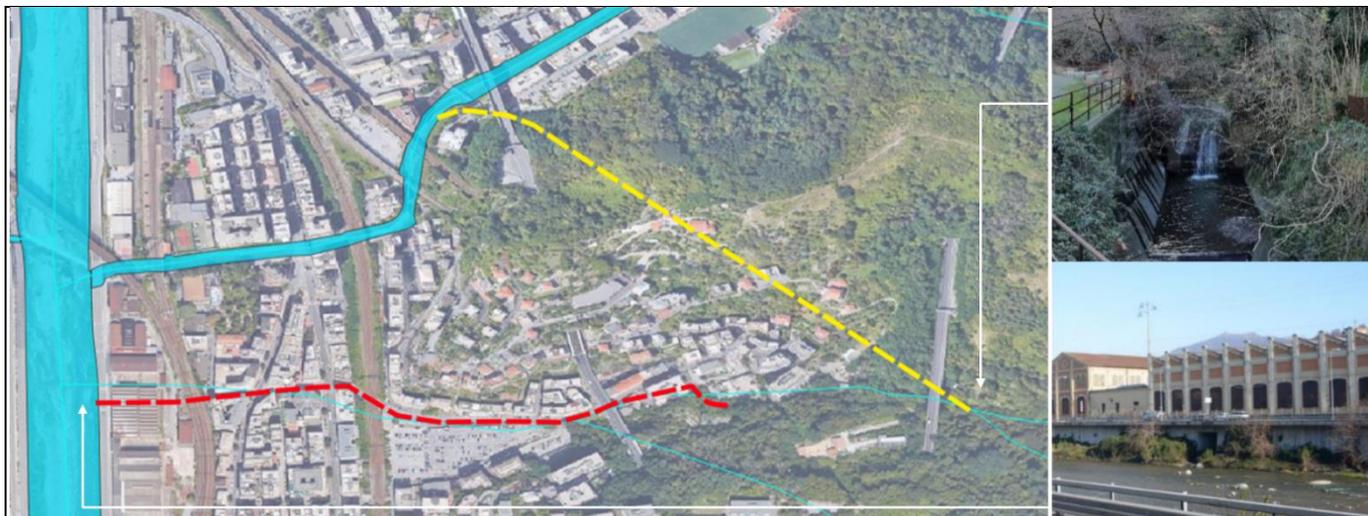




c_9969 - Comune di Genova - Prot. 22/11/2022.0445245.E



COMUNE DI GENOVA



Servizio di Progettazione di Fattibilità Tecnica ed Economica e definitiva (per appalto integrato) nonché del coordinamento della sicurezza in fase di progettazione delle “Opere di adeguamento idraulico del tratto tombinato di valle del rio Maltempo, affluente del torrente Polcevera”

PROGETTO DEFINITIVO

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO: Arch. Roberto Valcalda

PROGETTAZIONE:	MANDATARIA:	MANDANTE:
		Dott.ssa Claudia Pizzinato

RESPONSABILE DELLE INTEGRAZIONI DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE: Ing. Simone Venturini

**STRUTTURE
GALLERIA NATURALE E POZZI
GALLERIA NATURALE – RELAZIONE TECNICA E DI CALCOLO**

CODICE ESTESO ELABORATO:	SCALA:	DATA:
II151F-PD-STR-R001_1	-	10/2022
		NOME FILE:
		II151F-PD-STR-R001_1.docx

ELABORAZIONE PROGETTUALE:	REVISIONI					
	REV.	DATA	MOTIVO	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
Ing. SIMONE VENTURINI Ordine degli ingegneri Della Provincia di Verona N. A2515	0	09/2022	Emissione	C.MARCHINO	C.PESCE	S.VENTURINI
	1	10/2022	Revisione	C.MARCHINO	C.PESCE	S.VENTURINI



INDICE

	Pag.
1. INTRODUZIONE	1
2. OGGETTO E SCOPO	2
3. RIFERIMENTI NORMATIVI	3
4. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	4
5. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO E MODELLI MATEMATICI ADOTTATI	5
6. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOMECCANICO	6
6.1 Unità stratigrafiche	6
6.2 Litotipi presenti lungo la galleria naturale.....	9
6.3 Assetto idrogeologico.....	9
6.4 Caratterizzazione geotecnica e geomeccanica delle opere in progetto	10
7. SEZIONI TIPO PER LO SCAVO IN SOTTERRANEO	11
7.1 Sezioni tipo adottate per lo scavo della galleria scolmatrice	11
7.1.1 Sezione tipo A0c	11
7.1.2 Sezione tipo B0c	14
7.1.3 Sezione tipo B0Vc.....	16
7.2 Sezioni tipo adottate per lo scavo della camera di dissipazione.....	18
8. MODALITA' DI ANALISI DEL COMPORTAMENTO TENSO-DEFORMATIVO DELLA GALLERIA DI COLLEGAMENTO E DELLA CAMERA DI DISSIPAZIONE.....	21
8.1 Sviluppo della galleria e tratte omogenee	21
8.2 Scelta delle sezioni di analisi	21
8.3 Analisi di stabilità con il metodo di Tamez.....	23
8.4 Analisi tenso-deformativa agli elementi finiti.....	24
8.5 Influenza della falda freatica.....	26
8.6 Modalità di esecuzione delle verifiche strutturali	26
8.6.1 Prerivestimento	26
8.6.2 Rivestimento definitivo.....	29
8.7 Analisi sismica.....	34
9. ANALISI DEL COMPORTAMENTO TENSO-DEFORMATIVO - GALLERIA SCOLMATRICE	36
9.1 Analisi sezione tipo B0c.....	36
9.1.1 Analisi di stabilità con il metodo di Tamez	36
9.1.2 Analisi agli elementi finiti	38
9.2 Analisi sezione tipo B0Vc	46
9.2.1 Analisi di stabilità con il metodo di Tamez	46
9.2.2 Analisi agli elementi finiti	48
9.3 Analisi sezione tipo A0c.....	57
9.3.1 Analisi di stabilità con il metodo di Tamez	57
9.3.2 Analisi agli elementi finiti	59
10. ANALISI DEL COMPORTAMENTO TENSO-DEFORMATIVO DELLA CAMERA DI DISSIPAZIONE	68
10.1 Premessa.....	68
10.2 Analisi sezione tipo B0d	68
10.2.1 Analisi di stabilità con il metodo di Tamez	68
10.2.2 Analisi agli elementi finiti	70
11. MONITORAGGIO IN CORSO D'OPERA DELLA GALLERIA DI COLLEGAMENTO E DELLA CAMERA DI DISSIPAZIONE.....	79
11.1 Stazioni di convergenza.....	80
11.2 Stazioni di controllo	81
11.2.1 Celle di pressione	81
11.2.2 Celle di carico.....	82
11.2.3 Estensimetro multibase	82
11.3 Rilievo geologico del fronte di scavo	82
12. CONCLUSIONI	83



INDICE DELLE FIGURE

	Pag.
Figura 1.1: Opere principali. In rosso il tratto tombato del Rio Maltempo, in giallo la nuova galleria scolmatrice	1
Figura 6.1 - Unità I tra 5 – 10 m dal p.c. nel sondaggio S1N.....	6
Figura 6.2 - Unità Is tra 0 – 3.5 m dal p.c. nel sondaggio S3N.....	7
Figura 6.3 - Unità II tra 5 – 10 m dal p.c. nel sondaggio S4N.....	7
Figura 6.4 - Unità III tra 30 – 35 m dal p.c. nel sondaggio S1N.....	8
Figura 6.5 - Unità IIs tra 15 – 20 m dal p.c. nel sondaggio S1N.....	8
Figura 7.1 - Galleria di collegamento - Sezione tipo A0c.....	13
Figura 7.2 - Galleria di collegamento - Sezione tipo B0c.....	15
Figura 7.3 - Galleria di collegamento - Sezione tipo B0Vc.....	17
Figura 7.4 – Camera di dissipazione – Sezione tipo Intermedia	19
Figura 7.5 - Camera di dissipazione - Sezione tipo B0d.....	20
Figura 9.1 – Galleria scolmatrice - Sezione B0c - Analisi Tamez con parametri caratteristici (sopra) e ridotti (sotto).....	37
Figura 9.2 – Galleria di collegamento - Sezione B0c – Geometria del modello agli elementi finiti	38
Figura 9.3 – Galleria di collegamento - Sezione B0c – Analisi agli elementi finiti: vettori di spostamento e spostamenti radiali al termine dell’analisi 1	39
Figura 9.4 – Galleria di collegamento - Sezione B0c – Analisi agli elementi finiti: distribuzione della tensione principale massima e minima e dei punti plastici al termine dell’analisi 1	40
Figura 9.5 – Galleria di collegamento - Sezione B0c – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento di prima fase.....	41
Figura 9.6 – Galleria di collegamento - Sezione B0c – Analisi agli elementi finiti: diagrammi di interazione dei prriverstimenti	42
Figura 9.7 – Galleria di collegamento - Sezione B0c – Analisi agli elementi finiti: verifiche strutturali del rivestimento definitivo.....	42
Figura 9.8 – Galleria di collegamento - Sezione B0c – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento definitivo al termine del detensionamento, fase 6.....	43
Figura 9.9 – Galleria di collegamento - Sezione B0c – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento definitivo al termine del detensionamento, fase 7a.....	44
Figura 9.10 – Galleria di collegamento - Sezione B0c – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento definitivo al termine del detensionamento, fase 7b.....	45
Figura 9.11 – Galleria scolmatrice - Sezione B0Vc - Analisi Tamez con parametri caratteristici (sopra) e ridotti (sotto).....	47
Figura 9.12 – Galleria di collegamento - Sezione B0Vc – Geometria del modello agli elementi finiti	48
Figura 9.13 – Galleria di collegamento - Sezione B0Vc – Analisi agli elementi finiti: vettori di spostamento e spostamenti radiali al termine dell’analisi 1	49
Figura 9.14 – Galleria di collegamento - Sezione B0Vc – Analisi agli elementi finiti: distribuzione della tensione principale massima e minima e dei punti plastici al termine dell’analisi 1	50
Figura 9.15 – Galleria di collegamento - Sezione B0Vc – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento di prima fase.....	51
Figura 9.16 – Galleria di collegamento - Sezione B0Vc – Analisi agli elementi finiti: diagrammi di interazione dei prriverstimenti.....	52
Figura 9.17 – Galleria di collegamento - Sezione B0Vc – Analisi agli elementi finiti: verifiche strutturali del rivestimento definitivo.....	52
Figura 9.18 – Galleria di collegamento - Sezione B0Vc – Analisi agli elementi finiti: verifiche strutturali di quelle sezioni del rivestimento definitivo che richiedono armatura	53



Figura 9.19 – Galleria di collegamento - Sezione B0Vc – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento definitivo al termine del detensionamento, fase 6.....	54
Figura 9.20 – Galleria di collegamento - Sezione B0Vc – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento definitivo al termine del detensionamento, fase 7°	55
Figura 9.21 – Galleria di collegamento - Sezione B0Vc – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento definitivo al termine del detensionamento, fase 7b.....	56
Figura 9.22 – Galleria scolmatrice - Sezione A0c - Analisi Tamez con parametri caratteristici (sopra) e ridotti (sotto).....	58
Figura 9.23 – Galleria di collegamento - Sezione A0c – Geometria del modello agli elementi finiti	59
Figura 9.24 – Galleria di collegamento - Sezione A0c – Analisi agli elementi finiti: vettori di spostamento e spostamenti radiali al termine dell'analisi 1	60
Figura 9.25 – Galleria di collegamento - Sezione A0c – Analisi agli elementi finiti: distribuzione della tensione principale massima e minima e dei punti plastici al termine dell'analisi 1	61
Figura 9.26 – Galleria di collegamento - Sezione A0c – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nello spritz-beton	62
Figura 9.27 – Galleria di collegamento - Sezione A0c – Analisi agli elementi finiti: diagrammi di interazione dello spritz-beton	63
Figura 9.28 – Galleria di collegamento - Sezione A0c – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N agenti nei chiodi Swellex.....	63
Figura 9.29 – Galleria di collegamento - Sezione A0c – Analisi agli elementi finiti: verifiche strutturali del rivestimento definitivo	64
Figura 9.30 – Galleria di collegamento - Sezione A0c – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento definitivo al termine del detensionamento, fase 6.....	65
Figura 9.31 – Galleria di collegamento - Sezione A0c – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento definitivo al termine del detensionamento, fase 7a.....	66
Figura 9.32 – Galleria di collegamento - Sezione A0c – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento definitivo al termine del detensionamento, fase 7b.....	67
Figura 10.1 – Camera di dissipazione - Sezione B0d - Analisi Tamez con parametri caratteristici (sopra) e secondo NTC (sotto)	69
Figura 10.2 – Camera di dissipazione - Sezione B0d – Geometria del modello agli elementi finiti	70
Figura 10.3 – Camera di dissipazione - Sezione B0d – Analisi agli elementi finiti: vettori di spostamento e spostamenti radiali al termine dell'analisi 1	71
Figura 10.4 – Camera di dissipazione - Sezione B0d – Analisi agli elementi finiti: distribuzione della tensione principale massima e minima e dei punti plastici al termine dell'analisi 1	72
Figura 10.5 – Camera di dissipazione - Sezione B0d – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento di prima fase.....	73
Figura 10.6 – Camera di dissipazione - Sezione B0d – Analisi agli elementi finiti: diagrammi di interazione dei prerivestimenti	74
Figura 10.7 – Camera di dissipazione - Sezione B0d – Analisi agli elementi finiti: verifiche strutturali del rivestimento definitivo in assenza di armatura	74
Figura 10.8 – Camera di dissipazione - Sezione B0d – Analisi agli elementi finiti: verifiche strutturali di quelle sezioni del rivestimento definitivo che richiedono armatura	75
Figura 10.9 – Camera di dissipazione - Sezione B0d – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento definitivo al termine del detensionamento, fase 6.....	76
Figura 10.10 – Camera di dissipazione - Sezione B0d – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento definitivo al termine del detensionamento, fase 7a.....	77
Figura 10.11 – Camera di dissipazione - Sezione B0d – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento definitivo al termine del detensionamento, fase 7b.....	78



1. INTRODUZIONE

La presente relazione si riferisce alla progettazione delle opere di sistemazione idraulica e adeguamento della capacità idraulica del Rio Maltempo, affluente in sinistra idrografica del Torrente Polcevera, del quale è nota l'insufficienza della sezione a convogliare le portate aventi tempo di ritorno di 200 anni. Tale insufficienza idraulica è imputabile, fra le altre cose, all'estesa urbanizzazione che ha portato alla copertura del tratto terminale del corso d'acqua. Copertura che peraltro allo stato attuale risulta degradata, caratterizzata da dimensioni non costanti, e ristretta in più punti per l'inserimento di numerosi sottoservizi.

La soluzione proposta al fine di risolvere le criticità idrauliche esistenti prevede la realizzazione di una galleria scolmatrice che raccoglie le acque provenienti dalla parte più a monte e non antropizzata del bacino del Rio Maltempo per coltellarle nel tratto terminale del Torrente Torbella, che con decorso circa parallelo rimane più a nord.

Nel dettaglio il progetto prevede, Figura 1.1:

- la realizzazione di un'opera di presa sul Rio Maltempo a monte del viadotto autostradale ①;
- un pozzo di dissipazione che collega l'opera di presa con la galleria scolmatrice ②;
- una galleria scolmatrice del diametro di circa 4 m e lunghezza circa 540 m che sottopassa lo spartiacque fra Rio Maltempo e Torrente Torbella ③, dotata di un pozzo di aerazione intermedio;
- l'opera di confluenza nel Torrente Torbella ④;
- la sistemazione idraulica del Torrente Torbella fra l'opera di confluenza e il Torrente Polcevera con il rifacimento del ponte stradale di Via Rossini ed una passerella pedonale ⑤.

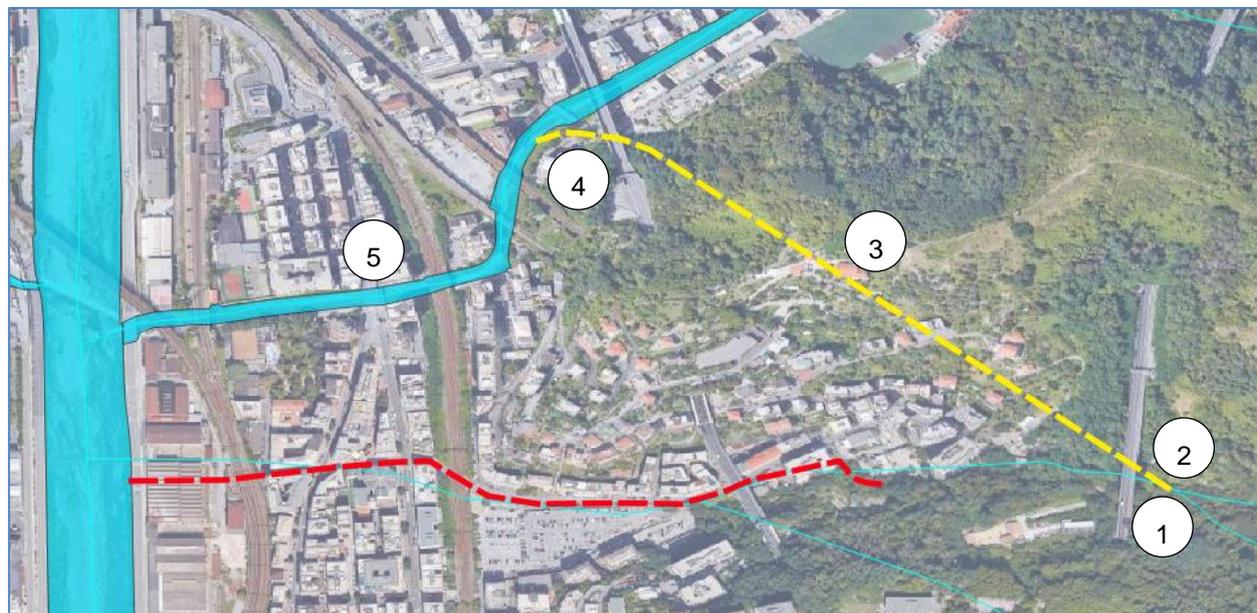


Figura 1.1: Opere principali. In rosso il tratto tombato del Rio Maltempo, in giallo la nuova galleria scolmatrice

La galleria scolmatrice è collegata con l'opera di presa mediante un pozzo di caduta. Ha poi inizio il tratto in galleria, di lunghezza 540 m, con una pendenza inferiore al 5 per mille, dotata di canale a pelo libero in corrente lenta di adeguata sezione ed altezza per consentire una manutenzione da valle, ed un aeroforo intermedio.



2. OGGETTO E SCOPO

Oggetto del presente rapporto sono le opere in sotterraneo previste nell'ambito del progetto, che consistono nella camera di dissipazione e nella galleria di collegamento.

Lo scopo è quello di dimostrare l'adeguatezza delle soluzioni proposte per la realizzazione degli scavi ed il sostegno degli stessi in fase provvisoria e nel lungo termine.



3. RIFERIMENTI NORMATIVI

Progettazione geotecnica

- D.M. del 17/01/2018 – Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”;
- Circolare Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. del 21/01/19 n. 7 C.S.LL.PP.- Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni” di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018;
- Circolare ministeriale LL.PP. del 24/09/88 n. 30483 - “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”;
- D.M. del 11/03/88 - Istruzioni per l'applicazione delle “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”.



4. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Bieniawski Z.T. (1974) "Geomechanic classification of rock masses and its application in tunnelling" - Proc. 3rd Int. Congr. Rock Mech. ISRM, vol.2A, Denver
- Hoek E. and Brown E.T. (1980) "Empirical strength criterion for rock masses" - J. Geotech. Eng. Div. ASCE 106 (GT9), pp.1013-1035
- Hoek E. and Marinos (2001) "Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as Flysch" - Bull. Eng. Geol. Env., pp. 86-92
- Hoek E., Carranza-Torres C. and Corkum B. (2002) "Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition" - Proc. North American Rock Mechanics Society, Toronto, July 2002
- Hoek E. and Diederichs M. S. (2006) "Empirical estimation of rock mass modulus" - Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 43(2), pp. 203–215



5. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO E MODELLI MATEMATICI ADOTTATI

I documenti di riferimento alla presente relazione sono gli elaborati relativi al PD.

I modelli matematici adottati per l'analisi di stabilità del cavo sono i seguenti:

- Phase 2D vers.8.0, Rocscience: programma agli elementi finiti per l'analisi bidimensionale della galleria e dei rivestimenti;
- Metodo di Tamez: analisi di stabilità del fronte e del cavo all'equilibrio limite, adottando il metodo proposto da Tamez Gonzalez, Rangel Nuñez, Holguin nel libro "Diseño geotecnico de túneles", 1997.



6. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOMECCANICO

6.1 Unità stratigrafiche

L'analisi delle informazioni, desunte dalle indagini pregresse e da quelle di nuova realizzazione a supporto del progetto definitivo, ha permesso di definire sulla base della uniformità dei caratteri stratigrafici e del comportamento geotecnico le seguenti unità stratigrafiche:

- **RIP**: Riporti artificiali e depositi rimaneggiati (Quaternario). Composizione eterogenea, prevalentemente ghiaioso sabbiosi in matrice limoso argillosa. Possibile presenza di frammenti di laterizio.
- **CD**: Coltri eluvio-colluviali (Quaternario). Clasti eterometrici in abbondante matrice sabbioso limosa o limoso argillosa.
- **AA/AM**: Materiali alluvionali antichi, recenti e di alveo attuale (Quaternario). Depositi ghiaiosi e sabbiosi anche posti a quota più elevata rispetto agli alvei attuali o al livello del mare, talvolta terrazzati. Possibili orizzonti sabbioso limosi in profondità. Al piede del versante possono inglobare coltri colluviali e/o accumuli di antica frana.
- **AMTa**: Argilliti di Montanesi, alterate per pedogenesi e/o molto fratturate e disarticolate.
- **AMT**: Argilliti di Montanesi (Cenomaniano - Turoniano). Costituite da argilliti emipelagiche e argilliti siltose in strati da centimetrici a pluridecimetrici poco evidenti e deformati, con subordinate intercalazioni di arenarie quarzose fini e vene di quarzo. Fissilità spinta con diffusa scistosità di tipo lastroide. Valori di RQD e GSI tendenzialmente bassi. Elevata variabilità del grado di fratturazione.



Figura 6.1 - Unità I tra 5 – 10 m dal p.c. nel sondaggio S1N



Figura 6.2 - Unità Is tra 0 – 3.5 m dal p.c. nel sondaggio S3N



Figura 6.3 - Unità II tra 5 – 10 m dal p.c. nel sondaggio S4N



c_0969 - Comune di Genova - Prot. 22/11/2022.0445245.E



Figura 6.4 - Unità III tra 30 – 35 m dal p.c. nel sondaggio S1N



Figura 6.5 - Unità IIIs tra 15 – 20 m dal p.c. nel sondaggio S1N



6.2 Litotipi presenti lungo la galleria naturale

La galleria di derivazione come risulta dalla carta geologica e dal profilo geologico si sviluppa interamente nelle argilliti di Montanesi, una formazione strutturalmente complessa caratterizzata da valori di resistenza relativamente modesti, una marcata fissilità e scagliosità, elevata variabilità laterale e verticale del grado di fratturazione, alterabile nel tempo con decadimento delle resistenze in caso di contatto prolungato con l'acqua ma anche con l'aria.

Nelle zone a maggior grado di fratturazione, così come in quelle alterate a minore copertura, l'RQD, già di per sé mai elevato e compreso fra 30-60%, decade significativamente portandosi fra zero e 20%; in tali ambiti non si può escludere la presenza di fasce, di spessore metrico, alterate e argillificate con caratteristiche e comportamento più simili ad una terra che ad una roccia.

La giacitura è immergente verso E o SE, il che considerando una direzione di scavo da valle verso monte significa a reggipoggio rispetto al versante. Tale condizione è favorevole solo all'apparenza poiché la fissilità di cui sopra, e una struttura fortemente deformata, potranno determinare nel corso dello scavo le più svariate intersezioni fra discontinuità stratigrafico-strutturali e superfici di scavo.

L'ammasso attraversato è tendenzialmente lapideo con un comportamento elastico perfettamente plastico allo scavo: raggiunta la resistenza massima, manifesta deformazioni continue senza variazione dello stato tensionale e di volume (angolo di dilatanza nullo).

Dalla cartografia geologica non risulta la presenza di faglie evidenti lungo l'opera, ma ciò è solo da attribuirsi alla particolare struttura di questa unità che ha un comportamento fragile/duttile ed è composta da accavallamenti tettonici interni non riconoscibili in campo, ma certamente presenti e testimoniati da una struttura fortemente deformata accompagnata da fasce diversamente fratturate. Durante lo scavo si ritiene quindi assai probabile l'attraversamento di zone da fratturate fino a brecciate, più frequenti probabilmente nella parte alta della formazione e quindi verso l'opera di presa avvicinandosi al limite tettonico con l'unità di Ronco. Il valore di GSI atteso è tendenzialmente basso, influenzato dalla fissilità della roccia, da una complessa storia geologica e dalle numerose discontinuità, variando fra 20 e 30 con punte minime nelle zone di alterazione per pedogenesi (bassa copertura) e di maggiore fratturazione.

6.3 Assetto idrogeologico

Dal punto di vista idrogeologico la formazione delle argilliti di Montanesi, entro cui si sviluppa la galleria, è sostanzialmente impermeabile. Non sono censite sorgenti entro e nell'intorno dei lavori, anche se la documentazione consultata inerente lo stoccaggio incontrollato di rifiuti a valle dell'autostrada riporta la presenza di una piccola emergenza idrica che, probabilmente perché captata e allontanata nell'ambito della messa in sicurezza del sito, non è stata riscontrata in sede di sopralluogo. Durante lo scavo in sotterraneo la roccia si presenterà da asciutta a umida, ma non mancheranno tratte con condizioni di stillicidio più o meno intenso specie in corrispondenza di fasce maggiormente fratturate e/o dell'intercettazione di intercalazioni arenacee. Le quantità d'acqua drenate nel cavo non saranno tali da condizionare direttamente le operazioni di scavo, anche tenuto conto che la pendenza della galleria diretta verso valle ne favorisce lo smaltimento.



6.4 Caratterizzazione geotecnica e geomeccanica delle opere in progetto

La seguente Tabella 6.1 riporta il quadro riassuntivo relativo alla caratterizzazione geotecnica e geomeccanica delle diverse unità stratigrafiche individuate nella Relazione Geologica di progetto.

Per quanto riguarda la presenza delle diverse formazioni ed i relativi spessori in corrispondenza del tracciato della galleria e della camera di dissipazione, si rimanda al profilo geomeccanico allegato al progetto.

Sigla	Unità stratigrafica	γ (kN/m ³)	GSI	RMR	Classe Bieniawsky	c' (kPa)	ϕ (°)	E (MPa)	K (m/s)
RIP	Ripporto	18	-	-	-	0	28	20	1.0E-05
CD	Depositi eluviali-colluviali	19	-	-	-	5	29	25	1.0E-05
AA/AM	Alluvioni Torbella	19	-	-	-	0	31	28	1.0E-04
AMT	Argilliti di Montanesi	27	30	27	IV	100	38	1200	1.5E-07
AMTa	Argilliti di Montanesi, materiale alterato e zona di faglia	25	20	16	V	25	28	350	4.0E-07

Tabella 6.1 Caratterizzazione geotecnica e geomeccanica delle diverse unità stratigrafiche



7. SEZIONI TIPO PER LO SCAVO IN SOTTERRANEO

In questo capitolo vengono descritte dal punto di vista strutturale le sezioni tipo che vengono proposte per la realizzazione della galleria naturale di collegamento tra la camera di dissipazione ed il Rio Torbella e quelle da adottare per lo scavo della camera di dissipazione.

L'avanzamento degli scavi in sotterraneo in ragione delle caratteristiche della roccia e delle coperture privilegia l'adozione di centine e spritz beton; più limitatamente di una sezione dotata di spritz beton fibrorinforzato e chiodi radiali al contorno. In galleria lo scavo potrà avvenire prevalentemente con martello demolitore o benna.

Sono presenti poi al di sopra della calotta della camera di dissipazione il pozzo di caduta e quello di ventilazione che verranno realizzati dall'alto; è importante evidenziare che, viste le ridotte coperture presenti, tutti gli scavi e le opere al di sopra della camera di dissipazione dovranno essere eseguiti solamente una volta completato lo scavo ed il rivestimento definitivo della stessa.

7.1 Sezioni tipo adottate per lo scavo della galleria scolmatrice

Lo scavo della galleria avverrà a piena sezione. I problemi di stabilità sono dovuti in maggiore entità al cavo, per cui il modo più sicuro di procedere è quello che mantiene la roccia all'intorno del cavo quanto più possibile in campo elastico. Infatti la sezione progettata raggiunge proprio lo scopo di mantenere l'ammasso roccioso in campo elastico o comunque quello di limitare l'estensione della zona plastica.

Il progetto della galleria prevede, per la sezione corrente della galleria di collegamento, l'adozione di 3 sezioni tipo fondamentali, descritte di seguito, la tipo A0c, B0c e B0Vc.

Sono previste poi 2 piazzole provvisorie, di lunghezza pari a 20 m ciascuna, da realizzarsi come allargamento della sezione corrente, necessarie per agevolare e snellire la cantierizzazione dell'opera. Esse saranno poi riempite per ottenere la costanza della sezione idraulica.

7.1.1 Sezione tipo A0c

La sezione tipo A0c si applica nei tratti interessati dalla presenza della porzione meno fratturata delle Argilliti di Montanesi, tali da non richiedere l'utilizzo di interventi di preconsolidamento al fronte e al contorno, né di centinatura metallica come rivestimento di prima fase.

Le fasi realizzative sono le seguenti:

- a) Scavo. Scavo a piena sezione con sfondi massimi pari a 3 m.
- b) Prerivestimento e consolidamento contorno di scavo. È costituito da uno strato di 15 cm di spritz beton fibrorinforzato (5 cm prespritz + 10 cm) e da una chiodatura radiale formata da 4-5 chiodi Swellex Mn16 di lunghezza 3,50 m, posti sfalsati e spazati longitudinalmente 1,50 m.
- c) Muretta e arco rovescio. Rappresentano la prima parte del rivestimento definitivo messa in opera e vengono gettate ad una distanza dal fronte non vincolata ma che dovrà essere regolata in funzione della risposta deformativa dell'ammasso; lo spessore dell'arco rovescio è pari a 0,40 m ed entrambe le membrature sono prive di armatura.



d) Rivestimento definitivo. Viene gettato il rivestimento definitivo ad una distanza dal fronte non vincolata ma che dovrà essere regolata in funzione della risposta deformativa dell'ammasso. Ha uno spessore in calotta pari a 0,30 m. Il getto, non armato, verrà eseguito con l'ausilio di lastre prefabbricate tralicciate che fungono da cassero a perdere.

La Figura 7.1 riporta la schematizzazione della sezione tipo A0c.

