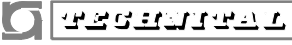


A	DICEMBRE 2011	EMISSIONE			C.MARCHINO	C.PESCE	F.BUSOLA															
REV.	DATA	DESCRIZIONE			ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO															
SOSTITUISCE L'ELABORATO N°					SOSTITUITO DALL'ELABORATO N°																	
CONSORZIO PER LE AUTOSTRADE SICILIANE AUTOSTRADA SIRACUSA – GELA 2° TRONCO: ROSOLINI – RAGUSA LOTTO 10/11 PROGETTO ESECUTIVO																						
IDENTIFICAZIONE ELABORATO																						
E	A	1	8	1	1	A	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	
PROG.	STRADA	LOTTO	MACRO OPERA	OPERA		PARTE DI OPERA	TIPOLOGIA ELABORATO	N. ELABORATO	REV.													
LOTTO 11 "RAGUSA" RELAZIONE DI CALCOLO GALLERIE NATURALI																						
DATA	DICEMBRE 2011				PROGETTAZIONE																	
CODICE CAD-FILE	EA1811A00GN000STRE001A.doc				IL RESPONSABILE : DOTT. ING. F. BUSOLA																	
<small>OPERA PROTETTA AI SENSI DELLA LEGGE 22 APRILE 1941 N. 633 TUTTI I DIRITTI RISERVATI QUALSIASI RIPRODUZIONE ED UTILIZZAZIONE NON AUTORIZZATE SARANNO PERSEGUITE A RIGORE DI LEGGE</small>																						

	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 1
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

AUTOSTRADA SIRACUSA-GELA


2° TRONCO ROSOLINI - RAGUSA

PROGETTO ESECUTIVO

LOTTO 11 "RAGUSA"


GALLERIE

RELAZIONE DI CALCOLO GALLERIE NATURALI


 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 2
	Pr	Strada			Lotto		Macro opera		Opera			Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev					

INDICE


1.	INTRODUZIONE	7
2.	OGGETTO E SCOPO	8
3.	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	9
4.	CARATTERISTICHE DEI MATERIALI	10
5.	DESCRIZIONE DELLE GALLERIE	11
6.	CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA DI RIFERIMENTO	14
6.1.	Metodologia di valutazione dei parametri geomeccanici	15
7.	DESCRIZIONE DELLE SEZIONI TIPO	17
7.1.	Premessa	17
7.2.	Attacco delle gallerie naturali	17
7.3.	Sezioni tipo	18
8.	SCELTA DELLE SEZIONI DI CALCOLO	28
9.	METODOLOGIA DI ANALISI	31
10.	METODOLOGIA ADOTTATA PER LE VERIFICHE STRUTTURALI	33
10.1.	Analisi strutturale del rivestimento preliminare	33
10.1.1.	Redistribuzione delle sollecitazioni sugli elementi di sostegno	34
10.1.2.	Calcolo della capacità di sostegno	35
10.2.	Analisi strutturale del rivestimento definitivo	36
10.2.1.	Modalità di verifica agli stati limite ultimi	37
10.2.2.	Modalità di verifica agli stati limite di servizio	39
10.2.3.	Verifica delle gallerie senza predisposizione di armatura	40
11.	ANALISI DI STABILITA' CON IL METODO DELLE LINEE CARATTERISTICHE ED IL METODO DI TAMEZ	41
11.1.	Sezione alla progressiva 3+700 km	41
11.1.1.	Analisi di stabilità con il metodo delle linee caratteristiche	42
11.1.2.	Analisi di stabilità con il metodo di Tamez	46
11.2.	Sezione alla progressiva 4+100 km	47
11.2.1.	Analisi di stabilità con il metodo delle linee caratteristiche – Sezione Ac	48
11.2.2.	Analisi di stabilità con il metodo delle linee caratteristiche – Sezione Ab	52
11.2.3.	Analisi di stabilità con il metodo di Tamez	56
11.3.	Sezione alla progressiva 2+915 km	57
11.3.1.	Analisi di stabilità con il metodo delle linee caratteristiche	59
11.3.2.	Analisi di stabilità con il metodo di Tamez	59
11.4.	Sezione alla progressiva 4+400 km	60
11.4.1.	Analisi di stabilità con il metodo delle linee caratteristiche	60
11.4.2.	Analisi di stabilità con il metodo di Tamez	65

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 3
	Pr	Strada			Lotto		Macro opera		Opera			Parte di opera		Tipo elab	N. Elab.		Rev						

12. ANALISI CON METODI EMPIRICI	66
12.1. RMR89 di Bieniawski	66
12.2. Q System di Barton	67
12.3. Rock Load di Terzaghi	68
12.4. Confronto con i risultati delle linee caratteristiche	69
12.5. Considerazioni conclusive	69
13. ANALISI CON IL METODO AGLI ELEMENTI FINITI	70
13.1. Sezione alla progressiva 3+700 km	70
13.1.1. Analisi di stabilità con il metodo agli elementi finiti	71
13.1.2. Verifiche strutturali del rivestimento preliminare	74
13.1.3. Sollecitazioni agenti sul rivestimento definitivo	77
13.1.4. Verifiche strutturali del rivestimento definitivo	80
13.1.5. Analisi sismica del rivestimento definitivo	83
13.2. Sezione alla progressiva 4+100 km – sezione tipo Ac	86
13.2.1. Risultati dell'analisi	87
13.2.2. Verifiche strutturali del rivestimento preliminare	91
13.2.3. Sollecitazioni agenti sul rivestimento definitivo	94
13.2.4. Verifiche strutturali del rivestimento definitivo	97
13.2.5. Analisi sismica del rivestimento definitivo	101
13.3. Sezione alla progressiva 4+100 km – Sezione tipo Ab	103
13.3.1. Risultati dell'analisi	104
13.3.2. Verifiche strutturali del rivestimento preliminare	108
13.3.3. Sollecitazioni agenti sul rivestimento definitivo	112
13.3.4. Verifiche strutturali del rivestimento definitivo	115
13.3.5. Analisi sismica del rivestimento definitivo	119
13.4. Sezione alla progressiva 2+915 km	121
13.4.1. Analisi di stabilità con il metodo agli elementi finiti	123
13.4.2. Verifiche strutturali del rivestimento preliminare	126
13.4.3. Sollecitazioni agenti sul rivestimento definitivo	129
13.4.4. Verifiche strutturali del rivestimento definitivo	132
13.4.5. Analisi sismica del rivestimento definitivo	136
13.5. Sezione alla progressiva 4+400 km	139
13.5.1. Risultati dell'analisi	140
13.5.2. Verifiche strutturali del rivestimento preliminare	143
13.5.3. Sollecitazioni agenti sul rivestimento definitivo	146
13.5.4. Verifiche strutturali del rivestimento definitivo	149
13.5.5. Analisi sismica del rivestimento definitivo	153
14. IMBOCCHI	156
14.1. Galleria Caddame	156
14.2. Galleria Occhipinti	158
15. STRUMENTAZIONE IN GALLERIA PER COSTRUZIONI IN CORSO D'OPERA	162
15.1. Generalità	162


 TECNOLOGIA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 4
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

15.2. Stazioni di convergenza	163
15.3. Rilievo geologico del fronte di scavo	164
15.4. Stazioni di controllo	164
15.5. Monitoraggio di superficie	165
16. CONCLUSIONI	167


 INGEGNERIA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 5
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

Elenco simboli

γ (kN/m ³)	=	peso di volume
σ_{ci}, σ_c (MPa)	=	resistenza a compressione della roccia intatta
m_i	=	parametro di Hoek e Brown della roccia intatta
m_p, m_r	=	parametri di Hoek e Brown dell'ammasso roccioso, di picco e residui
s_p, s_r	=	parametri di Hoek e Brown dell'ammasso roccioso, di picco e residui
RMR_{89}	=	indice Rock Mass Rating di Bieniawski (1989) per l'ammasso roccioso
GSI	=	indice Geological Strength Index di Hoek et al. (1995-2000)
Q	=	indice Q di Barton (1974)
c_p, c_r (kPa)	=	coesione di picco e residua
ϕ_p, ϕ_r (°)	=	angolo di attrito di picco e residuo
σ_{v0} (MPa)	=	tensione verticale indisturbata (originaria)
D (-)	=	parametro di danneggiamento
E (MPa)	=	modulo di elasticità
σ_{gd} (MPa)	=	resistenza a compressione dell'ammasso roccioso
σ_{td} (MPa)	=	resistenza a trazione dell'ammasso roccioso
b	=	rapporto tra σ_{td} e σ_{gd}
ν (-)	=	coefficiente di Poisson
k_0 (-)	=	coefficiente di spinta a riposo
K (m/s)	=	permeabilità
l (-)	=	percentuale di scarico tensionale (detensionamento)
ur (m)	=	spostamento radiale al contorno di scavo
EA (kN/m)	=	rigidezza assiale
EI (kNm ² /m)	=	rigidezza flessionale
M (MNm)	=	momento flettente
N (MN)	=	sforzo normale
Q (MN)	=	sforzo di taglio
f_{yk} (MPa)	=	tensione di snervamento caratteristica
f_{yd} (MPa)	=	tensione di snervamento di progetto

 TECNOLOGIA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 6
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

- f_{ck} (MPa) = resistenza cubica a compressione caratteristica
 f_{cd} (MPa) = resistenza a compressione di progetto
 f_{ctk} (MPa) = resistenza cubica a trazione caratteristica
 f_{ctd} (MPa) = resistenza a trazione di progetto
 I (m⁴) = momento d'inerzia
 s (m) = spessore
- a (m) = raggio equivalente della cavità
 V_s (m/s) = velocità di propagazione delle onde S nell'ammasso roccioso

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 7
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

1. INTRODUZIONE

La presente relazione analizza le gallerie naturali in progetto nell'ambito del Lotto 11 "Ragusa" – Progetto esecutivo dell'autostrada Siracusa-Gela, nella tratta compresa fra il fiume Irminio e Ragusa.

Il lotto in esame rappresenta la naturale prosecuzione del Lotto 10 "Irminio" che prevede, nella sua parte terminale, la realizzazione di un viadotto autostradale a grandi luci sull'impluvio del fiume Irminio.


Il Lotto 11 presenta un'estensione lineare di quasi 7 km, e comprende due gallerie naturali, denominate Caddame, di lunghezza media 2130 m, e Occhipinti, di lunghezza 1980 m, per poi proseguire in trincea fino a fine lotto. Tra le progressive 5+300 e 5+550 km, inoltre, è prevista la realizzazione di un viadotto, denominato Viadotto S.Viola-Pulce, che mette in connessione la zona dell'imbocco Ovest della Galleria Occhipinti con la trincea in roccia in prossimità degli abitati di Case Camemi e Villaggio 2000.

Il percorso oggetto di studio interessa un tratto dell'altopiano Ibleo, caratterizzato dalla presenza di una successione calcarenitica dell'Oligocene Superiore nota in letteratura come Formazione Ragusa. Su di essa poggiano, in maniera irregolare e discontinua, termini più recenti di età compresa fra il Miocene Medio e l'Olocene.

La presente relazione riporta i risultati delle verifiche realizzate per le diverse gallerie che costituiscono il tracciato in esame.

Le analisi di stabilità sono state realizzate con i metodi analitici delle linee caratteristiche e di Tamez, con modellazioni bidimensionali agli elementi finiti. I risultati sono stati poi confrontati con quanto previsto dalle classificazioni geomeccaniche in relazione alla qualità degli ammassi rocciosi intercettati.


Ulteriori considerazioni proposte nel presente studio fanno riferimento ad altrettanti aspetti progettuali, quali la definizione preliminare delle tipologie di imbocco e le analisi dei rivestimenti in condizioni sismiche.

 GENERALI	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 8
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

2. OGGETTO E SCOPO

Oggetto della presente relazione sono le gallerie naturali che costituiscono il tracciato in progetto.


Lo scopo è quello di analizzare l'adeguatezza delle soluzioni realizzative scelte per le diverse gallerie in progetto.

 TECNOFERRA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 9
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera			Parte di opera		Tipo elab	N. Elab.		Rev							

3. **NORMATIVA DI RIFERIMENTO**

Nella presente relazione si è fatto riferimento alle seguenti Normative ed Istruzioni:


- D.M. LL.PP. 11/03/1988: “Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l’esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione”.
- UNI EN 206-1 Calcestruzzo - “Specificazione, prestazione, produzione e conformità”.
- CNR 10011/97 Costruzioni in acciaio - “Istruzioni per il calcolo, l’esecuzione il collaudo e la manutenzione”.
- D.M. 14/01/2008 “Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni”.
- Raccomandazioni AICAP (Maggio 1993) “Ancoraggi nei terreni e nelle rocce”.

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 10
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

4. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

Per la progettazione delle gallerie naturali in oggetto, si sono utilizzati i seguenti materiali:

- Magrone: C 12/15
- calcestruzzo rivestimenti definitivi: C 28/35
- spritz beton: C 25/30
- acciaio per armature: B 450 C
- acciaio carpenterie: S 275
- tubi metallici infilaggi: S 355

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 11
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera			Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev						

5. DESCRIZIONE DELLE GALLERIE

Il tracciato in esame presenta una lunghezza complessiva di circa 7 km, di cui una porzione considerevole – circa il 60% – si pone in galleria, mentre la parte restante è quasi ovunque in trincea.


Tutte le gallerie sono a doppia fornice, con una sezione a ferro di cavallo ed un diametro equivalente di circa 15 metri ciascuna. Le sezioni corrispondenti alle due canne autostradali non sono esattamente uguali, in quanto la sezione di scavo lato Gela presenta un allargamento costante verso l'interno, pari a 90 cm nel caso della Galleria Caddame, a 125 cm per la Galleria Occhipinti.

Il tracciato del Lotto 11 prevede due gallerie naturali:

- Galleria Caddame, caratterizzata da una lunghezza complessiva di 2119 m per quanto riguarda la canna lato Gela, e 2158,58 m per la canna lato Siracusa;
- Galleria Occhipinti, caratterizzata da una lunghezza complessiva di 2019,20 m per quanto riguarda la canna lato Gela, e 1947,50 m per la canna lato Siracusa;

Si tratta di due gallerie a doppio fornice con la pista per Siracusa che prevede una carreggiata avente la larghezza tipica delle sezioni autostradali da 11,20 m; la pista per Gela, in seguito alle verifiche di visibilità condotte secondo le norme vigenti, necessita di un allargamento in sinistra di 0,90 m per la galleria Caddame e di 1,25 m per la Occhipinti, in modo che la larghezza complessiva della carreggiata nei due casi diviene rispettivamente pari a 12,10 m e 12,45 m.

E' così infatti che la pista per Siracusa, secondo quanto previsto nelle Linee Guida ANAS, prevede un raggio interno di 6,90 m in modo da contenere le due corsie di marcia da 3,75 m ciascuna, la corsia di emergenza da 3 m e la banchina in sinistra di 0,70 m. La pista per Gela, causa gli allargamenti suddetti, necessita di un raggio interno di 7,50 m per la galleria Caddame e di 7,80 m per la Occhipinti, con una organizzazione della piattaforma analoga alla precedente con la differenza che la banchina in sinistra diviene ora di 1,60 m e 1,95 m rispettivamente. In entrambi i casi, la carreggiata è delimitata ai due lati, come previsto dalla vigente normativa, da New Jersey a ridosso dei piedritti della galleria stessa, con a tergo il vano per l'alloggiamento dei cavidotti per gli impianti.

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 12
	Pr	Strada			Lotto		Macro opera		Opera			Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev					

La galleria Caddame presenta una lunghezza complessiva di 2119 m per quanto riguarda la canna lato Gela, e 2158,38 m per la canna lato Siracusa, con un tratto comprendente il portale, l'artificiale e la dima di attacco che lato Siracusa è pari a 49,67 m nella pista per Gela e a 50 m in quella per Siracusa, mentre sul lato opposto le relative lunghezze sono di 62,3 m e 68,58 m rispettivamente. Per quanto riguarda la tratta in naturale, la sua lunghezza nella pista per Gela è pari a 2007,03 m, mentre in quella per Siracusa a 2039,80 m.


La galleria Occhipinti presenta invece una lunghezza complessiva di 2019,20 m per quanto riguarda la canna lato Gela, e 1947,50 m per la canna lato Siracusa, con un tratto comprendente il portale, l'artificiale e la dima di attacco che lato Siracusa è pari a 62,47 m nella pista per Gela e a 113,28 m in quella per Siracusa, mentre sul lato opposto le relative lunghezze sono di 18 m e 32,50 m rispettivamente. Per quanto riguarda la tratta in naturale, la sua lunghezza nella pista per Gela è pari a 1938,73 m, mentre in quella per Siracusa a 1801,72 m.

Entrambe le gallerie prevedono, conformemente alle Linee Guida ANAS, by pass pedonali con interasse di 300 m e carrabili ogni 900, oltre a piazzole di sosta lunghe 50 m ad interasse massimo di 600 m; sono previste infine anche nicchie ogni 150 m sul lato destro della galleria.

Il tracciato si snoda tra l'incisione del fiume Irminio e la statale di Marina di Ragusa, interessando le zone limitrofe agli abitati di Contrada Occhipinti, Contrada Pulce, Contrada Camemi, per arrivare in corrispondenza di Gatto Corvino allo svincolo che conetterà il lotto in questione con la statale di Marina di Ragusa.

Il percorso interessa un'area caratterizzata da una notevole omogeneità da un punto di vista geologico e geomeccanico, con coperture massime di circa 75 m in corrispondenza della Galleria Occhipinti e di 60 m della Caddame.


Il litotipo maggiormente interessato dal tracciato del Lotto 11 è la cosiddetta Formazione dei calcari di Ragusa, caratterizzata da una successione di calcari, calcareniti e calciruditi grigio-biancastri organizzati in banchi sub orizzontali di spessore variabile fra i 30-60 cm con locali intercalazioni di tipo marnoso, marnoso-calcareo e marnoso-sabbioso. La presenza di numerose faglie dirette-inverse determina, in corrispondenza dell'imbocco Est della Galleria Occhipinti, la presenza della Formazione Tellaro, quasi ovunque obliterata da fenomeni di erosione e alterazione. Tale Formazione è costituita da marne e marne argillose di colore variabile dal giallastro al grigiastro, di origine miocenica.

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 13
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera			Parte di opera		Tipo elab	N. Elab.		Rev							

Localmente il tracciato interessa inoltre depositi detritici superficiali, costituiti da una matrice limo-argillosa con inclusi eterometrici di natura calcarea, laddove il deposito sia localizzato in prossimità di bancate calcaree, di natura marnosa se il deposito è ascrivibile ad un'alterazione della Formazione Tellaro. Quasi ovunque i calcari si presentano comunque affioranti o sub affioranti, con scarso ricoprimento detritico.

Lo studio idrogeologico ha evidenziato l'assenza di falde acquifere alle quote di progetto. L'unica falda presente a livello superficiale, di subalveo, si colloca in corrispondenza dei depositi detritici e alluvionali del fiume Irminio, a carattere prettamente stagionale, captata con gallerie drenanti a scopi irrigui: tale livello idrico nulla a che fare con la falda profonda, che presenta una soggiacenza rispetto al piano campagna di circa 100-120 metri.

In questo panorama idrogeologico ci si può attendere delle venute idriche non copiose solo in corrispondenza delle faglie e dei contatti stratigrafici tra marne del Tellaro e calcareniti della Ragusa.

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 14
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

6. CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA DI RIFERIMENTO

Le gallerie in progetto interessano generalmente un solo litotipo, rappresentato dai calcari della Formazione Ragusa, con coperture variabili fra qualche metro e 70 m in corrispondenza della Galleria Caddame, fino a coperture di 80-90 m per quanto riguarda invece la Galleria Occhipinti. Solo in corrispondenza dell'imbocco Est della Galleria Occhipinti la trincea che verrà realizzata per consentire l'attacco della galleria naturale potrà interessare le marne della Formazione Tellarò.


La classificazione geomeccanica dei materiali interessati dallo scavo delle gallerie è stata realizzata sulla base di:

- dati bibliografici;
- 4 stazioni di rilievo geostrutturale degli affioramenti rocciosi nella Formazione Ragusa;
- dati derivanti dalla campagna di indagini geognostiche, quali:
 1. 19 sondaggi geognostici a carotaggio continuo, con profondità variabili fra i 25 ed gli 80 metri, di cui il sondaggio S58Pz strumentato con piezometro a tubo aperto;
 2. prove penetrometriche dinamiche tipo Standard Penetration Test (SPT) eseguite nelle verticali di sondaggio;
 3. prove di permeabilità tipo Lugeon nell'attraversamento dei materiali lapidei;
 4. 13 pozzetti esplorativi;
 5. n° 28 stendimenti sismici a rifrazione;
 6. analisi di laboratorio eseguite su campioni indisturbati e/o rimaneggiati prelevati nel corso delle perforazioni, volte alla caratterizzazione fisica e meccanica dei singoli litotipi.

L'integrazione dei risultati delle indagini sopraelencate ha consentito di caratterizzare la Formazione Ragusa in relazione alle gallerie naturali previste nell'ambito del Lotto 11, definendo tratte omogenee a cui si sono associate medesime caratteristiche di resistenza a compressione e grado di fratturazione.

In termini generali, i calcari della Formazione Ragusa presentano:

- Resistenza a compressione uniassiale σ_c variabile fra 30 e 40 MPa;
- RQD variabile fra 30-40 %;
- Discontinuità lisce, con locale riempimento marnoso;
- Struttura a banchi sub-orizzontali di spessore variabile fra 30 e 80 cm;

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 15
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

- indice di qualità geomeccanica RMR_{89} , valutato in condizioni asciutte e senza tener conto dell'orientazione delle discontinuità in relazione alla direzione di avanzamento, variabile fra 50 e 55 punti.

In corrispondenza delle zone di faglia si è applicata una riduzione dell'indice RMR_{89} di base pari a 10 punti, a parità di resistenza a compressione della roccia intatta, per tener conto della riduzione di qualità geomeccanica.

L'ammasso roccioso in corrispondenza della piega anticlinale alla progressiva 1+380 km della Galleria Caddame vede una riduzione di 5 punti degli indici di qualità geomeccanica, per tener conto della particolare condizione di stress tettonico che caratterizza la roccia in prossimità dell'asse di piega.

La caratterizzazione dei litotipi intercettati dalle gallerie Caddame e Occhipinti è riportata nei relativi "Profili geotecnici e geomeccanici asse principale" in direzione Gela e Siracusa, in cui per ciascuna tratta omogenea si presentano gli indici di qualità geomeccanica degli ammassi rocciosi e la resistenza a compressione della roccia intatta. Si definiscono inoltre le tratte di applicazione delle diverse sezioni tipo e le previste misure di monitoraggio.

6.1. Metodologia di valutazione dei parametri geomeccanici

La caratterizzazione geomeccanica dei litotipi attraversati dalle gallerie è stata realizzata mediante l'involuppo di rottura per gli ammassi rocciosi di Hoek-Brown, considerando il valore di GSI corrispondente all' RMR_{89} di riferimento, il valore di resistenza a compressione uniassiale σ_c ed il parametro m_i della roccia intatta.

Per quanto riguarda il parametro m_i dei calcari della Formazione Ragusa, si è assegnato un valore pari a 10 punti.


L'involuppo di rottura è espresso dalla seguente equazione:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m \sigma_c \sigma_3 + s \sigma_c^2)^a$$

Dove:

σ_c = resistenza a compressione uniassiale della roccia intatta (MPa);

m = parametro sperimentale che definisce l'incremento di resistenza della roccia all'aumentare della tensione di confinamento. Si indica con m_i nel caso in cui il criterio di rottura faccia riferimento alla roccia intatta, con m se questo si

 INGEGNERIA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 16
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

riferisce all'ammasso roccioso. In questo secondo caso il coefficiente può assumere valori di picco m_p e residui m_r ;

s = parametro sperimentale che definisce la posizione dell'involuppo di Hoek - Brown. Il suo valore è unitario nel caso in cui il criterio faccia riferimento alla roccia intatta. Se il criterio si riferisce all'ammasso roccioso, s assume valori di picco s_p e residui s_r ;

a = esponente dell'involuppo di rottura, pari a 0.5 per la roccia intatta.

Il passaggio dai parametri di Hoek-Brown per la roccia intatta a quelli relativi all'ammasso roccioso viene realizzato mediante le seguenti formulazioni, che tengono conto del grado di fratturazione che caratterizza la roccia in posto:

$$m_p = m_i \cdot \exp((GSI-100)/(28-14D))$$

$$m_r = 0.7m_p$$

$$s_p = \exp((GSI-100)/(9-3D))$$

$$s_r = 0.04s_p$$

$$a = 0.5 + 1/6 \cdot (\exp(-GSI/15) - \exp(-20/3))$$

in cui:

$$GSI = RMR_{89} - 5$$


D = parametro di danneggiamento dell'ammasso roccioso, considerato in questo caso pari a 0, ipotizzando di realizzare lo scavo con metodologie che possono arrecare poco disturbo alla massa rocciosa, quali ad esempio il martellone o l'esplosivo in micro-cariche ritardate.

Anche il modulo elastico dell'ammasso roccioso è stato valutato a partire dall'indice GSI , adottando la seguente formulazione empirica, valida nel caso in cui la resistenza σ_c sia inferiore a 100 MPa:

$$E = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} \cdot 10^{(GSI-10)/40} \text{ [GPa]}$$

Una volta valutati i parametri di Hoek-Brown per l'ammasso roccioso per la classe di copertura adeguata alla condizione in esame, si procede alla linearizzazione dell'involuppo curvilineo. La procedura viene realizzata sulla base delle equazioni proposte da Balmer in "A general analytical solution for Mohr's envelope" - Am.Soc.Test.Mat. (1952).

In questo modo i litotipi vengono caratterizzati anche secondo l'involuppo di resistenza di Mohr-Coulomb, definendo i parametri coesione e angolo di attrito nelle condizioni di picco e residue.

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 17
	Pr	Strada			Lotto		Macro opera		Opera			Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev					

7. DESCRIZIONE DELLE SEZIONI TIPO

7.1. Premessa

Le gallerie sono caratterizzate da due fornicati affiancati, ad interasse variabile, con coperture comprese tra i pochi metri in corrispondenza degli imbocchi fino alla massima di circa 75 m della Occhipinti.

Esse interessano quasi interamente la formazione Ragusa, costituita da calcari, calcareniti e calciruditi. Solo in corrispondenza degli imbocchi lato Siracusa vi è la presenza di una copertura detritica costituita prevalentemente da limi e argille.

I problemi che andranno affrontati sono di stabilità del cavo, del fronte e di stabilità del rivestimento per la spinta esercitata dall'ammasso. Il progetto dell'opera ha dovuto risolvere nel modo più conveniente dal punto di vista tecnico ed economico i problemi di cui sopra nell'ambito della sicurezza durante l'esecuzione dei lavori e poi nella fase di esercizio.


7.2. Attacco delle gallerie naturali

L'attacco della galleria naturale dovrà essere condotto in modo da limitare al massimo il disturbo arrecato all'ammasso, il quale in caso contrario, potrebbe andare soggetto a fenomeni di detensionamento che, propagandosi verso monte, potrebbero coinvolgere estese porzioni del versante, causandone l'instabilità con conseguente pericolo di fenomeni gravitativi.

La conservazione degli equilibri naturali esistenti nell'ammasso avverrà quindi in fase di scavo, sagomando opportunamente le scarpate o limitando, nel caso di presenza della paratia, l'altezza degli scavi di approfondimento da eseguire prima della messa in opera dei tiranti, ed in fase di attacco della galleria vero e proprio, avendo opportunamente irrigidito il fronte e le opere di sostegno per l'attacco della galleria.

Le fasi di attacco della galleria naturale sono così esemplificabili:

- Scavo dell'area di imbocco secondo le scarpate di progetto, fino alla quota del piano di scavo, seguendo le indicazioni fornite nell'elaborato specifico, e protezione delle scarpate stesso con spritz beton e chiodi (questi ultimi ove necessari). Nel caso sia presente la paratia, scavo per fasi successive, fino alla quota del piano di scavo, seguendo le indicazioni fornite negli elaborati specifici, in modo da mettere in opera tutti i tiranti previsti

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 18
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

- Esecuzione del consolidamento con infilaggi metallici orizzontali al contorno di scavo. È opportuno che tali tubi metallici fuoriescano dai relativi fori per almeno 1,0 m.
- Messa in opera di 6 centine accoppiate, costituite ciascuna da 2 IPN 180, con interasse di circa 0,95 m, due coppie delle quali in prossimità del fronte di scavo.
- Collegamento non strutturale dei tubi metallici degli infilaggi con le prime centine appena messe in opera mediante legatura o punti di saldatura.
- Getto di calcestruzzo con spessore di 0,45 m realizzando una cassetta con pernermetal o similari, mentre le sottostanti centine saranno inglobate in uno strato di spritz beton di spessore pari a 0,25 m. Questo elemento strutturale costituisce la dima.
- Inizio del primo scavo di avanzamento.
- Prosecuzione dello scavo secondo le sezioni tipo previste nel profilo geomeccanico.

Un siffatto metodo di attacco permetterà:


- Mediante l'elemento dima, di contrastare adeguatamente la zona del fronte di scavo.
- Mediante il collegamento dell'armatura degli infilaggi alla dima, di collegare efficacemente la dima stessa ad una struttura infissa nel terreno (ed eventualmente alla paratia) e successivamente al rivestimento di prima fase della galleria, irrigidendo notevolmente l'intera struttura.
- Mediante l'armatura del rivestimento definitivo, di garantire la stabilità nel lungo termine delle opere, laddove i carichi possono presentarsi dissimmetrici.

Sarà quindi garantito:

- nel breve termine, che l'attacco della galleria naturale avvenga nelle adeguate condizioni di sicurezza
- nel lungo periodo, che le gli scavi all'imbocco siano capaci di esplicare la loro funzione statica con gli adeguati margini di sicurezza, laddove le condizioni di copertura non permettono la formazione di un corretto effetto arco e dove è probabile che i carichi divengano asimmetrici.

7.3. Sezioni tipo

Lo scavo della galleria avverrà a piena sezione. I problemi di instabilità 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 in campo elastico. Infatti la sezione progettata raggiunge

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 19
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

proprio lo scopo di mantenere l'ammasso roccioso, con i trattamenti previsti, pressoché in campo elastico. Questo fatto è essenziale per evitare convergenze rilevanti.


Il progetto della galleria principale prevede l'adozione di 4 sezioni tipo fondamentali, descritte di seguito, la tipo Ab, Ac, B0 e B0V; vi sono poi le sezioni Ab(90) e Ac(125), Ac(90) e Ac(125), B0(90) e B0(125), B0V(90) e B0V(125) che sono analoghe come interventi alle precedenti e si differenziano da esse solamente perché applicate sulla carreggiata per Gela che presenta, per motivi legati alla visibilità, un allargamento della banchina di 0,90 m in corrispondenza della galleria Caddame e di 1,25 m della galleria Occhipinti, portandole quindi rispettivamente da 0,70 m a 1,60 m e 1,95 m.

Sezione tipo Ab

La sezione tipo Ab si applica nel tratto in cui la galleria si trova all'interno della formazione rocciosa con le migliori caratteristiche geomeccaniche.

Le fasi realizzative sono le seguenti:

- (a) Scavo. Scavo a piena sezione con sfondi massimi pari a 5,0 m.
- (b) Prerivestimento e consolidamento. È costituito da uno strato di 0,20 m di spritz-beton fibrorinforzato per i primi 17 cm, e da un consolidamento del contorno di scavo con 12-13 chiodature radiali in acciaio ad aderenza continua tipo Swellex lunghe 4,5 m e con passo longitudinale pari a 1,25 m.
- (c) Muretta ed arco rovescio. Rappresentano la prima parte del rivestimento definitivo messa in opera e vengono gettate ad una distanza dal fronte non vincolata; l'arco rovescio ha uno spessore pari a 0,70 m.
- (d) Impermeabilizzazione e drenaggio. Contro il prerivestimento verrà posto in opera il tessuto non tessuto da 500 gr/m² ricoperto dalla guaina impermeabile di pvc con spessore di 2 mm, che raccoglie l'acqua infiltratasi dall'ammasso roccioso, attraverso lo spritz-beton, nel cavo e la convoglia ai tubi di drenaggio posti all'altezza della muretta. La guaina di pvc è sostanzialmente impermeabile ed impedisce all'acqua di raggiungere il rivestimento definitivo. L'impermeabilizzazione della sezione è completata con l'esecuzione dell'arco rovescio, che può considerarsi impermeabile a tutti gli effetti.
- (e) Rivestimento definitivo. Viene gettato il rivestimento definitivo ad una distanza dal fronte non vincolata, suscettibile comunque di variazioni in corso d'opera in funzione del comportamento deformativo del cavo. Ha uno spessore in calotta pari a 0,60 m.

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 20
	Pr	Strada	Lotto	Macro opera	Opera	Parte di opera	Tipo elab	N. Elab.	Rev														

La Figura 1 riporta la schematizzazione della sezione tipo Ab.

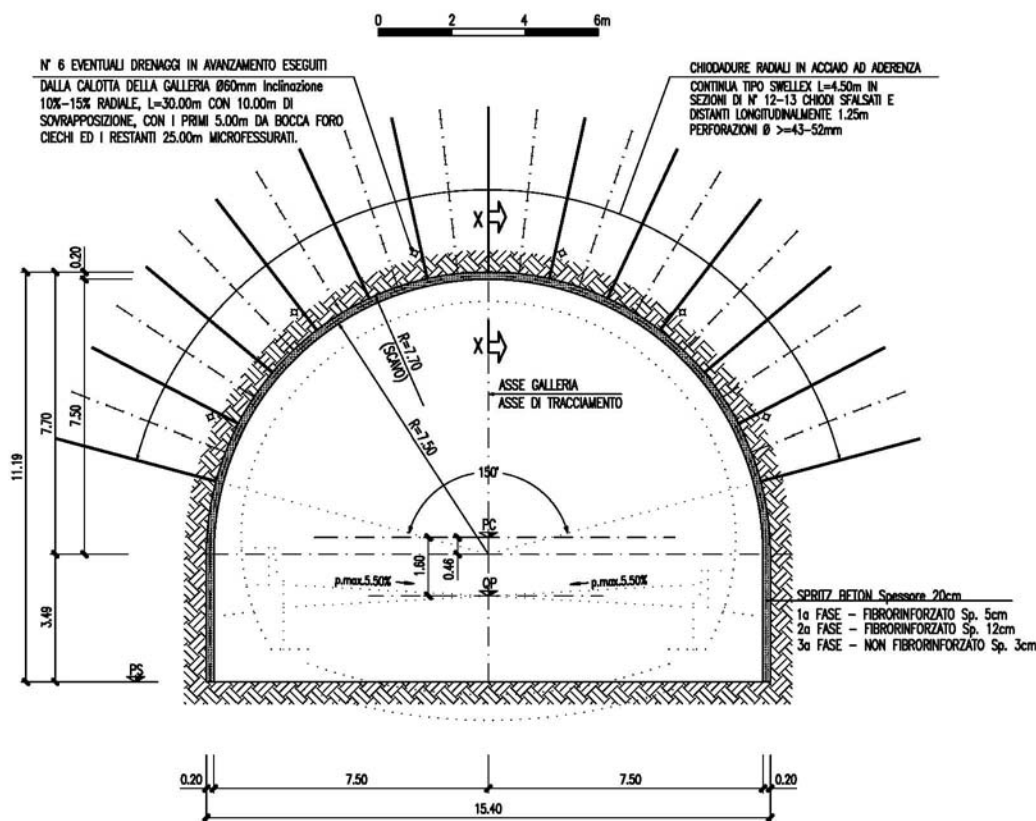


Figura 1 - Sezione tipo Ab

Sezione tipo Ac

La sezione tipo Ac si applica quando lo scavo della galleria interessa ammassi rocciosi con caratteristiche geomeccaniche discrete e non prevede alcun intervento di preconsolidamento, ma un prerivestimento costituito solo da spritz beton e centine metalliche leggere.

Le fasi realizzative sono le seguenti:

- Scavo. Scavo a piena sezione con sfondi massimi pari ad 3,0 m.
- Prerivestimento. È costituito da una singola centina HEA 160, con interasse 1,30-1,50 m, rivestite con 0,25 m di spritz-beton fibrorinforzato per i primi 22 cm.
- Muretta ed arco rovescio. Rappresentano la prima parte del rivestimento definitivo messa in opera e vengono gettate ad una distanza dal fronte non vincolata; l'arco rovescio ha uno spessore pari a 0,70 m.

- (d) Impermeabilizzazione e drenaggio. Contro il prerivestimento verrà posto in opera il tessuto non tessuto da 500 gr/m² ricoperto dalla guaina impermeabile di pvc con spessore di 2 mm, che raccoglie l'acqua infiltratasi dall'ammasso roccioso, attraverso lo spritz-beton, nel cavo e la convoglia ai tubi di drenaggio posti all'altezza della muretta. La guaina di pvc è sostanzialmente impermeabile ed impedisce all'acqua di raggiungere il rivestimento definitivo. L'impermeabilizzazione della sezione è completata con l'esecuzione dell'arco rovescio, che può considerarsi impermeabile a tutti gli effetti.
- (e) Rivestimento definitivo. Viene gettato il rivestimento definitivo ad una distanza dal fronte non vincolata, suscettibile comunque di variazioni in corso d'opera in funzione del comportamento deformativo del cavo. Ha uno spessore in calotta pari a 0,60 m.

La Figura 2 riporta la schematizzazione della sezione tipo Ac.

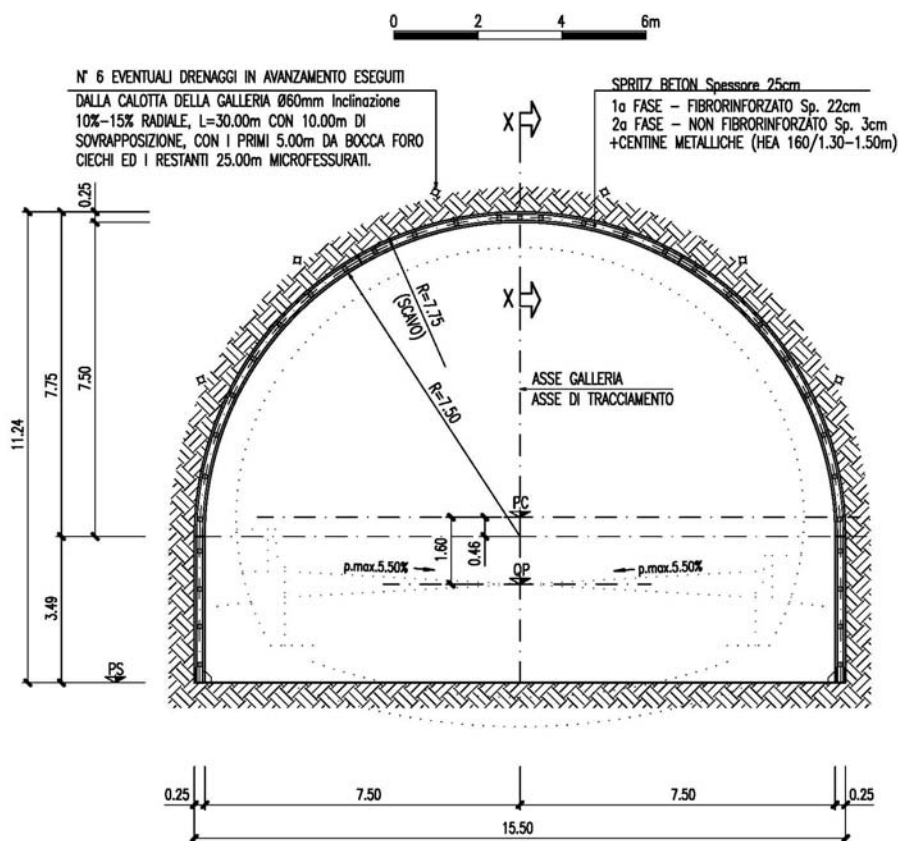



Figura 2 - Sezione tipo Ac

 GENERAL	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 22
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							


Sezione tipo B0

La sezione tipo B0 si applica quando lo scavo della galleria interessa ammassi rocciosi con caratteristiche geomeccaniche simili alle precedenti, ma con un grado di fatturazione leggermente maggiore.

Le fasi realizzative sono le seguenti:

- (a) Scavo. Scavo a piena sezione con sfondi massimi pari ad 1,20 m.
- (b) Prerivestimento. È costituito da due centine accoppiate IPN180, con interasse 1,00-1,20 m, rivestite con 0,25 m di spritz-beton fibrorinforzato per i primi 22 cm.
- (c) Muretta ed arco rovescio. Rappresentano la prima parte del rivestimento definitivo messa in opera e vengono gettate ad una distanza dal fronte non vincolata; l'arco rovescio ha uno spessore pari a 0,70 m.
- (d) Impermeabilizzazione e drenaggio. Contro il prerivestimento verrà posto in opera il tessuto non tessuto da 500 gr/m² ricoperto dalla guaina impermeabile di pvc con spessore di 2 mm, che raccoglie l'acqua infiltratasi dall'ammasso roccioso, attraverso lo spritz-beton, nel cavo e la convoglia ai tubi di drenaggio posti all'altezza della muretta. La guaina di pvc è sostanzialmente impermeabile ed impedisce all'acqua di raggiungere il rivestimento definitivo. L'impermeabilizzazione della sezione è completata con l'esecuzione dell'arco rovescio, che può considerarsi impermeabile a tutti gli effetti.
- (e) Rivestimento definitivo. Viene gettato il rivestimento definitivo ad una distanza dal fronte non vincolata, suscettibile comunque di variazioni in corso d'opera in funzione del comportamento deformativo del cavo. Ha uno spessore in calotta pari a 0,70 m.

La Figura 3 riporta la schematizzazione della sezione tipo B0.

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 23
	Pr	Strada	Lotto	Macro opera	Opera	Parte di opera	Tipo elab	N. Elab.	Rev														

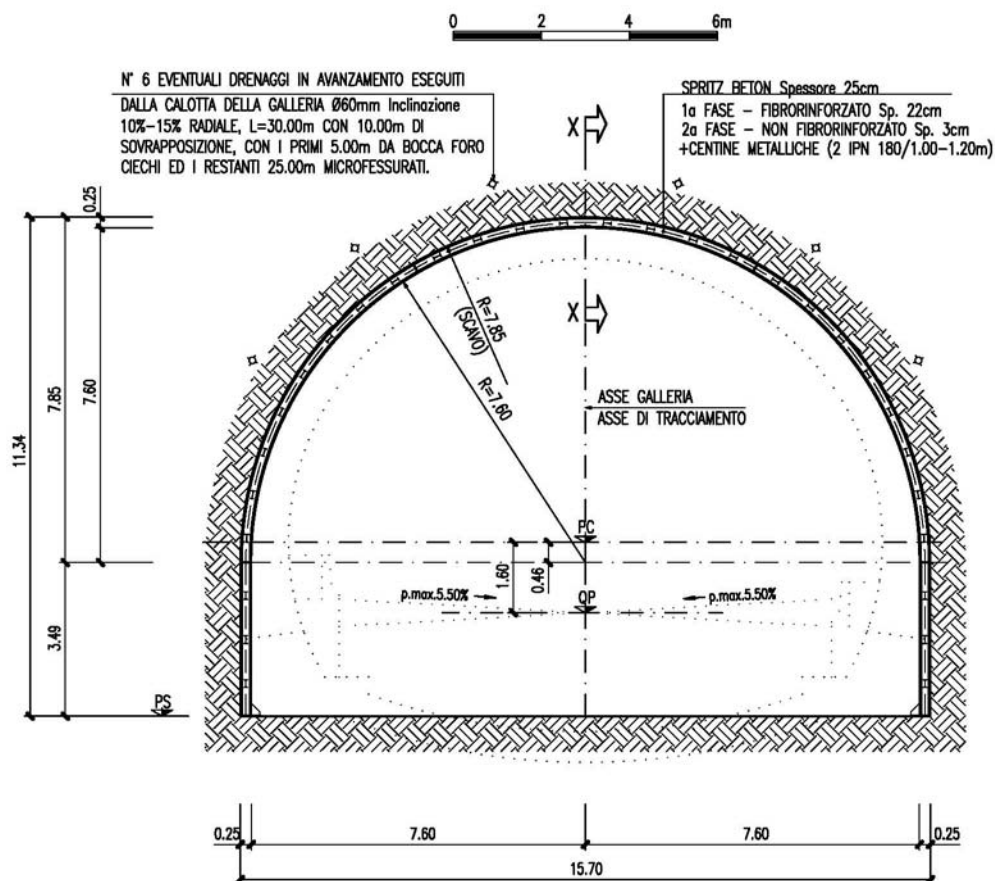



Figura 3 - Sezione tipo B0

Sezione tipo B0V

La sezione tipo B1st si applica in corrispondenza delle zone ove l'ammasso presenta un elevato grado di fratturazione e nella maggior parte delle faglie. Essa prevede un consolidamento del contorno di scavo tramite infilaggi metallici valvolati.

Le fasi realizzative sono le seguenti:

- Stabilizzazione del cavo. Considerata la dimensione della sezione e le caratteristiche dell'ammasso è necessario preconsolidare il contorno dello scavo per contenere le spinte sul prinvestimento e garantire la stabilità dell'ammasso roccioso nel tratto tra il fronte ed il prinvestimento al momento dell'avanzamento del fronte (lunghezza libera). L'intervento proposto consente inoltre di evitare la caduta della parte plasticizzata, con conseguente pericolo per le maestranze, almeno per il periodo di tempo necessario a completare lo scavo e mettere in opera il prinvestimento. Nel caso in esame la lunghezza libera, o sfondo consentito, è pari

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 24
	Pr	Strada			Lotto		Macro opera		Opera			Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev					

ad 1 m. L'intervento proposto è costituito da una coronella di n° 53 tubi metallici, aventi diametro 88,9 mm, spessore di 10 mm, e con una leggera inclinazione verso l'alto rispetto alla direzione di avanzamento. Essi hanno lunghezza 12 m e verranno eseguiti con una sovrapposizione di 3,00 m. I tubi vanno posizionati ad un interasse di circa 0,40 m lungo la circonferenza per un arco di estensione pari a 150° circa sulla calotta e saranno valvolati con n° 2 valvole a metro in modo da poter essere iniettati con pressioni di iniezione atte a garantire una sufficiente penetrazione della miscela di iniezione nell'ammasso roccioso circostante. In avanzamento è prevista l'esecuzione di drenaggi posizionati lungo il perimetro dello scavo. I dreni avranno diametro 60 mm, verranno eseguiti con direzione suborizzontale, lunghezza di 30 m ed una sovrapposizione durante l'avanzamento di 10 m. Dal momento che i dreni hanno una funzione provvisoria, e devono essere attivi per un periodo ridotto di tempo, non richiedono accorgimenti particolari. Per garantire la stabilità del foro nel periodo di funzionamento sarà sufficiente inserire un tubo microfessurato avente diametro esterno appena inferiore a quello di perforazione;

- (b) Scavo. Scavo a piena sezione con sfondi massimi pari ad 1 m.
- (c) Prerivestimento. È costituito da 2 centine IPN180, con interasse 1 m, rivestite con 0,25 m di spritz-beton fibrorinforzato nei primi 22 cm.
- (d) Muretta ed arco rovescio. Rappresentano la prima parte del rivestimento definitivo messa in opera e vengono gettate ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri. L'arco rovescio ha uno spessore pari a 0,80 m.
- (e) Impermeabilizzazione e drenaggio. Contro il prerivestimento verrà posto in opera il tessuto non tessuto da 500 gr/m2 ricoperto dalla guaina impermeabile di pvc con spessore di 2 mm, che raccoglie l'acqua infiltratasi dall'ammasso roccioso, attraverso lo spritz-beton, nel cavo e la convoglia ai tubi di drenaggio posti all'altezza della muretta. La guaina di pvc è sostanzialmente impermeabile ed impedisce all'acqua di raggiungere il rivestimento definitivo. L'impermeabilizzazione della sezione è completata con l'esecuzione dell'arco rovescio, che può considerarsi impermeabile a tutti gli effetti.
- (f) Rivestimento definitivo. Viene gettato il rivestimento definitivo ad una distanza massima dal fronte non vincolata, suscettibile comunque di variazioni in corso d'opera in funzione del comportamento deformativo del cavo. Ha uno spessore in calotta compreso tra 0,60 m e 1,23 m.

La Figura 4 riporta la schematizzazione della sezione tipo B0V.

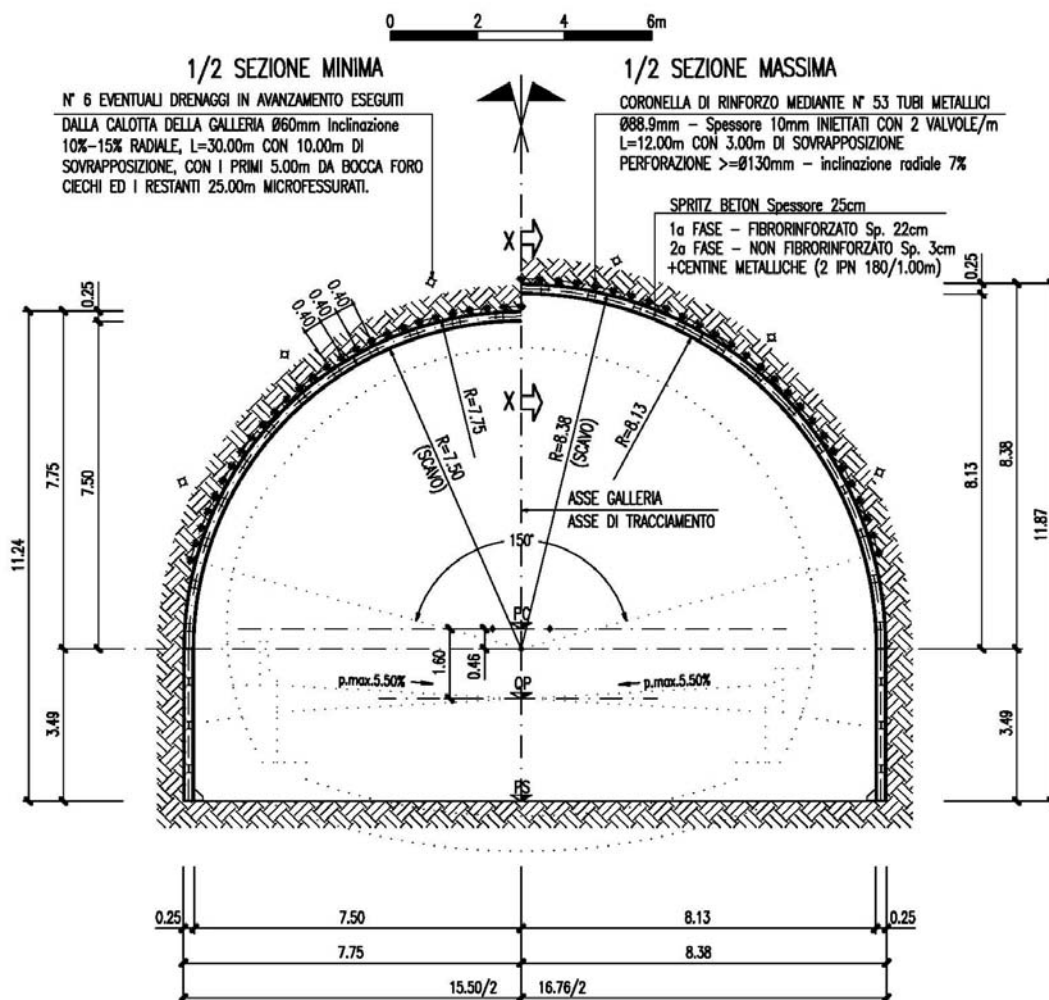



Figura 4 - Sezione tipo B0V

Come detto precedentemente, a queste sezioni tipo di scavo si affiancano le corrispondenti Ab(90) e Ab(125), Ac(90) e Ac(125), B0(90) e B0(125) e B0V(90) e B0V(125) che sono analoghe come tipologia di interventi di consolidamento, priverivestimento e rivestimento definitivo alle omologhe appena descritte, con l'unica differenza che tali sezioni presentano una banchina in sinistra più ampia di 0,90 m e 1,25 m per tenere conto delle necessità di allargamento emerse in seguito alle verifiche di visibilità.

 TECNOFERRAL	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 26
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

Sezione tipo P

Infine è presente la piazzola di sosta (sezione tipo P), di lunghezza pari a 50 m, realizzata ad interasse massimo di 600 m. Essa viene scavata a piena sezione e le sue fasi realizzative sono le seguenti:

- (a) Scavo. Scavo a piena sezione con sfondi massimi pari ad 1,00 m.
- (b) Prerivestimento. È costituito da due centine accoppiate IPN200, con interasse 1,00 m, rivestite con 0,30 m di spritz-beton fibrorinforzato per i primi 27 cm.
- (c) Muretta ed arco rovescio. Rappresentano la prima parte del rivestimento definitivo messa in opera e vengono gettate ad una distanza dal fronte non vincolata; l'arco rovescio ha uno spessore pari a 0,90 m.
- (d) Impermeabilizzazione e drenaggio. Contro il prerivestimento verrà posto in opera il tessuto non tessuto da 500 gr/m² ricoperto dalla guaina impermeabile di pvc con spessore di 2 mm, che raccoglie l'acqua infiltratasi dall'ammasso roccioso, attraverso lo spritz-beton, nel cavo e la convoglia ai tubi di drenaggio posti all'altezza della muretta. La guaina di pvc è sostanzialmente impermeabile ed impedisce all'acqua di raggiungere il rivestimento definitivo. L'impermeabilizzazione della sezione è completata con l'esecuzione dell'arco rovescio, che può considerarsi impermeabile a tutti gli effetti.
- (e) Rivestimento definitivo. Viene gettato il rivestimento definitivo ad una distanza dal fronte non vincolata, suscettibile comunque di variazioni in corso d'opera in funzione del comportamento deformativo del cavo. Ha uno spessore in calotta pari a 0,90 m.

