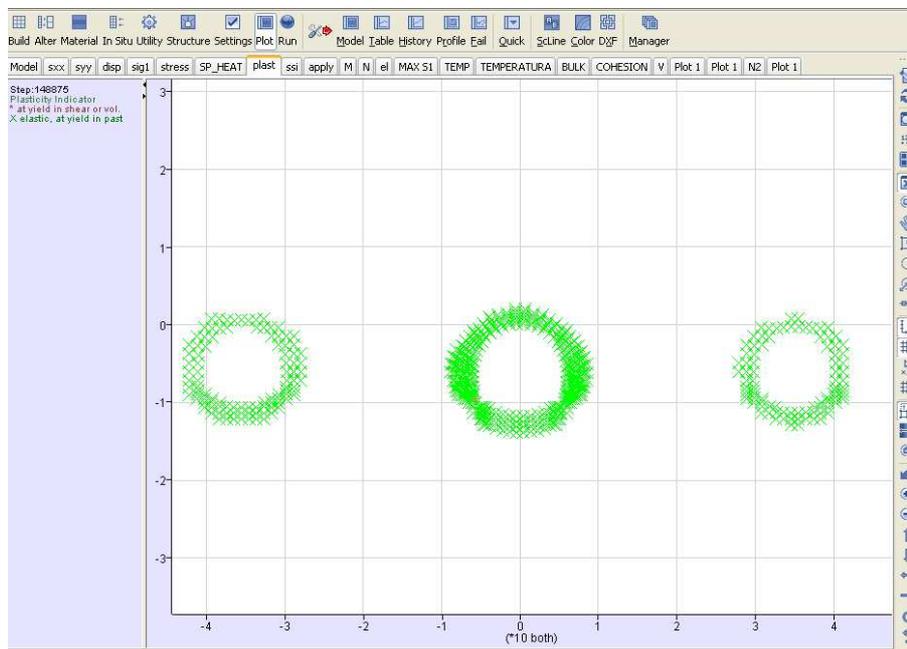
9.11. Modello 2: Sezione Tipo B0 area sicura

9.11.1. Analisi deformativa

I risultati più significativi ottenuti dalla presente analisi sono riassunti nelle tabelle contenute nel presente paragrafo. Il modello ha indicato spostamenti contenuti in rapporto alla copertura con deformazioni del cavo in lungo termine nell'ordine di 3 cm.



Nel corso della simulazione delle fasi esecutive della galleria naturale prima di effettuare la riduzione dei parametri (fase di LT), i fenomeni di plasticizzazione nel terreno al contorno della cavità risultano piuttosto limitati; come si può vedere nella figura sottostante, infatti, risulta plasticizzata unicamente una fascia di circa 3 m attorno al cavo.



Per quanto riguarda il prerivestimento, la convergenza media rilevata risulta inferiore al centimetro. Il rivestimento definitivo è caratterizzato invece da una deformazione media dell'ordine del millimetro.

SEZIONE	Preconvergenza (time 2)	Δ spostamento prerivestimenti (time 14-2)	Δ spostamento rivestimento definitivo (time 22-12)
	[cm]	[cm]	[cm]
Chiave calotta Verticale	1.8	0.8	0.2
Piano centri Orizzontale	1.6	0.6	<0.1
Chiave arco rovescio Verticale	1.3	-	<0.1

9.11.2. Analisi Tensionale

I rivestimenti di prima fase utilizzati sono descritti nella seguente tabella

Spessore spritz beton (m)	Centine (-)	Numero (-)	Passo (m)
0.25	IPN 180	2	1.2

Lo stato di sollecitazione nel prerivestimento risulta di lieve entità, con momenti flettenti che raggiungono circa 7 KN*m/m ed azioni assiali prossime ai 650 KN/m;

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 161 di 166

Nella tabella sottostante viene riportato lo stato tensionale sia sulle ali delle centine che sullo spritz beton unicamente le condizioni più gravose in base a quanto valutato nei vari step di calcolo. Le sollecitazioni relative a tutti i beam e le relative tensioni valutate sui materiali sono riportate in allegato.

