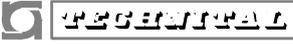


A	DICEMBRE 2011	EMISSIONE			C.MARCHINO	C.PESCE	F.BUSOLA														
REV.	DATA	DESCRIZIONE			ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO														
SOSTITUISCE L'ELABORATO N°					SOSTITUITO DALL'ELABORATO N°																
<b>CONSORZIO PER LE AUTOSTRADE SICILIANE</b> <b>AUTOSTRADA SIRACUSA – GELA</b> <b>2° TRONCO: ROSOLINI – RAGUSA</b> <b>LOTTO 10/11</b> <b>PROGETTO ESECUTIVO</b>																					
IDENTIFICAZIONE ELABORATO																					
E	A	1	8	1	0	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.											
<b>LOTTO 10 "IRMINIO"</b>  <b>RELAZIONE DI CALCOLO GALLERIE NATURALI</b>																					
DATA	DICEMBRE 2011				PROGETTAZIONE																
CODICE CAD-FILE	EA1810A00GN000STRE001A.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	0	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 10 "IRMINIO"**

**GALLERIE**

**RELAZIONE DI CALCOLO GALLERIE NATURALI**

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	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	6
2.	OGGETTO E SCOPO	7
3.	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	8
4.	CARATTERISTICHE DEI MATERIALI	9
5.	DESCRIZIONE GALLERIE	10
6.	CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA DI RIFERIMENTO	13
6.1.	Metodologia di valutazione dei parametri geomeccanici	14
7.	DESCRIZIONE 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	25
9.	METODOLOGIA DI ANALISI	27
10.	METODOLOGIA ADOTTATA PER LE VERIFICHE STRUTTURALI	29
10.1.	Analisi strutturale del rivestimento preliminare	29
10.1.1.	Redistribuzione delle sollecitazioni sugli elementi di sostegno	30
10.1.2.	Calcolo della capacità di sostegno	31
10.2.	Analisi strutturale del rivestimento definitivo	33
10.2.1.	Modalità di verifica agli stati limite ultimi	33
10.2.2.	Modalità di verifica agli stati limite di servizio	35
10.2.3.	Verifica delle gallerie senza predisposizione di armatura	37
11.	ANALISI DI STABILITA' CON IL METODO DELLE LINEE CARATTERISTICHE ED IL METODO DI TAMEZ	38
11.1.	Sezione alla progressiva 2+900 km	38
11.1.1.	Analisi di stabilità con il metodo delle linee caratteristiche	38
11.1.2.	Analisi di stabilità con il metodo di Tamez	43
11.2.	Sezione alla progressiva 3+200 km	44
11.2.1.	Analisi di stabilità con il metodo delle linee caratteristiche	45
11.2.2.	Analisi di stabilità con il metodo di Tamez	51
11.3.	Sezione alla progressiva 3+300 km	51
11.3.1.	Analisi di stabilità con il metodo delle linee caratteristiche	52
11.3.2.	Analisi di stabilità con il metodo di Tamez	57
12.	ANALISI CON METODI EMPIRICI	58
12.1.	RMR89 di Bieniawski	58
12.2.	Q System di Barton	59
12.3.	Rock Load di Terzaghi	61
12.4.	Confronto con i risultati delle linee caratteristiche	62

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	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							

12.5. Considerazioni conclusive	62
13. ANALISI CON IL METODO DEGLI ELEMENTI FINITI	63
13.1. Sezione alla progressiva 2+900 km	63
13.1.1. Risultati dell'analisi	64
13.1.2. Verifiche strutturali del rivestimento preliminare	68
13.1.3. Sollecitazioni agenti sul rivestimento definitivo	71
13.1.4. Verifiche strutturali del rivestimento definitivo	74
13.1.5. Analisi sismica del rivestimento definitivo	77
13.2. Sezione alla progressiva 3+200 km	79
13.2.1. Analisi di stabilità con il metodo agli elementi finiti	81
13.2.2. Verifiche strutturali del rivestimento preliminare	85
13.2.3. Sollecitazioni agenti sul rivestimento definitivo	87
13.2.4. Verifiche strutturali del rivestimento definitivo	91
13.2.5. Analisi sismica del rivestimento definitivo	94
13.3. Sezione alla progressiva 3+300 km	96
13.3.1. Analisi di stabilità con il metodo agli elementi finiti	98
13.3.2. Sollecitazioni agenti nel rivestimento definitivo	104
13.3.3. Verifiche strutturali del rivestimento definitivo	107
13.3.4. Analisi sismica del rivestimento definitivo	110
14. IMBOCCHI	113
15. STRUMENTAZIONE IN GALLERIA PER COSTRUZIONI IN CORSO D'OPERA	115
15.1. Generalità	115
15.2. Stazioni di convergenza	116
15.3. Rilievo geologico del fronte di scavo	117
15.4. Stazioni di controllo	117
16. CONCLUSIONI	119

 <b>INGEGNERIA</b>	E	A	1	8	1	0	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														

## Elenco simboli

$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	=	peso di volume
$\sigma_{ci}$ , $\sigma_c$ (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 all. (1995-2000)
Q	=	indice Q di Barton (1974)
$c_p$ , $c_r$ (kPa)	=	coesione di picco e residua
$\phi_p$ , $\phi_r$ (°)	=	angolo di attrito di picco e residuo
$\sigma_{v0}$ (MPa)	=	tensione verticale indisturbata (originaria)
D (-)	=	parametro di danneggiamento
E (MPa)	=	modulo di elasticità
$\sigma_{gd}$ (MPa)	=	resistenza a compressione dell'ammasso roccioso
$\sigma_{td}$ (MPa)	=	resistenza a trazione dell'ammasso roccioso
b	=	rapporto tra $\sigma_{td}$ e $\sigma_{gd}$
$\nu$ (-)	=	coefficiente di Poisson
$k_o$ (-)	=	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 <sup>2</sup> /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

 <b>TECNOLOGIA</b>	E	A	1	8	1	0	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							

- $f_{ck}$  (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  
 $I$  (m<sup>4</sup>) = 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

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	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							

## 1. INTRODUZIONE

La presente relazione analizza le gallerie naturali in progetto nell'ambito del Lotto 10 – Progetto esecutivo dell'autostrada Siracusa-Gela, nella tratta compresa fra Scicli e il fiume Irminio, denominata Lotto 10 “Irminio”.

Il lotto in esame rappresenta la naturale prosecuzione del Lotto 9 “Scicli” che prevede, nella sua parte terminale, la realizzazione dello svincolo autostradale di Scicli ed il suo collegamento alla strada statale Scicli-Donnalucata. Il lotto 10 si snoda quasi interamente entro il territorio comunale di Scicli, per terminare in corrispondenza della sponda destra del fiume Irminio, il cui impluvio marca il passaggio al Lotto 11. Tale connessione verrà realizzata mediante un viadotto autostradale a grandi luci sull'impluvio del fiume Irminio.

Il Lotto 10 presenta un'estensione di poco più di 5 km, e comprende, nel tratto centrale, la galleria naturale Truncafila il cui sviluppo lineare è pari a circa 860 m.

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. L'assetto litotecnico ed idrogeologico dei terreni che si incontreranno nel corso dello scavo della galleria è illustrato nel Profilo geomeccanico della Galleria Truncafila, separatamente per le carreggiate in direzione Gela e Siracusa.

La presente relazione riporta i risultati delle verifiche realizzate per la galleria naturale Truncafila.

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.

 <b>TECNOLOGIA</b>	E	A	1	8	1	0	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							

## 2. OGGETTO E SCOPO

Oggetto della presente relazione è la Galleria Truncafila, l'unica galleria naturale prevista nel tracciato in progetto.

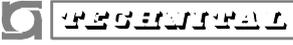
Lo scopo è quello di analizzare l'adeguatezza delle soluzioni realizzative previste per la galleria in questione, alla luce dell'assetto geomeccanico che la caratterizza.

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	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							

### 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”.

	E	A	1	8	1	0	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							

#### 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

 <b>TRUNCAFILA</b>	E	A	1	8	1	0	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						

## 5. DESCRIZIONE GALLERIE

Il tracciato in esame presenta una lunghezza complessiva di circa 5.1 km, di cui una porzione considerevole si pone in galleria, artificiale o naturale. Il tracciato prevede infatti alcune opere maggiori quali:

- Galleria Truncafila, a cui si riferisce la presente relazione;
- Galleria artificiale Cottonari, di lunghezza media 395 m, interamente in roccia calcarea;
- Rilevato Cottonari, a connessione della Galleria Truncafila lato Est con la Galleria artificiale Cottonari;
- Viadotto Irminio, di lunghezza 280 m circa.

La Galleria Truncafila è l'unica galleria naturale del Lotto 10 "Irminio". Si tratta di una galleria 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 0,40 m che porta la larghezza complessiva della carreggiata a 11,60 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 l'allargamento suddetto, necessita di un raggio interno di 7,20 m, con una organizzazione della piattaforma analoga alla precedente con la differenza che la banchina in sinistra diviene ora di 1,10 m. 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.

La galleria presenta una lunghezza complessiva di 861 m per quanto riguarda la canna lato Gela, e 854,98 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 29,43 m nella pista per Gela e a 29,27 m in quella per Siracusa, mentre sul lato opposto le relative lunghezze sono di 91,09 m e 77,29 m rispettivamente. Per quanto riguarda la tratta in naturale, la sua lunghezza nella pista per Gela è pari a 740 m, mentre in quella per Siracusa a 748,42 m. La galleria prevede, conformemente alle Linee Guida ANAS, 2 by-pass pedonali con interasse di 300 m; sono previste anche nicchie ogni 150 m sul lato destro della galleria.

 <b>INGEGNERIA</b>	E	A	1	8	1	0	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							

Il tracciato si snoda tra la zona morfologicamente pianeggiante di Contrada Lincino, caratterizzata dalla presenza di numerose serre, in parte interferenti col tracciato, e la località Cottonari nel comune di Scicli. Le coperture sono variabili da pochi metri, in corrispondenza degli imbocchi, a circa 23-25 m.

La galleria interessa i terreni terziari che costituiscono l'ossatura dell'Altipiano Ibleo. Tali terreni, denominati in geologia come "Formazione Ragusa" e "Formazione Tellaro", sono sovrapposti l'uno all'altro e coprono l'intervallo di tempo compreso tra l'Oligo-Miocene e il Miocene medio-superiore. Si tratta di terreni con caratteristiche geomeccaniche diverse sui quali poggiano, localmente, litotipi più recenti rappresentati dai Trubi, dalle calcareniti pleistoceniche e dai depositi alluvionali e detritici.

Procedendo da Siracusa verso Gela gli scavi della parte iniziale del lotto interessano la Formazione Ragusa. Superata la progressiva 2+200 km circa da inizio lotto, la presenza di un sistema di faglie orientato in direzione all'incirca nord/est-sud/ovest determina un abbassamento della successione carbonatica, con conseguente affioramento della sovrastante Formazione Tellaro generalmente mancante per erosione. Quest'ultima formazione si riscontra in affioramento sino alla progressiva di circa 3+300 km, interessando per 300 m il tracciato in galleria.

Gli imbocchi lato Siracusa della galleria Truncafila si trovano circa alla progressiva 2+750 km ed interessano, quindi, la Formazione Tellaro, costituita da marne, marne argillose e marne argillo-sabbiose di colore variabile dal giallastro, se alterate, al grigio-azzurro, se integre. Il tracciato in galleria interessa le marne del Tellaro fino alla progressiva 3 km, zona nella quale si intercetta il contatto con la sottostante Formazione Ragusa. Quest'ultima è costituita da calcareniti ben stratificate di colore variabile dal biancastro al grigio, suddivise in banchi con spessori decimetrici. Localmente vi si trovano intercalati livelli calcareo-sabbiosi e calcareo-marnosi con spessori variabili da pochi centimetri sino a diversi decimetri.

Il tratto rimanente della galleria interesserà esclusivamente le sopra citate calcareniti della Formazione Ragusa sino a raggiungere gli imbocchi lato Gela.

Dalla schematizzazione sopra riportata si comprende che il tratto più complesso della galleria, oltre agli imbocchi lato Siracusa, è quello centrale, ovvero quello compreso tra le progressive 3+000 km e 3+300 km. In tale tratto, infatti, si riscontra un contatto stratigrafico importante tra terreni con caratteristiche meccaniche e idrogeologiche

 <b>TRUNCAFILA</b>	E	A	1	8	1	0	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						

differenti, tale contatto è complicato dalla presenza di una faglia diretta orientata all'incirca nord-est/sud-ovest posta alla progressiva 3.200 m rispetto all'inizio del lotto. Si rimanda al “Profilo geotecnico e geomeccanico asse principale” in direzione Gela e Siracusa per i dettagli relativi all’assetto litologico e geomeccanico degli ammassi rocciosi intercettati dalla galleria Truncafila.

Per quanto riguarda l'aspetto idrogeologico si può dire che le caratteristiche di permeabilità dei litotipi afferenti alla Formazione Ragusa sono molto variabili, con coefficiente di permeabilità elevato in corrispondenza delle porzioni dell’ammasso roccioso molto fratturato e con fratture parzialmente beanti e coefficiente di permeabilità più ridotto laddove l’ammasso roccioso è poco fratturato o interessato dalla presenza di livelli marnosi. Le prove di permeabilità effettuate durante la campagna d’indagine hanno comunque evidenziato valori di permeabilità sempre modesti. I terreni appartenenti alla Formazione Tellaro possono considerarsi invece poco permeabili o impermeabili.

In siffatte condizioni idrogeologiche ci si può attendere delle venute idriche non copiose in corrispondenza delle faglie e del contatto tra le marne della Tellaro e le calcareniti della Ragusa. Per quanto riguarda la falda acquifera vera e propria si può affermare che questa è essenzialmente relegata nell’ambito delle formazione carbonatica e staziona a notevole profondità dal piano campagna (> 120m dal p.c.). A riprova di ciò si evidenzia che le indagini svolte escludono la presenza, almeno nell’area in studio e a profondità prossima alla livelletta autostradale, di una circolazione idrica significativa in seno ai calcari della Ragusa.

 <b>INGEGNERIA</b>	E	A	1	8	1	0	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							

## 6. CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA DI RIFERIMENTO

Nel periodo compreso tra il mese di gennaio 2003 e giugno 2004 sono state eseguite indagini geognostiche al fine di dettagliare i rapporti esistenti fra i diversi tipi litologici affioranti lungo il tracciato autostradale. Sulla scorta delle indagini geognostiche e dei rilievi di superficie è stato possibile mappare i diversi litotipi e valutarne le caratteristiche geotecniche e idrogeologiche.

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

- dati bibliografici;
- 6 stazioni di rilievo geostrutturale degli affioramenti rocciosi nella Formazione Ragusa, ed una in corrispondenza della Cava Truncafila, interamente scavata nelle marne del Tellaro;
- dati derivanti dalla campagna di indagini geognostiche, quali:
  1. 19 sondaggi geognostici a carotaggio continuo, con profondità variabili fra i 25 ed i 50 metri, di cui i sondaggi S33Pz, S40bPz, S41Pz strumentati 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. 11 pozzetti esplorativi;
  5. n° 21 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 i calcari della Formazione Ragusa e le marne della Formazione Tellaro, 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  $\sigma_c$  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;

 <b>TRUNCAFILA</b>	E	A	1	8	1	0	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							

- 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.

Le marne della Formazione Tellaro presentano invece le seguenti caratteristiche:

- Resistenza a compressione uniassiale  $\sigma_c$  variabile fra 2 e 4 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;
- 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.

La caratterizzazione dei litotipi intercettati dalla Galleria Truncafila è riportata nel relativo “Profilo geotecnico e geomeccanico 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  $\sigma_c$  ed il parametro  $m_i$  della roccia intatta.

Il parametro  $m_i$ , si è assegnato un valore pari a 10 punti per quanto riguarda i calcari della Formazione Ragusa, pari a 6 per le marne del Tellaro.

L'involuppo di rottura è espresso dalla seguente equazione:

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

Dove:

$\sigma_c$  = resistenza a compressione uniassiale della roccia intatta (MPa);

 <b>INGEGNERIA</b>	E	A	1	8	1	0	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														

- $m$  = 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 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  $\sigma_c$  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

 <b>GENERAL</b>	E	A	1	8	1	0	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							

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’inviluppo di resistenza di Mohr-Coulomb, definendo i parametri coesione e angolo di attrito nelle condizioni di picco e residue.

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	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 SEZIONI TIPO

### 7.1. Premessa

La galleria è caratterizzata da due fornicati affiancati, ad interasse di circa 45 m, con copertura variabile da pochi metri in corrispondenza dell'imbocco fino alla massima di circa 25 m, nella sua zona centrale.

Essa interessa, procedendo da Siracusa verso Gela, dapprima, fino circa alla progressiva 3+000, la formazione del Tellaro, caratterizzata da marne, marne argillose e calcari marnosi, quindi la formazione Ragusa, costituita da calcari, calcareniti e calciruditi, fino all'imbocco opposto.

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 ed in fase di attacco della galleria vero e proprio, avendo opportunamente irrigidito il fronte 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 stesse con spritz beton e chiodi (questi ultimi ove necessari).
- 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.

 <b>TECNOLOGIA</b>	E	A	1	8	1	0	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							

- Messa in opera di 6 centine accoppiate, costituite ciascuna da 2 IPN180, 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 casseratura con pternvometal 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 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 proprio lo scopo di mantenere l'ammasso roccioso, con i trattamenti previsti, pressoché in campo elastico. Questo fatto è essenziale per evitare convergenze rilevanti.

 <b>INGEGNERIA</b>	E	A	1	8	1	0	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							

Il progetto della galleria principale prevede l'adozione di 3 sezioni tipo fondamentali, descritte di seguito, la tipo Ac, B0 e B0V; vi sono poi le sezioni Ac(40, B0(40) e B0V(40) 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 0,40 m, portandola quindi da 0,70 m a 1,10 m.

### 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 priverivestimento costituito solo da spritz beton e centine metalliche leggere.

Le fasi realizzative sono le seguenti:

- a) Scavo. Scavo a piena sezione con sfondi massimi pari ad 3,0 m.
- b) Priverivestimento. 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.
- 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 priverivestimento verrà posto in opera il tessuto non tessuto da 500 gr/m<sup>2</sup> 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 1 riporta la schematizzazione della sezione tipo Ac.

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	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														

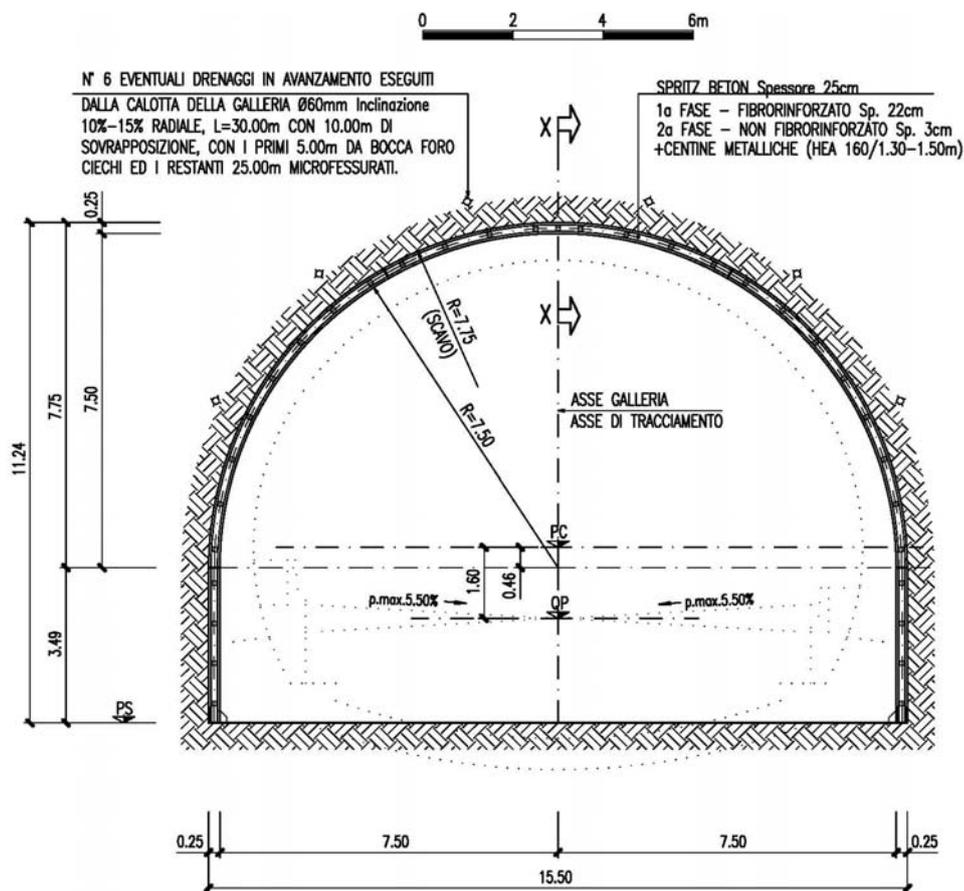


Figura 1 - Sezione tipo Ac

### 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 fratturazione leggermente maggiore.

Le fasi realizzative sono le seguenti:

- Scavo. Scavo a piena sezione con sfondi massimi pari ad 1,20 m.
- 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.
- 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.
- Impermeabilizzazione e drenaggio. Contro il prerivestimento verrà posto in opera il tessuto non tessuto da 500 gr/m<sup>2</sup> ricoperto dalla guaina impermeabile di pvc con

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 21
	Pr	Strada	Lotto	Macro opera	Opera	Parte di opera	Tipo elab	N. Elab.	Rev														

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 2 riporta la schematizzazione della sezione tipo B0.