La Figura 5 riporta la schematizzazione della sezione tipo P1.

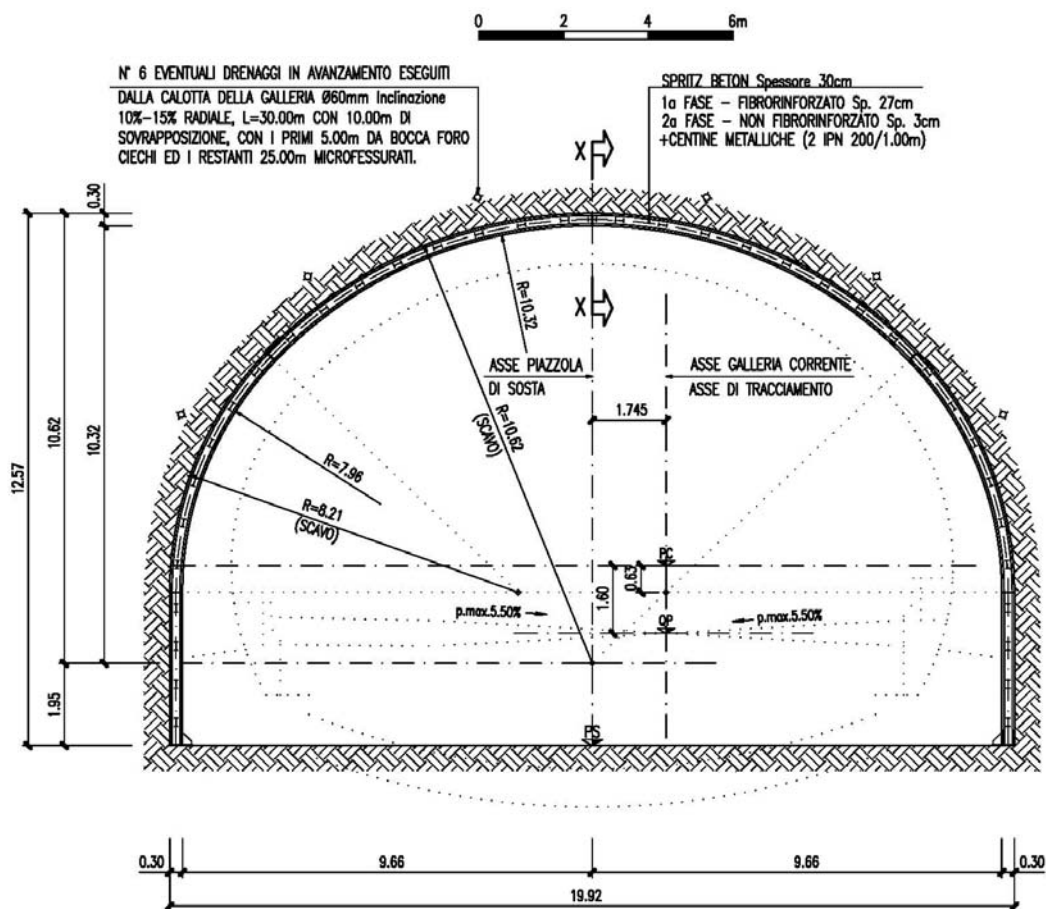


Figura 5 - Sezione tipo P1

Anche per le piazzole di sosta, come per le sezioni correnti, vi sono le sezioni P(90) e P(125) applicate in corrispondenza della pista per Gela in presenza di allargamenti ma della medesima tipologia della sezione tipo P.

8. SCELTA DELLE SEZIONI DI CALCOLO

La Galleria Caddame, Figura 6, presenta un tracciato interamente in calcare della Formazione Ragusa, con coperture mediamente pari a 40-60 metri, con valore massimo di 80 m nella porzione centrale. La galleria è interessata da alcune faglie verticali in corrispondenza delle zone a media copertura, e da una piega anticlinale alla progressiva 1+380 km.

L'imbocco est interessa parzialmente un deposito detritico di alterazione di un preesistente livello marnoso, di potenza massima 5 metri, che ha determinato la necessità di realizzare un imbocco con paratia frontale tirantata. L'estensione prevista del detrito è tale da non interessare la galleria naturale, se non in corrispondenza della calotta della galleria per un tratto di circa 20 metri, in cui si prevede di adottare una sezione tipo B0V con infilaggi al contorno.

La Galleria Occhipinti, Figura 7, analogamente alla Caddame, si pone interamente entro la Formazione Ragusa, con copertura media di 50-60 metri, e massima pari a 85-90 m. La galleria presenta alcune faglie verticali lungo il tracciato, che determinano una riduzione delle proprietà geomeccaniche della massa rocciosa.

L'imbocco in direzione Gela interessa un deposito detritico coesivo, a copertura di un livello di marne del Tellaro e al di sotto i calcari della Formazione Ragusa.

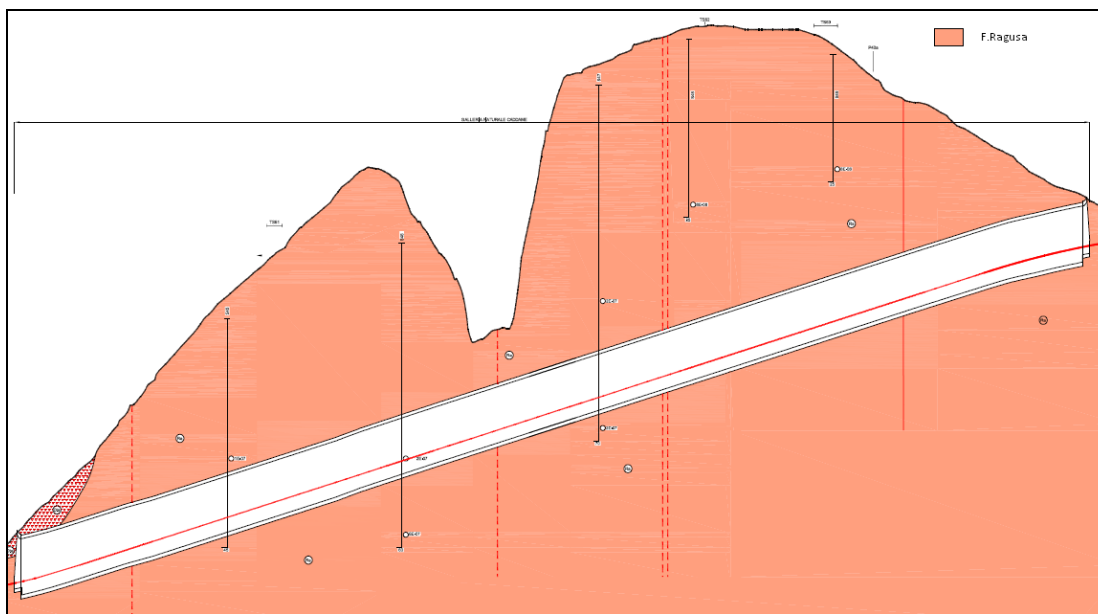


Figura 6 –Galleria Caddame

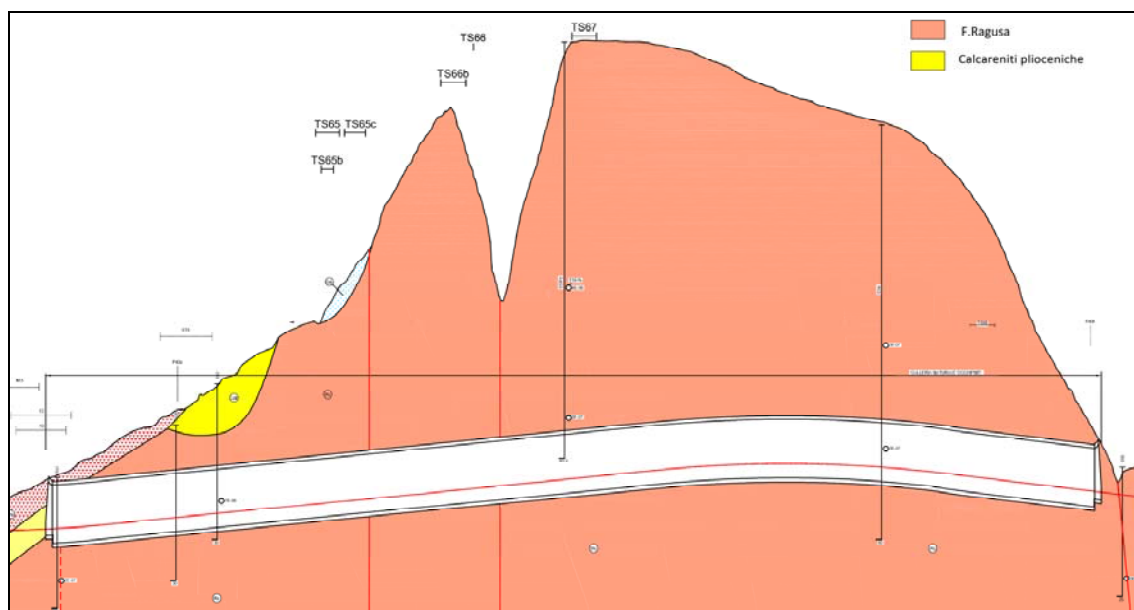


Figura 7 - Galleria Occhipinti

Vista la forte omogeneità litologica e di coperture che caratterizza le due gallerie in progetto, la scelta delle sezioni di analisi è stata fatta indipendentemente dalla galleria di appartenenza, considerando condizioni medio-massime di copertura e le più scadenti condizioni geomeccaniche.

Per tale motivo, le sezioni di calcolo esaminate si dispongono tutte nel tracciato della Galleria Occhipinti, dal momento che la Galleria Caddame è caratterizzata da indici RMR leggermente più elevati, a parità di condizioni di copertura.

Le sezioni di calcolo individuate ritenute significative per l'intero tracciato del lotto 11 in galleria naturale sono le seguenti:

- progressiva 3+700 km, Galleria Occhipinti: zona di faglia caratterizzata da una copertura di circa 30 m in cui è previsto il sostegno del cavo con la sezione B0V;
- progressiva 4+100 km, Galleria Occhipinti: rappresenta una delle sezioni a maggior copertura nella Formazione Ragusa, caratterizzata da un RMR89 pari a 52 punti. Le sezioni tipo di sostegno utilizzate sono la Ab e la Ac;
- progressiva 4+400 km, Galleria Occhipinti: in corrispondenza di questa sezione è prevista la realizzazione di una piazzola di allargò, con una copertura elevata pari a circa 70 m.

Un'ulteriore sezione di calcolo è rappresentata dalla sezione posizionata alla progressiva 2+915 km. Tale sezione si colloca in corrispondenza dell'imbocco Est della

Galleria Occhipinti, caratterizzato da un forte sfalsamento tra le due canne autostradali. A questa progressiva, infatti, la pista lato Gela si colloca in galleria naturale, con copertura molto ridotta, mentre la pista in direzione Siracusa prosegue in trincea per un ulteriore tratto di circa 10 m, come osservabile in Figura 8.

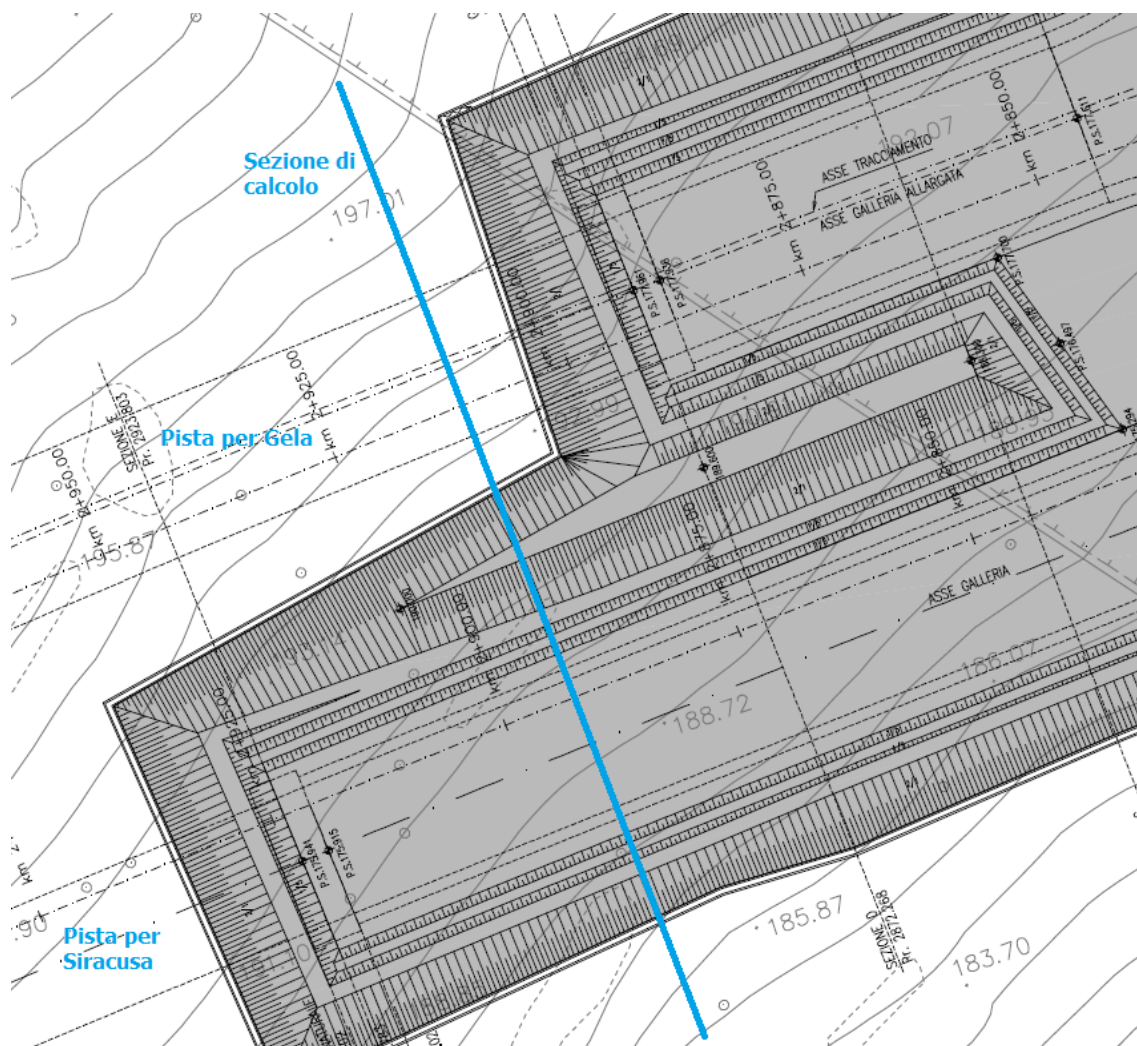



Figura 8 – Pianta scavi dell'imbocco Est della Galleria Occhipinti, con ubicazione della sezione di calcolo alla progr. 2+915 km

 INGEGNERIA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 31
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

9. METODOLOGIA DI ANALISI

La stabilità del cavo all'avanzamento e in presenza dei rivestimenti è stata analizzata mediante l'utilizzo dei seguenti modelli matematici:

- metodo convergenza-confinamento (metodo delle linee caratteristiche);
- metodo di Tamez;
- modello agli elementi finiti bidimensionale.

Linee caratteristiche

Ciascuna sezione è stata analizzata applicando la teoria delle linee caratteristiche, che consente di verificare la stabilità del cavo e del fronte in assenza di rivestimento, l'estensione della fascia plastica ed il comportamento dell'ammasso in presenza dei rivestimenti previsti. L'impiego di questa metodologia ha inoltre permesso di valutare le percentuali di detensionamento adottate nel calcolo FEM per la simulazione delle diverse fasi esecutive.


Le analisi esaminano sia la condizione naturale, in cui la galleria è priva di sostegni, allo scopo di valutare la stabilità a breve termine della sezione in esame, sia le fasi di posa dei sostegni provvisori e definitivi.

Il rivestimento definitivo viene schematizzato nel modello di calcolo come un anello di calcestruzzo chiuso.

Il metodo di calcolo adottato permette di tener conto delle principali curve di detensionamento proposte in letteratura. Caso per caso, si è scelta quale di queste risulti più idonea a valutare l'interazione roccia-sostegno, in ragione della qualità geomeccanica dell'ammasso roccioso e della tipologia di sostegno adottata.

Metodo di Tamez

La stabilità del fronte è stata valutata anche mediante il metodo proposto da Tamez, che si basa su una verifica all'equilibrio limite delle condizioni di stabilità dell'ammasso roccioso, considerando un possibile cinematismo di rottura composto da un cuneo al fronte, e due prismi che si estendono in direzione verticale per tutto il tratto di influenza dello scavo, che insistono sul cuneo al fronte e sulla chiave.

 TECNOLOGIA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 32
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							


Modello agli elementi finiti

L'analisi delle sezioni di calcolo è stata inoltre realizzata adottando il programma di calcolo agli elementi finiti Plaxis, che simula l'avanzamento della costruzione della galleria riducendo progressivamente le forze equivalenti applicate al contorno del cavo.

Tale analisi, se da un lato consente di ottenere un riscontro ai risultati dell'analisi con le linee caratteristiche, dall'altro ha il vantaggio di fornire le sollecitazioni agenti punto per punto sui rivestimenti, necessarie per realizzare la verifica strutturale degli stessi.

Si sono adottate due diverse sequenze di calcolo, di cui la prima, realizzata simulando la posa dei priverestimenti e poi dei rivestimenti definitivi, consente di avere una visione globale dell'evoluzione delle condizioni tenso-deformative dell'ammasso roccioso con l'avanzamento, mentre la seconda, che si ferma alla fase di posa dei rivestimenti preliminari, ha principalmente lo scopo di fornire le sollecitazioni agenti sui sostegni di prima fase.

Tutte le analisi sono state realizzate associando all'ammasso roccioso un modello di comportamento elastico perfettamente plastico.

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 33
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

10. METODOLOGIA ADOTTATA PER LE VERIFICHE STRUTTURALI

10.1. Analisi strutturale del rivestimento preliminare

L'analisi delle sollecitazioni agenti sui rivestimenti di prima fase in relazione alle caratteristiche di resistenza dei materiali che compongono i sostegni viene realizzata mediante i diagrammi di interazione (Kersten Lecture, Hoek, 2008).

I diagrammi di interazione sono diagrammi che permettono l'analisi della risposta del sostegno all'avanzare dello scavo e alle conseguenti deformazioni del cavo. La rappresentazione dei risultati avviene su diagrammi che riportano l'andamento del momento flettente rispetto allo sforzo normale e alle sollecitazioni di taglio, nel caso delle centine e del calcestruzzo spruzzato. Nel caso in cui i sostegni preliminari si compongano di centine annegate nel calcestruzzo proiettato, infatti, diventa importante conoscere la distribuzione delle sollecitazioni agenti su ciascuno di questi elementi di supporto.

La trattazione di seguito descritta è stata proposta da Carranza-Torres e Diederichs (2009).

Si consideri una sezione di sostegno composito di larghezza pari a b , comprendente n centine, posizionate con un interasse $s = b/n$, Figura 9. Generalmente nei modelli numerici tale sezione viene modellata come un sostegno equivalente caratterizzato da uno spessore t_{eq} ed un modulo elastico E_{eq} .

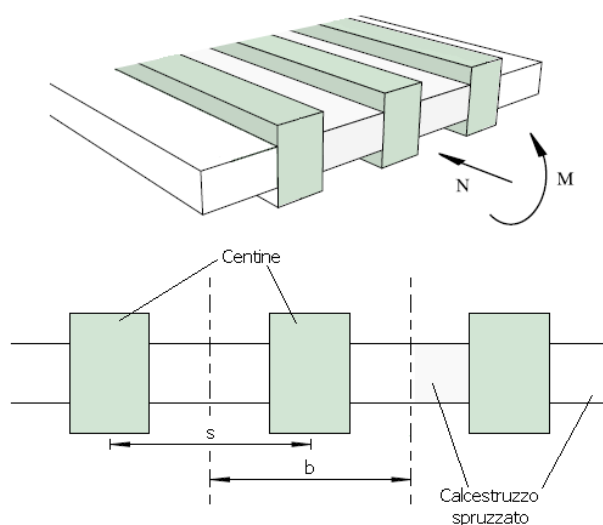



Figura 9 - Geometria di riferimento (Hoek, 2009, modificato)

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 34
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera			Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev						

Le assunzioni di base sono le seguenti:

- si suppone che le centine siano disposte in modo simmetrico, di modo che gli assi neutri delle centine e del calcestruzzo proiettato coincidano;
- si ipotizza che l'intero guscio di calcestruzzo proiettato si comporti in modo elastico.

10.1.1. Redistribuzione delle sollecitazioni sugli elementi di sostegno

Il primo passo per comprendere in quali proporzioni si distribuiscono 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 di Young;


A = area della sezione (nel caso del calcestruzzo proiettato pari a $s \cdot t_{cls}$);

I = momento d'inerzia (nel caso del calcestruzzo proiettato pari a $s \cdot t_{cls}^3 / 12$);

ν = modulo di Poisson.

Le sollecitazioni agenti sul rivestimento preliminare vengono valutate mediante il modello numerico bidimensionale, nel quale l'intero sostegno viene modellato come un sostegno continuo equivalente. A questo punto, allo scopo di analizzare singolarmente il comportamento delle centine e del calcestruzzo proiettato, è necessario ridistribuire tali sollecitazioni sui due diversi componenti del sistema di supporti composito.

Partendo dall'ipotesi che lo spessore del calcestruzzo proiettato sia molto ridotto rispetto al raggio della galleria, si fa riferimento ad una redistribuzione delle sollecitazioni su sottili elementi trave curvilinei che rappresentano sia le centine che il calcestruzzo stesso. Di seguito sono riportate le formulazioni utilizzate:

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 35
	Pr	Strada	Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera	Tipo elab	N. Elab.		Rev										

1. Momento flettente

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

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

2. Sforzo normale

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

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

dove R rappresenta il raggio della galleria (nel caso in esame di circa 7.2 m)

3. Taglio

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

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

10.1.2. Calcolo della capacità di sostegno

Questa procedura permette di verificare se le sollecitazioni agenti nelle centine e nel calcestruzzo proiettato si pongono entro i limiti di accettabilità delle due tipologie di sostegno, a meno di un certo fattore di sicurezza.

Resistenza a sollecitazioni di momento flettente-sforzo normale

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


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

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:

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

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

$$M_{max} = \pm \left(\frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{FS} \right) \frac{I}{t} \text{ a cui corrisponde una } N_{cr} = \frac{A \cdot (\sigma_{max} + \sigma_{min})}{FS}$$

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 36
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

Resistenza a sollecitazioni di taglio-sforzo normale

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

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{\max}}{A} \quad \tau_{\max} = \frac{3Q}{2A}$$

Dai cerchi di Mohr:

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

Il fattore di sicurezza può essere inoltre definito come: $FS = \frac{\sigma_c}{\sigma_1} = \frac{\sigma_t}{\sigma_3}$

Di conseguenza, accorpando le precedenti equazioni, si ottiene che:

$$N = \frac{\sigma_c \cdot A}{FS} - \frac{9Q^2 \cdot FS}{4\sigma_c \cdot A} \text{ per quanto riguarda la resistenza in compressione}$$

$$N = \frac{\sigma_t \cdot A}{FS} - \frac{9Q^2 \cdot FS}{4\sigma_t \cdot A} \text{ per quanto riguarda la resistenza in trazione}$$

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

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

10.2. Analisi strutturale del rivestimento definitivo

Le verifiche ed i dimensionamenti delle membrature saranno eseguiti seguendo quanto esposto nel presente paragrafo. Si sottolinea che, secondo quanto previsto dalle NTC, la verifica strutturale dei rivestimenti gettati in opera è stata realizzata considerando due diverse modalità di verifica, adottate alternativamente per le sezioni armate e per le sezioni prive di armatura.

Di conseguenza, per le sezioni di calcolo per le quali è necessaria l'armatura del rivestimento definitivo, si farà riferimento alle metodologie di verifica descritte nei paragrafi 3710.2.1 e 10.2.2, mentre per le sezioni in cui l'armatura non è necessaria si farà riferimento a quanto riportato al paragrafo 10.2.3.

10.2.1. Modalità di verifica agli stati limite ultimi

Verifiche a flessione

Le verifiche a flessione controlleranno che, per ogni elemento si verifichi:

$$M_{sd} < M_{Rd}$$

ovvero che il momento sollecitante ultimo sia minore del momento resistente della sezione stessa.

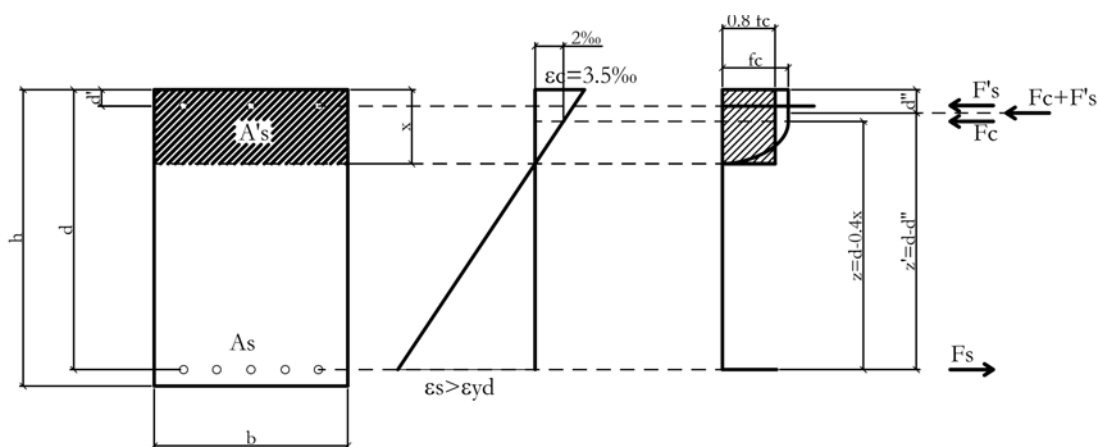


Figura 10 – Schema di calcolo del momento resistente

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:
$$M_{RD} = F_s \cdot (d - d'')$$


$$d'' = \frac{F'_s \cdot d' + F_c \cdot 0.4 \cdot x}{F_c + F'_s}$$

dove d'' viene valutato come:

$$F'_s: \quad F'_s = f_{yd} \cdot A'_s$$

$$F_s: \quad F_s = f_{yd} \cdot A_s$$

$$F_c: \quad F_c = 0.8 \cdot f_c \cdot b \cdot x$$

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 38
	Pr	Strada	Lotto		Macro opera		Opera			Parte di opera	Tipo elab	N. Elab.		Rev									

Verifiche a taglio

Secondo le prescrizioni contenute nella normativa nazionale e nell'Eurocodice 2 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_{Rd1}) ovvero se:

$$V_{Sd} > V_{Rd1}$$

dove V_{Rd1} è definito come:

$$V_{Rd1} = \left\{ 0.18 \cdot k \cdot \frac{(100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{1/3}}{\gamma_c} + 0.15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b_w \cdot d \geq (v_{\min} + 0.15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$$

Con:

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

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

ρ_1 = percentuale d'armatura di trazione $A_s/(bwd) \leq 0.02$

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

d = altezza utile della sezione

b_w = larghezza minima della sezione

Ogni qual volta il taglio sollecitante risulti essere maggiore di V_{Rd1} si dovrà verificare che in ogni sezione risulti essere

$$V_{Sd} < V_{Rd2}$$

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

$$V_{Sd} \leq V_{Rd3}$$

dove:

$$V_{Rd2} = 0.9 \cdot b_w \cdot d \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot \frac{(ctg \alpha + ctg \vartheta)}{(1 + ctg^2 \vartheta)}$$

$$V_{Rd3} = 0.9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (ctg \alpha + ctg \vartheta) \cdot \sin \alpha$$

Con:

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


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 ($f'_{cd} \leq 0.5 f_{cd}$)

α_c = coefficiente maggiorativo dipendente dalla compressione della membratura

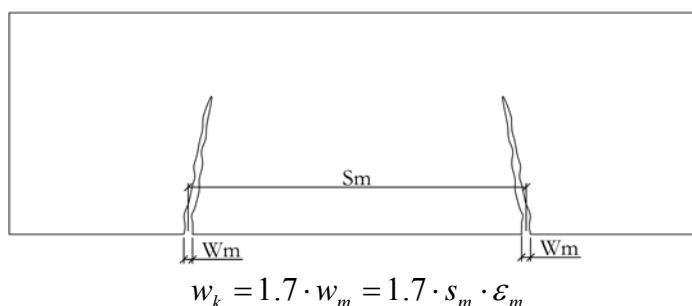
 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 39
	Pr	Strada		Lotto	Macro opera		Opera			Parte di opera	Tipo elab	N. Elab.		Rev									

10.2.2. Modalità di verifica agli stati limite di servizio

Verifiche fessurazione

La verifica a fessurazione viene effettuata garantendo che in ogni sezione, sotto le condizioni di carico di servizio, l'ampiezza caratteristica delle fessure (w_k) sia minore di 0.2 mm.

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



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

 INGEGNERIA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 40
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

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 tensioni massime in esercizio

Per la verifica delle massime tensioni agenti nel calcestruzzo e nell'acciaio in fase di esercizio si adottano le limitazioni tensionali relative alla combinazione dei carichi quasi permanente:

- $\sigma_{c,max} = 0.45 \times f_{ck} = 13.1 \text{ N/mm}^2$ per il calcestruzzo
- $\sigma_{s,max} = 0.8 \times f_{yk} = 360 \text{ N/mm}^2$ per l'acciaio

10.2.3. Verifica delle gallerie senza predisposizione di armatura

Si riportano nel seguito le verifiche effettuate per le tipologie di galleria per cui non è prevista armatura.

Il criterio di verifica adottato è quello riportato al punto 4.1.11 delle NTC2008.

Le sollecitazioni di calcolo ottenute con Plaxis sono state considerate senza l'applicazione di un coefficiente di amplificazione, coerentemente con la combinazione rara di carico richiesta da normativa.

Ai fini delle verifiche strutturali è stata trascurata la resistenza a trazione del calcestruzzo e sono stati verificati i seguenti limiti tensionali:

$$\sigma_c = 0,25 \cdot f_{ck} = 7,3 \text{ MPa} \quad \text{sforzo massimo di compressione}$$

$$\tau_c = 0,21 \cdot f_{ctk} = 0,42 \text{ MPa} \quad \text{sforzo massimo di taglio}$$

Il calcolo della massima sollecitazione di taglio è stata effettuata mediante formula di Jourawski applicata ad una sezione rettangolare:

$$\tau_{Ed} = \frac{3 \cdot V}{2 \cdot A^*}$$

V rappresenta l'azione di taglio agente nel baricentro della sezione e A^* è l'area della sezione reagente per effetto della sollecitazione di flessione.

11. ANALISI DI STABILITA' CON IL METODO DELLE LINEE CARATTERISTICHE ED IL METODO DI TAMEZ

11.1. Sezione alla progressiva 3+700 km

Copertura 30 m da livelletta

Proprietà della sezione di calcolo:

La sezione di calcolo rappresenta una delle sezioni a maggiore copertura della Galleria Occhipinti in una zona di faglia entro la Formazione Ragusa. L'indice RMR associato alla zona di influenza della faglia è pari a 42 punti.

La sezione tipo adottata è la B0V, analogamente a quanto previsto per tutte le zone di faglia accertata o presunta lungo il tracciato in galleria.

Nella seguente Figura 11 si propone la caratterizzazione della zona di faglia entro i calcari della Formazione Ragusa:

copertura		25	m	
peso specifico ammasso		23	kN/m ³	
indici caratterizz.	RMR _{SS}	42		
	BRMR	-		
	Q'	-		
	m _i	10		
	σ _c	30	MPa	
	σ _{v0}	0,58	MPa	
	GSI	37,00		
Hoek - Brown	m _p (di picco)	1,05		
	s _p (di picco)	9,12E-04		
	m _r (residuo)	0,74		
	s _r (residuo)	3,65E-05		
Mohr - Coulomb	copertura	c _p (di picco)	0,236	MPa
		φ _p (di picco)	50	°
		c _r (residuo)	0,181	MPa
		φ _r (residuo)	48	°
	origine	c _p (di picco)	0,093	MPa
		φ _p (di picco)	64	°
		c _r (residuo)	0,010	MPa
		φ _r (residuo)	64	°
parametri di resistenza	E	2,59	GPa	
	σ _{gd}	0,91	MPa	
	σ _{tg}	-0,03	MPa	
	β	0,029		

Figura 11 – Caratterizzazione della zona di faglia in calcare alla progressiva 3+700 km

R medio galleria = 7.5 m

11.1.1. Analisi di stabilità con il metodo delle linee caratteristiche

La sezione è stata analizzata con la metodologia delle linee caratteristiche, che consente di analizzare in modo rapido le condizioni di stabilità del cavo e del fronte, e valutare, in relazione alla distanza di posa dal fronte, l'ordine di grandezza delle sollecitazioni agenti sui rivestimenti.

Nelle figure seguenti si propongono i risultati dell'analisi realizzata considerando un cavo privo di sostegni. In Figura 12 si riportano le curve caratteristiche del fronte e del cavo: si osserva una sostanziale stabilità del cavo, con spostamenti millimetrici sia al fronte che al cavo. La Figura 18 riporta l'estensione delle zone plastiche al cavo e al fronte in assenza di sostegni: la plasticizzazione è pressoché inesistente, il comportamento del cavo e del fronte è di tipo elastico.

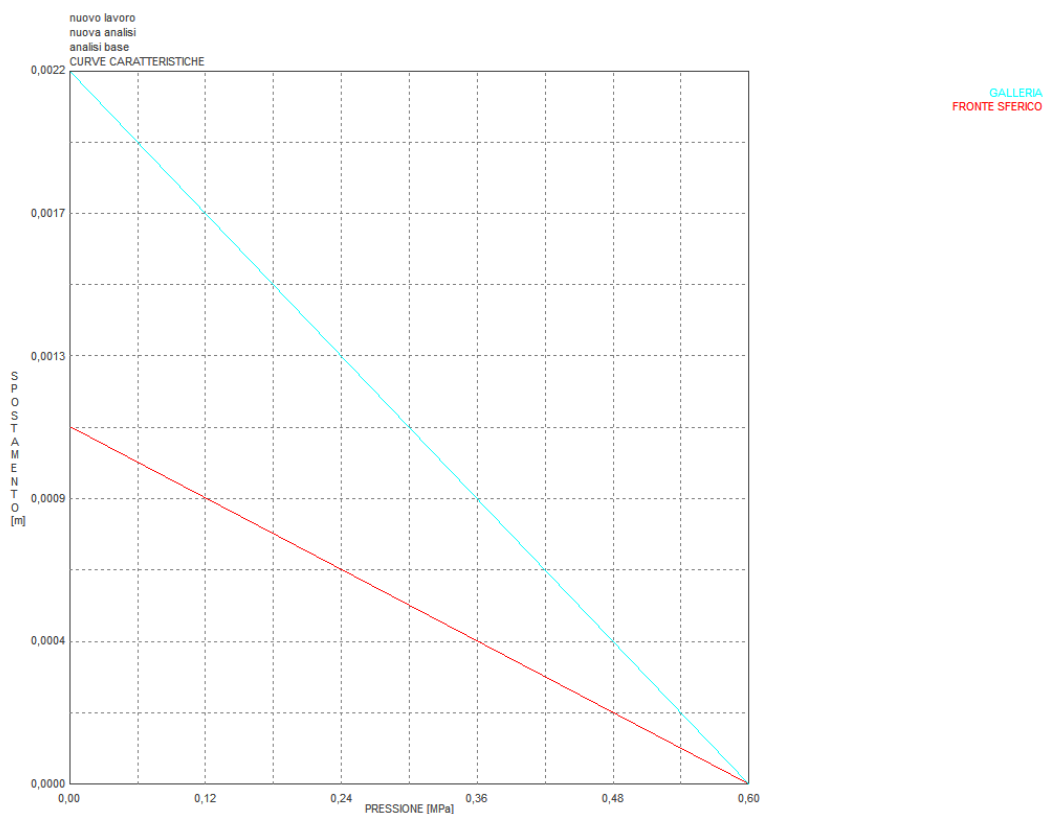


Figura 12 – Curve caratteristiche del fronte e del cavo in assenza di sostegni



Figura 13 – Zone plastiche al contorno galleria in assenza di sostegni

Si propongono ora gli stessi risultati ottenuti ipotizzando la messa in opera dei rivestimenti previsti dalla sezione B0V(125), ad una distanza dal fronte di 1 m per quanto riguarda i sostegni di prima fase, a 50 metri per il rivestimento definitivo. La Figura 14 riporta nuovamente le curve caratteristiche del fronte e del cavo, in relazione alle linee di reazione dei sostegni: si osserva dunque una ulteriore riduzione degli spostamenti del cavo. In Figura 20 si propongono le sollecitazioni previste sui sostegni di prima e seconda fase: tutte le sollecitazioni risultano sempre inferiori ai limiti di resistenza dei materiali.

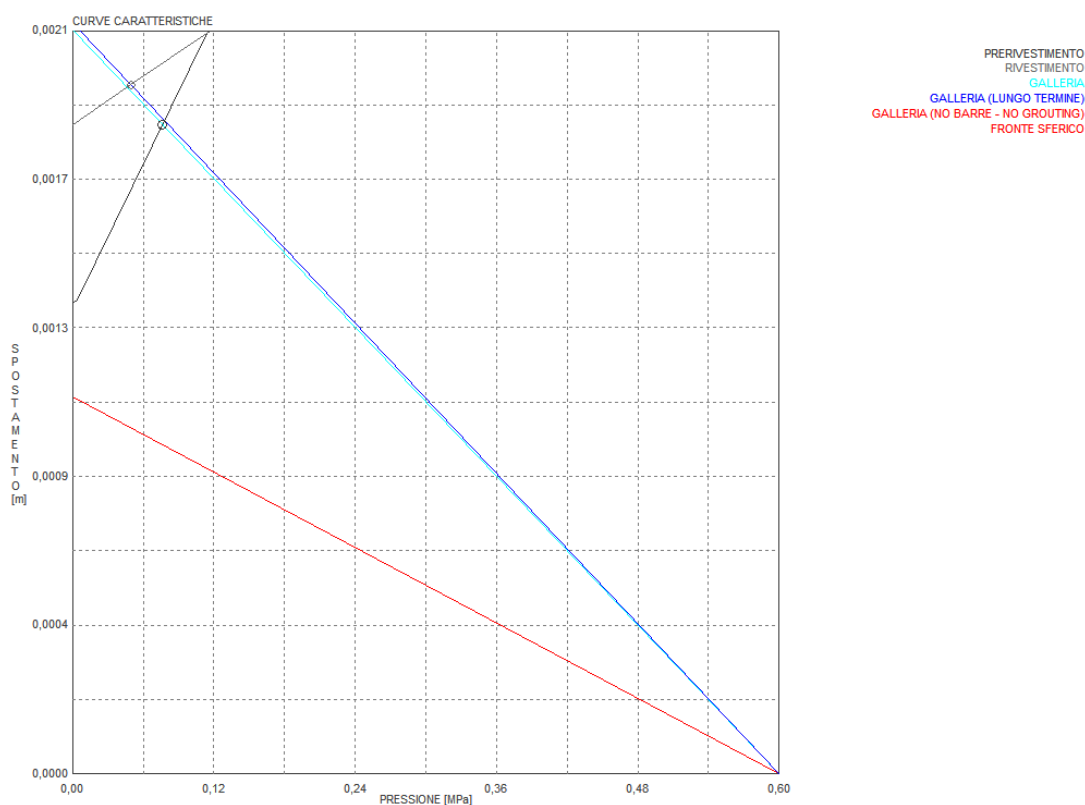


Figura 14 – Curve caratteristiche del fronte e del cavo in presenza dei rivestimenti di prima e seconda fase

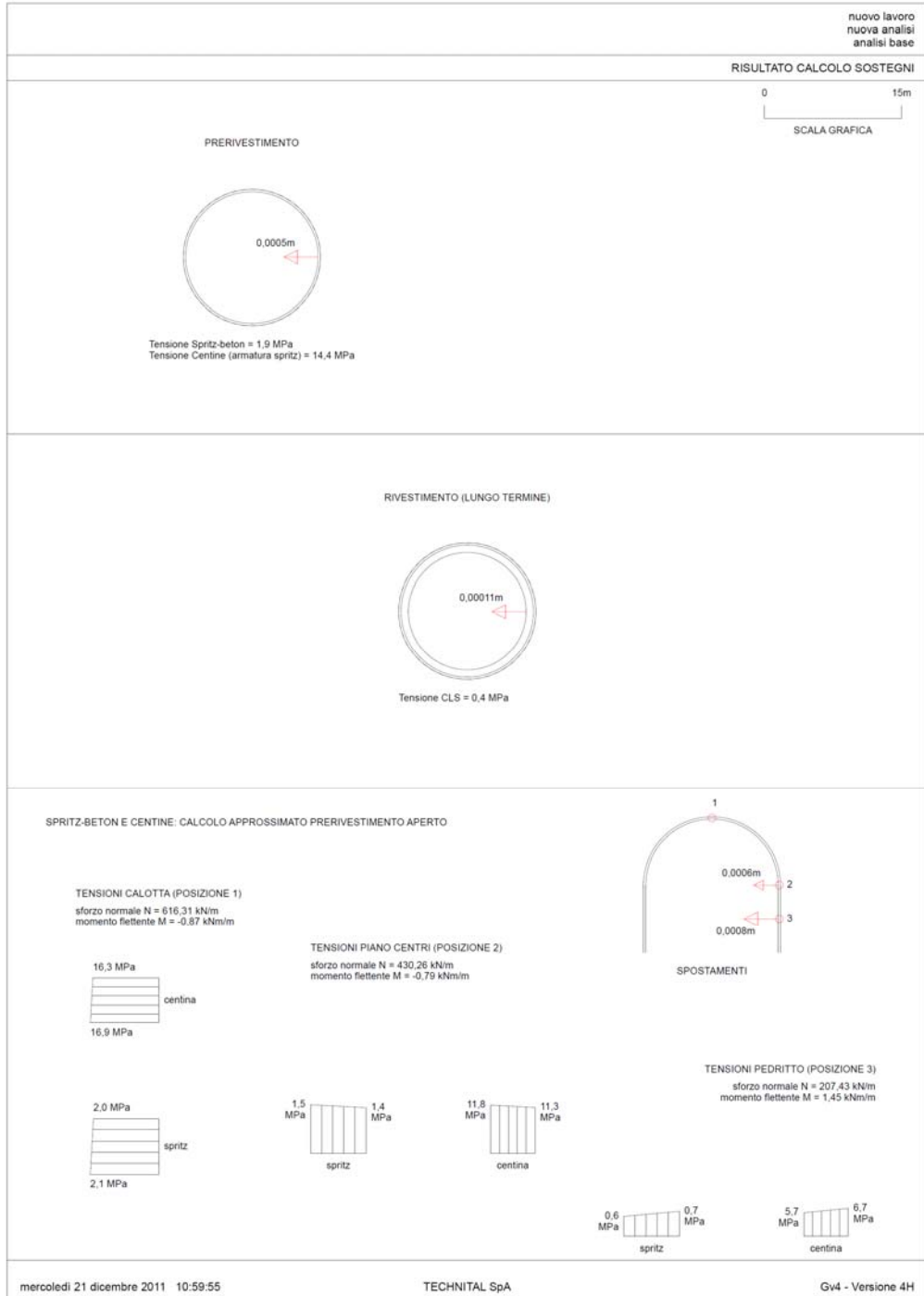


Figura 15 – Sollecitazioni agenti sui sostegni di prima e seconda fase

11.1.2. Analisi di stabilità con il metodo di Tamez

L'analisi Tamez è stata realizzata per la massima sezione di scavo (canna direzione Gela) della Galleria Occhipinti, considerando un avanzamento di 1 m in assenza di sostegni per la sezione B0V.

L'analisi evidenzia la sostanziale stabilità del fronte, Figura 16, con un fattore di sicurezza pari a 2.7. Per quanto riguarda il cavo, invece, la stabilità è in condizioni di equilibrio limite, con un fattore di sicurezza di 0.9: è quindi dimostrata la necessità di un intervento di sostegno della chiave mediante infilaggi metallici. Il fattore di sicurezza globale è pari a 2.16.

ANALISI DI STABILITA' DI TAMEZ - TABELLE RIEPILOGATIVE CASO GENERALE

RIASSUNTO DATI DI INGRESSO

GEOMETRIA			
a	lunghezza libera	1	m
A	h galleria	11.6	m
D	largh. galleria	17.5	m
L	estens. longitud. cuneo	2.68	m
H	copertura da calotta	20	m
Z _d	tratto di influenza scavo	20.00	m
S	sezione di scavo	170.14	m ²

TERRENO			
γ	peso di volume	23	kNm ⁻³
c	coesione	93	kPa
φ	attrito	64	°
q _s	sovraccarico	0	kPa

CONDIZIONI IDRAULICHE			
γ _w	peso di volume	10	kN/m ³
α ₁	condizioni di drenaggio	0.4	
β	permeab. ammasso	1	
h _w	copertura acqua	0	m
	presenza di raggiera drenante in chiave?	no	si/no

RIASSUNTO RISULTATI - no interventi			
STABILITA' DEL FRONTE			
FS _f	fattore di sicurezza	2.7	
p _f	pressione al fronte	0.00	kPa
p _{f max}	pressione massima applicabile	-26.34	kPa
STABILITA' DELLA CHIAVE			
FS _{c pl}	fattore di sicurezza alla plasticizzazione	0.91	
FS _c	fattore di sicurezza	0.9	
p _a	pressione in chiave	0.00	kPa
STABILITA' GLOBALE			
FS _g	fattore di sicurezza	2.16	

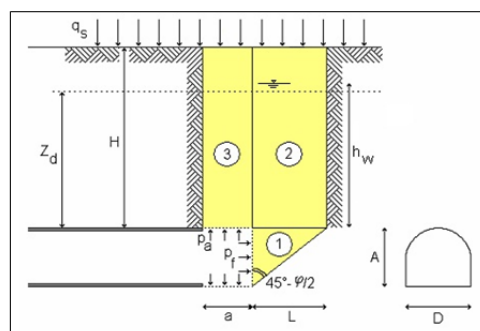


Figura 16 – Analisi di stabilità con il metodo di Tamez

11.2. Sezione alla progressiva 4+100 km

Copertura 80 m da livelletta

Distanza fra i piedritti delle due gallerie affiancate = 59 m

Proprietà della sezione di calcolo:

La sezione di calcolo rappresenta una delle sezioni a maggiore copertura della Galleria Occhipinti entro la Formazione Ragusa, caratterizzata in questa tratta da un indice RMR89 pari a 52 punti.

La sezione tipo adottata è la Ac, con la sezione Ab come sezione alternativa.

Le analisi di stabilità vengono realizzate considerando i parametri geotecnici propri del calcare con un RMR89 di 52 punti nel caso della sezione Ab, con quelli ottenuti scalando l'indice RMR di 5 punti per la sezione Ac, per tenere conto di un'eventuale riduzione locale della qualità geomeccanica.

Nella seguente Figura 17 si propongono le caratterizzazioni dei calcari della Formazione Ragusa adottate per le due sezioni di calcolo:

		copertura	70	m				copertura	70	m
		peso specifico ammasso	23	kN/m ³				peso specifico ammasso	23	kN/m ³
indici caratterizz.	RMR ₈₉	RMR ₈₉	52		indici caratterizz.	RMR ₈₉	RMR ₈₉	47		
		BRMR	-				BRMR	-		
		Q'	-				Q'	-		
		m _i	10				m _i	10		
		σ _c	30	MPa			σ _c	30	MPa	
		σ _{v0}	1,61	MPa			σ _{v0}	1,61	MPa	
GSI	47,00		GSI	42,00						
Hoek - Brown	m _p (di picco)	m _p (di picco)	1,51		Hoek - Brown	m _p (di picco)	m _p (di picco)	1,26		
		s _p (di picco)	2,77E-03				s _p (di picco)	1,59E-03		
		m _r (residuo)	1,05				m _r (residuo)	0,88		
		s _r (residuo)	1,11E-04				s _r (residuo)	6,36E-05		
Mohr - Coulomb	copertura	c _p (di picco)	0,539	MPa	Mohr - Coulomb	copertura	c _p (di picco)	0,495	MPa	
		φ _p (di picco)	45	°			φ _p (di picco)	43	°	
		c _r (residuo)	0,432	MPa			c _r (residuo)	0,414	MPa	
		φ _r (residuo)	42	°			φ _r (residuo)	40	°	
	origine	c _p (di picco)	0,179	MPa		origine	c _p (di picco)	0,127	MPa	
		φ _p (di picco)	60	°			φ _p (di picco)	60	°	
		c _r (residuo)	0,019	MPa			c _r (residuo)	0,014	MPa	
		φ _r (residuo)	60	°			φ _r (residuo)	60	°	
parametri di resistenza	E	E	4,61	GPa	parametri di resistenza	E	E	3,46	GPa	
		σ _{gsd}	1,58	MPa			σ _{gsd}	1,20	MPa	
		σ _{tg}	-0,06	MPa			σ _{tg}	-0,04	MPa	
		β	0,035				β	0,032		

Figura 17 – Calcolo dei parametri geotecnici per le sezioni tipo Ab e Ac

R medio galleria = 7.5 m

11.2.1. Analisi di stabilità con il metodo delle linee caratteristiche – Sezione Ac

La sezione è stata analizzata con la metodologia delle linee caratteristiche, che consente di analizzare in modo rapido le condizioni di stabilità del cavo e del fronte, e valutare, in relazione alla distanza di posa dal fronte, l'ordine di grandezza delle sollecitazioni agenti sui rivestimenti.

Nelle figure seguenti si propongono i risultati dell'analisi realizzata considerando un cavo privo di sostegni. In Figura 18 si riportano le curve caratteristiche del fronte e del cavo: si osserva una sostanziale stabilità del cavo, con spostamenti massimi inferiori al mezzo centimetro al cavo, inferiori ai 3 mm al fronte. La Figura 19 riporta l'estensione delle zone plastiche al cavo e al fronte in assenza di sostegni: la plasticizzazione raggiunge uno spessore di 0.5-1 m al contorno galleria, di 10 cm al fronte.

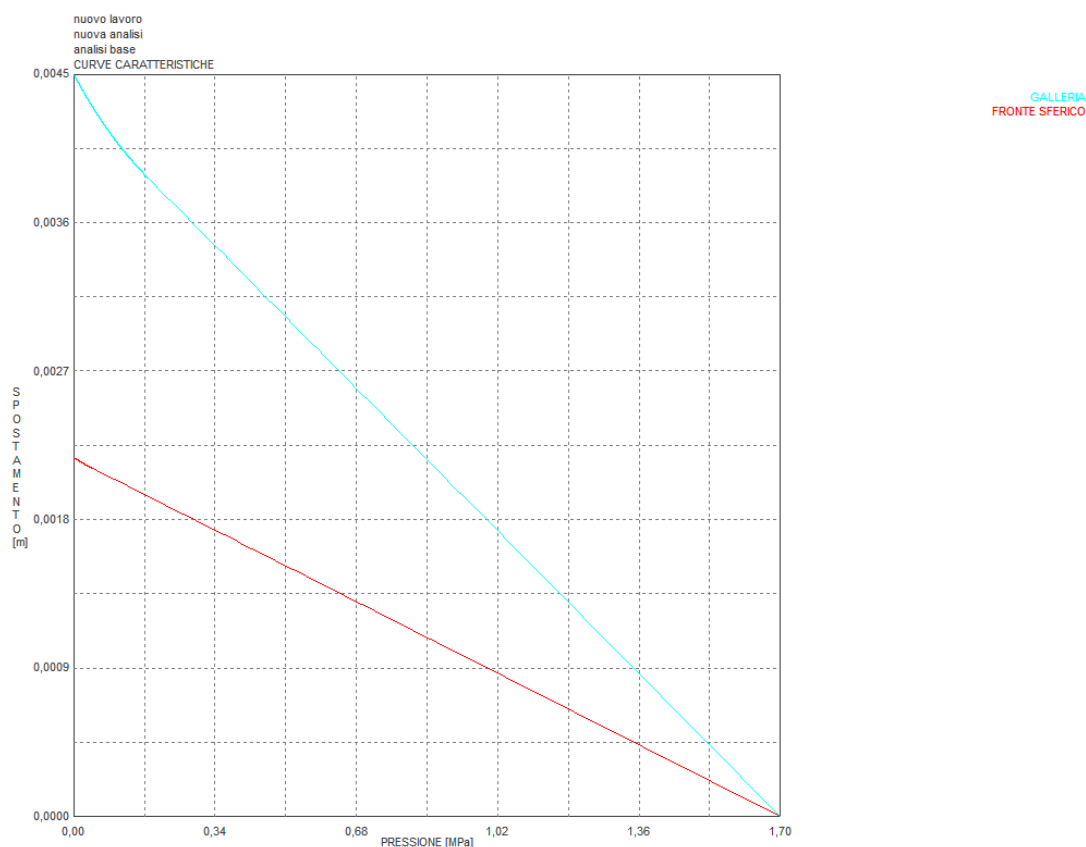


Figura 18 – Curve caratteristiche del fronte e del cavo in assenza di sostegni

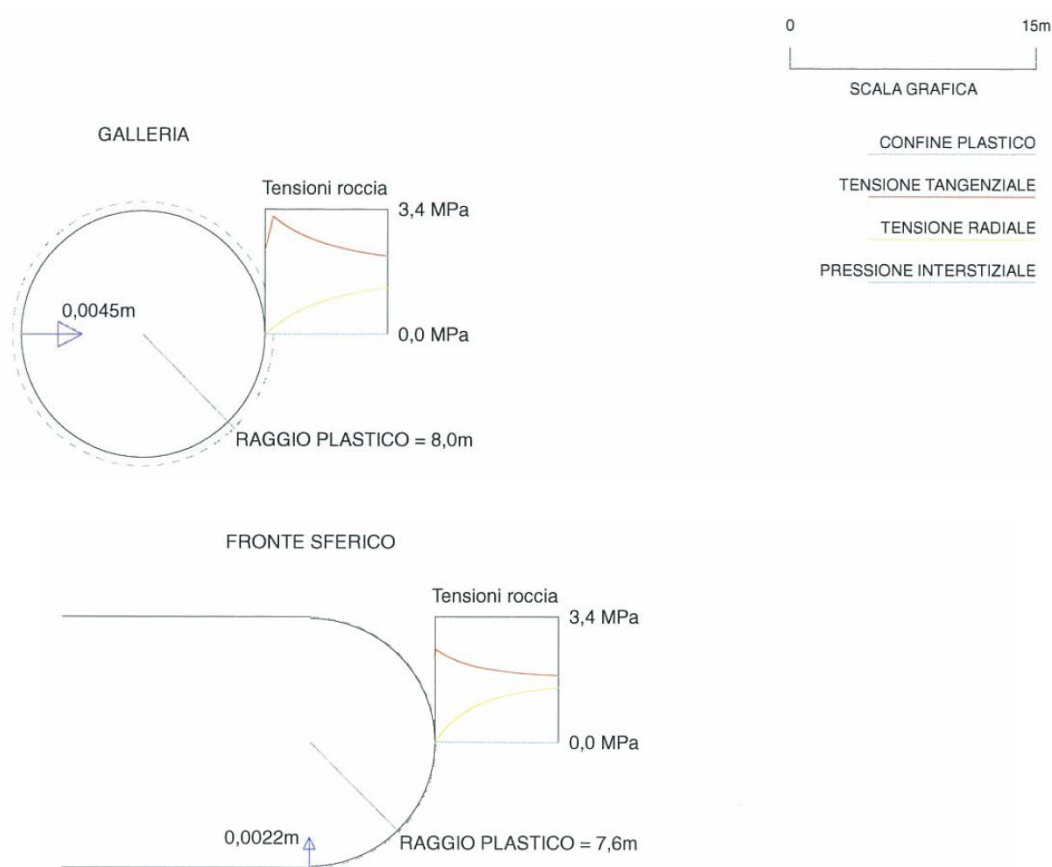


Figura 19 – Zone plastiche al contorno galleria in assenza di sostegni

Si propongono ora gli stessi risultati ottenuti ipotizzando la messa in opera dei rivestimenti previsti dalla sezione Ac, ad una distanza dal fronte di 3 m per quanto riguarda i sostegni di prima fase, a 50 metri per il rivestimento definitivo.