FASE	H	N [kN/m]	M [kNm/m]	σ_c [Mpa]	σ_c limite [Mpa]	σ_s [Mpa]	σ_s limite [Mpa]	V [kN/m]	τ [Mpa]	τ limite[Mpa]
0.5gg	0.25	-238.9	-1.1	-0.643	3.08	-34.6	190.0	-9.7	-4.5	109.7
3gg	0.25	-334.5	1.8	-1.285	10.77	-18.2	190.0	-11.1	-5.1	109.7
28gg	0.25	-643.8	7.7	-2.937	19.23	-28.7	190.0	15.5	7.2	109.7

Lo spritz-beton è caratterizzato da una tensione massima di compressione prossima ai 3 MPa, mentre l'acciaio si carica con una tensione massima pari a circa 30 MPa. La tensione tangenziale massima sulle ali delle centine risulta inferiore al valore limite. Come si nota tutte le verifiche risultano soddisfatte.

Il rivestimento definitivo mostra in calotta sollecitazioni flettenti massime dell'ordine di 145 kNm/m ed azioni assiali di compressione di 1750 kN/m e 250 kN/m di trazione. In corrispondenza dell'arco rovescio si raggiungono valori di momento dell'ordine dei 200 kNm/m ed azioni assiali che arrivano a 260 kN/m circa.

FERRI ARMATURA PRINCIPALE		
	Intradosso	Estradosso
Arco rovescio	$\Phi 20/20$	$\Phi 20/20$
Calotta	$\Phi 20/20$	$\Phi 20/20$

In sintesi vengono indicate le condizioni più gravose per le diverse parti strutturali (arco rovescio e calotta) della sezione in esame in base a quanto valutato nella fase di lungo termine nella quale si verificano le sollecitazioni maggiori.

H	N	M	σ_c	σ_s	V	τ
[m]	[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[kN]	[MPa]
AR	-264.37	196.3	-2.63	84.5	-393.930	-0.5
PIEDRITTO	-5241.69	-53.8	-6.60	-97.9	-385.454	-0.6
CALOTTA	-1746.07	47.0	-2.44	-35.6	-344.204	-0.5
CALOTTA*	266,2	144.7	-0,81	177.7	111.8	0.1

*Si riporta la verifica a trazione nella sezione in calotta

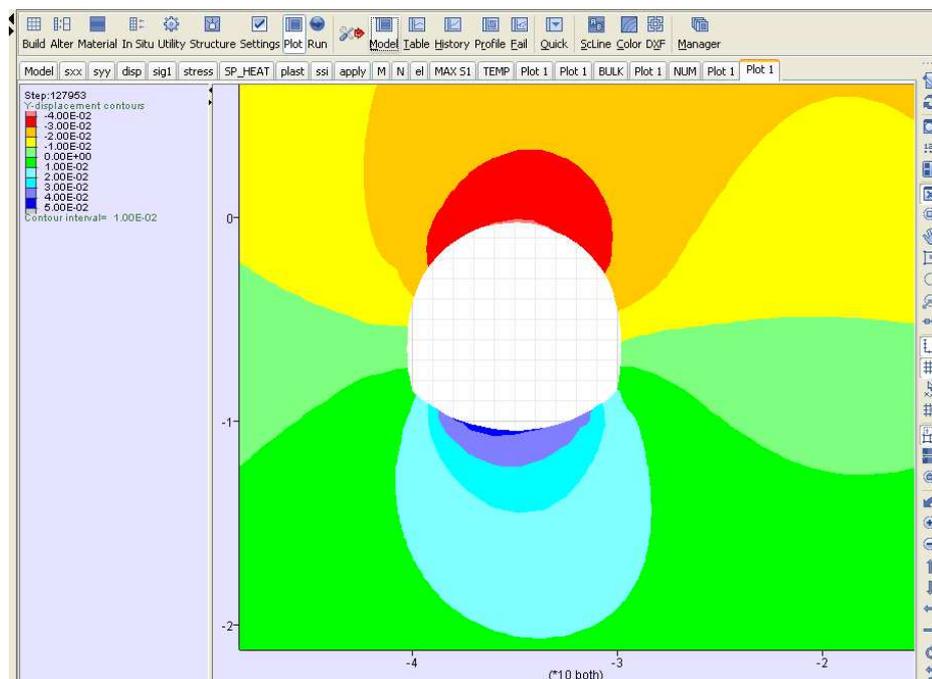
Come si nota, tutte le verifiche risultano soddisfatte. Poiché si verifica ovunque $\tau < \tau_{c0}$ non è necessario disporre armatura specifica a taglio.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00 Foglio 162 di 166