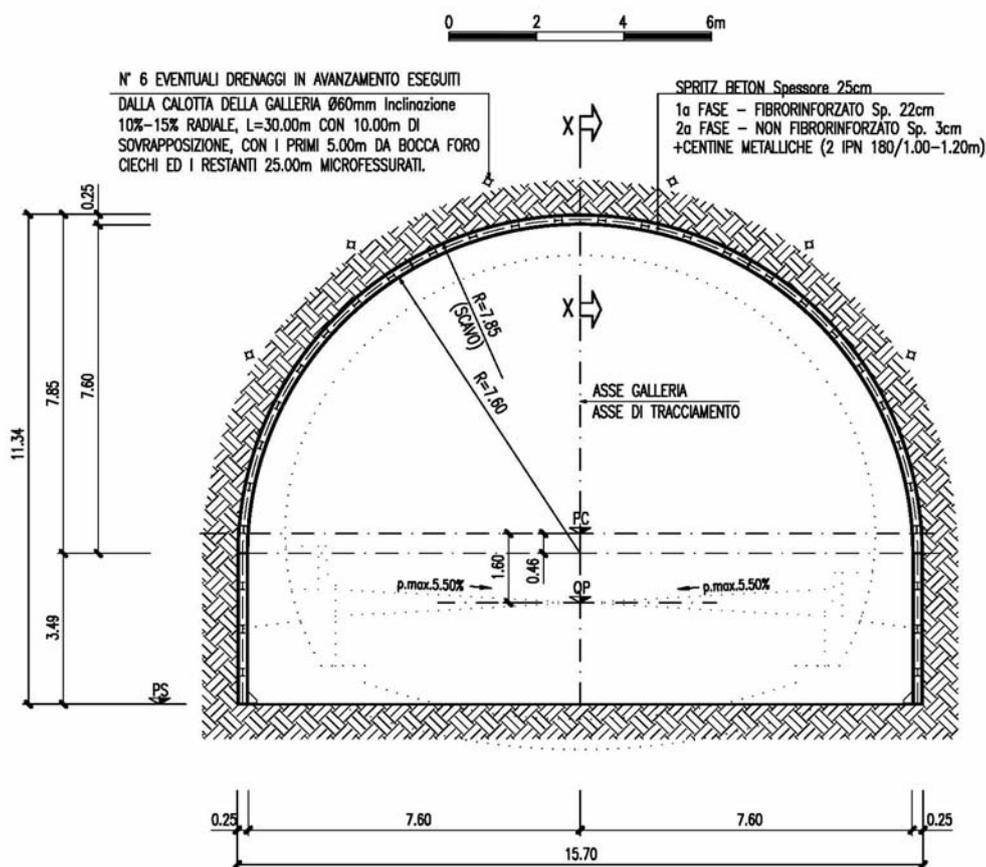


Figura 2 - Sezione tipo B0

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	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 B0V

La sezione tipo B0V 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:

- a) 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 priverivestimento e garantire la stabilità dell'ammasso roccioso nel tratto tra il fronte ed il priverivestimento 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 priverivestimento. Nel caso in esame la lunghezza libera, o sfondo consentito, è pari 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) Priverivestimento. 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/m<sup>2</sup> 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 3 riporta la schematizzazione della sezione tipo B0V.

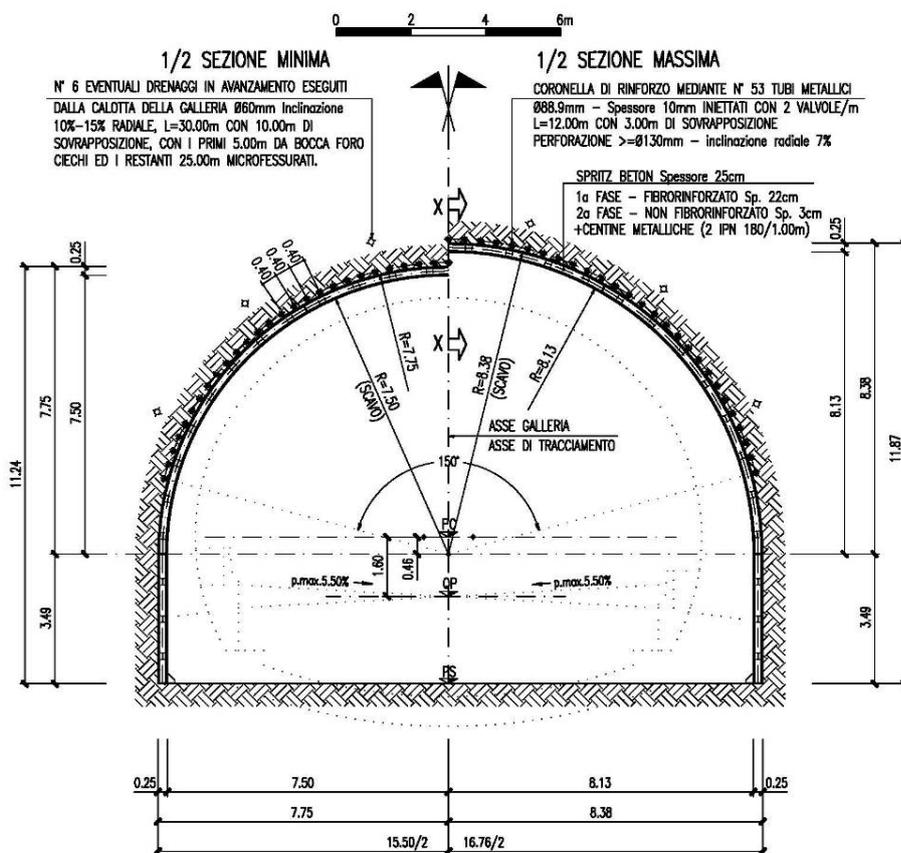


Figura 3 - Sezione tipo B0V

 <b>GENERAL</b>	E	A	1	8	1	0	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							

Come detto precedentemente, a queste sezioni tipo di scavo si affiancano le corrispondenti Ab(40), Ac(40), B0(40) e B0V(40) che sono analoghe come interventi di consolidamento, pririvestimento e rivestimento definitivo alle omologhe appena descritte, con l'unica differenza che tali sezioni presentano una banchina in sinistra più ampia di 0,40 m per tenere conto delle necessità di allargamento emerse in seguito alle verifiche di visibilità.

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 25
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

## 8. SCELTA DELLE SEZIONI DI CALCOLO

La Galleria Truncafila è suddivisibile, da un punto di vista litologico e geomeccanico, in tre tratte:

- Dall'imbocco lato Siracusa fino circa alla progressiva 3+000 km, la galleria interessa la Formazione Tellaro, caratterizzata da marne e marne argillose, con coperture variabili fra pochi metri e 35 m;
- Dalla pk 3+000 km circa fino all'imbocco lato Gela, la galleria interessa invece i calcari e calcareniti della Formazione Ragusa, con coperture analoghe a quelle della tratta precedente;
- In corrispondenza della progressiva 3+200 km circa, la galleria è interessata da una importante faglia diretta sub-verticale caratterizzata da un rigetto di circa 12-13 m, che mette a contatto due lembi calcarei.

Alla luce di queste considerazioni, si è ritenuto opportuno analizzare tre diverse sezioni della galleria, ciascuna appartenente ad una delle tratte individuate, Figura 4.

La prima sezione di analisi è la sezione posta alla progressiva 2+900 km, in Tellaro, caratterizzata da una copertura di circa 22 m dalla livelletta. Tale sezione è stata scelta come rappresentativa dell'intera tratta in marna, in quanto caratterizzata da una copertura medio-massima.

La seconda sezione di analisi è posizionata alla progressiva 3+200 km, con copertura di 28 metri dalla livelletta, caratterizzata da una delle maggiori coperture della tratta entro la Formazione Ragusa, in corrispondenza di uno specchio di faglia che ha determinato lo scorrimento relativo tra i due lembi a contatto.

La terza sezione di analisi si pone invece entro la Formazione Ragusa, in una tratta caratterizzata da una buona qualità geomeccanica, ed è posizionata alla progressiva 3+300 km, con copertura di 35 metri dalla livelletta.

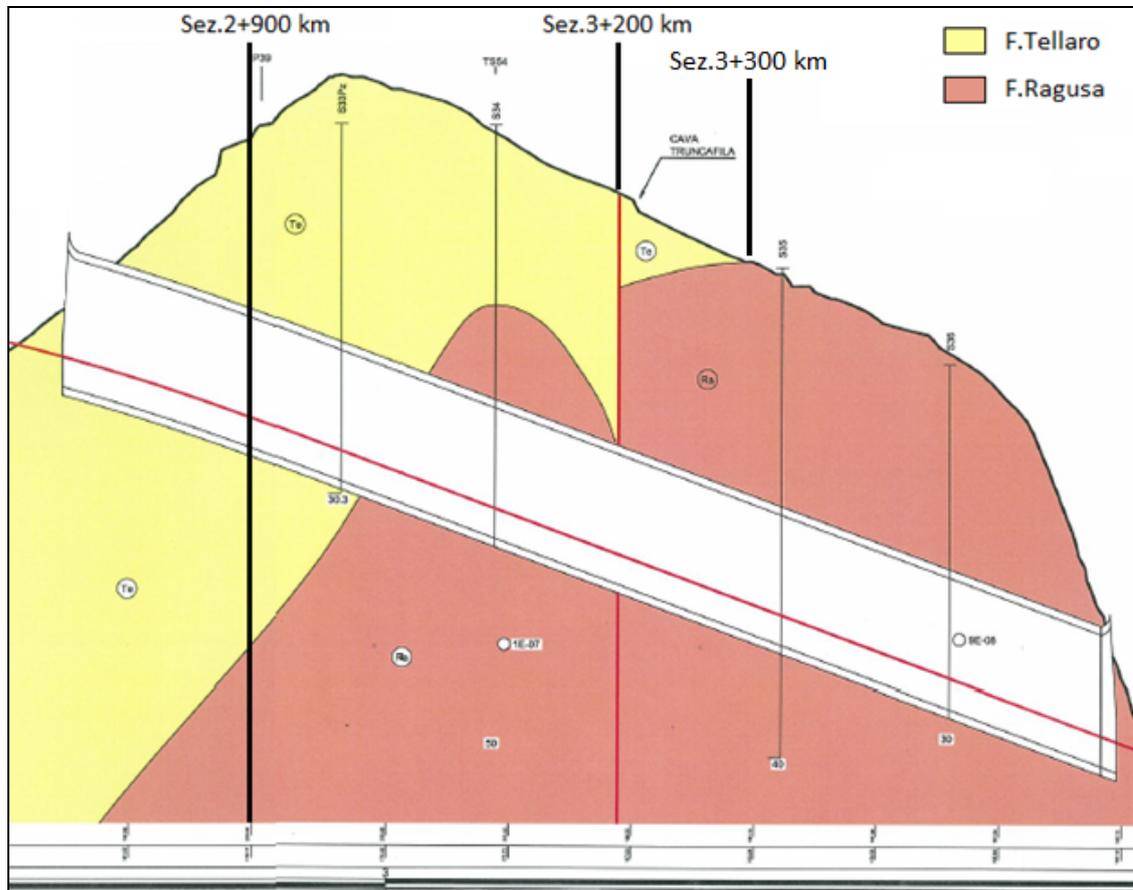


Figura 4 – Sezioni di calcolo – Galleria Truncafila

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 27
	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.

 <b>TECNOLOGIA</b>	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 28
	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.

 <b>INGENIERIA</b>	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 29
	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 5. Generalmente nei modelli numerici tale sezione viene modellata come un sostegno equivalente caratterizzato da uno spessore  $t_{eq}$  ed un modulo elastico  $E_{eq}$ .

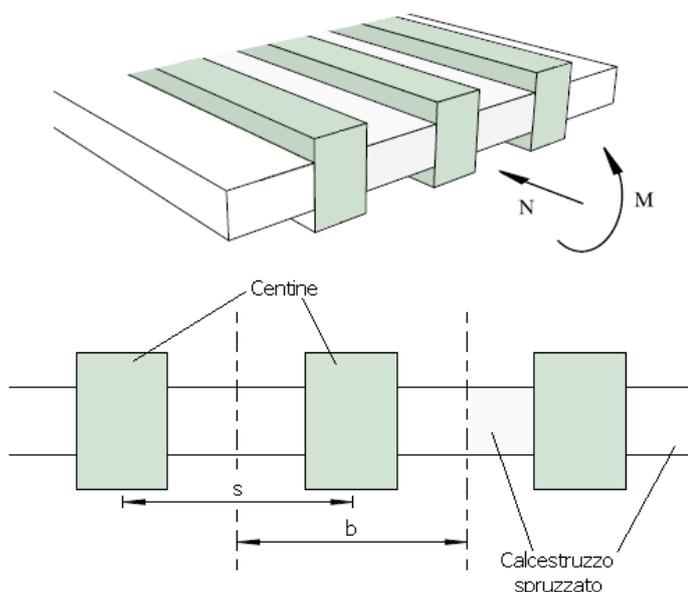


Figura 5 - Geometria di riferimento (Hoek, 2009, modificato)

 <b>TECNOFERRA</b>	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 30
	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  $s \cdot t_{cls}^3 / 12$ );

$\nu$  = 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 redistribuire tali sollecitazioni sui due diversi componenti del sistema di supporti composito.

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	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														

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:

Momento flettente

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

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

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)

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 :

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

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	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									

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

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

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

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

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, accorpare 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 10.2.1 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.

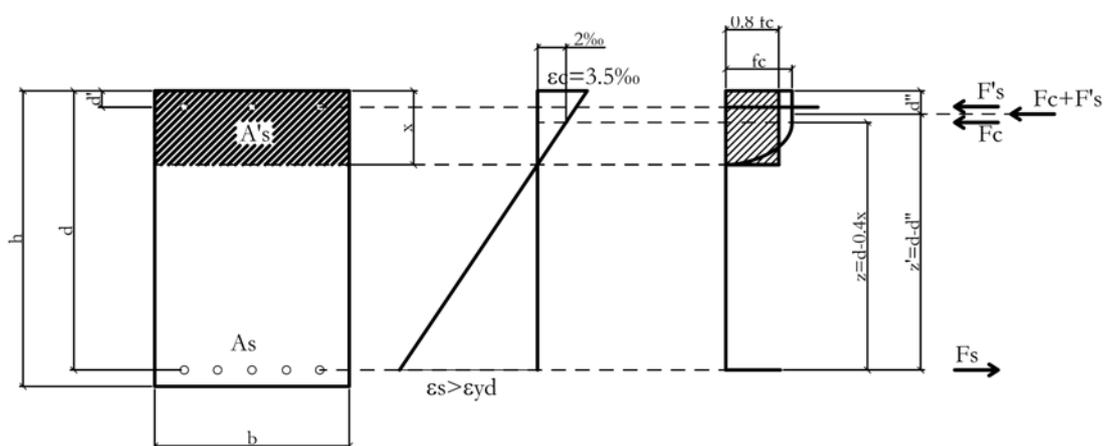


Figura 6 – Schema di calcolo del momento resistente

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	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														

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:

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

$$d'' = \frac{F'_S \cdot d' + F_C \cdot 0.4 \cdot x}{F_C + F'_S}$$

dove  $d''$  viene valutato come:

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

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

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

#### 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:

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

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

$$\rho_1 = \text{percentuale d'armatura di trazione } A_s/(bwd) \leq 0.02$$

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

$d$  = altezza utile della sezione

 <b>INGEGNERIA</b>	E	A	1	8	1	0	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														

$b_w$  = 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:

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

$A_{sw}$  = area dell'armatura trasversale

$s$  = interasse tra le armature

$\alpha$  = angolo di inclinazione dell'armatura rispetto all'asse della trave

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

$\alpha_c$  = coefficiente maggiorativo dipendente dalla compressione della membratura

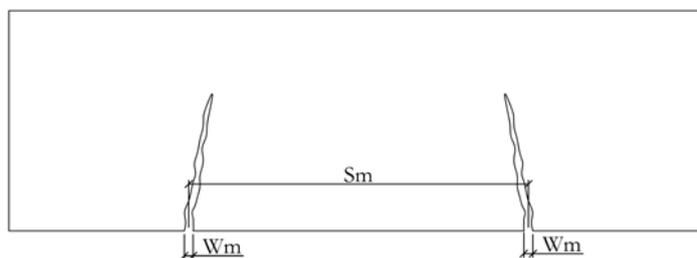
### 10.2.2. Modalità di verifica agli stati limite di servizio

#### 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:

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	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										



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

dove, l'espressione di  $s_m$  in millimetri è:

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

con:

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

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

$\phi$  = diametro delle barre espresso in millimetri

$\rho_r$  = percentuale d'armatura tesa

e l'espressione di  $\varepsilon_m$ , 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:

$\sigma_{cr}$  = tensione di trazione nelle barre di acciaio conseguente all'applicazione del momento di prima fessurazione

$\sigma_s$  = tensione di trazione nelle barre d'acciaio in corrispondenza della generica sezione parzializzata.

$E_s$  = modulo di elasticità dell'acciaio

$\beta_1$  = coefficiente sull'aderenza delle barre (0.5 per barre lisce e 1 per barre ad aderenza migliorata).

 <b>INGEGNERIA</b>	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 37
	Pr	Strada			Lotto	Macro opera		Opera			Parte di opera		Tipo elab	N. Elab.		Rev							

$\beta_2$  = 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.

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	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							

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

### 11.1. Sezione alla progressiva 2+900 km

Copertura 22 m da livelletta

#### Proprietà della sezione di calcolo:

La sezione interessa le marne della Formazione Tellaro, caratterizzate dai seguenti parametri geotecnici:

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

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

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

$$E = 630 MPa$$

$$\nu = 0.25$$

$$k_0 = 1$$

R medio galleria = 7 m

La sezione tipo adottata è la B0, che rappresenta la sezione minima prevista nella tratta in cui la galleria intercetta la Formazione Tellaro. La sezione di sostegno prevede l'installazione di centine metalliche accoppiate 2IPN180, con spaziatura variabile fra 1 e 1.2 m, ed uno strato di 25 cm di spritz beton fibrorinforzato. L'avanzamento previsto è di 1.2 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.

Si sottolinea che, a rigore, tale metodologia è valida per gallerie poste a grande profondità, laddove è presumibile ipotizzare un coefficiente di spinta a riposo circa pari a 1, corrispondente ad uno stato tensionale di tipo idrostatico. Nel caso in esame, la sezione di calcolo è caratterizzata da una copertura medio-bassa. Si ritiene però di poter associare al litotipo in esame un coefficiente  $k_0$  pari all'unità, per tener conto della storia tensionale che lo ha caratterizzato e della struttura dell'ammasso.

Nelle figure si propongono i risultati dell'analisi realizzata considerando un cavo privo di sostegni. In Figura 7 si riportano le curve caratteristiche del fronte e del cavo: si osserva una sostanziale stabilità del cavo, con spostamenti massimi inferiori al centimetro al cavo, inferiori ai 4 mm al fronte. La Figura 8 riporta l'estensione delle zone plastiche al cavo e al fronte in assenza di sostegni: la plasticizzazione raggiunge uno spessore di 2.5-3 m al contorno galleria, di 1 m al fronte.