La Figura 20 riporta nuovamente le curve caratteristiche del fronte e del cavo, in relazione alle linee di reazione dei sostegni: si osserva dunque una ulteriore riduzione degli spostamenti del cavo. In Figura 21 si propongono le sollecitazioni previste sui sostegni di prima e seconda fase: tutte le sollecitazioni risultano sempre inferiori ai limiti di resistenza dei materiali.

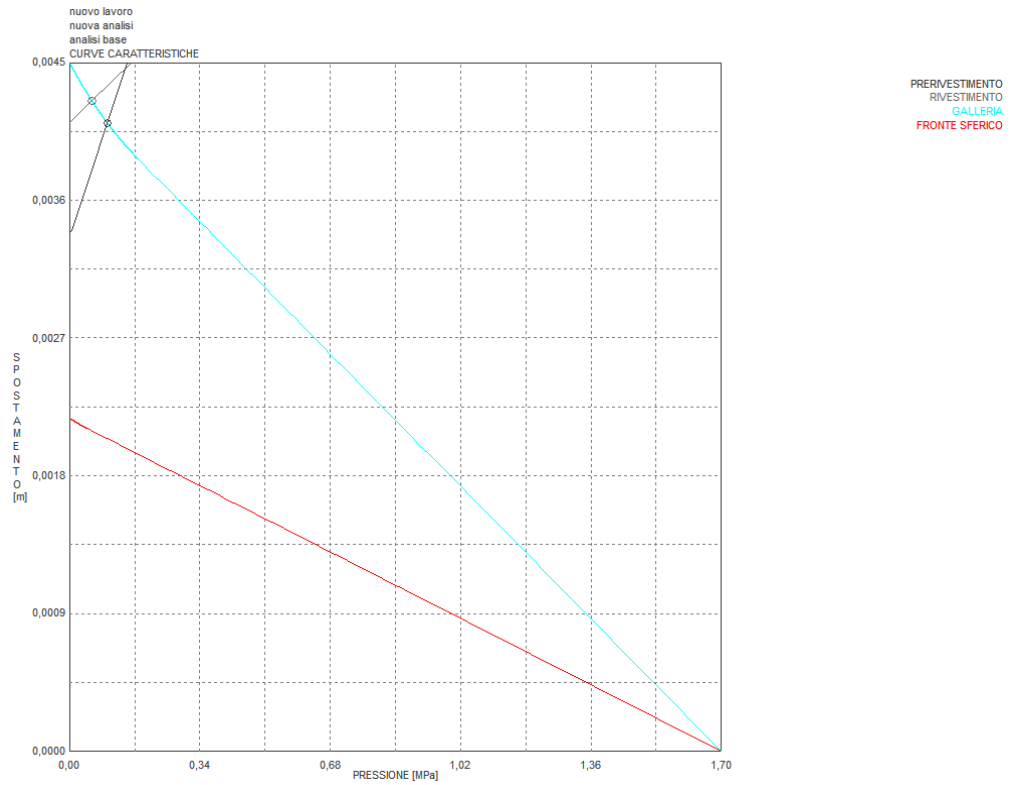


Figura 20 – Curve caratteristiche del fronte e del cavo in presenza dei rivestimenti di prima e seconda fase

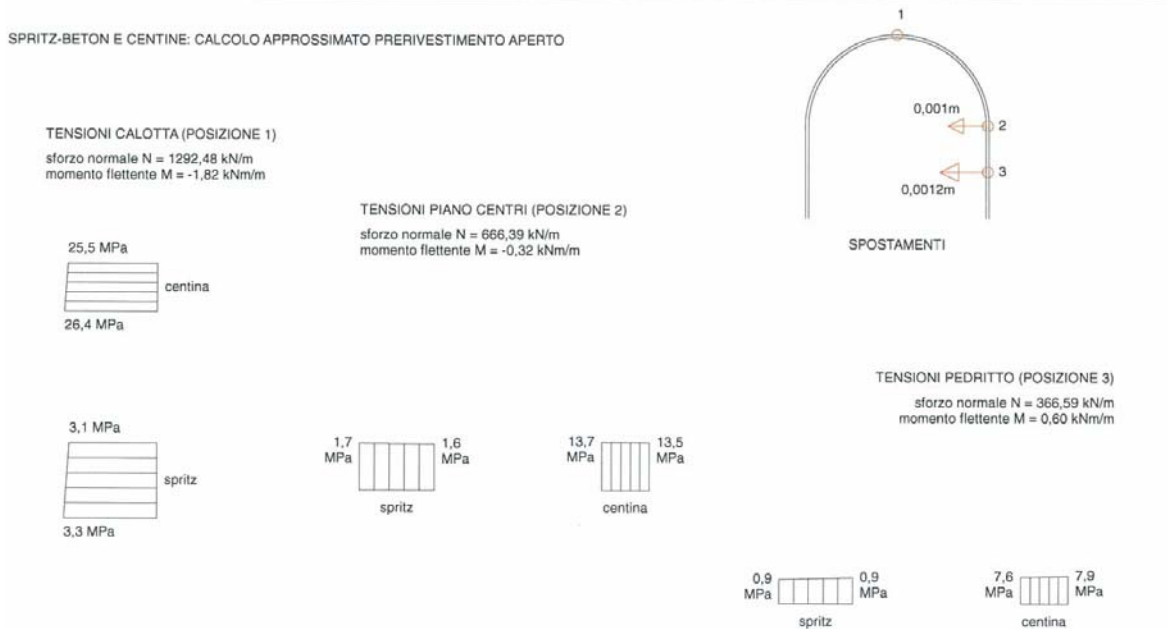


Figura 21 – Sollecitazioni agenti sui sostegni di prima e seconda fase

11.2.2. Analisi di stabilità con il metodo delle linee caratteristiche – Sezione Ab

La sezione è stata analizzata con la metodologia delle linee caratteristiche, che consente di analizzare in modo rapido le condizioni di stabilità del cavo e del fronte, e valutare, in relazione alla distanza di posa dal fronte, l'ordine di grandezza delle sollecitazioni agenti sui rivestimenti.

Nelle figure seguenti si propongono i risultati dell'analisi realizzata considerando un cavo privo di sostegni. In Figura 22 si riportano le curve caratteristiche del fronte e del cavo: si osserva una sostanziale stabilità del cavo, con spostamenti millimetrici sia al fronte che al cavo. La Figura 23 riporta l'estensione delle zone plastiche al cavo e al fronte in assenza di sostegni: la plasticizzazione non raggiunge i 50 cm al contorno galleria, il fronte presenta un comportamento perfettamente elastico.

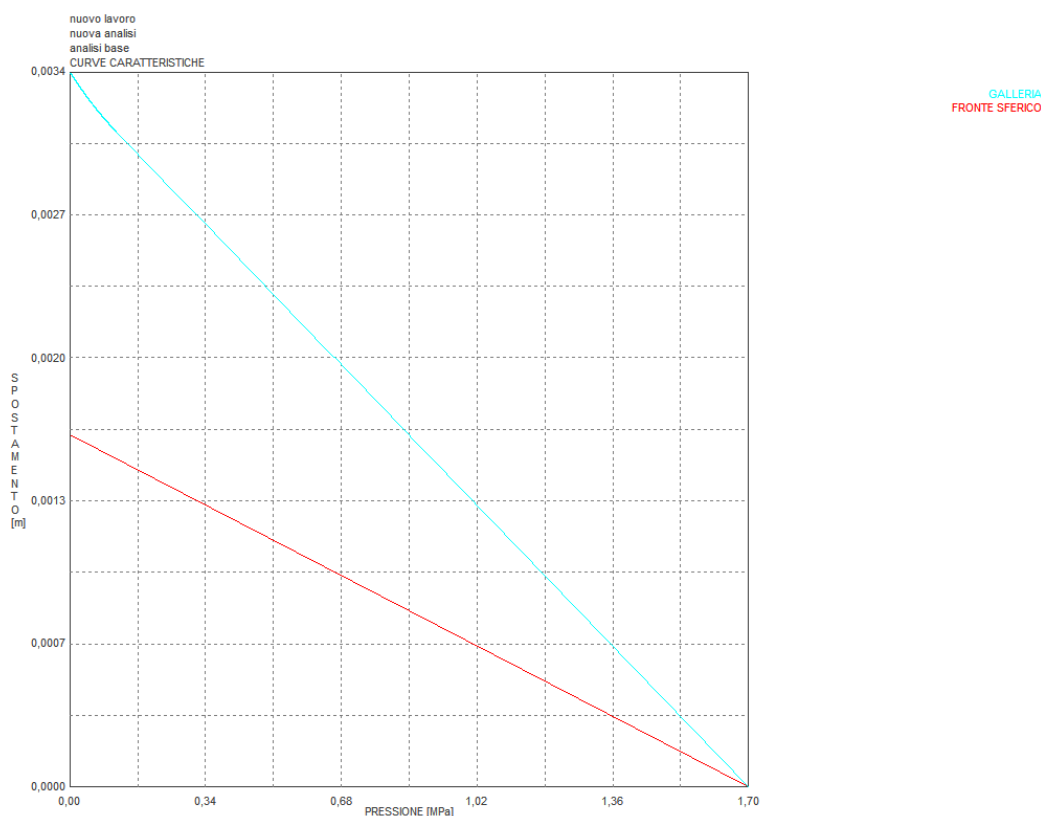


Figura 22 – Curve caratteristiche del fronte e del cavo in assenza di sostegni

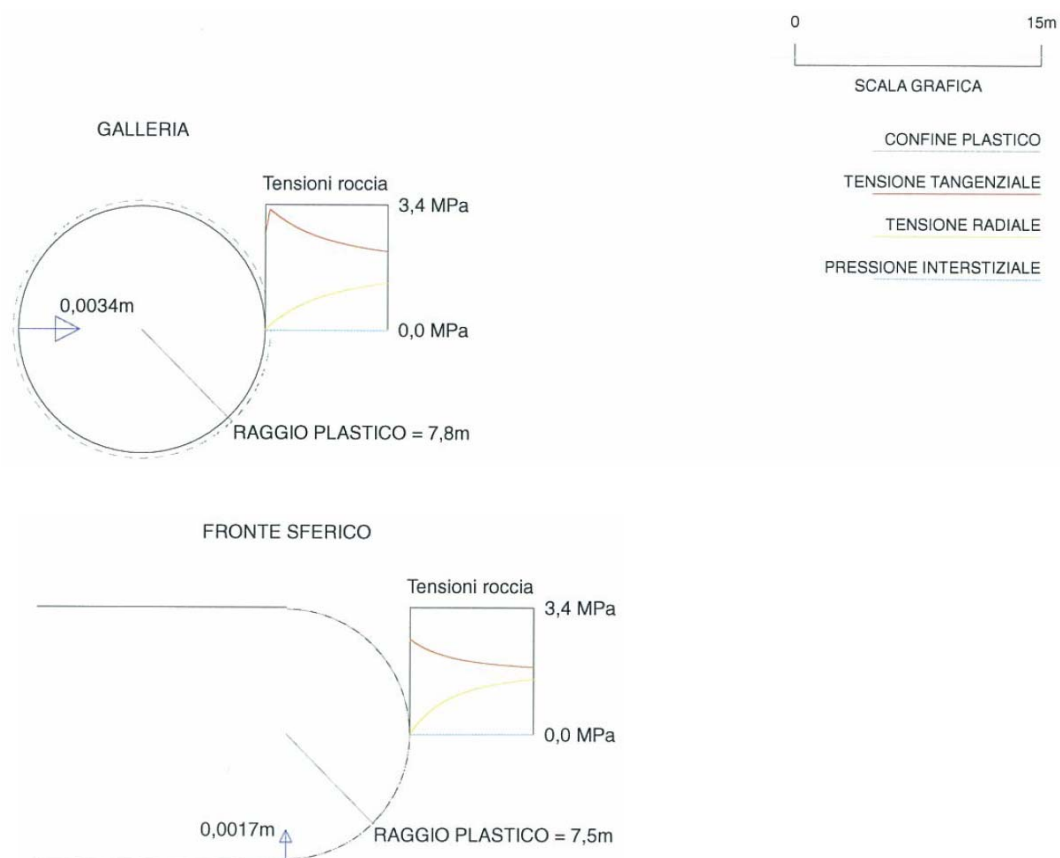


Figura 23 – Zone plastiche al contorno galleria in assenza di sostegni

Si propongono ora gli stessi risultati ottenuti ipotizzando la messa in opera dei rivestimenti previsti dalla sezione Ab, ad una distanza dal fronte di 5 m per quanto riguarda i sostegni di prima fase, a 50 metri per il rivestimento definitivo.

La Figura 29 riporta nuovamente le curve caratteristiche del fronte e del cavo, in relazione alle linee di reazione dei sostegni. In Figura 30 si propongono le sollecitazioni previste sui sostegni di prima e seconda fase: tutte le sollecitazioni risultano sempre inferiori ai limiti di resistenza dei materiali.

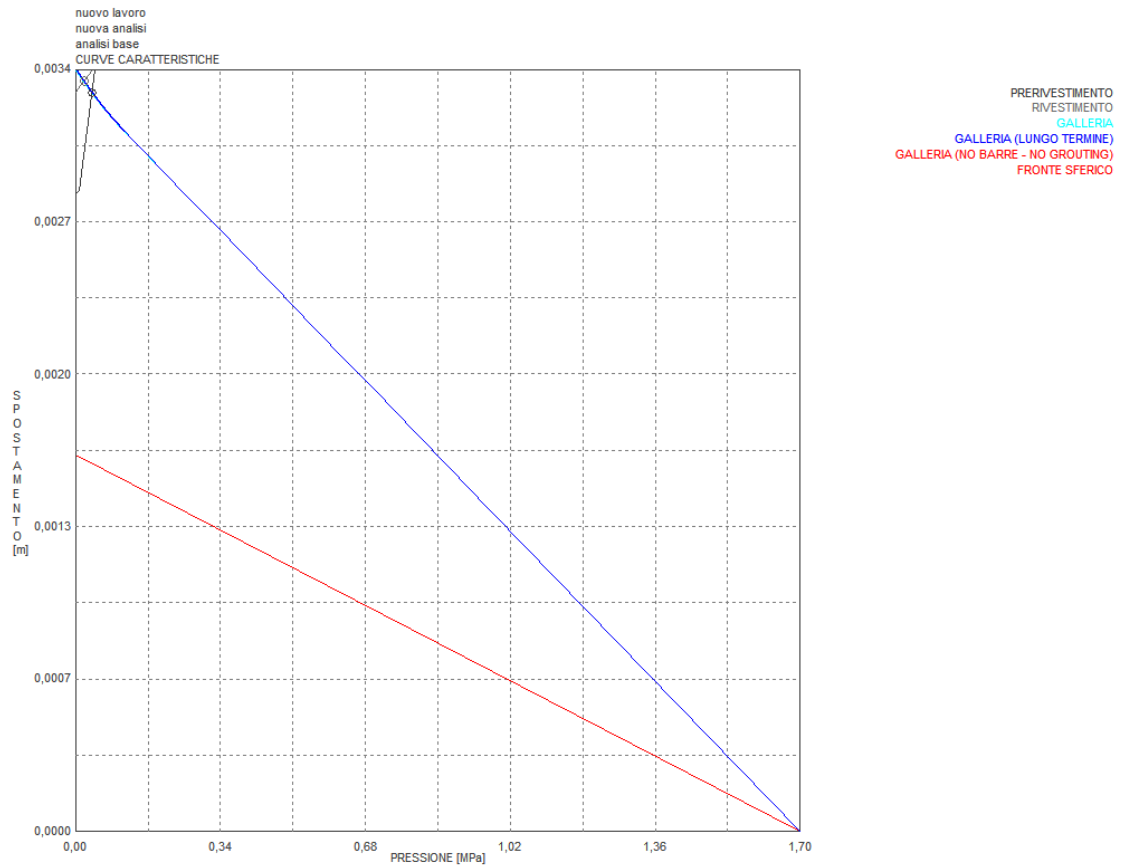


Figura 24 – Curve caratteristiche del fronte e del cavo in presenza dei rivestimenti di prima e seconda fase

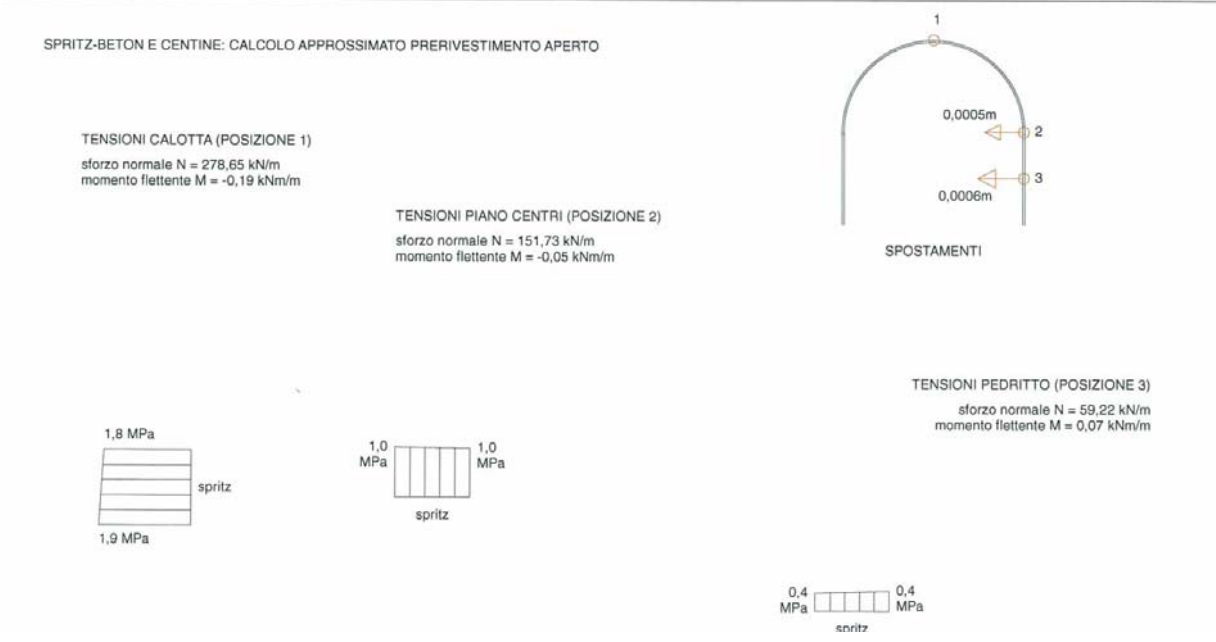
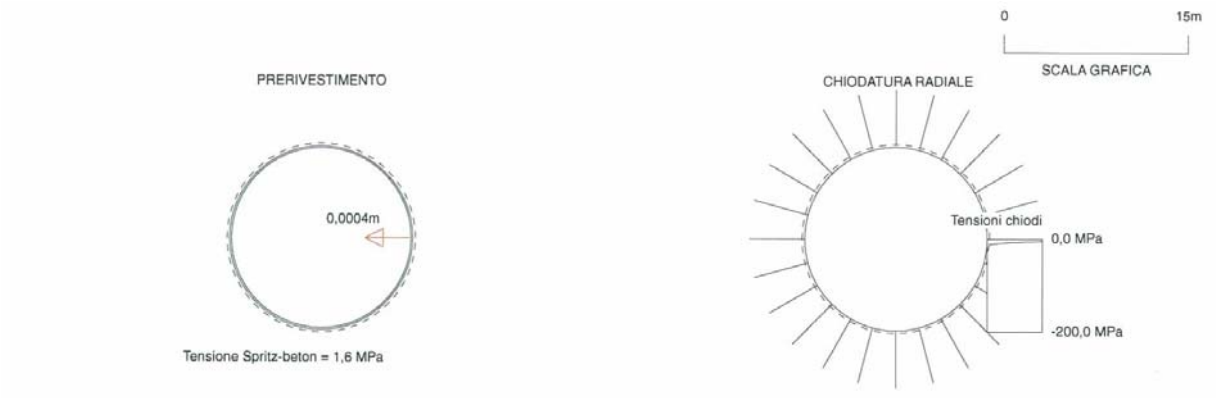


Figura 25 – Sollecitazioni agenti sui sostegni di prima e seconda fase

11.2.3. Analisi di stabilità con il metodo di Tamez

L'analisi Tamez è stata realizzata per la massima sezione di scavo (canna direzione Gela) della Galleria Truncafila, considerando un avanzamento di 5 m in assenza di sostegni per la sezione Ab, di 3 m per la Ac.

Entrambe le analisi evidenziano la sostanziale stabilità del fronte e del cavo, Figura 26 e Figura 27, con fattori di sicurezza rispettivamente superiori a 4 per quanto riguarda il fronte, maggiori di 1.3 relativamente alla stabilità della chiave. Il fattore di sicurezza globale è sempre maggiore di 2.5.

ANALISI DI STABILITA' DI TAMEZ - TABELLE RIEPILOGATIVE CASO GENERALE

RIASSUNTO DATI DI INGRESSO

GEOMETRIA			
a	lunghezza libera	3	m
A	h galleria	11,6	m
D	largh. galleria	17,5	m
L	estens. longitud. cuneo	3,11	m
H	copertura da calotta	70	m
Z _d	tratto di influenza scavo	29,75	m
S	sezione di scavo	170,14	m ²

TERRENO			
γ	peso di volume	23	kNm ³
c	coesione	130	kPa
φ	attrito	60	°
q _s	sovraccarico	0	kPa

CONDIZIONI IDRAULICHE			
γ _w	peso di volume	10	kN/m ³
α ₁	condizioni di drenaggio	0,4	
β	permeab. ammasso	1	
h _w	copertura acqua	0	m
	presenza di raggiera drenante in chiave?	no	si/no

RIASSUNTO RISULTATI - no interventi

STABILITA' DEL FRONTE			
FS _f	fattore di sicurezza	4,4	
p _f	pressione al fronte	0,00	kPa
p _{f max}	pressione massima applicabile	31,12	kPa

STABILITA' DELLA CHIAVE			
FS _{c-pl}	fattore di sicurezza alla plasticizzazione	0,63	
FS _c	fattore di sicurezza	1,9	
p _a	pressione in chiave	0,00	kPa

STABILITA' GLOBALE			
FS _g	fattore di sicurezza	2,61	

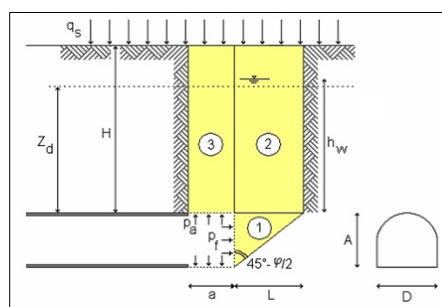


Figura 26 – Analisi di stabilità con il metodo di Tamez, RMR89 pari a 47

**ANALISI DI STABILITA' DI TAMEZ - TABELLE RIEPILOGATIVE
CASO GENERALE**

RIASSUNTO DATI DI INGRESSO

GEOMETRIA			
a	lunghezza libera	5	m
A	h galleria	11,6	m
D	largh. galleria	17,5	m
L	estens.longitud.cuneo	3,11	m
H	copertura da calotta	70	m
Z _d	tratto di influenza scavo	29,75	m
S	sezione di scavo	170,14	m ²

TERRENO			
γ	peso di volume	23	kNm ³
c	coesione	180	kPa
φ	attrito	60	°
q _s	sovraccarico	0	kPa

CONDIZIONI IDRAULICHE			
γ _w	peso di volume	10	kNm ³
α ₁	condizioni di drenaggio	0,4	
β	permeab. ammasso	1	
h _w	copertura acqua	0	m
	presenza di raggiera drenante in chiave?	no	si/no

RIASSUNTO RISULTATI - no interventi

STABILITA' DEL FRONTE			
FS _f	fattore di sicurezza	5,5	
p _f	pressione al fronte	0,00	kPa
p _{f max}	pressione massima applicabile	-5,05	kPa

STABILITA' DELLA CHIAVE			
FS _{cp}	fattore di sicurezza alla plasticizzazione	0,57	
FS _c	fattore di sicurezza	1,3	
p _a	pressione in chiave	0,00	kPa

STABILITA' GLOBALE			
FS _g	fattore di sicurezza	2,56	

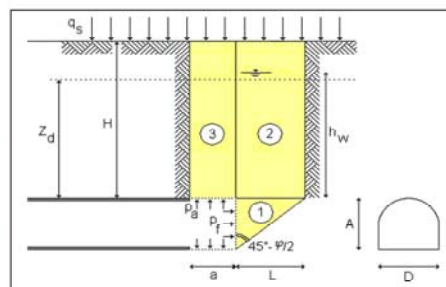


Figura 27 - Analisi di stabilità con il metodo di Tamez, RMR89 pari a 52

11.3. Sezione alla progressiva 2+915 km


Copertura circa 16 m da livelletta

La sezione di calcolo rappresenta una delle sezioni più critiche in corrispondenza dell'imbocco Est della Galleria Occhipinti. Tale imbocco è caratterizzato da un notevole sfalsamento tra le due canne, che determina la presenza di un tratto di lunghezza pari a circa 35 metri in cui la pista per Gela è già in galleria naturale, mentre la pista per Siracusa presenta una trincea in roccia, che verrà sostituita a lungo termine con un tratto di galleria artificiale ritombata.

La sezione di calcolo analizza la stabilità globale della configurazione a breve termine, supponendo che, al momento dello scavo dei primi campi della galleria naturale lato Gela, la trincea della pista per Siracusa sia già stata realizzata.

Proprietà della sezione di calcolo:

La sezione analizzata presenta i seguenti litotipi:

 INGEGNERIA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 58
	Pr	Strada			Lotto		Macro opera		Opera			Parte di opera		Tipo elab	N. Elab.		Rev						

Formazione Ragusa:

$$\gamma = 23 \frac{kN}{m^3}$$

$$c = 250kPa \quad c_{origine} = 200kPa$$

$$\phi = 56^\circ \quad \phi_{origine} = 65^\circ$$

$$E = 4600MPa$$

$$\nu = 0.2$$

$$k_0 = 1$$

Formazione Tellaro:

$$\gamma = 20 \frac{kN}{m^3}$$

$$c = 70kPa \quad cu = 100kPa$$

$$\phi = 34^\circ \quad \phi_u = 0^\circ$$

$$E = 630MPa$$

$$\nu = 0.25$$

$$k_0 = 1$$

Detrito:

$$\gamma = 19 \frac{kN}{m^3}$$

$$c = 5kPa$$

$$\phi = 25^\circ$$

$$E = 40MPa$$

$$\nu = 0.3$$

$$k_0 = 1$$

R medio galleria = 7.5 m

La sezione tipo adottata in tutte le zone di imbocco è la sezione B0V(125), caratterizzata dalla presenza di infilaggi metallici al contorno di scavo quale prerivestimento. L'azione di sostegno fornita dagli infilaggi viene modellata con un tegolo di spessore 15 cm che si estende su un arco di 150° in calotta, a cui si associano gli stessi parametri della roccia, ma coesione doppia.

11.3.1. Analisi di stabilità con il metodo delle linee caratteristiche

La sezione in esame non è stata analizzata con il metodo delle linee caratteristiche, in quanto tale metodologia è idonea all'analisi di sezioni di scavo a coperture medio-elevate. Trattandosi in questo caso di un problema prettamente superficiale, si rimanda all'analisi agli elementi finiti per una trattazione completa della stabilità della sezione esaminata.

11.3.2. Analisi di stabilità con il metodo di Tamez

L'analisi Tamez è stata realizzata per la massima sezione di scavo (canna direzione Gela) della Galleria Truncafila, considerando un avanzamento di 5 m in assenza di sostegni. L'analisi evidenzia la sostanziale stabilità del fronte e del cavo, Figura 28, con fattori di sicurezza rispettivamente pari a 1.3 per quanto riguarda il fronte, 1.8 relativamente alla stabilità della chiave. Il fattore di sicurezza globale è pari a 1.

ANALISI DI STABILITÀ DI TAMEZ - TABELLE RIEPILOGATIVE CASO GENERALE

RIASSUNTO DATI DI INGRESSO

GEOMETRIA			
a	lunghezza libera	1	m
A	h galleria	11,6	m
D	largh. galleria	17,5	m
L	estens. longitud. cuneo	2,57	m
H	copertura da calotta	5	m
Z _d	tratto di influenza scavo	5,00	m
S	sezione di scavo	170,14	m ²

TERRENO			
γ	peso di volume	23	kNm ³
c	coesione	200	kPa
φ	attrito	65	°
q _a	sovraccarico	0	kPa

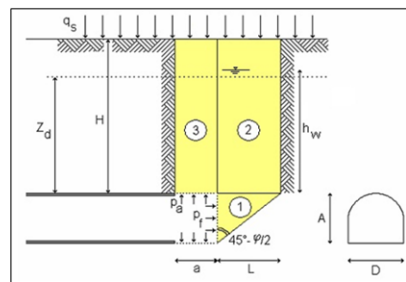
CONDIZIONI IDRAULICHE			
γ _{ir}	peso di volume	10	kN/m ³
α _d	condizioni di drenaggio	0,4	
β	permeab. ammasso	1	
h _w	copertura acqua	0	m
	presenza di raggiere drenante in chiave?	no	si/no

RIASSUNTO RISULTATI - no interventi

STABILITÀ DEL FRONTE			
FS _f	fattore di sicurezza	1,3	
D _f	pressione al fronte	0,00	kPa
D _{f max}	pressione massima applicabile	-107,51	kPa

STABILITÀ DELLA CHIAVE			
FS _{c pl}	fattore di sicurezza alla plasticizzazione	1,80	
FS _c	fattore di sicurezza	1,8	
p _a	pressione in chiave	0,00	kPa

STABILITÀ GLOBALE			
FS _y	fattore di sicurezza	1,0	




RIASSUNTO RISULTATI - con interventi

STABILITÀ DEL FRONTE			
FS _f	fattore di sicurezza	0,1	
D _f	pressione al fronte	-107,51	kPa
D _{f max}	pressione massima applicabile	-107,51	kPa

STABILITÀ DELLA CHIAVE			
FS _{c pl}	fattore di sicurezza alla plasticizzazione	1,80	
FS _c	fattore di sicurezza	1,8	
p _a	pressione in chiave	0,00	kPa
A _{eff}	avanzamento senza sostegni	0,50	m

STABILITÀ GLOBALE			
FS _y	fattore di sicurezza	0,16	

Figura 28 – Analisi di stabilità con il metodo di Tamez

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 60
	Pr	Strada			Lotto		Macro opera		Opera			Parte di opera		Tipo elab	N. Elab.		Rev						

11.4. Sezione alla progressiva 4+400 km

Copertura circa 70 m da livelletta

La sezione di calcolo rappresenta una delle sezioni a maggiore copertura in corrispondenza di una piazzola della Galleria Occhipinti.

Proprietà della sezione di calcolo:

Formazione Ragusa:

$$\gamma = 23 \frac{kN}{m^3}$$

$$c = 540 kPa \quad c_{origine} = 200 kPa$$

$$\phi = 45^\circ \quad \phi_{origine} = 60^\circ$$

$$E = 4600 MPa$$

$$\nu = 0.2$$

$$k_0 = 1$$

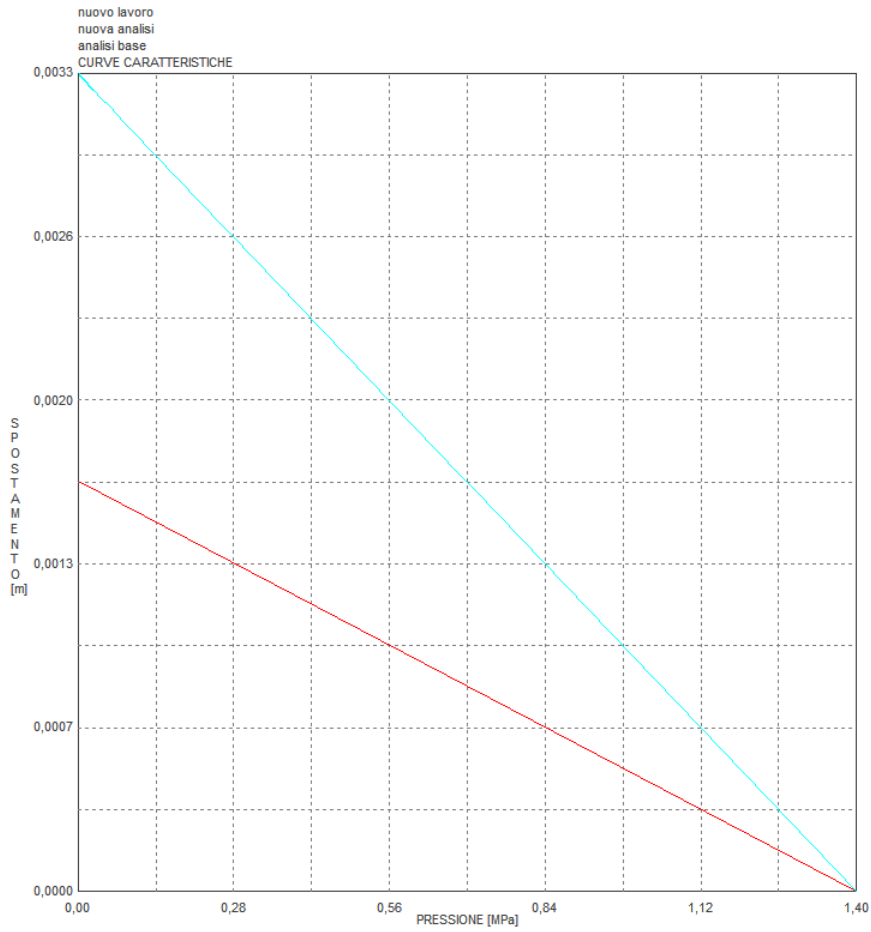
R medio galleria = 9 m circa

La sezione tipo adottata in tutte le piazzole è la sezione P. Nel caso in esame si considera la sezione di scavo della pista Gela, che presenta un allargamento all'estremità sinistra di 1.25 m, la sezione adottata è dunque denominata P(125), e prevede a breve termine 2 centine IPN220 con interasse 1 m ed uno strato di 30 cm di spritz beton. Lo sfondo di avanzamento è di 1 m, il rivestimento definitivo viene messo in opera a distanza dal fronte non vincolata, e presenta uno spessore medio di 0.95 m.

11.4.1. Analisi di stabilità con il metodo delle linee caratteristiche

La sezione è stata analizzata con la metodologia delle linee caratteristiche, che consente di analizzare in modo rapido le condizioni di stabilità del cavo e del fronte, e valutare, in relazione alla distanza di posa dal fronte, l'ordine di grandezza delle sollecitazioni agenti sui rivestimenti.

Nelle figure seguenti si propongono i risultati dell'analisi realizzata considerando un cavo privo di sostegni. In Figura 29 si riportano le curve caratteristiche del fronte e del cavo: si osserva una sostanziale stabilità del cavo, con comportamento pressoché elastico sia del fronte che del cavo. La Figura 30 riporta l'estensione delle zone plastiche al cavo e al fronte in assenza di sostegni: la plasticizzazione presenta uno spessore decimetrico.



GALLERIA
FRONTE SFERICO

Figura 29 – Curve caratteristiche del fronte e del cavo in assenza di sostegni

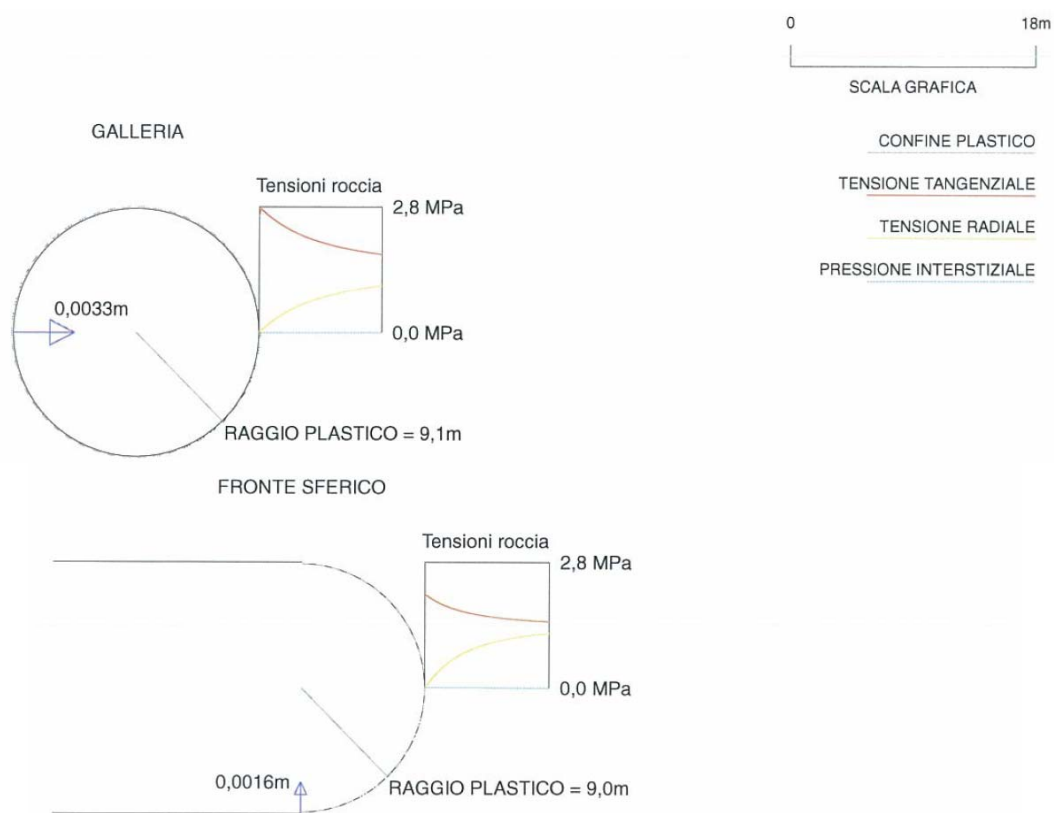


Figura 30 – Zone plastiche al contorno galleria in assenza di sostegni

Si propongono ora gli stessi risultati ottenuti ipotizzando la messa in opera dei rivestimenti previsti dalla sezione P(125), ad una distanza dal fronte di 1 m per quanto riguarda i sostegni di prima fase, a 50 metri per il rivestimento definitivo. La Figura 31 riporta nuovamente le curve caratteristiche del fronte e del cavo, in relazione alle linee di reazione dei sostegni. In Figura 32 si propongono le sollecitazioni previste sui sostegni di prima e seconda fase: tutte le sollecitazioni risultano sempre inferiori ai limiti di resistenza dei materiali.

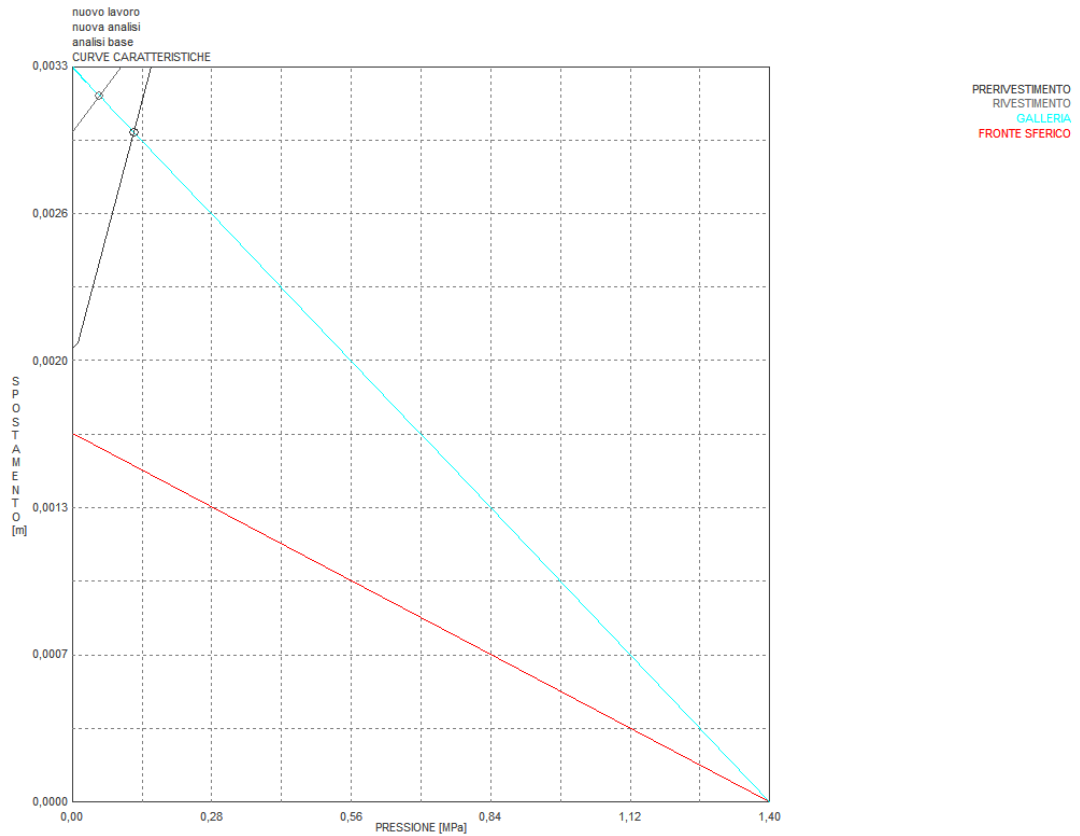


Figura 31 – Curve caratteristiche del fronte e del cavo in presenza dei rivestimenti di prima e seconda fase.

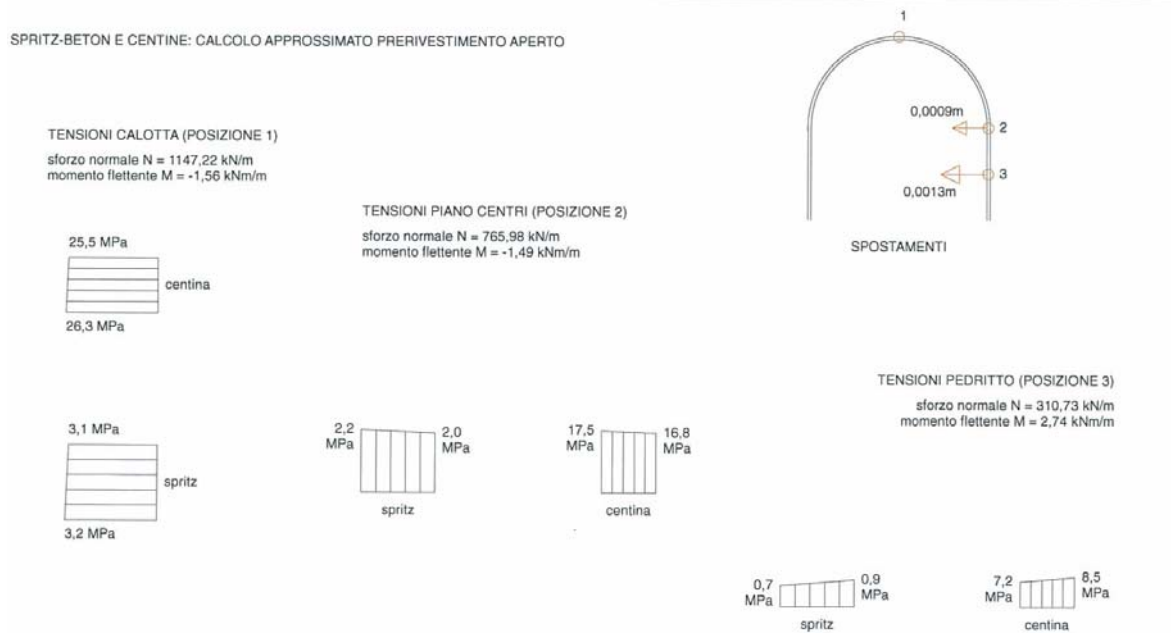


Figura 32 – Sollecitazioni agenti sui sostegni di prima e seconda fase

11.4.2. Analisi di stabilità con il metodo di Tamez

L'analisi Tamez è stata realizzata per la massima sezione di scavo (canna direzione Gela) della sezione in piazzola nella Galleria Occhipinti, considerando un avanzamento di 1 m in assenza di sostegni. L'analisi evidenzia la sostanziale stabilità del fronte e del cavo, Figura 33, con fattori di sicurezza rispettivamente pari a 5.4 per quanto riguarda il fronte, 5.3 relativamente alla stabilità della chiave. Il fattore di sicurezza globale è pari a 4.4.

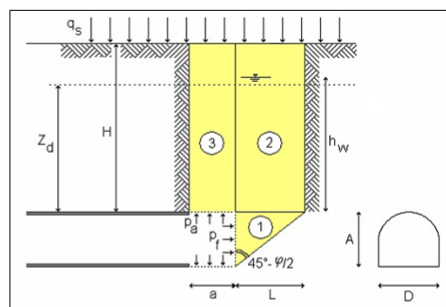
ANALISI DI STABILITA' DI TAMEZ - TABELLE RIEPILOGATIVE CASO GENERALE

RIASSUNTO DATI DI INGRESSO

GEOMETRIA			
a	lunghezza libera	1	m
A	h galleria	13	m
D	largh. galleria	22	m
L	estens. longitud. cuneo	3,48	m
H	copertura da calotta	60	m
Z _d	tratto di influenza scavo	37,40	m
S	sezione di scavo	234,07	m ²


TERRENO			
γ	peso di volume	23	kNm ⁻³
c	coesione	200	kPa
ϕ	attrito	60	°
q _b	sovraccarico	0	kPa

CONDIZIONI IDRAULICHE			
γ_w	peso di volume	10	kN/m ³
α_1	condizioni di drenaggio	0,4	
β	permeab. ammasso	1	
h _w	copertura acqua	0	m
	presenza di raggiera drenante in chiave?	no	si/no



RIASSUNTO RISULTATI - no interventi			
STABILITA' DEL FRONTE			
FS _f	fattore di sicurezza	5,4	
p _f	pressione al fronte	0,00	kPa
p _{f max}	pressione massima applicabile	-34,88	kPa
STABILITA' DELLA CHIAVE			
FS _{s pl}	fattore di sicurezza alla plasticizzazione	2,60	
FS _s	fattore di sicurezza	5,3	
p _a	pressione in chiave	0,00	kPa
STABILITA' GLOBALE			
FS _g	fattore di sicurezza	4,43	

Figura 33 – Analisi di stabilità con il metodo di Tamez

 TECENITPA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 66
	Pr	Strada	Lotto	Macro opera	Opera	Parte di opera	Tipo elab	N. Elab.	Rev														

12. ANALISI CON METODI EMPIRICI

12.1. RMR89 di Bieniawski

Il calcare della Formazione Ragusa presenta una qualità geomeccanica buona, con un indice RMR89 di base variabile nell'intervallo 45-60. Si tratta dunque di una roccia appartenente alla classe III di Bieniawski, per la quale si prevede:

- tratto non armato di lunghezza 5 m;
- tempo di auto portanza pari a circa 1 settimana.


Queste previsioni risultano tra l'altro confermate dalla presenza, lungo il tracciato, di numerose caverne scavate in calcare caratterizzate da una calotta orizzontale, con dimensione media di 5-8 metri per lato, Figura 34.



Figura 34 – Caverna presente in prossimità del fiume Irminio

I sostegni consigliati dalla classificazione geomeccanica sono alternativamente i seguenti:

- spritz beton di spessore 5-10 cm con occasionali rete elettrosaldata e bulloni;
- bulloni, con lunghezza pari a $\frac{1}{2}$ della larghezza complessiva della galleria, spazati 1-1.5 m, con rete elettrosaldata e 3 cm di spritz beton in calotta;
- centine leggere con interasse 1.5-2 m

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 67
	Pr	Strada			Lotto		Macro opera		Opera			Parte di opera		Tipo elab	N. Elab.		Rev						

La stima dei carichi agenti sui rivestimenti è realizzabile mediante la seguente formulazione, considerando una larghezza B della galleria mediamente pari a 15 metri:

$$p = \frac{100 - RMR}{100} \cdot \gamma \cdot B = 150 \div 190 kPa$$

A titolo di esempio, facendo riferimento alla sezione posta alla progressiva 4+100 km in corrispondenza della Galleria Occhipinti, caratterizzata da un RMR di 52 punti, si avrà:

$$p = \frac{100 - RMR}{100} \cdot \gamma \cdot B = 165 kPa$$

12.2. Q System di Barton


Per i calcoli della Formazione Ragusa si è valutato in modo autonomo rispetto all'indice RMR, il valore dell'indice Q nel modo seguente. A titolo di esempio la scheda proposta fa riferimento alla sezione posta alla progressiva 4+100 km in corrispondenza della Galleria Occhipinti.

Parametro	Descrizione	Valore numerico
RQD	-	35-40 %
Jn	3 sistemi di discontinuità	9
Jr	Discontinuità ondulate	2
Ja	Discontinuità con bordi leggermente alterati, riempimento non plastico	2
Jw	Acqua assente o scarsa	1
SRF	Singole zone di frattura in roccia coerente, scavo a profondità superiore a 50 m	2.5
Q	indice Q di Barton	1.56

Si sottolinea che, anche adottando la formulazione di Bieniawski per la determinazione dell'indice Q a partire dal valore di RMR di base, si otterrebbe un valore analogo. Si considerano in questo caso i valori massimi e minimi di RMR89 caratterizzano l'intero tracciato dei lotti 10 e 11:

$$RMR = 45 \quad Q = \exp\left(\frac{RMR - 44}{9}\right) = 1.12$$

$$RMR = 60 \quad Q = \exp\left(\frac{RMR - 44}{9}\right) = 5.92$$

 INGEGNERIA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 68
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

Applicando la teoria del Q Load di Barton, è possibile a questo punto valutare i carichi agenti sui rivestimenti in calotta. Si considera un indice Jr pari a 2, corrispondente a discontinuità chiuse o ad apertura ridotta, con superficie ondulata:

$$P_{roof} = \frac{\left(0.2 \cdot Q^{\frac{1}{3}}\right)}{Jr} = 55 \div 100 kPa$$

Per la valutazione dei carichi agenti sui piedritti, si definisce un indice Q' pari a $2.5Q = 2.8 \div 14.8$ e si applica nuovamente la precedente formulazione:

$$P_{wall} = \frac{\left(0.2 \cdot Q'^{\frac{1}{3}}\right)}{Jr} = 40 \div 70 kPa$$

Facendo riferimento in particolare alla sezione 4+100 km in corrispondenza della Galleria Occhipinti per la quale si è proceduto alla valutazione dell'indice Q corrispondente si valutano i carichi agenti sui rivestimenti:

$$P_{roof} = \frac{\left(0.2 \cdot Q^{\frac{1}{3}}\right)}{Jr} = 85 kPa \quad P_{wall} = \frac{\left(0.2 \cdot Q'^{\frac{1}{3}}\right)}{Jr} = 64 kPa$$

12.3. Rock Load di Terzaghi

La galleria in esame presenta le seguenti dimensioni medie:

h = altezza media galleria = 11.5 m

b = semilarghezza media galleria = 7.5 m

I parametri geotecnici impiegati sono quelli relativi alla condizione di assenza di confinamento, ovvero i parametri all'origine, per la sezione alla progressiva 4+100 km in corrispondenza della Galleria Occhipinti.