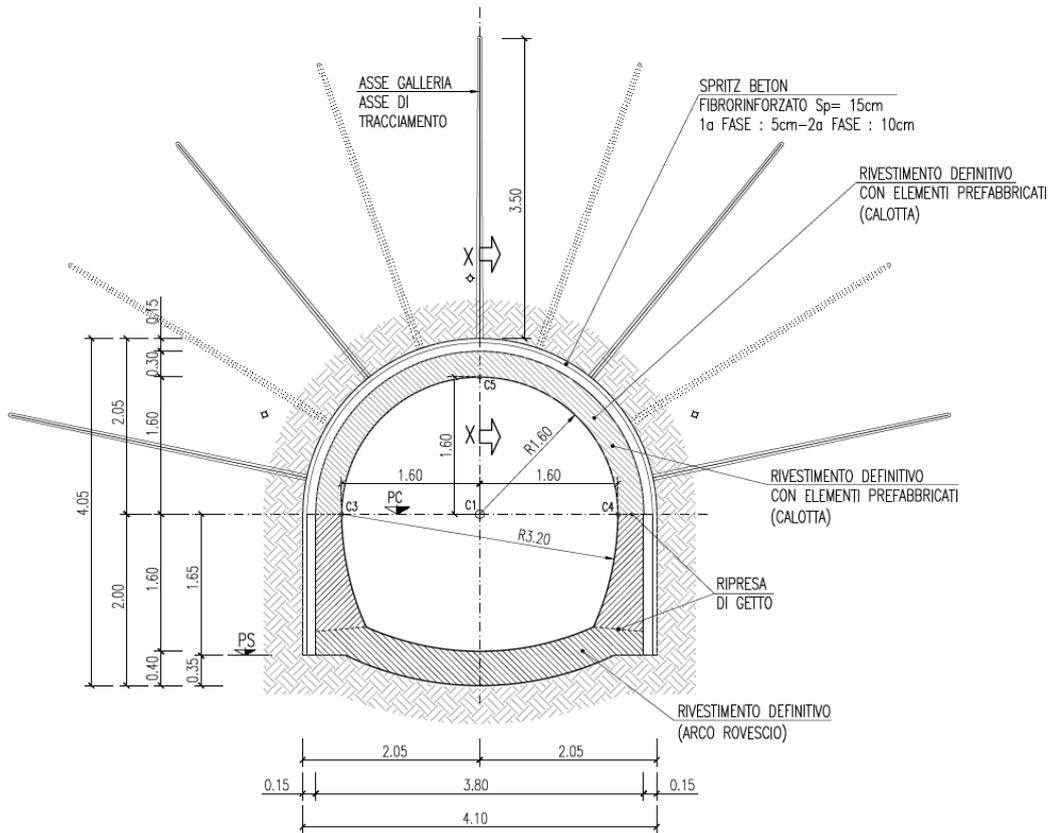
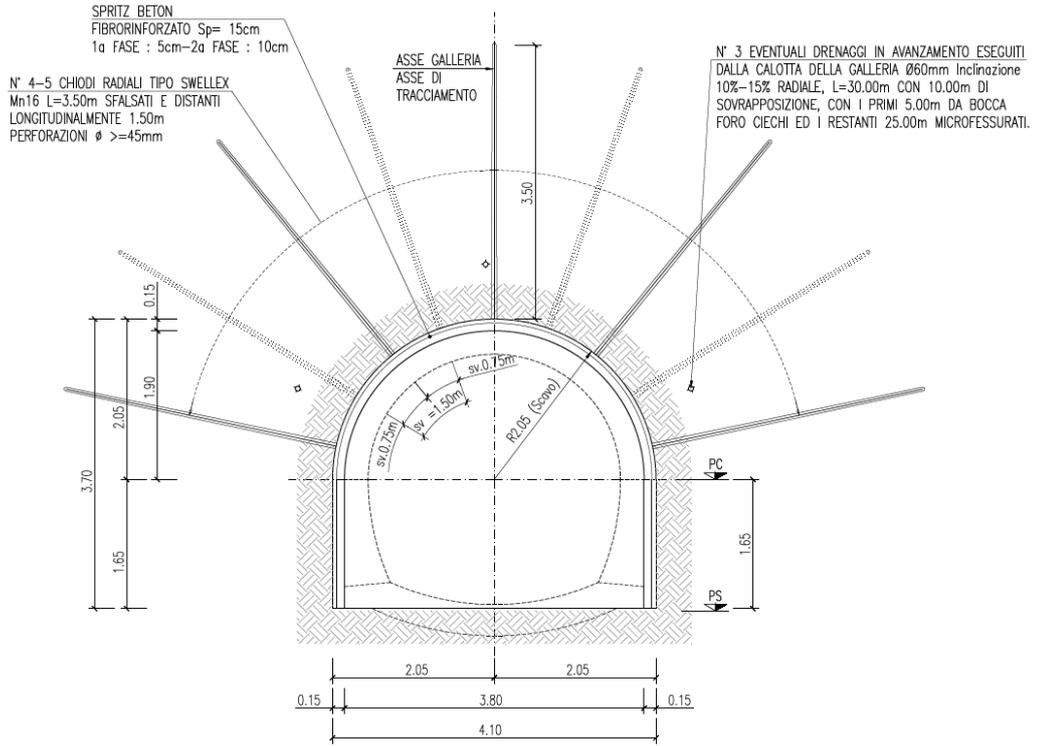


Figura 7.1 - Galleria di collegamento - Sezione tipo A0c



7.1.2 Sezione tipo B0c

La sezione tipo B0c si applica nei tratti interessati dalla presenza della porzione a media fratturazione delle Argilliti di Montanesi, tali da non richiedere l'utilizzo di interventi di preconsolidamento al fronte e al contorno.

Le fasi realizzative sono le seguenti:

- a) Scavo. Scavo a piena sezione con sfondi massimi pari a 2,80 m.
- b) Prerivestimento. È costituito da uno strato di 25 cm di spritz beton fibrorinforzato o armato con rete elettrosaldata (5 cm prespritz + 20 cm) e da 2 centine metalliche IPE140 con interasse 1,20-1,40 m.
- c) Muretta e arco rovescio. Rappresentano la prima parte del rivestimento definitivo messa in opera e vengono gettate ad una distanza dal fronte non vincolata ma che dovrà essere regolata in funzione della risposta deformativa dell'ammasso; lo spessore dell'arco rovescio è pari a 0,40 m ed entrambe le membrature sono prive di armatura.
- d) Rivestimento definitivo. Viene gettato il rivestimento definitivo ad una distanza dal fronte non vincolata ma che dovrà essere regolata in funzione della risposta deformativa dell'ammasso. Ha uno spessore in calotta pari a 0,30 m. Il getto, non armato, verrà eseguito con l'ausilio di lastre prefabbricate tralicciate che fungono da cassero a perdere.

La Figura 7.2 riporta la schematizzazione della sezione tipo B0c.

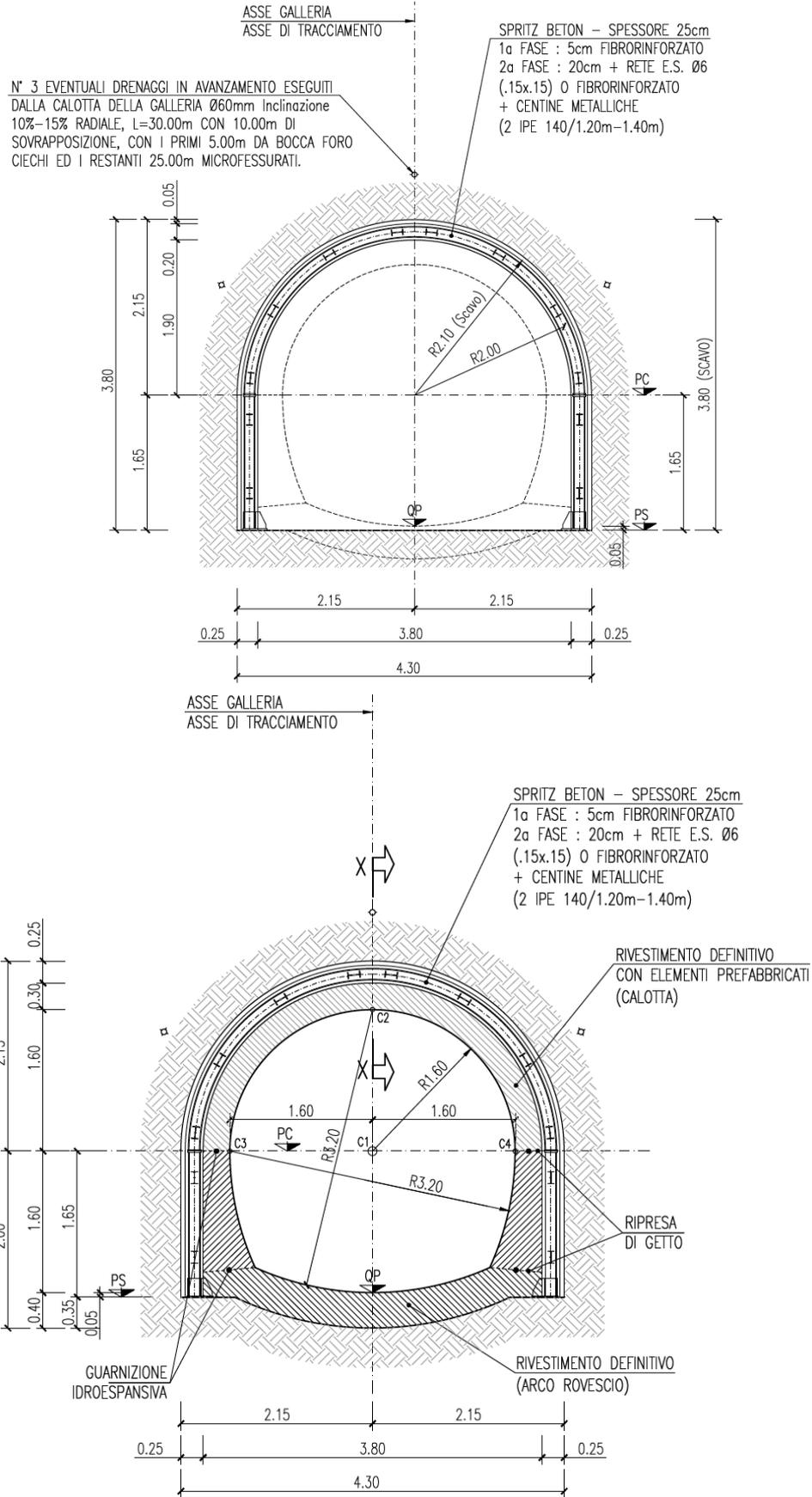


Figura 7.2 - Galleria di collegamento - Sezione tipo B0c



7.1.3 Sezione tipo B0Vc

La sezione tipo B0Vc viene adottata per una estensione pari a circa il 17% della galleria di collegamento (circa 91 m) in corrispondenza delle zone che presentano un maggior grado di fratturazione e alterazione tale da richiedere l'utilizzo di interventi di preconsolidamento al contorno.

Le fasi realizzative sono le seguenti:

- a) Preconsolidamento del contorno di scavo. Esecuzione della coronella costituita da n.16 tubi metallici di lunghezza 12 m e 3 m di sovrapposizione, valvolati con 2 vlv/m ed iniettati a pressione con miscela cementizia, disposti su un angolo di 150° al contorno di scavo.
- b) Scavo. Scavo a piena sezione con sfondi massimi pari a 1 m.
- c) Prerivestimento. È costituito da uno strato di 25 cm di spritz beton fibrorinforzato o armato con rete elettrosaldata (5 cm prespritz + 20 cm) e da 2 centine metalliche IPE140 con interasse 1 m.
- d) Muretta e arco rovescio. Rappresentano la prima parte del rivestimento definitivo messa in opera e vengono gettate ad una distanza dal fronte non vincolata ma che dovrà essere regolata in funzione della risposta deformativa dell'ammasso; lo spessore dell'arco rovescio è pari a 0,40 m ed entrambe le membrature sono armate.
- e) Rivestimento definitivo. Viene gettato il rivestimento definitivo ad una distanza dal fronte non vincolata ma che dovrà essere regolata in funzione della risposta deformativa dell'ammasso. Ha uno spessore in calotta variabile tra 0,30 e 0,93 m. Il getto, non armato, verrà eseguito con l'ausilio di lastre prefabbricate tralicciate che fungono da cassero a perdere.

La Figura 7.3 riporta la schematizzazione della sezione tipo B0Vc.



7.2 Sezioni tipo adottate per lo scavo della camera di dissipazione

Lo scavo della camera di dissipazione avviene per step successivi adottando diverse sezioni tipo.

Una volta raggiunta la progressiva di inizio di tale camera con la sezione corrente della galleria di collegamento, si prevede, per un tratto di lunghezza pari a 6 m, di effettuare uno svaso che consente di passare da tale sezione a quella denominata Intermedia. Lo scavo avverrà sempre a piena sezione adottando le seguenti fasi:

- a) Scavo. Scavo a piena sezione con sfondi massimi pari a 1,0 m.
- b) Prerivestimento. È costituito da uno strato di 30 cm di spritz beton fibrorinforzato o armato con rete elettrosaldada (5 cm prespritz + 25 cm) e da 1 centina metallica HEB140 con interasse 1,0 m.

Non si prevede il getto dei rivestimenti definitivi in quanto si tratta di una configurazione temporanea che andrà poi allargata.

Una volta raggiunta la geometria della sezione Intermedia, si prevede lo scavo dei restanti 10,60 m della camera di dissipazione con le seguenti fasi esecutive:

- a) Scavo. Scavo a piena sezione con sfondi massimi pari a 1,0 m.
- b) Prerivestimento. È costituito da uno strato di 25 cm di spritz beton fibrorinforzato o armato con rete elettrosaldada (5 cm prespritz + 20 cm) e da 2 centine metalliche IPE160 con interasse 1,0 m.

Anche qui, non si prevede il getto dei rivestimenti definitivi in quanto si tratta di una configurazione temporanea che andrà poi allargata.

La Figura 7.4 riporta la schematizzazione della sezione tipo Intermedia.

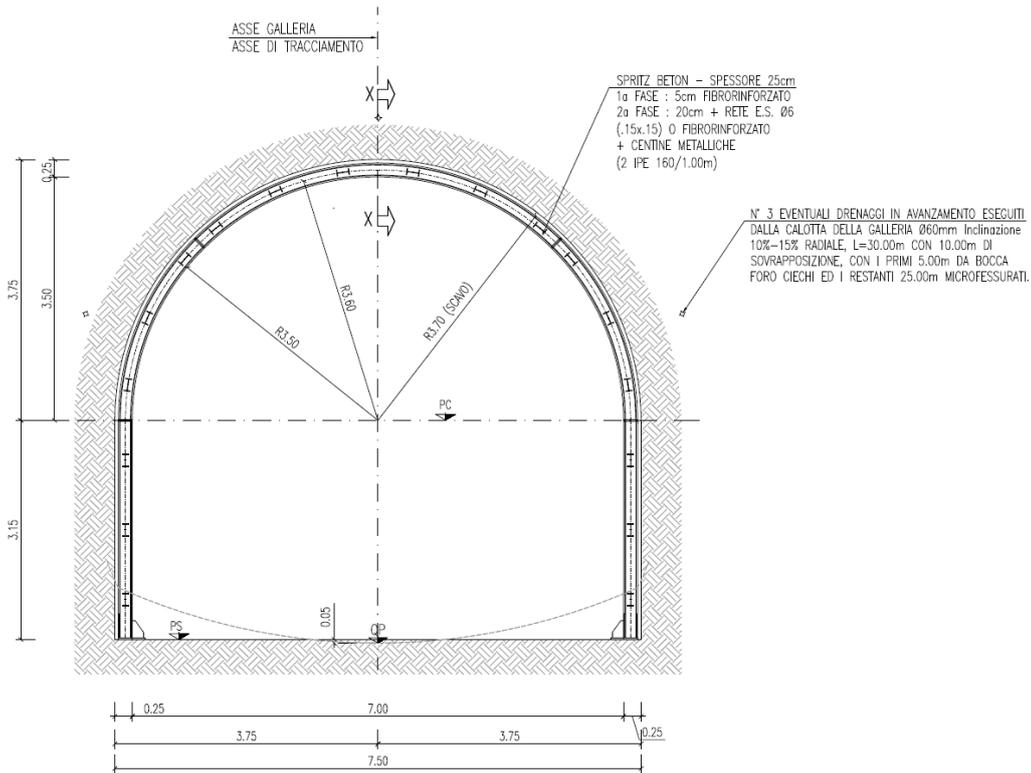


Figura 7.4 – Camera di dissipazione – Sezione tipo Intermedia

Una volta completata la sezione Intermedia si procederà a ritroso allargando la camera di dissipazione fino ad ottenere la sua geometria finale tramite la sezione tipo B0d.

Le fasi realizzative sono le seguenti:

- Consolidamento contorno di scavo. Si prevede il consolidamento del contorno di scavo tramite una chiodatura radiale costituita da da 6-5 chiodi Swellex Mn16 di lunghezza variabile tra 6,50 m e 10,50 m a seconda della posizione, posti sfalsati e spazati longitudinalmente 1,50 m.
- Scavo. Scavo di allargo con sfondi massimi pari a 1,0 m.
- Prerivestimento. È costituito da uno strato di 30 cm di spritz beton fibrorinforzato o armato con rete elettrosaldata (5 cm prespritz + 25 cm) e da 2 centine metalliche IPE180 con interasse 1,0 m.
- Muretta e arco rovescio. Rappresentano la prima parte del rivestimento definitivo messa in opera e vengono gettate ad una distanza dal fronte non vincolata ma che dovrà essere regolata in funzione della risposta deformativa dell'ammasso; lo spessore dell'arco rovescio è pari a 0,80 m ed entrambe le membrature sono interamente armate.
- Rivestimento definitivo. Viene gettato il rivestimento definitivo ad una distanza dal fronte non vincolata ma che dovrà essere regolata in funzione della risposta deformativa dell'ammasso. Ha uno spessore in calotta pari a 0,70 m. Il getto, tutto armato, verrà eseguito con l'ausilio di lastre prefabbricate tralicciate che fungono da cassero a perdere.

La Figura 7.5 Figura 7.2 riporta la schematizzazione della sezione tipo B0d.

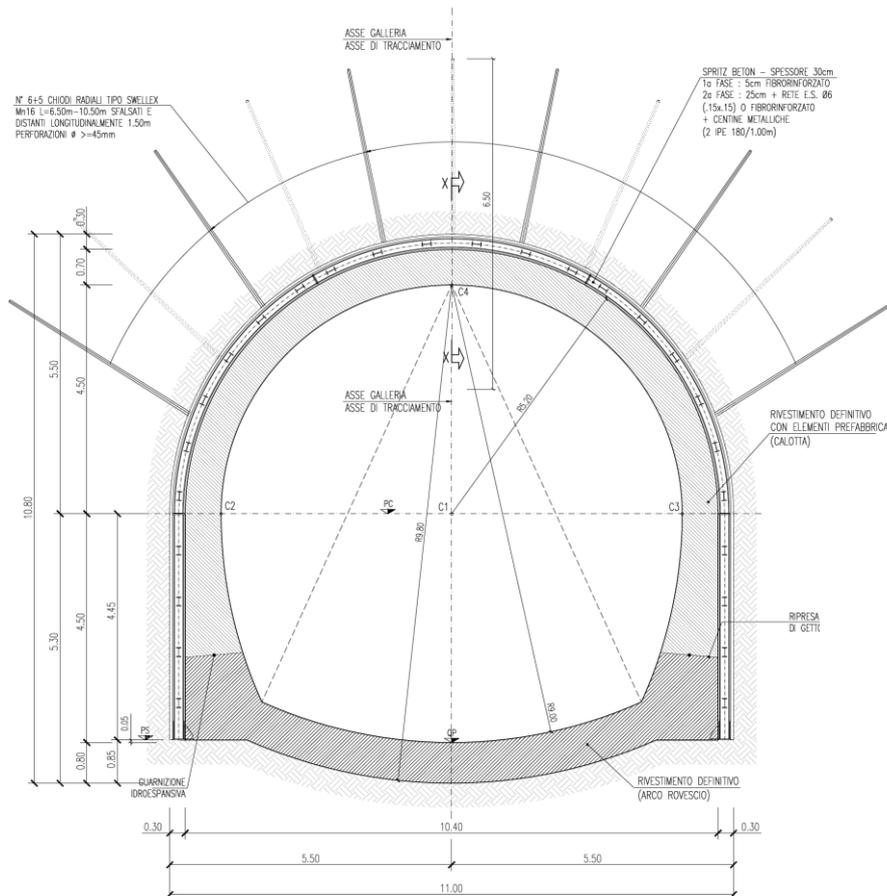
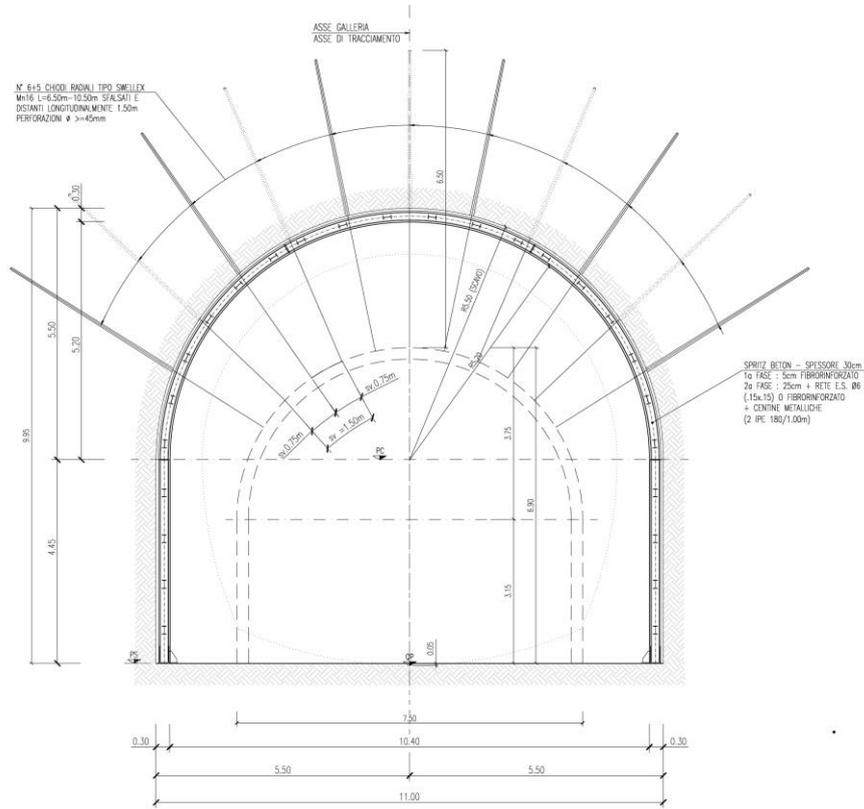


Figura 7.5 - Camera di dissipazione - Sezione tipo B0D



8. MODALITA' DI ANALISI DEL COMPORTAMENTO TENSO-DEFORMATIVO DELLA GALLERIA DI COLLEGAMENTO E DELLA CAMERA DI DISSIPAZIONE

8.1 Sviluppo della galleria e tratte omogenee

La galleria scolmatrice ha un'estensione di 538.85 m, di cui i primi 16.60 m costituiscono la futura camera di dissipazione. La galleria attraversa per tutto il suo sviluppo la formazione delle Argilliti di Montanesi, con una copertura, misurata dalla calotta, pari a 10 m sulla camera di dissipazione e variabile tra 5 e 75 m lungo lo sviluppo della restante parte di galleria naturale, con un valore medio di 50 m.

L'applicazione delle sezioni tipo di avanzamento lungo la galleria è stata fatta tenendo conto delle condizioni geomeccaniche previste per l'ammasso roccioso. Mentre nella camera di dissipazione è applicata la sola sezione tipo B0d, nella galleria scolmatrice in linea di principio le sezioni tipo B0c e B0Vc sono prevalenti e vengono impiegate per oltre l'80% del tracciato, mentre la sezione tipo A0c è prevista nel 9% dell'estensione della galleria, per le zone ove un ridotto grado di fratturazione rende possibile il sostegno del perimetro di scavo col solo spritz-beton e chiodature radiali, senza il ricorso alle centine metalliche.

La sezione con infilaggi verrà inoltre applicata, per un tratto di 2 campi pari a 18 m, in corrispondenza dell'imbocco della galleria lato valle da cui l'opera in sotterraneo verrà attaccata, in quanto in tale zona si incontrerà la facies più alterata e fratturata delle Argilliti di Montanesi.

8.2 Scelta delle sezioni di analisi

Sulla base della distribuzione delle sezioni tipo lungo la galleria, per le sezioni tipo di avanzamento più ricorrenti sono state individuate le condizioni geometriche e geomeccaniche di analisi.

La sezione tipo B0c è stata analizzata con una copertura media di 50 m in presenza di un indice GSI pari a 30, che si riferisce alle condizioni medie delle Argilliti di Montanesi. Al di sopra della calotta sono presenti circa 30 m di AMT sormontati da altri 20 m suddivisi in 15 m dell'unità AMTa e 5 m di coltre detritica.

La sezione tipo B0Vc è stata analizzata considerando la pk 150, ove la galleria sperimenta una locale riduzione della copertura dovuta alla presenza di un intaglio vallivo. In questa zona la copertura scende ad un valore minimo di 20 m. Il sondaggio S02 realizzato a limitata distanza dall'asse della galleria sembra escludere la possibilità che la porzione alterata (AMTa) delle Argilliti possa interessare la sezione di scavo. Ciò nonostante, nell'analisi, allo scopo di esaminare una situazione a favore di sicurezza, si considera l'ipotesi che la formazione AMTa giunga a lambire la calotta della galleria, e che la formazione AMT che interessa la restante parte della sezione di scavo presenti un indice GSI più scadente, pari a 25. Lungo il profilo della galleria la sezione B0Vc è prevista anche in presenza di coperture litostatiche maggiori, ma si è ritenuta dimensionante la sezione posta a pk 150m in virtù della presenza di un ammasso roccioso di qualità particolarmente scadente (GSI=25) con la possibilità che il contatto AMT/AMTa si abbassi a lambire la calotta della galleria.

La sezione tipo A0c è stata analizzata con una copertura media di 60 m in presenza di un indice GSI pari



a 35, che si riferisce alla porzione meno fratturata delle Argilliti di Montanesi. Al di sopra della calotta sono presenti circa 50 m di AMT sormontati da altri 10 m suddivisi in 8 m dell'unità AMTa e 2 m di coltre detritica.

La sezione B0d della camera di dissipazione è stata calcolata per una copertura di 10 m sulla calotta ed un indice GSI pari a 30, rappresentativo delle condizioni geomeccaniche medie dell'unità AMT, che la interessa per tutto il suo sviluppo. In questo caso al di sopra della calotta sono presenti circa 5 m di AMT sormontati da altri 5 m dell'unità AMTa.

La seguente tabella riassume le caratteristiche geomeccaniche assegnate alle diverse unità litologiche nei modelli di analisi. Si riassumono sia i parametri caratteristici dell'involuppo di Hoek-Brown, utilizzati nei calcoli tenso-deformativi delle sezioni di scavo, sia i parametri dell'involuppo di Mohr-Coulomb, derivati dalla linearizzazione del precedente rispettivamente alla copertura ed all'origine.

	Analisi A - galleria	Analisi B - galleria	Analisi C - galleria	Analisi D - camera di dissipazione
Formazione al fronte di scavo	AMT	AMTa - AMT	AMT	AMT
Copertura sulla calotta - m	50	20	60	10
Sezione tipo	B0c	B0Vc	A0c	B0d
γ - kN/m ³	27	25 - 27	27	27
Involuppo di Hoek-Brown				
GSI	30	22 (AMTa) - 25 (AMT)	35	30
m_i	6	5 (AMTa) - 6 (AMT)	6	6
σ_{ci} - MPa	15	4 (AMTa) - 15 (AMT)	15	15
E - MPa	1200	350 (AMTa) - 900 (AMT)	1600	1200
ν - (-)	0.20	0.25	0.20	0.20
Involuppo di Mohr-Coulomb - Parametri alla copertura				
c_c - kPa	180	25 (AMTa) - 90 (AMT)	250	100
ϕ_c - (°)	31	25 (AMTa) - 36 (AMT)	30	38
Involuppo di Mohr-Coulomb - Parametri all'origine				
c_o - kPa	38	0 (AMTa)	45	34

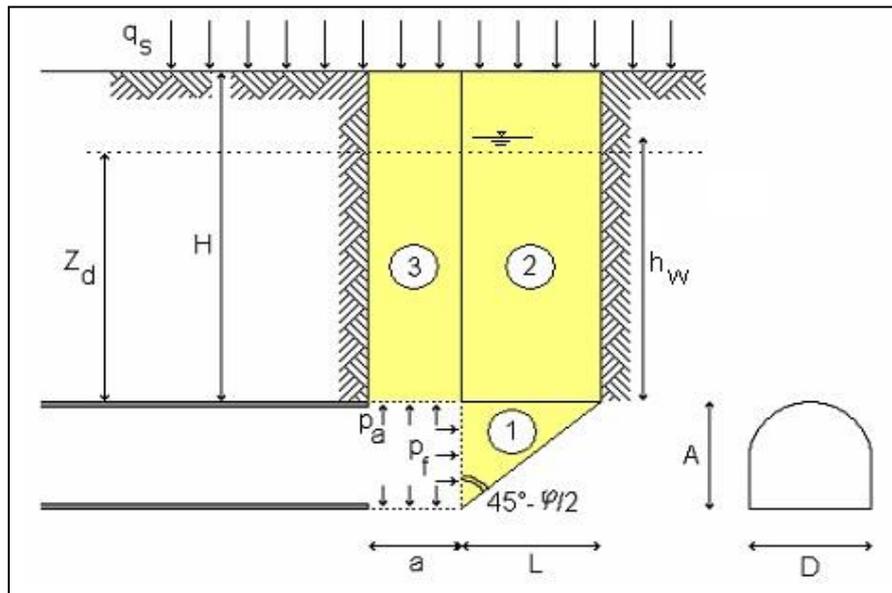


$\phi_0 - (^{\circ})$	45	35 (AMTa)	50	50
-----------------------	----	-----------	----	----

8.3 Analisi di stabilità con il metodo di Tamez

La stabilità del fronte di scavo in avanzamento è stata valutata utilizzando il metodo proposto da Tamez et al. nel 1997.

Il metodo impiega l'equilibrio limite e valuta la stabilità locale del fronte e della chiave, ovvero del tratto di cavo non sostenuto tra fronte e priverivestimento già eseguito, nonché la stabilità globale del cinematismo considerato, proposto nel seguente schema:



Il metodo tiene conto della presenza della falda freatica schematizzando le condizioni idrauliche che potranno interessare il fronte e la chiave. Consente inoltre di tenere conto dell'effetto dei presostegni tanto al fronte quanto in chiave, mediante l'applicazione di pressioni distribuite equivalenti. Per quanto riguarda i parametri di resistenza dell'ammasso roccioso, si è fatto riferimento alle caratteristiche di resistenza all'origine, valutate cioè in presenza di una tensione di confinamento σ_3 tendente a zero, per tenere conto dello scarico tensionale indotto dallo scavo in prossimità del fronte di avanzamento.

Il programma fornisce 3 fattori di sicurezza relativamente a:

- stabilità del fronte di avanzamento, con riferimento al cuneo 1;
- stabilità della chiave (lunghezza libera di avanzamento), con riferimento al prisma 2;
- stabilità globale, con riferimento all'insieme dei prismi 1,2 e 3.

Il programma è stato ricavato dalla pubblicazione di Tamez et al. (1997) e trasferito in ambiente Excel, da cui si è ricavata la forma grafica che riassume per la sezione esaminata sia i dati di input sia i risultati in assenza e presenza degli interventi di stabilizzazione.

L'analisi viene realizzata sia con l'approccio tradizionale, ovvero adottando i parametri geotecnici propri dell'ammasso roccioso in esame, sia in riferimento alle NTC 2018. In tal senso, in analogia con le opere



geotecniche il cui comportamento è influenzato in maniera significativa dall'interazione terreno-struttura (Sciotti, 2010), si è fatto riferimento all'Approccio 1, analizzando lo stato limite GEO con la combinazione 2 che prevede la riduzione dei parametri di resistenza del terreno tramite i coefficienti parziali M2. A valle dell'analisi allo stato limite GEO, dunque, il fattore di sicurezza globale R2 dovrà essere almeno pari all'unità.

La scelta di applicare la riduzione dei parametri del terreno per l'applicazione dell'analisi all'equilibrio limite adottato nel metodo di Tamez è differente da quanto indicato per le analisi tenso-deformative, in cui l'analisi di interazione è stata realizzata con i parametri caratteristici del terreno. Tale differenza nasce dalla necessità di garantire una descrizione realistica dello stato tensionale al contorno del cavo e negli elementi strutturali nelle analisi agli elementi finiti, vista la forte dipendenza dell'analisi dai rapporti di rigidità terreno-struttura.

8.4 Analisi tenso-deformativa agli elementi finiti

L'analisi del comportamento tenso-deformativo atteso per le diverse sezioni tipo è stata svolta con modelli agli elementi finiti in campo di deformazioni piano, adottando il codice di calcolo Phase 2 del pacchetto Rocscience.

Per ciascuna di queste sezioni, il modello numerico si estende dalla superficie topografica fino al di sotto della posizione della galleria; l'estensione verticale e orizzontale del modello è stata calibrata sulla base delle dimensioni di scavo al fine di limitare gli effetti di bordo.

In assenza di determinazioni specifiche, si è adottato un coefficiente di spinta k_0 pari a 1 per le sezioni a copertura superiore ai 5 diametri, pari a 0.50 per quelle a minore copertura.

Dal momento che lo scavo di una galleria è un processo spiccatamente tridimensionale, al fine di simulare nel modello piano l'avanzamento del cavo, si sostituisce al terreno inscritto nella cavità una pressione distribuita equivalente, che viene via via abbattuta per simulare il processo di detensionamento dell'ammasso roccioso indotto dal progressivo avvicinamento, superamento e successivo allontanamento del fronte dalla sezione di analisi.

L'analisi è stata realizzata in modo duplice:

- Analisi 1: il completo rilascio del cavo agisce sulla galleria in presenza dei soli priverivestimenti, in questo modo si tiene conto della distanza non vincolata di getto dei rivestimenti definitivi rispetto al fronte;
- Analisi 2: l'ultima aliquota di rilassamento del cavo insiste sulla galleria in presenza dei rivestimenti definitivi. Il priverivestimento nel lungo termine viene disattivato, nell'ipotesi che questo non partecipi all'azione di contenimento offerta dai rivestimenti definitivi.

L'analisi 1 è quella rispetto alla quale si procede al dimensionamento strutturale dei priverivestimenti, mentre con l'analisi 2 si verifica l'adeguatezza dei rivestimenti definitivi.

Le percentuali di detensionamento utilizzate nelle due analisi sono indicate nella seguente tabella:



Analisi 1	
Fase di calcolo	Percentuale di detensionamento
1_ iniziale	0 %
2_ fronte	30 %
3_ posa prerivestimento	70 %
4_ completo detensionamento	100 %
Analisi 2	
1_ iniziale	0 %
2_ fronte	30 %
3_ posa prerivestimento	70 %
4_ getto arco rovescio e murette	95 %
5_ getto rivestimento definitivo in calotta	100 %
6_ disattivazione prerivestimento	100 %
7a_sisma con k_v verso l'alto	100 %
7b_sisma con k_v verso il basso	100 %

Il detensionamento assegnato alla fase 3 deriva dalla curva di Panet, che per una lunghezza libera di avanzamento di 1-3 m indica un rilascio del cavo del 75-85%. Tenendo conto che la teoria di Panet si riferisce ad un cavo libero non sostenuto, che non risente quindi dell'irrigidimento offerto dai prerivestimenti già messi in opera e dagli eventuali preconsolidamenti in avanzamento, si è limitato tale valore al 70%, per garantire una maggiore cautelatività nel dimensionamento dei prerivestimenti.