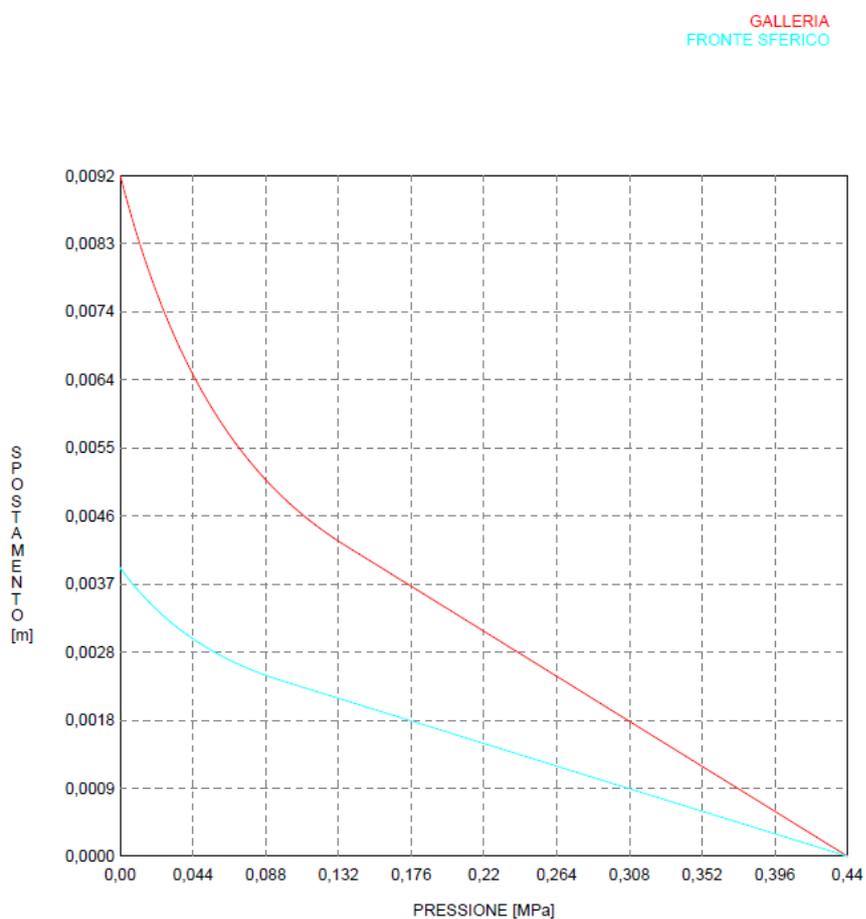
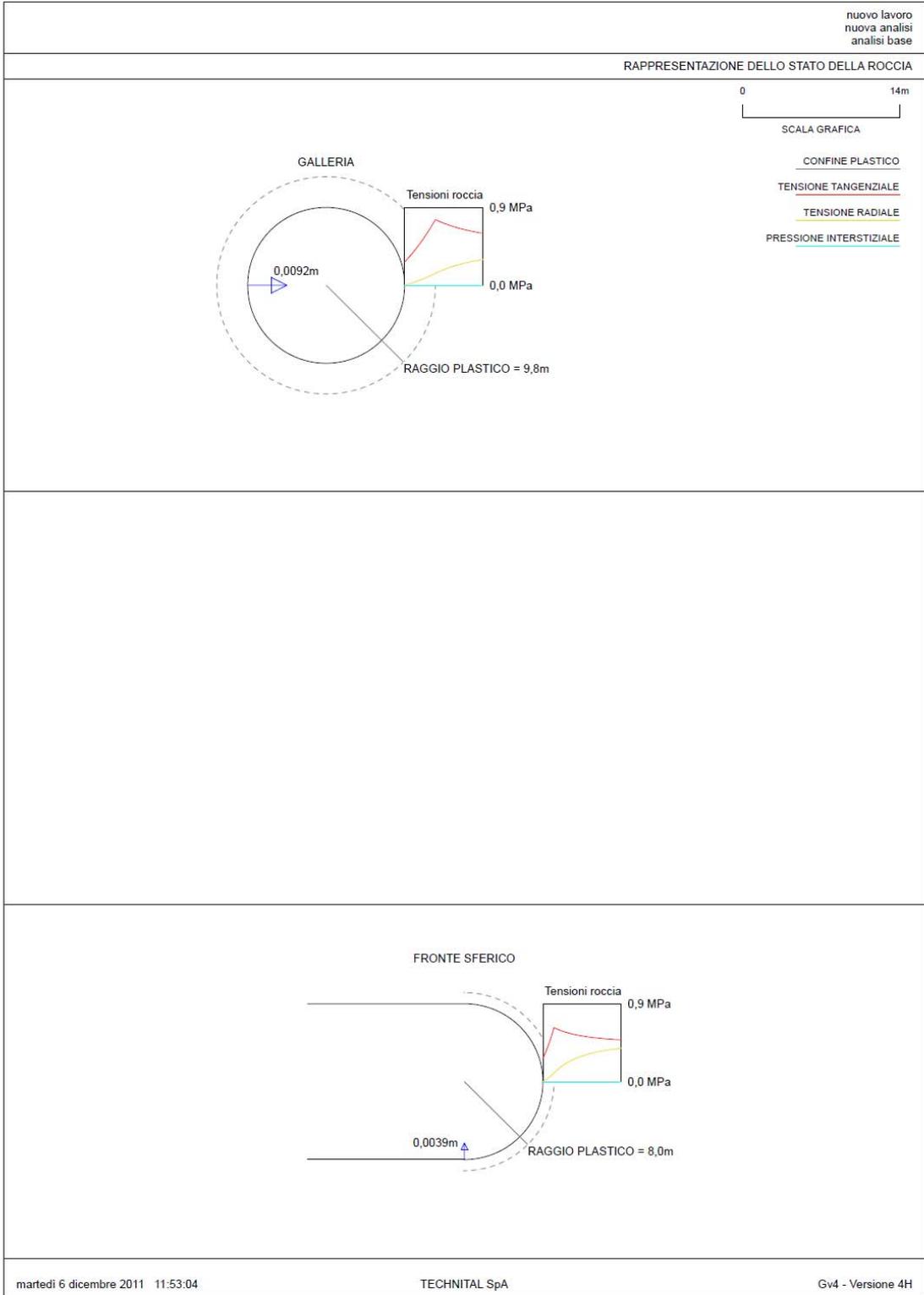


Figura 7 – Curve caratteristiche del fronte e del cavo in assenza di sostegni



*Figura 8 – 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 B0, ad una distanza dal fronte di 1.2 m per quanto riguarda i sostegni di prima fase, a 50 metri per il rivestimento definitivo.

La Figura 9 riporta nuovamente le curve caratteristiche del fronte e del cavo, in relazione alle linee di reazione dei sostegni: si osserva dunque una riduzione degli spostamenti del cavo alla posa dei rivestimenti preliminari, che si assestano sui 5-6 mm. In Figura 10 si propongono le sollecitazioni previste sui sostegni di prima e seconda fase: tutte le sollecitazioni risultano sempre inferiori ai limiti di resistenza dei materiali.

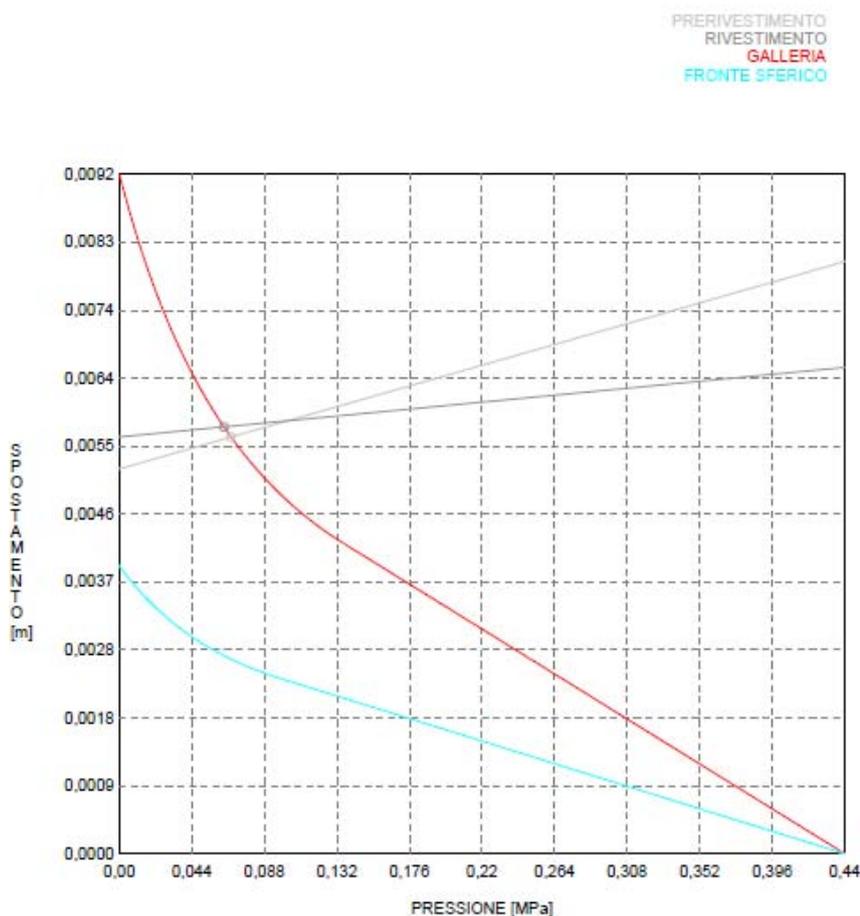
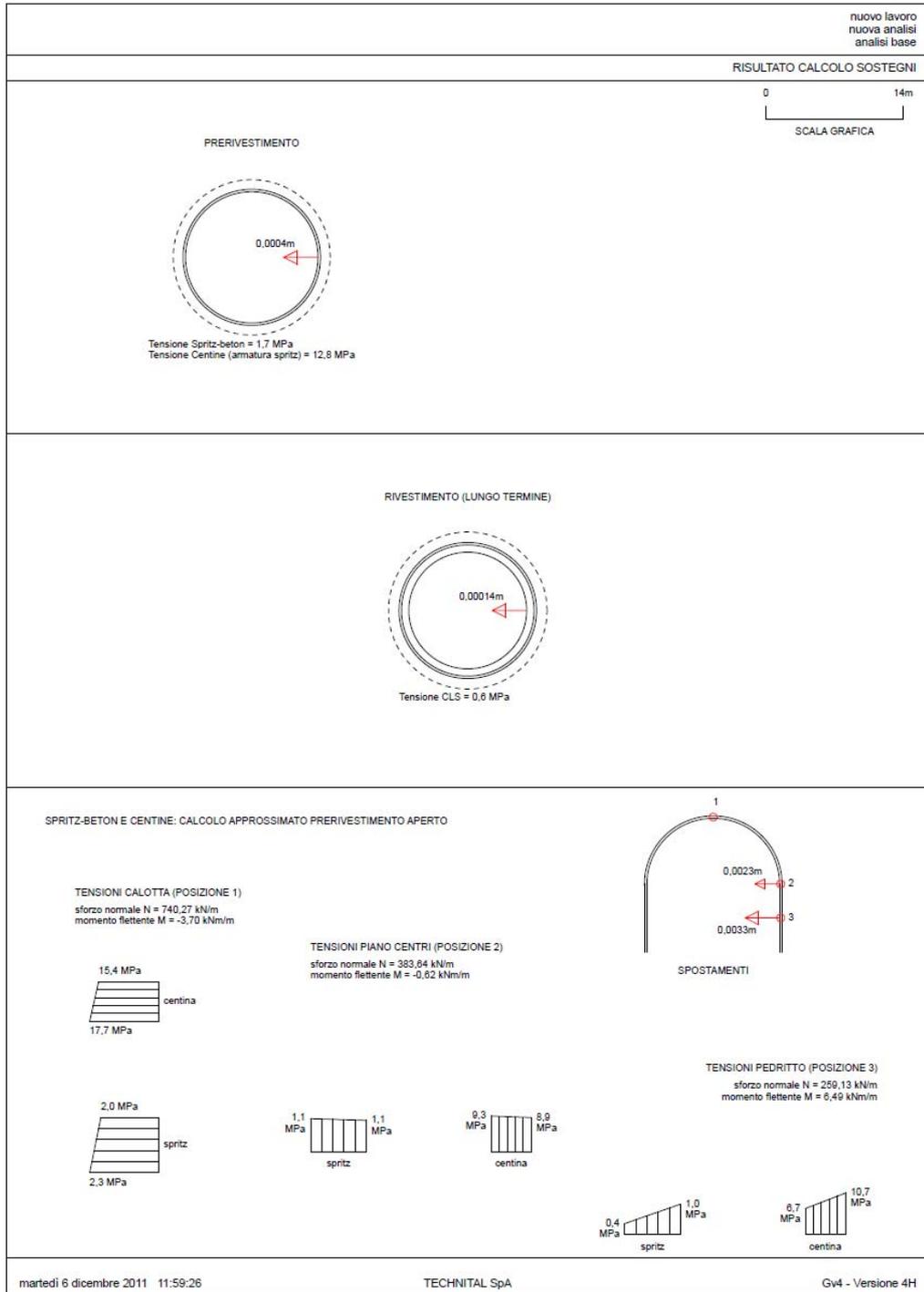


Figura 9 – Curve caratteristiche del fronte e del cavo in presenza dei rivestimenti di prima e seconda fase.



*Figura 10 – 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 Truncafila, considerando un avanzamento di 1.2 m. L'analisi considera i parametri non drenati del materiale. I risultati, Figura 11, evidenziano una sostanziale stabilità del fronte e del cavo, con fattori di sicurezza rispettivamente pari a 1.6 per quanto riguarda il fronte, a 8.9 relativamente alla stabilità della chiave. Il fattore di sicurezza globale è pari a 1.55.

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

##### RIASSUNTO DATI DI INGRESSO

GEOMETRIA			
a	lunghezza libera	1,2	m
A	h galleria	11,4	m
D	largh. galleria	16,3	m
L	estens. longitud. cono	11,40	m
H	copertura da calotta	14	m
Z <sub>d</sub>	tratto di influenza scavo	14,00	m
S	sezione di scavo	157,31	m <sup>2</sup>

TERRENO			
$\gamma$	peso di volume	20	kNm <sup>-3</sup>
c	coesione	100	kPa
$\phi$	attrito	0	°
q <sub>s</sub>	sovraccarico	0	kPa

CONDIZIONI IDRAULICHE			
$\gamma_w$	peso di volume	10	kN/m <sup>3</sup>
$\alpha_1$	condizioni di drenaggio	0,4	
$\beta$	permeab. ammasso	1	
h <sub>w</sub>	copertura acqua	0	m
	presenza di raggiera drenante in chiave?	no	si/no

##### RIASSUNTO RISULTATI - no interventi

STABILITA' DEL FRONTE			
FS <sub>f</sub>	fattore di sicurezza	1,6	
p <sub>f</sub>	pressione al fronte	0,00	kPa
p <sub>f,max</sub>	pressione massima applicabile	124,00	kPa

STABILITA' DELLA CHIAVE			
FS <sub>c,pl</sub>	fattore di sicurezza alla plasticizzazione	8,95	
FS <sub>c</sub>	fattore di sicurezza	8,9	
p <sub>c</sub>	pressione in chiave	0,00	kPa

STABILITA' GLOBALE			
FS <sub>g</sub>	fattore di sicurezza	1,55	

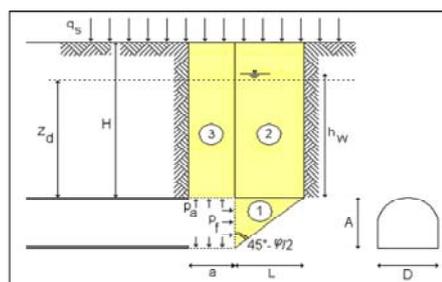


Figura 11 – Analisi di stabilità con il metodo di Tamez

## 11.2. Sezione alla progressiva 3+200 km

Copertura 28 m da livelletta

Proprietà della sezione di calcolo:

In Figura 12 è proposta la caratterizzazione dei calcari della Formazione Ragusa in corrispondenza della zona di faglia, per la copertura che compete alla sezione in esame:

copertura		25	m	
peso specifico ammasso		23	kN/m <sup>3</sup>	
indici caratterizz.	RMR <sub>89</sub>	46		
	BRMR	-		
	Q'	-		
	m <sub>i</sub>	10		
	σ <sub>c</sub>	28	MPa	
	σ <sub>v0</sub>	0,58	MPa	
	GSI	41,00		
Hoek - Brown	m <sub>p</sub> (di picco)	1,22		
	s <sub>p</sub> (di picco)	1,42E-03		
	m <sub>r</sub> (residuo)	0,85		
	s <sub>r</sub> (residuo)	5,69E-05		
Mohr - Coulomb	copertura	c <sub>p</sub> (di picco)	0,251	MPa
		φ <sub>p</sub> (di picco)	51	°
		c <sub>r</sub> (residuo)	0,184	MPa
		φ <sub>r</sub> (residuo)	48	°
	origine	c <sub>p</sub> (di picco)	0,112	MPa
		φ <sub>p</sub> (di picco)	64	°
		c <sub>r</sub> (residuo)	0,012	MPa
		φ <sub>r</sub> (residuo)	64	°
parametri di resistenza	E	3,15	GPa	
	σ <sub>gd</sub>	1,06	MPa	
	σ <sub>tg</sub>	-0,03	MPa	
	β	0,031		

Figura 12 – Parametri geotecnici della faglia alla pk 3+200 km

R medio galleria = 7 m

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 45
	Pr	Strada			Lotto		Macro opera		Opera			Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev					

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. Tale sezione prevede:

Infilaggi metallici al contorno di scavo distribuiti su un angolo di 150° in calotta;

Centine metalliche accoppiate 2IPN180 con interasse 1 m;

Spritz-beton fibrorinforzato, spessore 25 cm.

#### 11.2.1. 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.

Si sottolinea che, a rigore, tale metodologia è valida per gallerie poste a grande profondità, laddove è presumibile ipotizzare un coefficiente di spinta a riposo circa pari a 1, corrispondente ad uno stato tensionale di tipo idrostatico. Nel caso in esame, la sezione di calcolo è caratterizzata da una copertura medio-bassa. Si ritiene però di poter associare al litotipo in esame un coefficiente  $k_0$  pari all'unità, per tener conto della storia tensionale che lo ha caratterizzato e della struttura dell'ammasso.

Nelle figure si propongono i risultati dell'analisi realizzata considerando un cavo privo di sostegni. In Figura 13 si riportano le curve caratteristiche del fronte e del cavo: si osserva un comportamento pressoché elastico della roccia, con spostamenti di ordine millimetrico. La Figura 14 riporta l'estensione delle zone plastiche al cavo e al fronte in assenza di sostegni: la plasticizzazione è assente sia in corrispondenza del fronte che al cavo.