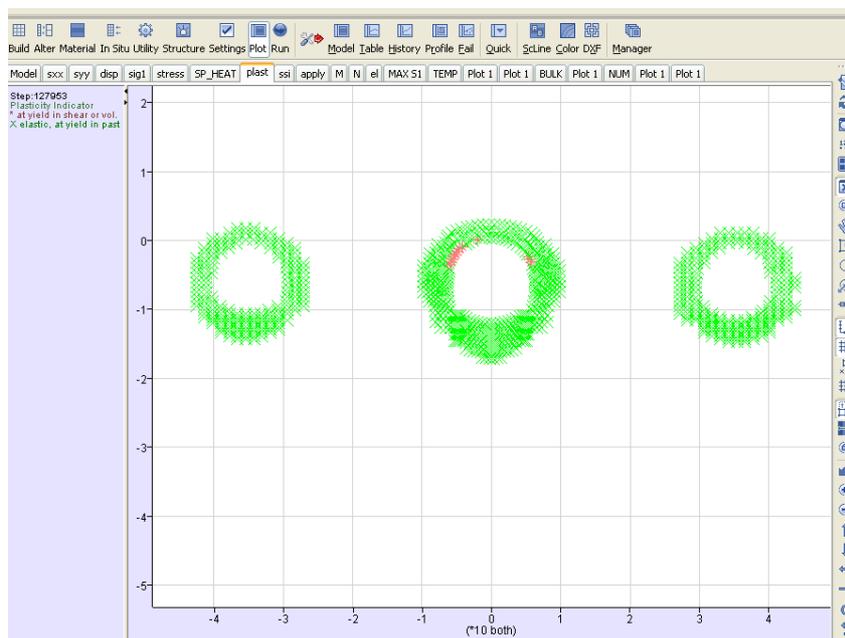
9.12. Modello 9: Sezione Tipo C4sb area sicura

9.12.1. Analisi deformativa

I risultati più significativi ottenuti dalla presente analisi sono riassunti nelle tabelle contenute nel presente paragrafo. Il modello ha indicato deformazioni massime del cavo in lungo termine dell'ordine di 5-6 cm. Si noti come tale valore massimo si raggiunga in arco rovescio.



Nel corso della simulazione delle fasi esecutive della galleria naturale prima di effettuare la riduzione dei parametri (fase di LT), i fenomeni di plasticizzazione nel terreno al contorno della cavità risultano presenti in una fascia nell'intorno del cavo con una estensione di circa 4 m.



Il priverivestimento è caratterizzato da valori di convergenza totale massima prossima ai 4cm. Il rivestimento definitivo è caratterizzato da una deformazione massima pari a circa 1mm.

SEZIONE	Preconvergenza (phase 2)	Δ spostamento prerivestimenti (phase 14-2)	Δ spostamento rivestimento definitivo (phase 22-7)
	[cm]	[cm]	[cm]
Chiave calotta Verticale	2.6	1.7	0.3
Piano centri Orizzontale/verticale	2.8	2.1	<0.1
Chiave arco rovescio Verticale	3.1	-	<0.1

9.12.2. Analisi Tensionale

I rivestimenti di prima fase utilizzati sono descritti nella seguente tabella

Spessore spritz beton (m)	Centine (-)	Numero (-)	Passo (m)
0.3	HEB 240	1	1.0

Lo stato di sollecitazione nel priverivestimento risulta di entità media, con momenti flettenti che raggiungono circa 73 KN*m/m con azioni assiali molto elevate prossime ai 1350 KN/m.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
IG5103ECVCLGN0000001A00		Foglio 164 di 166

Nella tabella sottostante viene riportato lo stato tensionale sia sulle ali delle centine che sullo spritz beton considerando unicamente le condizioni più gravose in base a quanto valutato nei vari step di calcolo. Le sollecitazioni relative a tutti i beam e le relative tensioni valutate sui materiali sono riportate in allegato.

FASE	H	N [kN/m]	M [kNm/m]	σ_c [Mpa]	σ_c limite [Mpa]	σ_s [Mpa]	σ_s limite [Mpa]	V [kN/m]	τ [Mpa]	τ limite [Mpa]
0.5gg	0.3	-348.5	6.9	-0.664	3.08	-28.9	190.0	19.5	7.8	109.7
3gg	0.3	-742.5	33.4	-3.295	10.77	-35.7	190.0	61.3	24.5	109.7
28gg	0.3	-1346.0	72.2	-7.076	23.08	-54.2	190.0	-117.0	-46.9	109.7

Lo spritz-beton è caratterizzato da una tensione massima di compressione di circa 7 MPa, mentre l'acciaio si carica con una tensione massima prossima a 54 MPa. La tensione massima tangenziale valutata durante le fasi di calcolo è pari a circa 47 MPa. Come si nota tutte le verifiche risultano soddisfatte, anche nelle condizioni limite sopra indicate.