Si procede quindi al calcolo dell'altezza del solido di carico:


$$B = \text{semilarghezza del solido di carico} = b + h \cdot \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) = 12.8 m$$

k_0 = coefficiente di spinta = 1

z = copertura da piano dei centri = 80 m

$$\sigma_v = \text{tensione verticale agente in calotta} = \frac{\gamma - \frac{c}{B}}{k \cdot \operatorname{tg}\phi} \cdot B \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{k \cdot \operatorname{tg}\phi}{B} \cdot z\right)\right) = 55 kPa$$

a cui corrisponde un solido di carico con un'estensione Hp di 2.4 metri di roccia. Entrando con tale valore nelle tabelle proposte da Terzaghi si può concludere che la

 INGEGNERIA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 69
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

massa rocciosa in cui si realizza lo scavo è molto fratturata, ma non determina comunque significative spinte laterali sui sostegni.

Si valutano quindi le spinte previste sui sostegni nella sola direzione verticale, in calotta:

$$w_p = \frac{Hp \cdot \gamma}{B} = \frac{2.4 \cdot 23}{12.8} = 4.3 \frac{kN}{m}$$

12.4. Confronto con i risultati delle linee caratteristiche

L'integrazione dei risultati dei metodi empirici proposti nei precedenti paragrafi con quanto previsto per le sezioni in calcare della Formazione Ragusa evidenzia una buona corrispondenza. Le linee caratteristiche, in particolare, prevedono un comportamento pressoché elastico del fronte e del cavo, con plasticizzazioni corticali in corrispondenza delle sole sezioni caratterizzate da un maggior grado di fratturazione. I metodi empirici presentano risultati maggiormente conservativi, definendo la possibile formazione di una fascia plasticizzata di spessore metrico al contorno di scavo, che non determina comunque significative sollecitazioni sui sostegni di prima e seconda fase.

12.5. Considerazioni conclusive

Osservando i risultati delle metodologie empiriche adottate, si può concludere che:

- Il calcare presenterà zone plasticizzate di spessore ridotto, che andranno quindi a determinare basse sollecitazioni sui rivestimenti;
- Le sollecitazioni agenti sui rivestimenti in direzione verticale e orizzontale risultano piuttosto ridotte, secondo tutti i metodi considerati;
- Le tre metodologie utilizzate per la stima dei carichi agenti sui sostegni forniscono risultati abbastanza diversificati. In particolare, la stima della pressione p agente sulle centine a partire dall'indice RMR risulta la metodologia più conservativa, che fornisce sollecitazioni comunque ridotte, ma di valore doppio rispetto alle altre metodologie.
- Il metodo di analisi dei carichi agenti sui rivestimenti proposto da Barton fornisce, per la stessa sezione di analisi, le sollecitazioni più ridotte;
- Il Q Load di Barton, che consente di definire autonomamente i carichi agenti sui rivestimenti in corrispondenza della calotta e in direzione orizzontale, evidenzia una situazione tensionale ben approssimabile con un coefficiente di spinta pari all'unità.

13. ANALISI CON IL METODO AGLI ELEMENTI FINITI

13.1. Sezione alla progressiva 3+700 km

Copertura 30 m da livelletta

La sezione di calcolo rappresenta una delle sezioni a maggiore copertura entro la Formazione Ragusa, in corrispondenza di uno specchio di faglia che ha determinato lo scorrimento relativo tra i due lembi a contatto.

Per i parametri geotecnici adottati nel calcolo, si rimanda al capitolo 11.1.

La sezione tipo adottata è la B0V, che rappresenta la sezione di sostegno adottata in corrispondenza di tutte le faglie previste lungo il tracciato delle gallerie naturali.

Per i calcoli di stabilità si sono adottate le seguenti percentuali di detensionamento, che fanno riferimento alla curva di Panet-Guenot per una galleria non sostenuta:

<i>Tabella 1 - Percentuali di detensionamento per le fasi di calcolo</i>	
Sequenza di calcolo	Detensionamento
Fase 1 - Fronte	35 %
Fase 2 - Avanzamento	45 %
Fase 3 - Posa rivestimenti preliminari	70 %
Fase 4 - Getto arco rovescio e murette	90 %
Fase 5 - Completamento rivestimento definitivo	100 %

La percentuale di detensionamento associata alla fase fronte è stata posta pari al 35%, per tener conto di un comportamento quasi elastico del cavo dovuto alla presenza degli infilaggi metallici a preconsolidamento del nucleo di avanzamento.

Nel caso dell'analisi in presenza del solo rivestimento di prima fase, l'analisi si ferma alla Fase 3, per applicare poi l'intero detensionamento al rivestimento provvisorio.

Si presentano ora le caratteristiche dei sostegni preliminari e definitivi previsti per la sezione B0V. L'avanzamento previsto è di 1 m. Ai fini delle verifiche strutturali si considera lo scavo della canna direzione Gela, per la quale si prevede l'adozione della sezione B0V(125).

<i>Tabella 2 - Caratteristiche dei rivestimenti previsti per la sezione in esame</i>		
Rivestimento preliminare	Centine	2 IPN 200 / 1 m
	A	66.8 cm ²
	J	4280 cm ⁴
	w	52.4 kg/m
	Spritz, spessore	25 cm
	Sostegno equivalente	
	E eq	34200 MPa
	spessore eq	25 cm
Rivestimento definitivo	Arco rovescio	
	spessore medio	0.9 m
	EA	2.7 e7 kN/m
	EJ	1820000 kNm ² /m
	Calotta	
	spessore medio	1 m
	EA	3 e7 kN/m
	EJ	2500000 kNm ² /m
	Muretta	
	spessore medio	1 m
	EA	3 e7 kN/m
	EJ	2500000 kNm ² /m

13.1.1. Analisi di stabilità con il metodo agli elementi finiti

L'analisi Plaxis è stata realizzata con un modello bidimensionale considerando lo scavo di una delle due canne, con i detensionamenti precedentemente elencati. Nelle pagine seguenti si riportano i risultati dell'analisi Plaxis.

La Figura 35 riporta la distribuzione degli spostamenti radiali al contorno di scavo, nel caso in cui l'intero detensionamento dell'ammasso roccioso gravi sul rivestimento di prima fase. Gli spostamenti al contorno galleria risultano di ordine millimetrico.

La Figura 36 illustra la distribuzione delle zone plasticizzate al termine del detensionamento, mentre in Figura 37 sono indicate le direzioni delle tensioni principali al contorno della cavità.

Gli spostamenti verticali in calotta, Figura 38, raggiungono il millimetro al termine del detensionamento, in assenza del rivestimento definitivo.

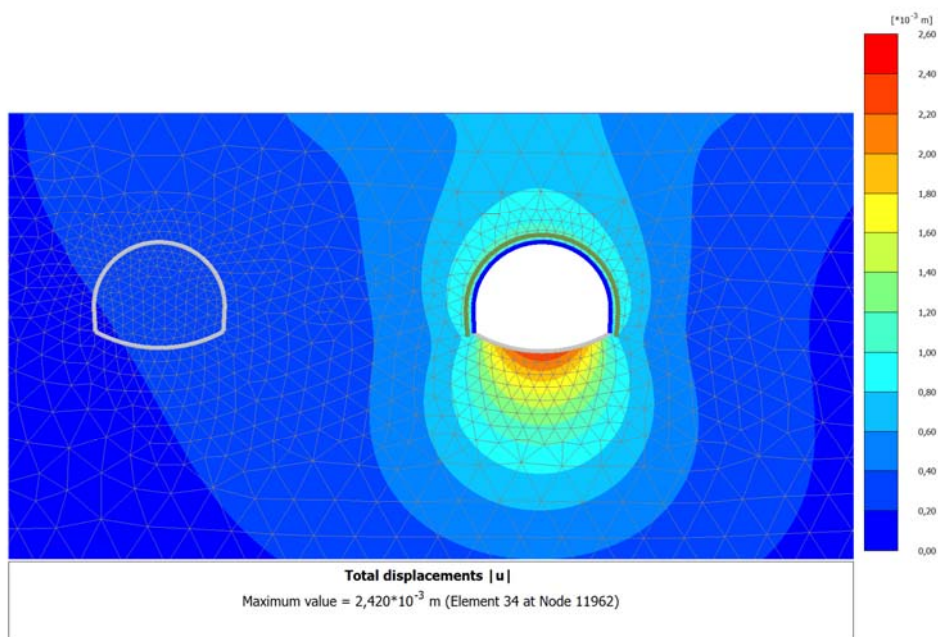


Figura 35 – Spostamenti radiali al contorno di scavo al termine del detensionamento

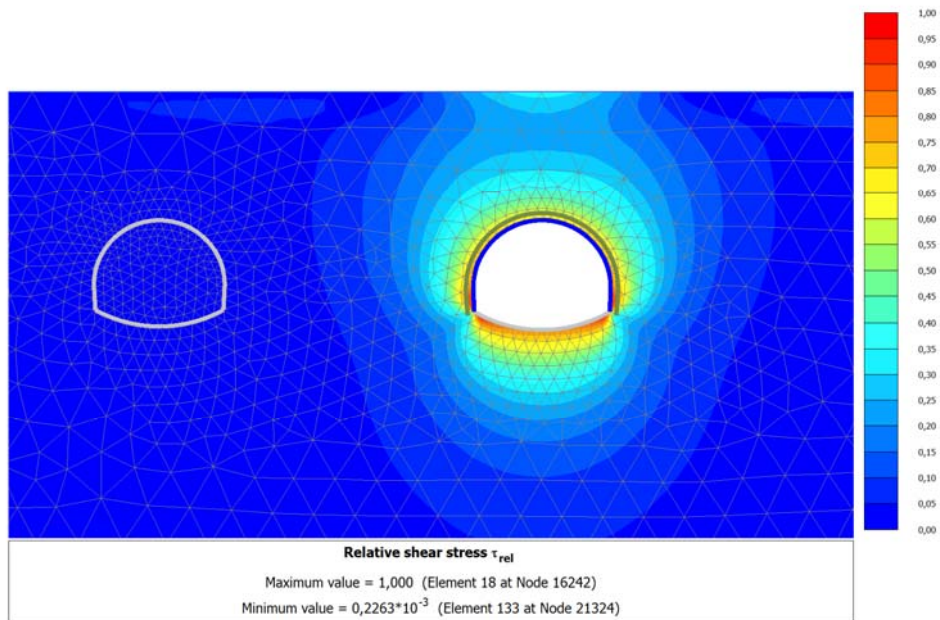


Figura 36 – Zone plasticizzate al contorno di scavo al termine del detensionamento

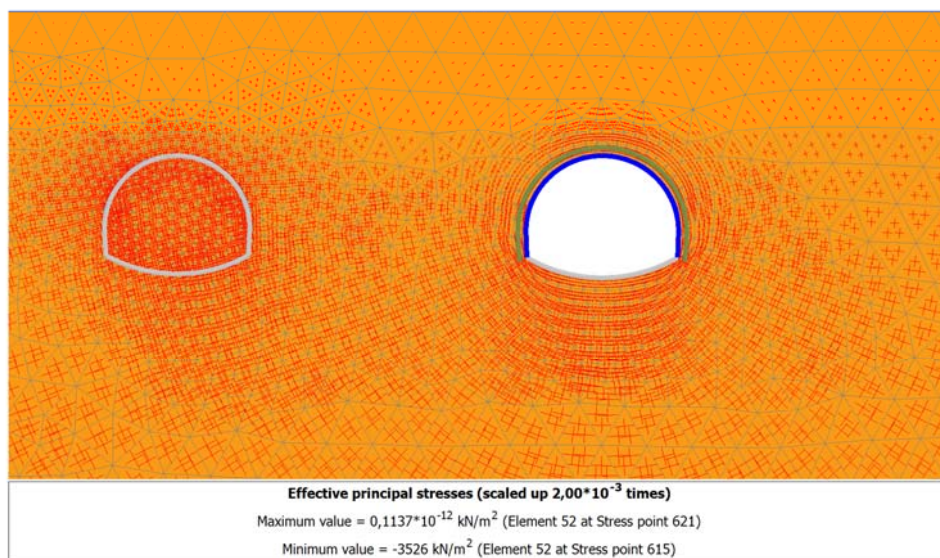


Figura 37 – Distribuzione delle tensioni principali al contorno della galleria

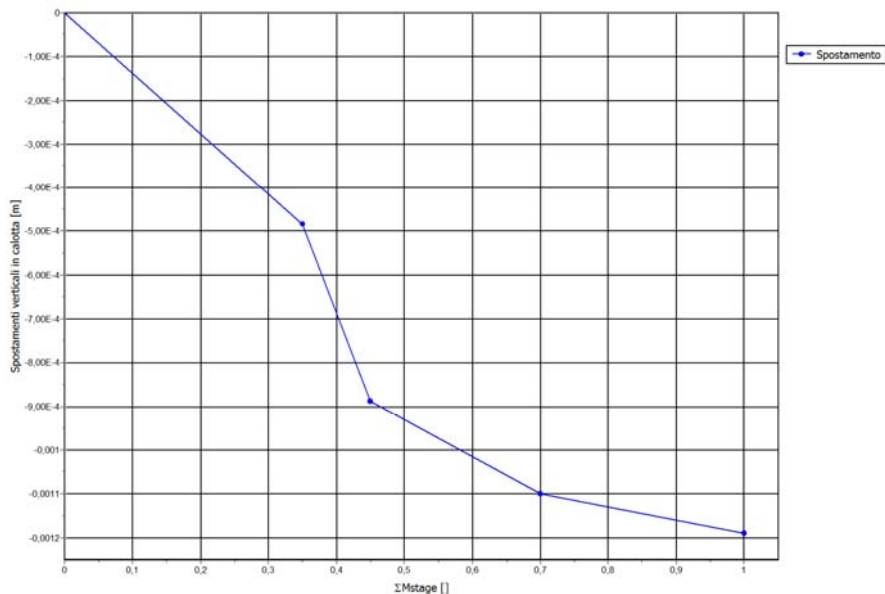


Figura 38 – Spostamenti verticali in calotta in presenza dei soli prerivestimenti

13.1.2. Verifiche strutturali del rivestimento preliminare

Nelle figure seguenti si propongono le distribuzioni delle sollecitazioni agenti sui rivestimenti di prima fase, alla fine del detensionamento.

In Figura 39, Figura 40, Figura 41 e Figura 42 si riportano le sollecitazioni agenti sui prerivestimenti, nell'ipotesi cautelativa in cui l'intero detensionamento venga supportato dall'accoppiamento centine-spritz beton, ed i relativi diagrammi di interazione. Tutte le sollecitazioni risultano abbondantemente entro i limiti di resistenza dei materiali.

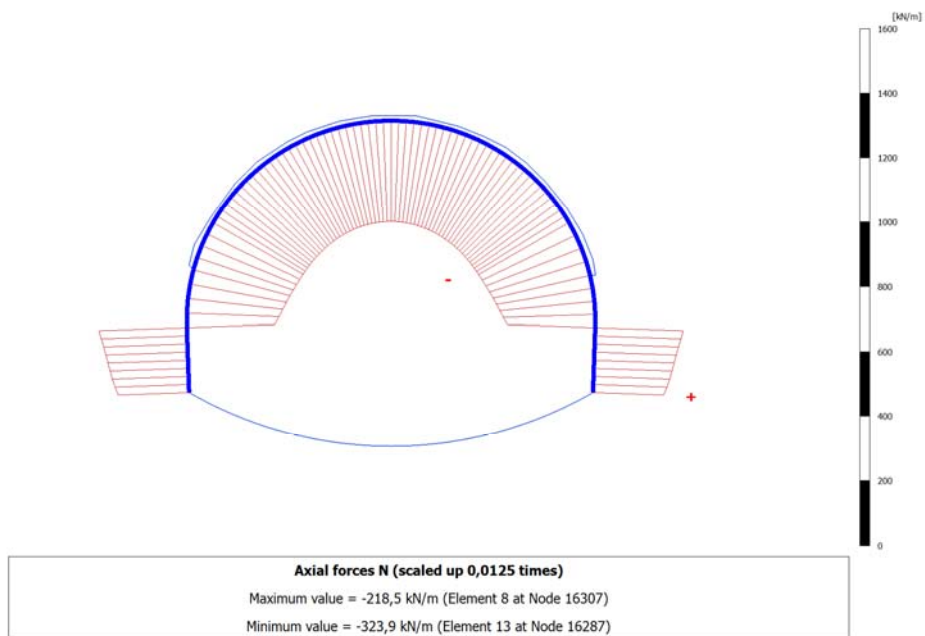


Figura 39 – Sollecitazioni di sforzo normale agenti sul rivestimento preliminare

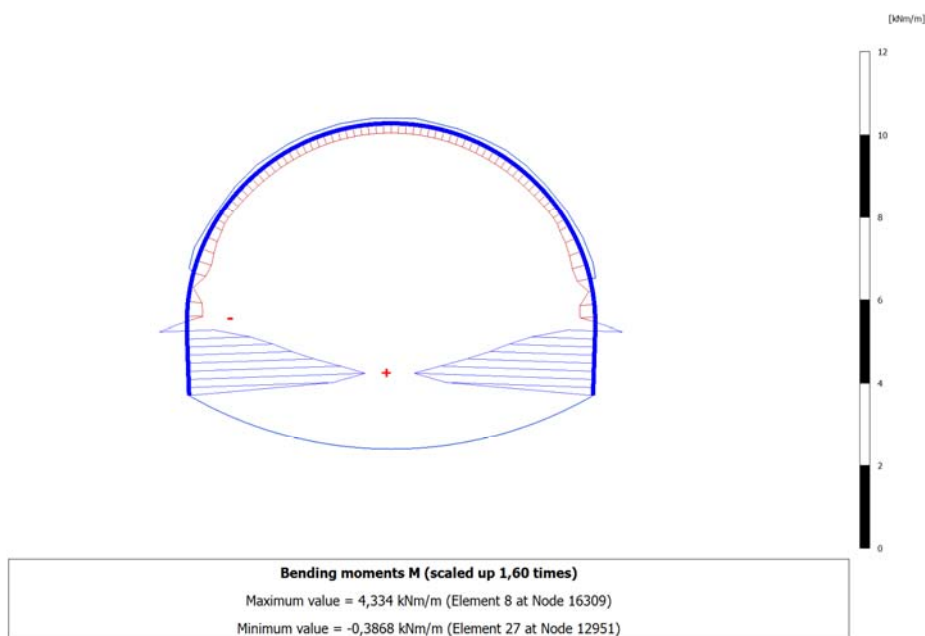


Figura 40 - Sollecitazioni di momento flettente agenti sul rivestimento preliminare

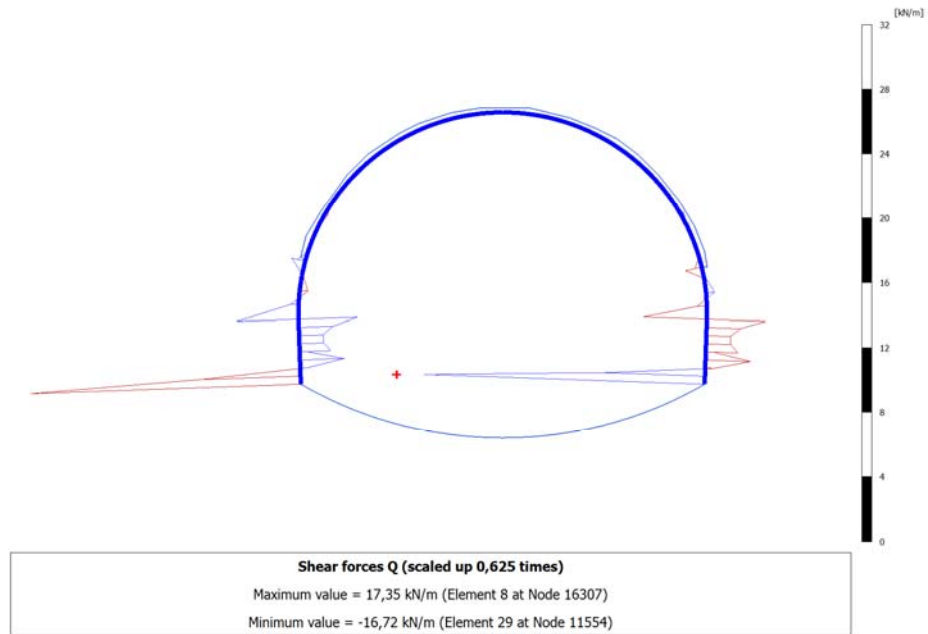


Figura 41 - Sollecitazioni di taglio agenti sul rivestimento preliminare

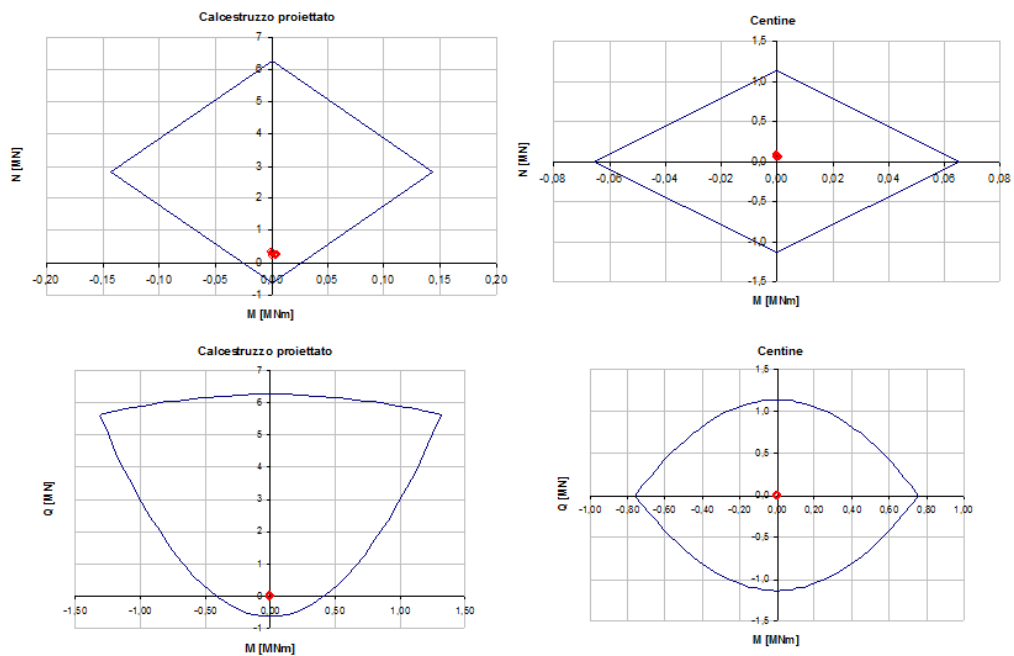


Figura 42 – Diagrammi di interazione per il rivestimento preliminare

13.1.3. Sollecitazioni agenti sul rivestimento definitivo

Nelle figure seguenti si propongono le distribuzioni delle sollecitazioni agenti sui rivestimenti definitivi, alla fine del detensionamento.

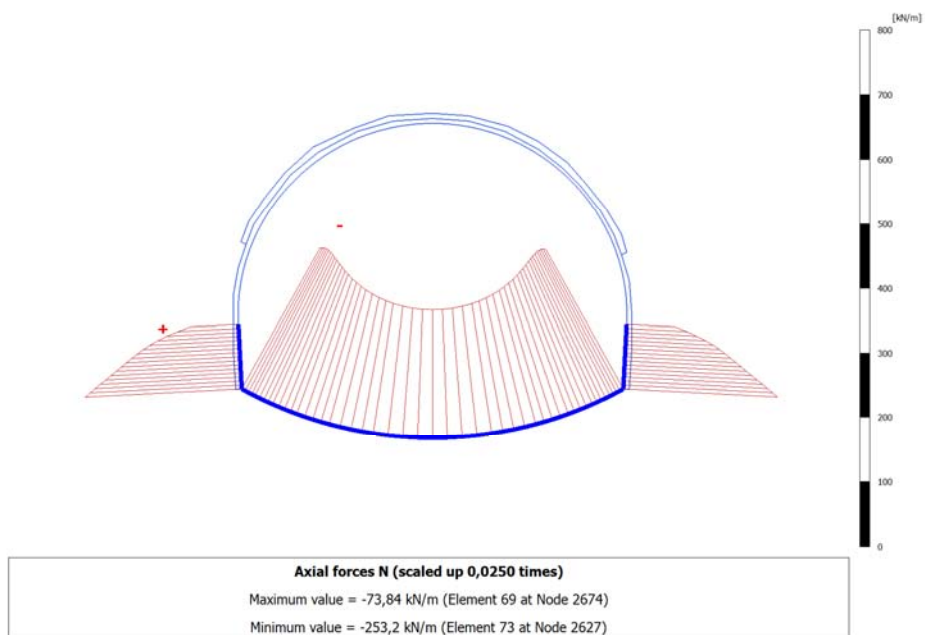


Figura 43 - Sollecitazioni di sforzo normale agenti su murette e arco rovescio

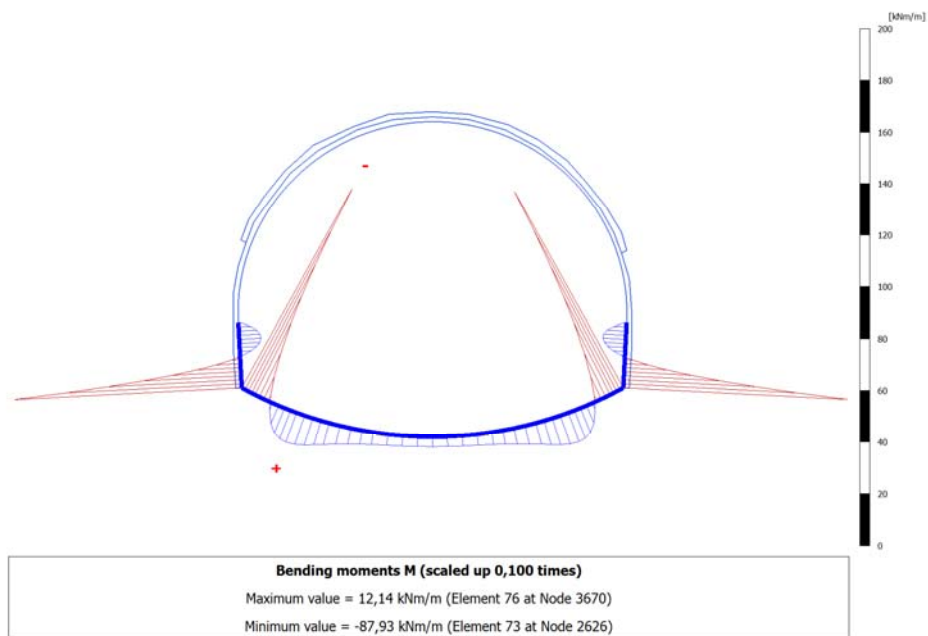


Figura 44 - Sollecitazioni di momento flettente agenti su murette e arco rovescio

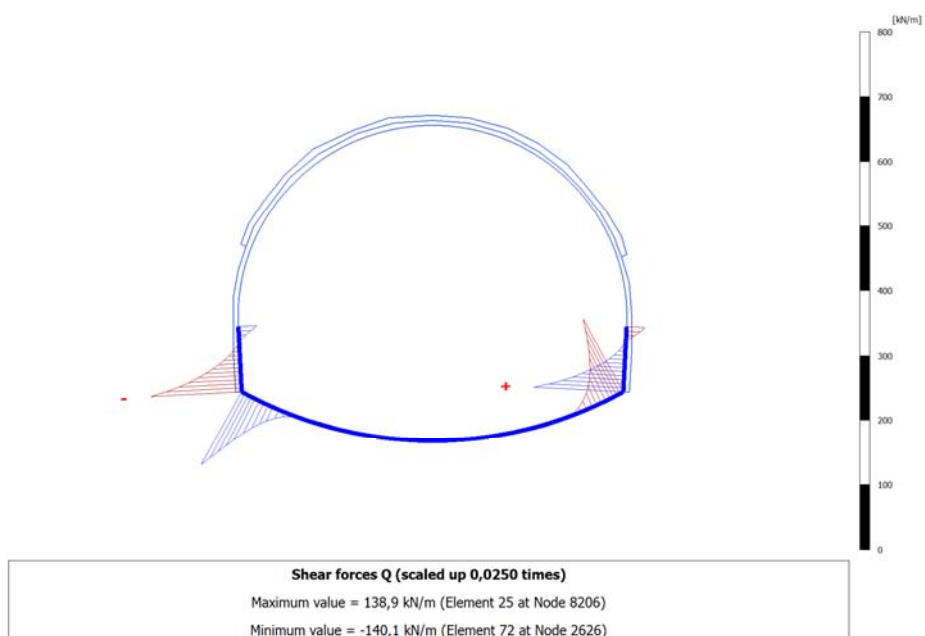



Figura 45 - Sollecitazioni di taglio agenti su murette e arco rovescio

 TECENITAL	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 79
	Pr	Strada			Lotto		Macro opera		Opera			Parte di opera		Tipo elab	N. Elab.		Rev						

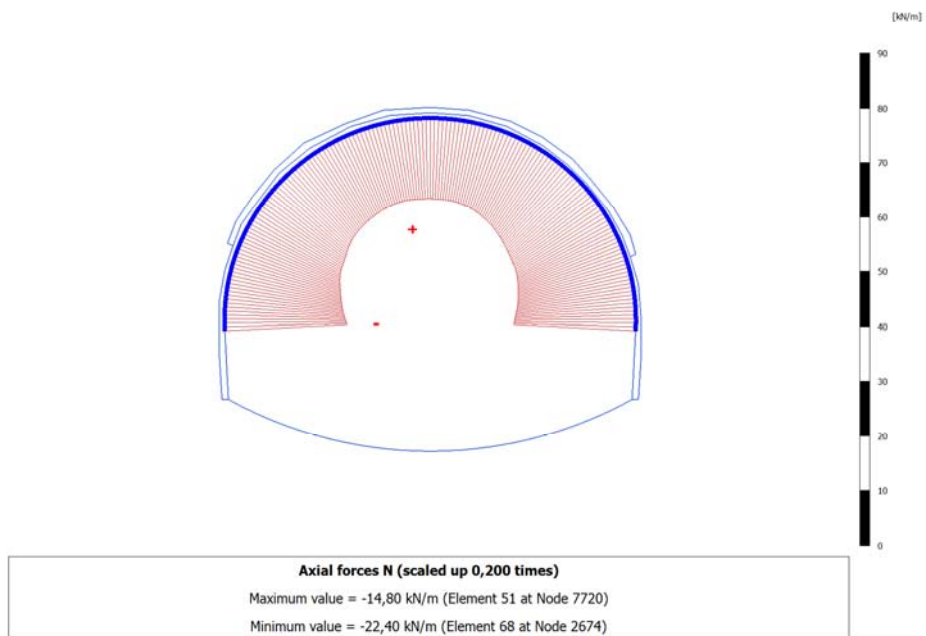


Figura 46 - Sollecitazioni di sforzo normale agenti sulla calotta

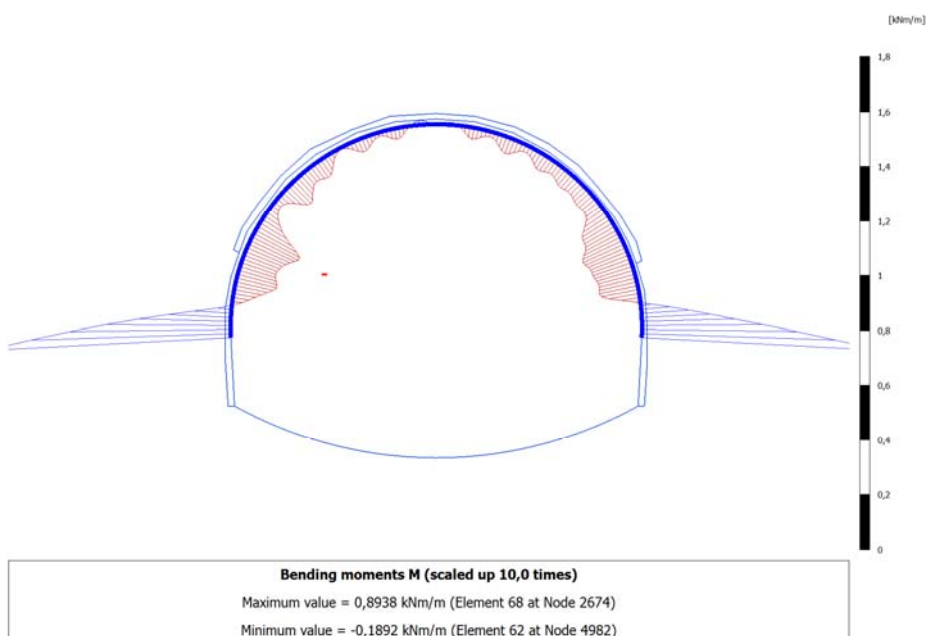


Figura 47 - Sollecitazioni di momento flettente agenti sulla calotta

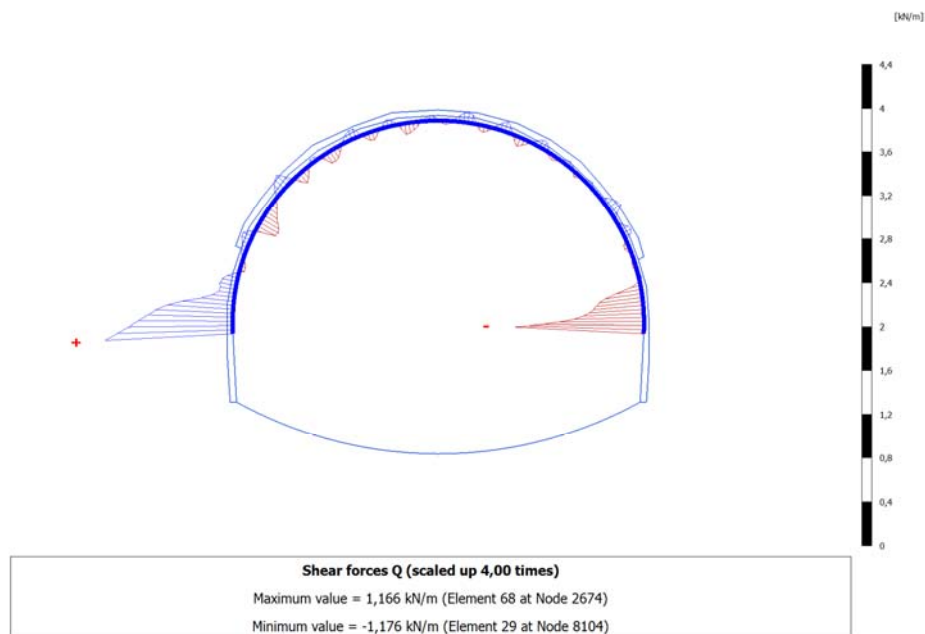


Figura 48 - Sollecitazioni di taglio agenti sulla calotta

13.1.4. Verifiche strutturali del rivestimento definitivo


Di seguito si presentano le verifiche strutturali realizzate per la Galleria Occhipinti nella sezione alla progressiva 3+700 km in faglia.

In corrispondenza di questa sezione si è analizzata con metodi numerici ed empirici la sezione tipo B0V.

Le verifiche strutturali sono state realizzate a partire dalle sollecitazioni di momento flettente M, sforzo assiale N e taglio Q valutate mediante l'analisi agli elementi finiti, a detensionamento avvenuto.

Nella tabella seguente si elencano le massime sollecitazioni agenti sulle diverse porzioni del rivestimento definitivo:

<i>Tabella 3 – Sollecitazioni agenti nel rivestimento definitivo, sezione B0V</i>			
Sollecitazioni agenti sul rivestimento, derivanti da analisi Plaxis			
	N [kN/m]	M [kNm/m]	Q [kN/m]
Calotta	-22	0.9	1.2
Arco rovescio	-200	12	10
Muretta	-253	88	140

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 81
	Pr	Strada	Lotto	Macro opera	Opera	Parte di opera	Tipo elab	N. Elab.	Rev														

Si sottolinea che la verifica di ciascuna sezione è stata realizzata non considerando lo spessore medio del rivestimento, implementato nel codice di calcolo per la modellazione dei diversi elementi piani costituenti il definitivo, ma definendo lo spessore del rivestimento in corrispondenza della sezione più sollecitata a partire dalla geometria propria della sezione tipo di sostegno.

Nella successiva Tabella 4 sono riassunti i risultati delle verifiche strutturali eseguite per la sezione più sollecitata di calotta, arco rovescio e muretta. La terminologia adottata per indicare le grandezze considerate è la seguente:

b	base della sezione
h	altezza della sezione
N_{max}	massima azione di compressione
M_{max}	massimo momento flettente
V_{max}	massima azione di taglio
x	distanza dell'asse neutro dal lembo compresso
$\sigma_{c,max}$	massimo sforzo di compressione
$0,25 \cdot f_{ck}$	sforzo di compressione limite
$F_{s,\sigma}$	fattore di sicurezza nei confronti degli sforzi di compressione
A^*	area della sezione parzializzata
$\tau_{c,max}$	massimo sforzo di taglio
$0,21 \cdot f_{ctk}$	sforzo di taglio limite
$F_{s,\tau}$	fattore di sicurezza nei confronti degli sforzi di taglio

Il fattore di sicurezza è inteso come rapporto tra il massimo sforzo agente nella sezione e il corrispondente valore limite. Come si nota dai valori riportati nelle tabelle, i valori di F_s sono tutti minori dell'unità. La verifica è dunque rispettata per tutte le sezioni considerate in assenza di armatura.

In Figura 49, Figura 50 e Figura 51 si riporta altresì la distribuzione degli sforzi normali agenti sulle sezioni considerate per effetto della corrispondente sollecitazione di presso-flessione.

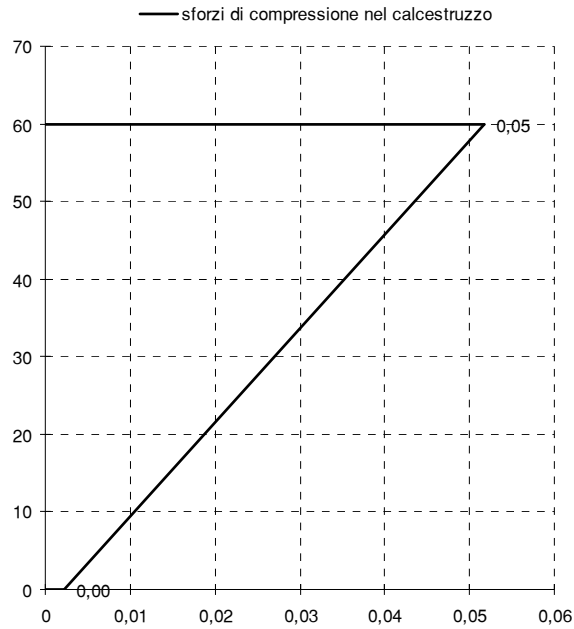


Figura 49 – Compressione nel calcestruzzo, calotta

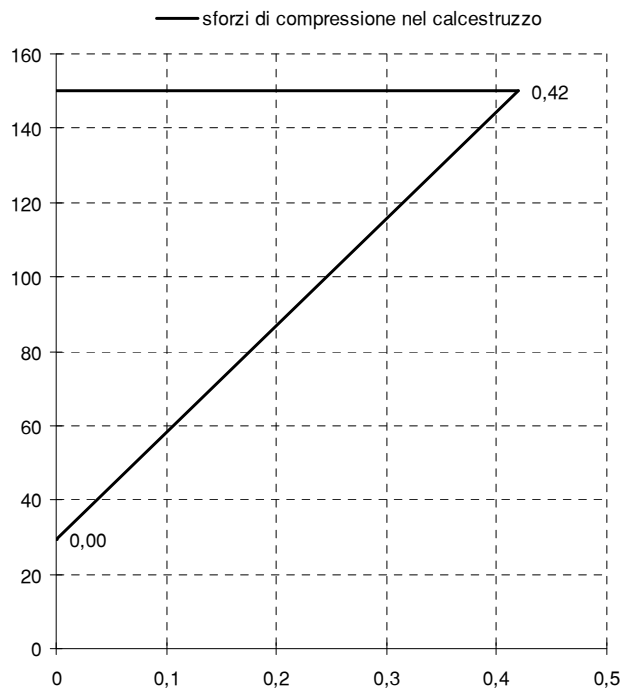


Figura 50 - Compressione nel calcestruzzo, muretta

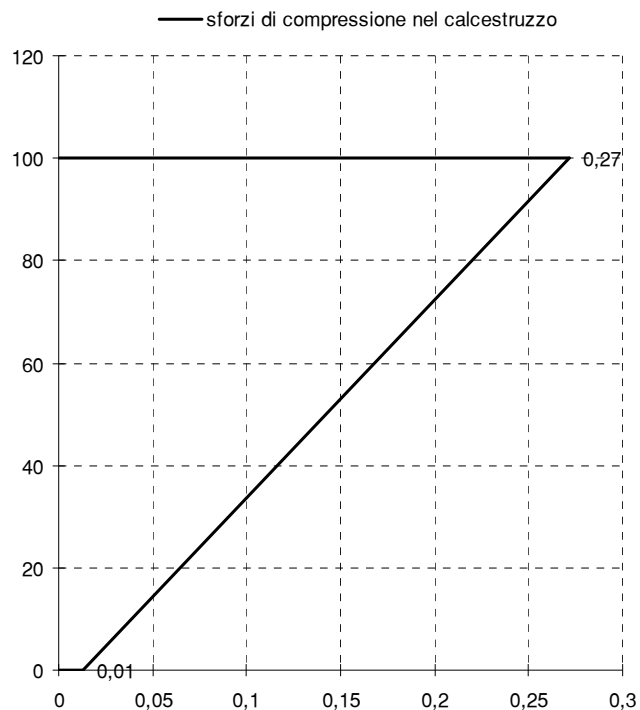


Figura 51 - Compressione nel calcestruzzo, arco rovescio

<i>Tabella 4 – Verifiche strutturali per la sezione BOV alla progr. 3+700 km</i>														
Elemento strutturale	sezione	b	h	N _{max}	M _{max}	V _{max}	x	σ _{c,max}	0,25·f _{ck}	F _{s,σ}	A*	τ _{c,max}	0,21·f _{ctk}	F _{s,τ}
		cm	cm	kN	kNm	kN	cm	MPa	MPa		cm ²	MPa	MPa	
Calotta	1-1	100	60	22	0,9	0,0	112,5	0,54	7,3	0,1	6000	0,00	0,42	0,0
Muretta	2-2	100	150	253	88	140	120,7	0,42	7,3	0,1	12070	0,17	0,42	0,4
Arco rovescio	3-3	100	100	200	12	10	188,9	0,27	7,3	0,0	10000	0,02	0,42	0,0

13.1.5. Analisi sismica del rivestimento definitivo

L'analisi sismica del rivestimento definitivo per la sezione in esame è stata realizzata considerando una Vs30 ben superiore a 800 m/s: si assume dunque una categoria di suolo di tipo A, a cui corrisponde una accelerazione orizzontale su suolo rigido ag pari a 0.262 g.

METODO DI PROPAGAZIONE DELLE ONDE		
INPUT		
Eg (modulo elastico terreno)	3,15E+09	kPa
ν_g (poisson terreno)	0,2	
EI (modulo elastico lining)	2,50E+07	kPa
ν_l (poisson lining)	0,5	
R (raggio esterno galleria)	7	m
t (spessore lining)	0,75	m
V/A table 2	140	
cs (velocità onde di taglio)	1500	m/s
As (peak ground acceleration) normativa	0,262	g
Spost/acc (ampiezza spostamento) con table 3		
C (coefficiente di profondità) table 4		
cp (velocità onde di compressione)	3000	m/s
Ap peak acceleration onde P	0,262	g
H (spessore deposito dal bedrock)	1	m
γ (peso di volume terreno)	23	kN/m ³
Φ inclinazione onda S	45	°
Φ inclinazione onda P	0	°
CALCOLI		
Ic (momento inerzia trasv)	2,68483789	m ⁴
Ag (sezione trasv)	31,219577	m ²
Vs peak particle velocity	0	m/s
Vp (peak particle velocity)	0,385	m/s
T periodo	0,002666667	s
L lunghezza d'onda	4	m
Gm modulo di taglio	5275229,358	kPa
Ka Kt (molle)	319399620,1	kN/m
A1 (ampiezza spostamento) caso flessionale	1,71804E-07	m
A2 (ampiezza spostamento) caso assiale	0	m
A (ampiezza spostamento con table 3)	0	m
F	128053,3	flessibile

Figura 52 – Dati di ingresso dell'analisi sismica dei rivestimenti

In Figura 52 è stata realizzata la prima parte del calcolo sismico, che consente di definire il grado di flessibilità del rivestimento in relazione alle caratteristiche geometriche e di resistenza che lo caratterizzano, e a quelle del materiale circostante. Nel caso in esame i calcoli hanno evidenziato un rivestimento di tipo flessibile: i calcoli della sollecitazione sismica sul rivestimento definitivo verranno di conseguenza realizzati mediante un approccio Free Field, senza considerare cioè l'interazione fra rivestimento e terreno circostante.

Si considerano tre diverse modalità di deformazione sismica:

- Deformazione assiale, dovuta ad un'onda sismica agente in direzione parallela all'asse galleria;
- Deformazione longitudinale, connessa d un moto perpendicolare all'asse;
- Ovaling, dovuta ad un'onda di tagli perpendicolare all'asse.

In Figura 53 e Figura 54 sono illustrati i risultati del calcolo sismico, considerando due diverse configurazioni di sollecitazione sismica:

- onde P con angolo di deviazione 0/90° dall'asse galleria, 45° di deviazione per le onde S;
- onde P con angolo di deviazione 45° dall'asse galleria, 0° di deviazione per le onde S;

Per ragioni trigonometriche a queste due configurazioni corrispondono le massime sollecitazioni sul rivestimento, nelle tre tipologie di deformazione considerate.

In entrambi i casi si osserva come la sollecitazione sismica non determini un notevole incremento degli sforzi nel calcestruzzo. Per la deformazione assiale e longitudinale, le tensioni assiali risultano sempre inferiori ai 2 MPa, quelle flettenti sono del tutto trascurabili. Nel caso dell'ovaling, la massima tensione assiale è dell'ordine di 1.1 MPa. Le deformazioni indotte sul rivestimento dal movimento vibratorio risultano nettamente inferiori ai limiti di accettabilità.

FREE FIELD senza interazione				
def assiale e flessionale				ovaling
	DEF LONG	DEF NORMALE	DEF FLESS	DEF DI TAGLIO
ONDE P	0,0001283333	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
ONDE S	0,0000000000	0,0000000000	0,0000028084	0,0000000000
	σ kPa assiale	σ kPa assiale	σ kPa fless	σ kPa assiale
ONDE P	3208,333333	0	0	0
ONDE S	0	0	70,2101791	0
ϵ max onda S	0,000003 < ϵ amm			
ϵ max onda P	0,000128 < ϵ amm			

Figura 53 – Risultati dell'analisi nel caso di angolo di deviazione dall'asse della galleria pari a 0/90° per le onde P, 45° per le onde S

FREE FIELD senza interazione				
def assiale e flessionale				ovaling
	DEF LONG	DEF NORMALE	DEF FLESS	DEF DI TAGLIO
ONDE P	0,0000641667	0,0000641667	0,0000007021	0,0000320833
ONDE S	0,0000000000	0,0000000000	0,0000079434	0,0000000000
	σ kPa assiale	σ kPa assiale	σ kPa fless	σ kPa assiale
ONDE P	1604,166667	1604,166667	17,55254478	1172,242182
ONDE S	0	0	198,584375	0
ϵ max onda S	0,000008 < ϵ amm			
ϵ max onda P	0,000065 < ϵ amm			

Figura 54 - Risultati dell'analisi nel caso di angolo di deviazione dall'asse della galleria pari a 45° per le onde P, 0° per le onde S

13.2. Sezione alla progressiva 4+100 km – sezione tipo Ac

Copertura 80 m da livelletta

Distanza fra i piedritti delle due gallerie affiancate = 59 m

Per i parametri geotecnici relativi alla sezione in esame si rimanda al capitolo 11.1.

In questa sezione di calcolo sono state analizzate due diverse sezioni tipo di sostegno, quali la Ab, per le tratte a maggiore qualità geomeccanica, e la Ac, La sezione interessa per l'intera sagoma di scavo i calcari della Formazione Ragusa.

Il presente paragrafo fa riferimento all'analisi di stabilità realizzata ipotizzando la messa in opera della sezione tipo Ac, l'analisi di stabilità della sezione Ab è invece proposta al paragrafo 13.3.

Per i calcoli di stabilità si sono adottate le seguenti percentuali di detensionamento, che fanno riferimento alla curva di Panet-Guenot per una galleria non sostenuta:

<i>Tabella 5 - Percentuali di detensionamento per le fasi di calcolo</i>	
Sezione tipo Ac	
Sequenza di calcolo	Detensionamento
Fase 1 - Fronte	30 %
Fase 2 - Avanzamento	65 %
Fase 3 - Posa rivestimenti preliminari	70 %
Fase 4 - Getto arco rovescio e murette	90 %
Fase 5 - Completamento rivestimento definitivo	100 %

Nel caso dell'analisi in presenza del solo rivestimento di prima fase, l'analisi si ferma alla Fase 3, per applicare poi l'intero detensionamento al rivestimento provvisorio.

Si presentano ora le caratteristiche dei sostegni preliminari e definitivi previsti per la sezione tipo Ac. L'avanzamento previsto è di 3 m.

Ai fini delle verifiche strutturali si considera lo scavo della canna direzione Gela, per la quale si prevede l'adozione della sezione tipo Ac(125), indicando con il valore tra parentesi l'entità dell'allargamento della sezione corrente, limitatamente alla canna direzione Gela, in centimetri.


<i>Tabella 6 - Caratteristiche dei rivestimenti previsti per la sezione in esame</i>		
Rivestimento preliminare	Centine	1 HEA 180 / 1.5 m
	A	45.3 cm ²
	J	2510 cm ⁴
	w	35.5 kg/m
	Spritz, spessore	25 cm
	E eq	32060 MPa
	spessore eq	25 cm
Rivestimento definitivo	Arco rovescio	
	spessore medio	0.8 m
	EA	2.4 e7 kN/m
	EJ	1280000 kNm ² /m
	Calotta	
	spessore medio	0.7 m
	EA	2.1 e7 kN/m
	EJ	857500 kNm ² /m
	Muretta	
	spessore medio	0.8 m
	EA	2.4 e7 kN/m
	EJ	1280000 kNm ² /m

13.2.1. Risultati dell'analisi

L'analisi Plaxis è stata realizzata con un modello bidimensionale considerando lo scavo di una delle due canne, con i detensionamenti precedentemente elencati. Nelle pagine seguenti si riportano i risultati dell'analisi Plaxis ipotizzando la messa in opera di una sezione di sostegno Ac.

Seppur il modello presenti entrambe le canne autostradali, l'analisi è stata realizzata per la sola canna direzione Gela, per due ragioni:

- la distanza tra i due assi autostradali è di circa 60 m nella sezione in esame, rimanendo tale o aumentando di estensione lungo la parte di tracciato che compete alla galleria Occhipinti;

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 88
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

- la galleria si pone, per tutta la sua lunghezza, entro la formazione dei calcari marnosi, caratterizzati da una buona qualità geomeccanica e da una naturale capacità di auto sostenersi.

Alla luce di queste considerazioni, si ritiene che le due canne di scavo non presentino alcun tipo di mutua interazione.

Nelle pagine seguenti si riportano i risultati dell'analisi Plaxis. L'analisi è stata realizzata per la massima copertura presente lungo la galleria Occhipinti, 80 m dal piano di scavo. I risultati proposti fanno riferimento all'ipotesi cautelativa in cui l'intero detensionamento venga assorbito dai rivestimenti di prima fase.

Le Figura 55 e Figura 56 riportano la distribuzione degli spostamenti radiali al contorno di scavo e la distribuzione delle zone plasticizzate al termine del detensionamento: si osserva che i calcari presentano una buona capacità di autosostegno, con spostamenti millimetrici ed una plasticizzazione corticale. Questa osservazione è in accordo con quanto previsto dalle classificazione geomeccaniche per un ammasso di classe III. Il calcare presenta infatti un indice RMR di base di circa 50 punti, a cui si associano, secondo l'abaco di Bieniawski riportato in Figura 57 una lunghezza ibera autoportante di 4.5-5 m ed un tempo di auto portanza di circa 1 settimana.

In Figura 58 si riportano le direzioni delle tensioni principali al contorno della cavità, che descrivono l'effetto arco che si viene a creare nell'ammasso roccioso al contorno del cavo una volta realizzato lo scavo.

La Figura 59 illustra l'evoluzione degli spostamenti verticali in calotta all'aumentare del detensionamento, ovvero all'aumentare della distanza fra il fronte di scavo e la sezione di calcolo. Si osserva la regimazione degli spostamenti una volta irrigidito il contorno di scavo con la posa dei rivestimenti di prima fase.

Nelle figure 9-10-11-12 si riportano le sollecitazioni agenti sui priverestimenti, nell'ipotesi cautelativa in cui l'intero detensionamento venga supportato dall'accoppiamento centine-spritz beton, ed i relativi diagrammi di interazione. Tali diagrammi sono stati ottenuti incrementando le sollecitazioni di un fattore 1.3, come descritto nelle NTC per l'approccio A1+M1, e distribuendo le sollecitazioni su centine e spritz beton in relazione alle relative rigidezze. Tutte le sollecitazioni risultano ridotte, e sempre entro i limiti di resistenza dei materiali.