GALLERIA  
FRONTE SFERICO

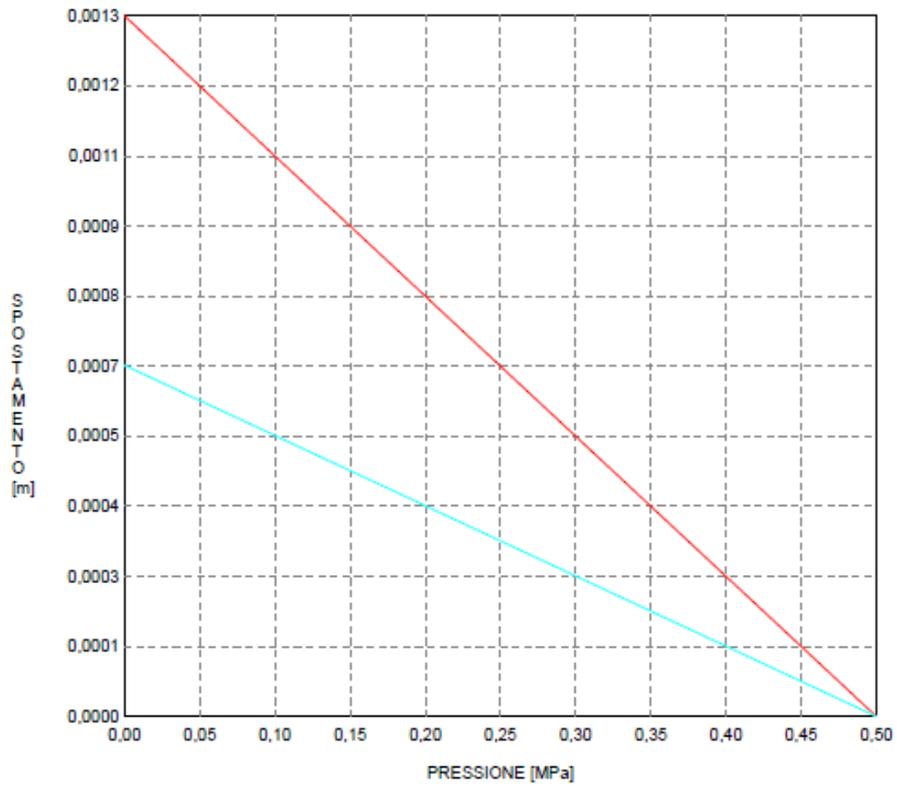
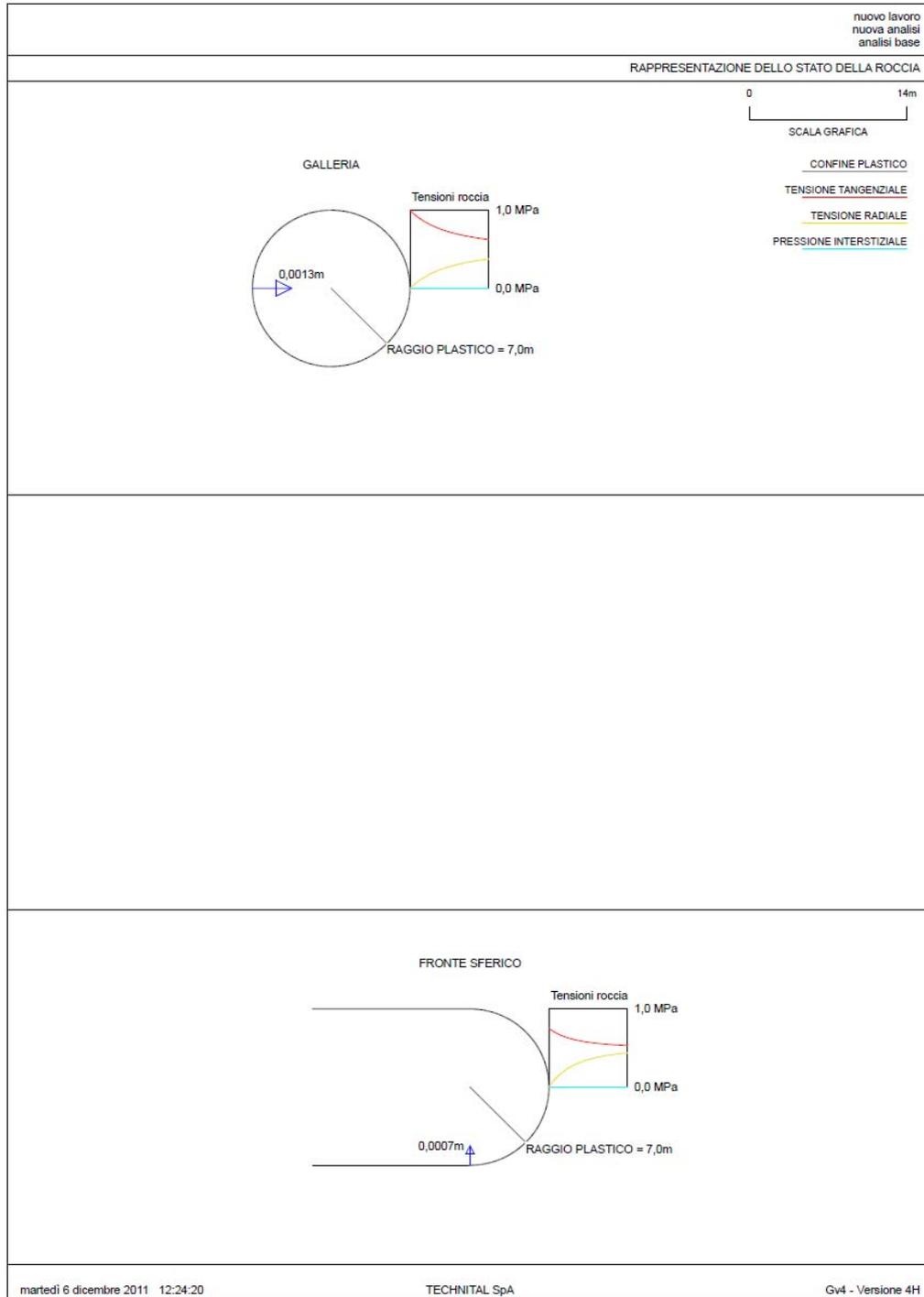


Figura 13 – Curve caratteristiche del fronte e del cavo in assenza di sostegni



*Figura 14 – Zone plastiche al contorno galleria in assenza di sostegni*

 <b>TECERRE</b>	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 48
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

Si propongono ora gli stessi risultati ottenuti ipotizzando la messa in opera dei rivestimenti previsti dalla sezione B0V, ad una distanza di 1 m per quanto riguarda i sostegni di prima fase, a 42 metri dal fronte, ovvero 3 diametri, per il rivestimento definitivo.

La Figura 15 riporta nuovamente le curve caratteristiche del fronte e del cavo, in relazione alle linee di reazione dei sostegni. In Figura 16 si propongono le sollecitazioni previste sui sostegni di prima e seconda fase: tutte le sollecitazioni risultano molto ridotte sia sull'accoppiamento centine-spritz, sia sul definitivo, e comunque sempre inferiori ai limiti di resistenza dei materiali.

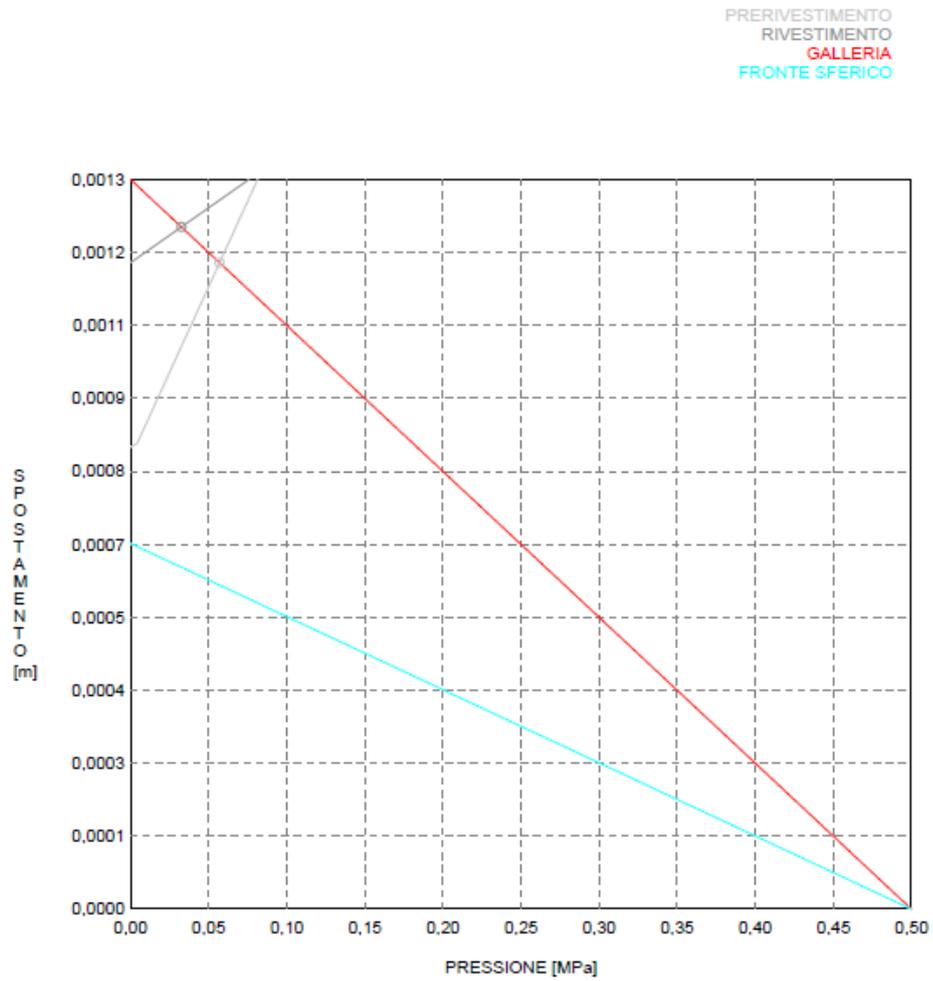
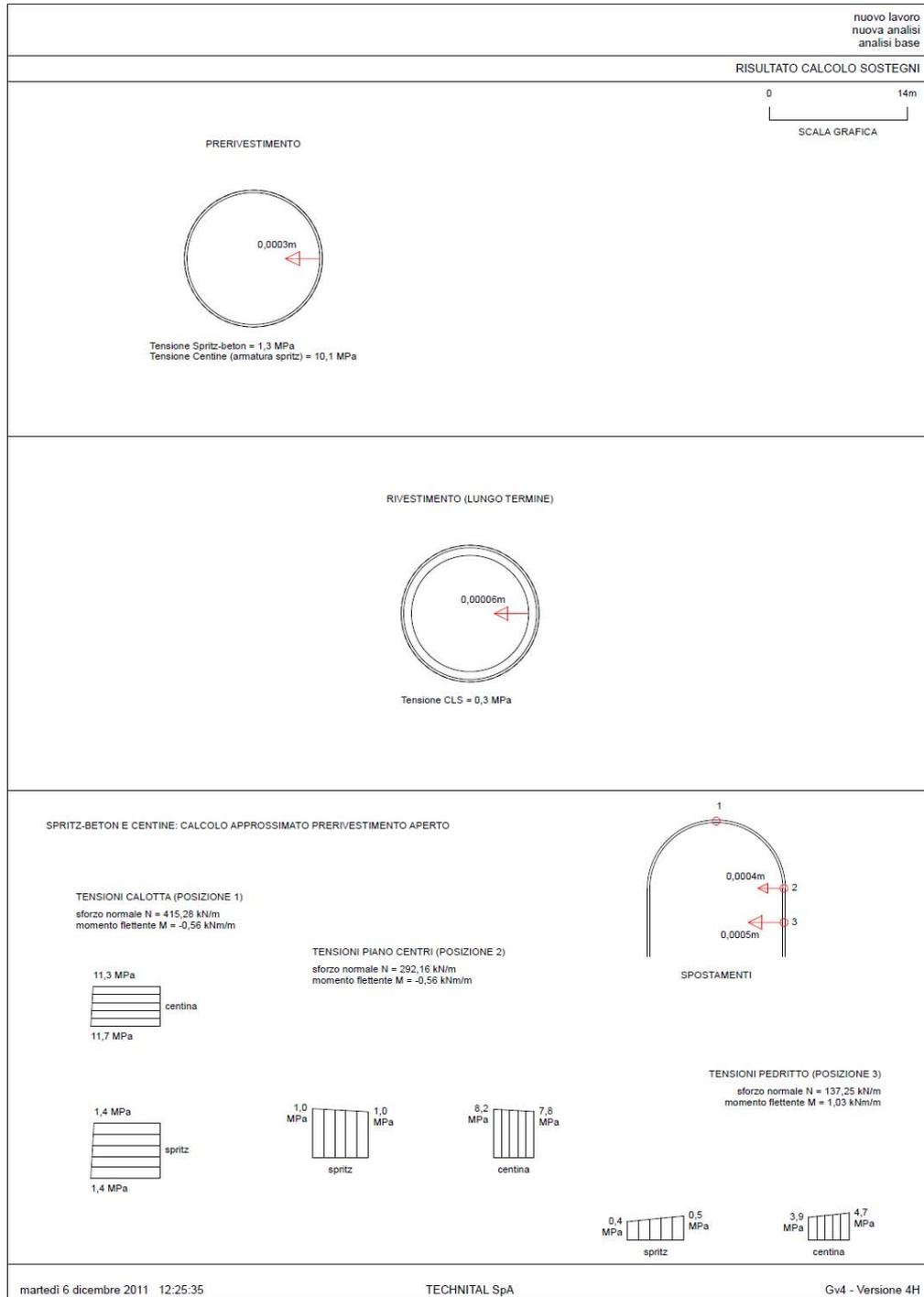


Figura 15 – Curve caratteristiche del fronte e del cavo in presenza dei rivestimenti di prima e seconda fase.



*Figura 16 – Sollecitazioni agenti sui sostegni di prima e seconda fase*

### 11.2.2. 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 1 m. I risultati, Figura 17, evidenziano una sostanziale stabilità del fronte e del cavo, con fattori di sicurezza rispettivamente pari a 2.9 per quanto riguarda il fronte, 1.1 relativamente alla stabilità della chiave. Il fattore di sicurezza globale è pari a 2.32.

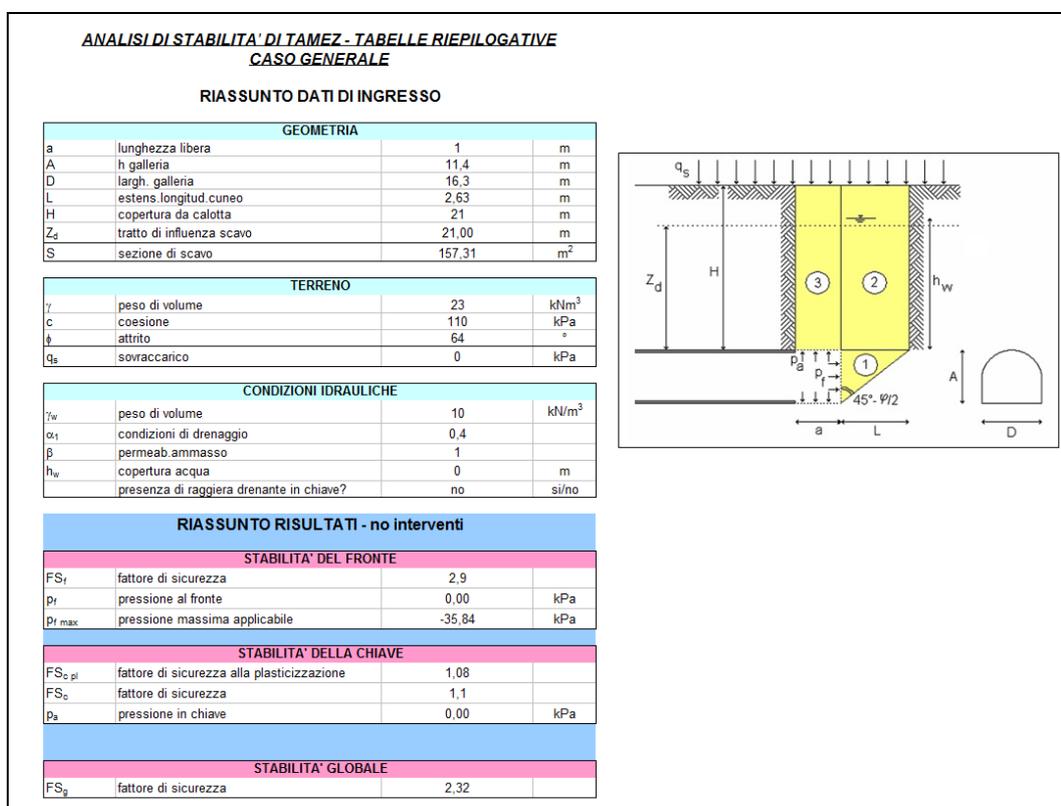


Figura 17 – Analisi di stabilità con il metodo di Tamez

### 11.3. Sezione alla progressiva 3+300 km

Copertura 35 m da livelletta

Proprietà della sezione di calcolo:

La sezione di calcolo si pone interamente entro la Formazione dei calcari di Ragusa, a cui sono stati associati i seguenti parametri geotecnici:

 <b>INGEGNERIA</b>	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 52
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

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

$$c = 380 kPa$$

$$\phi = 53^\circ$$

$$E = 5600 MPa$$

$$\nu = 0.2$$

$$k_0 = 1$$

$$c_{origine} = 220 kPa$$

$$\phi_{origine} = 63^\circ$$

La sezione di calcolo rappresenta una delle sezioni a maggiore copertura entro la Formazione Ragusa, caratterizzata da un indice RMR89 pari a 56 punti.

La sezione tipo adottata è la Ac, caratterizzata da 1 centina HEA160 con interasse variabile fra 1.3 ed 1.5 m, ed uno strato di spritz beton di 25 cm di spessore. L'avanzamento previsto è pari a 3 m.

#### 11.3.1. 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.

Si sottolinea che, a rigore, tale metodologia è valida per gallerie poste a grande profondità, laddove è presumibile ipotizzare un coefficiente di spinta a riposo circa pari a 1, corrispondente ad uno stato tensionale di tipo idrostatico. Nel caso in esame, la sezione di calcolo è caratterizzata da una copertura medio-bassa. Si ritiene però di poter associare al litotipo in esame un coefficiente  $k_0$  pari all'unità, per tener conto della storia tensionale che lo ha caratterizzato e della struttura dell'ammasso.

Nelle figure 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 millimetro sia al cavo sia al fronte. La Figura 19 riporta l'estensione delle zone plastiche al cavo e al fronte in assenza di sostegni: la sezione è totalmente in campo elastico.