Le percentuali di detensionamento assegnate alle fasi 4 e 5 tengono conto della distanza di posa dei rivestimenti definitivi rispetto al fronte di scavo, che non è vincolata. Tali percentuali sono cautelative e consentono di sovrastimare i carichi effettivamente agenti sul rivestimento definitivo, che verrà messo in opera solo dopo il termine dello scavo dell'intera galleria di collegamento.

Nel corso della fase 6 si ipotizza che nel lungo termine l'azione resistente offerta dal prerivestimento venga meno, trasferendo in toto i carichi sul rivestimento definitivo.

Per quanto riguarda le fasi 7a e 7b si faccia riferimento al seguente paragrafo 8.7.

All'ammasso oggetto di scavo è stata assegnata una legge di comportamento Hoek-Brown, assegnando i parametri indicati nel precedente paragrafo 8.2.

Tutti i parametri geotecnici implementati nei modelli di calcolo sono caratteristici, l'analisi proposta è dunque ascrivibile all'approccio A1+M1 da normativa. Infatti, vista la spiccata non linearità del comportamento del terreno, l'adozione di parametri geotecnici ridotti per tener conto dei coefficienti parziali di sicurezza potrebbe portare a risultati molto lontani dal reale comportamento tenso-deformativo dell'ammasso.



Questo approccio è in pieno accordo con quanto dichiarato nelle NTC 2018: "Le verifiche strutturali degli elementi di rinforzo, in avanzamento dal fronte e sulle pareti di scavo, e delle strutture di rivestimento, di prima fase e definitive, devono essere eseguite come specificato al § 6.2.4.1.3, utilizzando i valori caratteristici dei parametri geotecnici". E nel citato paragrafo § 6.2.4.1.3: "Le analisi finalizzate al dimensionamento strutturale nelle quali si consideri l'interazione terreno-struttura si eseguono con i valori caratteristici dei parametri geotecnici, amplificando l'effetto delle azioni con i coefficienti parziali del gruppo A1".

8.5 Influenza della falda freatica

La galleria interessa per tutto il suo sviluppo un ammasso costituito da argilliti fissili con indice RQD variabile localmente da medio a alto. La permeabilità dell'ammasso è direttamente correlata all'RQD, trattandosi di una permeabilità per fratturazione.

Durante la costruzione

Lo scavo impone al contorno una condizione di pressione dell'acqua pari a quella atmosferica. La rigidità dell'ammasso stabilisce rapidamente una condizione di flusso: la pressione dell'acqua risulta quindi molto ridotta in una fascia di roccia intorno al cavo sufficientemente estesa da non alterare lo stato di sollecitazione al cavo.

Durante la costruzione ci si può attendere una condizione di umidità diffusa delle pareti con locali stillicidi di scavo, con stillicidi variamente intensi e diffusi.

A lungo termine

Con la posa del rivestimento definitivo e la chiusura della sezione, l'acqua che potrà accumularsi a tergo del rivestimento si muoverà longitudinalmente al cavo lungo la superficie di contatto tra l'ammasso roccioso ed i rivestimenti. L'assenza di un sistema di impermeabilizzazione fa sì che l'acqua non venga drenata e che possa eventualmente infiltrarsi lungo le riprese di getto dei rivestimenti definitivi, senza per questo inficiare il normale funzionamento delle opere in progetto. Questo effetto di infiltrazione, tra l'altro, riduce i carichi idraulici che in caso contrario si potrebbero accumulare a tergo dei rivestimenti definitivi.

8.6 Modalità di esecuzione delle verifiche strutturali

Gli elementi strutturali componenti il priverivestimento ed il rivestimento definitivo sono stati analizzati come di seguito descritto al fine di valutare il tasso di sollecitazione a cui sono sottoposti in tutte le fasi di calcolo, verificando la compatibilità con la normativa.

Le forze agenti in termini di momento flettente M, sforzo normale N e taglio V sono stati ottenuti con il programma Phase 2D, imponendo i parametri geotecnici caratteristici dell'ammasso roccioso. Le sollecitazioni derivanti dal modello verranno poi amplificate mediante opportuni coefficienti di sicurezza parziali in relazione allo Stato Limite di riferimento.

8.6.1 Priverivestimento



Il priverivestimento è stato modellato nel calcolo agli elementi finiti con elementi plate a cui sono state assegnate caratteristiche di deformabilità equivalenti che tengono conto dell'accoppiamento delle centine con lo spritz-beton fibrorinforzato.

La verifica strutturale dei priverivestimenti è stata realizzata ripartendo le sollecitazioni ricavate dal modello tra i due elementi costituenti il priverivestimento, ossia centine e spritz-beton. Questo è stato fatto in funzione delle loro rigidezze, così come indicato da Carranza Torres & Diederichs (2009).

Il primo passo per comprendere in quali proporzioni si distribuiscano le sollecitazioni nelle due componenti del sostegno composito, è la valutazione dei coefficienti di compressibilità e flessibilità per le centine e per il calcestruzzo proiettato, nell'ipotesi di condizione di deformazione piana.

Nel caso delle centine:

$$D_{cent} = \frac{E_{cent} \cdot A_{cent}}{1 - \nu_{cent}^2} \quad K_{cent} = \frac{E_{cent} \cdot I_{cent}}{1 - \nu_{cent}^2}$$

Per quanto riguarda il calcestruzzo proiettato:

$$D_{cls} = \frac{E_{cls} \cdot A_{cls}}{1 - \nu_{cls}^2} \quad K_{cls} = \frac{E_{cls} \cdot I_{cls}}{1 - \nu_{cls}^2}$$

dove:

E = modulo elastico dell'acciaio o dello spritz-beton

A = area delle centine o dello spritz-beton

I = momento d'inerzia delle centine o dello spritz-beton

ν = modulo di Poisson delle centine o dello spritz-beton

Sulla base di tali coefficienti è possibile ridistribuire gli sforzi ottenuti dal programma sui due elementi costituenti il priverivestimento nel modo seguente:

Momento flettente

Centine:
$$M_{cent} = \frac{M \cdot K_{cent}}{n(K_{cent} + K_{cls})}$$

Calcestruzzo proiettato:
$$M_{cls} = \frac{M \cdot K_{cls}}{n(K_{cent} + K_{cls})}$$

Sforzo normale

Centine:
$$N_{cent} = \frac{N \cdot D_{cent}}{n(D_{cent} + D_{cls})} + \frac{M(D_{cls} K_{cent} - D_{cent} K_{cls})}{nR(D_{cent} + D_{cls})(K_{cent} + K_{cls})}$$

Calcestr. proiett.:
$$N_{cls} = \frac{N \cdot D_{cls}}{n(D_{cent} + D_{cls})} + \frac{M(D_{cls} K_{cent} - D_{cent} K_{cls})}{nR(D_{cent} + D_{cls})(K_{cent} + K_{cls})}$$

Taglio



$$\text{Centine: } V_{cent} = \frac{V \cdot K_{cent}}{n(K_{cent} + K_{cls})}$$

$$\text{Calcestruzzo proiettato: } V_{cls} = \frac{V \cdot K_{cls}}{n(K_{cent} + K_{cls})}$$

In cui n è il numero di centine in un metro lineare di galleria ed R è il raggio equivalente della galleria.

Con le sollecitazioni così ottenute sui due elementi vengono quindi svolte le verifiche strutturali, confrontando tali sollecitazioni con le resistenze di progetto dei materiali.

Tale confronto viene sviluppato in forma grafica, definendo i domini di resistenza N-M e V-N, distinguendo tra le centine e lo spritz-beton.

Le resistenze dei materiali sono calcolate nel modo seguente.

Dominio di resistenza N-M

La massima tensione di compressione e trazione accettabile è pari a:

$$\frac{\sigma_{max}}{FS} = \frac{N}{A} + \frac{Mt}{2I} \quad \frac{\sigma_{min}}{FS} = \frac{N}{A} - \frac{Mt}{2I}$$

Considerando un momento flettente nullo, si ottiene l'espressione per la stima della massima e minima forza normale che non comporta un superamento della resistenza del supporto:

$$N_{max} = \frac{A \cdot \sigma_{max}}{FS} \quad N_{min} = \frac{A \cdot \sigma_{min}}{FS}$$

Il massimo momento flettente agisce invece quando si verifica un simultaneo superamento della resistenza a trazione e compressione, ovvero:

$$M_{max} = \pm \left(\frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{FS} \right) \frac{I}{t}$$

a cui corrisponde una

$$N_{cr} = \frac{A \cdot (\sigma_{max} + \sigma_{min})}{FS}$$

Si ricava quindi il dominio resistente sia per le centine che per lo spritz-beton adottando a seconda dei casi le relative caratteristiche geometriche e di resistenza.

Dominio di resistenza N-V

Si vuole ora definire una correlazione fra la sollecitazione di taglio e quella di sforzo normale. Ricordiamo che:

$$\sigma_{max} = \frac{N_{max}}{A}$$

$$\tau_{max} = \frac{3V}{2A}$$

Dai cerchi di Mohr:



$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma_{\max}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\max}}{2}\right)^2 + \tau_{\max}^2}$$

$$FS = \frac{\sigma_c}{\sigma_1} = \frac{\sigma_t}{\sigma_3}$$

Il fattore di sicurezza può essere inoltre definito come:

Di conseguenza, accorpendo le precedenti equazioni, si ottengono per le resistenze a compressione e trazione rispettivamente:

$$N = \frac{\sigma_c \cdot A}{FS} - \frac{9V^2 \cdot FS}{4\sigma_c \cdot A}$$

$$N = \frac{\sigma_t \cdot A}{FS} - \frac{9V^2 \cdot FS}{4\sigma_t \cdot A}$$

Il valore critico di taglio a cui si verificano nello stesso tempo il collasso in compressione e trazione è pari a:

$$V_{cr} = \pm \frac{A}{FS} \cdot \sqrt{-\frac{4 \cdot \sigma_c \cdot \sigma_t}{9}}$$

Si ricava quindi il dominio resistente sia per le centine che per lo spritz-beton adottando a seconda dei casi le relative caratteristiche geometriche e di resistenza.

Le verifiche sul priverivestimento si forniscono quindi in forma grafica distinguendo tra le centine e lo spritz-beton. Entrambe le verifiche sono condotte al termine del detensionamento, in presenza dei soli priverivestimenti.

Le verifiche proposte fanno riferimento allo Stato Limite Ultimo e richiedono quindi, in accordo con il paragrafo 6.2.4.1.3. delle NTC 2018, una amplificazione delle azioni secondo i coefficienti A1. Tale amplificazione è stata tenuta in conto nella definizione del dominio di resistenza degli elementi resistenti, imponendo un FS pari ad 1.3.

8.6.2 Rivestimento definitivo

Il rivestimento definitivo è stato modellato nel calcolo agli elementi finiti con elementi plate a cui sono state assegnate le caratteristiche di deformabilità proprie del calcestruzzo gettato in opera e spessori variabili in relazione alle diverse parti che compongono il getto (calotta, murette, arco rovescio). I diversi elementi plate sono stati attivati in fasi diverse, come indicato nella sequenza di calcolo 2, per tenere conto di una prima fase di getto delle murette e dell'arco rovescio, ed una fase di completamento in cui viene gettata in opera la calotta.

Quanto alle riprese di getto, come suggerito nelle Linee guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale e per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo indurito mediante prove non distruttive (febbraio 2008), ad opera del C.S.L.P., è necessario che la superficie del getto su cui si prevede la ripresa, sia lasciata quanto più possibile corrugata, alternativamente la superficie deve essere scalfita (e pulita dai detriti), in modo da migliorare l'adesione con il getto successivo. A tale obiettivo concorre anche la specifica geometria delle riprese di getto indicate negli elaborati progettuali, che risultano orientate su piani ortogonali alla direzione dei flussi di compressione che si destano poi nella struttura in



servizio. Nell'ipotesi in cui queste condizioni siano garantite in cantiere, è possibile prevedere che l'intera struttura del rivestimento definitivo garantisca la piena continuità strutturale, nonostante la presenza delle riprese di getto, e si comporti quindi come una struttura monolitica.

Verifiche tensionali delle sezioni in solo calcestruzzo

Si determina innanzitutto lo stato tensionale della sezione per verificare qualora e dove il rivestimento necessiti di essere armato. Con riferimento al paragrafo 4.1.11.1 delle NTC2018, per una sezione rettangolare di lati a e b la verifica deve essere realizzata allo SLU avendo cura di verificare che:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd}$$

$$V_{Ed} \leq V_{Rd}$$

Dove N_{Ed} e V_{Ed} sono le azioni di progetto, mentre N_{Rd} e V_{Rd} sono le resistenze disponibili nella direzione a , valutate come descritto di seguito.

$$N_{Rd} = f_{cd} \cdot b \cdot x$$

$$V_{Rd} = \frac{f_{cvd} \cdot b \cdot x}{1.50}$$

Dove:

$$x = a - 2e;$$

e = eccentricità del carico nella direzione a ;

$$f_{cvd} = \begin{cases} \sqrt{(f_{ct1d}^2 + \sigma_c \cdot f_{ct1d})} & \text{se } \sigma_c \leq \sigma_{clim} \\ \sqrt{\left(f_{ct1d}^2 + \sigma_c \cdot f_{ct1d} - \frac{\delta^2}{4}\right)} & \text{se } \sigma_c > \sigma_{clim} \end{cases}$$

$$\delta = \sigma_c - \sigma_{clim}$$

$$\sigma_c = \frac{N_{Ed}}{b \cdot x}$$

$$\sigma_{clim} = f_{cd} - 2 \cdot \sqrt{(f_{ct1d}^2 + f_{cd} \cdot f_{ct1d})}$$

Qualora le sezioni non dovessero rispettare queste limitazioni, è necessario predisporre un'opportuna armatura dimensionata in modo tale da garantire la sicurezza nei confronti dello stato limite ultimo e di esercizio.

Verifiche agli stati limite per le sezioni in calcestruzzo armato

Le verifiche di sicurezza agli stati limite sono condotte con il Metodo dei coefficienti parziali: in tutte le situazioni progettuali significative, si verifica che gli stati limite non siano superati quando i valori di progetto delle azioni, delle proprietà del materiale e dei dati geometrici siano introdotti nei modelli strutturali e di carico impiegati.

Si fa riferimento in particolare l'approccio A1-M1-R1: i parametri di resistenza dei materiali sono introdotti



nei modelli con i loro valori caratteristici; Le sollecitazioni nelle sezioni sono introdotte con i valori non amplificati per le verifiche in esercizio e i valori amplificati per il coefficiente 1.3 per le verifiche allo stato limite ultimo.

I coefficienti di sicurezza parziali per le sezioni in cemento armato sono:

$\gamma_{cls} = 1.50$ coefficiente relativo al calcestruzzo;

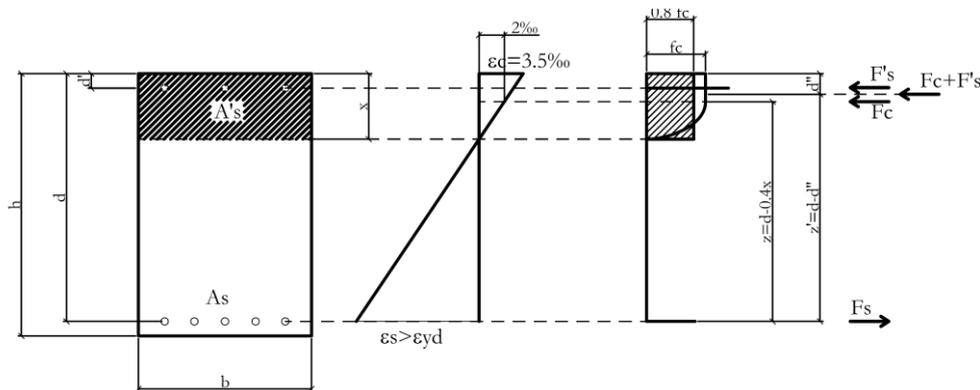
$\gamma_s = 1.15$ coefficiente relativo all'acciaio per calcestruzzo armato.

Verifiche allo stato limite ultimo a flessione

Le verifiche a flessione controlleranno che, per ogni elemento, risulti:

$$M_{Sd} < M_{Rd}$$

ossia che il momento sollecitante ultimo risulti minore del momento resistente della sezione stessa.



Partendo dalle prescrizioni contenute nell'Eurocodice 2 e nel Testo Unitario, il calcolo del momento resistente delle sezioni è stato eseguito secondo il modello seguente:

Momento resistente:
$$M_{RD} = F_S \cdot (d - d'')$$

dove d'' viene valutato come:
$$d'' = \frac{F'_S \cdot d' + F_c \cdot 0.4 \cdot x}{F_C + F'_S}$$

F's:
$$F'_S = f_{yd} \cdot A'_S$$

Fs:
$$F_S = f_{yd} \cdot A_S$$

Fc:
$$F_C = 0.8 \cdot f_c \cdot b \cdot x$$

Verifiche allo stato limite ultimo a taglio

Secondo le prescrizioni contenute nella normativa nazionale, l'armatura a taglio è disposta in tutti gli elementi dove il taglio sollecitante V_{Sd} risulta essere maggiore di un valore di riferimento fissato dalla norma ($V_{Rd,1}$) ovvero se:

$$V_{Sd} > V_{Rd,1}$$



dove $V_{Rd,1}$ è definito come:

$$= \left\{ 0.18 \cdot k \cdot \frac{(100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{1/3}}{\gamma_c} + 0.15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b_w \cdot d \geq (v_{\min} + 0.15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$$

con:

$$k = 1 + (200/d)^{1/2} \leq 2;$$

$$v_{\min} = 0.035k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2};$$

ρ = percentuale d'armatura di trazione $A_s/(b_w \cdot d) \leq 0.02$;

σ_{cp} = sforzo assiale di compressione $N_{Ed}/A_c \leq 0.2 \cdot f_{cd}$;

d = altezza utile della sezione;

b_w = larghezza minima della sezione.

Ogni qualvolta il taglio sollecitante risulti essere maggiore di $V_{Rd,1}$ si dovrà verificare che in ogni sezione risulti essere:

$$V_{Sd} > V_{Rcd}$$

e che la sezione presenti armatura a taglio sufficiente a resistere al taglio sollecitante V_{Sd} :

$$V_{Sd} > V_{Rsd}$$

dove:

$$V_{Rcd} = 0.9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\text{ctg} \alpha + \text{ctg} \vartheta) \cdot \sin \alpha$$

$$V_{Rsd} = 0.9 \cdot b_w \cdot d \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot \frac{(\text{ctg} \alpha + \text{ctg} \vartheta)}{(1 + \text{ctg}^2 \vartheta)}$$

con:

θ = inclinazione dei puntoni di calcestruzzo ($1 \leq \text{ctg} \theta \leq 2.5$);

A_{sw} = area dell'armatura trasversale;

s = interasse tra le armature;

α = angolo di inclinazione dell'armatura rispetto all'asse della trave;

f'_{cd} = resistenza a compressione ridotta del calcestruzzo d'anima ($f'_{cd} \leq 0.5f_{cd}$);

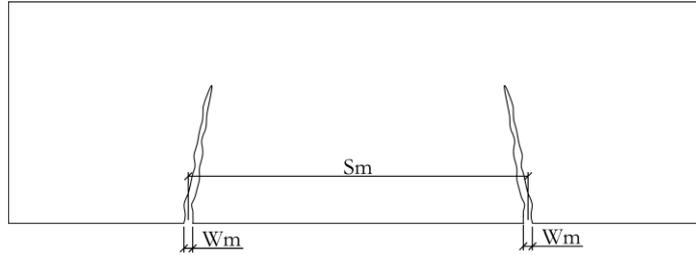
α_c = coefficiente maggiorativo dipendente dalla compressione della membratura.

Verifica a fessurazione

La verifica a fessurazione viene effettuata garantendo che in ogni sezione, sotto la condizione di carico "quasi permanente", l'ampiezza caratteristica delle fessure (w_k) sia minore di 0.3 mm.

L'ampiezza caratteristica delle fessure viene calcolata a partire dall'ampiezza media delle fessure (w_m) secondo la formula:

$$w_k = 1.7 \cdot w_m = 1.7 \cdot s_m \cdot \varepsilon_m$$



dove, l'espressione di s_m in millimetri è:

$$s_m = 50 + 0.25 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \phi / \rho_r$$

con:

k_1 = coefficiente sull'aderenza delle barre (1.6 per barre lisce e 0.8 per barre ad aderenza migliorata);

k_2 = coefficiente dipendente dal tipo di sollecitazione (1 per trazione pura, 0.5 per flessione);

ϕ = diametro delle barre espresso in millimetri;

ρ_r = percentuale d'armatura tesa;

e l'espressione di ε_m , deformazione media delle barre d'acciaio, è:

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_s}{E_s} \left[1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_s} \right)^2 \right]$$

con:

σ_{cr} = tensione di trazione nelle barre di acciaio conseguente all'applicazione del momento di prima fessurazione;

σ_s = tensione di trazione nelle barre d'acciaio in corrispondenza della generica sezione parzializzata;

E_s = modulo di elasticità dell'acciaio;

β_1 = coefficiente sull'aderenza delle barre (0.5 per barre lisce e 1 per barre ad aderenza migliorata);

β_2 = coefficiente sulla durata di applicazione del carico (1 per carichi di breve durata).

Verifica alle tensioni di esercizio

La verifica viene effettuata garantendo che in ogni sezione le tensioni di esercizio risultino inferiori ai limiti di normativa:

- la massima tensione di compressione del calcestruzzo σ_c deve rispettare la limitazione seguente:

$$\sigma_c < 0.60 f_{ck} = 19.2 \text{ MPa per combinazione caratteristica (rara)}$$

$$\sigma_c < 0.45 f_{ck} = 14.4 \text{ MPa per combinazione quasi permanente}$$

- per l'acciaio la tensione massima σ_s , per effetto delle azioni dovute alla combinazione caratteristica (rara) deve rispettare la limitazione seguente:

$$\sigma_s < 0.8 f_{yk} = 360 \text{ MPa}$$



8.7 Analisi sismica

Il comportamento sismico delle strutture in sotterraneo si distingue da quello delle strutture in superficie sia per il confinamento fornito dal terreno al suo contorno, sia per la loro significativa estensione longitudinale rispetto alle dimensioni trasversali.

Sulla base della letteratura disponibile sull'argomento, basata a sua volta su un numero significativo di casi studio, si possono sintetizzare le seguenti osservazioni:

- Le strutture sotterranee subiscono tendenzialmente meno danni di quelle in superficie;
- I danni si riducono ulteriormente con il crescere della profondità, e dunque del confinamento;
- Le gallerie realizzate in materiali sciolti risultano più sensibili al sisma rispetto a quelle realizzate in roccia;
- Il danno eventualmente osservato è direttamente correlabile alla PGA.

Generalmente l'inerzia del terreno confinante la galleria è nettamente superiore a quella del rivestimento definitivo. Per tale motivo, l'analisi sismica di una galleria si può basare su un'analisi free-field delle deformazioni indotte dal sisma nel terreno. L'eventuale interazione con la struttura invece deve essere tenuta in conto laddove il rivestimento risulti rigido rispetto al terreno. La scelta di un approccio free-field o di un'analisi di interazione può essere fatta determinando il rapporto di flessibilità F , così definito:

$$F = \frac{2E_g(1-\nu_r^2)R^3}{E_r(1+\nu_g)t^3}$$

Dove

R = raggio equivalente della galleria, rispetto alla mezzeria del rivestimento definitivo

t = spessore medio del rivestimento

E_g E_r = modulo elastico del terreno (alle piccole deformazioni) e del calcestruzzo

ν_g ν_r = modulo di Poisson del terreno e del calcestruzzo

Nel caso in cui F risulti superiore a 20, il rivestimento si può ritenere sufficientemente flessibile da rendere trascurabile l'interazione terreno-struttura, ovvero vale la soluzione freefield. In tal caso, pertanto, le deformazioni indotte dal sisma nella struttura sono con buona approssimazione le stesse di quelle del terreno.

Nel caso in esame, il rapporto di flessibilità è prossimo a 20 per tutte le sezioni in analisi. In queste condizioni l'interazione terreno-struttura non è trascurabile dal momento che non vi è una significativa differenza tra la deformabilità del rivestimento definitivo e quella degli ammassi rocciosi incassanti. Per tale ragione l'analisi sismica di tutte le sezioni di calcolo è stata eseguita con il modello agli elementi finiti, implementando l'azione sismica con modalità pseudostatica. Tale azione sismica viene imposta in termini di accelerazione al sito, adottando una categoria di sottosuolo B per tutti i litotipi coinvolti, sulla base di quanto affermato nella Relazione Geologica di progetto.

Il coefficiente di amplificazione stratigrafica S_s è pari a 1.20 per la categoria di suolo B, mentre l'amplificazione topografica è posta pari ad 1.



Per il caso in esame l'accelerazione massima orizzontale al sito per lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) risulta quindi pari a:

- $a_{max} = 0.088 \cdot 1.2 \cdot 1 = 0.106 \text{ g}$

I coefficienti sismici orizzontale e verticale utilizzati per le analisi pseudostatiche, considerando l'opera come rigida ossia come opera che non è in grado di subire spostamenti ($\beta=1$), sono proposti nella seguente tabella:

k_h	k_v
0.106	0.053

L'azione sismica è stata applicata per le diverse sezioni di calcolo al termine della sequenza di detensionamento ed in presenza dei rivestimenti definitivi.



9. ANALISI DEL COMPORTAMENTO TENSO-DEFORMATIVO - GALLERIA SCOLMATRICE

9.1 Analisi sezione tipo B0c

La sezione B0c è stata calcolata per una copertura di 50 m sulla calotta ed un indice GSI pari a 30, rappresentativo delle condizioni geomeccaniche medie dell'unità AMT.

9.1.1 Analisi di stabilità con il metodo di Tamez

L'analisi è stata eseguita sia con i parametri caratteristici che secondo l'approccio A2+M2 da normativa. Le schede riassuntive sono proposte nella seguente Figura 9.1.

Ciascuna scheda riassume nella parte superiore le caratteristiche geometriche, geotecniche del terreno, idrauliche di input dell'analisi e lo schema geometrico del cinematiso di rottura analizzato dal metodo di Tamez. Nella parte inferiore, invece, vengono riassunti i risultati dell'analisi, espressi in termini di fattori di sicurezza al fronte, chiave e globale.

Nel caso in esame, come si può osservare, l'analisi dimostra la piena stabilità del fronte, della chiave e dell'intero cinematiso di rottura in assenza di interventi (sezione tipo B0c). I fattori di sicurezza alla plasticizzazione della chiave risultano invece inferiori all'unità, denunciando la possibilità che si venga a creare una fascia di plasticizzazione corticale al contorno.



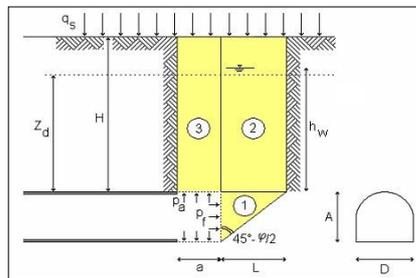
ANALISI DI STABILITA' DI TAMEZ - TABELLE RIEPILOGATIVE

RIASSUNTO DATI DI INGRESSO

GEOMETRIA		
a	lunghezza libera - m	3
A	h galleria - m	3,8
D	largh. galleria - m	4,3
L	estens. longitud. cuneo - m	1,57
H	copertura da calotta - m	50
Z _d	tratto di influenza scavo - m	7,31
S	sezione di scavo - m ²	14,36

TERRENO		
γ	peso di volume - kN/m ³	27
c	coesione - kPa	38
φ	attrito - (°)	45
q _s	sovraccarico - kPa	0

CONDIZIONI IDRAULICHE		
γ _w	peso di volume - kN/m ³	10
α ₁	condizioni di drenaggio	0,4
β	permeab. ammasso	0,9
h _w	carico acqua su calotta (m)	0
	presenza di raggiera drenante in chiave?	no



RIASSUNTO RISULTATI - p_a = 0, p_f = 0

STABILITA' DEL FRONTE		
p _f	pressione al fronte - kPa	0,00
FS _f	fattore di sicurezza	2,4

STABILITA' DELLA CHIAVE		
p _a	pressione applicata in chiave - kPa	0,0
FS _{c pl}	fattore di sicurezza alla plasticizzazione	0,53
p _{a opt}	pressione in chiave per evitare fascia plastica - kPa	1308
FS _c	fattore di sicurezza alla stabilità	1,3

STABILITA' GLOBALE		
FS _g	fattore di sicurezza	1,21

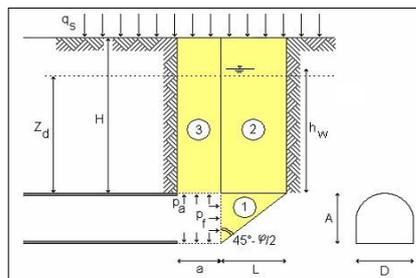
ANALISI DI STABILITA' DI TAMEZ - TABELLE RIEPILOGATIVE

RIASSUNTO DATI DI INGRESSO

GEOMETRIA		
a	lunghezza libera - m	3
A	h galleria - m	3,8
D	largh. galleria - m	4,3
L	estens. longitud. cuneo - m	1,83
H	copertura da calotta - m	50
Z _d	tratto di influenza scavo - m	7,31
S	sezione di scavo - m ²	14,36

TERRENO		
γ	peso di volume - kN/m ³	27
c	coesione - kPa	30,4
φ	attrito - (°)	39
q _s	sovraccarico - kPa	0

CONDIZIONI IDRAULICHE		
γ _w	peso di volume - kN/m ³	10
α ₁	condizioni di drenaggio	0,4
β	permeab. ammasso	0,9
h _w	carico acqua su calotta (m)	0
	presenza di raggiera drenante in chiave?	no



RIASSUNTO RISULTATI - p_a = 0, p_f = 0

STABILITA' DEL FRONTE		
p _f	pressione al fronte - kPa	0,00
FS _f	fattore di sicurezza	2,1

STABILITA' DELLA CHIAVE		
p _a	pressione applicata in chiave - kPa	0,0
FS _{c pl}	fattore di sicurezza alla plasticizzazione	0,56
p _{a opt}	pressione in chiave per evitare fascia plastica - kPa	1306
FS _c	fattore di sicurezza alla stabilità	1,3

STABILITA' GLOBALE		
FS _g	fattore di sicurezza	1,16

Figura 9.1 – Galleria scolmatrice - Sezione B0c - Analisi Tamez con parametri caratteristici (sopra) e ridotti (sotto)



9.1.2 Analisi agli elementi finiti

I risultati dell'analisi vengono proposti con riferimento alla fase 4 dell'analisi 1 ed alla fase 6 dell'analisi 2. La geometria di riferimento è di seguito proposta:

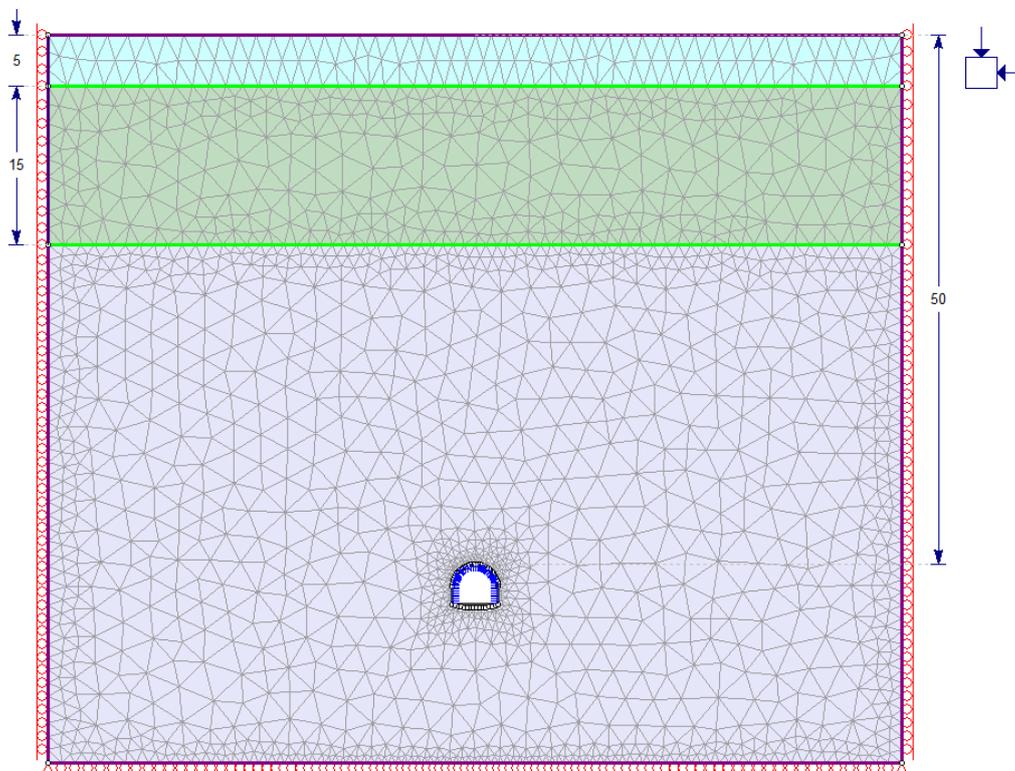


Figura 9.2 – Galleria di collegamento - Sezione B0c – Geometria del modello agli elementi finiti

La seguente Figura 9.3 presenta la distribuzione degli spostamenti radiali al contorno del cavo al termine dell'analisi 1. Come si può osservare, gli spostamenti sono limitati e dovuti a deformazioni in campo quasi completamente elastico al contorno del cavo. Gli spostamenti sono compresi tra 2 e 5 mm.