Il rivestimento definitivo di calotta e l'arco rovescio mostrano azioni flettenti massime nell'intorno di 400 kNm/m per la calotta e 570 kNm/m per l'arco rovescio ed azioni assiali nell'intorno di 250 kN/m per la calotta e di circa 500 kN/m per l'arco rovescio.

I ferri utilizzati per l'armatura principale sono riassunti in tabella.

FERRI ARMATURA PRINCIPALE		
	Intradosso	Estradosso
Arco rovescio	$\Phi 24/20$	$\Phi 24/20$
Calotta	$\Phi 24/20$	$\Phi 24/20$

In sintesi vengono indicate le sezioni più gravose in base a quanto valutato nei vari step di calcolo per le diverse parti strutturali (arco rovescio e calotta) della sezione in esame. Nella tabella sotto viene riportato lo stato tensionale e l'apertura della fessura qualora il momento agente risultasse superiore al momento di fessurazione.

H	N	M	σ_c	σ_s	V	τ
[m]	[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[kN]	[MPa]
AR	-247.50	570.6	-5.53	241.1	-370.810	-0.5
PIEDRITTO	-4405.51	-363.7	-6.82	-97.2	-398.541	-0.5
CALOTTA	-506.40	-398.8	-4.68	130.5	-357.827	-0.5

Come si nota, tutte le verifiche risultano soddisfatte. Poiché si verifica ovunque $\tau < \tau_{c0}$ non è necessario disporre armatura specifica a taglio; l'armatura sarà quella minima prescritta da normativa.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVCLGN0000001A00
	Foglio 165 di 166

10. INTERFERENZA SCAVO-EDIFICI – CLASSIFICAZIONE DEL DANNO

Per quanto riguarda il tratto di galleria analizzato, in base ai dati disponibili e in considerazione delle coperture sempre maggiori di 150m, non si ritiene possano essere presenti edifici interferenti con lo scavo della galleria in esame.

11. CONCLUSIONI

Oggetto del presente elaborato è la descrizione delle principali problematiche legate allo scavo in naturale della Galleria Naturale di Valico – Tratta 4, relativa allo sviluppo di entrambi i binari tra le progressive PK 16+280 e PK 20+988 circa, relativo alle WBS GN14R - GN14R (binario pari) e GN15P – GN15R (binario dispari). Tale tratta è realizzata mediante scavo tradizionale impiegando due canne a singolo binario di sezione policentrica poste ad interasse pari a 35m. Si deve inoltre considerare il tratto in prossimità della Finestra Val Lemme denominata “di esodo rapido”, nel quale in affianco alle due canne di linea verrà realizzato un cunicolo, collegato alla canna centrale (avente sagoma allargata) mediante by-pass pedonali e carrabili.

L'opera in oggetto fa parte del tracciato della linea ferroviaria del “Terzo Valico dei Giovi” che si estende da Genova a Tortona. Il progetto nel suo complesso prevede la realizzazione di una galleria prevalentemente a doppia canna di 27 km a binario, dei quali 5.3km circa per fornice verranno eseguiti mediante scavo meccanizzato mentre il restante verrà scavato in tradizionale.

La sezione a singolo binario adottata nel tratto da scavare, avente raggio interno in chiave calotta di 3.75m, ha una larghezza massima interna pari a 7.86m all'altezza del piano dei centri. E' prevista inoltre una sezione allargata denominata “Area sicura”, anch'essa analizzata nel presente elaborato.

Sono state esaminate le scelte progettuali effettuate con conseguente definizione delle sezioni tipo d'avanzamento e la successiva verifica di tali sezioni, con riferimento alle condizioni critiche rappresentative presenti lungo lo sviluppo della galleria. Le verifiche, condotte in conformità a quanto previsto dal D.M. 1996, dimostrano l'idoneità della soluzione progettuale adottata

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVCLGN0000001A00	Foglio 166 di 166

12. ALLEGATI DI CALCOLO

12.1. Linee caratteristiche

12.2. Stabilità del fronte