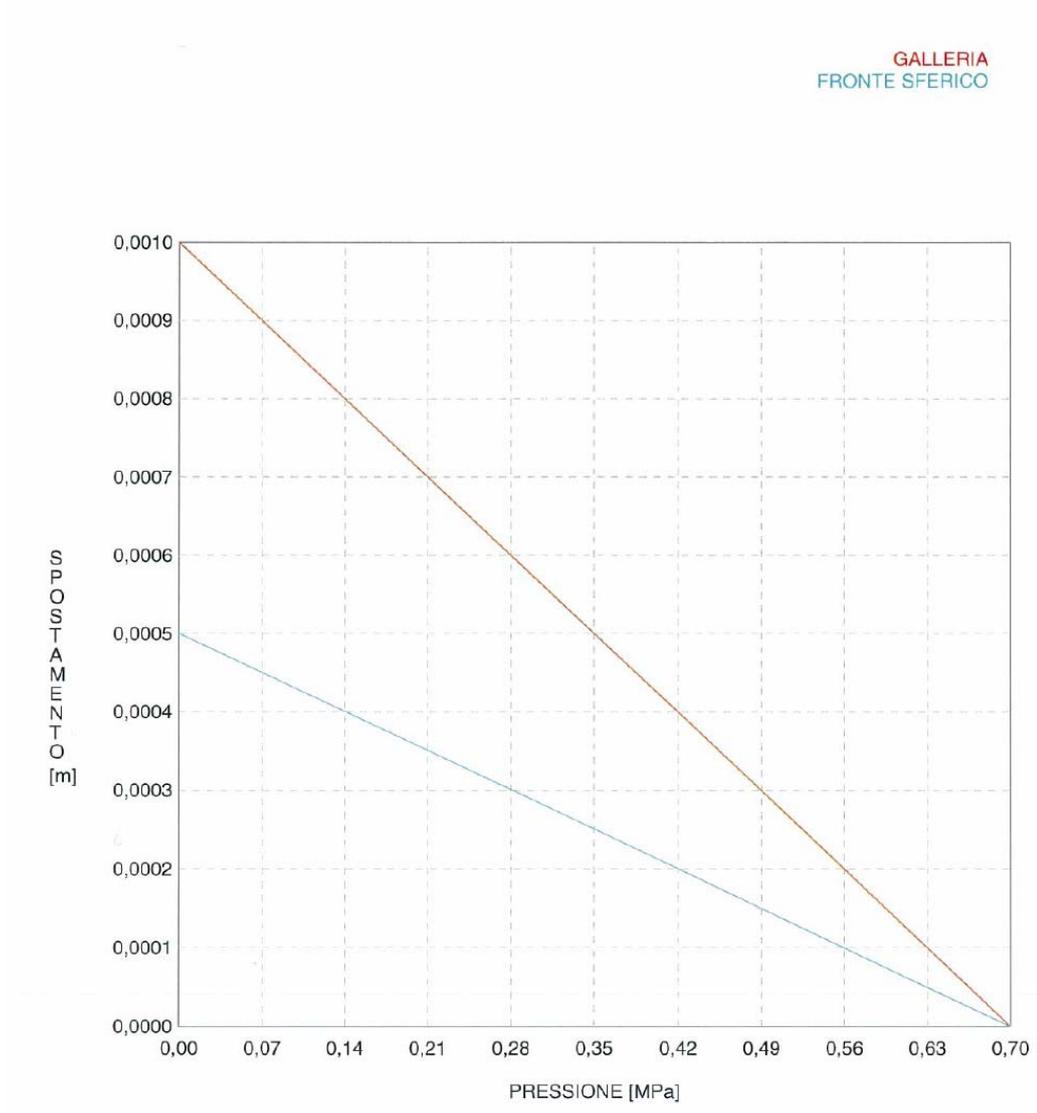


Figura 18 – Linea caratteristica del fronte e del cavo in assenza di sostegni

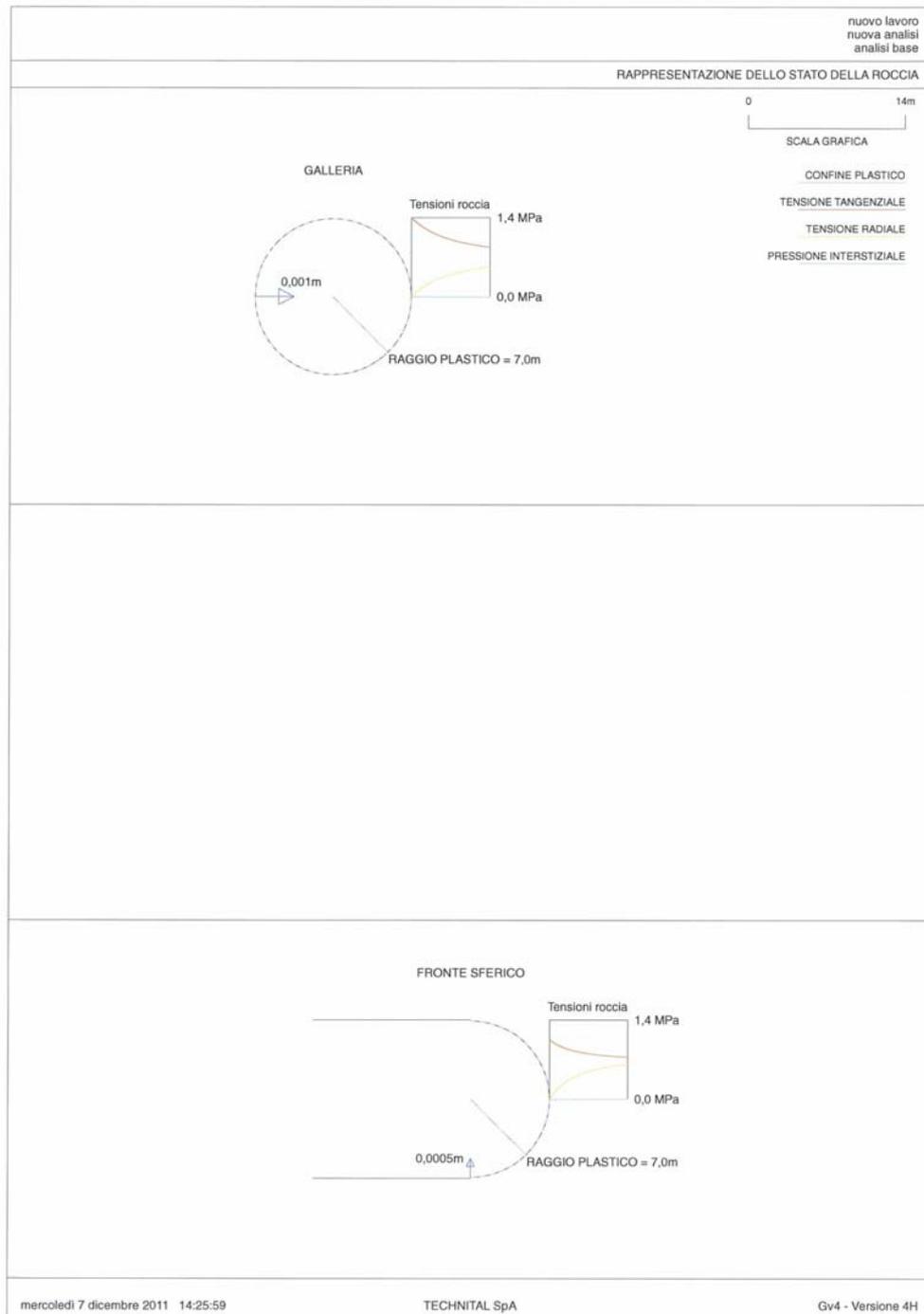


Figura 19 – Tensioni e plasticizzazione nella roccia al contorno galleria

Si propongono ora gli stessi risultati ottenuti ipotizzando la messa in opera dei rivestimenti previsti dalla sezione Ac, ad una distanza di 3 m dal fronte 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: alla luce del comportamento praticamente elastico della sezione, i rivestimenti risultano poco sollecitati, come visibile in Figura 21.

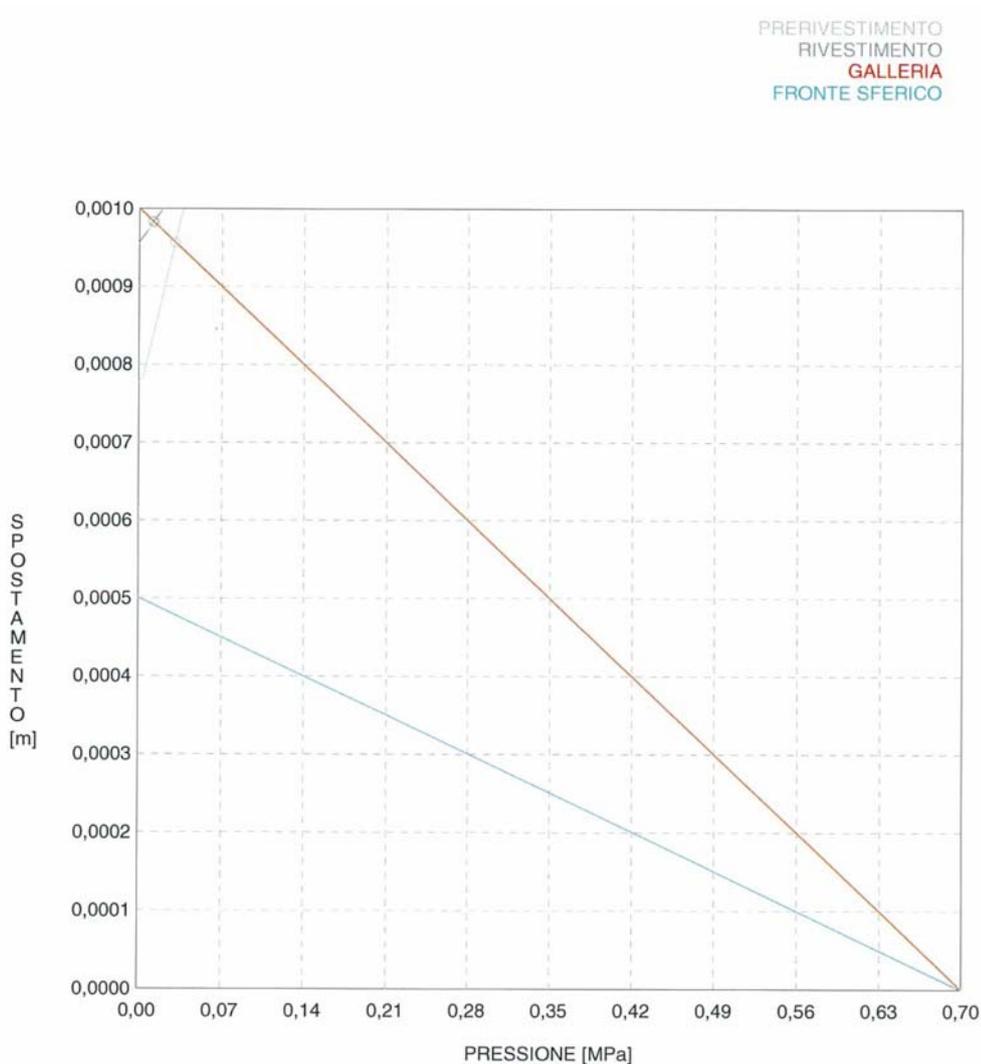


Figura 20 – Linea caratteristica del fronte e del cavo, e linea di reazione dei sostegni messi in opera



### 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 3 m in assenza di sostegni.

L'analisi evidenzia la sostanziale stabilità del fronte e del cavo, Figura 22, con fattori di sicurezza rispettivamente superiori a 4 per quanto riguarda il fronte, pari a 1 relativamente alla stabilità della chiave. Il fattore di sicurezza globale è pari a circa 2.4.

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

##### RIASSUNTO DATI DI INGRESSO

GEOMETRIA			
a	lunghezza libera	3	m
A	h galleria	11,4	m
D	largh. galleria	16,3	m
L	estens. longitud. cuneo	2,74	m
H	copertura da calotta	30	m
Z <sub>d</sub>	tratto di influenza scavo	27,71	m
S	sezione di scavo	157,31	m <sup>2</sup>

TERRENO			
γ	peso di volume	23	kNm <sup>3</sup>
c	coesione	220	kPa
φ	attrito	63	°
q <sub>s</sub>	sovraccarico	0	kPa

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

##### RIASSUNTO RISULTATI - no interventi

STABILITA' DEL FRONTE			
FS <sub>f</sub>	fattore di sicurezza	4,2	
p <sub>f</sub>	pressione al fronte	0,00	kPa
p <sub>f max</sub>	pressione massima applicabile	-95,28	kPa

STABILITA' DELLA CHIAVE			
FS <sub>c pl</sub>	fattore di sicurezza alla plasticizzazione	0,87	
FS <sub>c</sub>	fattore di sicurezza	1,0	
p <sub>a</sub>	pressione in chiave	0,00	kPa

STABILITA' GLOBALE			
FS <sub>g</sub>	fattore di sicurezza	2,39	

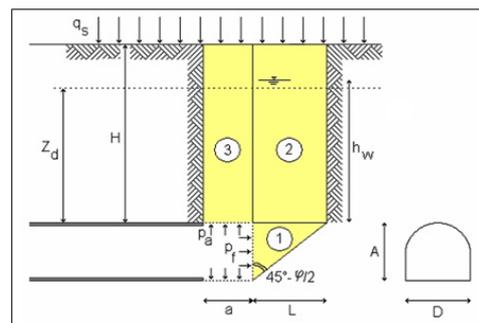


Figura 22 – Analisi di stabilità con il metodo di Tamez, RMR89 pari a 56

 <b>GENERAL</b>	E	A	1	8	1	0	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							

## 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 55-60. 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 autoportanza pari a circa 1 settimana.

Queste previsioni risultano tra l'altro confermate dalla presenza, lungo il tracciato, di numerose caverne a sezione rettangolare scavate in calcare e caratterizzate da una calotta orizzontale, con dimensione media di 5-8 metri per lato, Figura 23.



*Figura 23 – 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, spaziate 1-1.5 m, con rete elettrosaldata e 3 cm di spritz beton in calotta;
- centine leggere con interasse 1.5-2 m

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

$$p = \frac{100 - RMR}{100} \cdot \gamma \cdot B = 140 \div 155 kPa$$

A titolo di esempio, facendo riferimento alla sezione posta alla progressiva 3+300 km in corrispondenza della Galleria Truncafila, caratterizzata da un RMR di 56 punti, si avrà:

$$p = \frac{100 - RMR}{100} \cdot \gamma \cdot B = 152 kPa$$

Estendendo le medesime considerazioni anche per quanto riguarda le marne della Formazione Tellaro, che interessano il primo tratto della Galleria Truncafila in direzione Siracusa, e considerando un RMR pari a 35, si ottiene:

$$p = \frac{100 - RMR}{100} \cdot \gamma \cdot B = 195 kPa$$

La riduzione dell'indice RMR nel passaggio dai calcari della F.Ragusa alle marne del Tellaro determina dunque un notevole incremento delle sollecitazioni agenti sui sostegni.

## 12.2. Q System di Barton

Per i calcari della Formazione Ragusa si è valutato in modo autonomo rispetto all'indice RMR, il valore dell'indice Q nel modo seguente. L'indice Q di Barton si valuta come:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

La scheda proposta fa riferimento alla sezione posta alla progressiva 3+300 km in corrispondenza della Galleria Truncafila:

Parametro	Descrizione	Valore numerico
RQD	-	40 %
J <sub>n</sub>	2/3 sistemi di discontinuità	6
J <sub>r</sub>	Discontinuità ondulate	3
J <sub>a</sub>	Discontinuità con bordi leggermente alterati, riempimento non plastico	2
J <sub>w</sub>	Acqua assente o scarsa	1
SRF	Roccia coerente, scavo superficiale	2.5
<b>Q</b>	<b>Indice Q di Barton</b>	<b>4</b>

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.

Considerando l'intervallo di valori di RMR89 che caratterizzano il tracciato della galleria in esame:

$$RMR = 55 \quad Q = \exp\left(\frac{RMR - 44}{9}\right) = 3.39$$

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

Applicando la teoria del Q Load di Barton alla sezione 3+300 km della Galleria Truncafila, è possibile valutare la massima lunghezza libera e l'entità dei carichi agenti sui rivestimenti in calotta. Si considera un indice Jr pari a 3, corrispondente a discontinuità chiuse o ad apertura ridotta, con superficie ondulata:

$$P_{roof} = \frac{\left(0.2 \cdot Q^{\frac{1}{3}}\right)}{Jr} = 42kPa$$

Per la valutazione dei carichi agenti sui piedritti, si definisce un indice Q' pari a  $2.5 \cdot Q = 10$  e si applica nuovamente la precedente formulazione:

$$P_{wall} = \frac{\left(0.2 \cdot Q'^{\frac{1}{3}}\right)}{Jr} = 31kPa$$

Per quanto riguarda la lunghezza libera, si definisce un coefficiente ESR pari a 1 per gallerie autostradali:

$$L = 2 \cdot ESR \cdot Q^{0.4} \cong 3.5m$$

La teoria di Barton, dunque evidenzia come il calcare di Ragusa presenti una buona qualità geomeccanica, con sollecitazioni ridotte sui rivestimenti ed una lunghezza libera del tutto equivalente a quanto teorizzato da Bieniawski.

Per le marne della Formazione Tellaro si è analogamente valutato l'indice Q:

Parametro	Descrizione	Valore numerico
RQD	-	80 %
Jn	Roccia quasi incoerente	18
Jr	Discontinuità irregolari	3
Ja	Discontinuità con riempimento plastico	4
Jw	Acqua assente o scarsa	1
SRF	Ripetute alternanze di zone indebolite	10
<b>Q</b>	<b>indice Q di Barton</b>	<b>0.33</b>

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 61
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera			Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev						

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:

$$Q = \exp\left(\frac{RMR - 44}{9}\right) = 0.37$$

Si assume quindi un indice Q pari a 0.35.

Applicando la teoria del Q Load di Barton, è possibile a questo punto valutare i carichi agenti sui rivestimenti in calotta:

$$P_{roof} = \frac{\left(0.2 \cdot Q^{\frac{1}{3}}\right)}{J_r} = \frac{\left(0.2 \cdot (0.35)^{\frac{1}{3}}\right)}{3} = 95kPa$$

Per la valutazione dei carichi agenti sui piedritti, si definisce un indice Q' pari a 2.5Q = 0.88 e si applica nuovamente la precedente formulazione:

$$P_{wall} = \frac{\left(0.2 \cdot Q'^{\frac{1}{3}}\right)}{J_r} = \frac{\left(0.2 \cdot (0.88)^{\frac{1}{3}}\right)}{3} = 70kPa$$

Per quanto riguarda la lunghezza libera, si definisce un coefficiente ESR pari a 1 per gallerie autostradali:

$$L = 2 \cdot ESR \cdot Q^{0.4} \cong 1.5m$$

### 12.3. Rock Load di Terzaghi

Si applica ora la teoria del Rock Load alla Formazione dei calcari Ragusa. 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 sezione alla progressiva 3+300 km in corrispondenza della Galleria Truncafila.

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

$$B = \text{semilarghezza del solido di carico} = b + h \cdot \text{tg}\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) = 11.3m$$

$k_0$  = coefficiente di spinta = 1

z = copertura da piano dei centri = 30 m circa

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

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 62
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera			Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev						

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

#### **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.

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 63
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

### 13. ANALISI CON IL METODO DEGLI ELEMENTI FINITI

#### 13.1. Sezione alla progressiva 2+900 km

Copertura 22 m da livelletta

Distanza fra i piedritti delle due gallerie affiancate = 44 m

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

La sezione tipo adottata è la B0, che rappresenta la sezione minima prevista nella tratta in cui la galleria intercetta la Formazione Tellaro.

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 a comportamento plastico:

<i>Tabella 1 - Percentuali di detensionamento per le fasi di calcolo</i>	
Sequenza di calcolo	Detensionamento
Fase 1 - Fronte	55 %
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 B0. L'avanzamento previsto è di 1 m. Ai fini delle verifiche strutturali si considera lo scavo della canna a maggiore sezione, quella in direzione Gela, per la quale si prevede l'adozione della sezione B0 (40).

<i>Tabella 2 - Caratteristiche dei rivestimenti previsti per la sezione in esame</i>			
Rivestimento preliminare	Centine		2 IPN 180 / 1.2 m
	A		55.8 cm <sup>2</sup>
	J		2900 cm <sup>4</sup>
	w		43.8 kg/m
	Spritz, spessore		25 cm
	Sostegno equivalente		
	E eq		33280 MPa
	spessore eq		25 cm
Rivestimento definitivo	Arco rovescio		
	spessore medio		0.7 m
	EA		2.1 e7 kN/m
	EJ		857500 kNm <sup>2</sup> /m
	Calotta		
	spessore medio		0.7 m
	EA		2.1 e7 kN/m
	EJ		857500 kNm <sup>2</sup> /m
	Muretta		
	spessore medio		0.8 m
	EA		2.4 e7 kN/m
	EJ		1280000 kNm <sup>2</sup> /m

### 13.1.1. 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.

La Figura 24 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** 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 bassa copertura presente determina fenomeni di subsidenza, di entità decisamente ridotta: in prossimità del cavo, dunque, la superficie topografica potrà subire leggeri

ribassamenti, di ordine millimetrico, che per la loro esiguità e per l'assenza di sovrastrutture non risultano significativi.

La Figura 25 illustra la distribuzione delle zone plasticizzate al termine del detensionamento, mentre in Figura 26 sono indicate le direzioni delle tensioni principali al contorno della cavità.

Gli spostamenti verticali in calotta, Figura 27, raggiungono i 7 mm al termine del detensionamento, in assenza del rivestimento definitivo.

Infine in Figura 28 e Figura 29 si propongono i due risultati ritenuti più significativi per illustrare l'assenza di influenza tra i due scavi. L'analisi è stata realizzata supponendo che lo scavo della seconda canna venga realizzato quando nella prima canna non è ancora avvenuto il getto del rivestimento definitivo. In Figura 28 è illustrata la distribuzione delle tensioni orizzontali e verticali agenti nel pilastro di roccia presente tra i due cavi. Si osserva che, a meno delle tensioni  $\sigma_h$  e  $\sigma_v$  agenti al contorno, che rappresentano le sollecitazioni equilibrate dai rivestimenti, e di un naturale incremento delle tensioni nella zona di influenza del cavo, le tensioni orizzontali e verticali risultano in condizioni indisturbate nella zona centrale del pilastro. La stessa evidenza è illustrata in Figura 29.