Le zone plastiche al contorno del cavo sono limitate alla parte centrale dei piedritti ed al fondo scavo, si veda a riguardo la seguente Figura 9.4 che descrive la distribuzione delle tensioni principali e dei punti plastici al contorno del cavo.

Le sollecitazioni agenti sui priverestimenti sono ridotte, Figura 9.5, e garantiscono elevati fattori di sicurezza rispetto ai limiti di resistenza dei materiali, Figura 9.6.

Per quanto riguarda i rivestimenti definitivi, nelle seguenti Figura 9.8, Figura 9.9, Figura 9.10 è proposta la distribuzione delle sollecitazioni agenti sugli stessi, e la seguente tabella di Figura 9.7 riassume le verifiche strutturali eseguite nell'ipotesi in cui il rivestimento definitivo sia privo di armatura. Come si può vedere, tutte le verifiche sono pienamente soddisfatte anche in assenza di armatura.

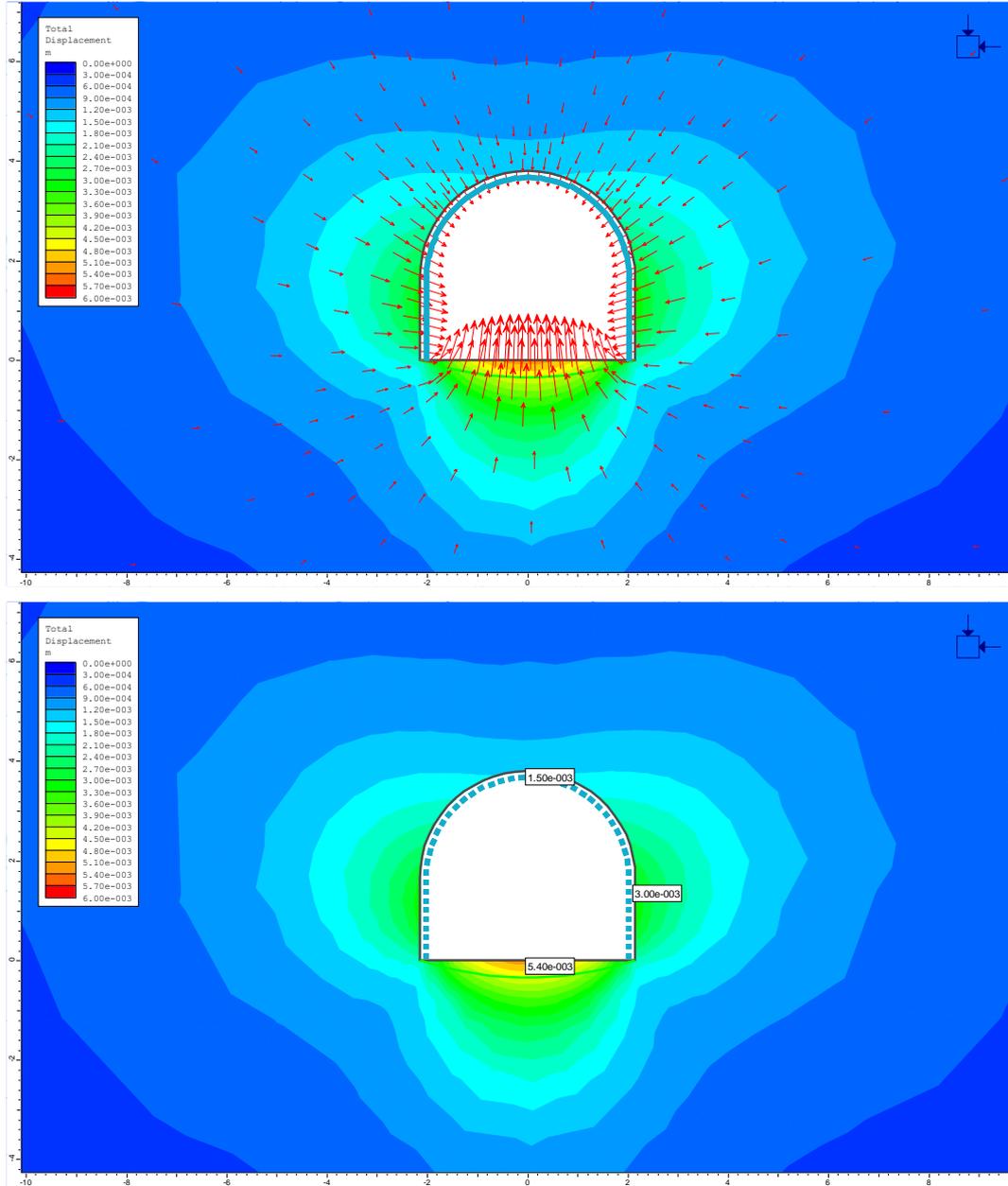


Figura 9.3 – Galleria di collegamento - Sezione B0c – Analisi agli elementi finiti: vettori di spostamento e spostamenti radiali al termine dell'analisi 1

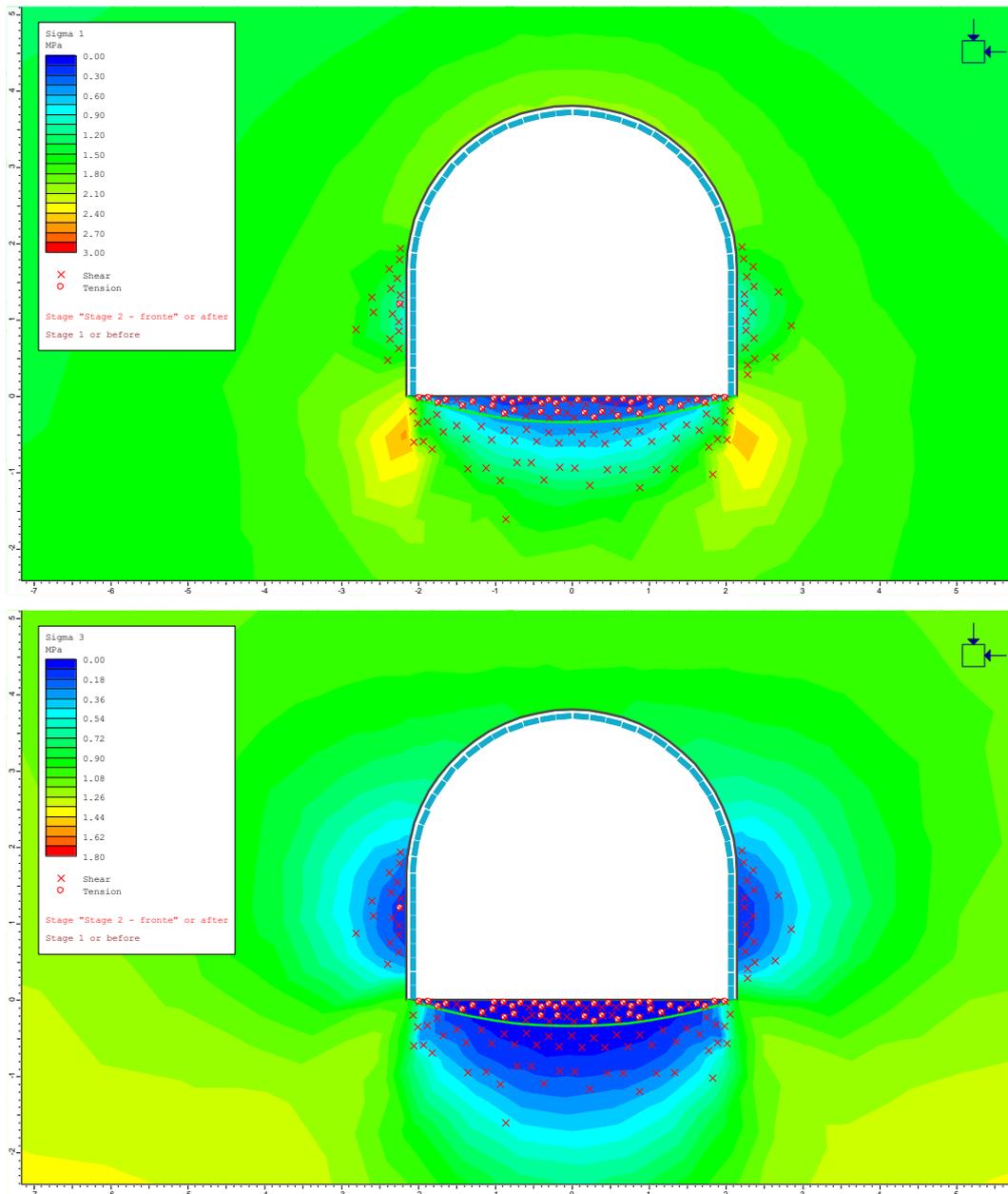


Figura 9.4 – Galleria di collegamento - Sezione B0c – Analisi agli elementi finiti: distribuzione della tensione principale massima e minima e dei punti plastici al termine dell'analisi 1

c_9969 - Comune di Genova - Prot. 22/11/2022.0445245.E

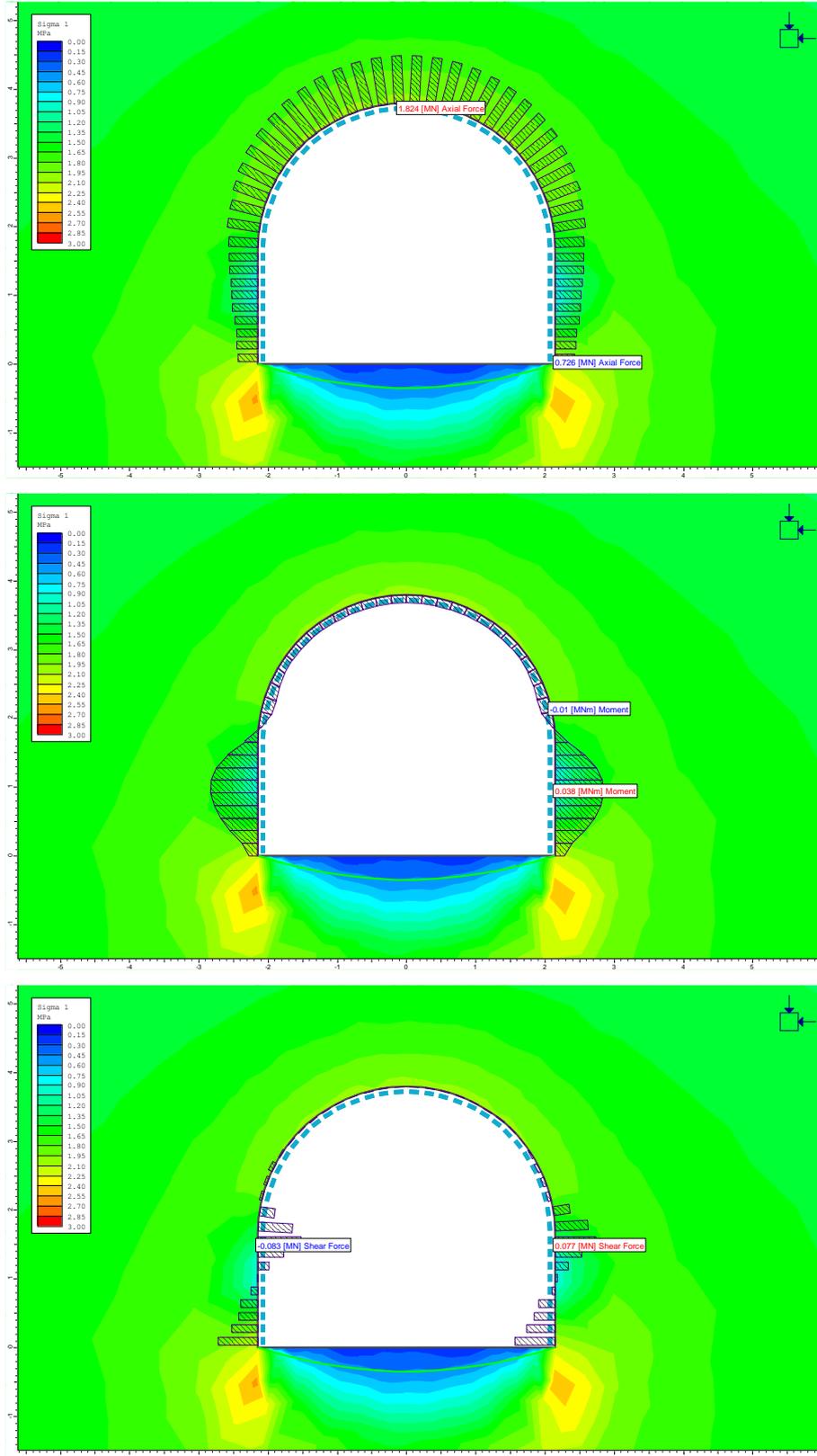


Figura 9.5 – Galleria di collegamento - Sezione B0c – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento di prima fase

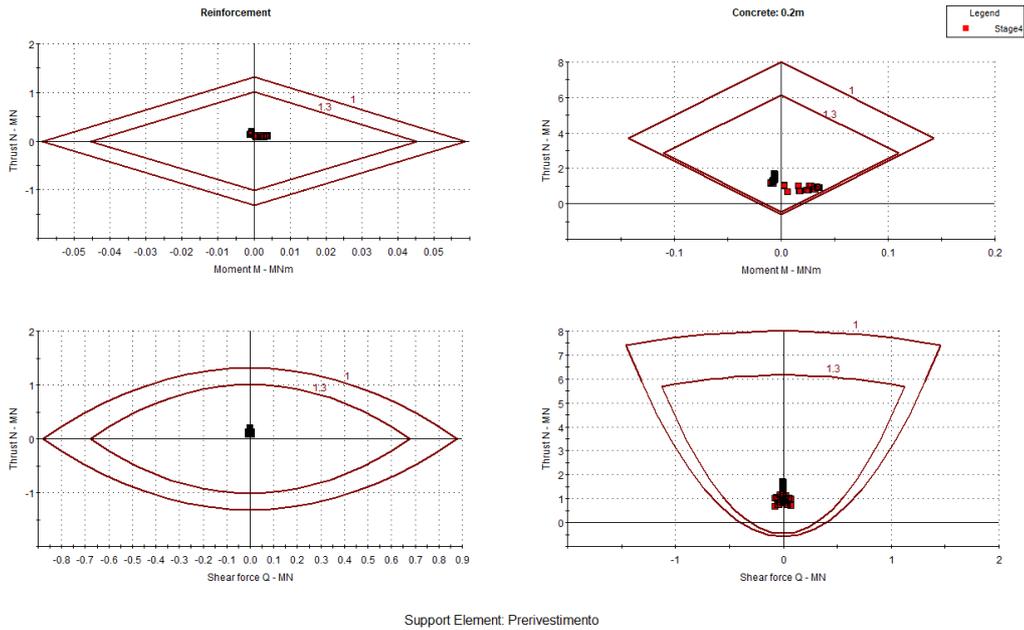


Figura 9.6 – Galleria di collegamento - Sezione B0c – Analisi agli elementi finiti: diagrammi di interazione dei prerivestimenti

Rck	40	MPa	Resistenza cubica a compressione
f _{ck}	33,2	MPa	Resistenza cilindrica a compressione
f _{cm}	41,2	MPa	Resistenza media cilindrica a compressione
f _{tm}	3,10	MPa	Resistenza media a trazione semplice
f _{ctk}	2,17	MPa	Resistenza caratteristica a trazione semplice (frattile 5%)
f _{cd}	18,81	MPa	Resistenza di progetto a compressione
f _{td}	1,45	MPa	Resistenza di progetto a trazione
f _{td}	1,23	MPa	Resistenza a trazione di progetto per calcestruzzo non armato o debolmente armato
σ _{slm}	8,89	MPa	

Analisi statica

Verifica cls non armato

Elemento strutturale	b	h	N _{max}	M _{max}	V _{max}	N _{Ed}	x	N _{Rd}	F _{s,N}	V _{Ed}	σ _c	δ	f _{cvd}	V _{Rd}	F _{s,V}
	cm	cm	kN	kNm	kN	kN	cm	kN		kN	MPa		MPa	kN	
Calotta	100	30	1060	8	13,0	1378	28,5	5360	0,26	17	4,84	-	2,73	518,7	0,03
Piedritto	100	30	970	25	36,0	1261	24,8	4674	0,27	47	5,08	-	2,78	461,1	0,10
Muretta	100	40	995	74	360	1293,5	25,1	4727	0,27	468	5,15	-	2,80	469,0	1,00
Arco rovescio	100	40	765	56	0	994,5	25,4	4771	0,21	0	3,92	-	2,52	425,4	0,00

Analisi sismica 7a

Verifica cls non armato

Elemento strutturale	b	h	N _{max}	M _{max}	V _{max}	N _{Ed}	x	N _{Rd}	F _{s,N}	V _{Ed}	σ _c	δ	f _{cvd}	V _{Rd}	F _{s,V}
	cm	cm	kN	kNm	kN	kN	cm	kN		kN	MPa		MPa	kN	
Calotta	100	30	1064	4	2,0	1064	29,2	5503	0,19	2	3,64	-	2,45	476,9	0,00
Piedritto	100	30	810	25	5	810	23,8	4483	0,18	5	3,40	-	2,39	378,9	0,01
Muretta	100	40	825	54	320	825	26,9	5062	0,16	320	3,07	-	2,30	412,2	0,78
Arco rovescio	100	40	760	40	0	760	29,5	5545	0,14	0	2,58	-	2,16	425,1	0,00

Analisi sismica 7b

Verifica cls non armato

Elemento strutturale	b	h	N _{max}	M _{max}	V _{max}	N _{Ed}	x	N _{Rd}	F _{s,N}	V _{Ed}	σ _c	δ	f _{cvd}	V _{Rd}	F _{s,V}
	cm	cm	kN	kNm	kN	kN	cm	kN		kN	MPa		MPa	kN	
Calotta	100	30	1245	14	12,0	1245	27,8	5221	0,24	12	4,49	-	2,65	490,4	0,02
Piedritto	100	30	1175	30	11	1175	24,9	4683	0,25	11	4,72	-	2,70	448,8	0,02
Muretta	100	40	1160	100	420	1160	22,8	4282	0,27	420	5,10	-	2,79	423,1	0,99
Arco rovescio	100	40	783	72	0	783	21,6	4065	0,19	0	3,62	-	2,44	351,9	0,00

Figura 9.7 – Galleria di collegamento - Sezione B0c – Analisi agli elementi finiti: verifiche strutturali del rivestimento definitivo

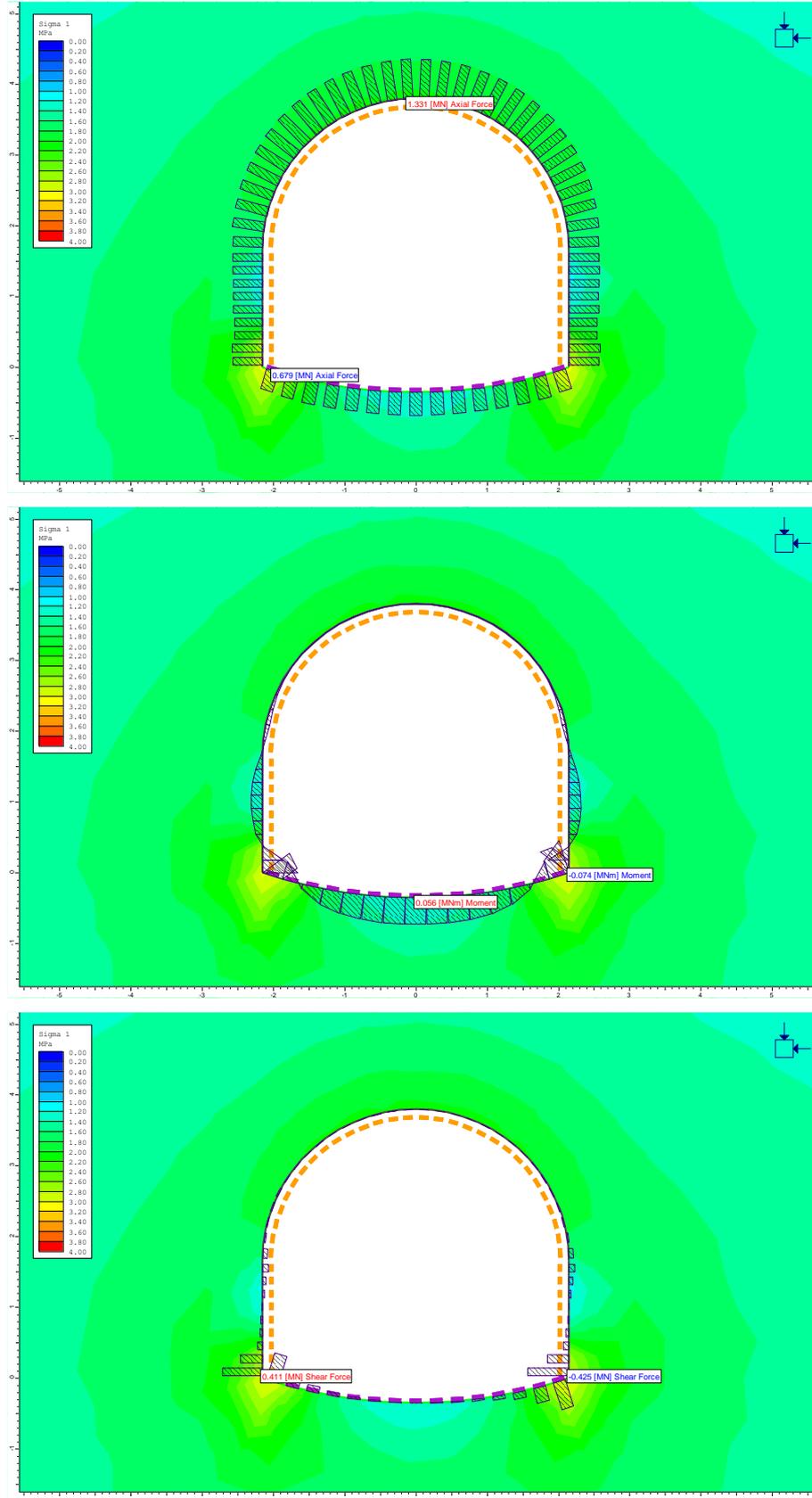


Figura 9.8 – Galleria di collegamento - Sezione B0c – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento definitivo al termine del detensionamento, fase 6

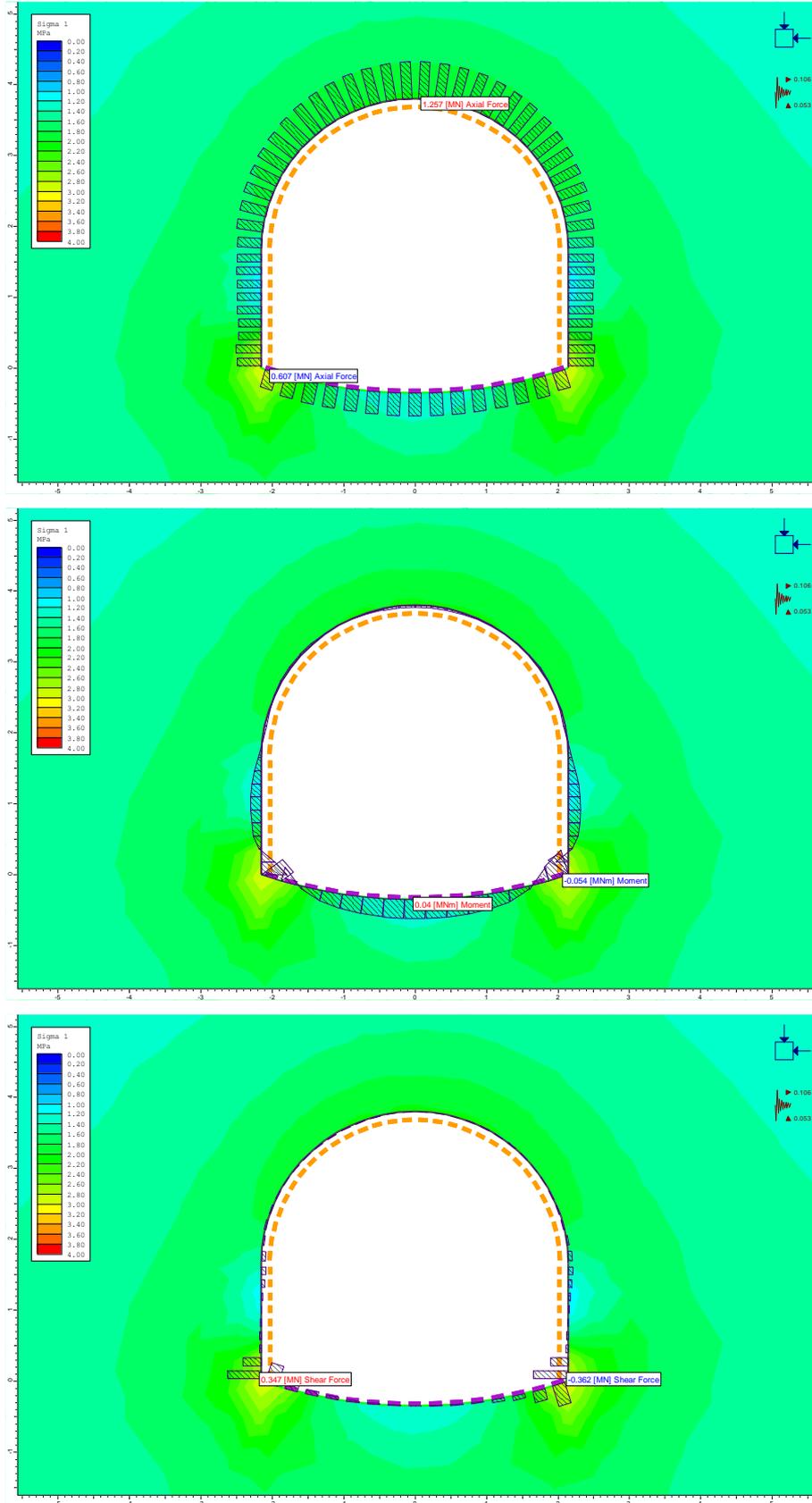


Figura 9.9 – Galleria di collegamento - Sezione B0c – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento definitivo al termine del detensionamento, fase 7a

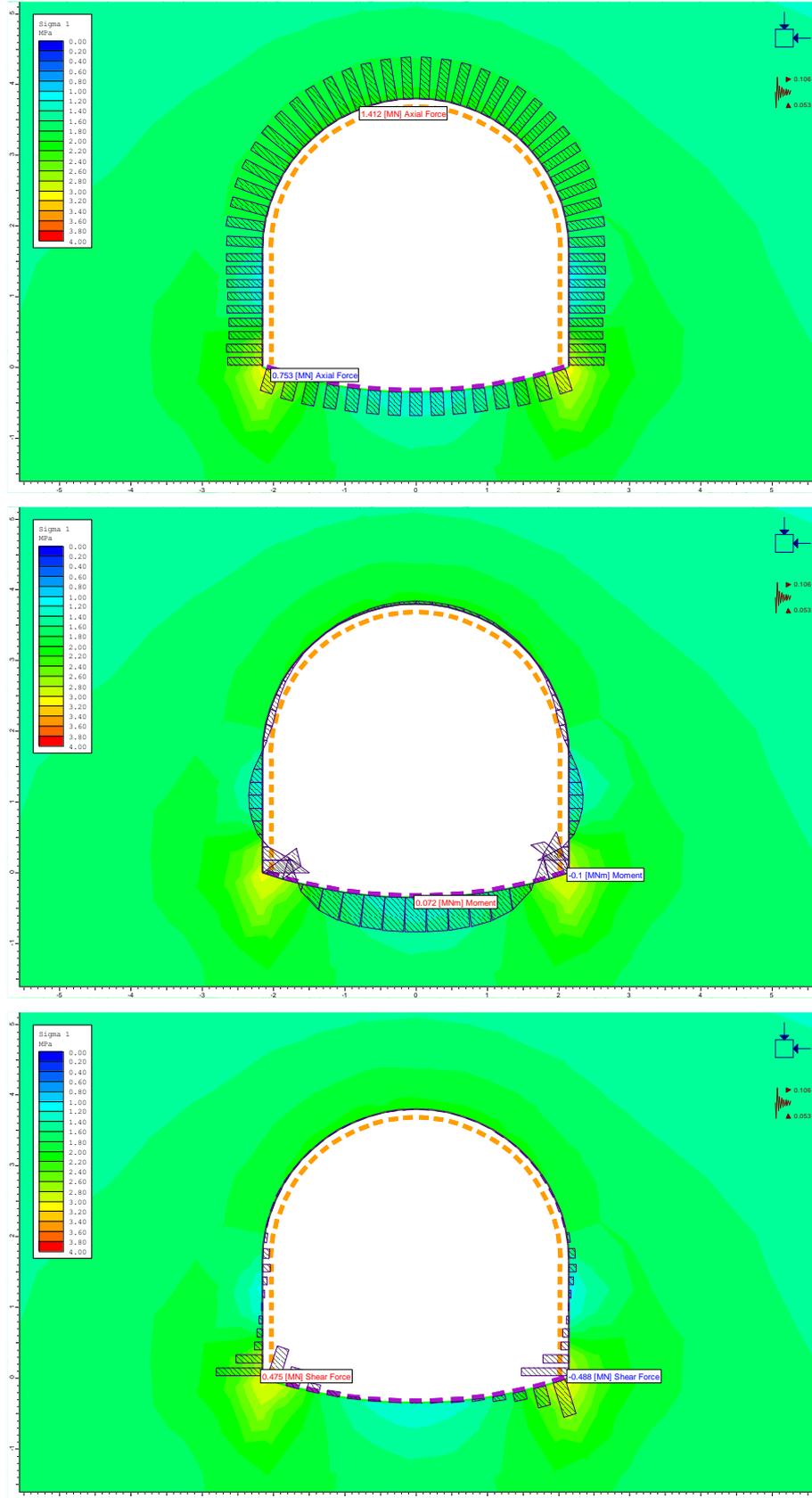


Figura 9.10 – Galleria di collegamento - Sezione B0c – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento definitivo al termine del detensionamento, fase 7b



9.2 Analisi sezione tipo B0Vc

La sezione B0Vc è stata calcolata per una copertura di 20 m sulla calotta ed un indice GSI pari a 25, rappresentativo delle condizioni geomeccaniche medio-basse dell'unità AMT. L'analisi prevede inoltre, a differenza di quanto indicato nella ricostruzione stratigrafica del profilo geologico-geomeccanico che si basa sul sondaggio S02 eseguito nelle vicinanze, che la formazione degradata AMTa possa localmente arrivare a lambire la calotta della galleria.

9.2.1 Analisi di stabilità con il metodo di Tamez

L'analisi è stata eseguita sia con i parametri caratteristici che secondo l'approccio A2+M2 da normativa. Le schede riassuntive sono proposte nella seguente Figura 9.11. A favore di sicurezza i parametri di resistenza adottati nelle analisi si riferiscono alla formazione più scadente AMTa.

Ciascuna scheda riassume nella parte superiore le caratteristiche geometriche, geotecniche del terreno, idrauliche di input dell'analisi e lo schema geometrico del cinematismo di rottura analizzato dal metodo di Tamez. Nella parte inferiore, invece, vengono riassunti i risultati dell'analisi, espressi in termini di fattori di sicurezza al fronte, chiave e globale.

Nel caso in esame, come si può osservare, l'analisi dimostra la stabilità del fronte e della chiave anche in assenza di interventi, mentre guardando all'intero cinematismo di instabilità si registrano fattori di sicurezza leggermente inferiori all'unità. In relazione alla plasticizzazione, la chiave presenta un FS nullo, il che fa presagire la creazione di una diffusa fascia plastica al contorno nel caso in cui l'avanzamento avvenga in assenza di preconsolidamenti.

La presenza degli infilaggi metallici, modellati come una pressione equivalente in chiave di 215 kPa, consente di aumentare in modo significativo il grado di stabilità della chiave lungo tutta la lunghezza libera.