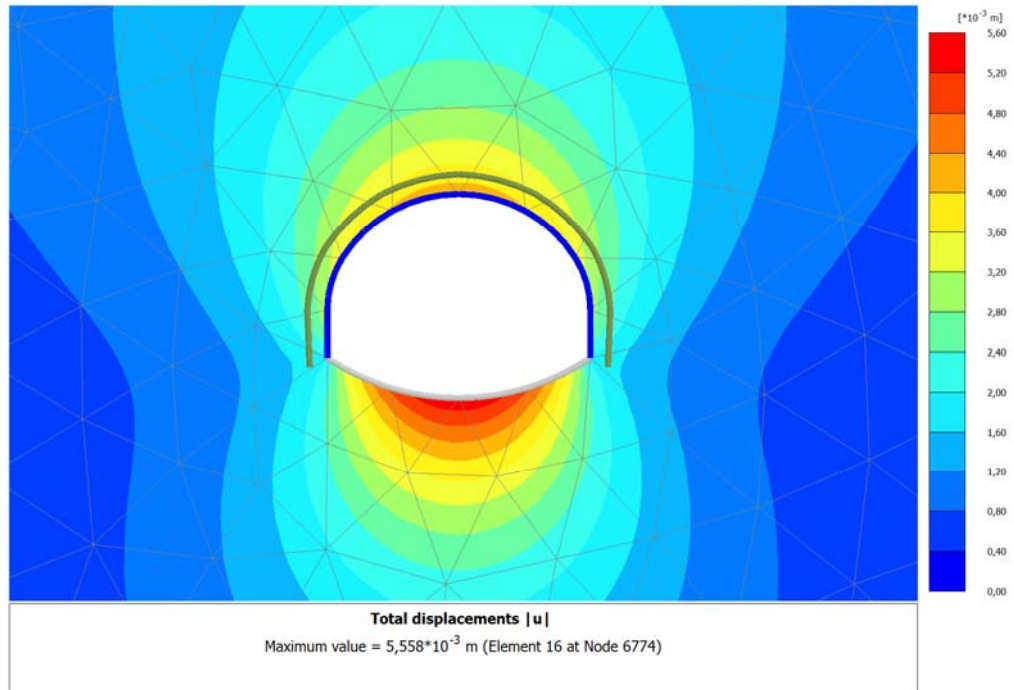


Figura 55 – Spostamenti radiali al contorno galleria a fine detensionamento

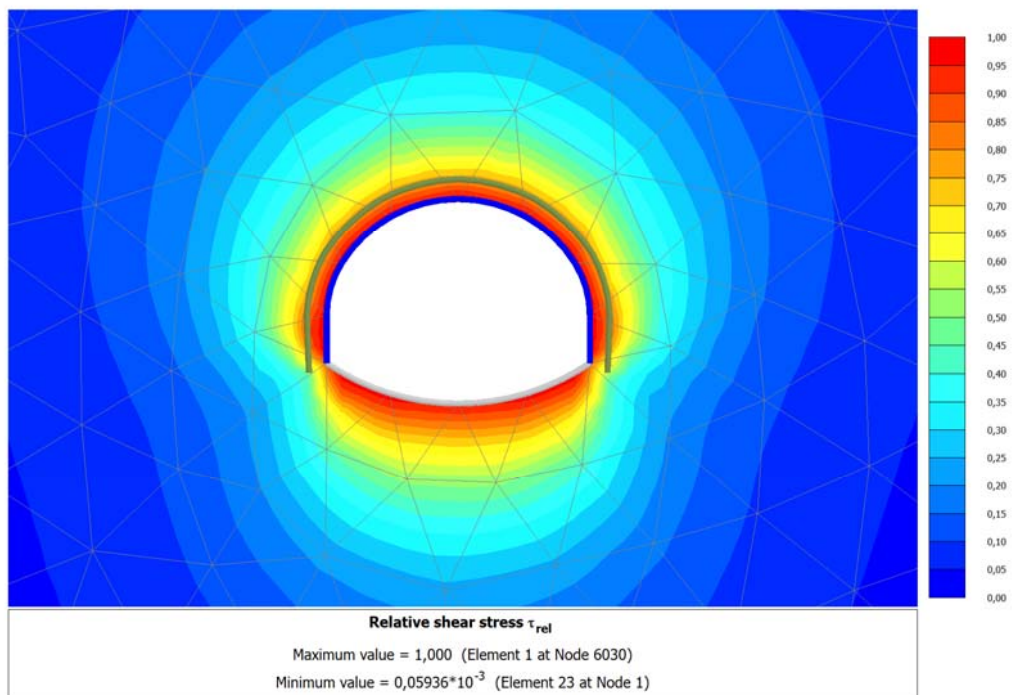


Figura 56 – Zone plasticizzate al contorno galleria a fine detensionamento

FIG. 2 - Bieniawski
[Da Bieniawski]

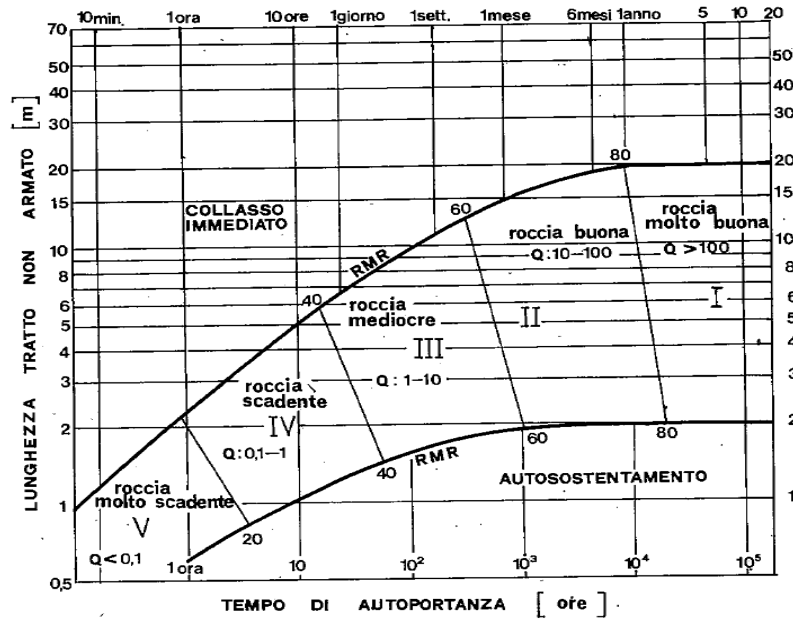


Figura 57 – Abaco di Bieniawski per la determinazione della lunghezza libera e del tempo di autoportanza in relazione alla qualità della massa rocciosa

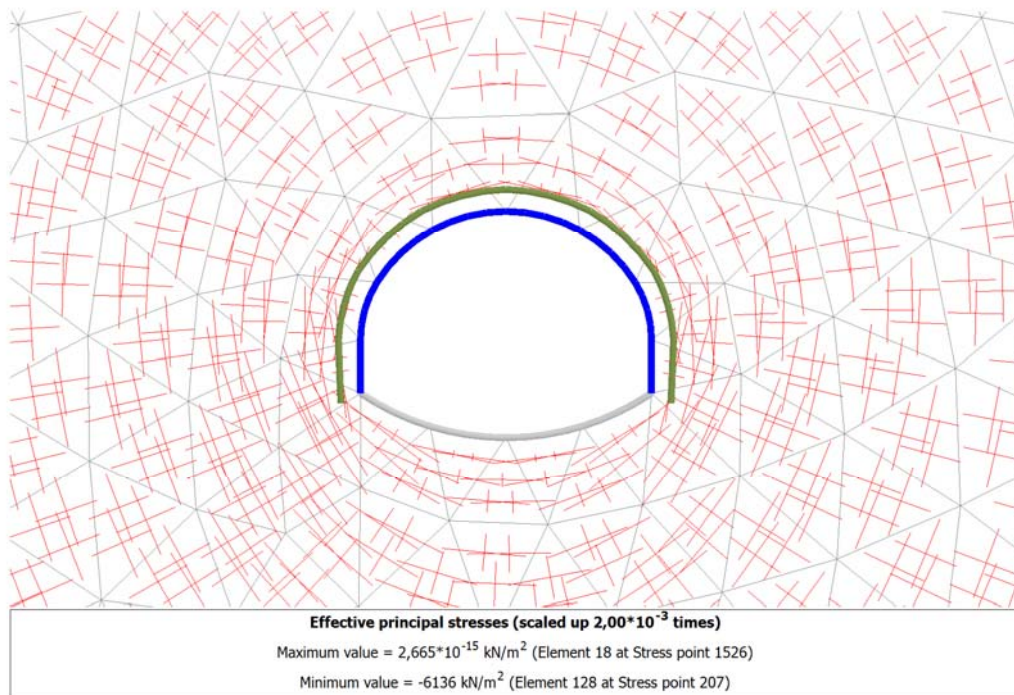


Figura 58 – Orientazione delle tensioni principali al contorno del cavo

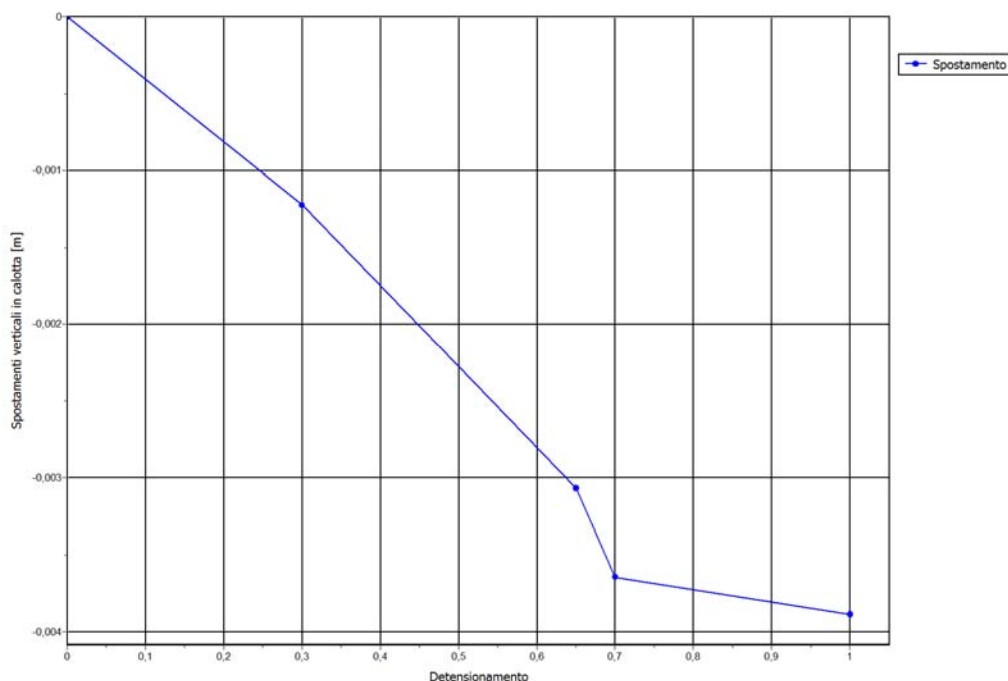


Figura 59 – Spostamenti verticali in calotta, in presenza del solo prerivestimento

13.2.2. Verifiche strutturali del rivestimento preliminare

Nelle figure seguenti si propongono le distribuzioni delle sollecitazioni agenti sui rivestimenti di prima fase, alla fine del detensionamento.

In Figura 60, Figura 61 e Figura 62 si riportano le sollecitazioni agenti sui prerivestimenti, nell'ipotesi cautelativa in cui l'intero detensionamento venga supportato dall'accoppiamento centine-spritz beton.

In Figura 63 si riportano i relativi diagrammi di interazione. Tali diagrammi sono stati ottenuti incrementando le sollecitazioni di un fattore 1.3, come descritto nelle NTC per l'approccio A1+M1, e distribuendo le sollecitazioni su centine e spritz beton in relazione alle relative rigidzze. Tutte le sollecitazioni risultano ridotte, e sempre entro i limiti di resistenza dei materiali.

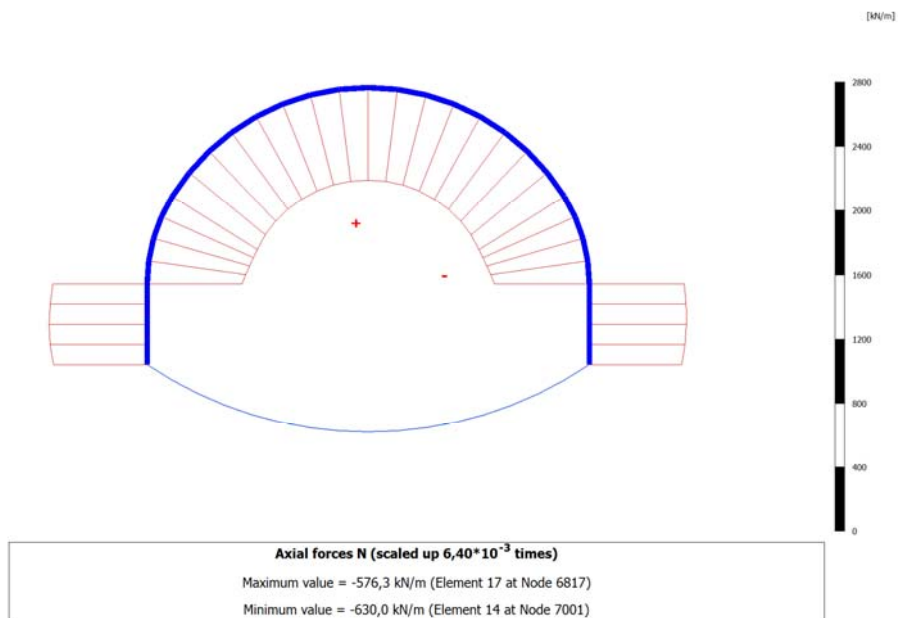


Figura 60 – Sollecitazioni di sforzo normale agenti sul rivestimento preliminare

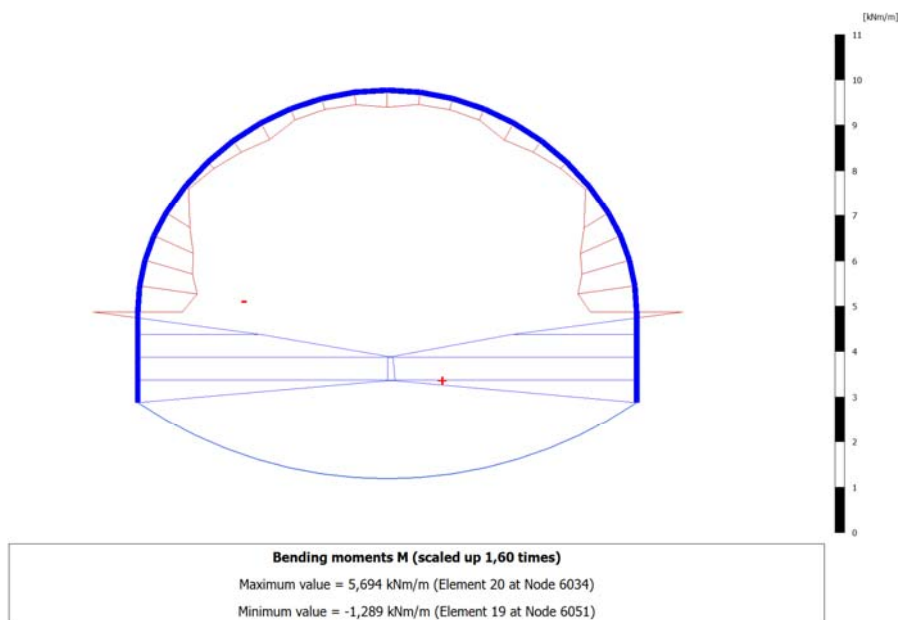


Figura 61 - Sollecitazioni di momento flettente agenti sul rivestimento preliminare

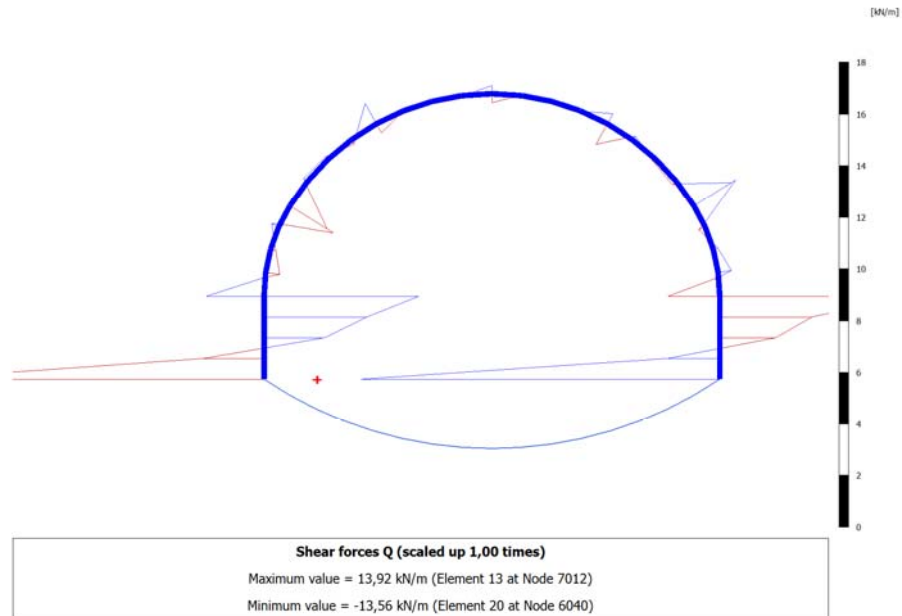


Figura 62 - Sollecitazioni di taglio agenti sul rivestimento preliminare

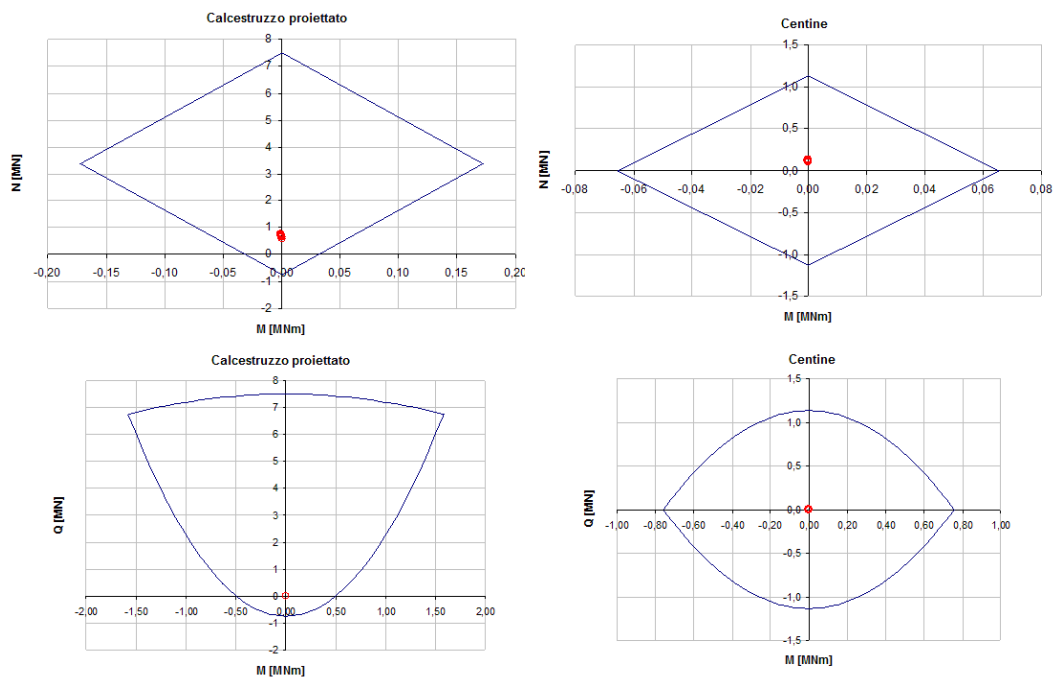


Figura 63 – Diagrammi di interazione dei rivestimento preliminari

13.2.3. Sollecitazioni agenti sul rivestimento definitivo

Nelle figure seguenti si propongono le distribuzioni delle sollecitazioni agenti sui rivestimenti definitivi, alla fine del detensionamento.

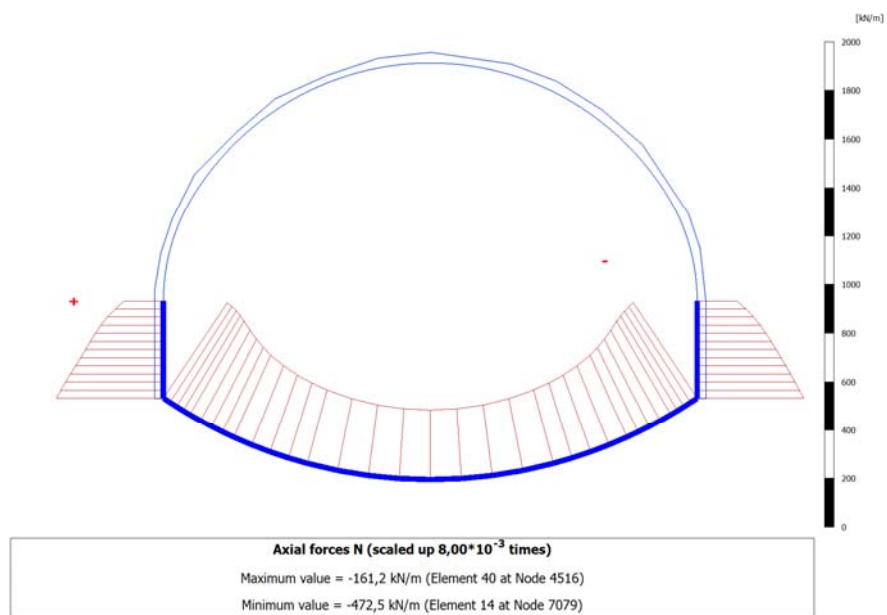


Figura 64 - Sollecitazioni di sforzo normale agenti su arco rovescio e murette

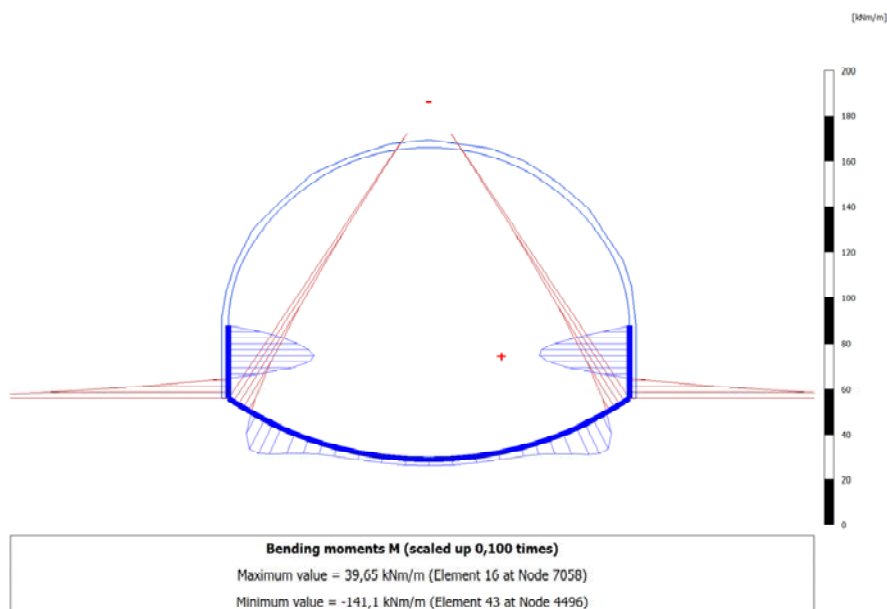


Figura 65 - Sollecitazioni di momento flettente agenti su arco rovescio e murette

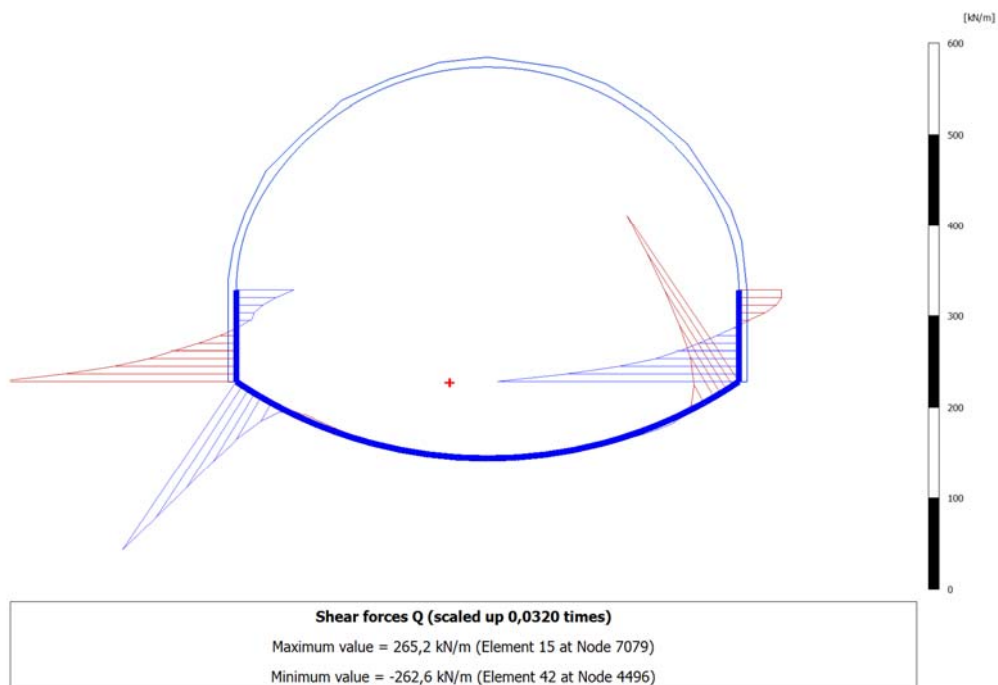


Figura 66 - Sollecitazioni di taglio agenti su arco rovescio e murette

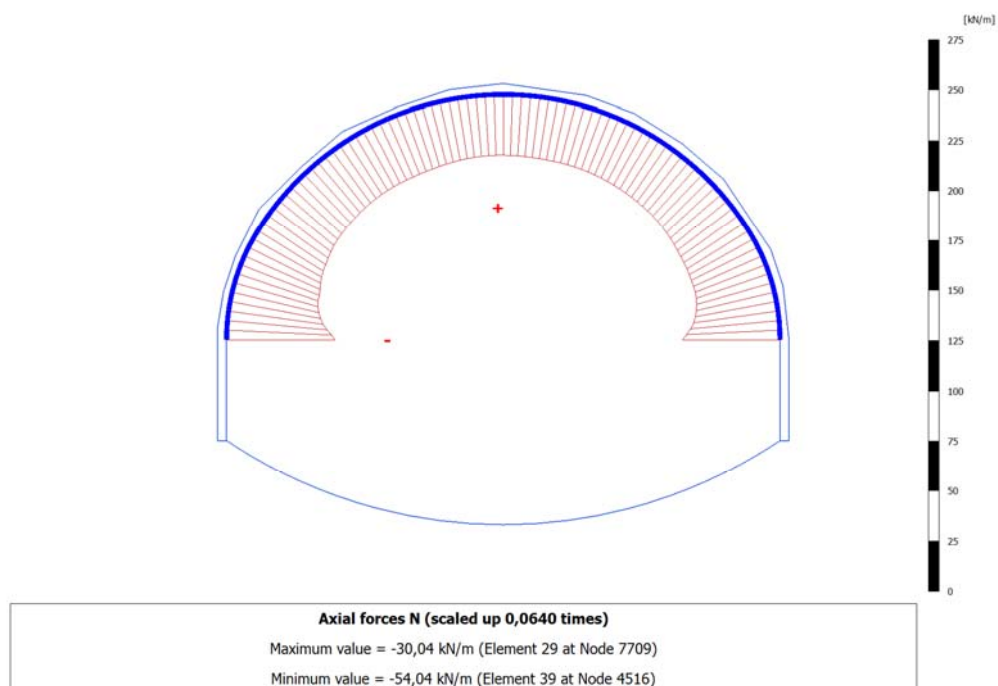
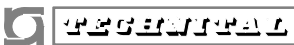


Figura 67 - Sollecitazioni di sforzo normale agenti sulla calotta

	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 96
	Pr	Strada			Lotto	Macro opera		Opera			Parte di opera	Tipo elab	N. Elab.	Rev									

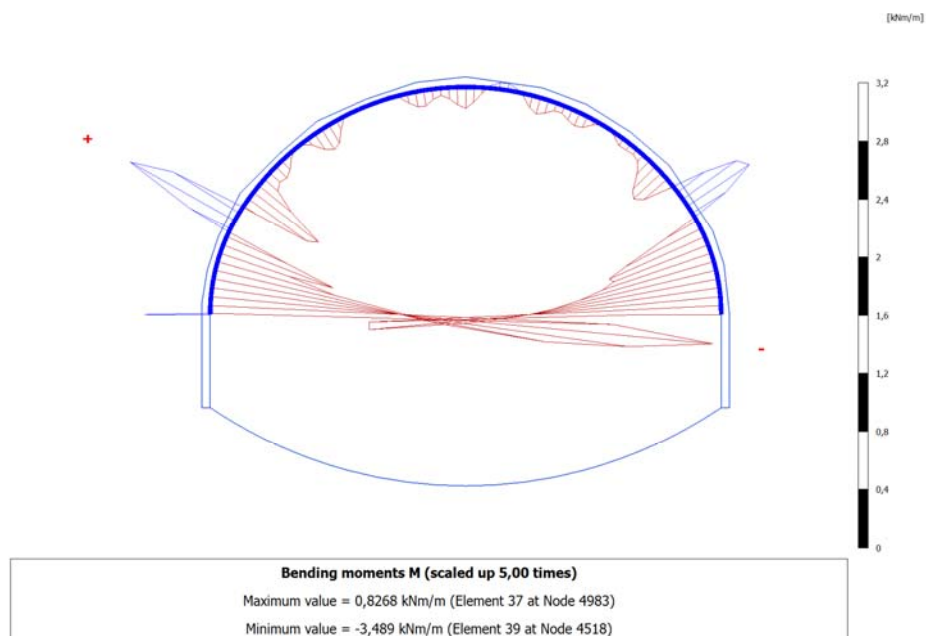


Figura 68 - Sollecitazioni di momento flettente agenti sulla calotta

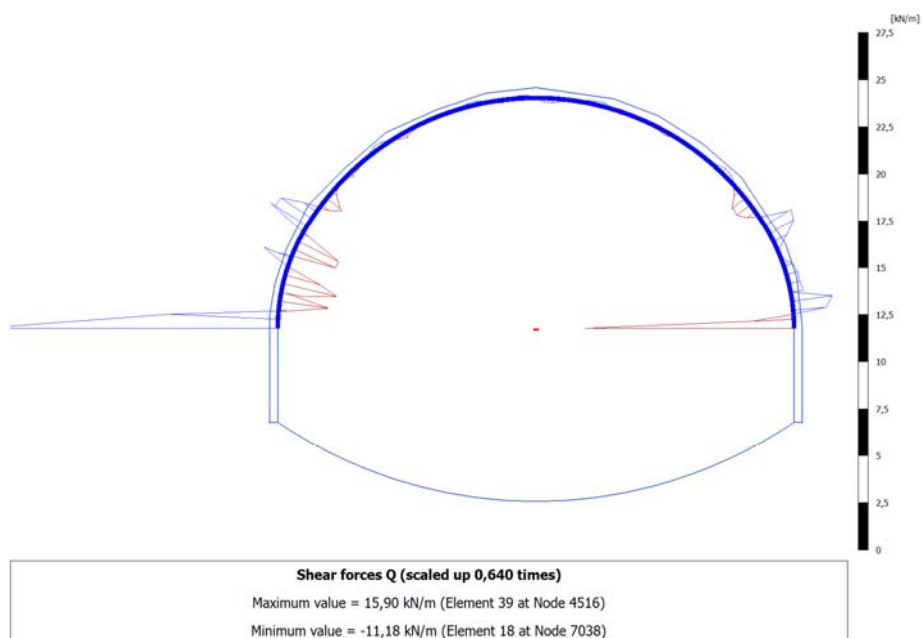


Figura 69 - Sollecitazioni di taglio agenti sulla calotta

13.2.4. Verifiche strutturali del rivestimento definitivo

Di seguito si presentano le verifiche strutturali realizzate per la Galleria Occhipinti, nella sezione alla progressiva 4+100 km, sezione Ac.

In corrispondenza di questa sezione, caratterizzata da una copertura medio-massima, si sono analizzate con metodi numerici ed empirici due diverse sezioni tipo di sostegno, la sezione Ab e la sezione Ac. Per ciascuna di queste si è realizzata dapprima un'analisi che cautelativamente associa tutti i carichi dovuti al detensionamento della massa rocciosa ai priverestimenti, e successivamente una seconda analisi in cui si realizza anche la posa in opera dei rivestimenti definitivi. Le verifiche strutturali sono state realizzate a partire dalle sollecitazioni di momento flettente M, sforzo assiale N e taglio Q valutate mediante l'analisi agli elementi finiti, a detensionamento avvenuto. L'approccio normativo adottato è
Nella tabella seguente si elencano le massime sollecitazioni agenti sulle diverse porzioni del rivestimento definitivo:

<i>Tabella 7 – Sollecitazioni agenti nel rivestimento definitivo, sezione Ac</i>			
Sollecitazioni agenti sul rivestimento, derivanti da analisi Plaxis			
	N [kN/m]	M [kNm/m]	Q [kN/m]
Calotta	-54	3.5	16
Arco rovescio	-300	20	50
Muretta	-473	141	265

Si sottolinea che la verifica di ciascuna sezione è stata realizzata non considerando lo spessore medio del rivestimento, implementato nel codice di calcolo per la modellazione dei diversi elementi piani costituenti il definitivo, ma definendo lo spessore del rivestimento in corrispondenza della sezione più sollecitata a partire dalla geometria propria della sezione tipo di sostegno.

Nella successiva Tabella 8 sono riassunti i risultati delle verifiche strutturali eseguite per la sezione più sollecitata di calotta, arco rovescio e muretta. La terminologia adottata per indicare le grandezze considerate è la seguente:

b	base della sezione
h	altezza della sezione
N_{max}	massima azione di compressione
M_{max}	massimo momento flettente

- V_{max} massima azione di taglio
 x distanza dell'asse neutro dal lembo compresso
 $\sigma_{c,max}$ massimo sforzo di compressione
 $0,25 \cdot f_{ck}$ sforzo di compressione limite
 $F_{s,\sigma}$ fattore di sicurezza nei confronti degli sforzi di compressione
 A^* area della sezione parzializzata
 $\tau_{c,max}$ massimo sforzo di taglio
 $0,21 \cdot f_{ctk}$ sforzo di taglio limite
 $F_{s,\tau}$ fattore di sicurezza nei confronti degli sforzi di taglio

Il fattore di sicurezza è inteso come rapporto tra il massimo sforzo agente nella sezione e il corrispondente valore limite. Come si nota dai valori riportati nelle tabelle, i valori di F_s sono tutti minori dell'unità. La verifica è dunque rispettata per tutte le sezioni considerate in assenza di armatura.

In Figura 70, Figura 71, Figura 72 si riporta altresì la distribuzione degli sforzi normali agenti sulle sezioni considerate per effetto della corrispondente sollecitazione di presso-flessione.

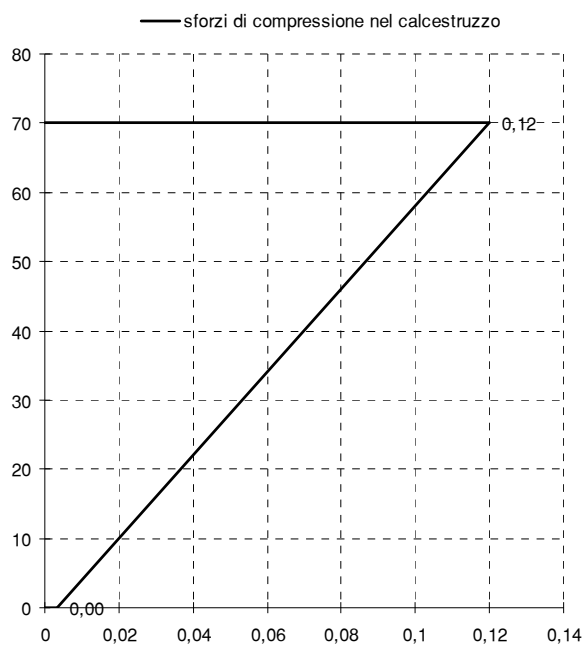


Figura 70 – Compressione nel calcestruzzo, calotta

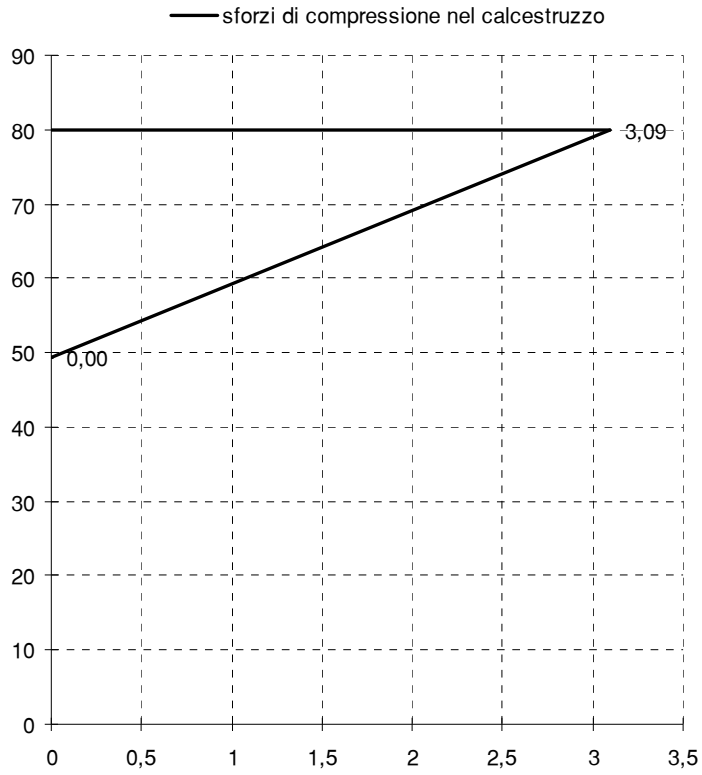


Figura 71 – Compressione nel calcestruzzo, muretta

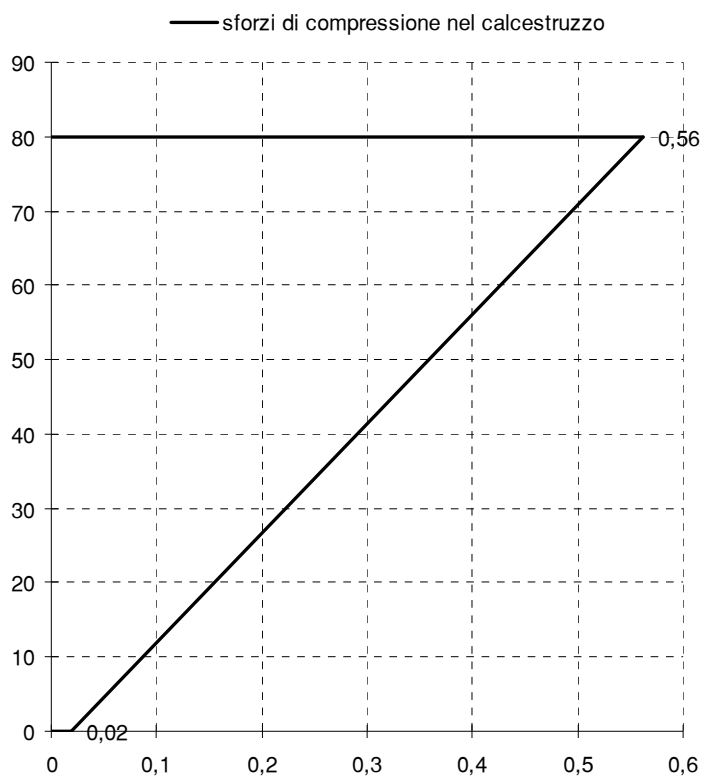


Figura 72 – Compressione nel calcestruzzo, arco rovescio

Tabella 8 – Verifiche strutturali per la sezione Ac alla progr. 4+100 km

Elemento strutturale	b	h	N _{max}	M _{max}	V _{max}	x	σ _{c,max}	0,25·f _{ck}	F _{s,σ}	A*	τ _{c,max}	0,21·f _{ctk}	F _{s,τ}
	cm	cm	kN	kNm	kN	cm	MPa	MPa		cm ²	MPa	MPa	
Calotta	100	70	54	3,5	16,0	98,0	0,12	7,3	0,0	7000	0,03	0,42	0,1
Muretta	100	120	473	141	265	95	1.04	7,3	0,4	9500	0,41	0,42	0,9
Arco rovescio	100	80	300	20	50	120	0,56	7,3	0,1	8000	0,09	0,42	0,2

13.2.5. Analisi sismica del rivestimento definitivo

L'analisi sismica del rivestimento definitivo per la sezione in esame è stata realizzata considerando una Vs30 superiore a 800 m/s: si assume dunque una categoria di suolo di tipo A, a cui corrisponde un'accelerazione orizzontale su suolo rigido ag pari a 0.262 g.

METODO DI PROPAGAZIONE DELLE ONDE		
INPUT		
Eg (modulo elastico terreno)	4600000	kPa
ν g (poisson terreno)	0,2	
EI (modulo elastico lining)	25000000	kPa
ν l (poisson lining)	0,15	
R (raggio esterno galleria)	7,5	m
t (spessore lining)	0,75	m
V/A table 2	140	
cs (velocità onde di taglio)	1500	m/s
As (peak ground acceleration) normativa	0,262	g
Spost/acc (ampiezza spostamento) con table 3	99	
C (coefficiente di profondità) table 4	0,7	
cp (velocità onde di compressione)	3000	m/s
Ap peak acceleration onde P	0,262	g
H (spessore deposito dal bedrock)	5	m
γ (peso di volume terreno)	23	kN/m ³
Φ inclinazione onda S	45	°
Φ inclinazione onda P	0	°
CALCOLI		
Ic (momento inerzia trasv)	3,338313705	m ⁴
Ag (sezione trasv)	33,57577149	m ²
Vs peak particle velocity	0,001834	m/s
Vp (peak particle velocity)	0,3668	m/s
T periodo	0,013333333	s
L lunghezza d'onda	20	m
Gm modulo di taglio	5275229,358	kPa
Ka Kt (molle)	68701050,36	kN/m
A1 (ampiezza spostamento) caso flessionale	4,09207E-06	m
A2 (ampiezza spostamento) caso assiale	1,94593E-06	m
A (ampiezza spostamento con table 3)	0,25938	m
F	299,8	flessibile

Figura 73 – Dati di ingresso dell'analisi sismica dei rivestimenti

In Figura 73 è stata realizzata la prima parte del calcolo sismico, che consente di definire il grado di flessibilità del rivestimento in relazione alle caratteristiche geometriche e di resistenza che lo caratterizzano, e a quelle del materiale circostante. Nel caso in esame i calcoli hanno evidenziato un rivestimento di tipo flessibile: i calcoli della sollecitazione sismica sul rivestimento definitivo verranno di conseguenza realizzati mediante un approccio Free Field, senza considerare cioè l'interazione fra rivestimento e terreno circostante.

Si considerano tre diverse modalità di deformazione sismica:

- Deformazione assiale, dovuta ad un'onda sismica agente in direzione parallela all'asse galleria;
- Deformazione longitudinale, connessa d un moto perpendicolare all'asse;
- Ovaling, dovuta ad un'onda di tagli perpendicolare all'asse.

In Figura 74 e Figura 75 sono illustrati i risultati del calcolo sismico, considerando due diverse configurazioni di sollecitazione sismica:

- onde P con angolo di deviazione 0/90° dall'asse galleria, 45° di deviazione per le onde S;
- onde P con angolo di deviazione 45° dall'asse galleria, 0° di deviazione per le onde S;

Per ragioni trigonometriche a queste due configurazioni corrispondono le massime sollecitazioni sul rivestimento, nelle tre tipologie di deformazione considerate.

In entrambi i casi si osserva come la sollecitazione sismica non determini un notevole incremento degli sforzi nel calcestruzzo. Per la deformazione assiale e longitudinale, le tensioni assiali risultano sempre inferiori ai 3 MPa, quelle flettenti sono del tutto trascurabili. Nel caso dell'ovaling, la massima tensione assiale è dell'ordine di 0.3 MPa. Anche le deformazioni indotte sul rivestimento dal movimento vibratorio risultano accettabili.

FREE FIELD senza interazione				
	def assiale e flessionale			ovaling
	DEF LONG	DEF NORMALE	DEF FLESS	DEF DI TAGLIO
ONDE P	0,0001222667	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
ONDE S	0,0000006113	0,0000006113	0,000028776	0,0000003057
	σ kPa assiale	σ kPa assiale	σ kPa fless	σ kPa assiale
ONDE P	3056,666667	0	0	0
ONDE S	15,28333333	15,28333333	71,93954132	1,179202415
ϵ max onda S		0,000003 < ϵ amm		
ϵ max onda P		0,000122 < ϵ amm		

Figura 74 – Risultati dell'analisi nel caso di angolo di deviazione dall'asse della galleria pari a 0/90° per le onde P, 45 ° per le onde S

FREE FIELD senza interazione				
def assiale e flessionale				
	DEF LONG	DEF NORMALE	DEF FLESS	ovaling
ONDE P	0,0000611333	0,0000611333	0,0000007194	0,0000305667
ONDE S	0,0000000000	0,0000000000	0,0000081390	0,0000006113
	σ kPa assiale	σ kPa assiale	σ kPa fless	σ kPa assiale
ONDE P	1528,333333	1528,333333	17,98488533	314,4539774
ONDE S	0	0	203,47575	2,358404831
ϵ max onda S		0,000008	< ϵ amm	
ϵ max onda P		0,000062	< ϵ amm	

Figura 75 - Risultati dell'analisi nel caso di angolo di deviazione dall'asse della galleria pari a 45° per le onde P, 0° per le onde S

13.3. Sezione alla progressiva 4+100 km – Sezione tipo Ab

Copertura 80 m da livelletta

Distanza fra i piedritti delle due gallerie affiancate = 59 m

Per i parametri geotecnici relativi alla sezione in esame si rimanda al capitolo 11.1.

La sezione interessa per l'intera sagoma di scavo i calcari della Formazione Ragusa.

Il presente paragrafo fa riferimento all'analisi di stabilità realizzata ipotizzando la messa in opera della sezione tipo Ab.

Per i calcoli di stabilità si sono adottate le seguenti percentuali di detensionamento, che fanno riferimento alla curva di Panet-Guenot per una galleria non sostenuta:

Tabella 9 - Percentuali di detensionamento per le fasi di calcolo	
Sezione tipo Ab	
Sequenza di calcolo	Detensionamento
Fase 1 - Fronte	30 %
Fase 2 - Avanzamento	70 %
Fase 3 - Installazione chiodature	75 %
Fase 4 – Posa spritz beton (15 cm)	90 %
Fase 5 - Getto arco rovescio e murette	90 %
Fase 6 - Completamento rivestimento definitivo	100 %

Nel caso dell'analisi in presenza del solo rivestimento di prima fase, l'analisi si ferma alla Fase 4, per applicare poi l'intero detensionamento al rivestimento provvisorio.

Si presentano ora le caratteristiche dei sostegni preliminari e definitivi previsti per la sezione tipo Ab. L'avanzamento previsto è di 5 m.


Ai fini delle verifiche strutturali si considera lo scavo della canna direzione Gela, per la quale si prevede l'adozione della sezione tipo Ab(125), indicando con il valore tra parentesi l'entità dell'allargamento della sezione corrente, limitatamente alla canna direzione Gela, in centimetri.

<i>Tabella 10 - Caratteristiche dei rivestimenti previsti per la sezione in esame</i>		
Rivestimento preliminare	Spritz, spessore	5+15 cm
	Chiodi, lunghezza	4.5 m
	spaz. longitudinale	1.25 m
Rivestimento definitivo	Arco rovescio	
	spessore medio	0.8 m
	EA	2.4 e7 kN/m
	EJ	1280000 kNm ² /m
	Calotta	
	spessore medio	0.7 m
	EA	2.1 e7 kN/m
	EJ	857500 kNm ² /m
	Muretta	
	spessore medio	0.8 m
	EA	2.4 e7 kN/m
	EJ	1280000 kNm ² /m

13.3.1. Risultati dell'analisi

L'analisi della sezione alla progressiva 4+100 km nella Galleria Occhipinti è stata realizzata anche in relazione all'adozione della sezione tipo Ab. Le fasi di messa in opera di tale sezione di sostegno sono:

- scavo per uno sfondo di 5 m;
- posa di uno strato di 5 cm di spritz beton a sicurezza delle maestranze;
- posa chiodi Swellex, lunghezza 4.5 m, nel numero di 12-13 chiodi con intersasse longitudinale 1.25 m;

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 105
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

- posa di 15 cm di spritz beton.

Nel modello non si è considerata l'azione di sostegno del primo strato di spritz beton di 5 cm, ottenendo quindi una soluzione cautelativa. Le percentuali di detensionamento adottate per la simulazione dell'avanzamento del fronte di scavo sono state precedentemente esposte, e fanno riferimento alla curva di Panet-Guenot per ammassi rocciosi autostabili.

Seppur il modello presenti entrambe le canne autostradali, l'analisi è stata realizzata per la sola canna direzione Gela, per due ragioni:

- la distanza tra i due assi autostradali è di circa 60 m nella sezione in esame, rimanendo tale o aumentando di estensione lungo la parte di tracciato che compete alla galleria Occhipinti;
- la galleria si pone, per tutta la sua lunghezza, entro la formazione dei calcari marnosi, caratterizzati da una buona qualità geomeccanica e da una naturale capacità di auto sostenersi.

Alla luce di queste considerazioni, si ritiene che le due canne di scavo non presentino alcun tipo di mutua interazione.

Nelle pagine seguenti si riportano i risultati dell'analisi Plaxis. L'analisi è stata realizzata per la massima copertura presente lungo la galleria Occhipinti, 80 m dal piano di scavo. I risultati proposti fanno riferimento all'ipotesi cautelativa in cui l'intero detensionamento venga assorbito dai rivestimenti di prima fase.

In Figura 76 è illustrata la geometria di scavo implementata nel modello di calcolo per la sezione in esame.

In Figura 77 sono illustrati gli spostamenti radiali al contorno di scavo al termine del detensionamento: gli spostamenti presentano un maggiore gradiente in direzione verticale, non raggiungendo mai comunque il centimetro. Analogamente, gli spostamenti verticali in calotta si aggirano sui 5 mm, Figura 78.

Nelle Figura 79 e Figura 80 si individuano le zone plasticizzate al contorno del cavo, di estensione media 1.5-2 m, e le direzioni delle tensioni principali. Si osserva che la lunghezza dei chiodi è adeguata all'estensione della zona allentata al contorno del cavo.