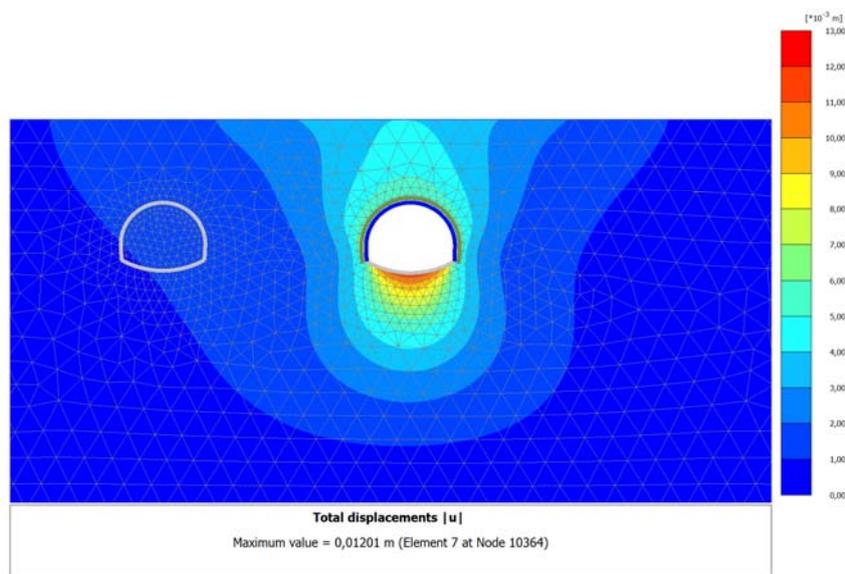
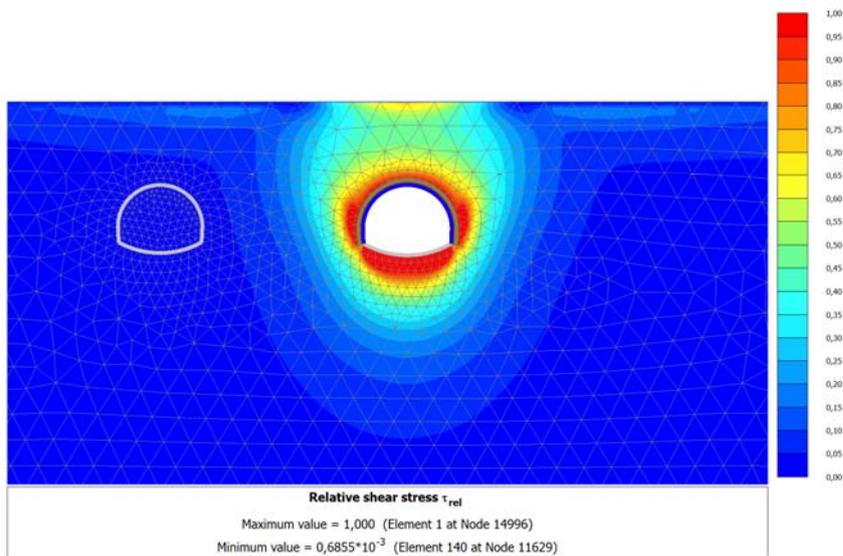
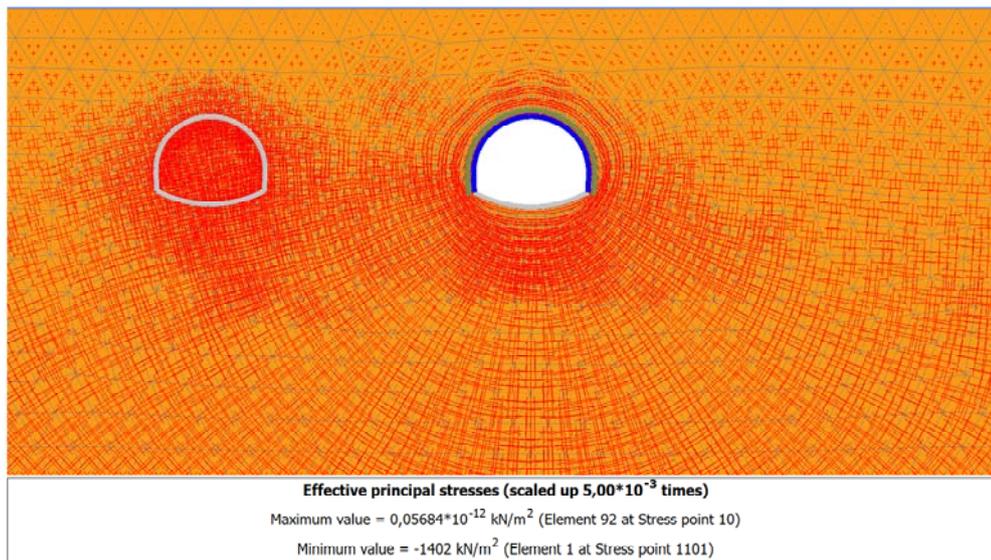


Figura 24 – Spostamenti radiali al contorno di scavo al termine del detensionamento



*Figura 25 – Zone plasticizzate al contorno di scavo al termine del detensionamento*



*Figura 26 – Distribuzione delle tensioni principali al contorno della galleria*

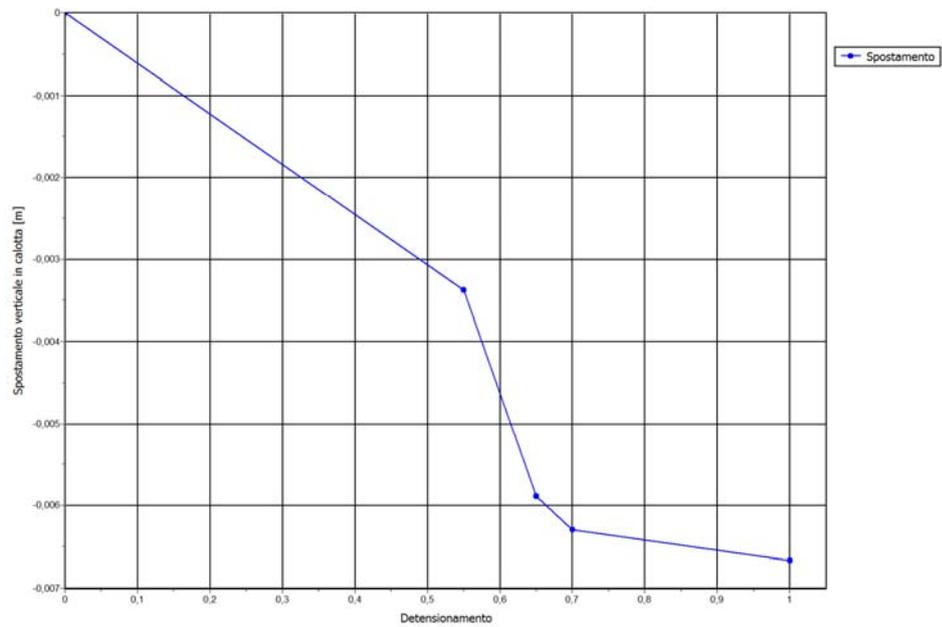


Figura 27 – Spostamenti verticali in calotta in presenza dei soli prerivestimenti

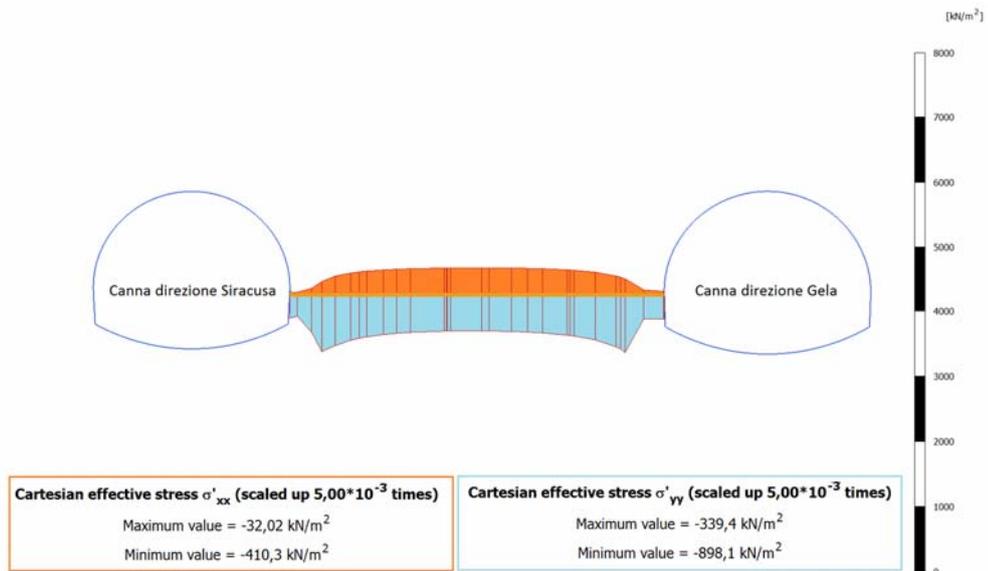
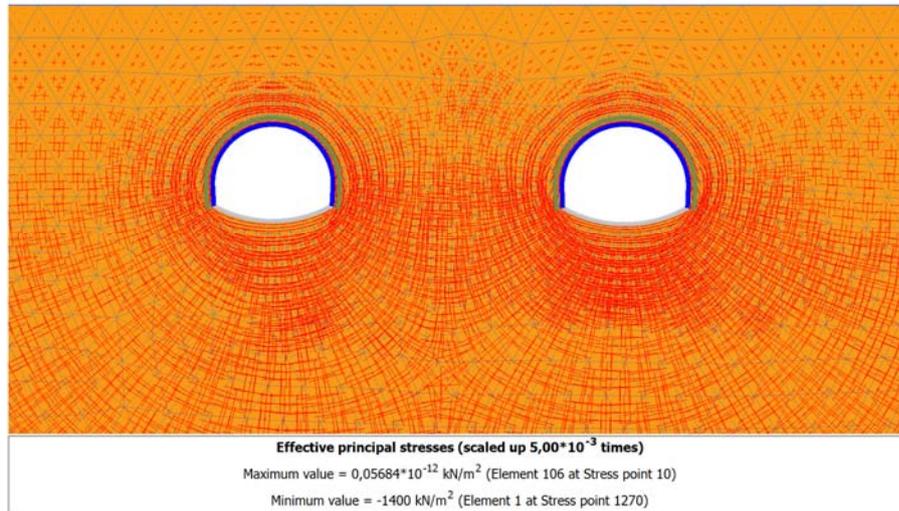


Figura 28 – Tensioni orizzontali e verticali agenti nel piedritto tra le due canne autostradali

 <b>TECNOFERRA</b>	E	A	1	8	1	0	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							

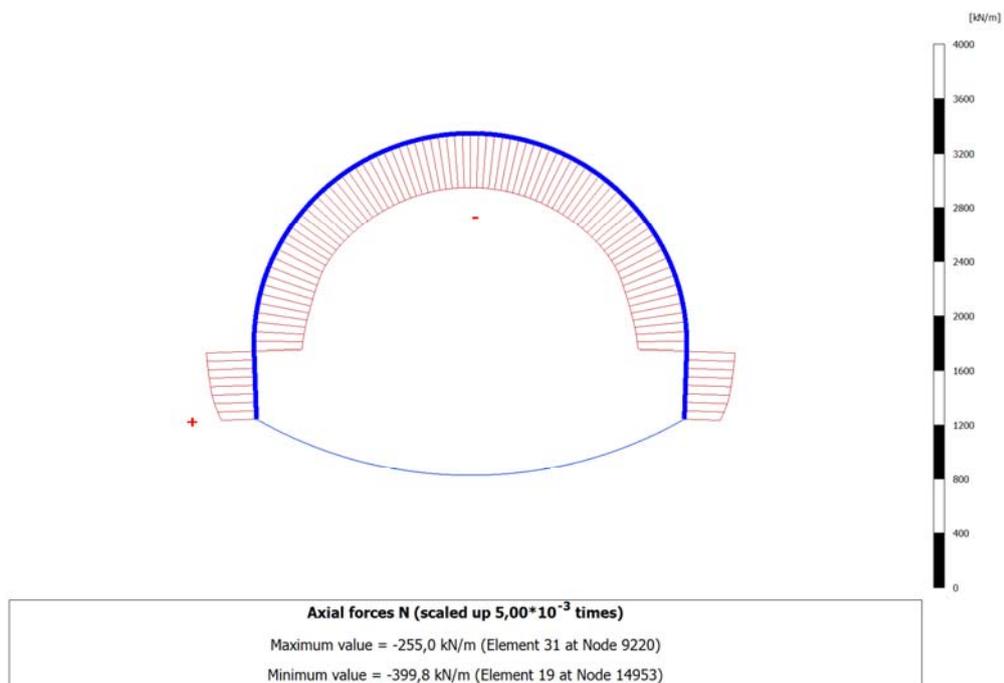


*Figura 29 – Distribuzione delle tensioni principali al contorno delle due canne autostradali*

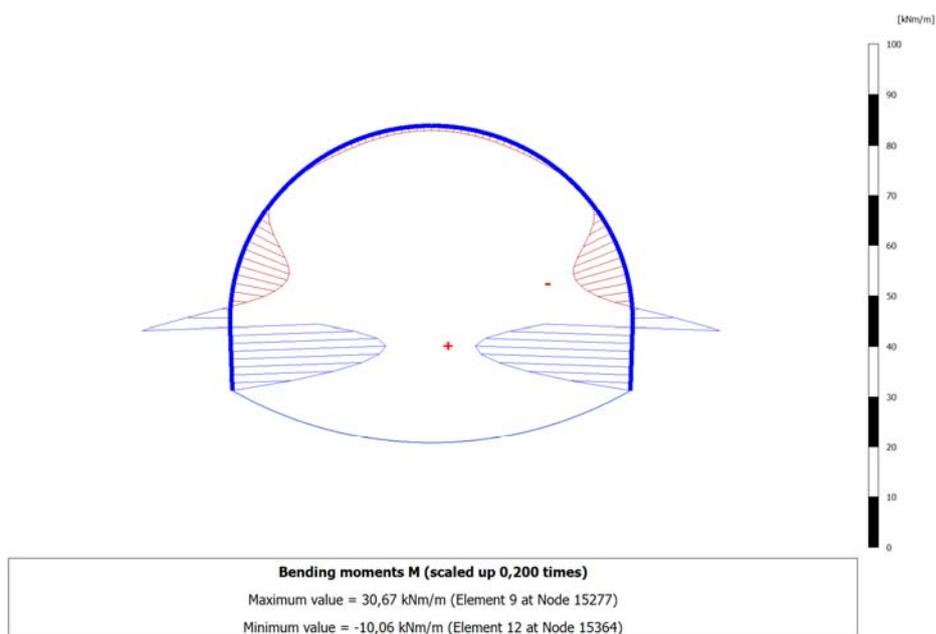
### 13.1.2. Verifiche strutturali del rivestimento preliminare

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

In Figura 30, Figura 31, Figura 32 e Figura 33 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. Tutte le sollecitazioni risultano abbondantemente entro i limiti di resistenza dei materiali.



*Figura 30 – Sollecitazioni di sforzo normale agenti sul rivestimento preliminare*



*Figura 31 - Sollecitazioni di momento flettente agenti sul rivestimento preliminare*

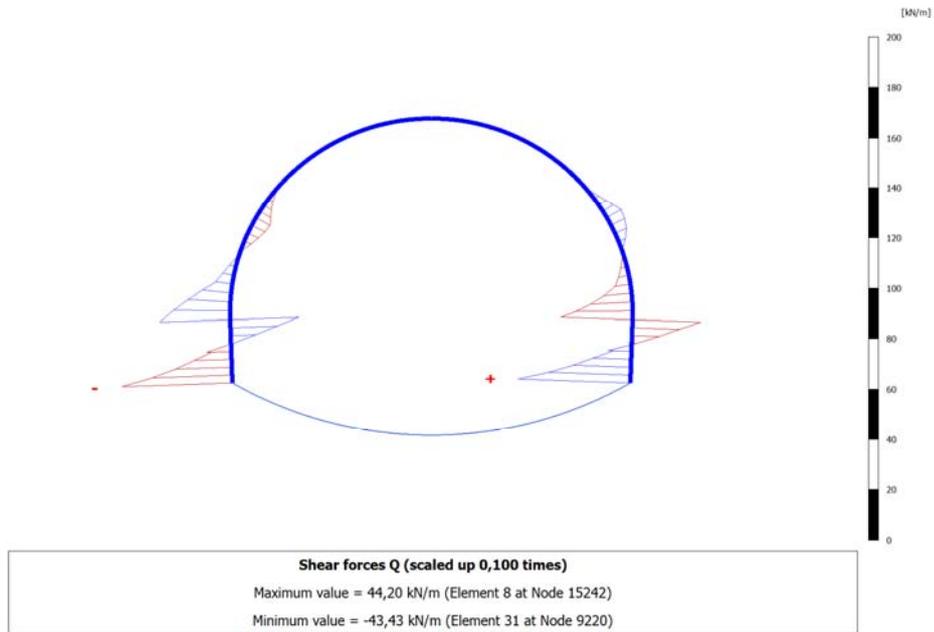


Figura 32 - Sollecitazioni di taglio agenti sul rivestimento preliminare

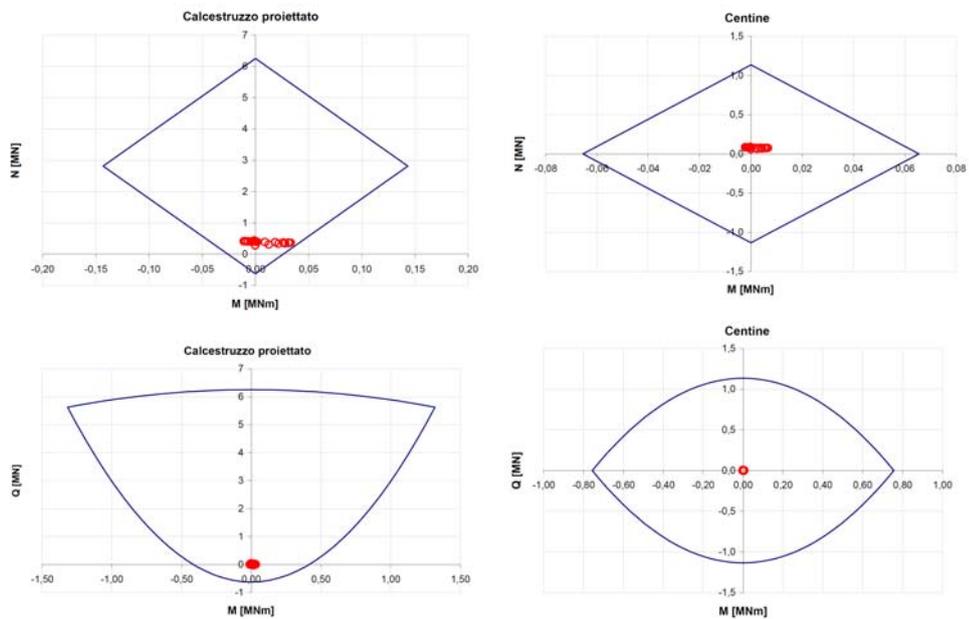


Figura 33 – Diagrammi di interazione per il rivestimento preliminare

### 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.

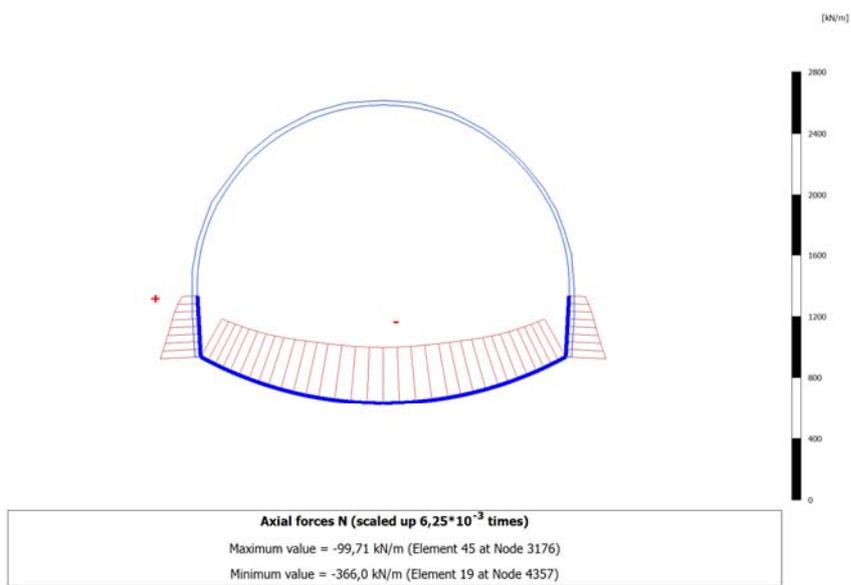


Figura 34 - Sollecitazioni di sforzo normale agenti su murette e arco rovescio

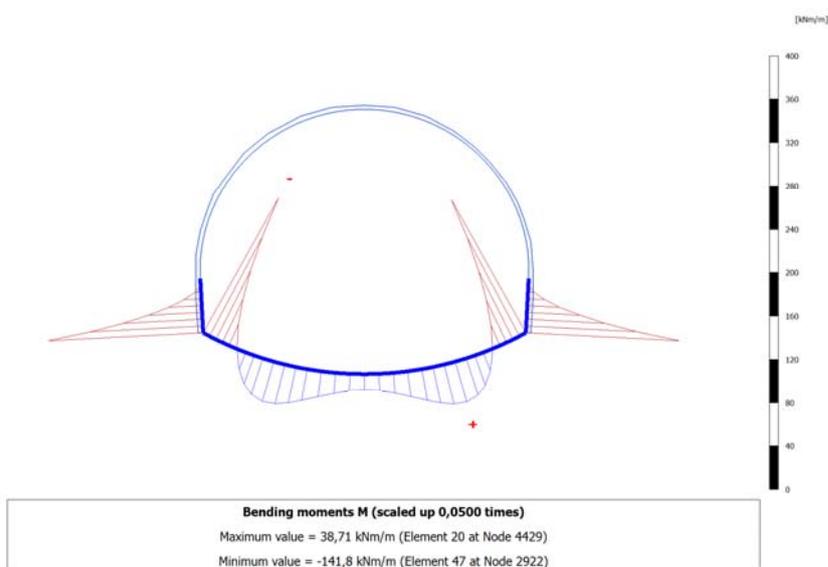
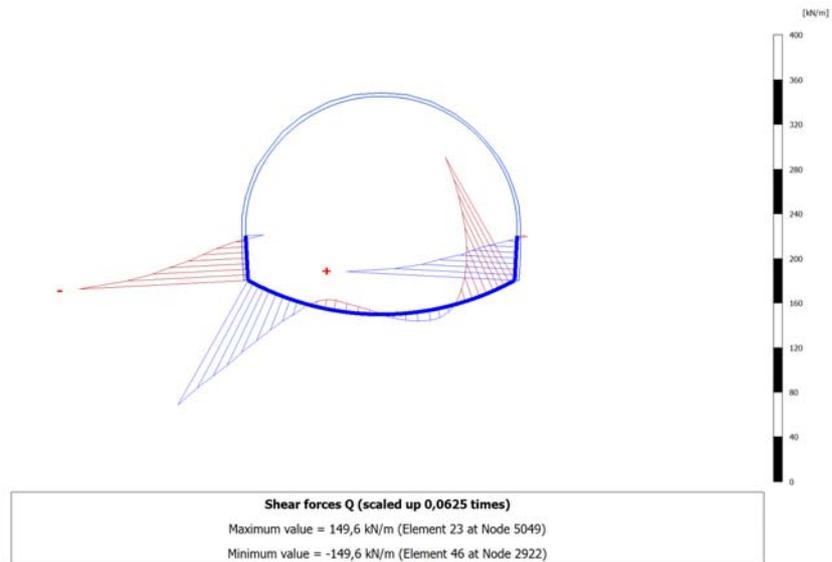
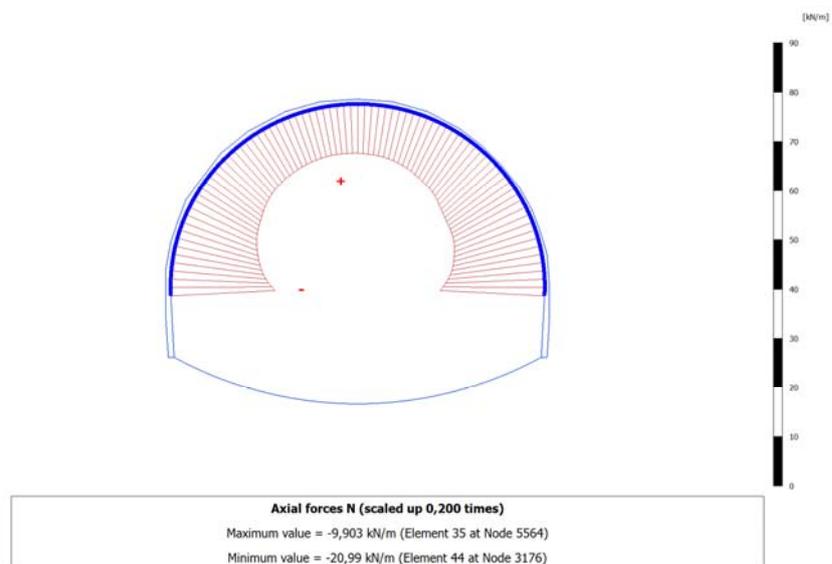