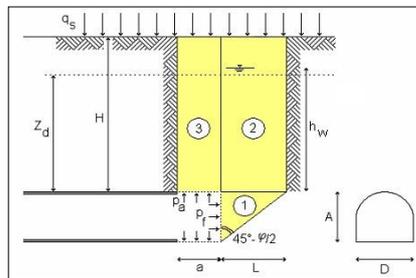
ANALISI DI STABILITA' DI TAMEZ - TABELLE RIEPILOGATIVE

RIASSUNTO DATI DI INGRESSO

GEOMETRIA		
a	lunghezza libera - m	1
A	h galleria - m	4,12
D	largh. galleria - m	4,93
L	estens.longitud.cuneo - m	2,14
H	copertura da calotta - m	20
Z _d	tratto di influenza scavo - m	8,38
S	sezione di scavo - m ²	17,70

TERRENO		
γ	peso di volume - kN/m ³	25
c	coesione - kPa	0
φ	attrito - (°)	35
q _s	sovraccarico - kPa	0

CONDIZIONI IDRAULICHE		
γ _w	peso di volume - kN/m ³	10
α ₁	condizioni di drenaggio	0,4
β	permeab.ammasso	0,9
h _w	carico acqua su calotta (m)	0
	presenza di raggiera drenante in chiave?	no



RIASSUNTO RISULTATI - p_a = 0, p_r = 0

STABILITA' DEL FRONTE		
p _r	pressione al fronte - kPa	0,00
FS _f	fattore di sicurezza	1,1

STABILITA' DELLA CHIAVE		
p _a	pressione applicata in chiave - kPa	0,0
FS _{c pl}	fattore di sicurezza alla plasticizzazione	0,00
p _{a opt}	pressione in chiave per evitare fascia plastica - kPa	500
FS _c	fattore di sicurezza alla stabilità	2,1

STABILITA' GLOBALE		
FS _g	fattore di sicurezza	0,83

RIASSUNTO RISULTATI - con interventi

STABILITA' DEL FRONTE		
FS _f	fattore di sicurezza	1,1
p _r	pressione al fronte - kPa	0,00
p _{r max}	pressione massima applicabile - kPa	149,45

STABILITA' DELLA CHIAVE		
p _a	pressione in chiave - kPa	215,00
FS _c	fattore di sicurezza	6,3

STABILITA' GLOBALE		
FS _g	fattore di sicurezza	1,21

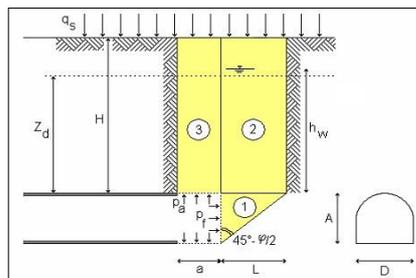
ANALISI DI STABILITA' DI TAMEZ - TABELLE RIEPILOGATIVE

RIASSUNTO DATI DI INGRESSO

GEOMETRIA		
a	lunghezza libera - m	1
A	h galleria - m	4,12
D	largh. galleria - m	4,93
L	estens.longitud.cuneo - m	2,41
H	copertura da calotta - m	20
Z _d	tratto di influenza scavo - m	8,38
S	sezione di scavo - m ²	17,70

TERRENO		
γ	peso di volume - kN/m ³	25
c	coesione - kPa	0
φ	attrito - (°)	29,3
q _s	sovraccarico - kPa	0

CONDIZIONI IDRAULICHE		
γ _w	peso di volume - kN/m ³	10
α ₁	condizioni di drenaggio	0,4
β	permeab.ammasso	0,9
h _w	carico acqua su calotta (m)	0
	presenza di raggiera drenante in chiave?	no



RIASSUNTO RISULTATI - p_a = 0, p_r = 0

STABILITA' DEL FRONTE		
p _r	pressione al fronte - kPa	0,00
FS _f	fattore di sicurezza	1,0

STABILITA' DELLA CHIAVE		
p _a	pressione applicata in chiave - kPa	0,0
FS _{c pl}	fattore di sicurezza alla plasticizzazione	0,00
p _{a opt}	pressione in chiave per evitare fascia plastica - kPa	500
FS _c	fattore di sicurezza alla stabilità	2,0

STABILITA' GLOBALE		
FS _g	fattore di sicurezza	0,77

RIASSUNTO RISULTATI - con interventi

STABILITA' DEL FRONTE		
FS _f	fattore di sicurezza	1,0
p _r	pressione al fronte - kPa	0,00
p _{r max}	pressione massima applicabile - kPa	189,41

STABILITA' DELLA CHIAVE		
p _a	pressione in chiave - kPa	215,00
FS _c	fattore di sicurezza	6,2

STABILITA' GLOBALE		
FS _g	fattore di sicurezza	1,06

Figura 9.11 – Galleria scolmatrice - Sezione B0Vc - Analisi Tamez con parametri caratteristici (sopra) e ridotti (sotto)



9.2.2 Analisi agli elementi finiti

I risultati dell'analisi vengono proposti con riferimento alla fase 4 dell'analisi 1 ed alla fase 6 dell'analisi 2. La geometria di riferimento è di seguito proposta:

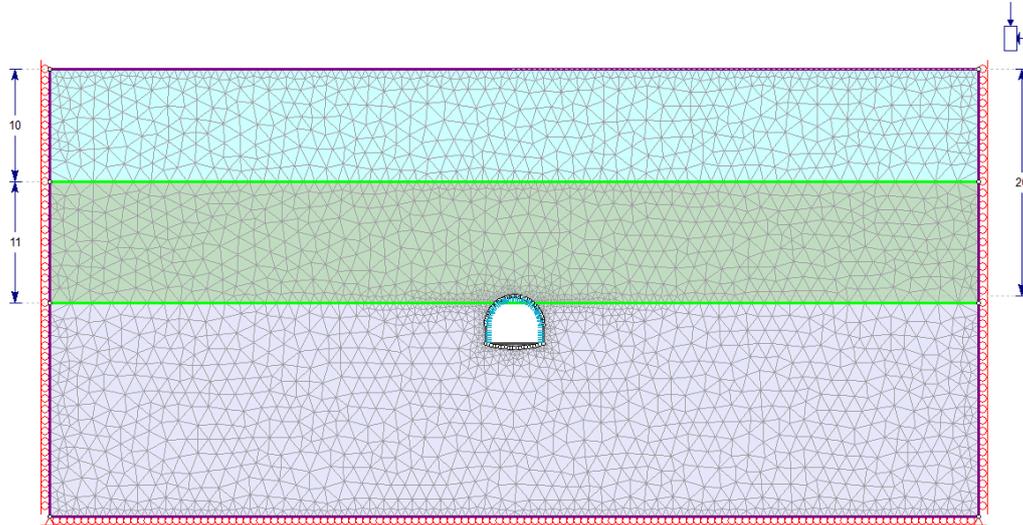


Figura 9.12 – Galleria di collegamento - Sezione B0Vc – Geometria del modello agli elementi finiti

La seguente Figura 9.13 presenta la distribuzione degli spostamenti radiali al contorno del cavo al termine dell'analisi 1. Come si può osservare, gli spostamenti sono limitati e dovuti a deformazioni in campo quasi completamente elastico al contorno del cavo. Gli spostamenti sono ovunque inferiori ai 3 mm.

Le zone plastiche al contorno del cavo sono limitate alla parte centrale dei piedritti ed al fondo scavo, si veda a riguardo la seguente Figura 9.14 che descrive la distribuzione delle tensioni principali e dei punti plastici al contorno del cavo.

Le sollecitazioni agenti sui priverestimenti sono ridotte, Figura 9.15, e garantiscono elevati fattori di sicurezza rispetto ai limiti di resistenza dei materiali, Figura 9.16.

Per quanto riguarda i rivestimenti definitivi, nelle seguenti Figura 9.19, Figura 9.20, Figura 9.21 è proposta la distribuzione delle sollecitazioni agenti sugli stessi, e la seguente tabella di Figura 9.17 riassume le verifiche strutturali eseguite nell'ipotesi in cui il rivestimento definitivo sia privo di armatura. Come si può vedere, tutte le verifiche sono soddisfatte anche in assenza di armatura, ad eccezione dell'arco rovescio, che richiede armatura, Figura 9.18. Questa situazione è dovuta al ridotto confinamento laterale imposto dall'ammasso roccioso dovuto alla scelta di un coefficiente di spinta a riposo k_0 pari a 0.50 per le zone a ridotta copertura. Laddove la copertura risulti più elevata, pur in presenza della stessa sezione tipo di avanzamento, è auspicabile un grado di confinamento più elevato (prossimo all'unità), che rende non necessaria l'armatura della parte inferiore del rivestimento definitivo.

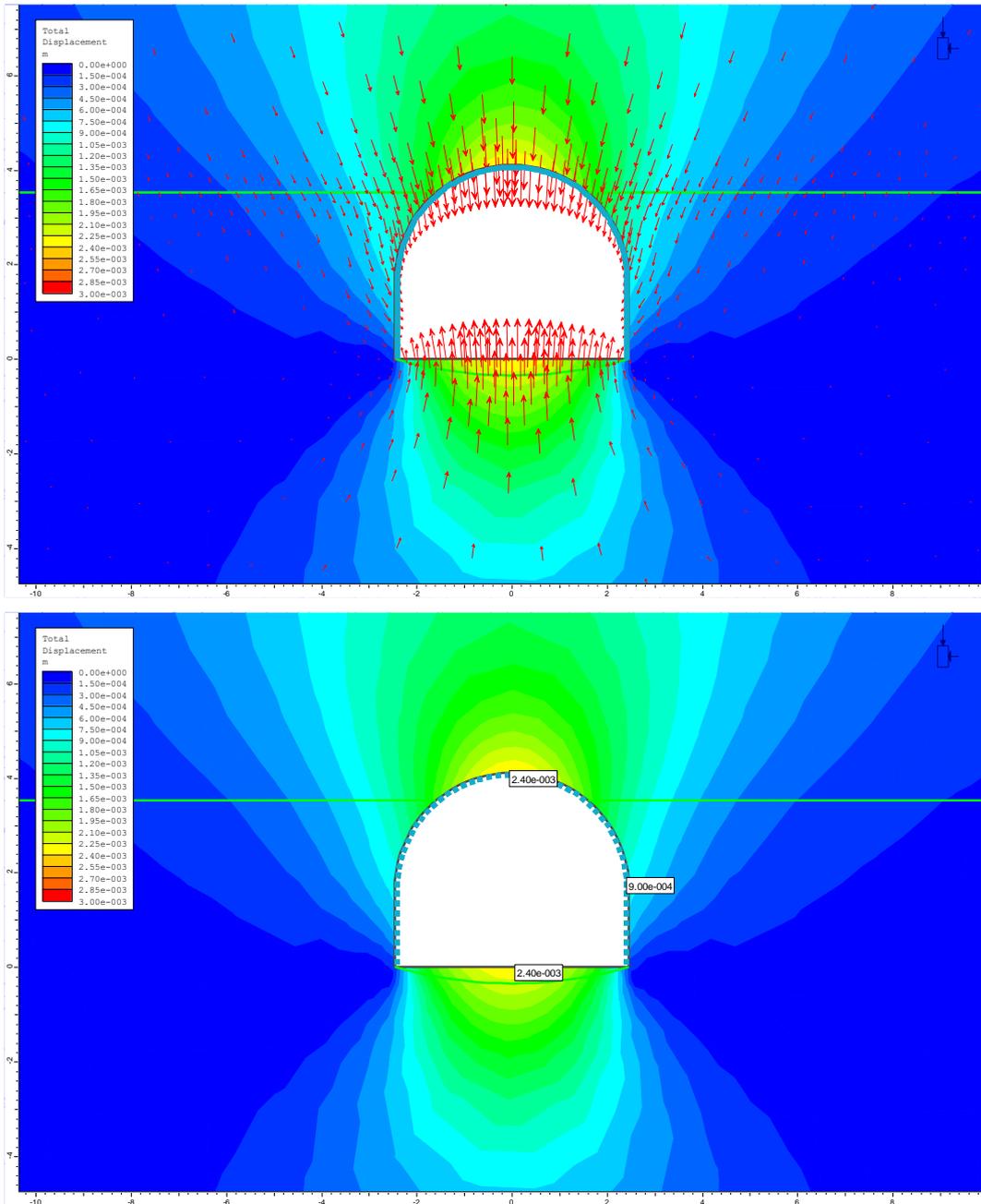


Figura 9.13 – Galleria di collegamento - Sezione B0Vc – Analisi agli elementi finiti: vettori di spostamento e spostamenti radiali al termine dell'analisi 1

c_d9969.Comune di Genova - Prot. 22/11/2022.0445245.E

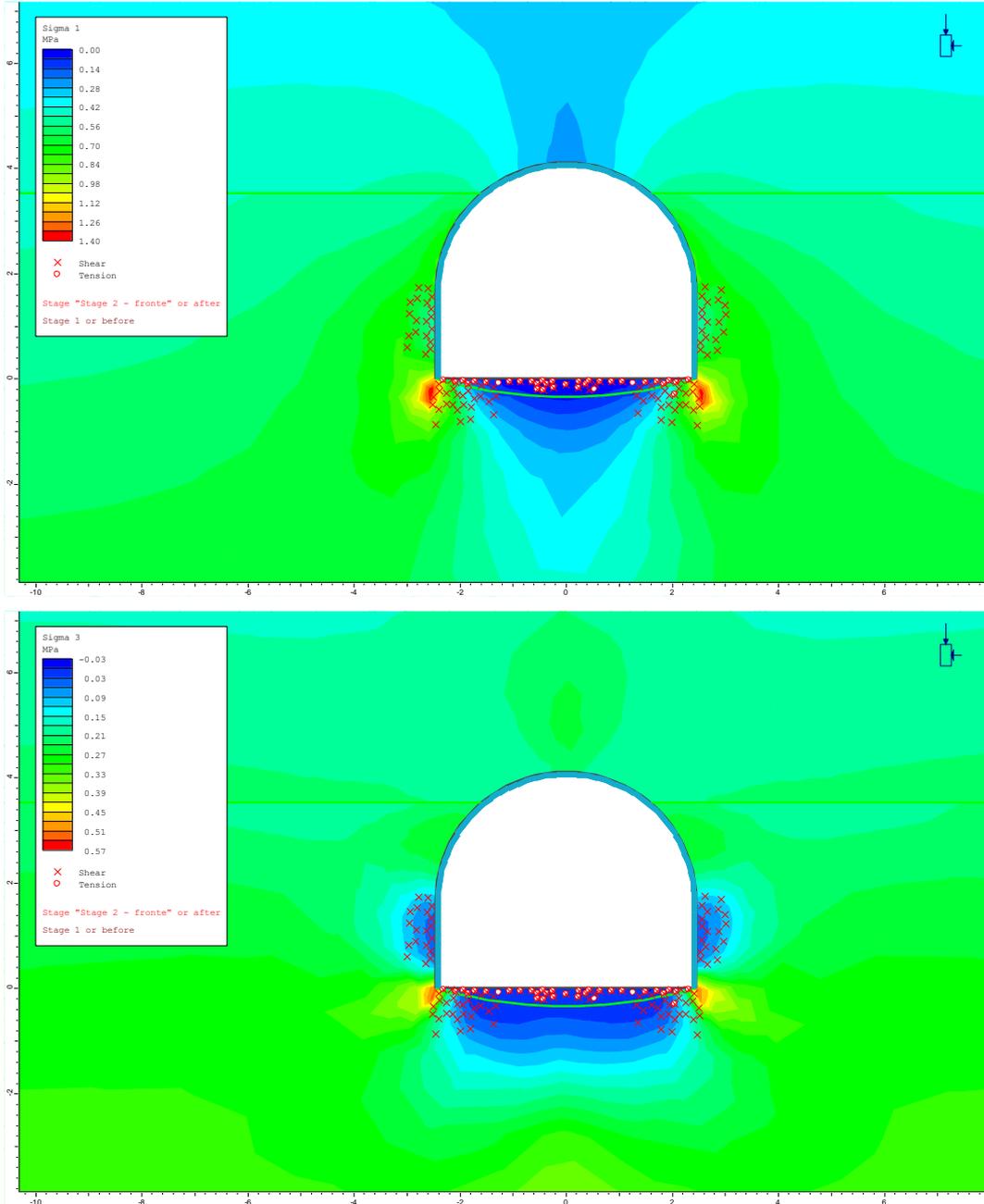


Figura 9.14 – Galleria di collegamento - Sezione B0Vc – Analisi agli elementi finiti: distribuzione della tensione principale massima e minima e dei punti plastici al termine dell'analisi 1

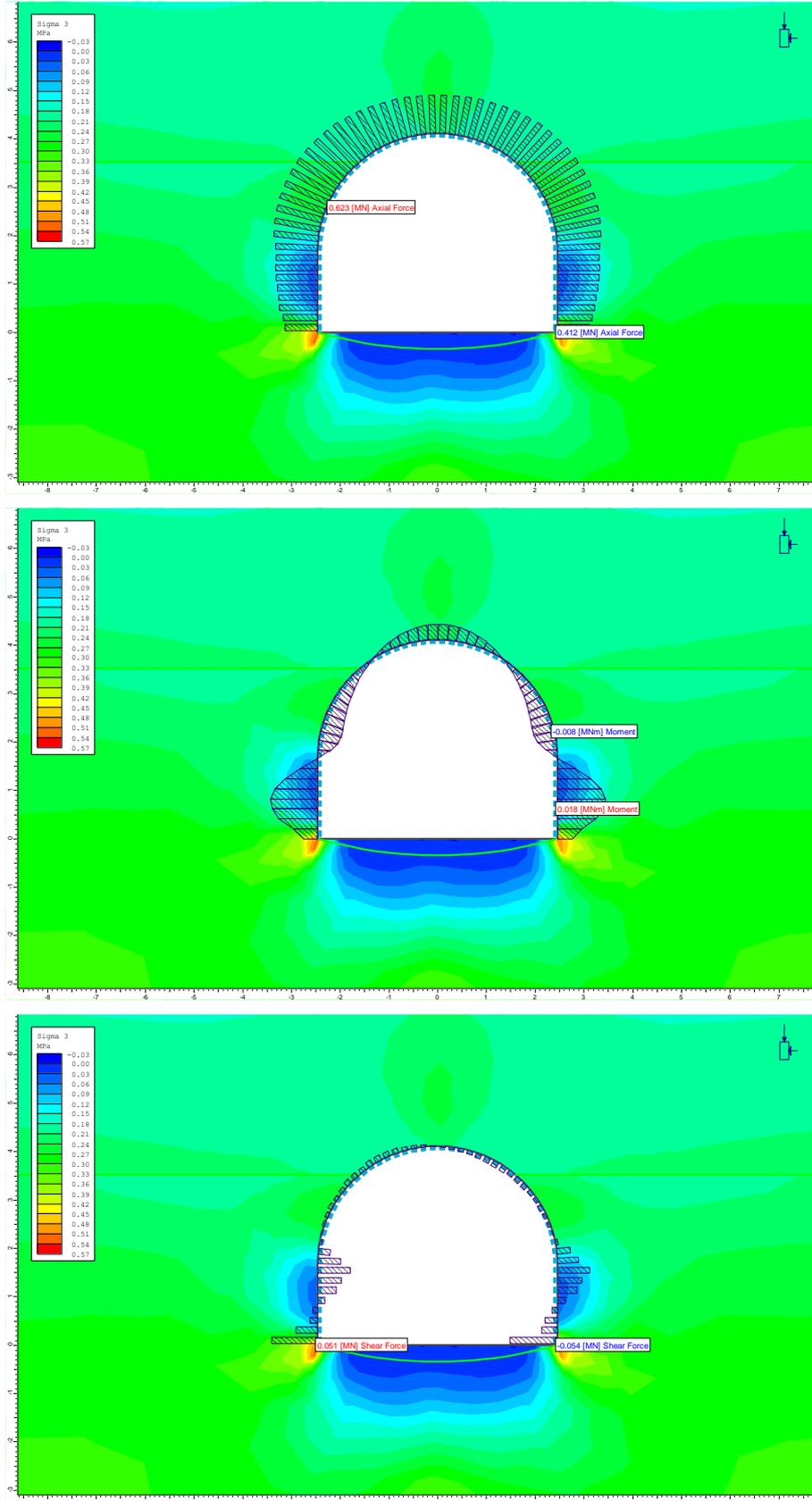


Figura 9.15 – Galleria di collegamento - Sezione B0Vc – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento di prima fase

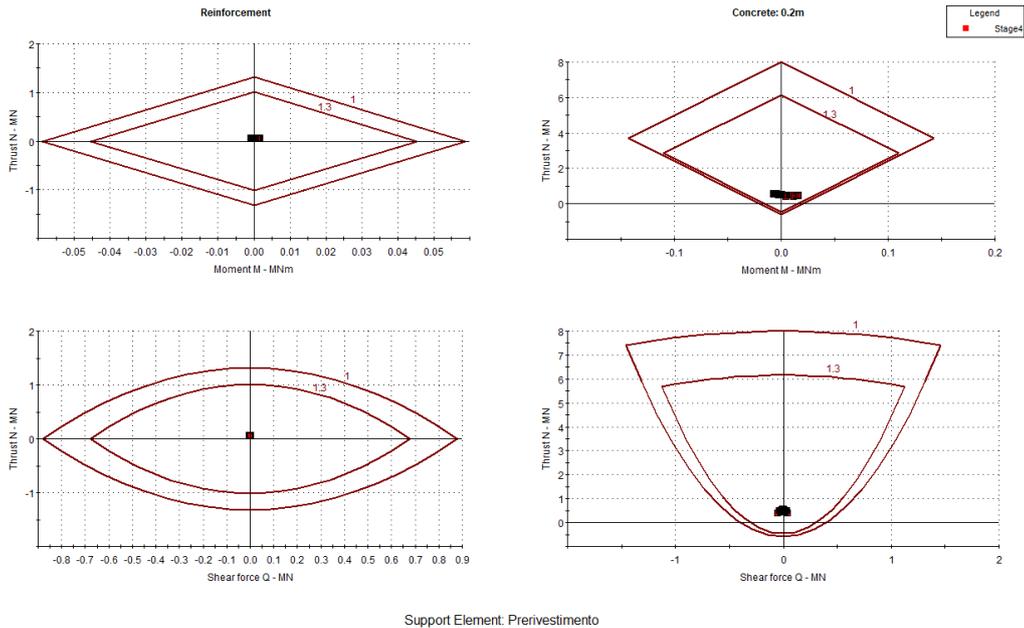


Figura 9.16 – Galleria di collegamento - Sezione B0Vc – Analisi agli elementi finiti: diagrammi di interazione dei prerivestimenti

Rck	40	MPa	Resistenza cubica a compressione
f _{ck}	33,2	MPa	Resistenza cilindrica a compressione
f _{cm}	41,2	MPa	Resistenza media cilindrica a compressione
f _{ctm}	3,10	MPa	Resistenza media a trazione semplice
f _{ctk}	2,17	MPa	Resistenza caratteristica a trazione semplice (frattile 5%)
f _{cd}	18,81	MPa	Resistenza di progetto a compressione
f _{td}	1,45	MPa	Resistenza di progetto a trazione
f _{ctd}	1,23	MPa	Resistenza a trazione di progetto per calcestruzzo non armato o debolmente armato
α _{clim}	8,89	MPa	

Analisi statica

Verifica cls non armato

Elemento strutturale	b	h	N _{max}	M _{max}	V _{max}	N _{Ed}	x	N _{Rd}	F _{s,N}	V _{Ed}	α _c	δ	f _{cvd}	V _{Rd}	F _{s,V}
	cm	cm	kN	kNm	kN	kN	cm	kN		kN	MPa	MPa	MPa	kN	
Calotta	100	40	565	6	10,0	734,5	37,9	7126	0,10	13	1,94	-	1,97	498,3	0,03
Piedritto	100	40	520	10	4,0	676	36,2	6802	0,10	5	1,87	-	1,95	470,4	0,01
Muretta	100	60	475	29	120	617,5	47,8	8991	0,07	156	1,29	-	1,76	560,9	0,28
Arco rovescio	100	60	73	33	1	94,9	-30,4								Nessun equilibrio

Analisi sismica 7a

Verifica cls non armato

Elemento strutturale	b	h	N _{max}	M _{max}	V _{max}	N _{Ed}	x	N _{Rd}	F _{s,N}	V _{Ed}	α _c	δ	f _{cvd}	V _{Rd}	F _{s,V}
	cm	cm	kN	kNm	kN	kN	cm	kN		kN	MPa	MPa	MPa	kN	
Calotta	100	40	404	14	3,0	404	33,1	6221	0,06	3	1,22	-	1,74	382,7	0,01
Piedritto	100	40	430	14	6	430	33,5	6300	0,07	6	1,28	-	1,76	392,4	0,02
Muretta	100	60	456	34	130	456	45,1	8483	0,05	130	1,01	-	1,66	498,8	0,26
Arco rovescio	100	60	46	27	3	46	-57,4								Nessun equilibrio

Analisi sismica 7b

Verifica cls non armato

Elemento strutturale	b	h	N _{max}	M _{max}	V _{max}	N _{Ed}	x	N _{Rd}	F _{s,N}	V _{Ed}	α _c	δ	f _{cvd}	V _{Rd}	F _{s,V}
	cm	cm	kN	kNm	kN	kN	cm	kN		kN	MPa	MPa	MPa	kN	
Calotta	100	40	470	15	2,0	470	33,6	6324	0,07	2	1,40	-	1,80	402,8	0,00
Piedritto	100	40	570	14	10	570	35,1	6601	0,09	10	1,62	-	1,87	438,1	0,02
Muretta	100	60	584	56	165	584	40,8	7680	0,08	165	1,43	-	1,81	492,1	0,34
Arco rovescio	100	60	76	41	0	76	-47,9								Nessun equilibrio

Figura 9.17 – Galleria di collegamento - Sezione B0Vc – Analisi agli elementi finiti: verifiche strutturali del rivestimento definitivo



Sez.tipo B0Vc bassa copertura - condizione statica+sismica - SLU

Elemento strutturale	b	h	N _{max}	M _{max}	V _{max}	N _{Ed}	M _{Ed}	V _{Ed}	armatura	M _{Rd}	V _{Rd}
	cm	cm	kN	kNm	kN	kN	kNm	kN		kNm	kN
Arco rovescio	100	60	73	33	1	94,9	42,9	1,3	5 φ 16 simmetrica	239	-
	100	60	46	27	3	46	27	3		227	-
	100	60	76	41	0	76	41	0		234	-

Sez.tipo B0Vc bassa copertura - condizione statica+sismica - SLE

Elemento strutturale	b	h	N _{max}	M _{max}	V _{max}	armatura	M _{cr}	w	tensioni - MPa		
	cm	cm	kN	kNm	kN		kNm	mm	cls	acciaio cx	acciaio tx
Arco rovescio	100	60	73	33	1	5 φ 16 simmetrica	170	-	0,6	7,8	4,3
	100	60	46	27	3		168	-	0,5	6,1	3,9
	100	60	76	41	0		171	-	0,7	9,3	5,7

Figura 9.18 – Galleria di collegamento - Sezione B0Vc – Analisi agli elementi finiti: verifiche strutturali di quelle sezioni del rivestimento definitivo che richiedono armatura

c_29969 - Comune di Genova - Prot. 22/11/2022. 0445245.E

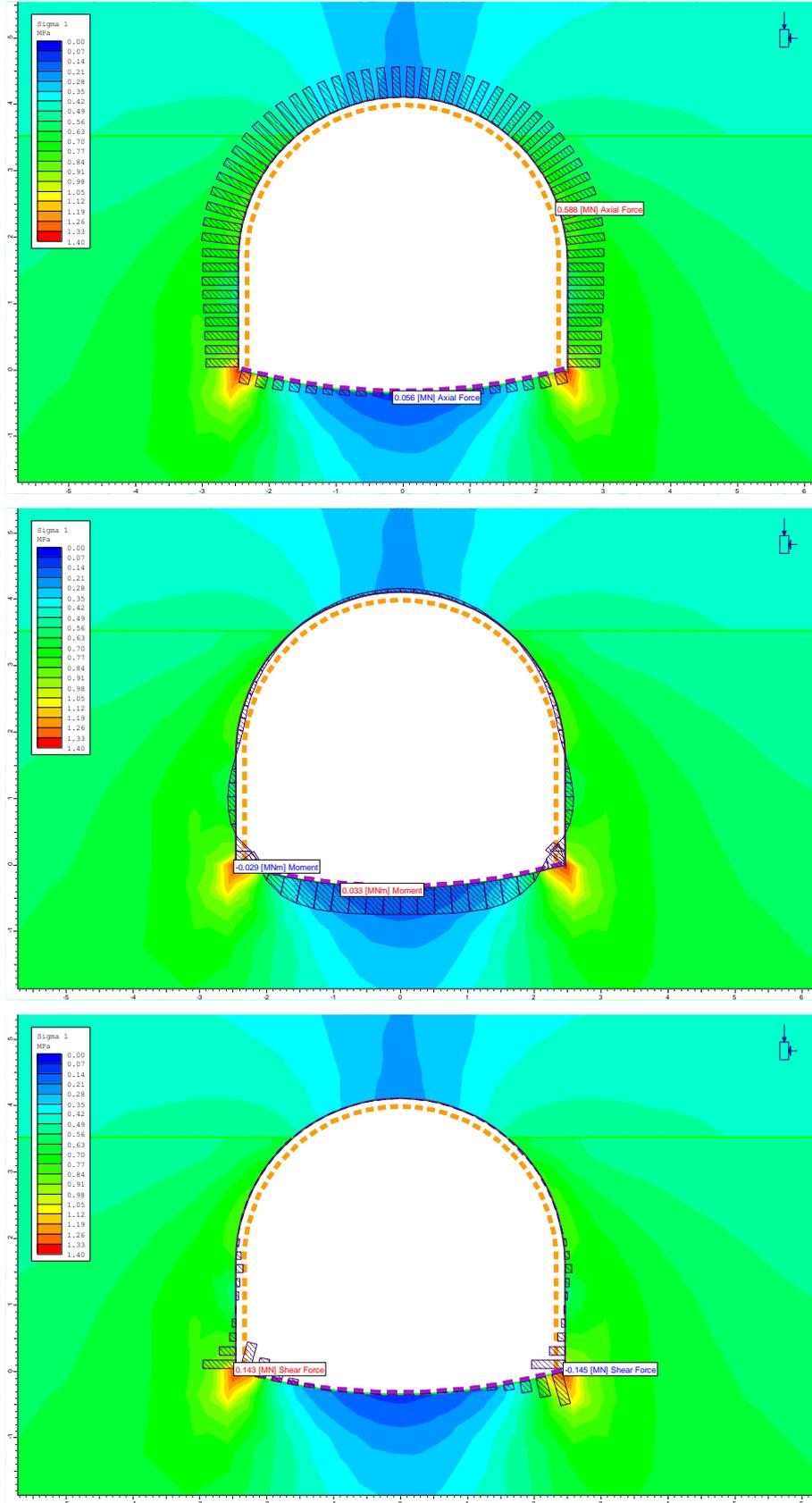


Figura 9.19 – Galleria di collegamento - Sezione B0Vc – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento definitivo al termine del detensionamento, fase 6

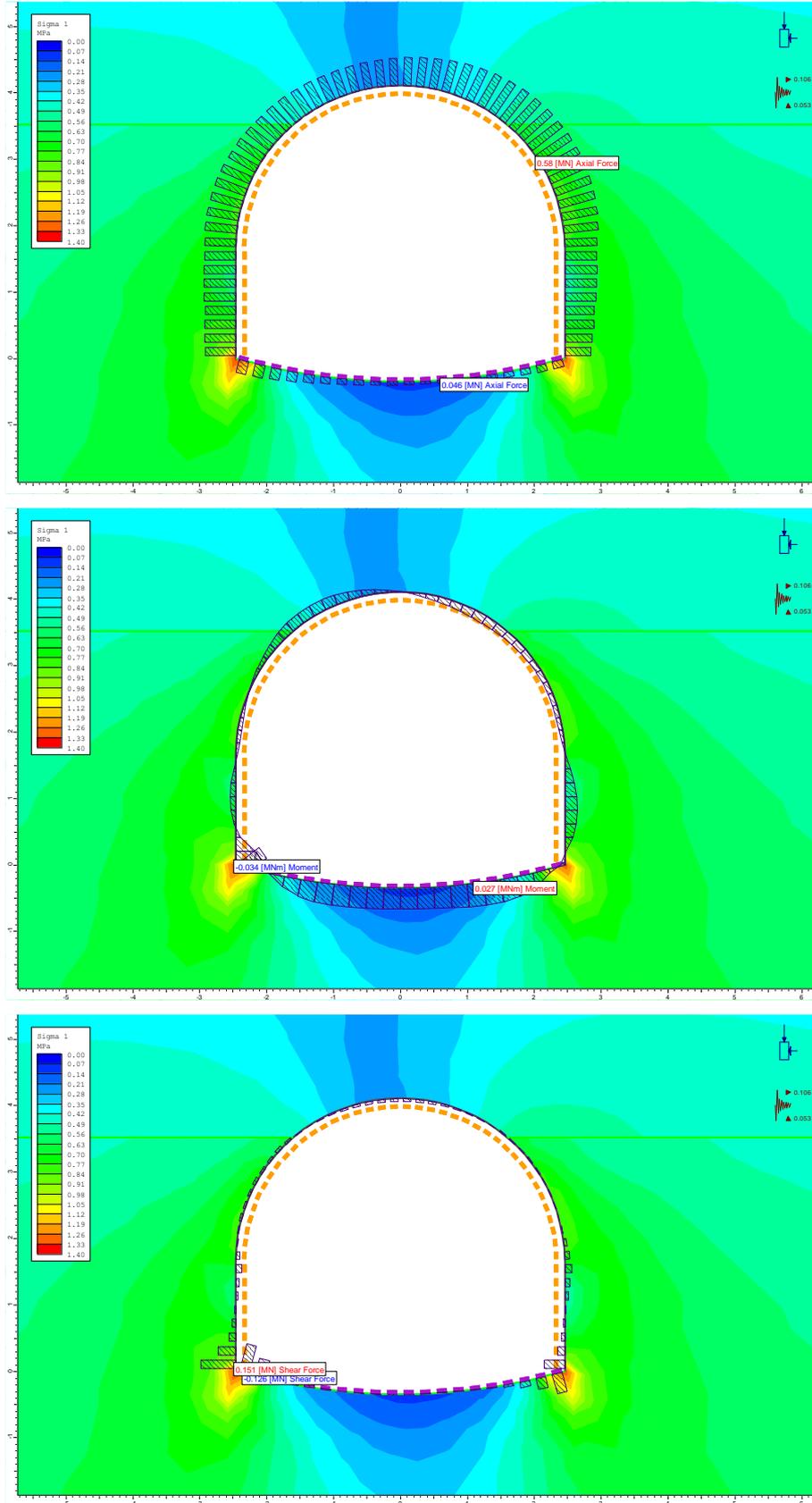


Figura 9.20 – Galleria di collegamento - Sezione B0Vc – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento definitivo al termine del detensionamento, fase 7°