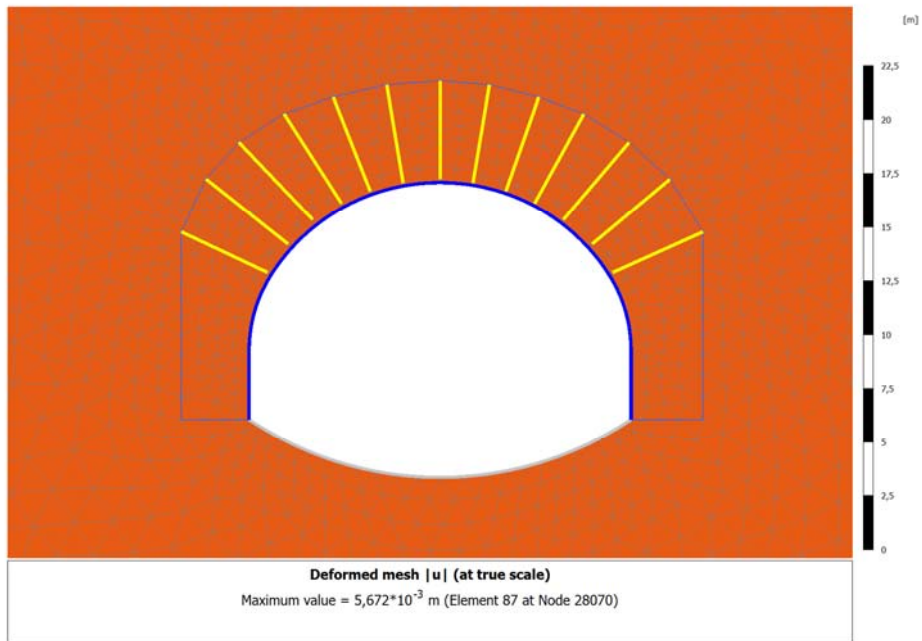


Figura 76 – Geometria del modello agli elementi finiti

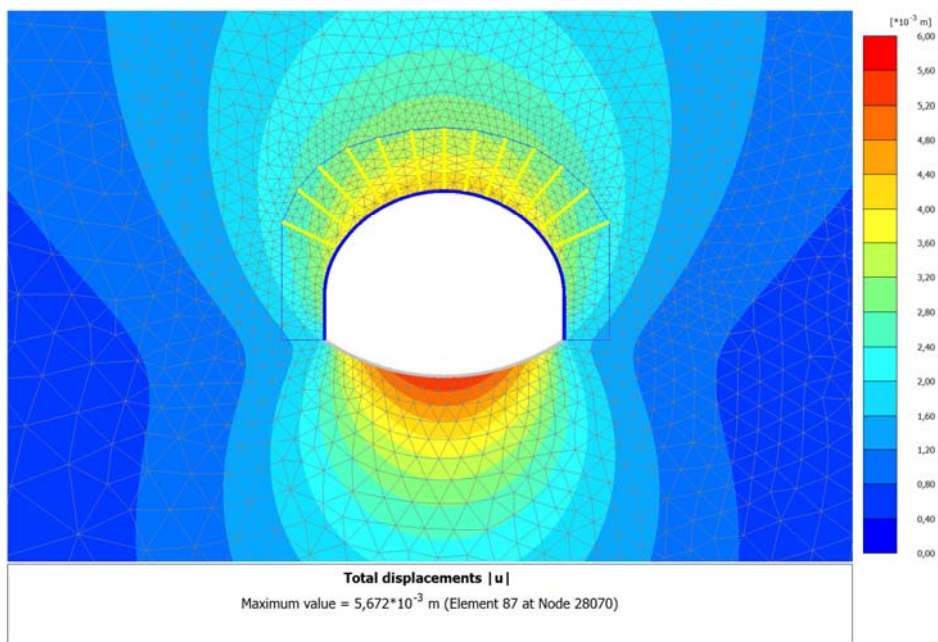


Figura 77 -

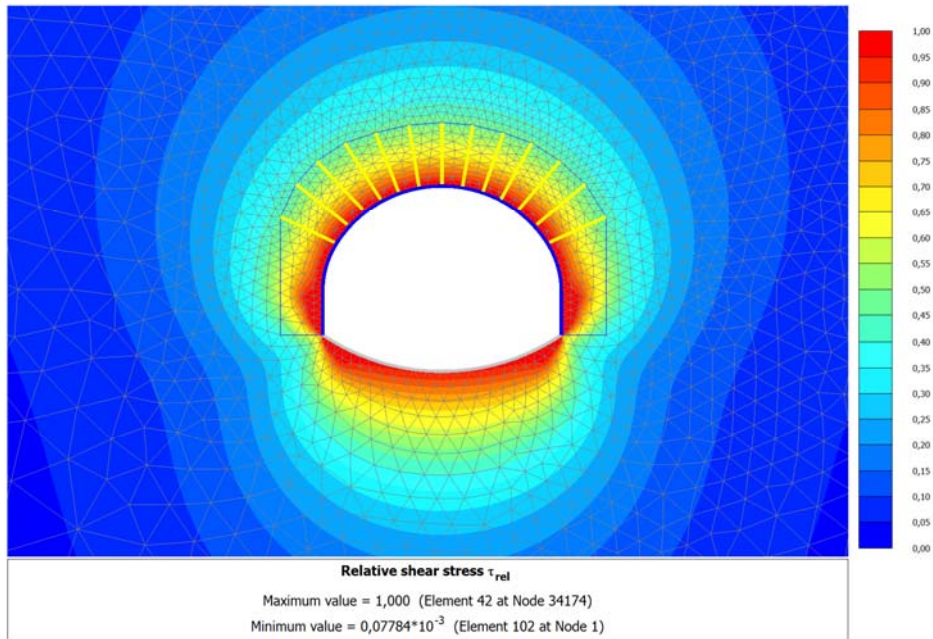


Figura 78 -

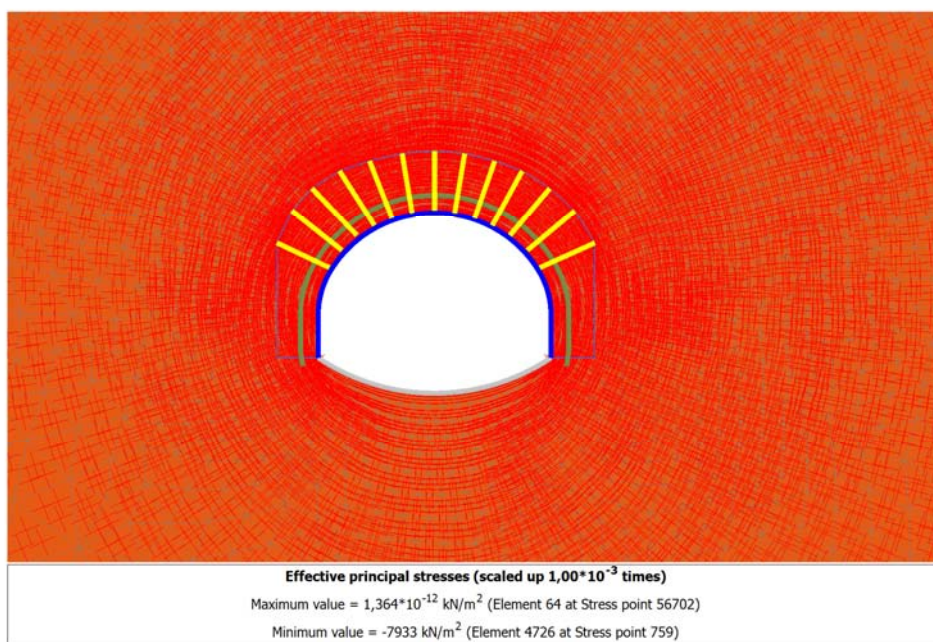


Figura 79 -

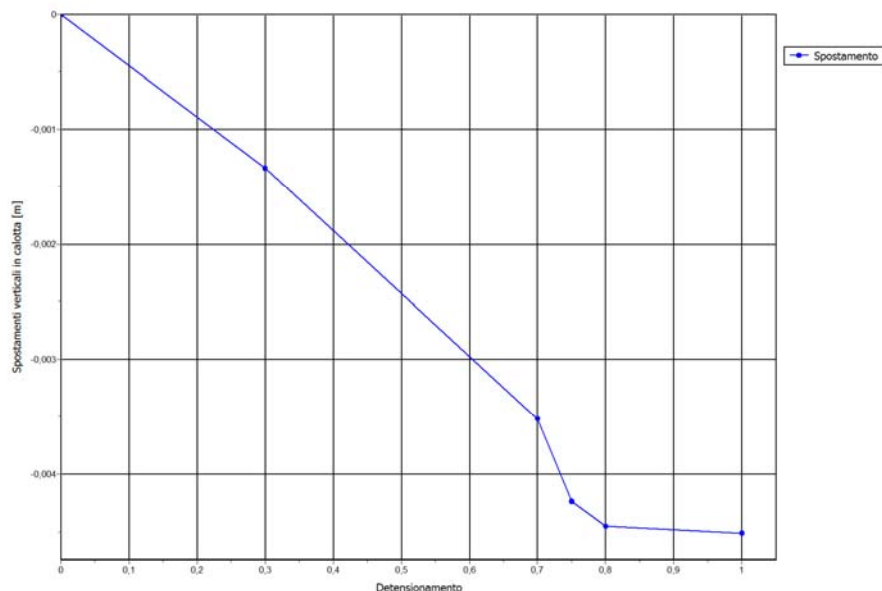


Figura 80 –

13.3.2. Verifiche strutturali del rivestimento preliminare

Nelle figure seguenti si propongono le distribuzioni delle sollecitazioni agenti sui rivestimenti definitivi, alla fine del detensionamento.

In Figura 81, Figura 82 e Figura 83 s'illustrano le sollecitazioni agenti sui prerivestimenti, nell'ipotesi cautelativa in cui l'intero detensionamento venga supportato dal rivestimento preliminare. In Figura 84 sono invece riportati i relativi diagrammi di interazione per il solo calcestruzzo proiettato. Tali diagrammi sono stati ottenuti incrementando le sollecitazioni di un fattore 1.3, come descritto nelle NTC per l'approccio A1+M1. Tutte le sollecitazioni risultano ridotte, e sempre entro i limiti di resistenza dello spritz beton.

La stabilità dei chiodi è stata analizzata a partire dalla conoscenza delle sollecitazioni assiali agenti su di essi, Figura 85. Si è quindi proceduto alle verifiche di sfilamento e snervamento, considerando una fascia plastica di spessore 2 m ed una resistenza laterale di 150 kPa.

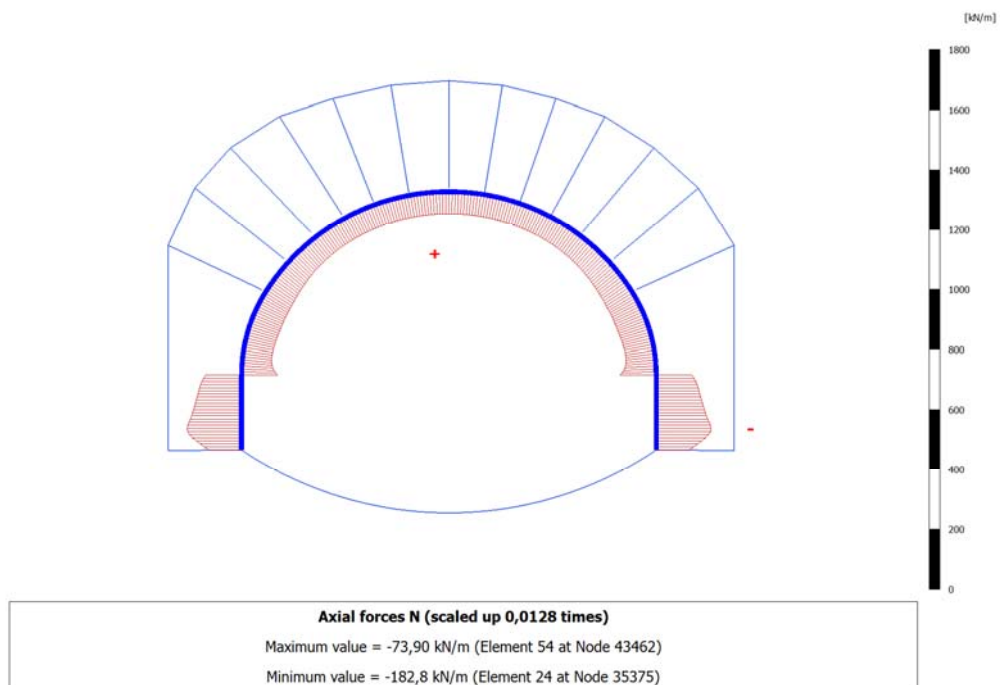


Figura 81 – Sollecitazioni di sforzo normale agenti sul rivestimento preliminare

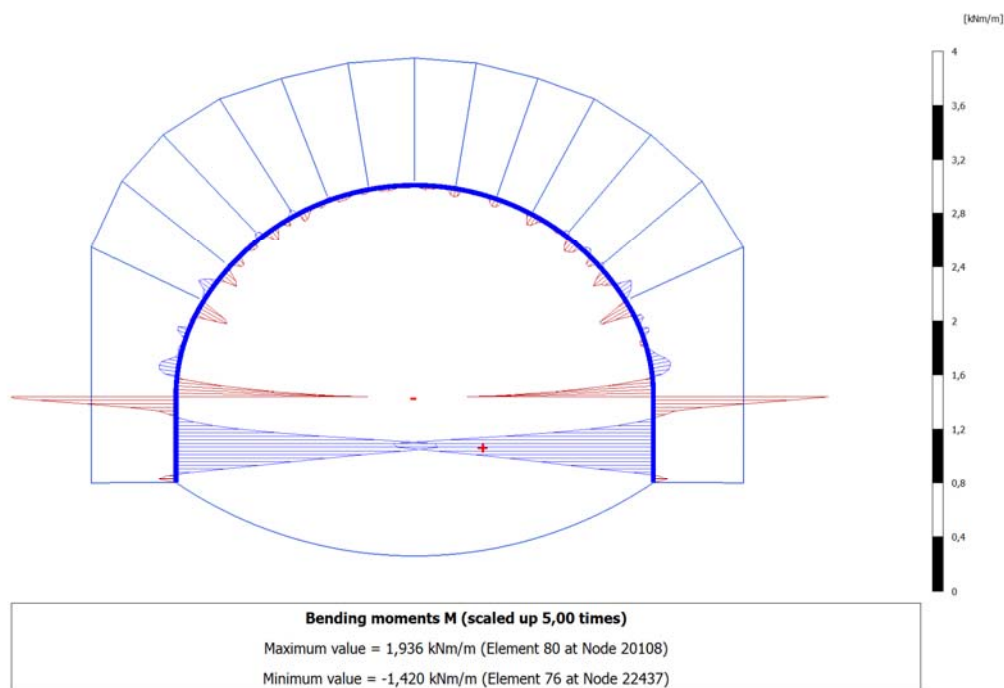


Figura 82 - Sollecitazioni di momento flettente agenti sul rivestimento preliminare

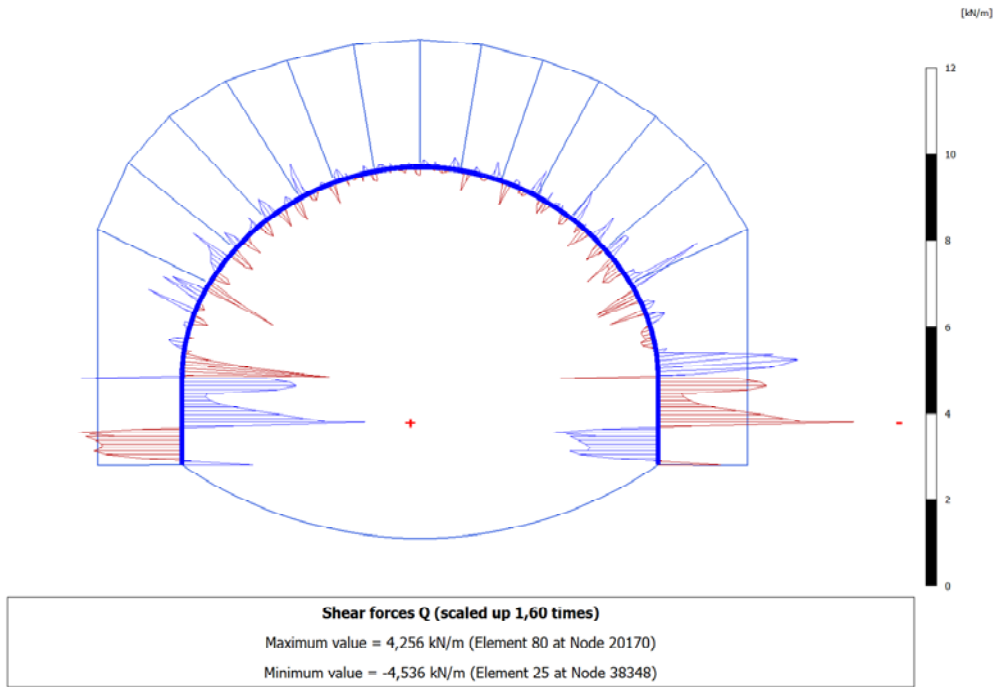


Figura 83 - Sollecitazioni di taglio agenti sul rivestimento preliminare

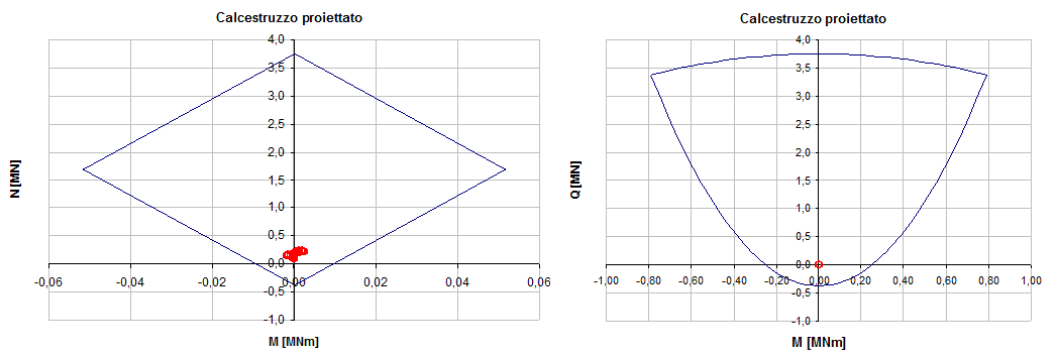


Figura 84 – Diagrammi di interazione per il guscio di spritz beton

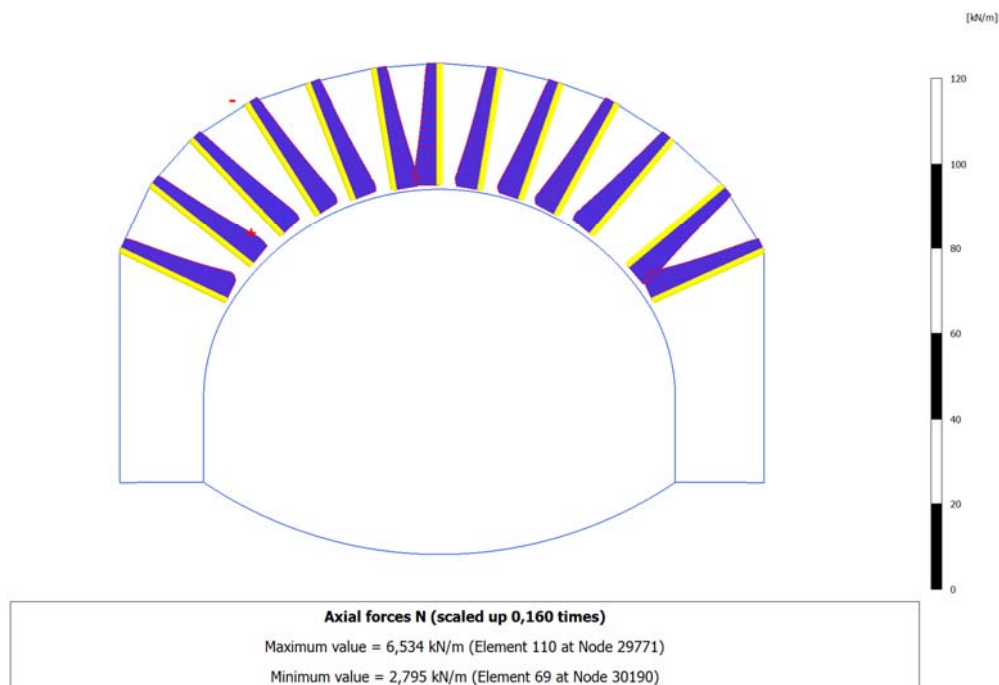


Figura 85 – Sollecitazioni assiali agenti nei chiodi

La verifica a sfilamento e snervamento dei chiodi è presentata nella seguente Tabella 11. La sollecitazione a cui si fa riferimento è la massima azione assiale agente sui chiodi, opportunamente incrementata di un fattore 1.3. Come si può osservare, la trazione indotta nell'acciaio è molto ridotta, il fattore di sicurezza allo sfilamento è di conseguenza piuttosto elevato.

<i>Tabella 11 – Verifica di sfilamento dei chiodi Swellex</i>		
L chiodi	4,5	m
Larghezza fascia plastica	2	m
L attiva chiodi	2,5	m
Diametro chiodo	52	mm
Aderenza laterale	150	kPa
Interasse longitudinale	1,25	m
F max/1 m	6,5	kN
F max sul chiodo	10,6	kN
Sigma max trazione	5	MPa
FS sfilamento	6	-

13.3.3. Sollecitazioni agenti sul rivestimento definitivo

Nelle figure seguenti si propongono le distribuzioni delle sollecitazioni agenti sui rivestimenti definitivi.

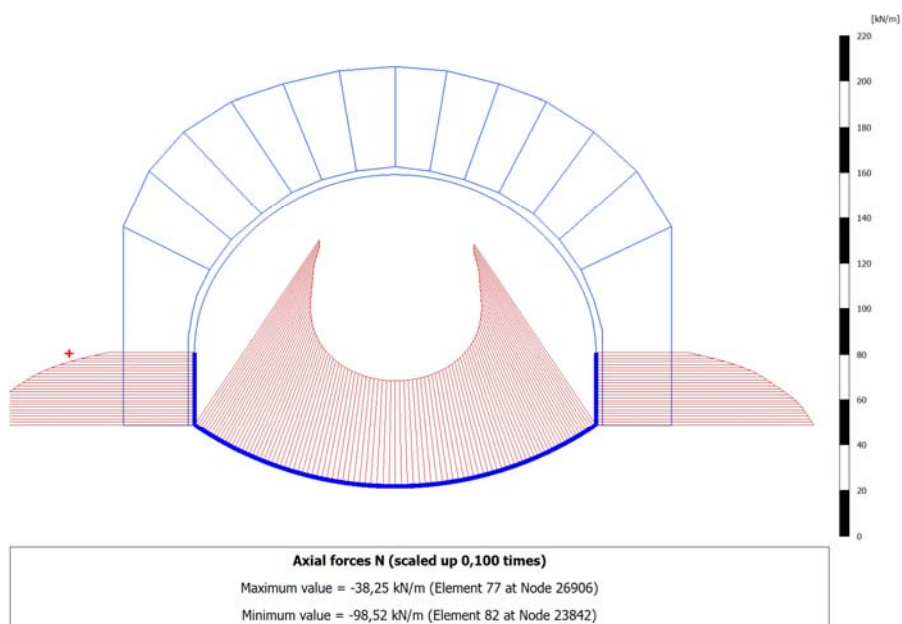


Figura 86 – Sollecitazioni di sforzo normale agenti su murette e arco rovescio

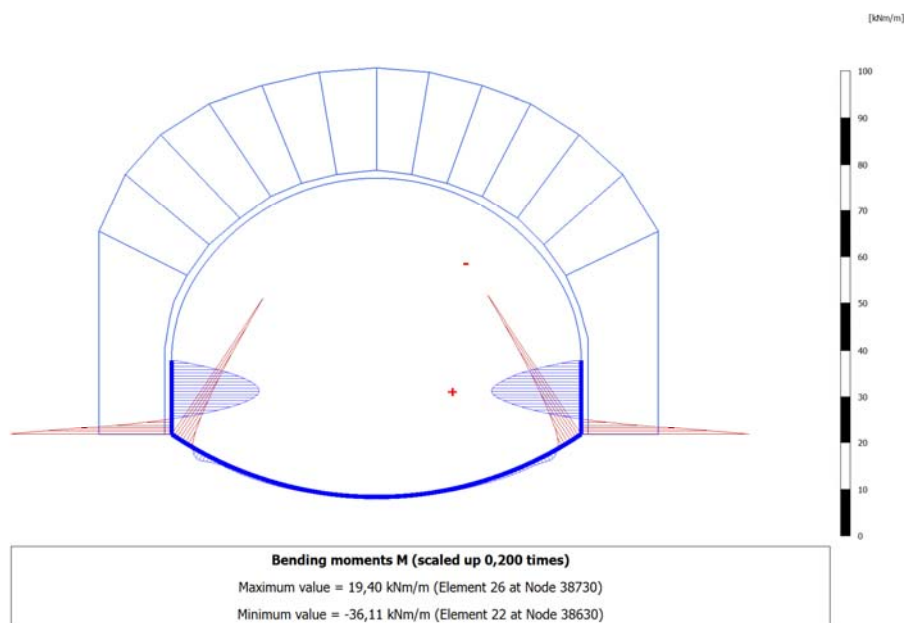


Figura 87 - Sollecitazioni di momento flettente agenti su murette e arco rovescio

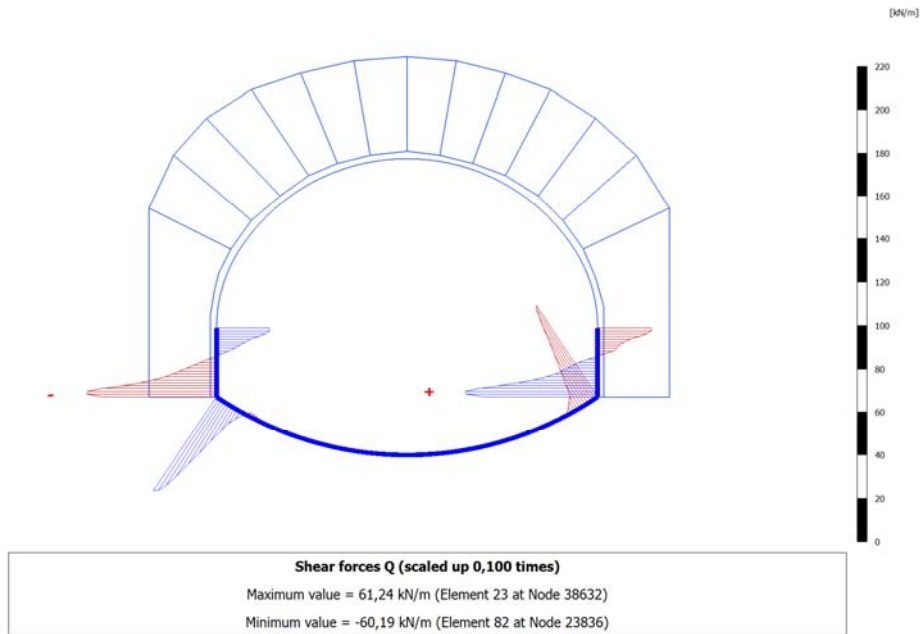


Figura 88 - Sollecitazioni di taglio agenti su murette e arco rovescio

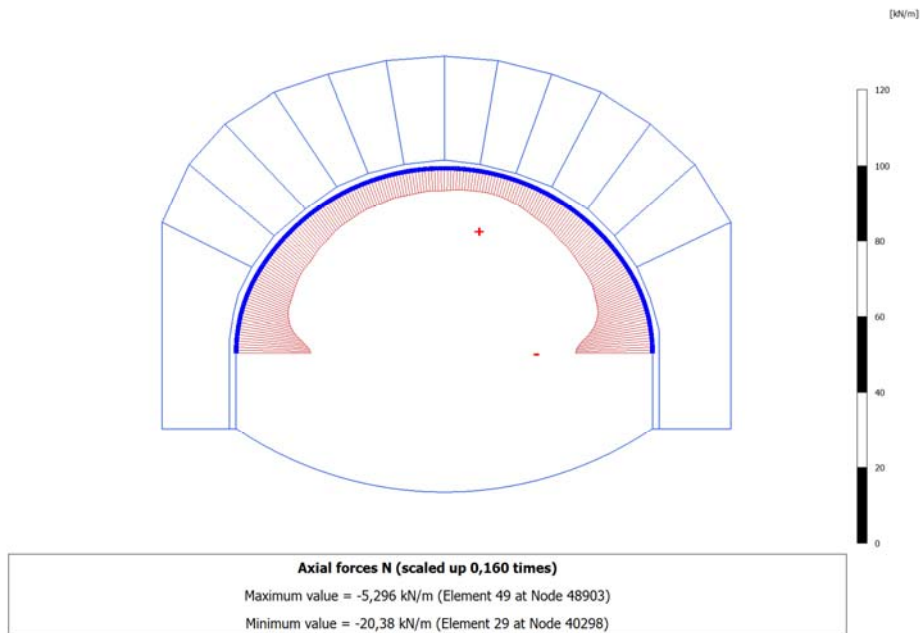


Figura 89 - Sollecitazioni di sforzo normale agenti in calotta

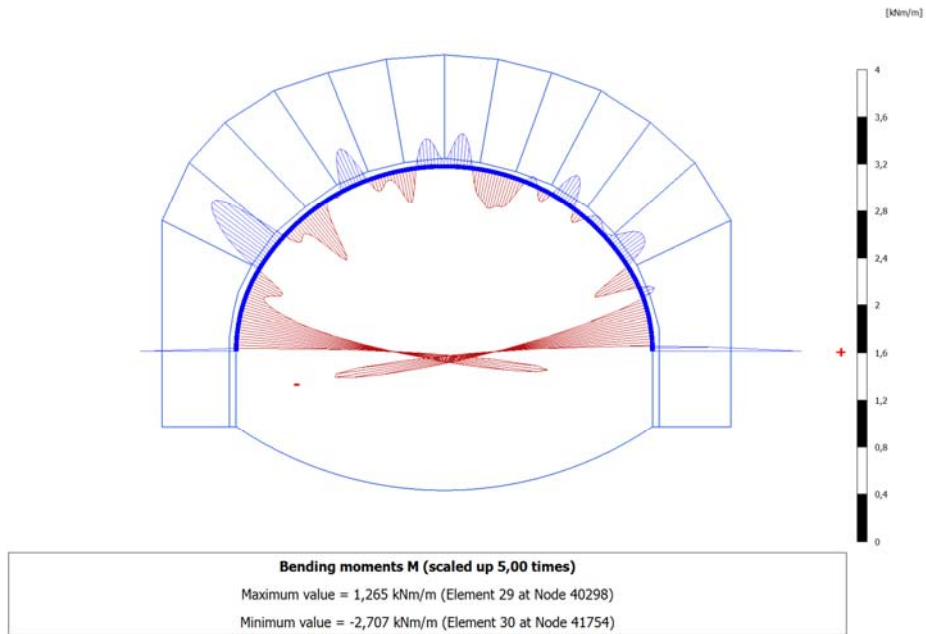


Figura 90 - Sollecitazioni di momento flettente agenti in calotta

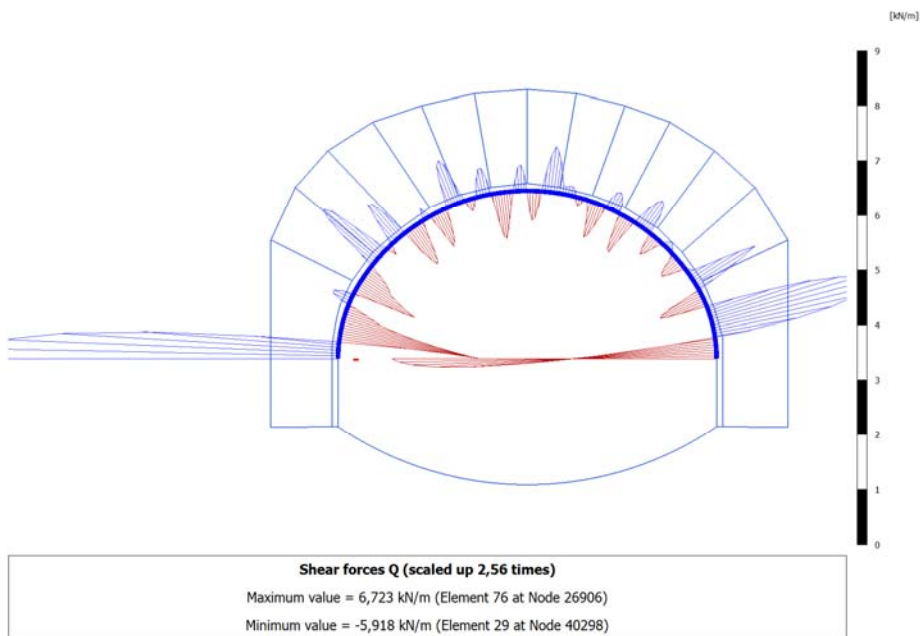


Figura 91 - Sollecitazioni di taglio agenti in calotta

13.3.4. Verifiche strutturali del rivestimento definitivo

Di seguito si presentano le verifiche strutturali realizzate per la Galleria Occhipinti, nella sezione alla progressiva 4+100 km, sezione Ab.

In corrispondenza di questa sezione, caratterizzata da una copertura medio-massima, si sono analizzate con metodi numerici ed empirici due diverse sezioni tipo di sostegno, la sezione Ab e la sezione Ac. Per ciascuna di queste si è realizzata dapprima un'analisi che cautelativamente associa tutti i carichi dovuti al detensionamento della massa rocciosa ai prerivestimenti, e successivamente una seconda analisi in cui si realizza anche la posa in opera dei rivestimenti definitivi.


Le verifiche strutturali sono state realizzate a partire dalle sollecitazioni di momento flettente M , sforzo assiale N e taglio Q valutate mediante l'analisi agli elementi finiti, a detensionamento avvenuto. L'approccio normativo adottato è
Nella tabella seguente si elencano le massime sollecitazioni agenti sulle diverse porzioni del rivestimento definitivo:

<i>Tabella 12 – Sollecitazioni agenti nel rivestimento definitivo, sezione Ab</i>			
Sollecitazioni agenti sul rivestimento, derivanti da analisi Plaxis			
	N [kN/m]	M [kNm/m]	Q [kN/m]
Calotta	-20	3	7
Arco rovescio	-50	3	10
Muretta	-99	36	61

Si sottolinea che la verifica di ciascuna sezione è stata realizzata non considerando lo spessore medio del rivestimento, implementato nel codice di calcolo per la modellazione dei diversi elementi piani costituenti il definitivo, ma definendo lo spessore del rivestimento in corrispondenza della sezione più sollecitata a partire dalla geometria propria della sezione tipo di sostegno.

Nella successiva Tabella 13 sono riassunti i risultati delle verifiche strutturali eseguite per la sezione più sollecitata di calotta, arco rovescio e muretta. La terminologia adottata per indicare le grandezze considerate è la seguente:

b	base della sezione
h	altezza della sezione
N_{max}	massima azione di compressione
M_{max}	massimo momento flettente
V_{max}	massima azione di taglio

 TECNOFERRAL	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 116
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

x	distanza dell'asse neutro dal lembo compresso
$\sigma_{c,max}$	massimo sforzo di compressione
$0,25 \cdot f_{ck}$	sforzo di compressione limite
$F_{s,\sigma}$	fattore di sicurezza nei confronti degli sforzi di compressione
A^*	area della sezione parzializzata
$\tau_{c,max}$	massimo sforzo di taglio
$0,21 \cdot f_{ctk}$	sforzo di taglio limite
$F_{s,\tau}$	fattore di sicurezza nei confronti degli sforzi di taglio

Il fattore di sicurezza è inteso come rapporto tra il massimo sforzo agente nella sezione e il corrispondente valore limite. Come si nota dai valori riportati nelle tabelle, i valori di F_s sono tutti minori dell'unità. La verifica è dunque rispettata per tutte le sezioni considerate in assenza di armatura.

In Figura 92, Figura 93, Figura 94 si riporta altresì la distribuzione degli sforzi normali agenti sulle sezioni considerate per effetto della corrispondente sollecitazione di presso-flessione.

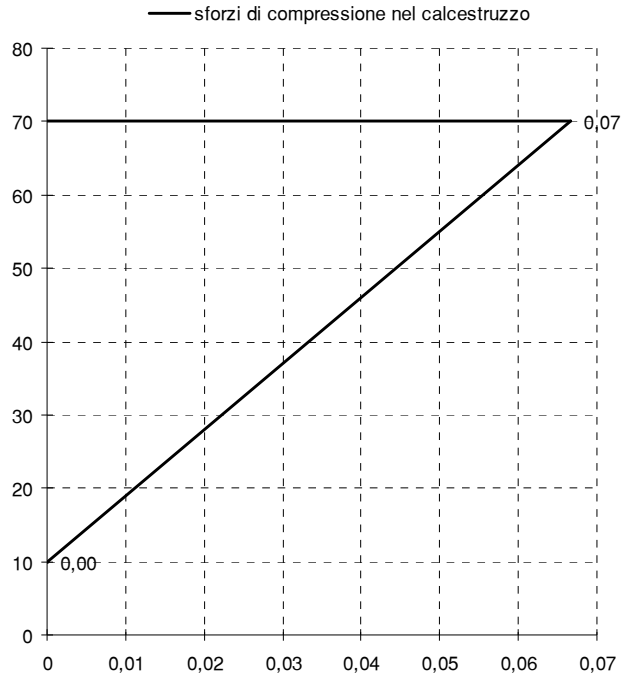


Figura 92 – Compressione nel calcestruzzo, calotta

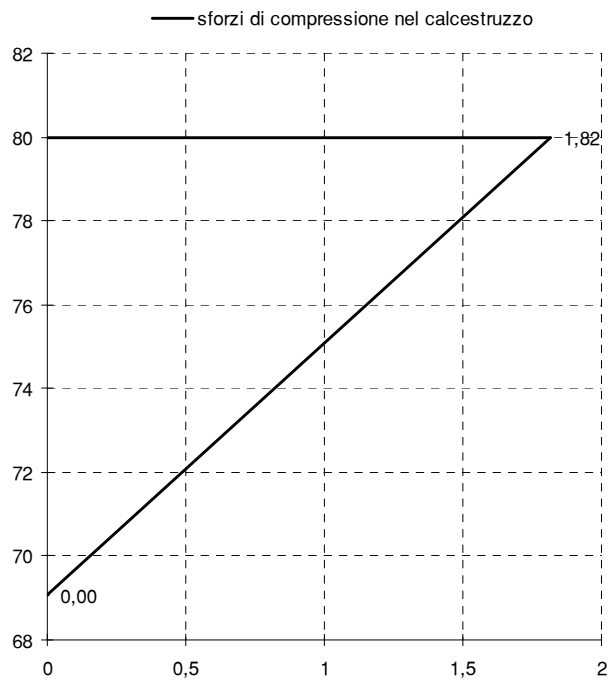


Figura 93 – Compressione nel calcestruzzo, muretta

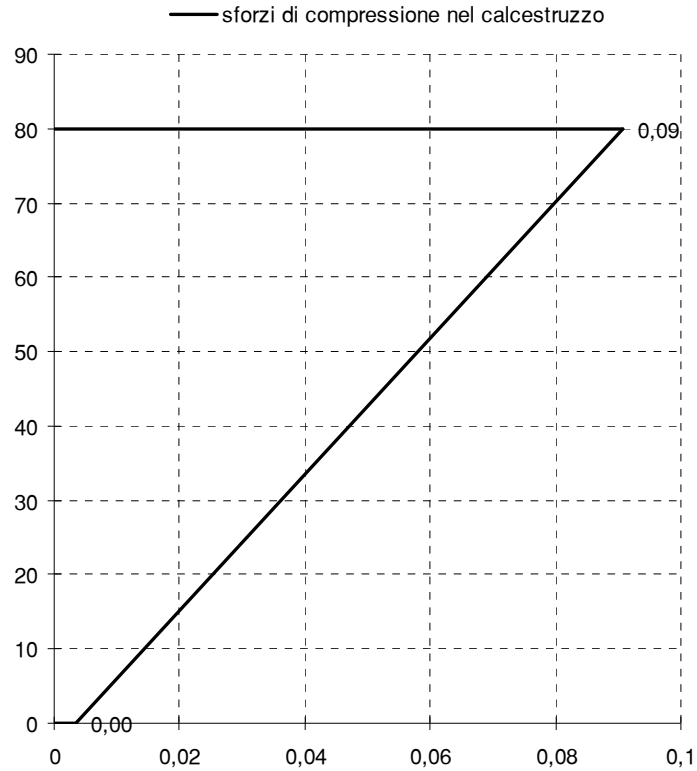


Figura 94 – Compressione nel calcestruzzo, arco rovescio

Tabella 13 – Verifiche strutturali per la sezione Ab alla progr. 4+100 km

Elemento strutturale	b	h	N _{max}	M _{max}	V _{max}	x	σ _{c,max}	0,25·f _{ck}	F _{s,σ}	A*	τ _{c,max}	0,21·f _{ctk}	F _{s,τ}
	cm	cm	kN	kNm	kN	cm	MPa	MPa		cm ²	MPa	MPa	
Calotta	100	70	20	3	7,0	60,0	0,07	7,3	0,0	6000	0,02	0,42	0,0
Muretta	100	120	99	36	61	70,9	0,28	7,3	0,0	7090	0,13	0,42	0,3
Arco rovescio	100	80	50	3	10	128,9	0,09	7,3	0,0	8000	0,02	0,42	0,0


13.3.5. Analisi sismica del rivestimento definitivo

L'analisi sismica del rivestimento definitivo per la sezione in esame è stata realizzata considerando una categoria di suolo di tipo A, a cui corrisponde un'accelerazione orizzontale su suolo rigido ag pari a 0.262 g.

METODO DI PROPAGAZIONE DELLE ONDE		
INPUT		
Eg (modulo elastico terreno)	3500000	kPa
ν_g (poisson terreno)	0,2	
EI (modulo elastico lining)	25000000	kPa
ν_l (poisson lining)	0,15	
R (raggio esterno galleria)	7,5	m
t (spessore lining)	0,75	m
V/A table 2	140	
cs (velocità onde di taglio)	1500	m/s
As (peak ground acceleration) normativa	0,262	g
Spost/acc (ampiezza spostamento) con table 3	99	
C (coefficiente di profondità) table 4	0,7	
cp (velocità onde di compressione)	3000	m/s
Ap peak acceleration onde P	0,262	g
H (spessore deposito dal bedrock)	5	m
γ (peso di volume terreno)	23	kN/m ³
Φ inclinazione onda S	45	°
Φ inclinazione onda P	0	°
CALCOLI		
Ic (momento inerzia trasv)	3,338313705	m4
Ag (sezione trasv)	33,57577149	m2
Vs peak particle velocity	0,001834	m/s
Vp (peak particle velocity)	0,3668	m/s
T periodo	0,013333333	s
L lunghezza d'onda	20	m
Gm modulo di taglio	5275229,358	kPa
Ka Kt (molle)	68701050,36	kN/m
A1 (ampiezza spostamento) caso flessionale	4,09207E-06	m
A2 (ampiezza spostamento) caso assiale	1,94593E-06	m
A (ampiezza spostamento con table 3)	0,25938	m
F	228,1	flessibile

Figura 95 – Dati di ingresso dell'analisi sismica dei rivestimenti

In Figura 95 è stata realizzata la prima parte del calcolo sismico, che consente di definire il grado di flessibilità del rivestimento in relazione alle caratteristiche geometriche e di resistenza che lo caratterizzano, e a quelle del materiale circostante. Nel caso in esame i calcoli hanno evidenziato un rivestimento di tipo flessibile: i calcoli della sollecitazione sismica sul rivestimento definitivo verranno

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 120
	Pr	Strada			Lotto		Macro opera		Opera			Parte di opera		Tipo elab	N. Elab.		Rev						

di conseguenza realizzati mediante un approccio Free Field, senza considerare cioè l'interazione fra rivestimento e terreno circostante.

Si considerano tre diverse modalità di deformazione sismica:

- Deformazione assiale, dovuta ad un'onda sismica agente in direzione parallela all'asse galleria;
- Deformazione longitudinale, connessa d un moto perpendicolare all'asse;
- Ovaling, dovuta ad un'onda di tagli perpendicolare all'asse.

In Figura 96 e Figura 97 sono illustrati i risultati del calcolo sismico, considerando due diverse configurazioni di sollecitazione sismica:

- onde P con angolo di deviazione 0/90° dall'asse galleria, 45° di deviazione per le onde S;
- onde P con angolo di deviazione 45° dall'asse galleria, 0° di deviazione per le onde S;

Per ragioni trigonometriche a queste due configurazioni corrispondono le massime sollecitazioni sul rivestimento, nelle tre tipologie di deformazione considerate.

In entrambi i casi si osserva come la sollecitazione sismica non determini un notevole incremento degli sforzi nel calcestruzzo. Per la deformazione assiale e longitudinale, le tensioni assiali risultano sempre inferiori ai 3 MPa, quelle flettenti sono del tutto trascurabili. Nel caso dell'ovaling, la massima tensione assiale è dell'ordine di 0.3 MPa. Le deformazioni indotte sul rivestimento dal movimento vibratorio risultano accettabili.

FREE FIELD senza interazione				
def assiale e flessionale			ovaling	
	DEF LONG	DEF NORMALE	DEF FLESS	DEF DI TAGLIO
ONDE P	0,0001222667	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
ONDE S	0,0000006113	0,0000006113	0,0000028776	0,0000003057
	σ kPa assiale	σ kPa assiale	σ kPa fless	σ kPa assiale
ONDE P	3056,666667	0	0	0
ONDE S	15,28333333	15,28333333	71,93954132	0,98319316
ϵ max onda S	0,000003 < ϵ amm			
ϵ max onda P	0,000122 < ϵ amm			

Figura 96 – Risultati dell’analisi nel caso di angolo di deviazione dall’asse della galleria pari a 0/90° per le onde P, 45 ° per le onde S

FREE FIELD senza interazione				
def assiale e flessionale				ovaling
	DEF LONG	DEF NORMALE	DEF FLESS	DEF DI TAGLIO
ONDE P	0,0000611333	0,0000611333	0,000007194	0,0000305667
ONDE S	0,0000000000	0,0000000000	0,0000081390	0,0000006113
	σ kPa assiale	σ kPa assiale	σ kPa fless	σ kPa assiale
ONDE P	1528,333333	1528,333333	17,98488533	262,1848427
ONDE S	0	0	203,47575	1,966386321
ϵ max onda S	0,000008	< ϵ amm		
ϵ max onda P	0,000062	< ϵ amm		

Figura 97 - Risultati dell’analisi nel caso di angolo di deviazione dall’asse della galleria pari a 45° per le onde P, 0 ° per le onde S

13.4. Sezione alla progressiva 2+915 km

Copertura 16 m da livelletta

Spessore del setto di terreno tra il piedritto ed il profilo di scavo della trincea = circa 20 m.

Per i parametri geotecnici relativi alla sezione in esame si rimanda al capitolo 11.3.

La sezione interessa per l’intera sagoma di scavo i calcari della Formazione Ragusa.

Il presente paragrafo fa riferimento all’analisi di stabilità realizzata ipotizzando la messa in opera della sezione tipo B0V in corrispondenza di una sezione dell’imbocco Est della Galleria Occhipinti, direzione Siracusa.

Per i calcoli di stabilità si sono adottate le seguenti percentuali di detensionamento, che fanno riferimento alla curva di Panet-Guenot per una galleria non sostenuta. Si sottolinea che la percentuale di scarico al fronte è stata assunta pari a quella di una roccia a comportamento elastico, vista la presenza di un prerivestimento di tubi metallici disposti lungo un arco di 150° al contorno di scavo.


Sezione tipo B0V	
Sequenza di calcolo	Detensionamento
Fase 1 - Fronte	30 %
Fase 2 - Avanzamento	50 %
Fase 3 - Posa rivestimenti preliminari	70 %
Fase 4 - Getto arco rovescio e murette	90 %

Fase 5 - Completamento rivestimento definitivo	100 %
--	-------

Nel caso dell'analisi in presenza del solo rivestimento di prima fase, l'analisi si ferma alla Fase 3, per applicare poi l'intero detensionamento al rivestimento provvisorio.

Si presentano ora le caratteristiche dei sostegni preliminari e definitivi previsti per la sezione B0V. L'avanzamento previsto è pari a 1 m.

<i>Tabella 15 - Caratteristiche dei rivestimenti previsti per la sezione in esame</i>		
Sezione B0V		
Rivestimento preliminare	Centine	2 IPN 200 / 1 m
	A	66.8 cm ²
	J	4280 cm ⁴
	w	52.4 kg/m
	Spritz, spessore	25 cm
	Sostegno equivalente	
	E eq	34200 MPa
	spessore eq	25 cm
Rivestimento definitivo	Arco rovescio	
	spessore	0.9 m
	EA	2.7 e7 kN/m
	EJ	1820000 kNm ² /m
	Calotta	
	spessore medio	1 m
	EA	3 e7 kN/m
	EJ	2500000 kNm ² /m
	Muretta	
	spessore	1 m
	EA	3 e7 kN/m
EJ	2500000 kNm ² /m	

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 123
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera			Parte di opera		Tipo elab	N. Elab.		Rev							

13.4.1. Analisi di stabilità con il metodo agli elementi finiti

L'analisi Plaxis è stata realizzata con un modello bidimensionale considerando entrambe le carreggiate autostradali, di cui una - pista per Gela - in galleria naturale, e l'altra - pista per Siracusa - in trincea.

L'analisi viene realizzata considerando la preesistenza della trincea lato Siracusa, e l'avanzamento della galleria naturale nella pista per Gela. La particolarità della geometria analizzata sta nella presenza di una scarsa copertura della galleria nella pista lato Gela, come visibile in Figura 98.

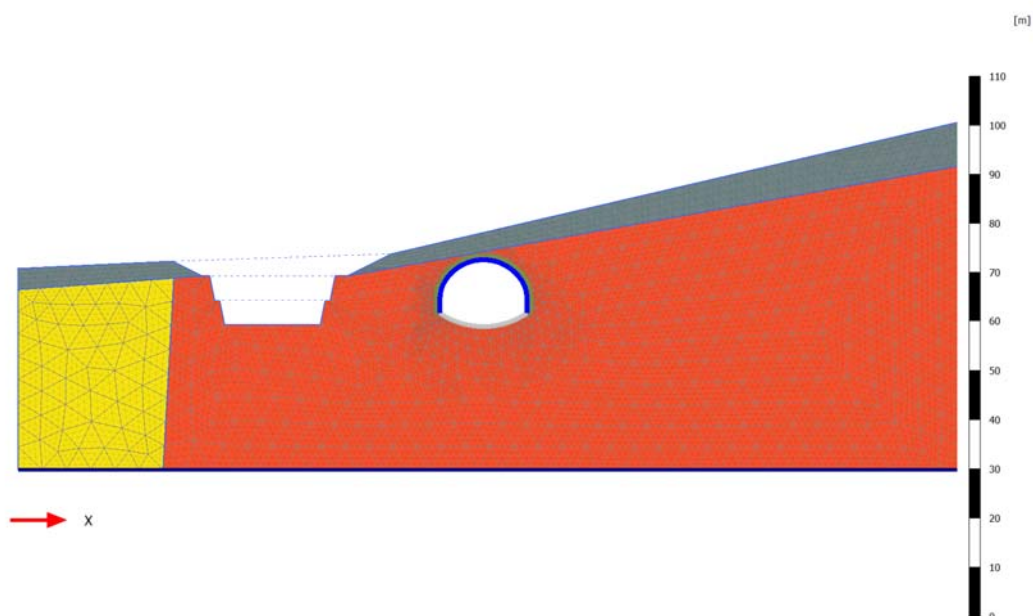


Figura 98 – Geometria del modello di analisi agli elementi finiti

Nelle pagine seguenti si riportano i risultati dell'analisi Plaxis. I risultati proposti fanno riferimento all'ipotesi cautelativa in cui l'intero detensionamento venga assorbito dai rivestimenti di prima fase.

Le Figura 99 e Figura 100 riportano la distribuzione degli spostamenti radiali al contorno di scavo e la distribuzione delle zone plasticizzate al termine del detensionamento: si osserva che i calcari presentano una buona capacità di autosostegno, con spostamenti millimetrici ed una plasticizzazione corticale e limitata al piedritti destro. Non si osserva alcuna interazione fra la galleria naturale lungo la pista per Gela e la trincea corrispondente alla pista per Siracusa.

In Figura 101 si riportano le direzioni delle tensioni principali al contorno della cavità, che descrivono l'effetto arco che si viene a creare nell'ammasso roccioso al contorno del cavo una volta realizzato lo scavo.

La Figura 102 illustra l'evoluzione degli spostamenti verticali in calotta all'aumentare del detensionamento, ovvero all'aumentare della distanza fra il fronte di scavo e la sezione di calcolo. Si osserva come gli spostamenti siano molto limitati, grazie alla presenza di rivestimenti rigidi.

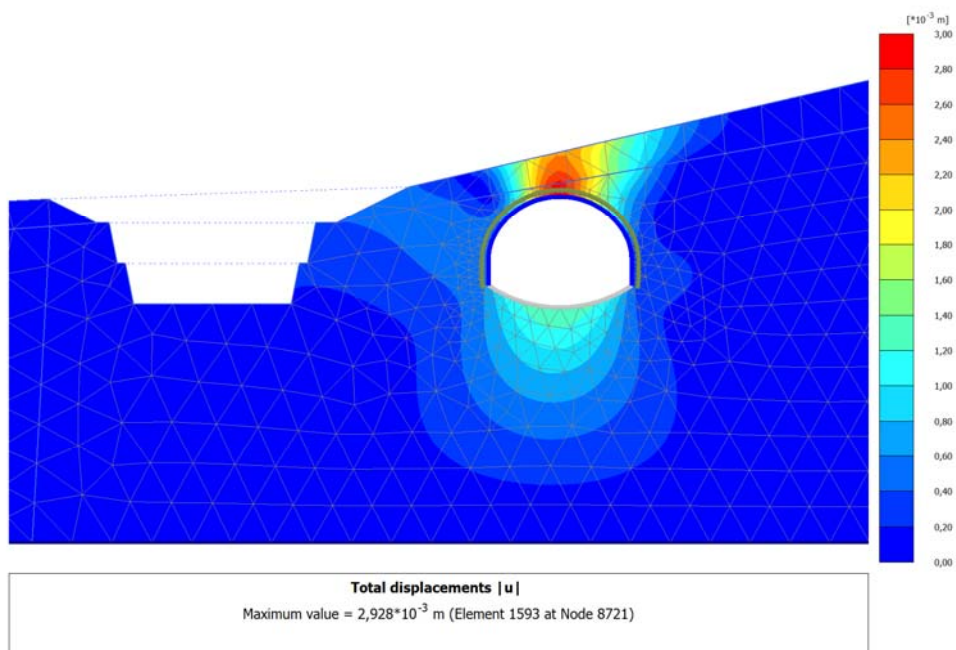


Figura 99 – Spostamenti radiali al contorno del cavo

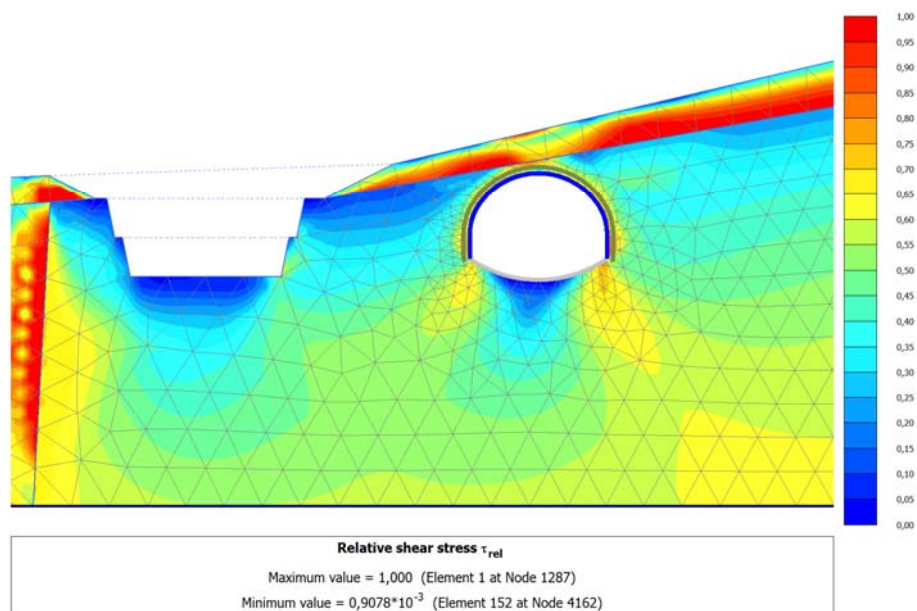


Figura 100 – Zone plasticizzate al contorno del cavo

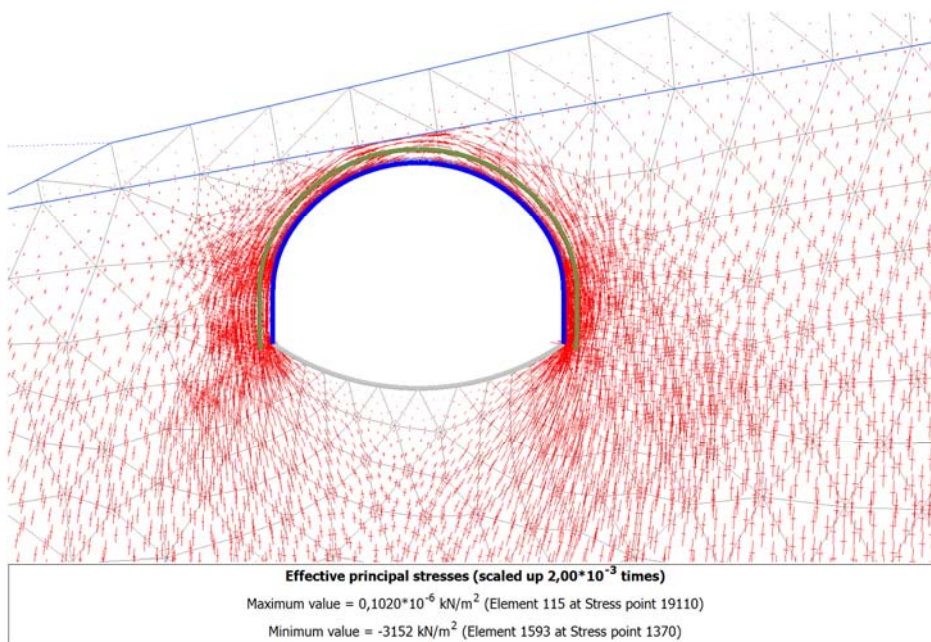


Figura 101 – Distribuzione delle tensioni principali al contorno del cavo

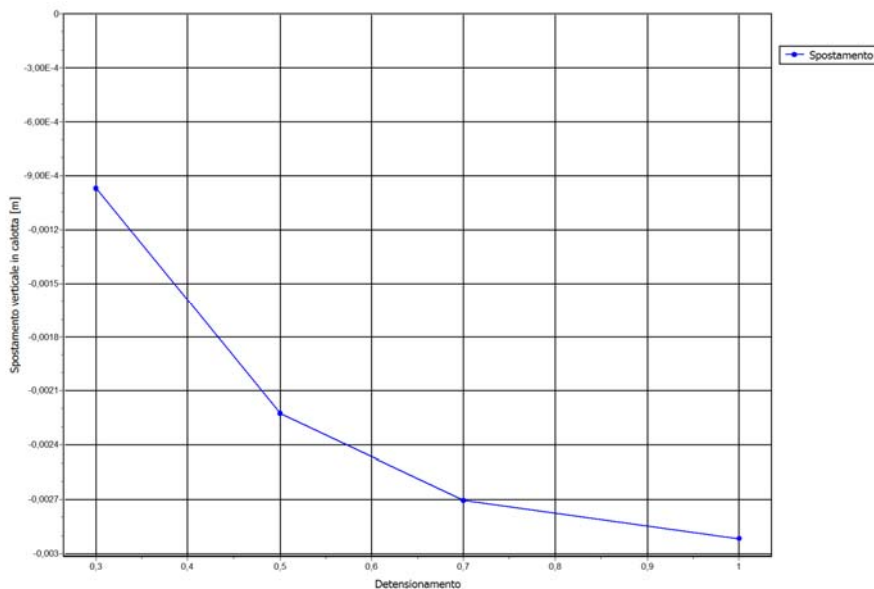


Figura 102 – Spostamenti verticali in calotta

13.4.2. Verifiche strutturali del rivestimento preliminare

Nelle figure seguenti si propongono le distribuzioni delle sollecitazioni agenti sui rivestimenti di prima fase, alla fine del detensionamento.