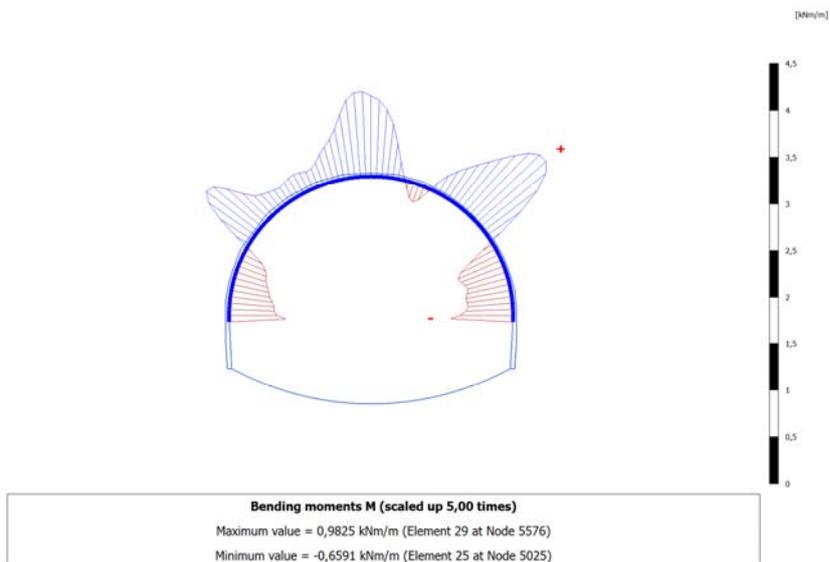
Figura 35 - Sollecitazioni di momento flettente agenti su murette e arco rovescio



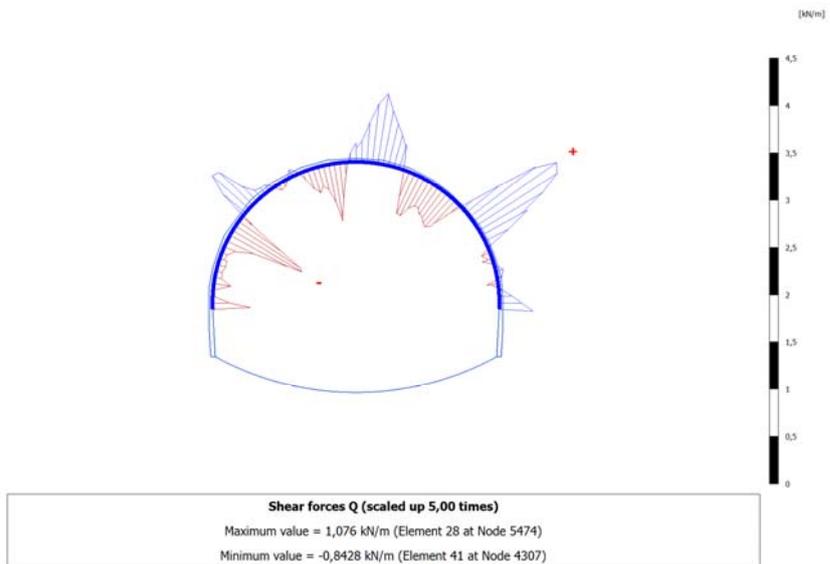
*Figura 36 - Sollecitazioni di taglio agenti su murette e arco rovescio*



*Figura 37 - Sollecitazioni di sforzo normale agenti sulla calotta*



*Figura 38 - Sollecitazioni di momento flettente agenti sulla calotta*



*Figura 39 - 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 Truncafila, nella sezione alla progressiva 2+900 km.

In corrispondenza di questa sezione si è analizzata con metodi numerici ed empirici la sezione tipo B0.

Le verifiche strutturali vengono realizzate a partire dalle sollecitazioni di momento flettente M, sforzo assiale N e taglio Q agenti nel rivestimento definitivo gettato in opera 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 Ac</i>			
Sollecitazioni agenti sul rivestimento, derivanti da analisi Plaxis			
	N [kN/m]	M [kNm/m]	Q [kN/m]
Calotta	-21	1	1
Arco rovescio	-366	40	150
Muretta	-250	142	50

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 40, Figura 41, Figura 42 si riporta altresì la distribuzione degli sforzi normali agenti sulle sezioni considerate per effetto della corrispondente sollecitazione di presso-flessione.

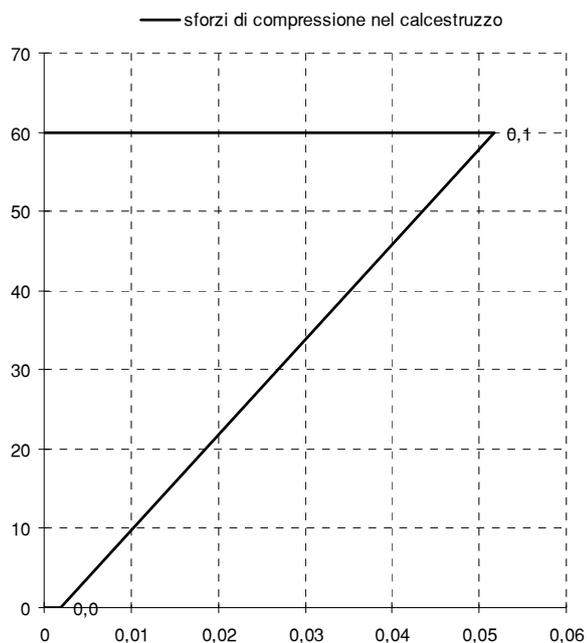


Figura 40 – Compressione nel calcestruzzo, calotta

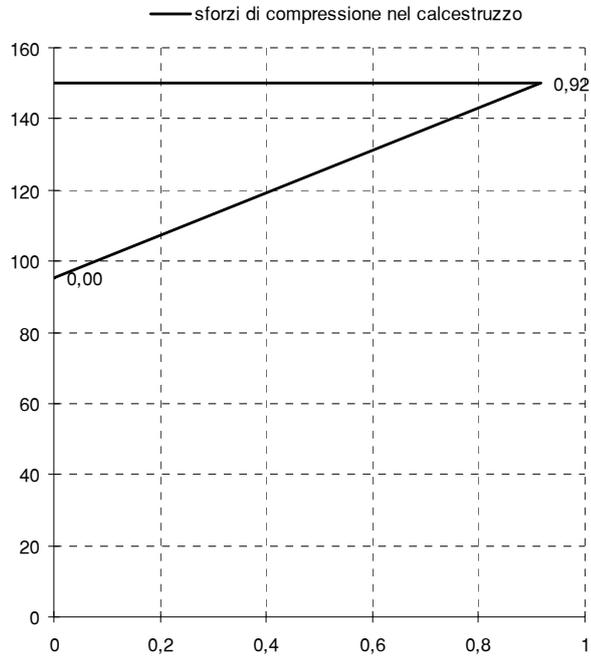


Figura 41 – Compressione nel calcestruzzo, muretta

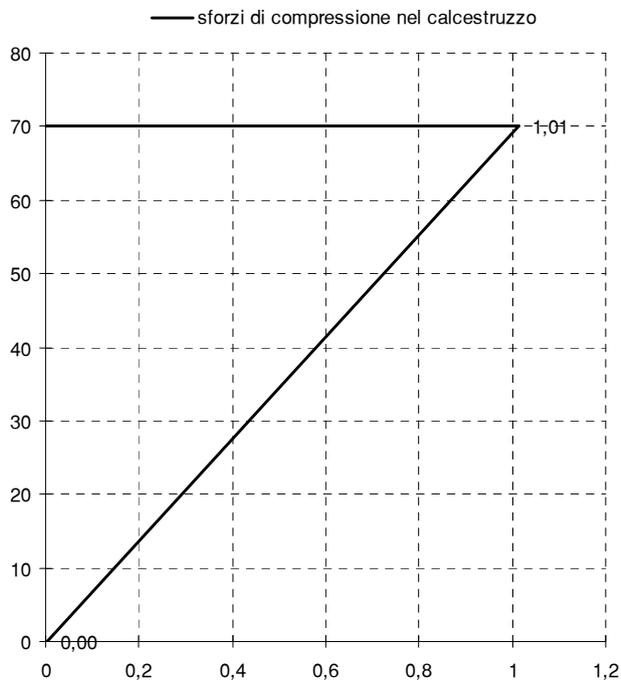


Figura 42 – Compressione nel calcestruzzo, arco rovescio

*Tabella 4 – Verifiche strutturali per la sezione B0 alla progr. 2+900 km*

Elemento strutturale	b	h	N <sub>max</sub>	M <sub>max</sub>	V <sub>max</sub>	x	σ <sub>c,max</sub>	0,25·f <sub>ck</sub>	F <sub>s,σ</sub>	A*	τ <sub>c,max</sub>	0,21·f <sub>ctk</sub>	F <sub>s,τ</sub>
	cm	cm	kN	kNm	kN	cm	MPa	MPa		cm <sup>2</sup>	MPa	MPa	
Calotta	100	60	21	1	0,0	93,0	0,05	7,3	<b>0,0</b>	6000	0,00	0,42	<b>0,0</b>
Muretta	100	150	250	142	150	54,6	0,92	7,3	<b>0,1</b>	5460	0,41	0,42	<b>0,9</b>
Arco rovescio	100	70	366	40	50	72,4	1,01	7,3	<b>0,1</b>	7000	0,11	0,42	<b>0,3</b>

### 13.1.5. Analisi sismica del rivestimento definitivo

L'analisi sismica del rivestimento definitivo per la sezione in esame è stata realizzata considerando il rilievo MASW M2, realizzato in corrispondenza dell'imbocco Sud, che individua una Vs30 media di 320 m/s. Si assume dunque una categoria di suolo di tipo B, a cui corrisponde una correzione stratigrafica pari a 1.13: posta l'accelerazione orizzontale su suolo rigido ag pari a 0.273 g, si ricava un'accelerazione sismica di progetto di 3.03 m/s<sup>2</sup>, pari a 0.308 g.

METODO DI PROPAGAZIONE DELLE ONDE		
INPUT		
Eg (modulo elastico terreno)	630000	kPa
νg (poisson terreno)	0,25	
EI (modulo elastico lining)	2,50E+07	kPa
νI (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)	900	m/s
As (peak ground acceleration) normativa	0,308	g
Spost/acc (ampiezza spostamento) con table 3		
C (coefficiente di profondità) table 4		
cp (velocità onde di compressione)	1800	m/s
Ap peak acceleration onde P	0,308	g
H (spessore deposito dal bedrock)	15	m
γ (peso di volume terreno)	20	kN/m <sup>3</sup>
Φ inclinazione onda S	45	°
Φ inclinazione onda P	0	°
CALCOLI		
Ic (momento inerzia trasv)	2,68483789	m <sup>4</sup>
Ag (sezione trasv)	31,219577	m <sup>2</sup>
Vs peak particle velocity	0	m/s
Vp (peak particle velocity)	0,4312	m/s
T periodo	0,066666667	s
L lunghezza d'onda	60	m
Gm modulo di taglio	1651376,147	kPa
Ka Kt (molle)	6874035,302	kN/m
A1 (ampiezza spostamento) caso flessionale	0,000120263	m
A2 (ampiezza spostamento) caso assiale	0	m
A (ampiezza spostamento con table 3)	0	m
F	24,6	<b>flessibile</b>

 <b>INGENIERIA</b>	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 78
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

*Figura 43 – Dati di ingresso dell’analisi sismica dei rivestimenti*

In Figura 43 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:

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

In Figura 44 e Figura 45 sono illustrati i risultati del calcolo sismico, considerando due diverse configurazioni di sollecitazione sismica:

- onde P con angolo di deviazione  $0/90^\circ$  dall’asse galleria,  $45^\circ$  di deviazione per le onde S;
- onde P con angolo di deviazione  $45^\circ$  dall’asse galleria,  $0^\circ$  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 6 MPa, quelle flettenti sono del tutto trascurabili. Nel caso dell’ovaling, la massima tensione assiale è dell’ordine di 0.1 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	0,0002395556	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
ONDE S	0,0000000000	0,0000000000	0,0000087373	0,0000000000
	$\sigma$ kPa assiale	$\sigma$ kPa assiale	$\sigma$ kPa fless	$\sigma$ kPa assiale
ONDE P	5988,888889	0	0	0
ONDE S	0	0	218,4316683	0
$\varepsilon$ max onda S	0,000009	< $\varepsilon$ amm		
$\varepsilon$ max onda P	0,000240	< $\varepsilon$ amm		

Figura 44 – 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	0,0001197778	0,0001197778	0,0000021843	0,0000598889
ONDE S	0,0000000000	0,0000000000	0,0000247127	0,0000000000
	$\sigma$ kPa assiale	$\sigma$ kPa assiale	$\sigma$ kPa fless	$\sigma$ kPa assiale
ONDE P	2994,444444	2994,444444	54,60791708	106,6658589
ONDE S	0	0	617,8180556	0
$\varepsilon$ max onda S	0,000025	< $\varepsilon$ amm		
$\varepsilon$ max onda P	0,000122	< $\varepsilon$ amm		

Figura 45 - 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 3+200 km

Copertura 28 m da livelletta

Distanza fra i piedritti delle due gallerie affiancate = 44 m

Sezioni di scavo diverse nelle due direzioni di marcia

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 11.2.

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:

**Tabella 5 - Percentuali di detensionamento per le fasi di calcolo**

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 (40).

**Tabella 6 - Caratteristiche dei rivestimenti previsti per la sezione in esame**

Rivestimento preliminare	Centine	2 IPN 180 / 1 m
	A	55.8 cm <sup>2</sup>
	J	2900 cm <sup>4</sup>
	w	43.8 kg/m
	Spritz, spessore	25 cm
	Sostegno equivalente	
	E eq	33930 MPa
	spessore eq	25 cm
Rivestimento definitivo	Arco rovescio	
	spessore medio	0.8 m
	EA	2.4 e7 kN/m
	EJ	1280000 kNm <sup>2</sup> /m
	Calotta	
	spessore medio	0.8 m
	EA	2.4 e7 kN/m
	EJ	1280000 kNm <sup>2</sup> /m
	Muretta	
	spessore medio	0.95 m
	EA	2.85 e7 kN/m
	EJ	3143438 kNm <sup>2</sup> /m

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	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						

### 13.2.1. 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 46 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 47 illustra la distribuzione delle zone plasticizzate al termine del detensionamento, mentre in Figura 48 sono indicate le direzioni delle tensioni principali al contorno della cavità.

Gli spostamenti verticali in calotta, Figura 49, raggiungono il millimetro al termine del detensionamento, in assenza del rivestimento definitivo.

Infine in Figura 50 e Figura 51 si propongono i due risultati ritenuti più significativi per illustrare l'assenza di influenza tra i due scavi. L'analisi è stata realizzata supponendo che lo scavo della seconda canna venga realizzato quando nella prima canna non è ancora avvenuto il getto del rivestimento definitivo. In Figura 50 è illustrata la distribuzione delle tensioni orizzontali e verticali agenti nel pilastro di roccia presente tra i due cavi. Si osserva che, a meno delle tensioni  $\sigma_h$  e  $\sigma_v$  agenti al contorno, che rappresentano le sollecitazioni equilibrate dai rivestimenti, e di un naturale incremento delle tensioni nella zona di influenza del cavo, le tensioni orizzontali e verticali risultano in condizioni indisturbate nella zona centrale del pilastro. La stessa evidenza è illustrata in Figura 51, dove è possibile osservare un progressivo ritorno delle tensioni principali ad un'orientazione orizzontale/verticale ascrivibile ad una condizione indisturbata.