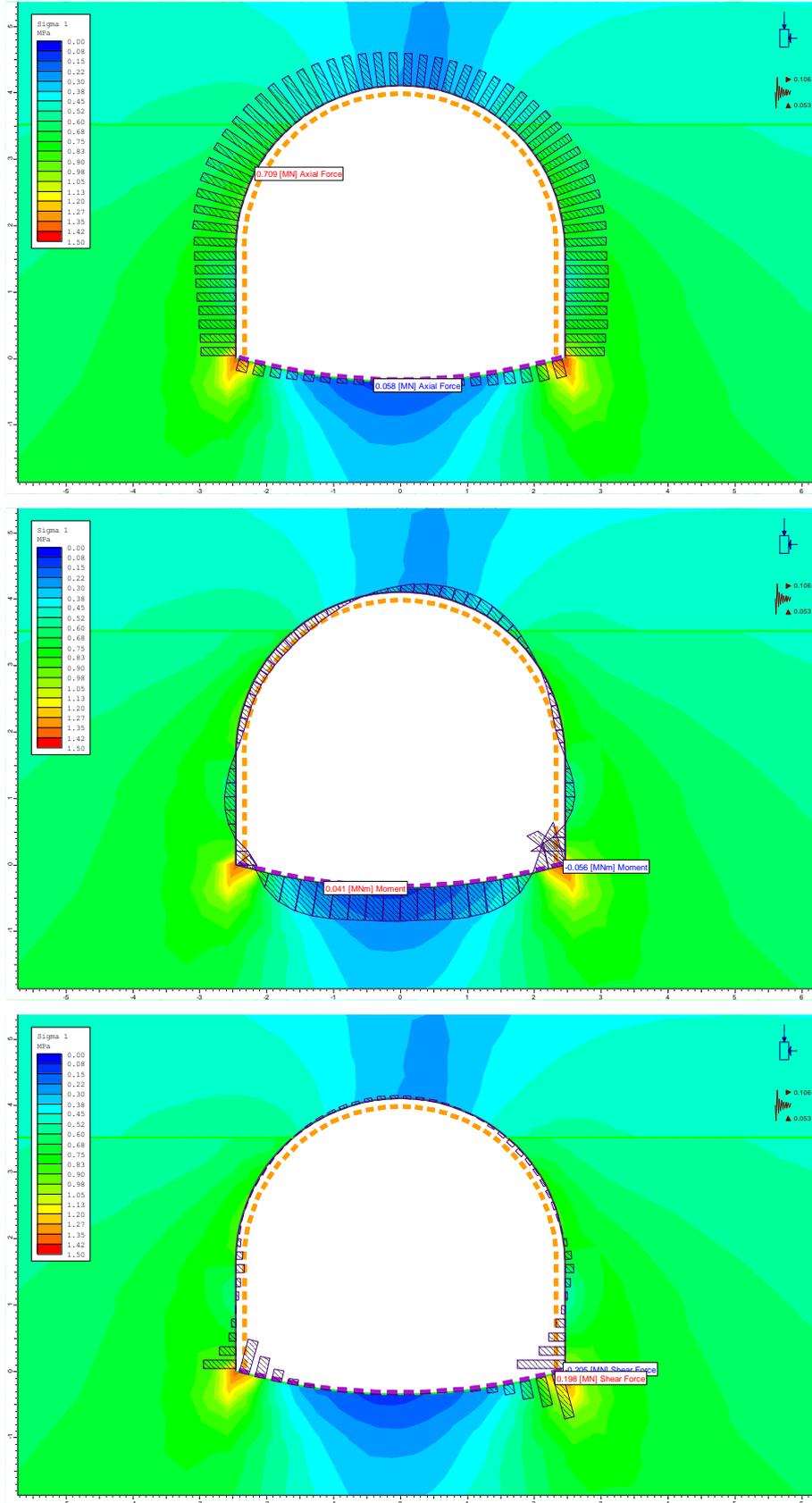


Figura 9.21 – Galleria di collegamento - Sezione B0Vc – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento definitivo al termine del detensionamento, fase 7b



9.3 Analisi sezione tipo A0c

La sezione A0c è stata calcolata per una copertura di 60 m sulla calotta ed un indice GSI pari a 35, rappresentativo della porzione meno fratturata dell'unità AMT.

9.3.1 Analisi di stabilità con il metodo di Tamez

L'analisi è stata eseguita sia con i parametri caratteristici che secondo l'approccio A2+M2 da normativa. Le schede riassuntive sono proposte nella seguente Figura 9.22.

Ciascuna scheda riassume nella parte superiore le caratteristiche geometriche, geotecniche del terreno, idrauliche di input dell'analisi e lo schema geometrico del cinematismo di rottura analizzato dal metodo di Tamez. Nella parte inferiore, invece, vengono riassunti i risultati dell'analisi, espressi in termini di fattori di sicurezza al fronte, chiave e globale.

Nel caso in esame, come si può osservare, l'analisi dimostra la piena stabilità del fronte, della chiave e dell'intero cinematismo di rottura in assenza di interventi preventivi. I fattori di sicurezza alla plasticizzazione della chiave risultano invece inferiori all'unità, denunciando la possibilità che si venga a creare una fascia di plasticizzazione corticale al contorno.



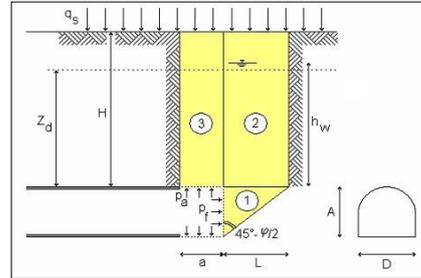
ANALISI DI STABILITA' DI TAMEZ - TABELLE RIEPILOGATIVE

RIASSUNTO DATI DI INGRESSO

GEOMETRIA		
a	lunghezza libera - m	3
A	h galleria - m	3,8
D	largh. galleria - m	4,3
L	estens. longitud. cuneo - m	1,38
H	copertura da calotta - m	60
Z _d	tratto di influenza scavo - m	7,31
S	sezione di scavo - m ²	14,36

TERRENO		
γ	peso di volume - kN/m ³	27
c	coesione - kPa	45
φ	attrito - (°)	50
q _s	sovraccarico - kPa	0

CONDIZIONI IDRAULICHE		
γ _w	peso di volume - kN/m ³	10
α ₁	condizioni di drenaggio	0,4
β	permeab. ammasso	0,9
h _w	carico acqua su calotta (m)	0
	presenza di raggiera drenante in chiave?	no



RIASSUNTO RISULTATI - p_a = 0, p_r = 0

STABILITA' DEL FRONTE		
p _r	pressione al fronte - kPa	0,00
FS _r	fattore di sicurezza	2,5

STABILITA' DELLA CHIAVE		
p _a	pressione applicata in chiave - kPa	0,0
FS _{c pt}	fattore di sicurezza alla plasticizzazione	0,49
p _{a opt}	pressione in chiave per evitare fascia plastica - kPa	1581
FS _c	fattore di sicurezza alla stabilità	1,2

STABILITA' GLOBALE		
FS _g	fattore di sicurezza	1,20

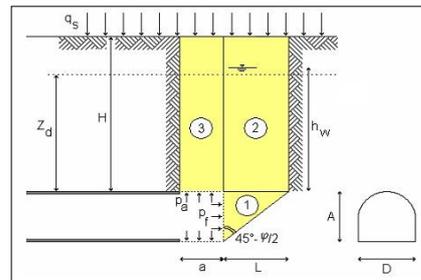
ANALISI DI STABILITA' DI TAMEZ - TABELLE RIEPILOGATIVE

RIASSUNTO DATI DI INGRESSO

GEOMETRIA		
a	lunghezza libera - m	3
A	h galleria - m	3,8
D	largh. galleria - m	4,3
L	estens. longitud. cuneo - m	1,63
H	copertura da calotta - m	60
Z _d	tratto di influenza scavo - m	7,31
S	sezione di scavo - m ²	14,36

TERRENO		
γ	peso di volume - kN/m ³	27
c	coesione - kPa	36
φ	attrito - (°)	44
q _s	sovraccarico - kPa	0

CONDIZIONI IDRAULICHE		
γ _w	peso di volume - kN/m ³	10
α ₁	condizioni di drenaggio	0,4
β	permeab. ammasso	0,9
h _w	carico acqua su calotta (m)	0
	presenza di raggiera drenante in chiave?	no



RIASSUNTO RISULTATI - p_a = 0, p_r = 0

STABILITA' DEL FRONTE		
p _r	pressione al fronte - kPa	0,00
FS _r	fattore di sicurezza	2,3

STABILITA' DELLA CHIAVE		
p _a	pressione applicata in chiave - kPa	0,0
FS _{c pt}	fattore di sicurezza alla plasticizzazione	0,54
p _{a opt}	pressione in chiave per evitare fascia plastica - kPa	1577
FS _c	fattore di sicurezza alla stabilità	1,3

STABILITA' GLOBALE		
FS _g	fattore di sicurezza	1,18

Figura 9.22 – Galleria scolmatrice - Sezione A0c - Analisi Tamez con parametri caratteristici (sopra) e ridotti (sotto)



9.3.2 Analisi agli elementi finiti

I risultati dell'analisi vengono proposti con riferimento alla fase 4 dell'analisi 1 ed alla fase 6 dell'analisi 2. La geometria di riferimento è di seguito proposta:

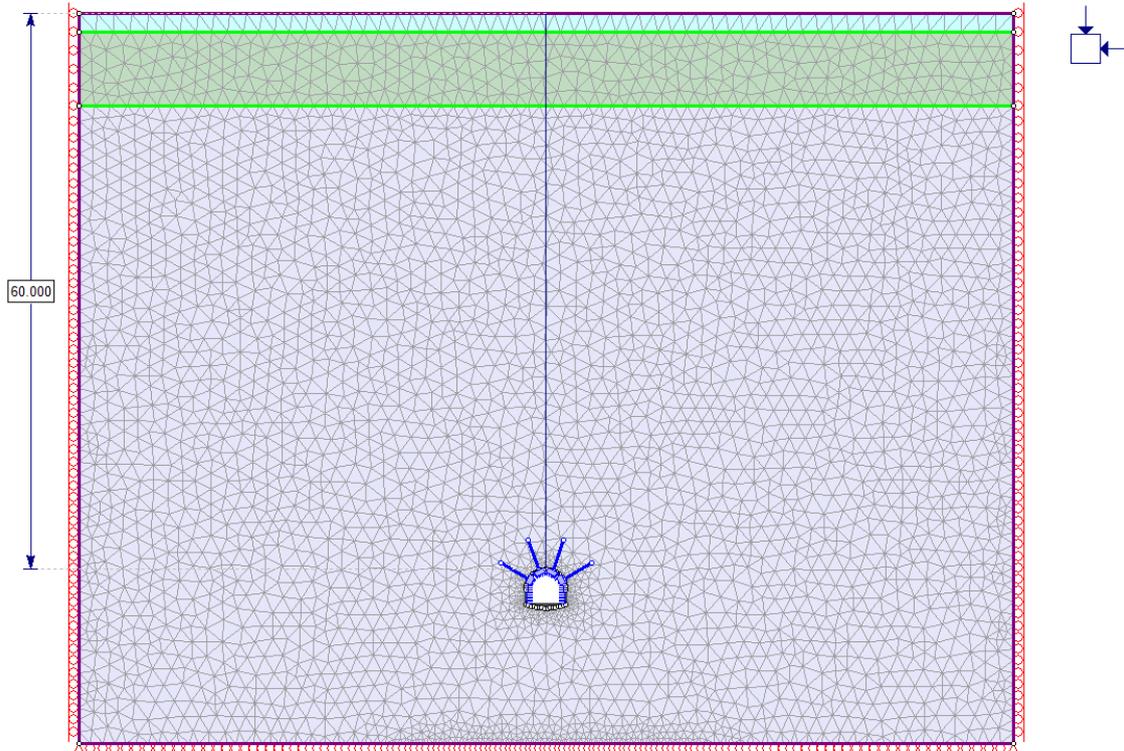


Figura 9.23 – Galleria di collegamento - Sezione A0c – Geometria del modello agli elementi finiti

La seguente Figura 9.24 presenta la distribuzione degli spostamenti radiali al contorno del cavo al termine dell'analisi 1. Come si può osservare, gli spostamenti sono limitati e dovuti a deformazioni in campo quasi completamente elastico al contorno del cavo. Gli spostamenti sono compresi tra 2 e 5 mm.

Le zone plastiche al contorno del cavo sono limitate alla parte centrale dei piedritti ed al fondo scavo, si veda a riguardo la seguente Figura 9.25 che descrive la distribuzione delle tensioni principali e dei punti plastici al contorno del cavo.

Le sollecitazioni agenti nello spritz-beton sono ridotte, Figura 9.26, e garantiscono elevati fattori di sicurezza rispetto ai limiti di resistenza dei materiali, Figura 9.27. I chiodi Swellex sono interessati da una azione assiale massima inferiore a 20 kN, Figura 9.28, valore molto limitato e pienamente compatibile con le caratteristiche dei sostegni.

Per quanto riguarda i rivestimenti definitivi, nelle seguenti Figura 9.30, Figura 9.31, Figura 9.32 è proposta la distribuzione delle sollecitazioni agenti sugli stessi, e la seguente tabella di Figura 9.29 riassume le verifiche strutturali eseguite nell'ipotesi in cui il rivestimento definitivo sia privo di armatura. Come si può vedere, tutte le verifiche sono pienamente soddisfatte anche in assenza di armatura.

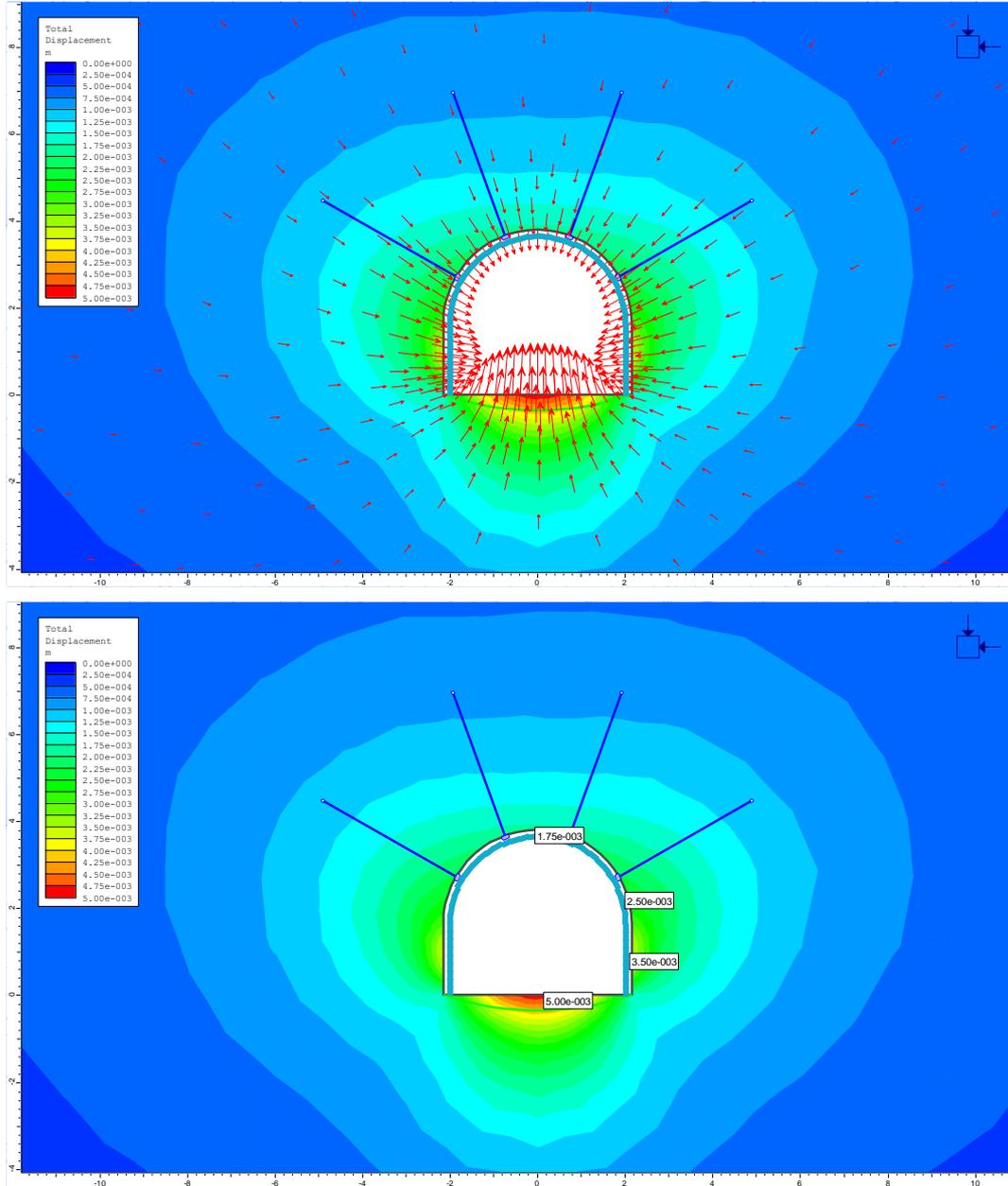


Figura 9.24 – Galleria di collegamento - Sezione A0c – Analisi agli elementi finiti: vettori di spostamento e spostamenti radiali al termine dell'analisi 1

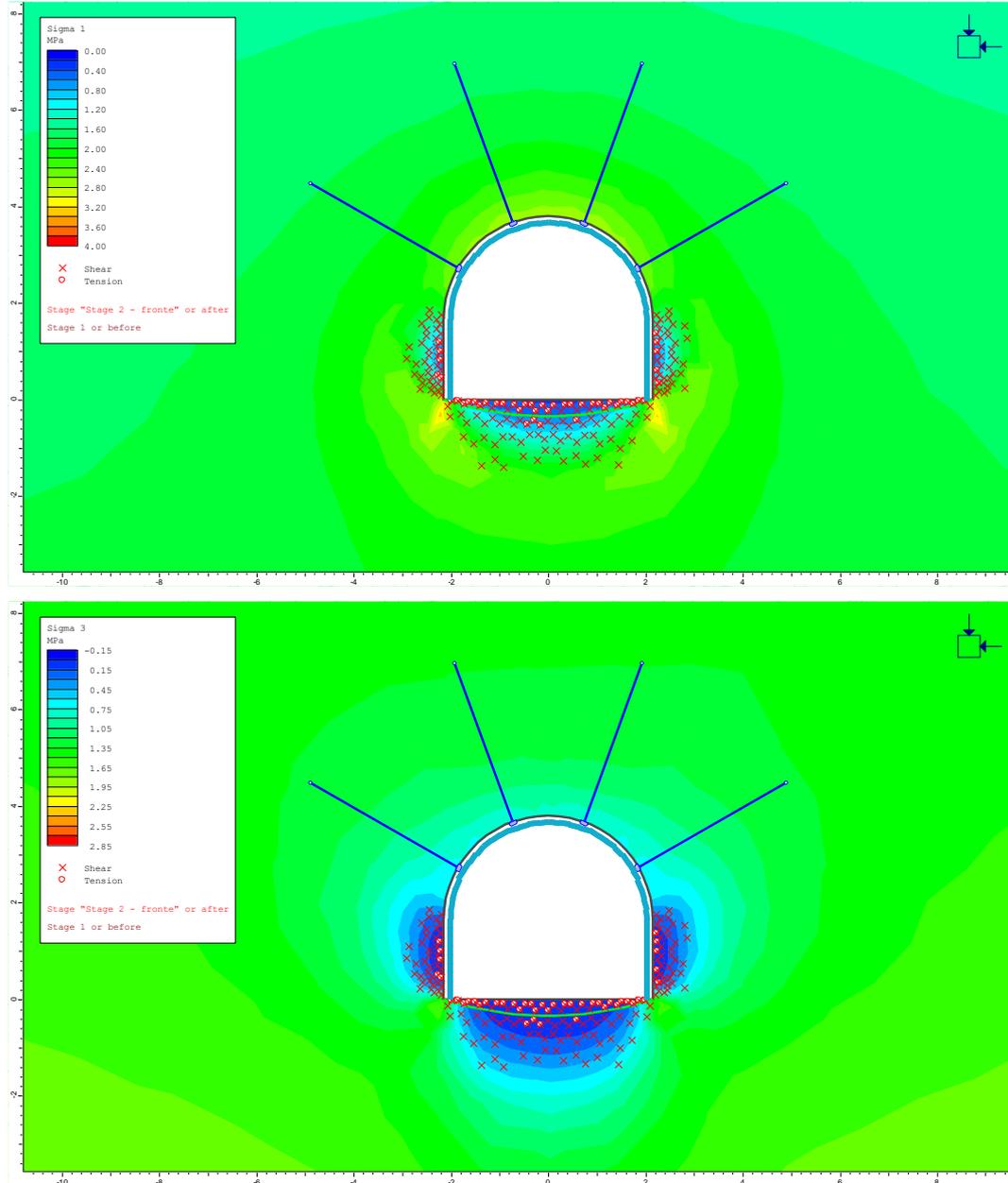


Figura 9.25 – Galleria di collegamento - Sezione A0c – Analisi agli elementi finiti: distribuzione della tensione principale massima e minima e dei punti plastici al termine dell'analisi 1

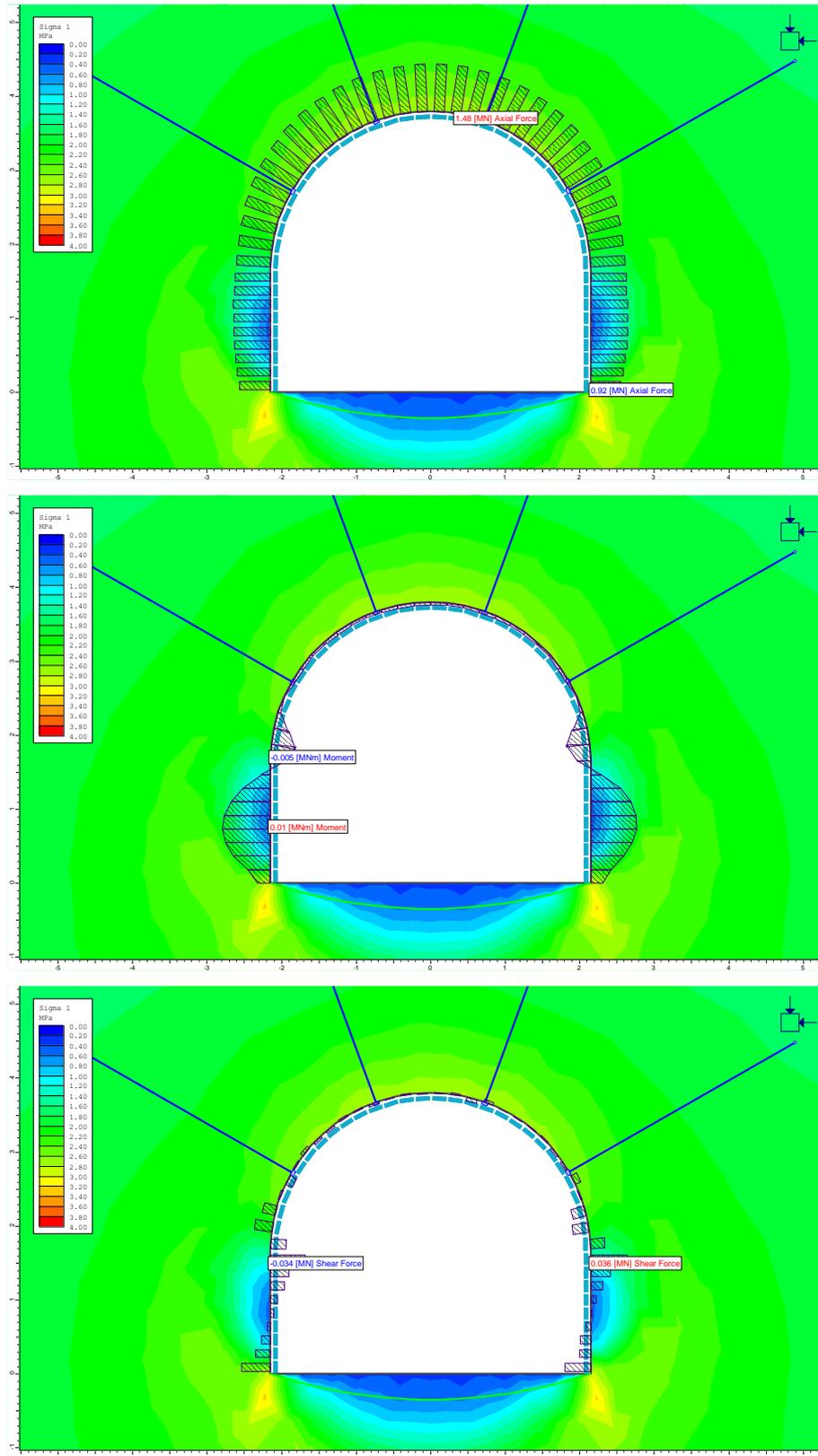
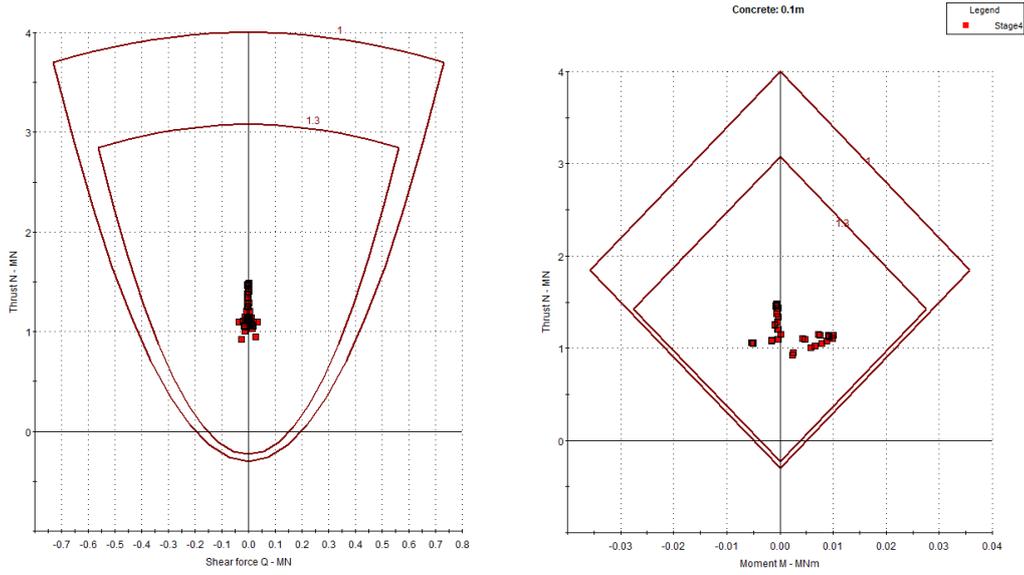


Figura 9.26 – Galleria di collegamento - Sezione A0c – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nello spritz-beton



Support Element: Prerivestimento

Figura 9.27 – Galleria di collegamento - Sezione A0c – Analisi agli elementi finiti: diagrammi di interazione dello spritz-beton

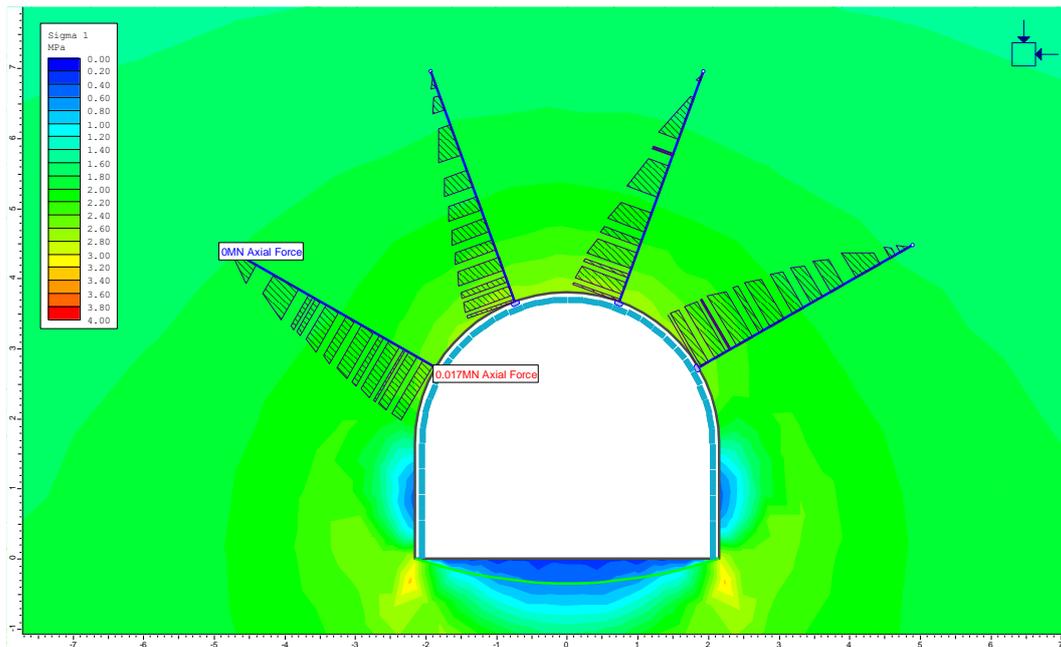


Figura 9.28 – Galleria di collegamento - Sezione A0c – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N agenti nei chiodi Swellex



Rck	40	MPa	Resistenza cubica a compressione
f _{ck}	33,2	MPa	Resistenza cilindrica a compressione
f _{cm}	41,2	MPa	Resistenza media cilindrica a compressione
f _{ctm}	3,10	MPa	Resistenza media a trazione semplice
f _{ctk}	2,17	MPa	Resistenza caratteristica a trazione semplice (frattile 5 %)
f _{cd}	18,81	MPa	Resistenza di progetto a compressione
f _{ctd}	1,45	MPa	Resistenza di progetto a trazione
f _{cttd}	1,23	MPa	Resistenza a trazione di progetto per calcestruzzo non armato o debolmente armato
σ _{ctm}	8,89	MPa	

Analisi statica

Verifica cls non armato

Elemento strutturale	b	h	N _{max}	M _{max}	V _{max}	N _{Ed}	x	N _{Rd}	F _{s,N}	V _{Ed}	σ _c	δ	f _{cvd}	V _{Rd}	F _{s,V}
	cm	cm	kN	kNm	kN	kN	cm	kN		kN	MPa		MPa	kN	
Calotta	100	30	845	7	11,0	1098,5	28,3	5332	0,21	14	3,88	-	2,51	473,3	0,03
Piedritto	100	30	1040	13	3,0	1352	27,5	5174	0,26	4	4,92	-	2,75	503,9	0,01
Muretta	100	40	592	27	245	769,6	30,9	5809	0,13	319	2,49	-	2,14	440,3	0,72
Arco rovescio	100	40	828	56	2	1076,4	26,5	4981	0,22	3	4,07	-	2,55	450,3	0,01

Analisi sismica 7a

Verifica cls non armato

Elemento strutturale	b	h	N _{max}	M _{max}	V _{max}	N _{Ed}	x	N _{Rd}	F _{s,N}	V _{Ed}	σ _c	δ	f _{cvd}	V _{Rd}	F _{s,V}
	cm	cm	kN	kNm	kN	kN	cm	kN		kN	MPa		MPa	kN	
Calotta	100	30	660	5	7,0	660	28,5	5369	0,12	7	2,32	-	2,09	396,5	0,02
Piedritto	100	30	836	18	8	836	25,7	4834	0,17	8	3,25	-	2,35	402,1	0,02
Muretta	100	40	508	10	202	508	36,1	6785	0,07	202	1,41	-	1,80	432,9	0,47
Arco rovescio	100	40	828	41	3	828	30,1	5662	0,15	3	2,75	-	2,21	443,8	0,01

Analisi sismica 7b

Verifica cls non armato

Elemento strutturale	b	h	N _{max}	M _{max}	V _{max}	N _{Ed}	x	N _{Rd}	F _{s,N}	V _{Ed}	σ _c	δ	f _{cvd}	V _{Rd}	F _{s,V}
	cm	cm	kN	kNm	kN	kN	cm	kN		kN	MPa		MPa	kN	
Calotta	100	30	1088	14	4,0	1088	27,4	5160	0,21	4	3,97	-	2,53	462,1	0,01
Piedritto	100	30	1294	22	7	1294	26,6	5004	0,26	7	4,86	-	2,74	485,3	0,01
Muretta	100	40	681	57	332	681	23,3	4376	0,16	332	2,93	-	2,26	350,5	0,95
Arco rovescio	100	40	846	70	0	846	23,5	4412	0,19	0	3,61	-	2,44	381,2	0,00