In Figura 103, Figura 104, Figura 105 e Figura 106 si riportano le sollecitazioni agenti sui prerivestimenti, nell'ipotesi cautelativa in cui l'intero detensionamento venga assorbito dall'accoppiamento centine-spritz beton, ed i relativi diagrammi di interazione. Tali diagrammi sono stati ottenuti incrementando le sollecitazioni di un fattore 1.3, come descritto nelle NTC per l'approccio A1+M1, e distribuendo le sollecitazioni su centine e spritz beton in relazione alle relative rigidezze.

Tutte le sollecitazioni risultano abbondantemente entro i limiti di resistenza dei materiali.

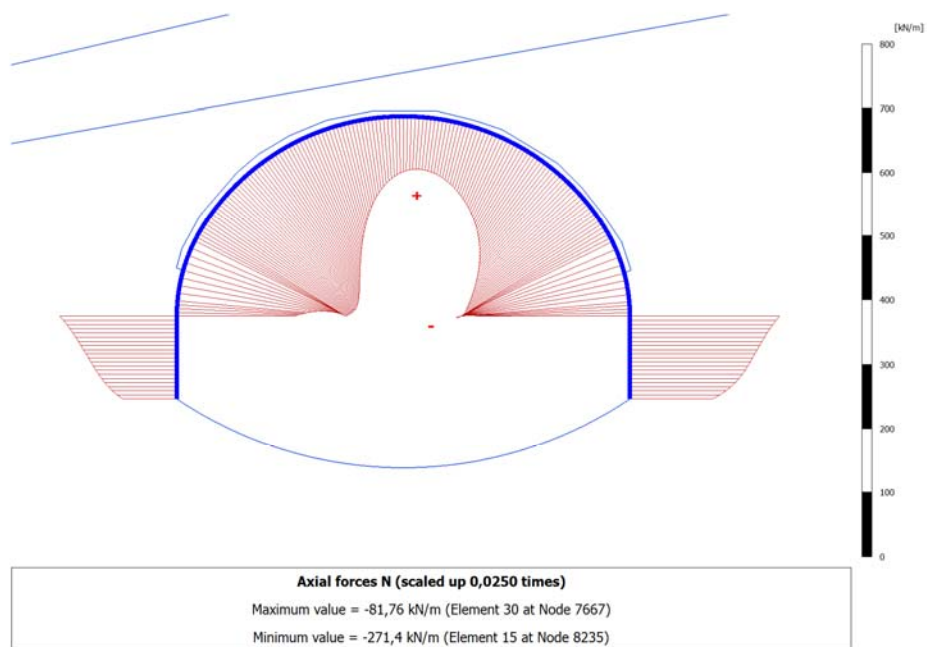


Figura 103 - Sollecitazioni di sforzo normale agenti sul rivestimento preliminare

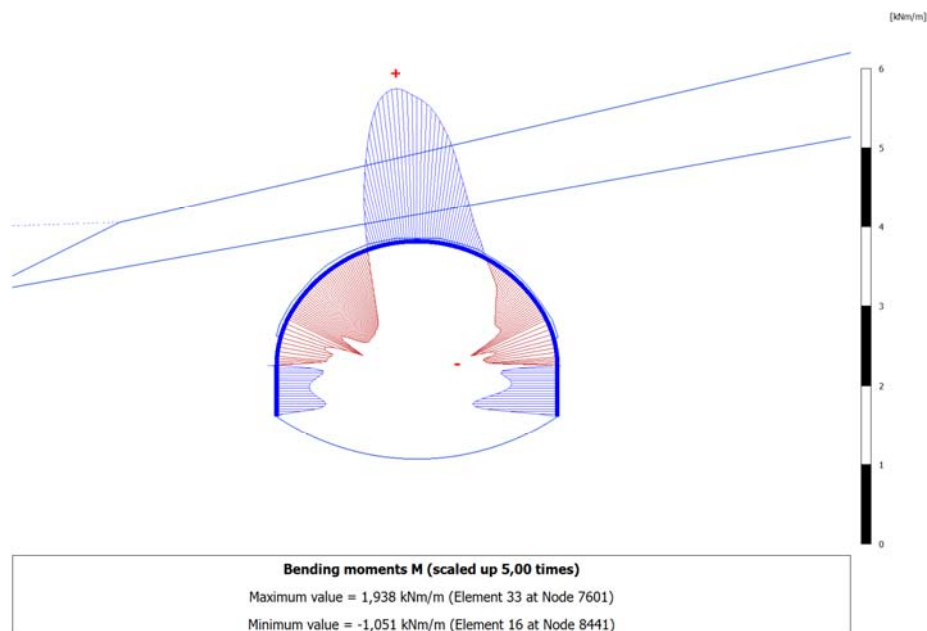


Figura 104 - Sollecitazioni di momento flettente agenti sul rivestimento preliminare

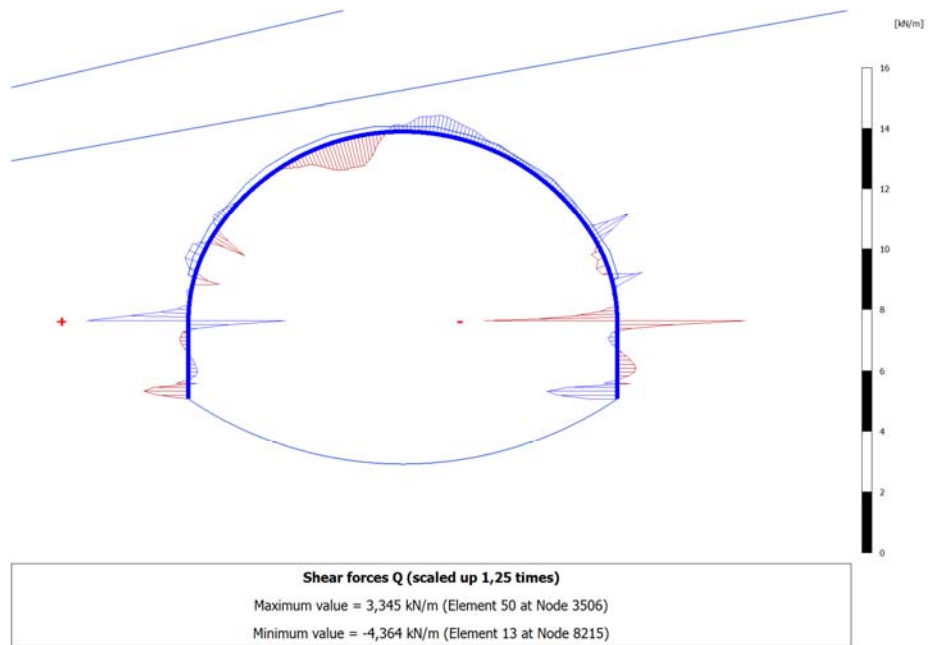


Figura 105 – Sollecitazioni di taglio agenti sul rivestimento preliminare

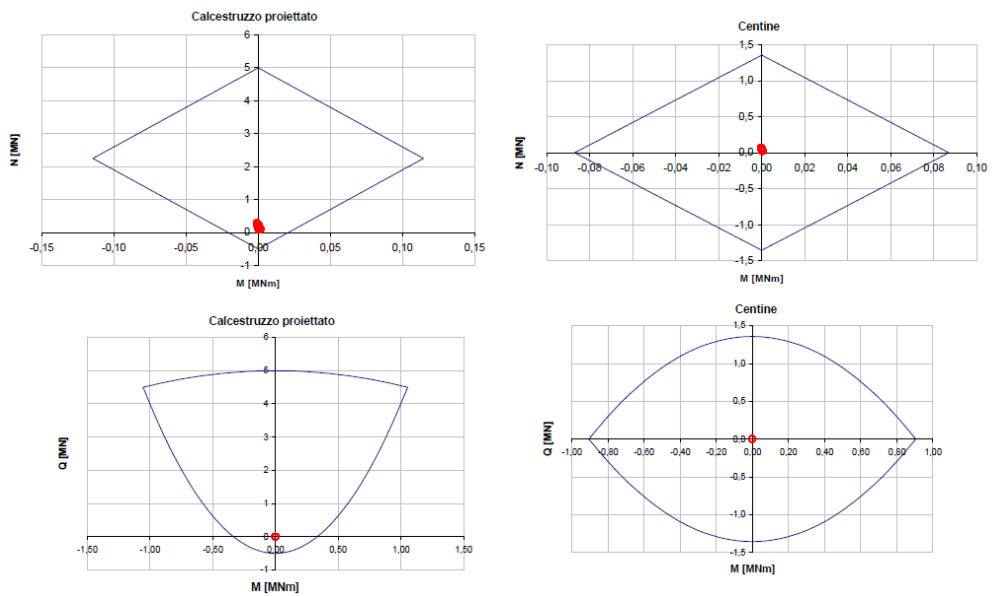


Figura 106 – Diagrammi di interazione del rivestimento preliminare

13.4.3. Sollecitazioni agenti sul rivestimento definitivo

Nelle figure seguenti si propongono le distribuzioni delle sollecitazioni agenti sui rivestimenti definitivi, alla fine del detensionamento.

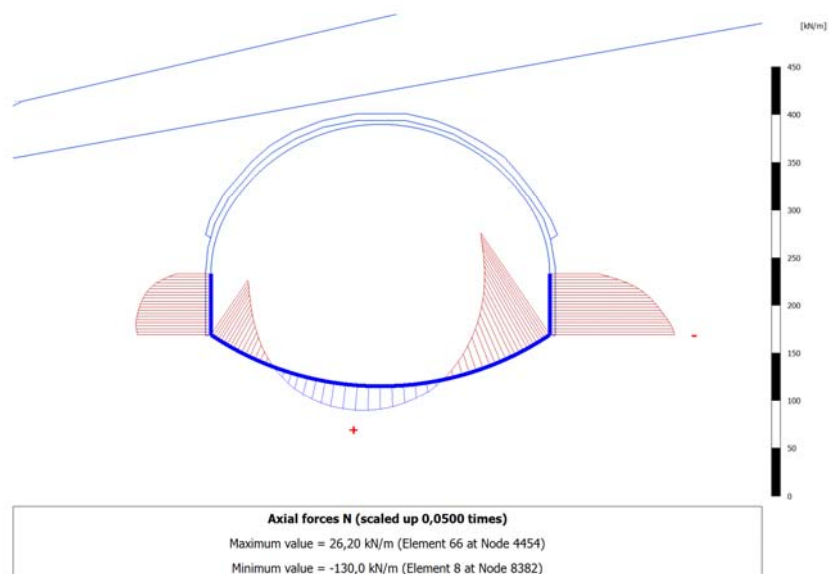


Figura 107 - Sollecitazioni di sforzo normale agenti su murette e arco rovescio

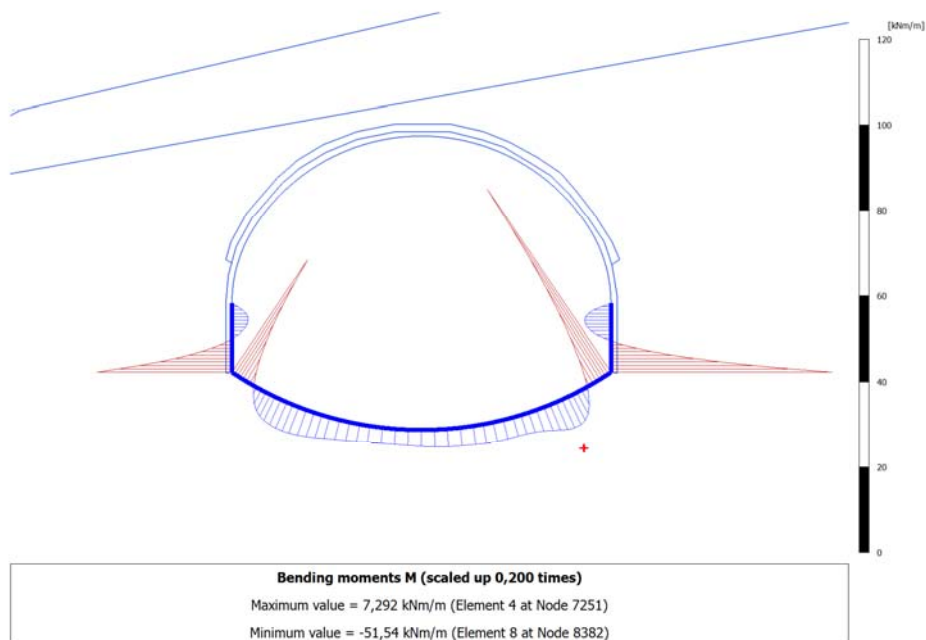


Figura 108 - Sollecitazioni di momento flettente agenti su murette e arco rovescio

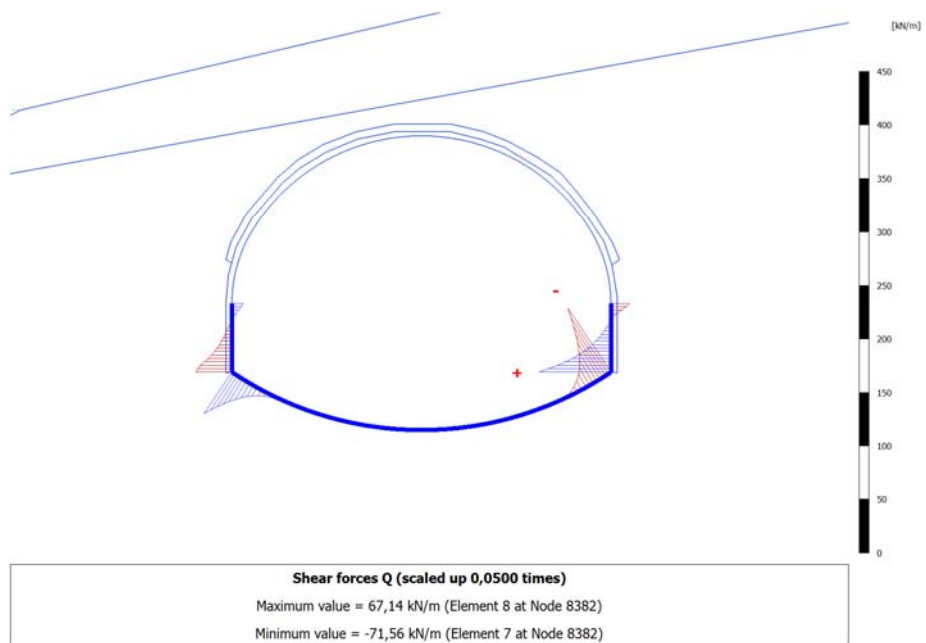


Figura 109 - Sollecitazioni di taglio agenti su murette e arco rovescio

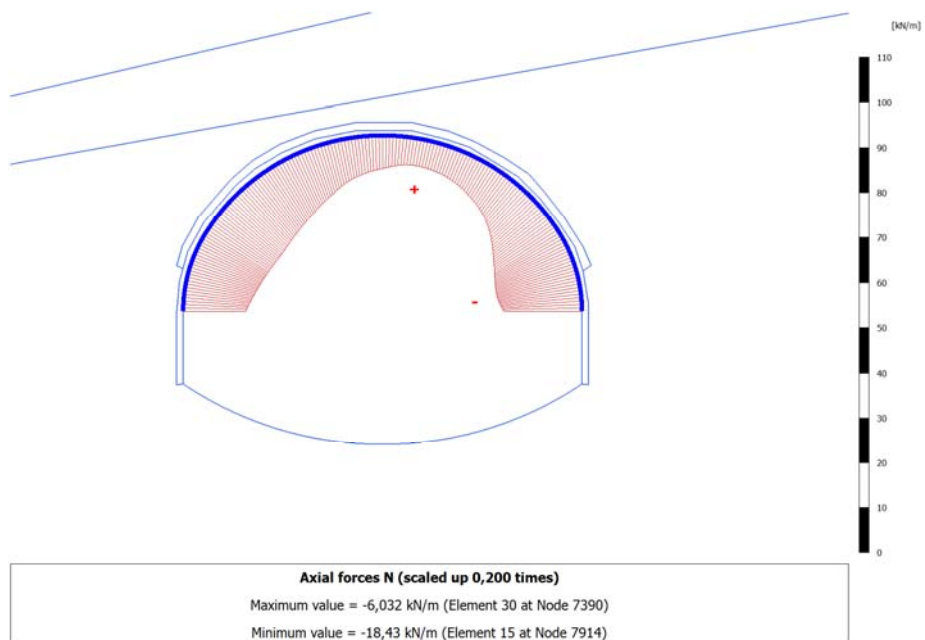


Figura 110 - Sollecitazioni di sforzo normale agenti in calotta

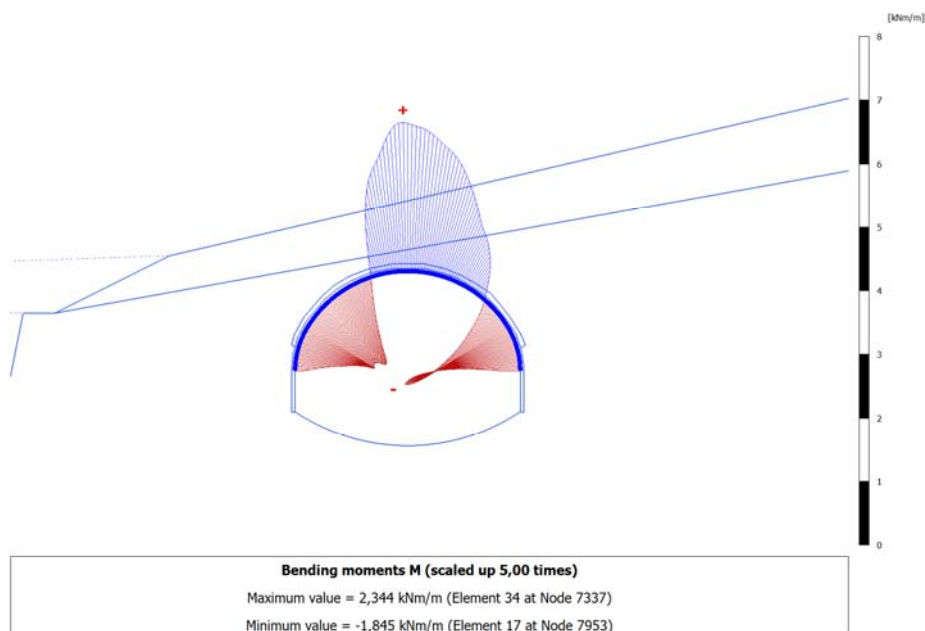


Figura 111 - Sollecitazioni di momento flettente agenti in calotta

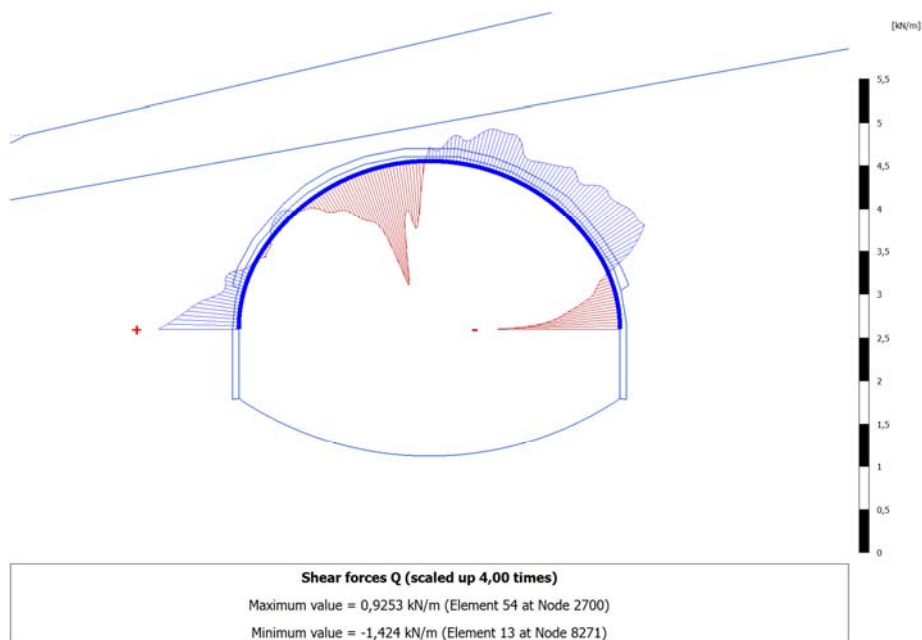


Figura 112 - Sollecitazioni di taglio agenti in calotta

13.4.4. Verifiche strutturali del rivestimento definitivo


Di seguito si presentano le verifiche strutturali realizzate per la Galleria Occhipinti, in corrispondenza della sezione 2+915 km dell'imbocco Est.

In corrispondenza di questa sezione si è analizzata con metodi numerici ed empirici la sezione tipo B0V.

Le verifiche strutturali sono state realizzate a partire dalle sollecitazioni di momento flettente M, sforzo assiale N e taglio Q valutate mediante l'analisi agli elementi finiti, a detensionamento avvenuto.

Nella tabella seguente si elencano le massime sollecitazioni agenti sulle diverse porzioni del rivestimento definitivo:

<i>Tabella 16 – Sollecitazioni agenti nel rivestimento definitivo</i>			
Sollecitazioni agenti sul rivestimento, derivanti da analisi Plaxis			
	N [kN/m]	M [kNm/m]	Q [kN/m]
Calotta	-18	2.5	1.5
Arco rovescio	-130/+26	10	94
Muretta	-130	52	72

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 133
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

Si sottolinea che la verifica di ciascuna sezione è stata realizzata non considerando lo spessore medio del rivestimento, implementato nel codice di calcolo per la modellazione dei diversi elementi piani costituenti il definitivo, ma definendo a partire dalla geometria propria della sezione tipo di sostegno lo spessore del rivestimento in corrispondenza della sezione più sollecitata.

Nella successiva Tabella 17 sono riassunti i risultati delle verifiche strutturali eseguite per la sezione più sollecitata di calotta, arco rovescio e muretta, in assenza di armatura. La terminologia adottata per indicare le grandezze considerate è la seguente:

b	base della sezione
h	altezza della sezione
N_{max}	massima azione di compressione
M_{max}	massimo momento flettente
V_{max}	massima azione di taglio
x	distanza dell'asse neutro dal lembo compresso
$\sigma_{c,max}$	massimo sforzo di compressione
$0,25 \cdot f_{ck}$	sforzo di compressione limite
$F_{s,\sigma}$	fattore di sicurezza nei confronti degli sforzi di compressione
A^*	area della sezione parzializzata
$\tau_{c,max}$	massimo sforzo di taglio
$0,21 \cdot f_{ctk}$	sforzo di taglio limite
$F_{s,\tau}$	fattore di sicurezza nei confronti degli sforzi di taglio

Il fattore di sicurezza è inteso come rapporto tra il massimo sforzo agente nella sezione e il corrispondente valore limite.

In Figura 113 e Figura 114 si riporta la distribuzione degli sforzi normali agenti sulle sezioni considerate per effetto della corrispondente sollecitazione di pressoflessione. Come si può osservare, tali grafici fanno riferimento unicamente a calotta e muretta, in quanto l'arco rovescio va in trazione, e necessita dunque di armatura.

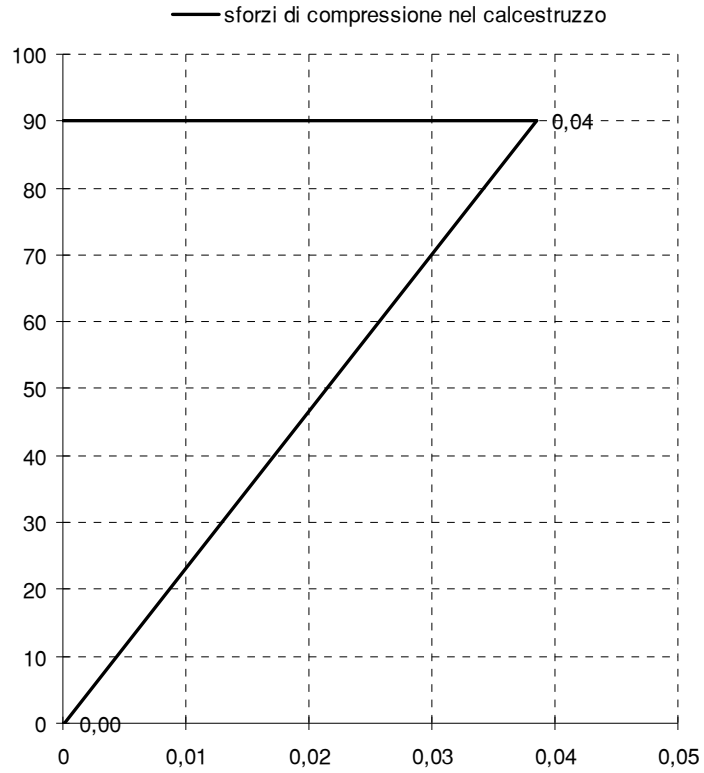


Figura 113 – Compressione nel calcestruzzo, calotta

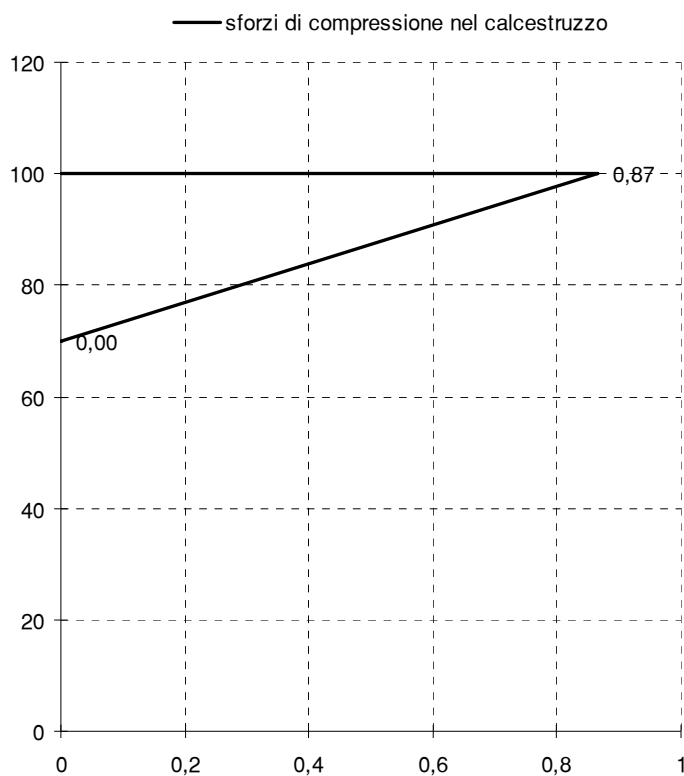



Figura 114 – Compressione nel calcestruzzo, muretta

Tabella 17 – Verifiche strutturali per la sezione Ab alla progr. 4+100 km, in assenza di armatura													
Elemento strutturale	b	h	N _{max}	M _{max}	V _{max}	x	σ _{c,max}	0,25·f _{ck}	F _{s,σ}	A*	τ _{c,max}	0,21·f _{ctk}	F _{s,τ}
	cm	cm	kN	kNm	kN	cm	MPa	MPa		cm ²	MPa	MPa	
Calotta	100	90	18	2,5	1,5	93,6	0,04	7,3	0,0	9000	0,00	0,42	0,0
Muretta	100	150	130	52	72	30	0,87	7,3	0,1	3000	0,36	0,42	0,9

Si propone ora la verifica dell'arco rovescio, realizzata secondo l'approccio classico per il cemento armato. Si sottolinea che, nonostante in questa sede sia prevista armatura per il solo arco rovescio, in realtà per

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 136
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera			Parte di opera		Tipo elab	N. Elab.		Rev							

ragioni di sicurezza si prevede di armare l'intera sezione del rivestimento definitivo in corrispondenza di tutte le zone di imbocco.

Si ipotizza la seguente armatura inferiore e superiore: $\phi 12$ passo 20 cm

Verifiche presso-flessione SLE:

Elemento strutturale	sezione	b	h	N_{SLE}	M_{SLE}	A's	d'	As	d	$\sigma_{c,max}$	$0,45 \cdot f_{ck}$	$\sigma_{s,max}$	$0,8 \cdot f_{yk}$	M_{cr}	w_k
		cm	cm	kN	kNm	cm ²	cm	cm ²	cm	MPa	MPa	MPa	MPa	kNm	mm
Arco rovescio	3-3	100	100	26	10	5,65	6	5,65	94	0	13,1	1,1	360	408	-

Verifiche presso-flessione SLU:

Elemento strutturale	sezione	b	h	N_{SLU}	M_{SLU}	A's	d'	As	d	M_{Rd}	M_{SLU} / M_{Rd}
		cm	cm	kN	kNm	cm ²	cm	cm ²	cm	kNm	
Arco rovescio	3-3	100	100	33,8	13,0	5,65	6	5,65	94	198,4	0,07

Verifiche taglio SLU:

Elemento strutturale	sezione	b	h	N_{SLU}	V_{SLU}	A's	d'	As	d	V_{Rd}	V_{SLU} / V_{Rd}
		cm	cm	kN	kNm	cm ²	cm	cm ²	cm	kN	
Arco rovescio	3-3	100	100	33,8	93,6	5,65	6	5,65	94	438	0,21

13.4.5. Analisi sismica del rivestimento definitivo

L'analisi sismica del rivestimento definitivo per la sezione in esame è stata realizzata considerando una V_{s30} superiore a 800 m/s: si assume dunque una categoria di suolo di tipo A, a cui corrisponde un'accelerazione orizzontale su suolo rigido ag pari a 0.262 g.

METODO DI PROPAGAZIONE DELLE ONDE		
INPUT		
Eg (modulo elastico terreno)	4600000	kPa
ν_g (poisson terreno)	0,2	
EI (modulo elastico lining)	25000000	kPa
ν_l (poisson lining)	0,15	
R (raggio esterno galleria)	7,5	m
t (spessore lining)	0,95	m
V/A table 2	140	
cs (velocità onde di taglio)	1000	m/s
As (peak ground acceleration) normativa	0,262	g
Spost/acc (ampiezza spostamento) con table 3	99	
C (coefficiente di profondità) table 4	0,95	
cp (velocità onde di compressione)	2200	m/s
Ap peak acceleration onde P	0,262	g
H (spessore deposito dal bedrock)	5	m
γ (peso di volume terreno)	23	kN/m ³
Φ inclinazione onda S	45	°
Φ inclinazione onda P	0	°
CALCOLI		
Ic (momento inerzia trasv)	4,060256913	m ⁴
Ag (sezione trasv)	41,93240794	m ²
Vs peak particle velocity	0,002489	m/s
Vp (peak particle velocity)	0,3668	m/s
T periodo	0,02	s
L lunghezza d'onda	20	m
Gm modulo di taglio	2344546,381	kPa
Ka Kt (molle)	30105255,59	kN/m
A1 (ampiezza spostamento) caso flessionale	9,20716E-06	m
A2 (ampiezza spostamento) caso assiale	3,96137E-06	m
A (ampiezza spostamento con table 3)	0,25938	m
F	147,5	flessibile

Figura 115 – Dati di ingresso dell'analisi sismica dei rivestimenti

In Figura 115 è stata realizzata la prima parte del calcolo sismico, che consente di definire il grado di flessibilità del rivestimento in relazione alle caratteristiche geometriche e di resistenza che lo caratterizzano, e a quelle del materiale circostante. Nel caso in esame i calcoli hanno evidenziato un rivestimento di tipo flessibile: i calcoli della sollecitazione sismica sul rivestimento definitivo verranno di conseguenza realizzati mediante un approccio Free Field, senza considerare cioè l'interazione fra rivestimento e terreno circostante.

Si considerano tre diverse modalità di deformazione sismica:

- Deformazione assiale, dovuta ad un'onda sismica agente in direzione parallela all'asse galleria;
- Deformazione longitudinale, connessa d un moto perpendicolare all'asse;

- Ovaling, dovuta ad un'onda di tagli perpendicolare all'asse.

In Figura 116 e Figura 117 sono illustrati i risultati del calcolo sismico, considerando due diverse configurazioni di sollecitazione sismica:

- onde P con angolo di deviazione 0/90° dall'asse galleria, 45° di deviazione per le onde S;
- onde P con angolo di deviazione 45° dall'asse galleria, 0° di deviazione per le onde S;

Per ragioni trigonometriche a queste due configurazioni corrispondono le massime sollecitazioni sul rivestimento, nelle tre tipologie di deformazione considerate.


In entrambi i casi si osserva come la sollecitazione sismica non determini un notevole incremento degli sforzi nel calcestruzzo. Per la deformazione assiale e longitudinale, le tensioni assiali risultano sempre inferiori ai 4.2 MPa, quelle flettenti sono del tutto trascurabili. Nel caso dell'ovaling, la massima tensione assiale è dell'ordine di 0.4 MPa. Le deformazioni indotte sul rivestimento dal movimento vibratorio risultano accettabili.

FREE FIELD senza interazione				
def assiale e flessionale				ovaling
	DEF LONG	DEF NORMALE	DEF FLESS	DEF DI TAGLIO
ONDE P	0,0001667273	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
ONDE S	0,0000012445	0,0000012445	0,0000063837	0,0000006223
	σ kPa assiale	σ kPa assiale	σ kPa fless	σ kPa assiale
ONDE P	4168,181818	0	0	0
ONDE S	31,1125	31,1125	159,592193	2,600733619
ϵ max onda S		0,000008 < ϵ amm		
ϵ max onda P		0,000167 < ϵ amm		

Figura 116 – Risultati dell'analisi nel caso di angolo di deviazione dall'asse della galleria pari a 0/90° per le onde P, 45 ° per le onde S

FREE FIELD senza interazione				
def assiale e flessionale				ovaling
	DEF LONG	DEF NORMALE	DEF FLESS	DEF DI TAGLIO
ONDE P	0,0000833636	0,0000833636	0,0000013189	0,0000416818
ONDE S	0,0000000000	0,0000000000	0,0000180558	0,0000012445
	σ kPa assiale	σ kPa assiale	σ kPa fless	σ kPa assiale
ONDE P	2084,090909	2084,090909	32,97359359	366,7617252
ONDE S	0	0	451,3948875	5,201487238
ϵ max onda S		0,000018 < ϵ amm		
ϵ max onda P		0,000085 < ϵ amm		

Figura 117 - Risultati dell'analisi nel caso di angolo di deviazione dall'asse della galleria pari a 45° per le onde P, 0 ° per le onde S

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 139
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

13.5. Sezione alla progressiva 4+400 km

Copertura 70 m da livelletta

Per i parametri geotecnici relativi alla sezione in esame si rimanda al capitolo 11.4.

La sezione interessa per l'intera sagoma di scavo i calcari della Formazione Ragusa.

Il presente paragrafo fa riferimento all'analisi di stabilità realizzata ipotizzando la messa in opera della sezione tipo P(125) in corrispondenza della piazzola a maggiore copertura della Galleria Occhipinti.

Per i calcoli di stabilità si sono adottate le seguenti percentuali di detensionamento, che fanno riferimento alla curva di Panet-Guenot per una galleria non sostenuta.

<i>Tabella 18 - Percentuali di detensionamento per le fasi di calcolo</i>	
Sezione tipo P(125)	
Sequenza di calcolo	Detensionamento
Fase 1 - Fronte	50 %
Fase 2 - Avanzamento	60 %
Fase 3 - Posa rivestimenti preliminari	70 %
Fase 4 - Getto arco rovescio e murette	90 %
Fase 5 - Completamento rivestimento definitivo	100 %

Nel caso dell'analisi in presenza del solo rivestimento di prima fase, l'analisi si ferma alla Fase 3, per applicare poi l'intero detensionamento al rivestimento provvisorio.

Si presentano ora le caratteristiche dei sostegni preliminari e definitivi previsti per la sezione P(125). L'avanzamento previsto è pari a 1 m.

<i>Tabella 19 - Caratteristiche dei rivestimenti previsti per la sezione in esame</i>		
Sezione P(125)		
Rivestimento preliminare	Centine	2 IPN 220 / 1 m
	A	79 cm ²
	J	6120 cm ⁴
	w	62 kg/m
	Spritz, spessore	30 cm
	Sostegno equivalente	
	E eq	3560 MPa
	spessore eq	30 cm
Rivestimento definitivo	Arco rovescio	
	spessore	1 m
	EA	3 e7 kN/m
	EJ	2500000 kNm ² /m
	Calotta	
	spessore medio	0.9 m
	EA	2.7 e7 kN/m
	EJ	1820000 kNm ² /m
	Muretta	
	spessore	1 m
	EA	3 e7 kN/m
	EJ	2500000 kNm ² /m

13.5.1. Risultati dell'analisi

L'analisi Plaxis è stata realizzata con un modello bidimensionale considerando lo scavo di una delle due canne, con i detensionamenti precedentemente elencati.

Nelle pagine seguenti si riportano i risultati dell'analisi Plaxis. L'analisi è stata realizzata per la massima copertura presente in corrispondenza delle piazzole della galleria Occhipinti, 70 m dal piano di scavo. I risultati proposti fanno riferimento all'ipotesi cautelativa in cui l'intero detensionamento venga assorbito dai rivestimenti di prima fase.

Le Figura 118 e Figura 119 riportano la distribuzione degli spostamenti radiali al contorno di scavo e la distribuzione delle zone plasticizzate al termine del detensionamento: si osserva che i calcari presentano una buona capacità di autosostegno, con spostamenti millimetrici ed una plasticizzazione corticale. Questa osservazione è in accordo con quanto previsto dalle classificazione geomeccaniche per un ammasso di classe III.

In Figura 120 si riportano le direzioni delle tensioni principali al contorno della cavità, che descrivono l'effetto arco che si viene a creare nell'ammasso roccioso al contorno del cavo una volta realizzato lo scavo.

La Figura 121 illustra l'evoluzione degli spostamenti verticali in calotta all'aumentare del detensionamento, ovvero all'aumentare della distanza fra il fronte di scavo e la sezione di calcolo. Si osserva la regimazione degli spostamenti una volta irrigidito il contorno di scavo con la posa dei rivestimenti di prima fase.

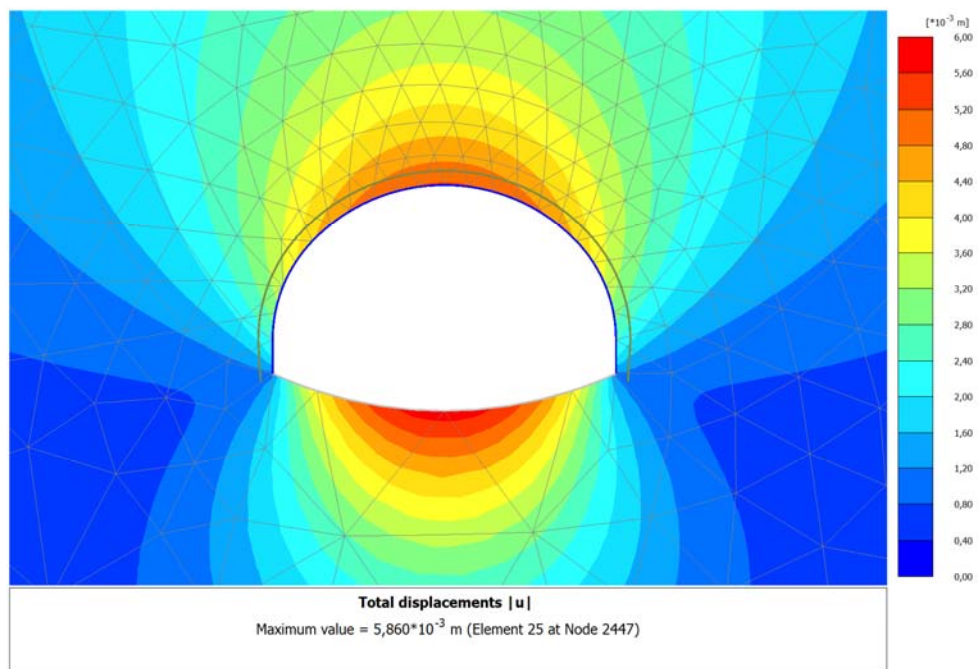


Figura 118 – Spostamenti radiali al contorno galleria a fine detensionamento

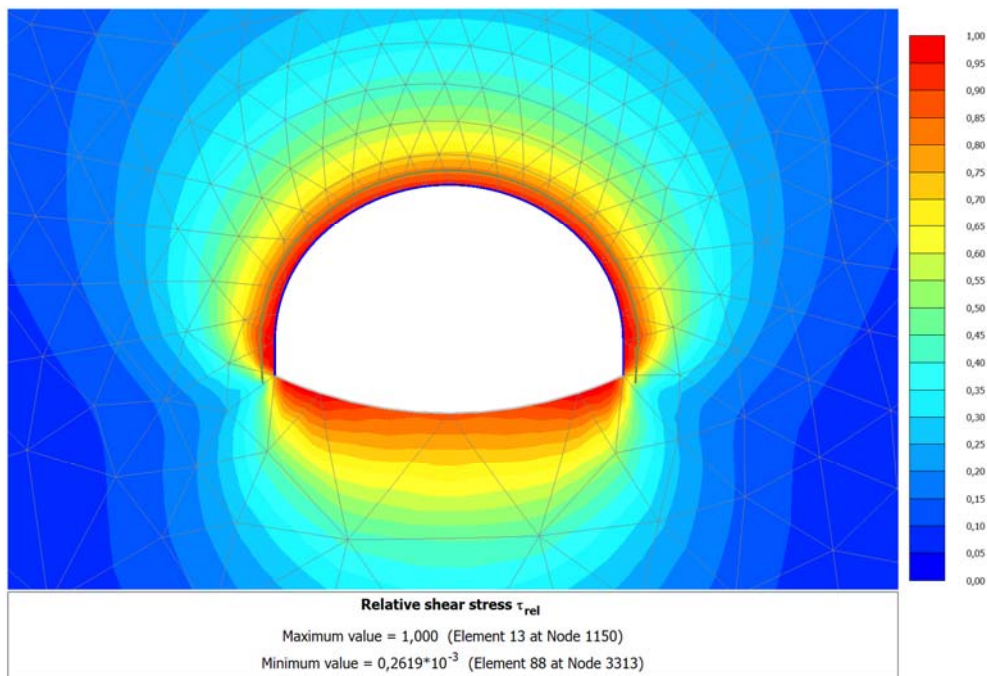


Figura 119 – Zone plasticizzate al contorno galleria a fine detensionamento

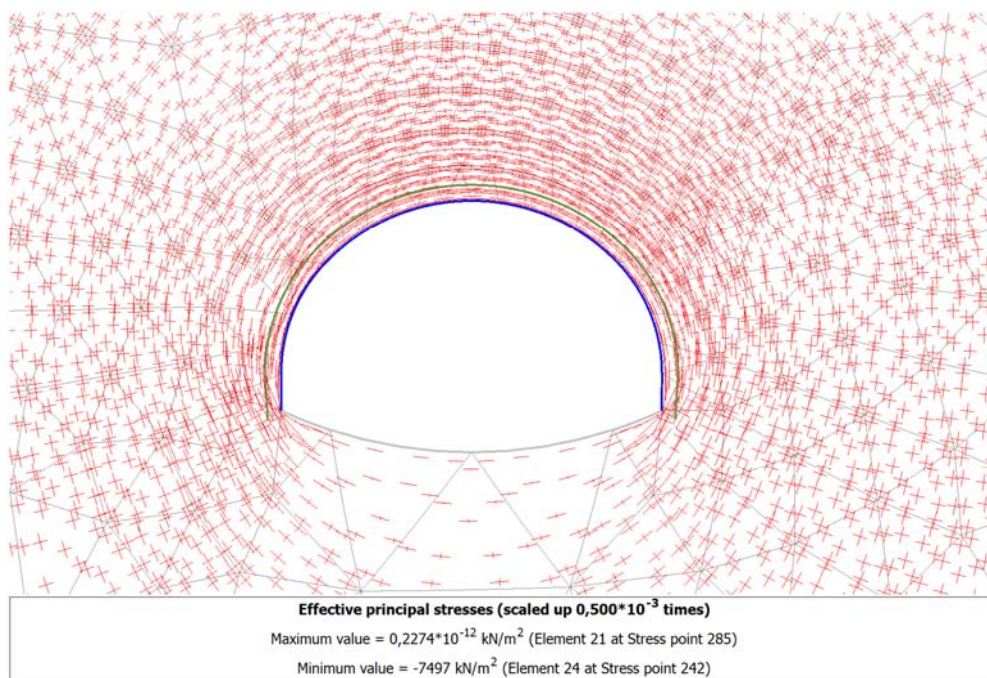


Figura 120 – Orientazione delle tensioni principali al contorno del cavo

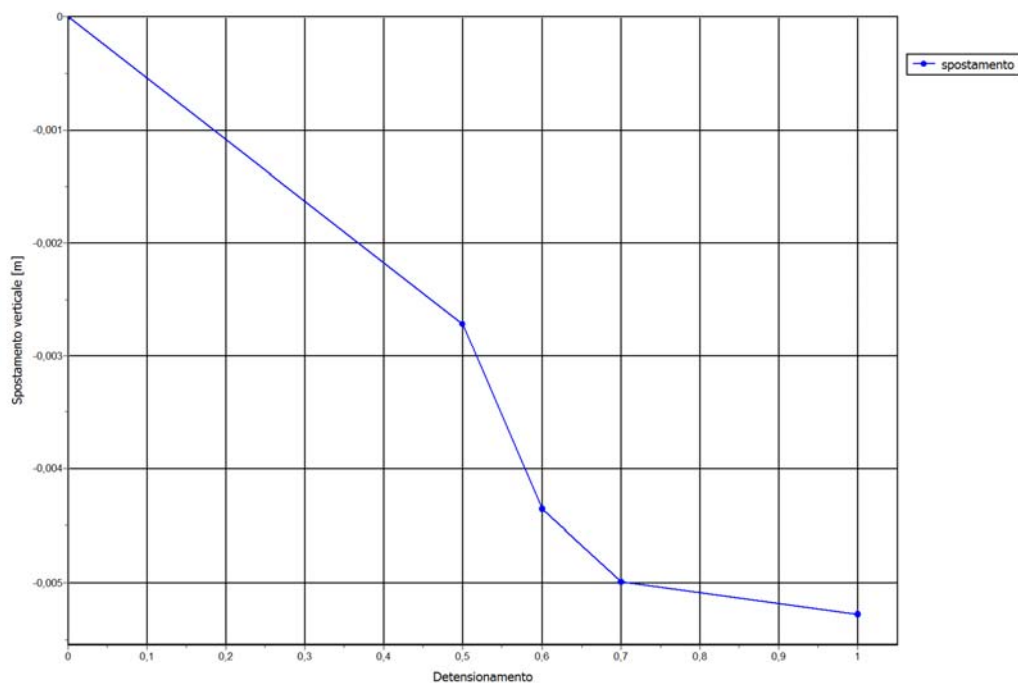


Figura 121 – Spostamenti verticali in calotta, in presenza del solo prerinvestimento

13.5.2. Verifiche strutturali del rivestimento preliminare

Nelle figure seguenti si propongono le distribuzioni delle sollecitazioni agenti sui rivestimenti di prima fase, alla fine del detensionamento.

In Figura 122, Figura 123 e Figura 124 si riportano le sollecitazioni agenti sui prerinvestimenti, nell'ipotesi cautelativa in cui l'intero detensionamento venga supportato dall'accoppiamento centine-spritz beton.

In Figura 125 si riportano i relativi diagrammi di interazione. Tali diagrammi sono stati ottenuti incrementando le sollecitazioni di un fattore 1.3, come descritto nelle NTC per l'approccio A1+M1, e distribuendo le sollecitazioni su centine e spritz beton in relazione alle relative rigidzze. Tutte le sollecitazioni risultano ridotte, e sempre entro i limiti di resistenza dei materiali.