Figura 9.29 – Galleria di collegamento - Sezione A0c – Analisi agli elementi finiti: verifiche strutturali del rivestimento definitivo

c_0969 - Comune di Genova - Prot. 22/11/2022. 0445245.E

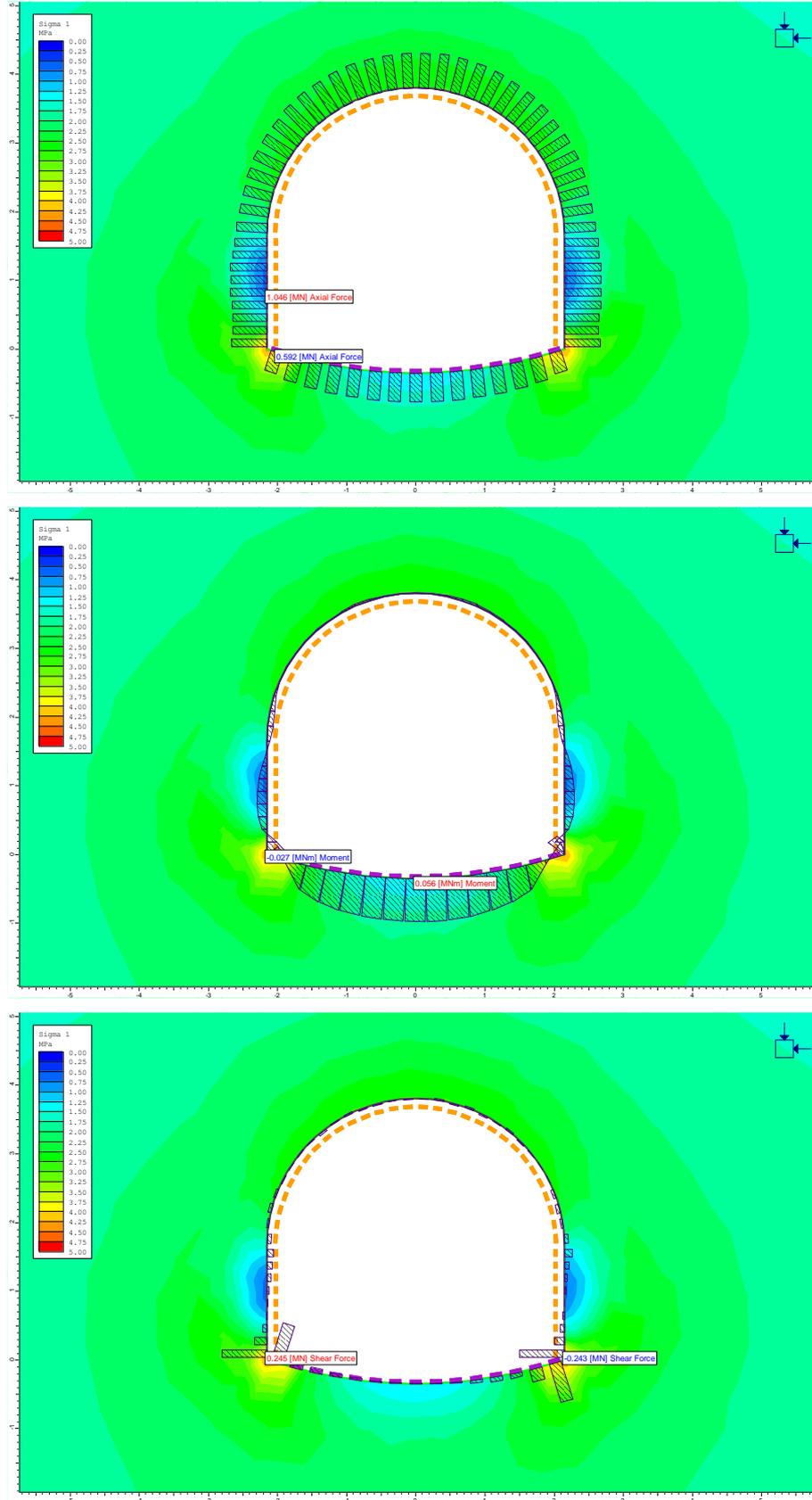


Figura 9.30 – Galleria di collegamento - Sezione A0c – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento definitivo al termine del detensionamento, fase 6

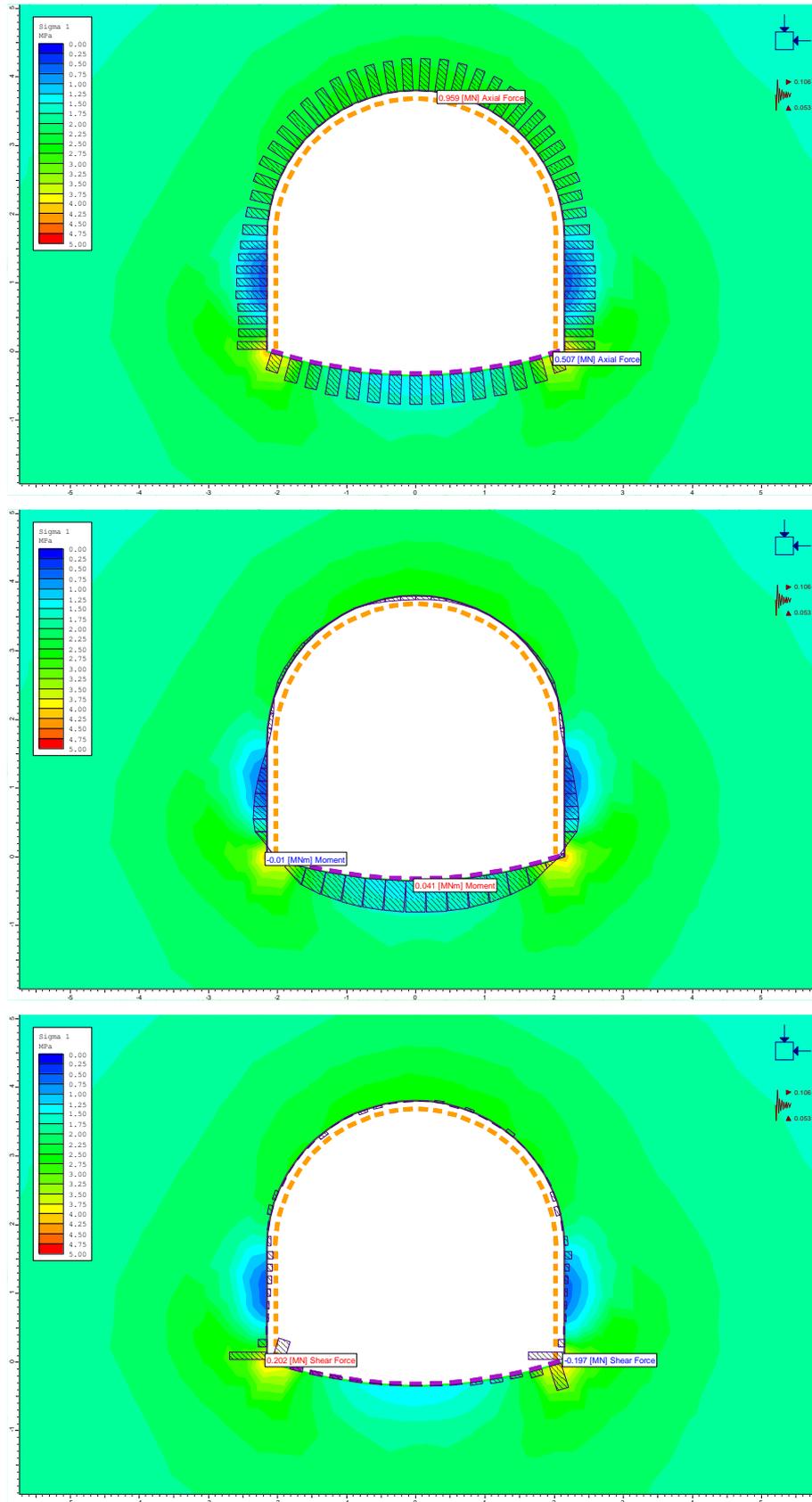


Figura 9.31 – Galleria di collegamento - Sezione A0c – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento definitivo al termine del detensionamento, fase 7a

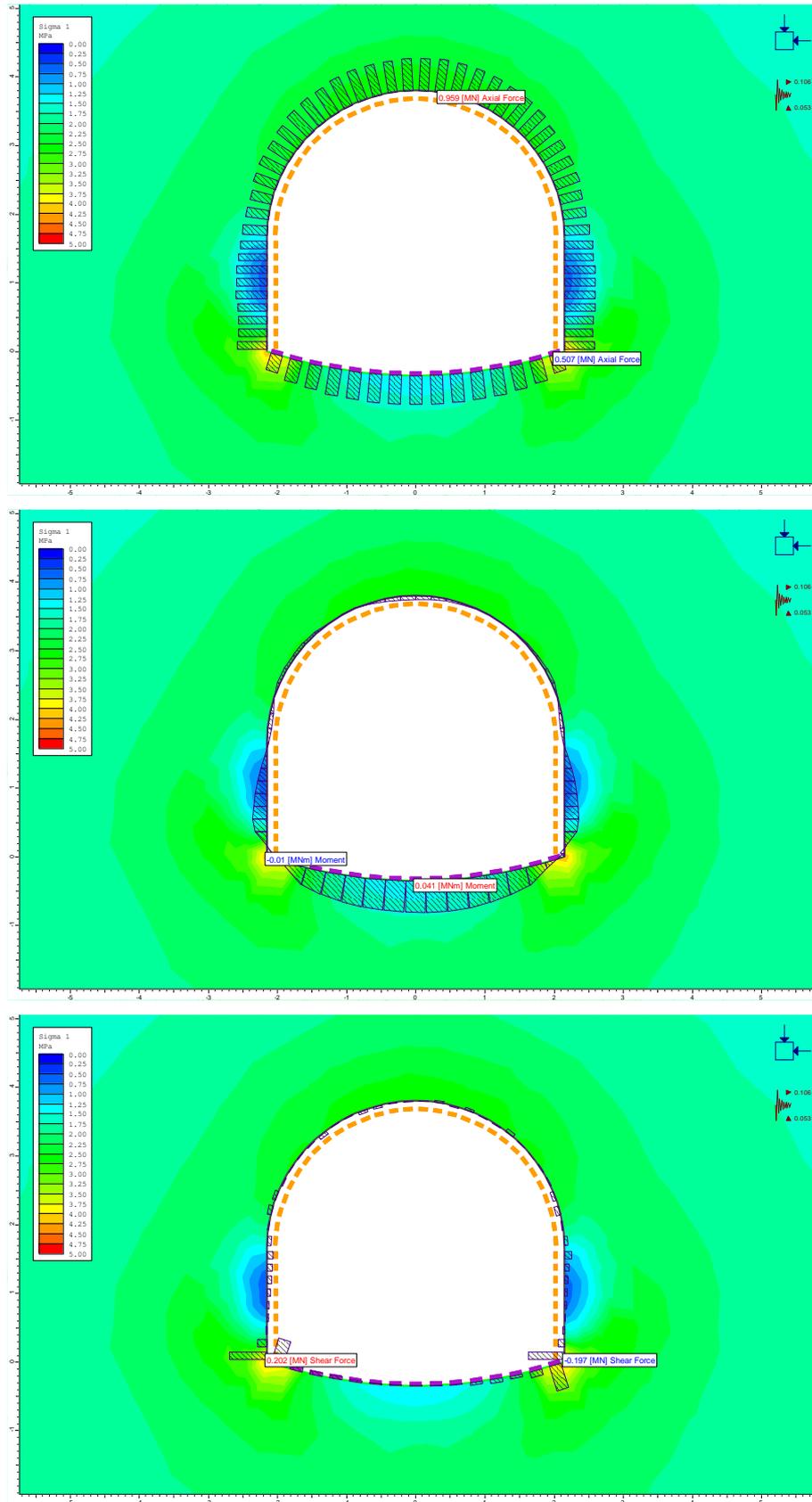


Figura 9.32 – Galleria di collegamento - Sezione A0c – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento definitivo al termine del detensionamento, fase 7b



10. ANALISI DEL COMPORTAMENTO TENSO- DEFORMATIVO DELLA CAMERA DI DISSIPAZIONE

10.1 Premessa

Come anticipato, lo scavo della camera di dissipazione verrà eseguito adottando una sezione di scavo caratterizzata da un raggio pari a 5.50 m.

La lunghezza esigua della camera di dissipazione, pari a circa 21,80m, rende fortemente tridimensionale il problema della stabilità del cavo, dal momento che la sezione B0d presenta un diametro equivalente di circa 11 m.

Al fine di valutare l'efficacia delle sezioni tipo proposte in relazione all'ammasso roccioso che ci si attende al contorno della camera di dissipazione, si procederà comunque all'analisi tenso-deformativa della sezione tipo B0d come se su questa gravasse l'intero processo di rilassamento del cavo, senza considerare l'effetto arco che si verrà a creare in relazione alla tridimensionalità della geometria. Questa scelta è certamente cautelativa in quanto associa tutto il detensionamento alla sezione in esame.

I criteri adottati per l'analisi della sezione tipo sono gli stessi già esposti al capitolo 8 per la galleria di collegamento.

10.2 Analisi sezione tipo B0d

La sezione B0d è stata calcolata per una copertura di 10 m sulla calotta ed un indice GSI pari a 30, rappresentativo delle condizioni geomeccaniche medie dell'unità AMT.

10.2.1 Analisi di stabilità con il metodo di Tamez

L'analisi è stata eseguita sia con i parametri caratteristici che secondo l'approccio A2+M2 da normativa. Le schede riassuntive sono proposte nella seguente Figura 10.1.

Ciascuna scheda riassume nella parte superiore le caratteristiche geometriche, geotecniche del terreno, idrauliche di input dell'analisi e lo schema geometrico del cinematismo di rottura analizzato dal metodo di Tamez. Nella parte inferiore, invece, vengono riassunti i risultati dell'analisi, espressi in termini di fattori di sicurezza al fronte, chiave e globale.

Dal momento che la sezione B0d nella sua geometria finale non viene adottata durante l'avanzamento, ma solo in una successiva fase di allargamento, la verifica di stabilità con il metodo di Tamez viene di seguito proposta per la sezione intermedia di realizzazione della camera di dissipazione, che è quella prevista subito dopo i 6 m della sezione di transizione.

Nel caso in esame, come si può osservare, l'analisi dimostra la piena stabilità del fronte, della chiave e dell'intero cinematismo di rottura in assenza di interventi.



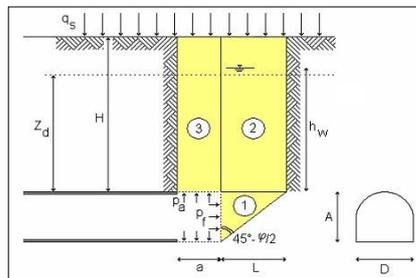
ANALISI DI STABILITA' DI TAMEZ - TABELLE RIEPILOGATIVE

RIASSUNTO DATI DI INGRESSO

GEOMETRIA		
a	lunghezza libera - m	1
A	h galleria - m	6,9
D	largh. galleria - m	7,5
L	estens.longitud.cuneo - m	2,51
H	copertura da calotta - m	15
Z _d	tratto di influenza scavo - m	12,75
S	sezione di scavo - m ²	45,71

TERRENO		
γ	peso di volume - kN/m ³	27
c	coesione - kPa	34
φ	attrito - (°)	50
q _s	sovaccarico - kPa	0

CONDIZIONI IDRAULICHE		
γ _w	peso di volume - kN/m ³	10
α ₁	condizioni di drenaggio	0,4
β	permeab.ammasso	0,9
h _w	carico acqua su calotta (m)	0
	presenza di raggiera drenante in chiave?	no



RIASSUNTO RISULTATI - p_a = 0, p_f = 0

STABILITA' DEL FRONTE		
p _f	pressione al fronte - kPa	0,00
FS _f	fattore di sicurezza	1,8

STABILITA' DELLA CHIAVE		
p _a	pressione applicata in chiave - kPa	0,0
FS _{c pl}	fattore di sicurezza alla plasticizzazione	0,74
p _{a opt}	pressione in chiave per evitare fascia plastica - kPa	375
FS _c	fattore di sicurezza alla stabilità	1,3

STABILITA' GLOBALE		
FS _g	fattore di sicurezza	1,44

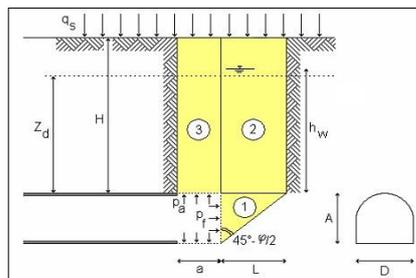
ANALISI DI STABILITA' DI TAMEZ - TABELLE RIEPILOGATIVE

RIASSUNTO DATI DI INGRESSO

GEOMETRIA		
a	lunghezza libera - m	1
A	h galleria - m	6,9
D	largh. galleria - m	7,5
L	estens.longitud.cuneo - m	3,76
H	copertura da calotta - m	15
Z _d	tratto di influenza scavo - m	12,75
S	sezione di scavo - m ²	45,71

TERRENO		
γ	peso di volume - kN/m ³	25
c	coesione - kPa	27,2
φ	attrito - (°)	32,9
q _s	sovaccarico - kPa	0

CONDIZIONI IDRAULICHE		
γ _w	peso di volume - kN/m ³	10
α ₁	condizioni di drenaggio	0,4
β	permeab.ammasso	0,9
h _w	carico acqua su calotta (m)	0
	presenza di raggiera drenante in chiave?	no



RIASSUNTO RISULTATI - p_a = 0, p_f = 0

STABILITA' DEL FRONTE		
p _f	pressione al fronte - kPa	0,00
FS _f	fattore di sicurezza	1,1

STABILITA' DELLA CHIAVE		
p _a	pressione applicata in chiave - kPa	0,0
FS _{c pl}	fattore di sicurezza alla plasticizzazione	1,34
p _{a opt}	pressione in chiave per evitare fascia plastica - kPa	326
FS _c	fattore di sicurezza alla stabilità	1,9

STABILITA' GLOBALE		
FS _g	fattore di sicurezza	1,0

Figura 10.1 – Camera di dissipazione - Sezione B0d - Analisi Tamez con parametri caratteristici (sopra) e secondo NTC (sotto)



10.2.2 Analisi agli elementi finiti

I risultati dell'analisi vengono proposti con riferimento alla fase 4 dell'analisi 1 ed alla fase 6 dell'analisi 2. La geometria di riferimento è di seguito proposta:

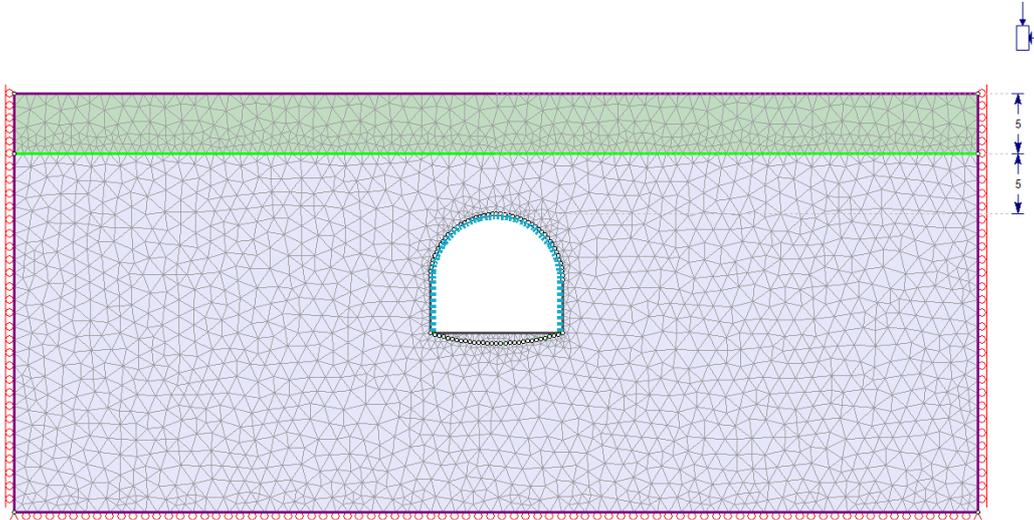


Figura 10.2 – Camera di dissipazione - Sezione B0d – Geometria del modello agli elementi finiti

La seguente Figura 10.3 presenta la distribuzione degli spostamenti radiali al contorno del cavo al termine dell'analisi 1. Come si può osservare, gli spostamenti sono limitati e dovuti a deformazioni in campo quasi completamente elastico al contorno del cavo. Gli spostamenti sono ovunque inferiori ai 4 mm.

Le zone plastiche al contorno del cavo sono limitate alla parte centrale dei piedritti, si veda al riguardo la seguente Figura 10.4 che descrive la distribuzione delle tensioni principali e dei punti plastici al contorno del cavo.

Le sollecitazioni agenti sui priverestimenti sono ridotte, Figura 10.5, e garantiscono adeguati fattori di sicurezza rispetto ai limiti di resistenza dei materiali, Figura 10.6.

L'analisi 2 della sezione B0d arriva fino alla posa dei rivestimenti definitivi della camera di dissipazione.

Nelle seguenti Figura 10.9, Figura 10.10, Figura 10.11 è proposta la distribuzione delle sollecitazioni agenti sugli stessi, e la seguente tabella di Figura 10.7 riassume le verifiche strutturali eseguite nell'ipotesi in cui il rivestimento definitivo sia privo di armatura. Come si può vedere, tutte le verifiche sono soddisfatte ad eccezione dell'arco rovescio, che richiede armatura per garantire l'equilibrio, Figura 10.8. La camera di dissipazione verrà comunque armata completamente, per garantire un sostegno adeguato al rivestimento del pozzo di caduta.



c_d969.Comune di Genova - Prot. 22/11/2022.0445245.E

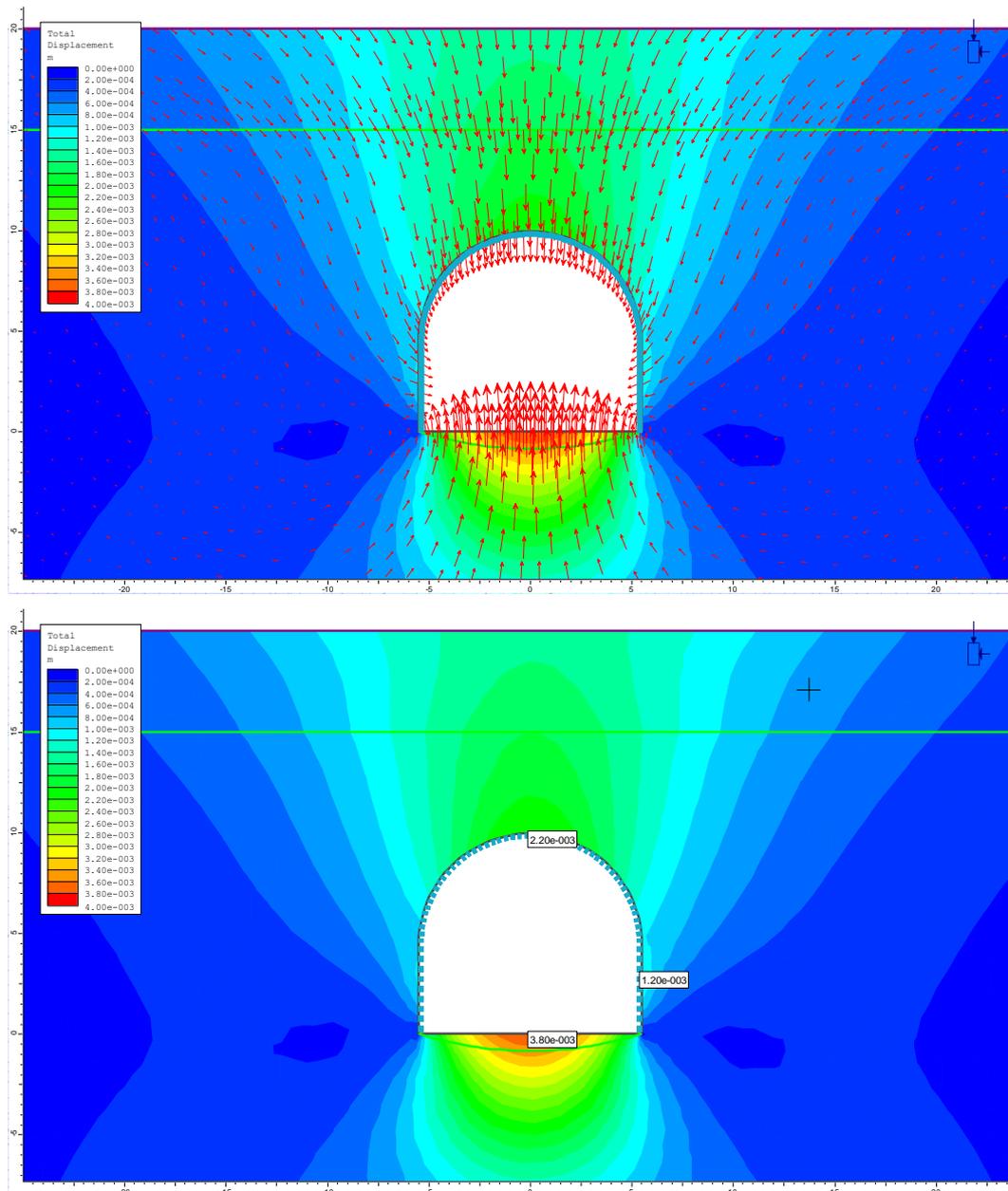


Figura 10.3 – Camera di dissipazione - Sezione B0d – Analisi agli elementi finiti: vettori di spostamento e spostamenti radiali al termine dell'analisi 1

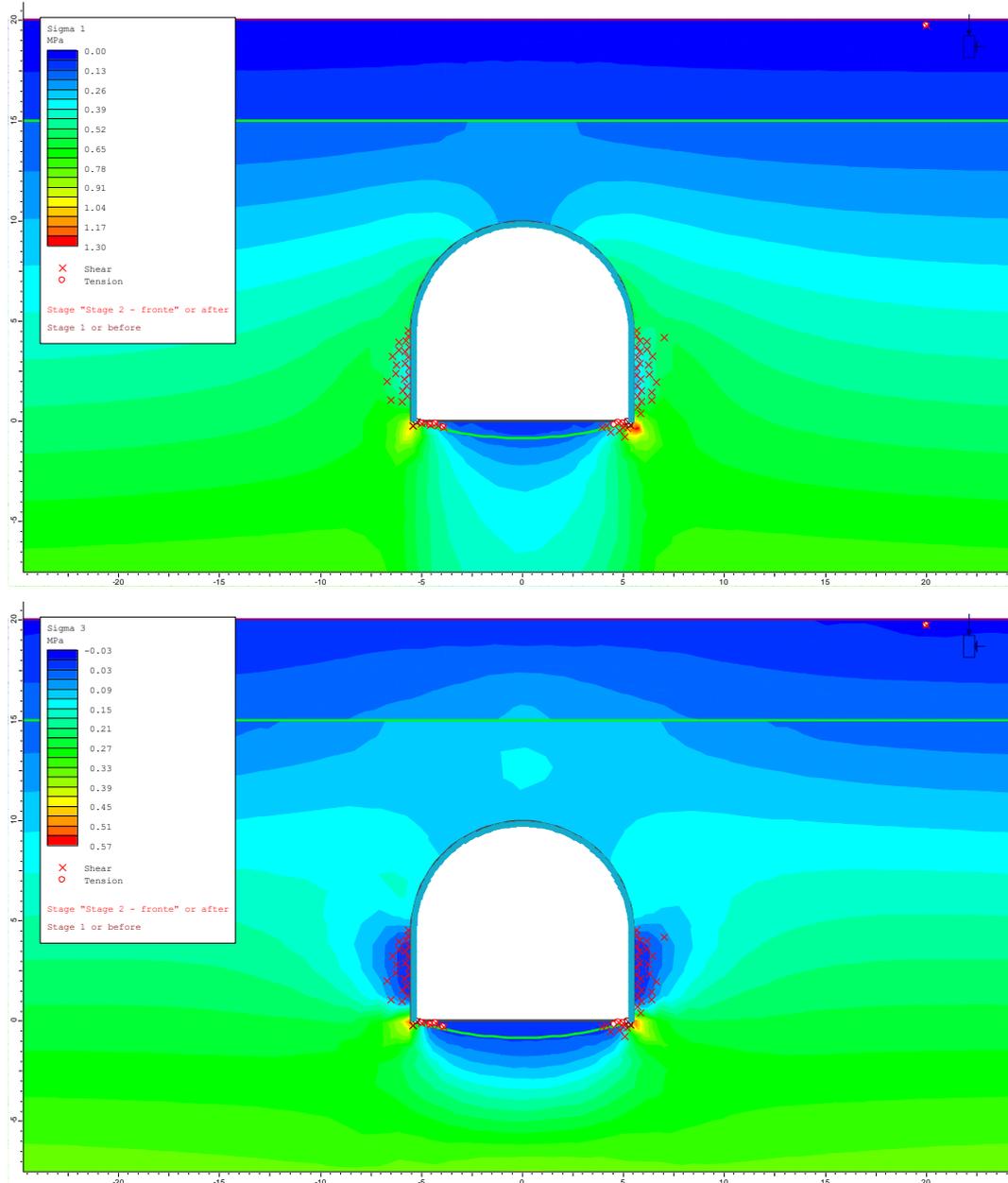


Figura 10.4 – Camera di dissipazione - Sezione B0d – Analisi agli elementi finiti: distribuzione della tensione principale massima e minima e dei punti plastici al termine dell'analisi 1

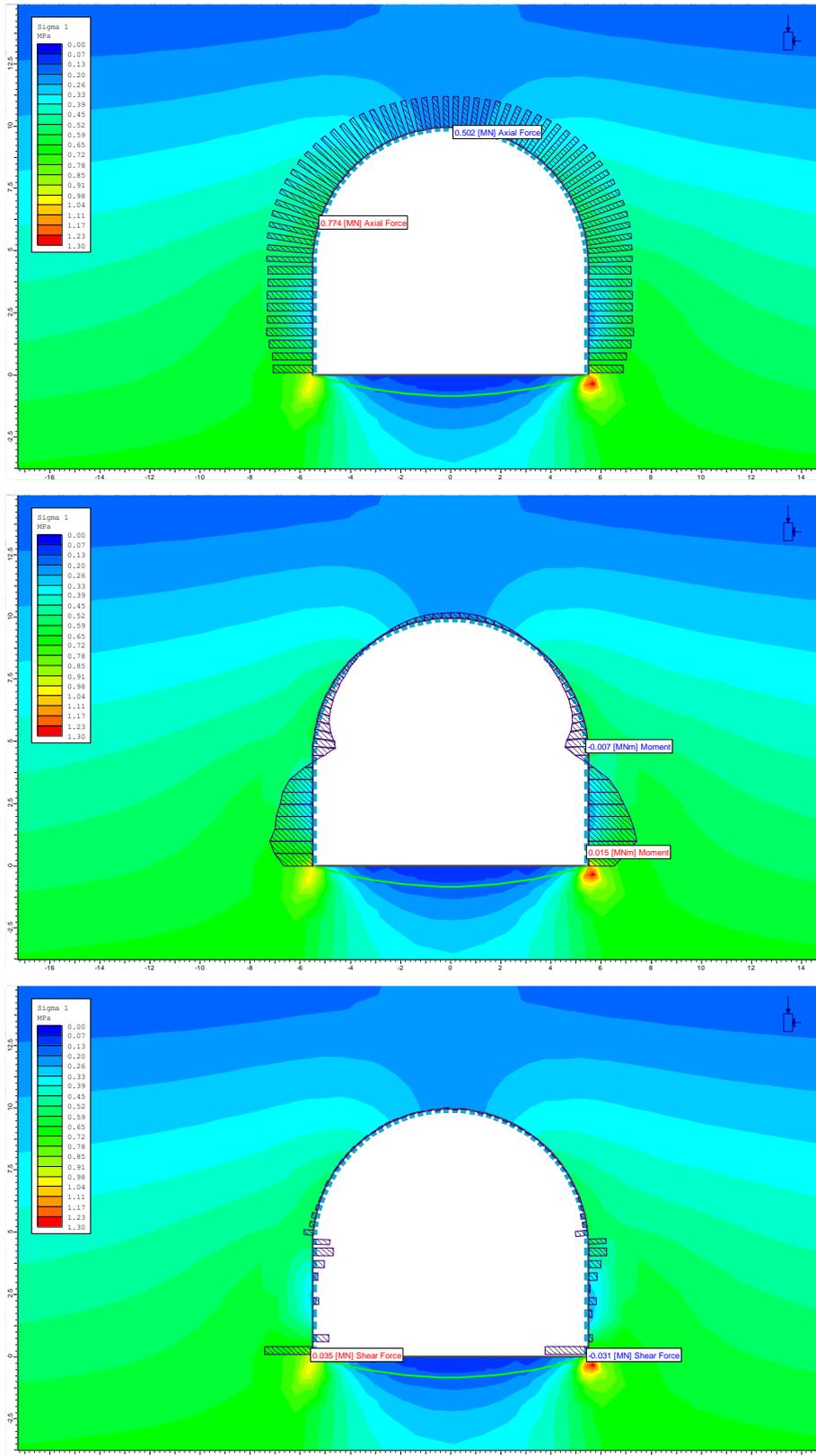
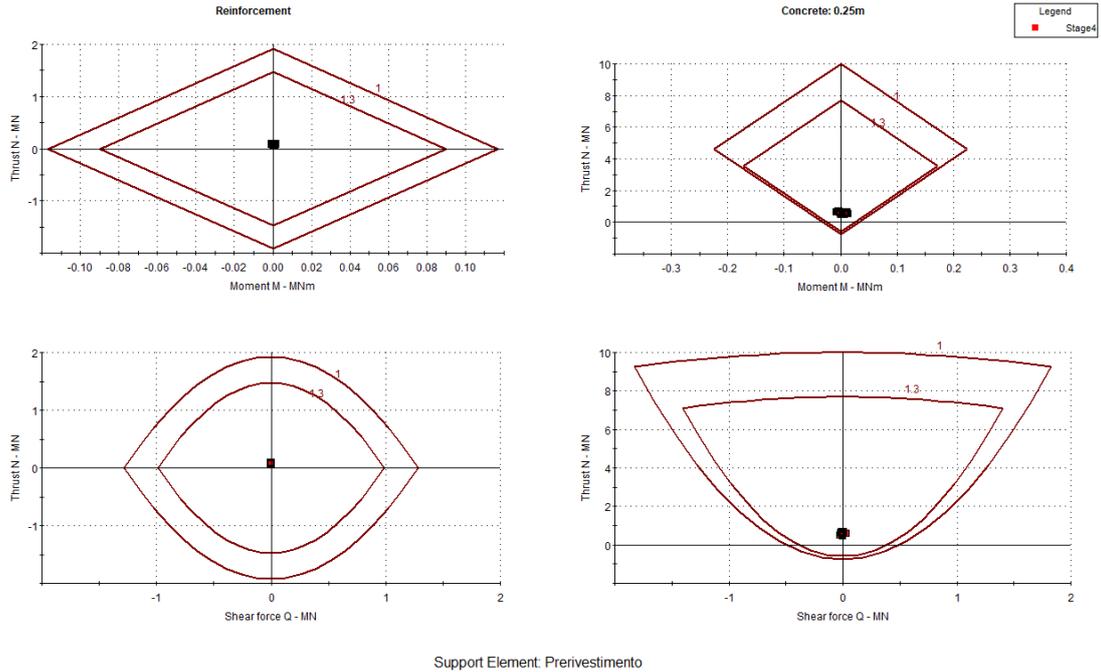