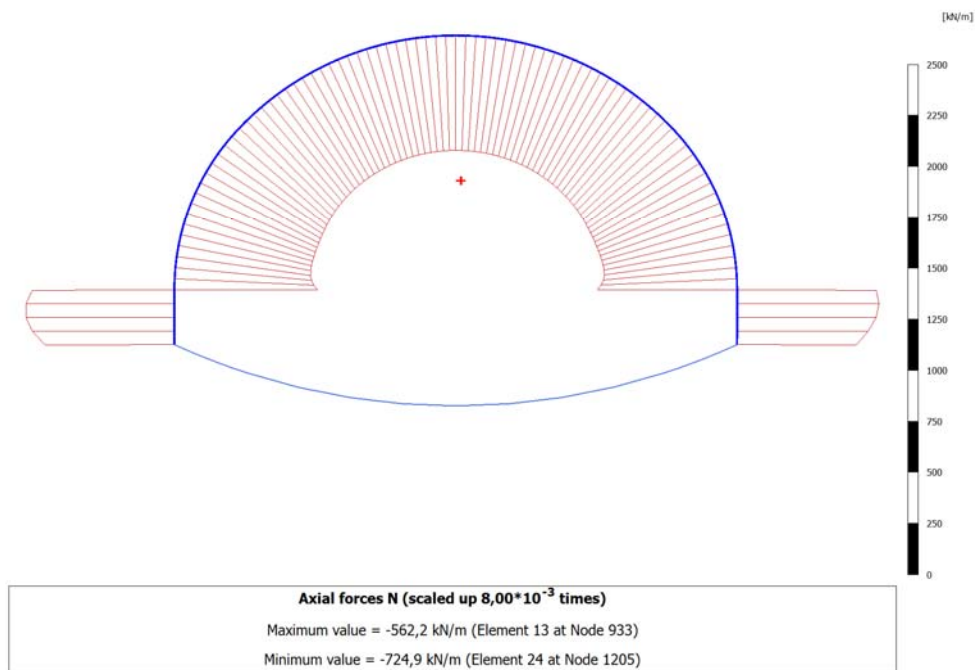


Figura 122 – Sollecitazioni di sforzo normale agenti sul rivestimento preliminare

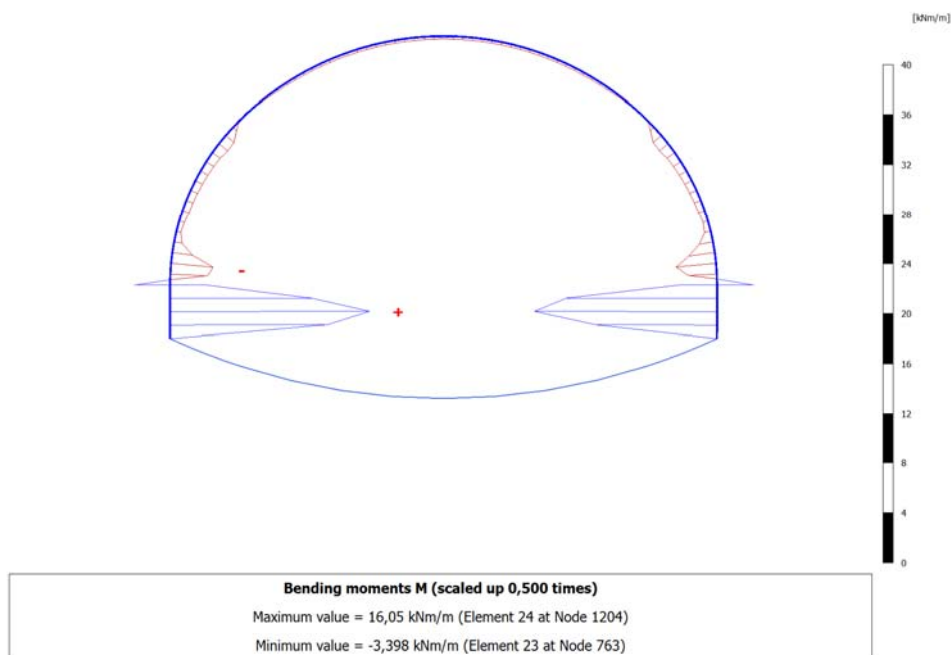


Figura 123 - Sollecitazioni di momento flettente agenti sul rivestimento preliminare

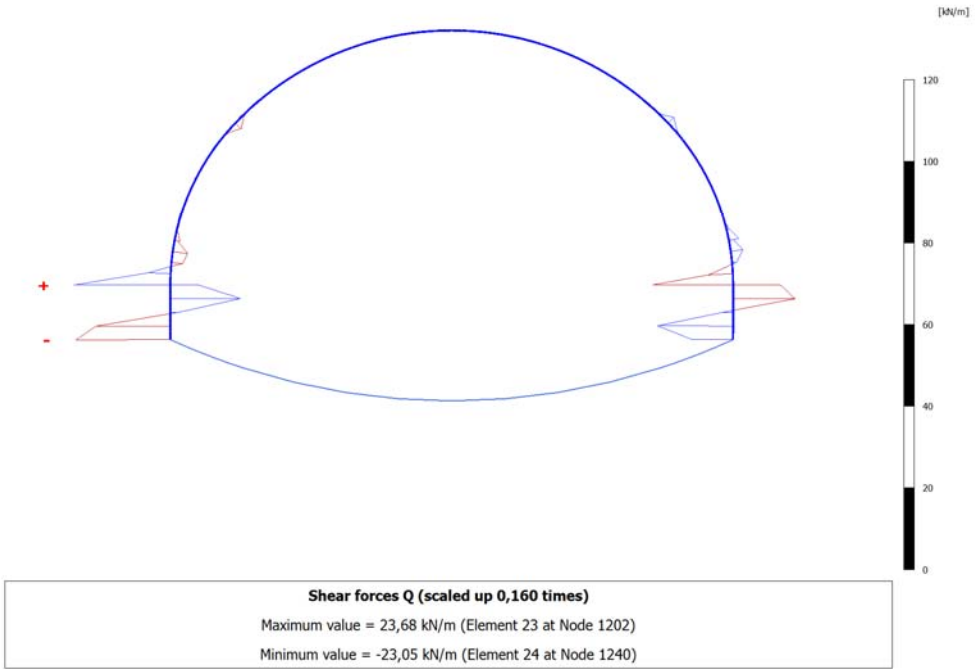


Figura 124 - Sollecitazioni di taglio agenti sul rivestimento preliminare

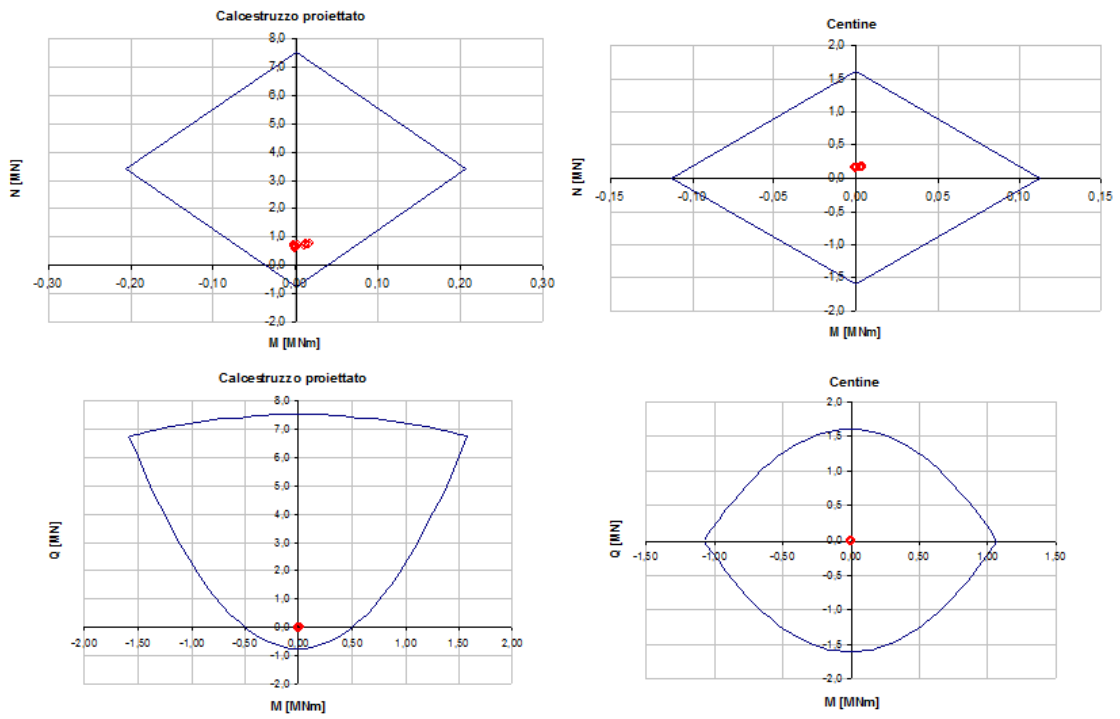


Figura 125 – Diagrammi di interazione dei rivestimento preliminari

13.5.3. Sollecitazioni agenti sul rivestimento definitivo

Nelle figure seguenti si propongono le distribuzioni delle sollecitazioni agenti sui rivestimenti definitivi, alla fine del detensionamento.

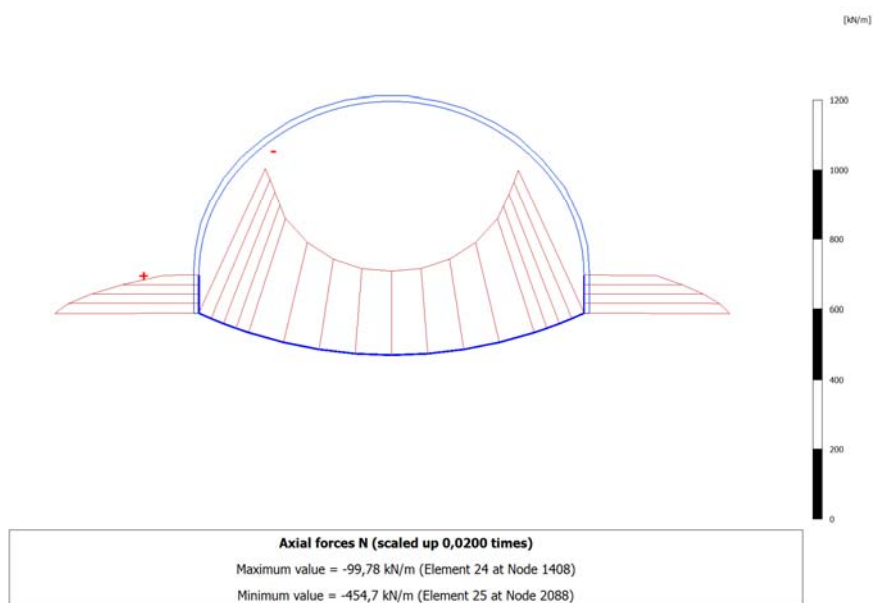


Figura 126 - Sollecitazioni di sforzo normale agenti su arco rovescio e murette

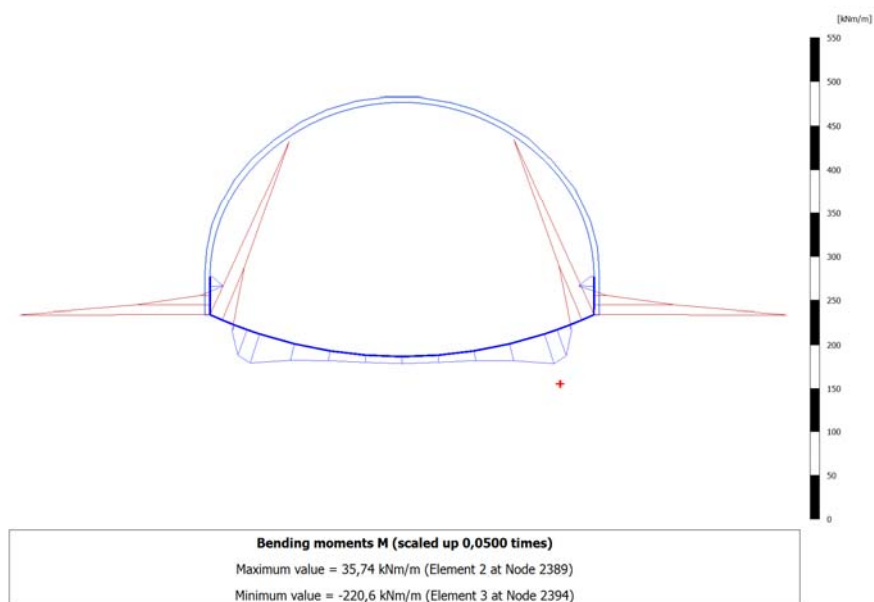


Figura 127 - Sollecitazioni di momento flettente agenti su arco rovescio e murette

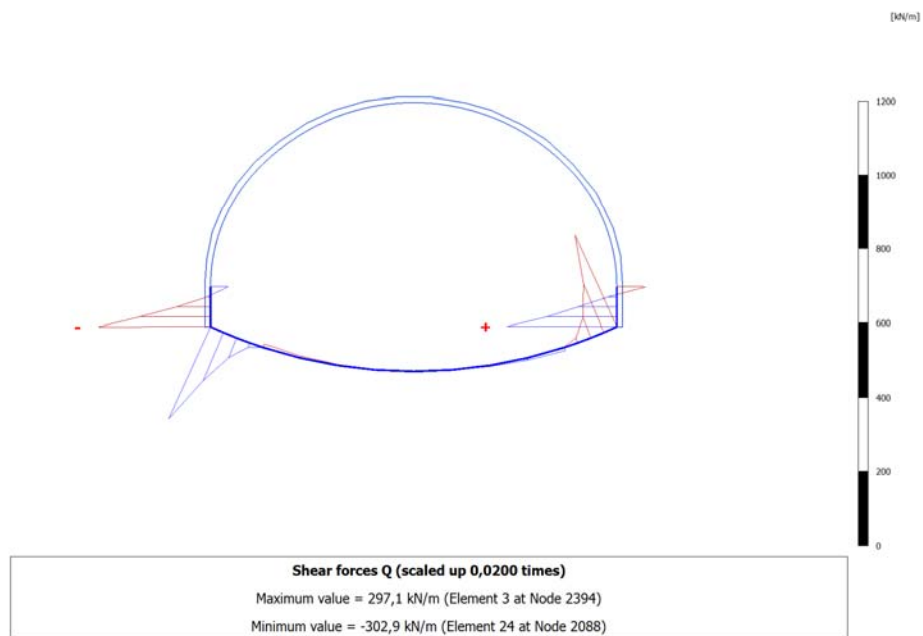


Figura 128 - Sollecitazioni di taglio agenti su arco rovescio e murette

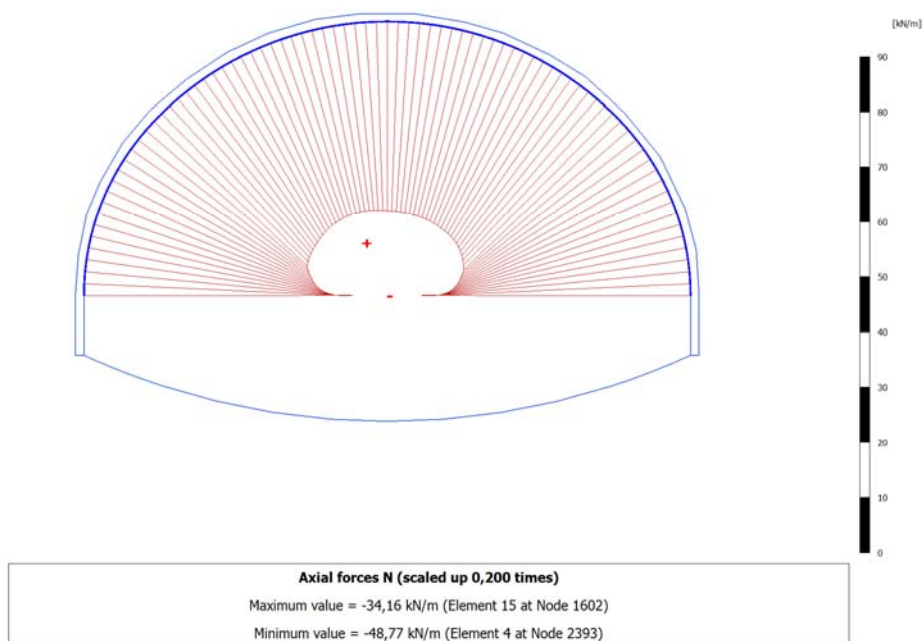


Figura 129 - Sollecitazioni di sforzo normale agenti sulla calotta

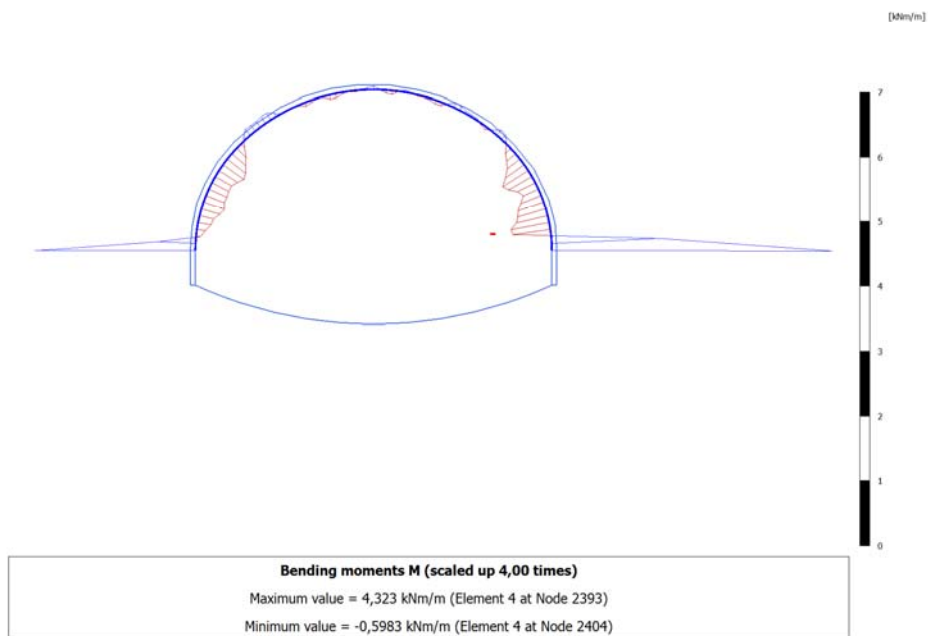


Figura 130 - Sollecitazioni di momento flettente agenti sulla calotta

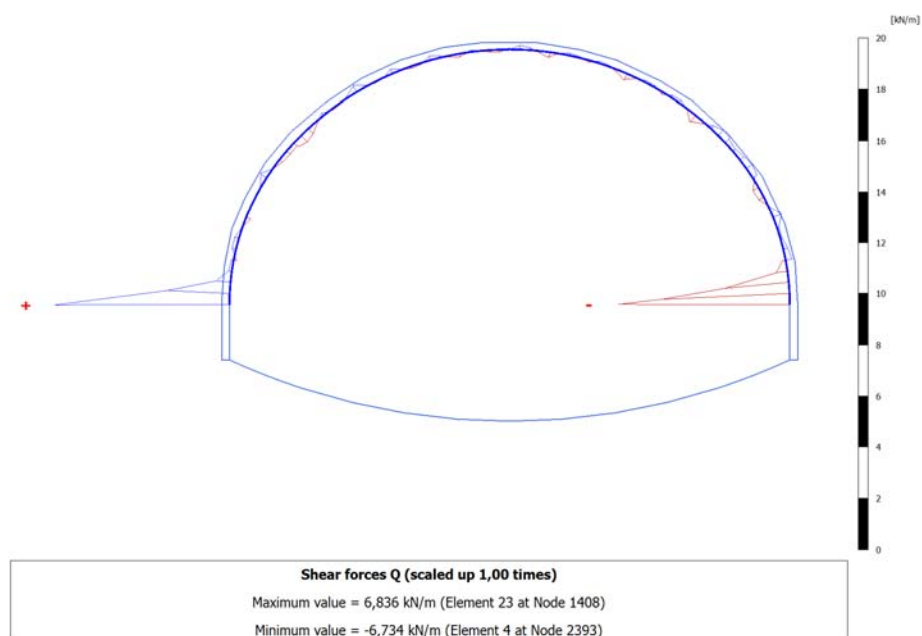


Figura 131 - Sollecitazioni di taglio agenti sulla calotta

13.5.4. Verifiche strutturali del rivestimento definitivo

Di seguito si presentano le verifiche strutturali realizzate per la Galleria Occhipinti, nella sezione alla progressiva 4+400 km, sezione P(125).

In corrispondenza di questa sezione, caratterizzata da una copertura medio-massima ed una sezione di scavo corrispondente alla zona di piazzola, si è analizzata la stabilità con metodi numerici ed empirici. Si è realizzata dapprima un'analisi che cautelativamente associa tutti i carichi dovuti al detensionamento della massa rocciosa ai prerivestimenti, e successivamente una seconda analisi in cui si realizza anche la posa in opera dei rivestimenti definitivi.

Le verifiche strutturali sono state realizzate a partire dalle sollecitazioni di momento flettente M , sforzo assiale N e taglio Q valutate mediante l'analisi agli elementi finiti, a detensionamento avvenuto.

Nella tabella seguente si elencano le massime sollecitazioni agenti sulle diverse porzioni del rivestimento definitivo:

<i>Tabella 20 – Sollecitazioni agenti nel rivestimento definitivo, sezione Ac</i>			
Sollecitazioni agenti sul rivestimento, derivanti da analisi Plaxis			
	N [kN/m]	M [kNm/m]	Q [kN/m]
Calotta	-49	4.5	7
Arco rovescio	-300	40	94
Muretta	-455	221	304

Si sottolinea che la verifica di ciascuna sezione è stata realizzata non considerando lo spessore medio del rivestimento, implementato nel codice di calcolo per la modellazione dei diversi elementi piani costituenti il definitivo, ma definendo lo spessore del rivestimento in corrispondenza della sezione più sollecitata a partire dalla geometria propria della sezione tipo di sostegno.

Nella successiva Tabella 21 sono riassunti i risultati delle verifiche strutturali eseguite per la sezione più sollecitata di calotta, arco rovescio e muretta, in assenza di armatura. La terminologia adottata per indicare le grandezze considerate è la seguente:

- b base della sezione
- h altezza della sezione
- N_{max} massima azione di compressione

- M_{max} massimo momento flettente
- V_{max} massima azione di taglio
- x distanza dell'asse neutro dal lembo compresso
- $\sigma_{c,max}$ massimo sforzo di compressione
- $0,25 \cdot f_{ck}$ sforzo di compressione limite
- $F_{s,\sigma}$ fattore di sicurezza nei confronti degli sforzi di compressione
- A^* area della sezione parzializzata
- $\tau_{c,max}$ massimo sforzo di taglio
- $0,21 \cdot f_{ctk}$ sforzo di taglio limite
- $F_{s,\tau}$ fattore di sicurezza nei confronti degli sforzi di taglio

Il fattore di sicurezza è inteso come rapporto tra il massimo sforzo agente nella sezione e il corrispondente valore limite.

In Figura 132, Figura 133 e Figura 134, si riporta la distribuzione degli sforzi normali agenti sulle sezioni considerate per effetto della corrispondente sollecitazione di presso-flessione.

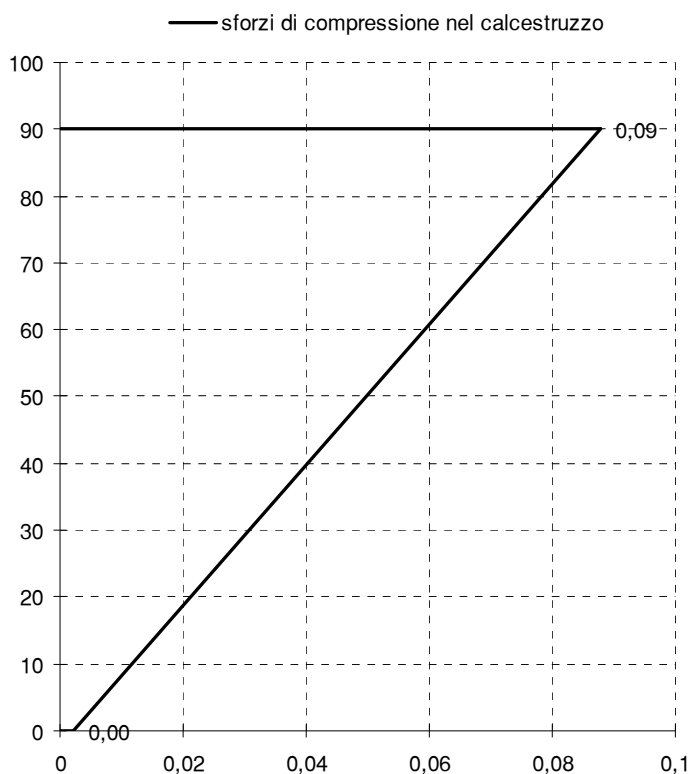


Figura 132 – Compressione nel calcestruzzo, calotta

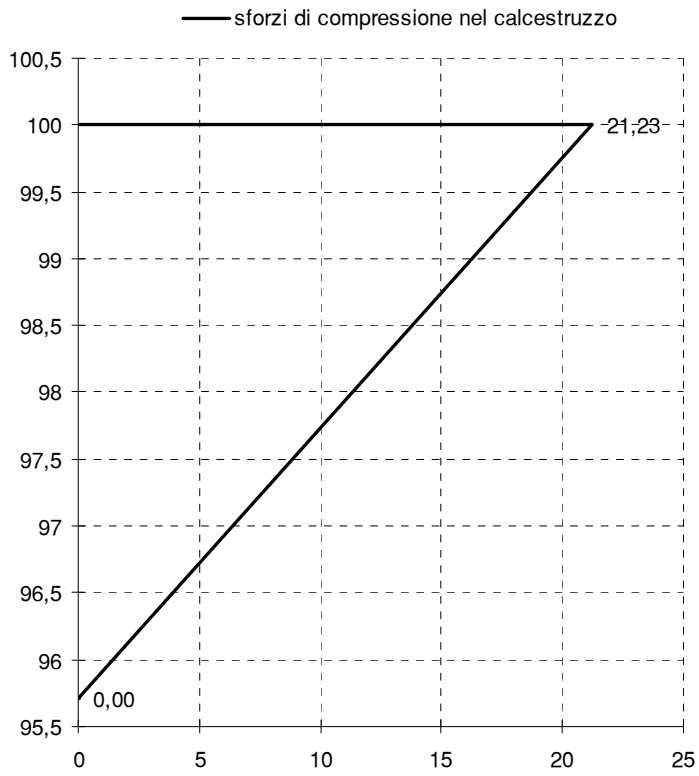


Figura 133 – Compressione nel calcestruzzo, muretta

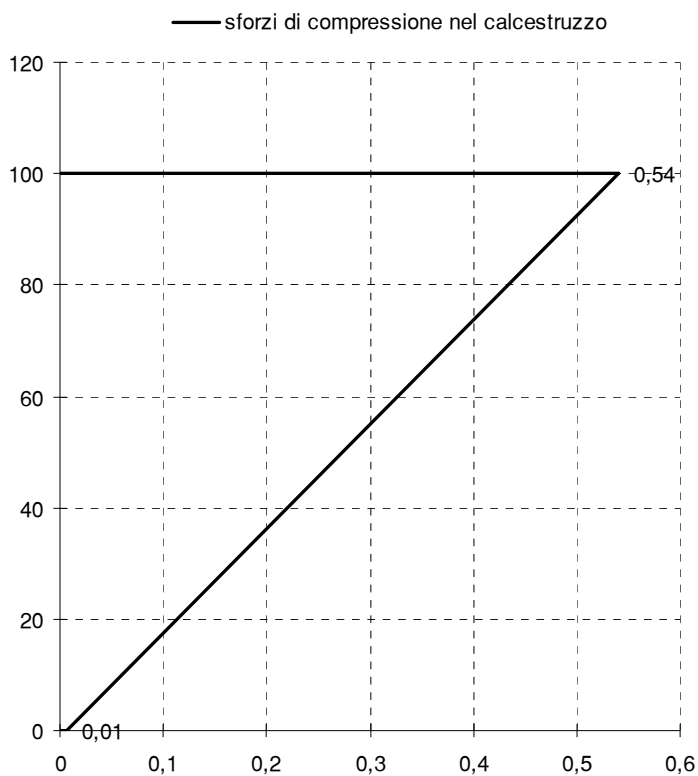



Figura 134 – Compressione nel calcestruzzo, arco rovescio

Tabella 21 – Verifiche strutturali per la sezione BOV alla progr. 4+400 km, in assenza di armatura

Elemento strutturale	b	h	N _{max}	M _{max}	V _{max}	x	σ _{c,max}	0,25·f _{ck}	F _{s,σ}	A*	τ _{c,max}	0,21·f _{ctk}	F _{s,τ}
	cm	cm	kN	kNm	kN	cm	MPa	MPa		cm ²	MPa	MPa	
Calotta	100	90	49	4,5	7,0	118,5	0,09	7,3	0,0	9000	0,01	0,42	0,0
Muretta	100	150	455	221	304	79,3	1,15	7,3	0,2	7930	0,58	0,42	1,4
Arco rovescio	100	100	300	40	94	112,5	0,54	7,3	0,1	10000	0,14	0,42	0,3

Come si può osservare dalla tabella precedente, tutte le sezioni sono verificate in assenza di armatura, ad eccezione della muretta, che richiede invece armatura a taglio.

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 153
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

Si propone ora la verifica della muretta ipotizzando una certa distribuzione di ferri, realizzata secondo l'approccio classico per il cemento armato. Si sottolinea che, nonostante in questa sede sia prevista armatura per la sola muretta, in realtà per ragioni di sicurezza si prevede di armare muretta e arco rovescio in corrispondenza di tutte le zone di faglia.

Si ipotizza la seguente armatura inferiore e superiore: $\phi 12$ passo 20 cm

Verifiche presso-flessione SLE:

Elemento strutturale	sezione	b	h	N _{SLE}	M _{SLE}	A's	d'	As	d	$\sigma_{c,max}$	0,45·f _{ck}	$\sigma_{s,max}$	0,8·f _{yk}	M _{cr}	w _k
		cm	cm	kN	kNm	cm ²	cm	cm ²	cm	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	kNm	mm
Muretta	2-2	100	150	-455	221	5,65	6	5,65	144	0,9	13,1	3,4	360	1034	-

Verifiche presso-flessione SLU:

Elemento strutturale	sezione	b	h	N _{SLU}	M _{SLU}	A's	d'	As	d	M _{Rd}	M _{SLU} / M _{Rd}
		cm	cm	kN	kNm	cm ²	cm	cm ²	cm	kNm	
Muretta	2-2	100	150	-591,5	287,3	5,65	6	5,65	144	740	0,39

Verifiche taglio SLU:

Elemento strutturale	sezione	b	h	N _{SLU}	V _{SLU}	A's	d'	As	d	V _{Rd}	V _{SLU} / V _{Rd}
		cm	cm	kN	kNm	cm ²	cm	cm ²	cm	kN	
Muretta	2-2	100	150	-591,5	395,2	5,65	6	5,65	144	438	0,90

13.5.5. Analisi sismica del rivestimento definitivo

L'analisi sismica del rivestimento definitivo per la sezione in esame è stata realizzata considerando una Vs30 superiore a 800 m/s: si assume dunque una categoria di suolo di tipo A, a cui corrisponde un'accelerazione orizzontale su suolo rigido ag pari a 0.262 g.

METODO DI PROPAGAZIONE DELLE ONDE		
INPUT		
Eg (modulo elastico terreno)	4600000	kPa
ν_g (poisson terreno)	0,2	
EI (modulo elastico lining)	25000000	kPa
ν_l (poisson lining)	0,15	
R (raggio esterno galleria)	9	m
t (spessore lining)	0,95	m
V/A table 2	140	
cs (velocità onde di taglio)	1500	m/s
As (peak ground acceleration) normativa	0,262	g
Spost/acc (ampiezza spostamento) con table 3	99	
C (coefficiente di profondità) table 4	0,7	
cp (velocità onde di compressione)	3000	m/s
Ap peak acceleration onde P	0,262	g
H (spessore deposito dal bedrock)	5	m
γ (peso di volume terreno)	23	kN/m ³
Φ inclinazione onda S	45	°
Φ inclinazione onda P	0	°
CALCOLI		
Ic (momento inerzia trasv)	7,245408485	m ⁴
Ag (sezione trasv)	50,88594701	m ²
Vs peak particle velocity	0,001834	m/s
Vp (peak particle velocity)	0,3668	m/s
T periodo	0,013333333	s
L lunghezza d'onda	20	m
Gm modulo di taglio	5275229,358	kPa
Ka Kt (molle)	82200204,11	kN/m
A1 (ampiezza spostamento) caso flessionale	4,09207E-06	m
A2 (ampiezza spostamento) caso assiale	1,94593E-06	m
A (ampiezza spostamento con table 3)	0,25938	m
F	254,9	flessibile

Figura 135 – Dati di ingresso dell'analisi sismica dei rivestimenti

In Figura 135 è stata realizzata la prima parte del calcolo sismico, che consente di definire il grado di flessibilità del rivestimento in relazione alle caratteristiche geometriche e di resistenza che lo caratterizzano, e a quelle del materiale circostante. Nel caso in esame i calcoli hanno evidenziato un rivestimento di tipo flessibile: i calcoli della sollecitazione sismica sul rivestimento definitivo verranno di conseguenza realizzati mediante un approccio Free Field, senza considerare cioè l'interazione fra rivestimento e terreno circostante.

Si considerano tre diverse modalità di deformazione sismica:

- Deformazione assiale, dovuta ad un'onda sismica agente in direzione parallela all'asse galleria;
- Deformazione longitudinale, connessa d un moto perpendicolare all'asse;
- Ovaling, dovuta ad un'onda di tagli perpendicolare all'asse.

In Figura 136 e Figura 137 sono illustrati i risultati del calcolo sismico, considerando due diverse configurazioni di sollecitazione sismica:

- onde P con angolo di deviazione 0/90° dall'asse galleria, 45° di deviazione per le onde S;
- onde P con angolo di deviazione 45° dall'asse galleria, 0° di deviazione per le onde S;

Per ragioni trigonometriche a queste due configurazioni corrispondono le massime sollecitazioni sul rivestimento, nelle tre tipologie di deformazione considerate.


In entrambi i casi si osserva come la sollecitazione sismica non determini un notevole incremento degli sforzi nel calcestruzzo. Per la deformazione assiale e longitudinale, le tensioni assiali risultano sempre inferiori ai 3 MPa, quelle flettenti sono del tutto trascurabili. Nel caso dell'ovaling, la massima tensione assiale è dell'ordine di 0.3 MPa. Anche le deformazioni indotte sul rivestimento dal movimento vibratorio risultano accettabili.

FREE FIELD senza interazione				
def assiale e flessionale				ovaling
	DEF LONG	DEF NORMALE	DEF FLESS	DEF DI TAGLIO
ONDE P	0,0001222667	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
ONDE S	0,0000006113	0,0000006113	0,0000034430	0,0000003057
	σ kPa assiale	σ kPa assiale	σ kPa fless	σ kPa assiale
ONDE P	3056,666667	0	0	0
ONDE S	15,28333333	15,28333333	86,07603014	1,442811178
ϵ max onda S		0,000004 < ϵ amm		
ϵ max onda P		0,000122 < ϵ amm		

Figura 136 – Risultati dell'analisi nel caso di angolo di deviazione dall'asse della galleria pari a 0/90° per le onde P, 45° per le onde S

FREE FIELD senza interazione				
def assiale e flessionale				ovaling
	DEF LONG	DEF NORMALE	DEF FLESS	DEF DI TAGLIO
ONDE P	0,0000611333	0,0000611333	0,0000008608	0,0000305667
ONDE S	0,0000000000	0,0000000000	0,0000097383	0,0000006113
	σ kPa assiale	σ kPa assiale	σ kPa fless	σ kPa assiale
ONDE P	1528,333333	1528,333333	21,51875753	303,7497218
ONDE S	0	0	243,45695	2,885622357
ϵ max onda S		0,000010 < ϵ amm		
ϵ max onda P		0,000062 < ϵ amm		

Figura 137 - Risultati dell'analisi nel caso di angolo di deviazione dall'asse della galleria pari a 45° per le onde P, 0° per le onde S

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 156
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

14. IMBOCCHI

La Galleria Caddame prevede un imbocco con attacco diretto dal lato Ovest, con la realizzazione di due trincee indipendenti ciascuna a servizio di una delle due carreggiate, interamente entro i calcari della Formazione Ragusa. Per quanto riguarda l'imbocco Est, invece, la presenza di un potente deposito detritico nell'area di innesto della galleria naturale rende necessaria la realizzazione di una paratia tirantata frontale, mentre lateralmente si realizzeranno scarpate con pendenza adeguata ai litotipi interessati.

Per quanto riguarda la Galleria Occhipinti, l'innesto delle gallerie naturali viene realizzato con imbocco diretto. I due imbocchi risultano comunque abbastanza diversi fra loro, in quanto dal lato Ovest l'area di imbocco si pone totalmente entro la Formazione Ragusa, caratterizzata da una buona qualità geomeccanica, mentre dal lato Est la zona di scavo in corrispondenza dell'imbocco intercetta l'intera sequenza stratigrafica, composta dalla Formazione Ragusa alla base, sormontata dalla Formazione Tellaro e da un deposito detritico superficiale di alterazione della marne del Tellaro sottostanti.


14.1. Galleria Caddame

La galleria Caddame si pone per intero entro i calcari marnosi della Formazione Ragusa, caratterizzati da una stratificazione sub orizzontale ed una buona qualità geomeccanica. In particolare, in corrispondenza dell'imbocco Est – lato fiume Irminio – è presente uno strato detritico superficiale di potenza massima pari a circa 7 m.

L'imbocco Ovest, ovvero quello in direzione Gela, è caratterizzato dalla presenza di calcari della Formazione Ragusa sub-affioranti, disposti in banchi debolmente inclinati, con una copertura di terreno vegetale inferiore al metro, Figura 138.

Per la realizzazione dello scavo si prevede un attacco di tipo diretto, con la realizzazione di scarpate laterali con pendenza 1:5 interrotte, ogni 5 metri di altezza, da berme orizzontali di 1 metro di larghezza, in accordo alla stratificazione dell'ammasso roccioso. In corrispondenza dell'attacco della galleria naturale viene realizzata un'unica scarpata a tutta altezza con pendenza 1:5.

Le scarpate non necessitano di alcun intervento di stabilizzazione, a meno di un disgaggio sistematico in fase di ribasso del piano di scavo, e la posa di bulloni metallici posti localmente a "cucitura" di eventuali blocchi instabili.

 GENERALI	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 157
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

I bulloni dovranno presentare una cementazione lungo foro, ed una lunghezza minima di 2,5 m, la cui disposizione dovrà tener conto della spaziatura media delle famiglie di discontinuità dell'ammasso roccioso. A questo proposito è da segnalare che, generalmente, i piani di strato presentano una spaziatura media di 60 cm. Per questo motivo si ritiene adeguata una disposizione a quinconce dei bulloni, con interasse 2,5 m tra bulloni della stessa fila.

I bulloni, inoltre, potranno essere installati con direzione perpendicolare al versante. La conformazione dell'ammasso roccioso presenta, infatti, piani di strato con immersione pressoché perpendicolare al tracciato, con una disposizione a reggipoggio o franapoggio, ma comunque con un'inclinazione non superiore ai 10 gradi.




Figura 138 – Area dell'imbocco Ovest della Galleria Caddame

In corrispondenza dell'imbocco Est, invece, la presenza di un deposito detritico di potenza elevata in corrispondenza dell'area di imbocco determina la necessità di realizzare una paratia di micropali frontale nella sezione di attacco della galleria naturale, modellando invece le scarpate laterali con pendenza 1:5 in calcare, 2:1 nella parte superficiale in corrispondenza del detrito.

Per la parte di scavo in cui non è prevista la paratia verranno realizzate scarpate artificiali con i seguenti criteri:

- per le scarpate realizzate nella formazione Ragusa si procede in modo analogo all'imbocco Ovest, mantenendo una pendenza di 1:5, con berme ogni 5 metri di altezza.
- per le scarpate realizzate in corrispondenza del detrito si adotta una pendenza pari a 2:1.

 INGEGNERIA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 158
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera			Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev						

Per quanto riguarda i versanti realizzati nella formazione Ragusa, sono previsti i seguenti interventi di sistemazione:

- rimodellazione del versante
- disaggio di sicurezza
- eventuale posa di bulloni metallici

La “cucitura” degli eventuali blocchi instabili dovrà essere realizzata mediante bulloni metallici a cementazione lungo foro, di lunghezza minima 2,5 m, la cui disposizione dovrà tener conto della spaziatura media delle famiglie di discontinuità.

A questo proposito è da segnalare che, generalmente, i piani di strato presentano una spaziatura media di 60 cm. Per questo motivo si ritiene adeguata una disposizione a quinconce dei bulloni, con interasse 2,5 m tra bulloni della stessa fila.

I bulloni, inoltre, potranno essere installati con direzione perpendicolare alla parete del fronte. La conformazione dell’ammasso roccioso presenta, infatti, piani di strato con una inclinazione non superiore ai 10 gradi.

Per quanto riguarda i versanti realizzati in corrispondenza dello strato detritico, si prevede il getto di uno strato di circa 10-15 cm di spritz-beton fibro-rinforzato.


14.2. Galleria Occhipinti

Analogamente alla galleria Caddame, anche la galleria Occhipinti si pone interamente entro i calcari marnosi della Formazione Ragusa.

In corrispondenza dell’imbocco Ovest i rilievi in campo hanno evidenziato la presenza frequente di testate calcaree sub-affioranti, disposte in banchi sub orizzontali di spessore variabile fra i 30 ed i 60 cm, come visibile in Figura 139. Vista la presenza di roccia compatta in affioramento, con un ricoprimento sempre inferiore al metro, si prevede di realizzare l’imbocco della galleria naturale con attacco diretto.

Per la realizzazione dello scavo si realizzano scarpate laterali con pendenza 1:5 interrotte, ogni 5 metri di altezza, da berme orizzontali, in accordo con la stratificazione rocciosa, di 1 metro di larghezza, che vanno via via a ridursi di altezza e numero all’aumentare della distanza dall’area di imbocco. In corrispondenza dell’attacco della galleria naturale viene realizzata un’unica scarpata a tutta altezza con pendenza 1:5.

Come precedentemente evidenziato, le trincee e il versante del fronte realizzati nella formazione Ragusa non presentano problemi dal punto di vista della stabilità globale, come dimostrato al capitolo 8, in ragione della buona qualità geomeccanica dell’ammasso. Dal punto di vista della stabilità locale, invece, la stratificazione sub

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 159
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

orizzontale del calcare, associata alla presenza di due famiglie di discontinuità principali sub verticali e ortogonali fra loro può determinare eventuali fenomeni di instabilità di cunei di roccia. A tale scopo, nel corso della realizzazione delle trincee e dell'abbassamento del piano di scavo sarà necessario procedere effettuando un disgiungimento sistematico delle pareti di roccia, e eventualmente installando bulloni metallici a cementazione lungo foro di lunghezza minima 2.5 m al fine di "cucire" i volumi rocciosi che saranno individuati come possibili fonti di instabilità da una semplice osservazione visiva. I piani di strato presentano generalmente una spaziatura media di 60 cm: per questo motivo si ritiene adeguata una disposizione a quinconce dei bulloni, con interasse 2,5 m tra bulloni della stessa fila. I bulloni potranno essere installati con direzione perpendicolare ai versanti, in quanto l'ammasso roccioso presenta piani di strato con un'inclinazione non superiore ai 10 gradi.

La prosecuzione del tracciato autostradale in direzione Gela viene realizzata in trincea.



Figura 139 – Area dell'imbocco Ovest della Galleria Occhipinti

L'imbocco Est della Galleria Occhipinti si colloca in una zona caratterizzata da una morfologia pianeggiante e priva di affioramenti rocciosi, Figura 140. Le indagini geognostiche hanno evidenziato la presenza di un deposito detritico di potenza variabile fra 3 e 8 m, a copertura di uno strato di marne del Tellaro di spessore medio 5 m, e al di sotto i calcari della Formazione Ragusa. Tale sequenza stratigrafica interesserà tutte le scarpate laterali dell'area di imbocco.


 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 160
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera			Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev						




Figura 140 – Area dell’imbocco Est della Galleria Occhipinti

Alla progressiva dell’imbocco della galleria naturale, la presenza di una faglia diretta determina alla quota della galleria il passaggio dalle marne ai calcari, che quindi interesseranno per l’intera altezza il fronte di scavo nell’area di imbocco.

Per la realizzazione dello scavo si realizzeranno scarpate laterali con pendenza 1:5 sia per i calcari della Formazione Ragusa che per le marne del Tellaro interrotte, ogni 5 metri di altezza, da berme di 1 metro di larghezza, che vanno via via a ridursi di altezza all’aumentare della distanza dall’area di imbocco. La parte più superficiale della scarpata interesserà invece il deposito detritico, in corrispondenza del quale si realizzerà una berma di larghezza 1.5 m e si modellerà la scarpata con pendenza 2:1 fino a raggiungere il piano campagna. In corrispondenza dell’attacco della galleria naturale, la presenza del solo calcare, sormontato dal detrito, consente di realizzare un’unica scarpata in roccia a tutta altezza con pendenza 1:5, modellando poi il detrito superficiale nuovamente con pendenza 2:1.


Gli interventi di stabilizzazione previsti per le scarpate in calcare sono rappresentati dal disgaggio sistematico ed eventuale bullonatura locale dei blocchi instabili, analogamente a quanto esplicitato per l’imbocco Ovest.

Le scarpate nelle marne del Tellaro verranno trattate con uno strato di 10-15 cm di spritz beton di copertura, non tanto ai fini di stabilizzare lo scavo a breve termine, quanto allo scopo di preservare la scarpata da fenomeni di alterazione connessi agli eventi meteorici.

 TECERRE	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 161
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

La porzione di roccia frapposta tra le due carreggiate autostradali verrà mantenuta in posto per un tratto di circa 30 m, con le stesse pendenze delle scarpate laterali.

Per una trattazione completa degli imbocchi e per le verifiche di stabilità delle scarpate artificiali si rimanda alla specifica relazione di calcolo degli imbocchi del Lotto 11.

 GENERALITÀ	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 162
	Pr	Strada	Lotto	Macro opera	Opera	Parte di opera	Tipo elab	N. Elab.	Rev														

15. STRUMENTAZIONE IN GALLERIA PER COSTRUZIONI IN CORSO D'OPERA

15.1. Generalità

Il progetto degli avanzamenti della galleria dovrà essere verificato in corso di opera mediante appropriate misure di tensione e spostamenti, in modo da controllare il comportamento delle strutture di rivestimento nei confronti delle condizioni geomeccaniche effettivamente incontrate nella galleria, consentendo la taratura delle tecnologie esecutive e l'affinamento delle soluzioni progettuali adottate.


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 consentirebbe quindi, qualora ce ne fosse bisogno, di affinare il progetto delle tratte più profonde sulla base di quanto osservato durante lo scavo di quelle più corticali, e cioè sulla base 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, è necessario che:

- le strumentazioni impiegate siano affidabili;
- le strumentazioni impiegate siano poste in opera correttamente;
- l'installazione degli strumenti sia documentata accuratamente;
- le strumentazioni impiegate siano tra loro differenziate;
- le grandezze misurate siano tra loro facilmente correlabili;
- 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.

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 163
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

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.

15.2. 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 tensodeformativo 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.

Devono essere 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 la testa di una barretta che verrà infissa nella roccia 10 cm e lungo abbastanza per continuare le misure attraverso il prerivestimento, fino al getto del rivestimento definitivo, quando la barretta verrà abbandonata.


La barretta o chiodo dovrà leggere le tre componenti di spostamento, le due nel piano della sezione x e y, 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;

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 164
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

- a fronte fermo, per periodi prolungati superiori ai 3 giorni, le barrette, tutte, dovranno essere lette ogni 3 giorni.

Sulla lettura dovrà sempre essere indicata la posizione del fronte e dell'arco rovescio. La frequenza delle stazioni di convergenza è pari, a partire dagli imbocchi, di una stazione ogni 40 m.

Ulteriori stazioni di convergenza verranno realizzate in corrispondenza delle faglie principali, secondo quanto indicato nel Profilo geotecnico e geomeccanico delle Gallerie Caddame e Occhipinti, in direzione Gela e Siracusa.

15.3. Rilievo geologico del fronte di scavo

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

Nei rilievi devono essere descritte le caratteristiche litologiche e stratigrafiche dei terreni, con indicazione della granulometria, del grado di compattezza, dello stato di alterazione, nonché osservazioni sulle venute d'acqua e sugli eventuali distacchi.


Si prevede di realizzare tali rilievi in modo sistematico lungo l'intero tracciato, in corrispondenza delle stazioni di convergenza.

Tale frequenza realizzativa andrà comunque verificata in corso d'opera, eventuali ulteriori stazioni di rilievo potranno essere realizzate in corrispondenza di una brusca variazione dell'assetto lito-tecnico o di maggiori venute d'acqua o di un aumento delle deformazioni, registrate dai sistemi di monitoraggio messi in opera.

15.4. 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 deformazione delle opere di rivestimento, eseguite mediante 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. Tali misure verranno realizzate con una cadenza spaziale di circa 200 metri.

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. Verranno messe in opera celle di pressione ed estensimetri multibase.

 TECNOLOGIA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 165
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

Celle di pressione

Verranno installate tra l'ammasso roccioso e le centine del prerivestimento. 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. Quindi le letture potranno passare ad 1 ogni 3 giorni fino al getto del rivestimento definitivo. Poi si eseguirà una lettura ogni mese in presenza del rivestimento definitivo. Sulle letture bisognerà sempre indicare la posizione del fronte rispetto alla sezione di lettura.

Estensimetri multibase


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

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 lo spostamento del punto di ancoraggio.

I due estensimetri previsti dovranno essere montati immediatamente a ridosso del fronte di scavo, non appena messo in opera lo spessore di spritz-beton di progetto, eseguendo la perforazione radiale $\phi 127$ mm, l'inserimento delle basi di misura preassemblate, la cementazione, il montaggio della testa dello strumento e dei trasduttori di spostamento.

15.5. Monitoraggio di superficie

In corrispondenza del tratto compreso fra le progressive 3+210 e 3+250 km in corrispondenza della Galleria Occhipinti, lo scavo in sotterraneo della pista per Siracusa passa a distanza e copertura ridotta in prossimità di un edificio storico, la cosiddetta "Villa Ficazza". Nonostante non si prevedano significative interazioni tra lo scavo e la

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 166
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							


struttura - in quanto in quel tratto lo scavo in sotterraneo si realizza in calcari compatti – si prevede, per la sola pista per Siracusa, di procedere con le seguenti cautele:

- Prima dell'esecuzione dei lavori dovrà essere innanzitutto valutato lo stato di consistenza dell'edificio, con la mappatura di tutte le eventuali fessure e fratture presenti con relativa documentazione fotografica;
- Laddove fossero presenti delle fessure e/o fratture si procederà inoltre all'installazione di fessurimetri al fine di monitorare l'eventuale evoluzione di dette discontinuità in relazione alle tempistiche di avanzamento dello scavo. Il suddetto rilievo dovrà inoltre verificare la possibile formazione di nuove fessure e quindi monitorarle con nuovi fessurimetri;
- Il monitoraggio dei cedimenti di superficie indotti dallo scavo della galleria avverrà tramite delle sezioni di subsidenza, costituite da caposaldi topografici, che verranno alloggiati all'interno di pozzetti con chiusino profondi 0,5 m circa.

La frequenza con cui si procederà a realizzare il rilievo visivo delle fessure e la lettura dei fessurimetri è pari a due volte alla settimana per tutta la durata dei lavori nel tratto di interesse.

Le sezioni di monitoraggio topografico di superficie saranno ubicate in corrispondenza delle stazioni di convergenza in galleria.

La frequenza delle letture è in funzione delle tempistiche di scavo ovvero della distanza del fronte di scavo dalle sezioni strumentate. Le sezioni verranno lette ogni due campi di avanzamento ed in generale il monitoraggio continuerà fino all'esaurimento delle deformazioni.

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 167
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

16. CONCLUSIONI

Nella presente relazione si sono analizzate le due gallerie naturali in progetto nell'ambito del Progetto esecutivo dell'autostrada Siracusa-Gela, nella tratta denominata Lotto 11 "Ragusa".

Il lotto in esame rappresenta la naturale prosecuzione del Lotto 10 "Irminio" che prevede, nella sua parte terminale, la realizzazione di un viadotto autostradale a grandi luci sull'impluvio del fiume Irminio.


Il Lotto 11 presenta un'estensione lineare di quasi 7 km, e comprende due gallerie naturali, denominate Caddame, di lunghezza media 2130 m, e Occhipinti, di lunghezza 1980 m, per poi proseguire in trincea fino a fine lotto.

Le gallerie presentano una geometria a doppio fornice. Le due canne di scavo presentano una sezione differente: la pista per Siracusa prevede una carreggiata avente la larghezza tipica delle sezioni autostradali da 11,20 m, la pista per Gela invece necessita di un allargamento in sinistra variabile fra 0,90 m per la Galleria Caddame, e 1.25 m per la Galleria Occhipinti, per ragioni di visibilità.

La presente relazione riporta i risultati delle verifiche di stabilità e strutturali realizzate per le gallerie naturali Caddame e Occhipinti, in relazione alle diverse sezioni tipo analizzate lungo il tracciato della galleria. Le sezioni di calcolo si collocano in corrispondenza dei tratti ritenuti significativi per rappresentare il comportamento tenso-deformativo degli ammassi rocciosi intercettati. Tutte le analisi sono state realizzate facendo riferimento a tre diversi approcci, in particolare i metodi analitici delle linee caratteristiche e di Tamez, ed il metodo numerico agli elementi finiti (software Plaxis).

I risultati delle analisi di stabilità sia con metodi analitici che numerici hanno evidenziato che tutte le sezioni di calcolo risultano stabili, con convergenze e plasticizzazioni ridotte in tutte le fasi costruttive. La particolare configurazione geometrica a doppia canna di scavo affiancata non presenta problemi di stabilità in corrispondenza del diaframma divisorio, le analisi numeriche hanno dimostrato l'assenza di interazione tra le due canne, sia in roccia sana che in tratti più scadenti da un punto di vista geomeccanico.

Sulla base delle sollecitazioni ottenute dal modello Plaxis sono state eseguite anche le verifiche strutturali dei rivestimenti preliminari e definitivi. Questa procedura ha

 PROGETTA	E	A	1	8	1	1	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 168
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

permesso da un lato di appurare che i prerivestimenti lavorano al di sotto dei corrispondenti limiti dei resistenza, dall'altro, limitatamente al rivestimento definitivo, di valutare l'eventuale armatura necessaria a garantire il sostegno del cavo a lungo termine.

Data l'elevata distanza di posa del rivestimento definitivo dal fronte, tale sostegno risulta ben poco sollecitato: tutte le verifiche realizzate - ad eccezione di quelle relative alle zone di imbocco e di faglia ad elevata copertura - dimostrano infatti che il rivestimento definitivo non necessita di armatura.

Alla luce di quanto evidenziato dalle verifiche realizzate per la sezione 2+195 km in corrispondenza di un imbocco e la sezione 4+400 km in faglia ad elevata copertura, si è comunque previsto di armare il rivestimento gettato in opera in corrispondenza dei tratti ritenuti più critici, ossia in corrispondenza delle faglie principali (armatura di muretta e arco rovescio) e delle zone di imbocco a ridotta copertura (armatura di tutta la sezione).

In conclusione, le valutazioni condotte hanno confermato la validità delle soluzioni progettuali proposte, con riferimento sia allo stato tensionale dei rivestimenti e dell'ammasso roccioso al contorno del cavo, sia al livello delle deformazioni raggiunte.

Si sottolinea infine che tra le progressive 3+135 e 3+290 km lungo la pista per Siracusa, lo scavo sottopassa con copertura ridotta un edificio storico, la Villa Ficazza. Al fine di minimizzare le interazioni tra la struttura e lo scavo, dunque, si prevede, oltre ad uno specifico monitoraggio di superficie, di realizzare lo scavo obbligatoriamente con martellone, al fine di limitare le vibrazioni indotte dall'avanzamento, con sfondo massimo di 1 m; le sezioni tipo B0 e B0V previste in tale tratta dovranno presentare un interasse centine pari ad 1 m.