Figura 10.5 – Camera di dissipazione - Sezione B0d – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento di prima fase



Support Element: Prirvestimento

Figura 10.6 – Camera di dissipazione - Sezione B0d – Analisi agli elementi finiti: diagrammi di interazione dei prirvestimenti

Rck	40	MPa	Resistenza cubica a compressione
f _{ck}	33,2	MPa	Resistenza cilindrica a compressione
f _{cm}	41,2	MPa	Resistenza media cilindrica a compressione
f _{ctm}	3,10	MPa	Resistenza media a trazione semplice
f _{ctk}	2,17	MPa	Resistenza caratteristica a trazione semplice (frattile 5%)
f _{cd}	18,81	MPa	Resistenza di progetto a compressione
f _{td}	1,45	MPa	Resistenza di progetto a trazione
f _{cttd}	1,23	MPa	Resistenza a trazione di progetto per calcestruzzo non armato o debolmente armato
σ _{lim}	8,89	MPa	

Analisi statica

Verifica cls non armato

Elemento strutturale	b	h	N _{max}	M _{max}	V _{max}	N _{Ed}	x	N _{Rd}	F _{s,N}	V _{Ed}	σ _c	δ	f _{cvd}	V _{Rd}	F _{s,V}
	cm	cm	kN	kNm	kN	kN	cm	kN		kN	MPa	MPa	MPa	kN	
Calotta	100	70	400	13	2,0	520	63,5	11946	0,04	3	0,82	-	1,59	671,7	0,00
Piedritto	100	70	709	14	4,0	921,7	66,1	12426	0,07	5	1,40	-	1,80	790,9	0,01
Muretta	100	80	719	69	180	934,7	60,8	11440	0,08	234	1,54	-	1,84	747,5	0,31
Arco rovescio	100	80	225	98	6	292,5	-7,1								Nessun equilibrio

Analisi sismica 7a

Verifica cls non armato

Elemento strutturale	b	h	N _{max}	M _{max}	V _{max}	N _{Ed}	x	N _{Rd}	F _{s,N}	V _{Ed}	σ _c	δ	f _{cvd}	V _{Rd}	F _{s,V}
	cm	cm	kN	kNm	kN	kN	cm	kN		kN	MPa	MPa	MPa	kN	
Calotta	100	70	396	16	0,0	396	61,9	11649	0,03	0	0,64	-	1,52	625,7	0,00
Piedritto	100	70	616	21	1	616	63,2	11887	0,05	1	0,97	-	1,65	693,3	0,00
Muretta	100	80	326	54	190	326	46,9	8818	0,04	190	0,70	-	1,54	480,6	0,40
Arco rovescio	100	80	224	82	2	224	6,8	1277	0,18	2	3,30	-	2,36	106,8	0,02

Analisi sismica 7b

Verifica cls non armato

Elemento strutturale	b	h	N _{max}	M _{max}	V _{max}	N _{Ed}	x	N _{Rd}	F _{s,N}	V _{Ed}	σ _c	δ	f _{cvd}	V _{Rd}	F _{s,V}
	cm	cm	kN	kNm	kN	kN	cm	kN		kN	MPa	MPa	MPa	kN	
Calotta	100	70	855	22	2,0	855	64,9	12201	0,07	2	1,32	-	1,77	765,1	0,00
Piedritto	100	70	885	37	6	885	61,6	11596	0,08	6	1,44	-	1,81	743,8	0,01
Muretta	100	80	493	133	340	493	26,0	4900	0,10	340	1,89	-	1,96	340,2	1,00
Arco rovescio	100	80	280	118	3	280	-4,3								Nessun equilibrio

Figura 10.7 – Camera di dissipazione - Sezione B0d – Analisi agli elementi finiti: verifiche strutturali del rivestimento definitivo in assenza di armatura



Sez.tipo B0d - condizione statica+sismica - SLU

Elemento strutturale	b	h	N _{max}	M _{max}	V _{max}	N _{Ed}	M _{Ed}	V _{Ed}	armatura	M _{Rd}	V _{Rd}
	cm	cm	kN	kNm	kN	kN	kNm	kN		kNm	kN
Arco rovescio	100	80	225	98	6	292,5	127,4	7,8	5 φ20	425	-
	100	80	280	118	3	280	118	3	simmetrica	421	-

Sez.tipo B0d - condizione statica+sismica - SLE

Elemento strutturale	b	h	N _{max}	M _{max}	V _{max}	armatura	M _{cr}	w	tensioni - MPa		
	cm	cm	kN	kNm	kN		kNm	mm	cls	acciaio cx	acciaio tx
Arco rovescio	100	80	225	98	6	5 φ20	311	-	1,1	14,6	0,6
	100	80	280	118	3	simmetrica	318	-	1,3	17,7	0,6

Figura 10.8 – Camera di dissipazione - Sezione B0d – Analisi agli elementi finiti: verifiche strutturali di quelle sezioni del rivestimento definitivo che richiedono armatura

c_29969 - Comune di Genova - Prot. 22/11/2022.0445245.E

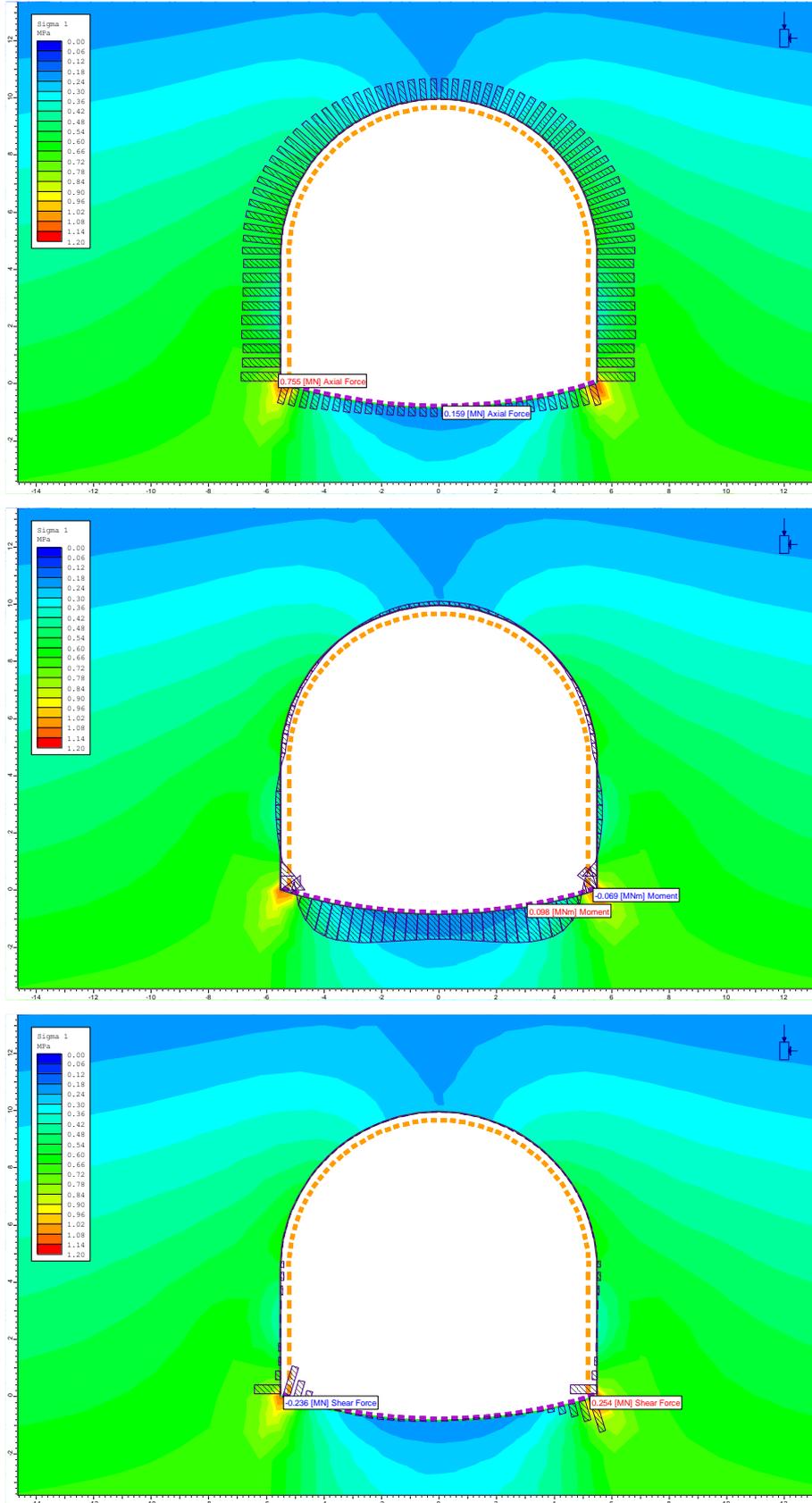


Figura 10.9 – Camera di dissipazione - Sezione B0d – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento definitivo al termine del detensionamento, fase 6

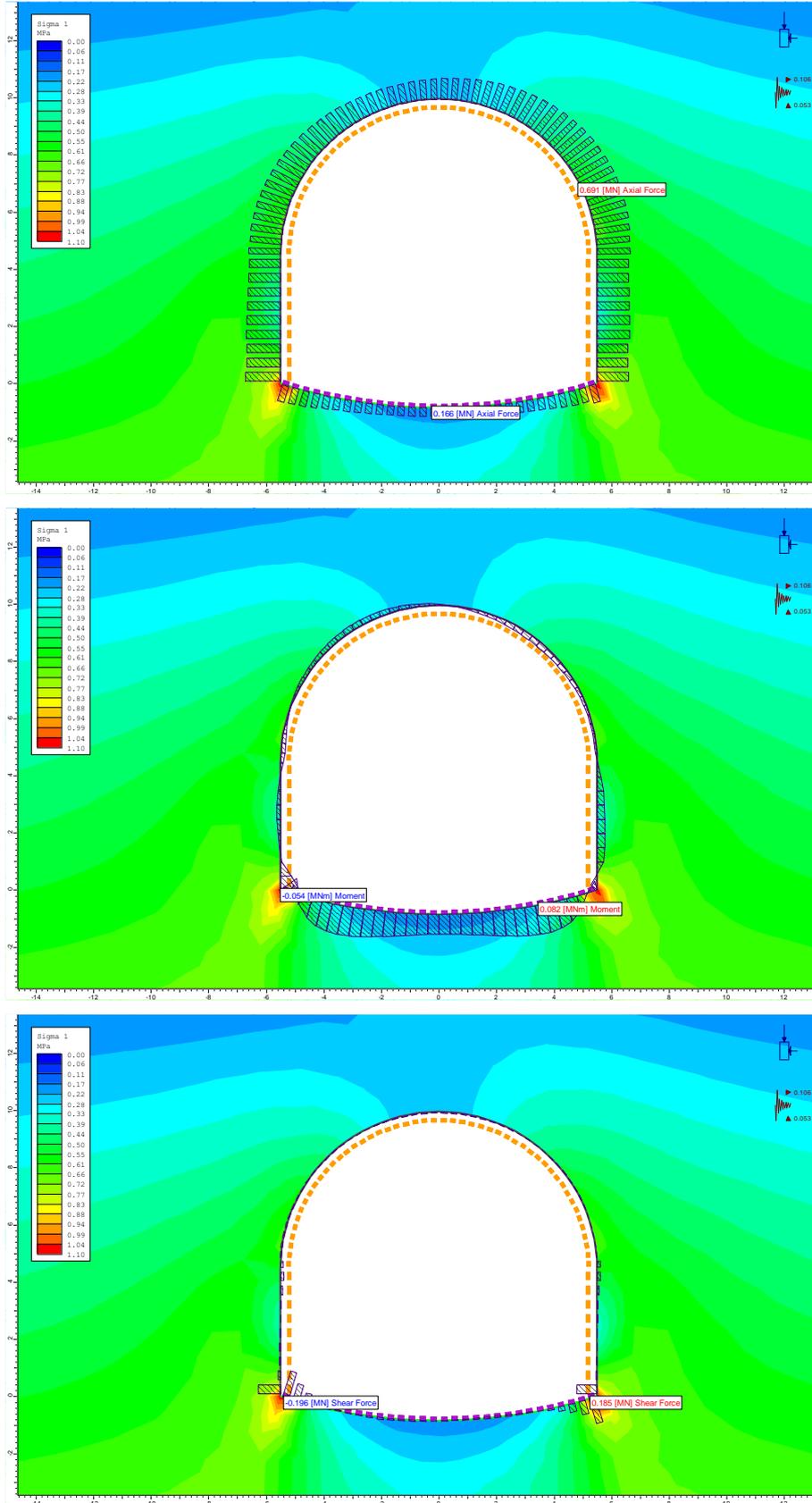


Figura 10.10 – Camera di dissipazione - Sezione B0d – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento definitivo al termine del detensionamento, fase 7a

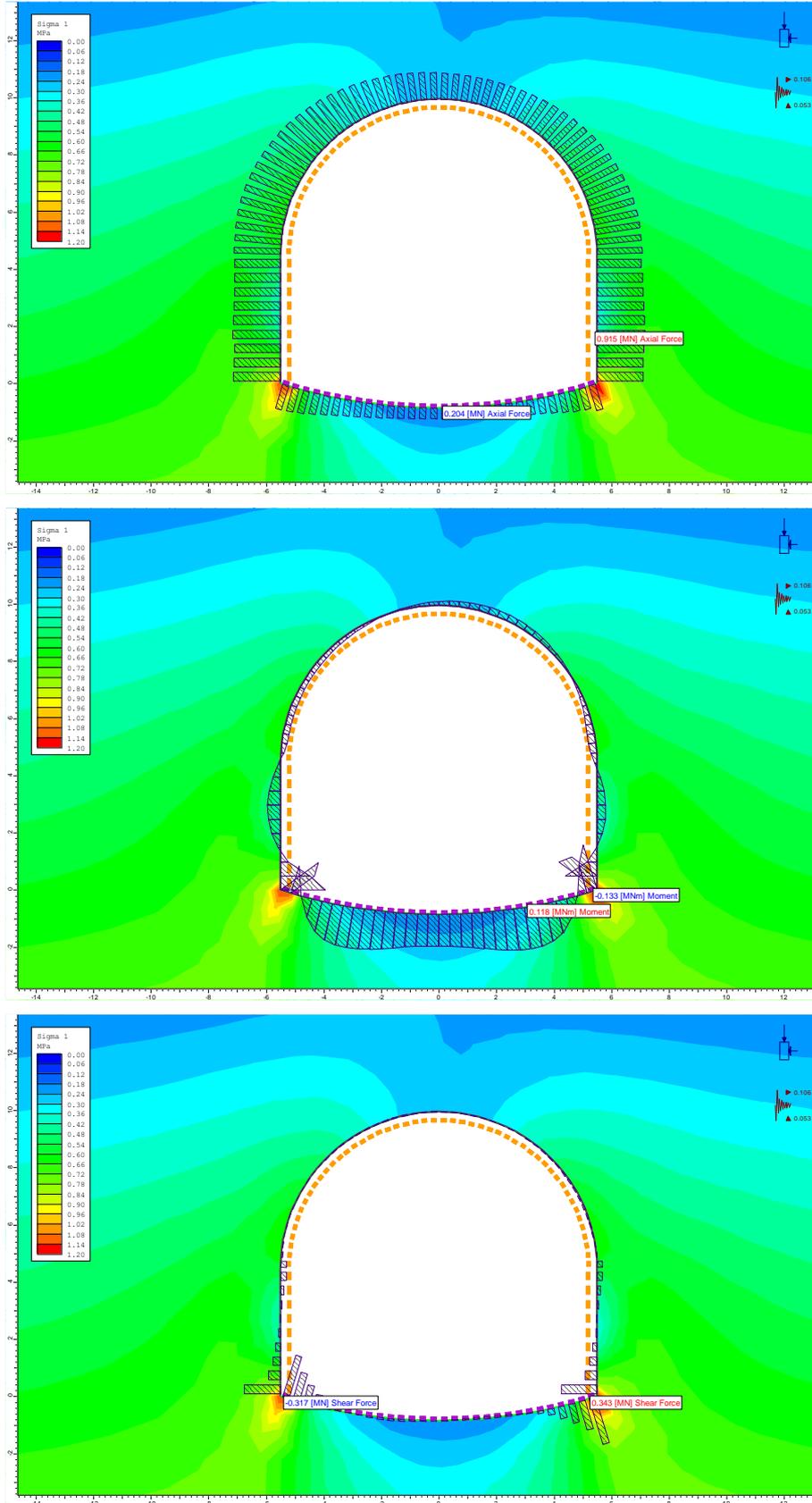


Figura 10.11 – Camera di dissipazione - Sezione B0d – Analisi agli elementi finiti: sollecitazioni N, M, T agenti nel rivestimento definitivo al termine del detensionamento, fase 7b



11. MONITORAGGIO IN CORSO D'OPERA DELLA GALLERIA DI COLLEGAMENTO E DELLA CAMERA DI DISSIPAZIONE

Si presenta nel seguito il programma di monitoraggio previsto per il controllo tenso-deformativo in corso d'opera dell'ammasso interessato dagli scavi della galleria di collegamento e della camera di dissipazione.

Lo scopo delle misure in corso d'opera è essenzialmente il controllo del comportamento delle strutture di rivestimento nei confronti delle condizioni geomeccaniche effettivamente incontrate in galleria, consentendo la taratura delle tecnologie esecutive e l'affinamento delle soluzioni progettuali adottate. Più in particolare con le misure in corso d'opera si cercano le seguenti risposte:

- il controllo della sicurezza;
- la determinazione e verifica delle proprietà dei materiali;
- la verifica della validità delle scelte progettuali con riferimento al metodo costruttivo, e l'adeguamento della tempistica delle operazioni in cantiere condotta sulla base delle misure in sito;
- il confronto delle previsioni teoriche con il comportamento geomeccanico reale.

Per quanto concerne le opere in progetto, il programma di monitoraggio previsto si articola in:

- rilievo sistematico delle fasi esecutive e delle cadenze di avanzamento;
- stazioni sistematiche di misura delle convergenze;
- rilievo geologico dei fronti di scavo;
- stazioni di controllo, che prevedono la misura dello stato tensionale nei rivestimenti di prima fase e dello stato deformativo dell'ammasso a distanze progressive al contorno del cavo.

Per la descrizione dettagliata delle caratteristiche delle strumentazioni e le indicazioni sulla posa in opera si rimanda allo specifico elaborato grafico.

L'insieme dei dati forniti dalla campagna di monitoraggio concorrerà alla determinazione delle informazioni necessarie per la gestione dell'avanzamento e la scelta delle sezioni tipo, consentendo la taratura delle tecnologie esecutive e l'affinamento delle soluzioni progettuali adottate. Inoltre, i calcoli realizzati in corrispondenza delle sezioni rappresentative delle gallerie in progetto permetteranno di realizzare confronti in termini di spostamenti e/o sollecitazioni sui sostegni, tra i risultati attesi e definiti mediante calcoli numerici, e l'effettiva situazione in sito.

Per condurre questo lavoro, che rappresenta una vera e propria appendice della progettazione, è necessario disporre lungo il tracciato della galleria di un congruo numero di sezioni strumentate, dove poter raccogliere i dati sul comportamento del sistema statico costituito dai rivestimenti e dall'ammasso roccioso prospiciente la cavità.

I dati così raccolti permetteranno sia il controllo diretto degli effetti dell'avanzamento della galleria verificando che i valori di tensione e deformazione instauratisi siano compatibili con gli interventi adottati, sia l'estrapolazione degli stessi, in particolare quelli provenienti dai primi avanzamenti, anche per le tratte



di galleria ancora da scavare. Ciò consente quindi, qualora ce ne sia bisogno, di affinare il progetto delle tratte successive dal momento che il monitoraggio rappresenta l'esito di “una prova a vera grandezza dello scavo della galleria”.

Per fare sì che i dati provenienti dai controlli in corso d'opera siano da considerarsi attendibili e comunque facilmente controllabili e confrontabili, è necessario che:

- le strumentazioni impiegate siano affidabili
- le strumentazioni impiegate siano poste in opera correttamente
- l'installazione degli strumenti sia documentata accuratamente
- le sezioni strumentate siano poste in opera in numero congruo
- le sezioni strumentate siano accuratamente documentate da un punto di vista geologico-geomeccanico
- le letture siano condotte secondo un programma preciso
- i dati raccolti siano presentati in modo organico e facilmente interpretabile.

Per il conseguimento di questo obiettivo vengono fornite di seguito le principali indicazioni per la realizzazione delle due tipologie di sezione strumentata che si prevede di realizzare lungo la galleria e per l'esecuzione dei rilievi geostrutturali del fronte di scavo.

11.1 Stazioni di convergenza

La lettura della convergenza del profilo di scavo permette di avere un riscontro immediato del comportamento delle opere di stabilizzazione.

La misura della convergenza della cavità è un semplice metodo di controllo dell'evolversi dello stato tenso-deformativo a tergo delle opere di stabilizzazione, che consente in modo molto pratico di comprendere rapidamente se l'ammasso scavato si sta portando verso una condizione di equilibrio stabile o meno.

Affinché sia possibile una buona interpretazione dei fenomeni che stanno avvenendo nell'ammasso a seguito dello scavo è necessario che le letture siano effettuate secondo un adeguato programma che consenta di seguire idoneamente il loro evolversi nel tempo.

La stazione di convergenza è illustrata sul relativo elaborato di progetto. La sezione di galleria sarà provvista di 5 barrette o chiodi di convergenza.

Al fine di poter contare su un'affidabile descrizione del comportamento deformativo del cavo, è importante che le mire vengano installate a ridosso del fronte, prima di iniziare la fase di avanzamento.

Esse devono misurare lo spostamento radiale tra roccia e rivestimento. Il chiodo, quindi, deve essere alla testa di una barretta che verrà infissa nella roccia per circa 10 cm e lungo abbastanza per continuare le misure attraverso il priverestimento, fino al getto del rivestimento definitivo, quando la barretta verrà abbandonata.

La barretta o chiodo dovrà leggere le tre componenti di spostamento, due nel piano della sezione x e y ed una in quella normale z diretta verso il fronte di avanzamento. Le due componenti x e y verranno utilizzate per valutare lo spostamento complessivo radiale secondo i diametri equivalenti indicati sul disegno (= convergenza). La precisione della lettura deve essere 0.1 mm.



La frequenza delle letture deve essere la seguente:

- lettura di zero, subito dopo l'installazione;
- durante l'avanzamento del fronte e fino al getto dell'arco rovescio, una lettura al giorno;
- fino al getto del rivestimento definitivo, le barrette tra arco rovescio e rivestimento definitivo verranno lette ogni 3 giorni;
- a fronte fermo, per periodi prolungati superiori ai 3 giorni, le barrette, tutte, dovranno essere lette con frequenza giornaliera, almeno nelle sezioni ove non è ancora presente l'arco rovescio.

A corredo di ciascuna lettura dovrà essere sempre indicata la posizione del fronte, dell'arco rovescio e del rivestimento definitivo in calotta.

La posizione di installazione delle stazioni di convergenza è indicata nel profilo geomeccanico delle gallerie in progetto.

11.2 Stazioni di controllo

Per completare maggiormente il quadro dello stato tenso-deformativo che lo scavo della galleria induce nell'ammasso, è necessario che le misure di convergenza siano integrate con la misura della pressione che si instaura a tergo dei rivestimenti medesimi e con la misura dello stato deformativo in profondità nell'ammasso roccioso.

Il controllo incrociato tra le diverse misurazioni così disponibili permetterà innanzitutto di individuare le misure affette da errori, che potranno essere quindi scartate, e soprattutto di disporre di un numero maggiore di informazioni puntuali sul comportamento della sezione indagata.

Per ciascuna stazione di controllo verranno messe in opera 5 celle di pressione, 2 celle di carico ed un estensimetro multibase, nelle posizioni indicate sul profilo geomeccanico delle gallerie in progetto.

11.2.1 Celle di pressione

Verranno installate tra l'ammasso roccioso e le centine del prerinvestimento. La sezione della galleria verrà strumentata con 5 celle di pressione nella posizione indicata sul disegno.

Le celle dovranno essere poste in opera subito dopo l'installazione della centina e prima dell'applicazione dello spritz-beton.

Verrà fatta una lettura giornaliera durante la fase di avanzamento del fronte e fino al getto dell'arco rovescio. Successivamente le letture potranno essere eseguite con frequenza di una ogni 2 giorni fino al getto del rivestimento definitivo. Poi si eseguirà una lettura ogni mese in presenza del rivestimento definitivo.

Ciascuna lettura dovrà essere corredata dall'indicazione della posizione del fronte e dei rivestimenti definitivi rispetto alla sezione di lettura.



11.2.2 Celle di carico

Verranno posizionate sotto ciascun piede della centina, nelle medesime sezioni di galleria dove si posizioneranno le celle di pressione.

Esse verranno lette con lo stesso calendario di lettura delle celle di pressione.

Per ciascuna lettura bisognerà sempre indicare la posizione del fronte e dei rivestimenti definitivi rispetto alla sezione di lettura.

11.2.3 Estensimetro multibase

La misura delle deformazioni profonde che avvengono attorno al profilo di scavo può essere indagata misurando lo spostamento relativo di una base di misura solidarizzata al terreno ad una certa profondità e libera di scorrere rispetto al punto di misura rappresentato dal profilo di scavo.

Quando il punto di ancoraggio oppure il profilo di scavo tenderà a muoversi, con questo sistema sarà possibile misurare lo spostamento relativo tra il punto di ancoraggio ed il punto di misura. Noto lo spostamento assoluto della testa dello strumento ottenibile mediante battitura topografica della testa dello strumento stesso, sarà possibile ricavare il corrispondente spostamento del punto di ancoraggio.

Al fine di conoscere tale risposta deformativa a distanza dal contorno di scavo, si prevede di installare per ciascuna stazione di controllo un estensimetro a 3 basi.

L'estensimetro potrà essere installato lungo la calotta, sul lato destro o sinistro in modo indifferente dal momento che ci si attende un comportamento isotropo dell'ammasso.

Le strumentazioni estensimetriche dovranno essere montate immediatamente a ridosso del fronte di scavo, non appena messo in opera lo spessore di spritz-beton di progetto, eseguendo una perforazione radiale di diametro 127 mm, l'inserimento delle basi di misura preassemblate, la cementazione, il montaggio della testa dello strumento e dei trasduttori di spostamento.

La lettura delle basi dell'estensimetro dovrà sempre essere associata alla registrazione della posizione del fronte, dell'arco rovescio e del rivestimento definitivo.

11.3 Rilievo geologico del fronte di scavo

Tali rilievi consistono nel rilevamento e restituzione grafica e numerica delle caratteristiche geologiche-geostrutturali e geomeccaniche del fronte di scavo, durante l'avanzamento.

Nei rilievi devono essere descritte in dettaglio le caratteristiche litologiche stratigrafiche e strutturali dell'ammasso, con indicazione della litologia e delle caratteristiche geotecniche, del grado di compattezza/consistenza, della granulometria, dello stato di alterazione, delle caratteristiche strutturali e idrogeologiche, nonché osservazioni sul comportamento del cavo e dei rivestimenti già in opera.

Durante i rilievi si potranno prelevare campioni per prove di laboratorio (prove di classificazione, di compressione, triassiali, di estrusione ...) ed eventualmente eseguire prove in situ (pressiometriche, dilatometriche, scissometriche...).

La frequenza dei rilievi è indicata sul profilo geomeccanico della galleria naturale.



12. CONCLUSIONI

Sezioni tipo per le opere in sotterraneo

Sono state verificate le sezioni tipo proposte per la realizzazione della galleria di collegamento e la camera di dissipazione. Le sezioni analizzate sono rappresentative delle sezioni tipo più frequenti lungo la galleria di progetto. Il calcolo ha interessato la stabilità del fronte, metodo Tamez, e del cavo, metodo agli elementi finiti con codice di calcolo Phase 2D.

Tutte le sezioni risultano verificate per le coperture e le condizioni geotecniche esaminate. Il comportamento dell'ammasso roccioso è sempre di tipo elasto-plastico, con limitate plasticizzazioni di estensione corticale lungo i piedritti. Gli spostamenti sono limitati e in tutti i casi inferiori ai 5 mm.

Le analisi evidenziano la completa stabilità del cavo anche in presenza dei soli prerivestimenti fino al totale detensionamento dell'ammasso roccioso. A conferma di questo, le sollecitazioni agenti sui rivestimenti definitivi sono limitate e garantiscono in tutti i casi un elevato margine di sicurezza rispetto alle resistenze dei materiali.

Verifiche strutturali e armature

Il rivestimento di prima fase e quello definitivo delle opere in sotterraneo sono stati oggetto di verifiche strutturali durante l'avanzamento e a lungo termine. In tutti i casi gli elementi strutturali proposti risultano verificati.

Le sezioni tipo A0c e B0c previste per lo scavo e rivestimento della galleria di collegamento non prevedono alcuna armatura.

La sezione tipo B0Vc prevede un getto armato in corrispondenza di arco rovescio e murette, per le sole tratte a ridotta copertura litostatica e anche in calotta solamente nel primo campo di imbocco.

Infine, per quanto riguarda la camera di dissipazione, la sezione B0d prevede un rivestimento definitivo interamente armato.

Il getto verrà realizzato in opera, con l'impiego di lastre prefabbricate tralicciate che fungono da cassero a perdere per quanto riguarda il rivestimento in calotta.

Distribuzione delle sezioni tipo lungo il tracciato

La galleria di collegamento verrà quasi interamente scavata facendo ricorso alla sezione tipo B0c, caratterizzata dall'assenza di consolidamenti al fronte ed al contorno e da un prerivestimento costituito da centine e spritz beton; una piccola porzione è invece scavata con la sezione tipo A0c che prevede una chiodatura radiale e solo lo spritz beton nel prerivestimento. La sezione tipo B0Vc è applicata per una lunghezza complessiva di circa 92 m dove l'ammasso presenta un maggior grado di fratturazione e alterazione ed è quindi necessaria la presenza di un consolidamento al contorno di scavo con infilaggi metallici.

La camera di dissipazione verrà scavata con sezioni intermedie e per fasi successive di allargio; è importante che tutti gli scavi e le opere al di sopra di essa vengano iniziati solo dopo che è stato completato lo scavo ed il rivestimento definitivo della camera di dissipazione stessa.



Monitoraggio in corso d'opera

Nel corso dell'avanzamento del fronte di scavo, è prevista l'esecuzione sistematica di rilievi al fronte di scavo e l'installazione di stazioni di convergenza per il controllo degli spostamenti al cavo. In corrispondenza di alcune zone significative sono inoltre previste stazioni di controllo, costituite da un monitoraggio estensimetrico e delle sollecitazioni agenti nei rivestimenti, che completano il quadro conoscitivo della risposta tenso-deformativa dell'ammasso allo scavo.