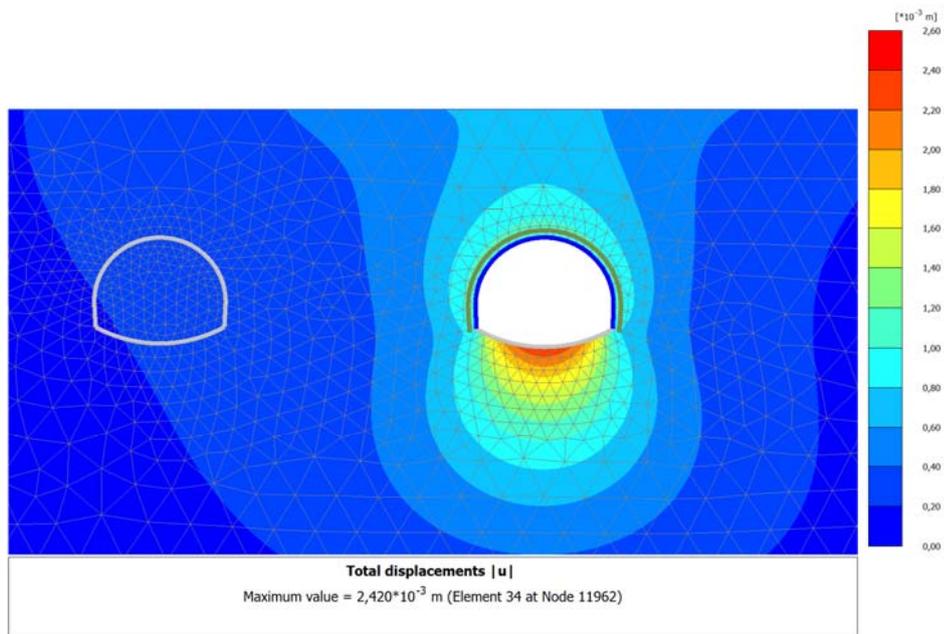


Figura 46 – Spostamenti radiali al contorno di scavo al termine del detensionamento

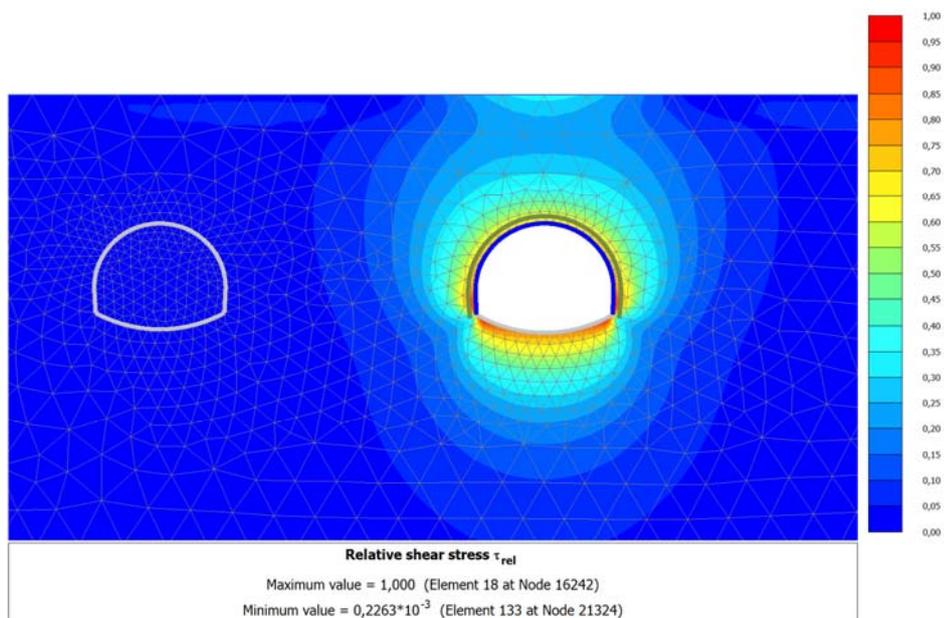


Figura 47 – Zone plasticizzate al contorno di scavo al termine del detensionamento

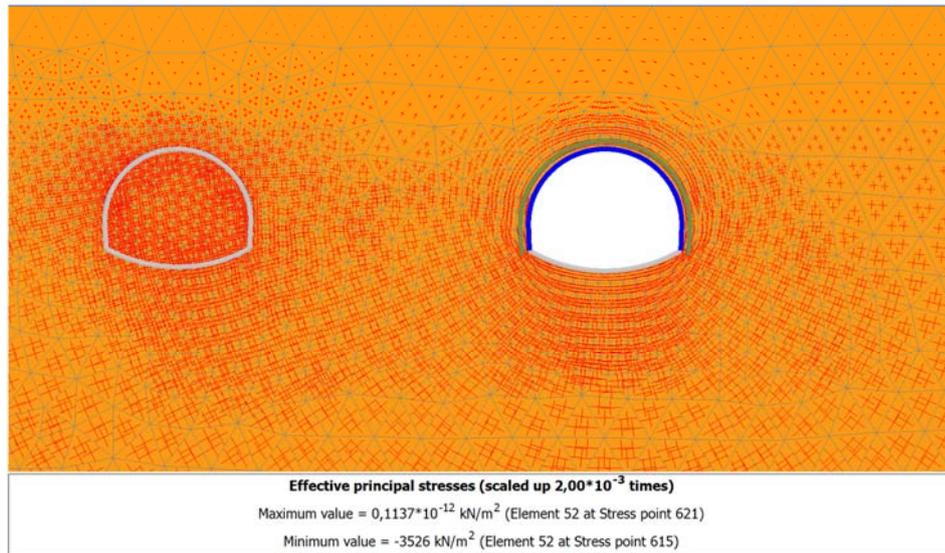


Figura 48 – Distribuzione delle tensioni principali al contorno della galleria

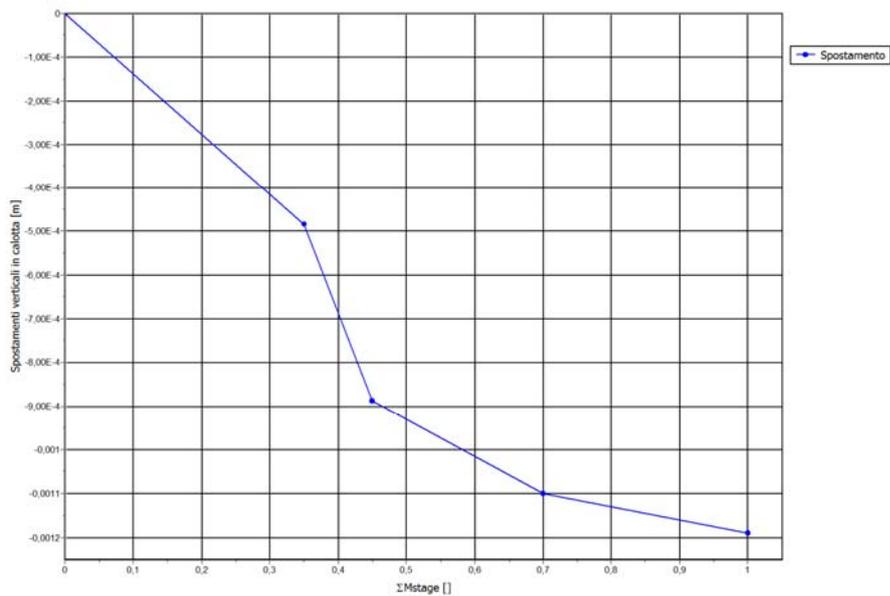


Figura 49 – Spostamenti verticali in calotta in presenza dei soli priverestimenti

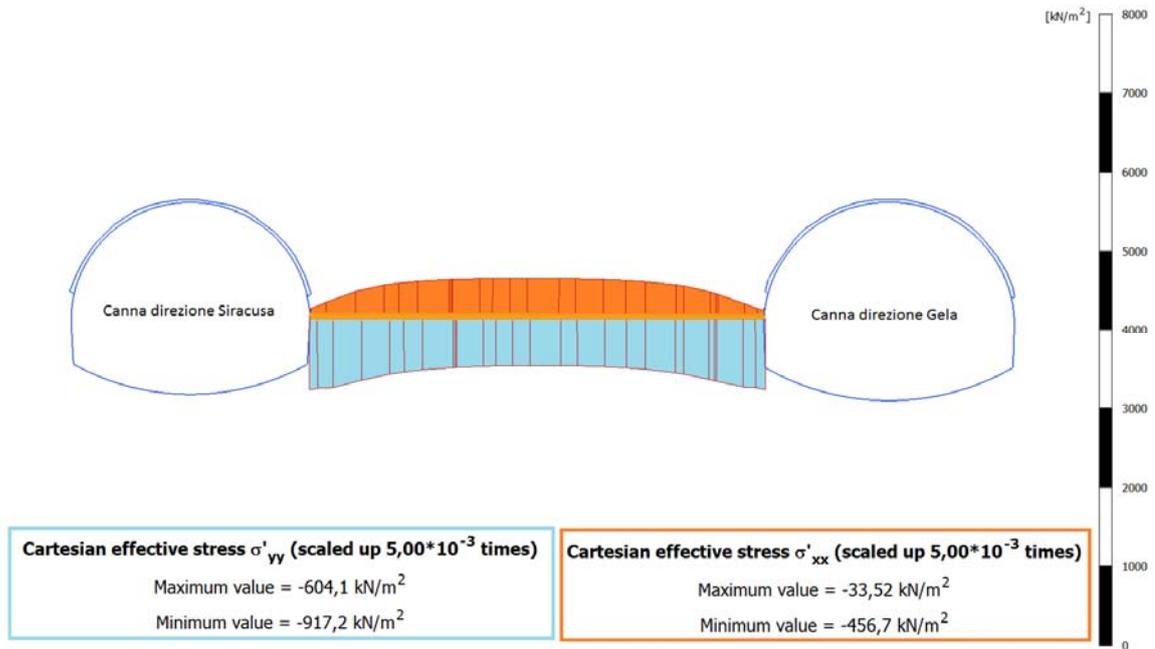


Figura 50 – Tensioni orizzontali e verticali agenti nel piedritto tra le due canne autostradali

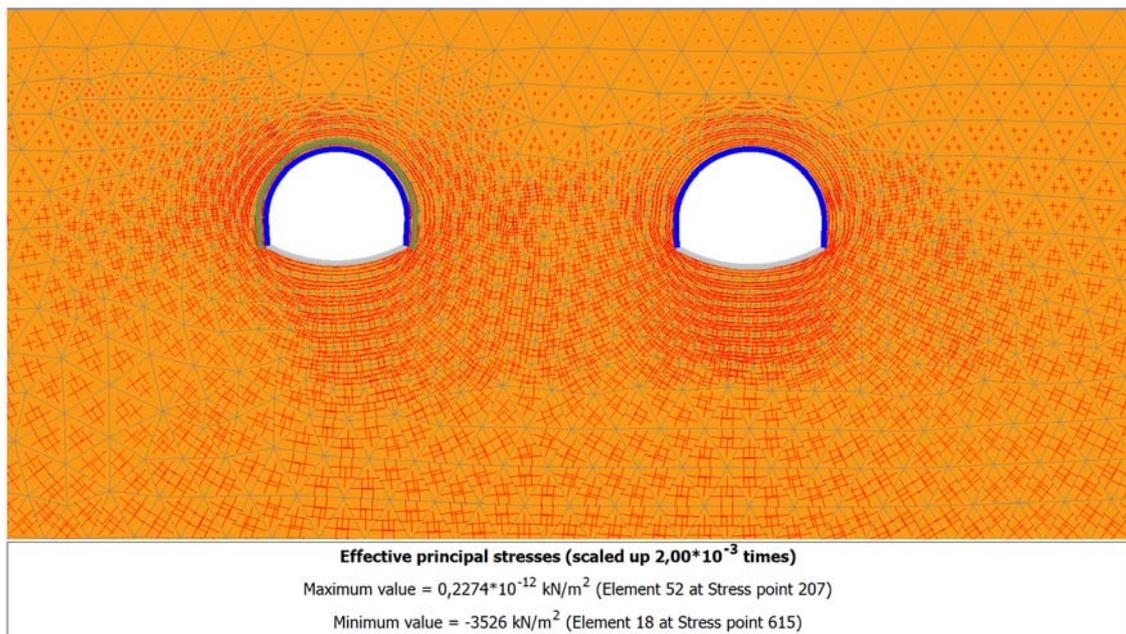
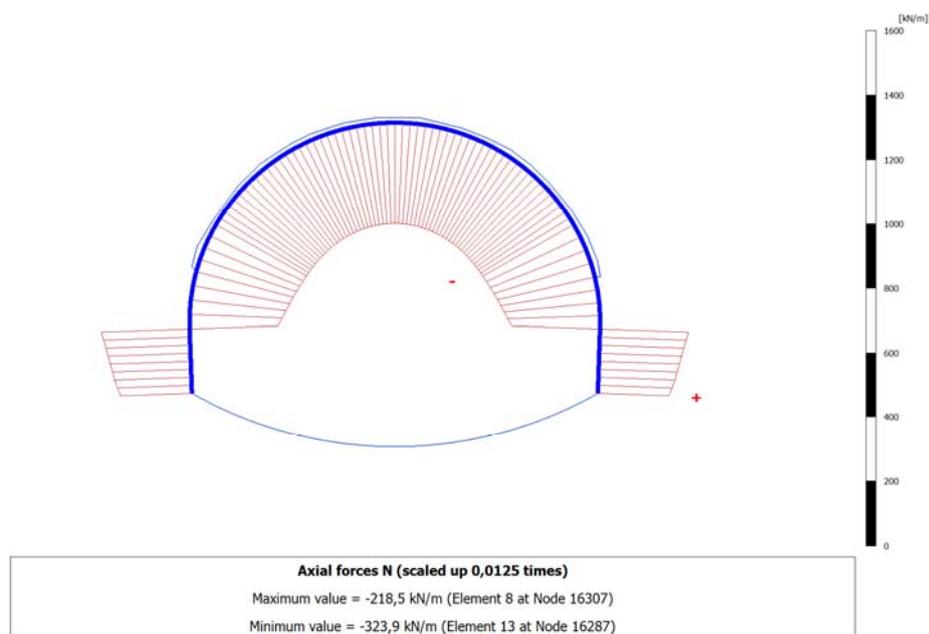


Figura 51 – Distribuzione delle tensioni principali al contorno delle due canne autostradali

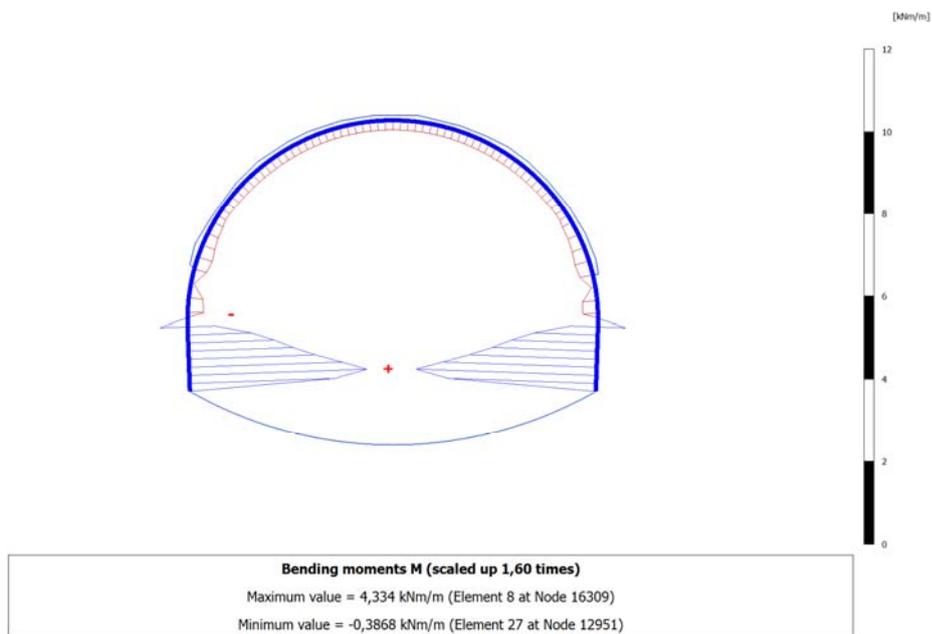
### 13.2.2. Verifiche strutturali del rivestimento preliminare

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

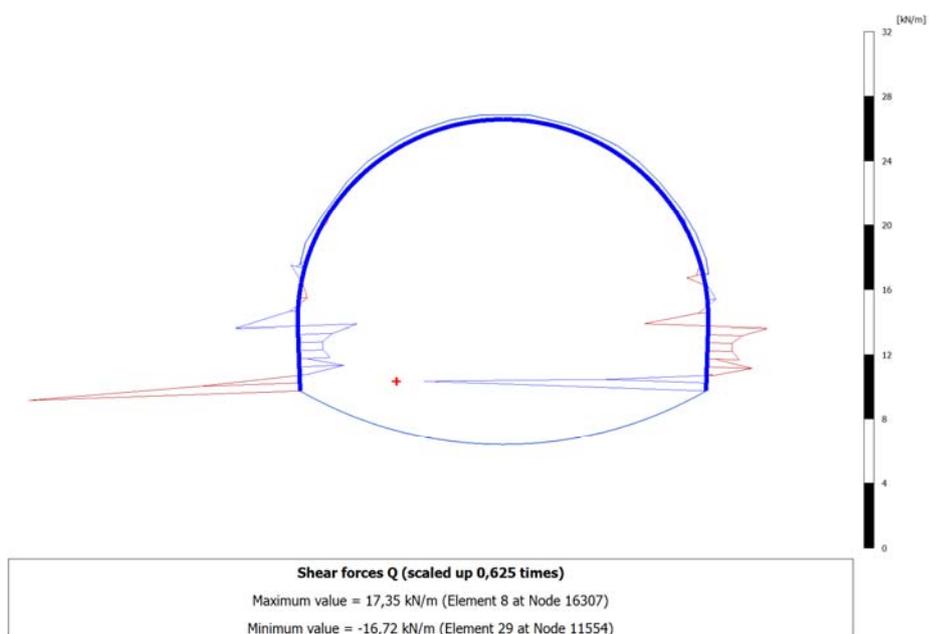
In Figura 52, Figura 53, Figura 54 e Figura 55 si riportano le sollecitazioni agenti sui prerivestimenti, nell'ipotesi cautelativa in cui l'intero detensionamento venga supportato dall'accoppiamento centine-spritz beton, ed i relativi diagrammi di interazione. Tutte le sollecitazioni risultano abbondantemente entro i limiti di resistenza dei materiali.



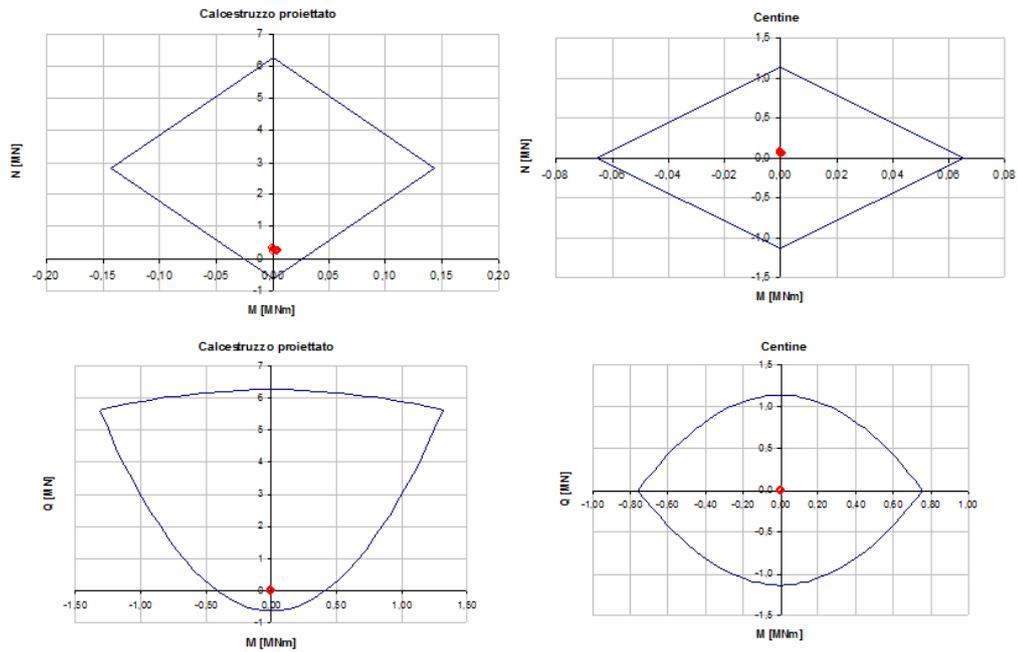
*Figura 52 – Sollecitazioni di sforzo normale agenti sul rivestimento preliminare*



*Figura 53 - Sollecitazioni di momento flettente agenti sul rivestimento preliminare*



*Figura 54 - Sollecitazioni di taglio agenti sul rivestimento preliminare*



*Figura 55 – Diagrammi di interazione per il rivestimento preliminare*

### 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.

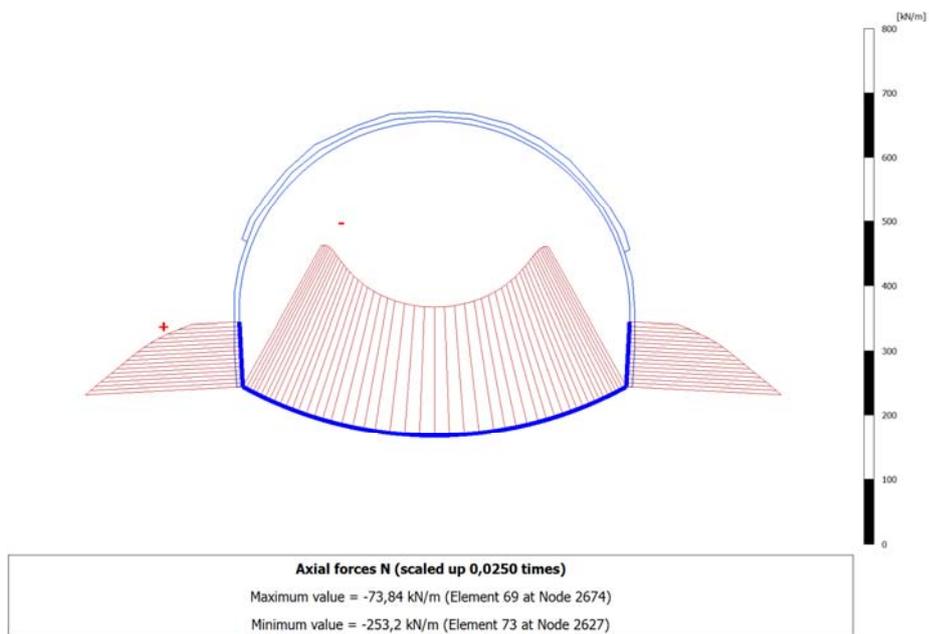


Figura 56 - Sollecitazioni di sforzo normale agenti su murette e arco rovescio

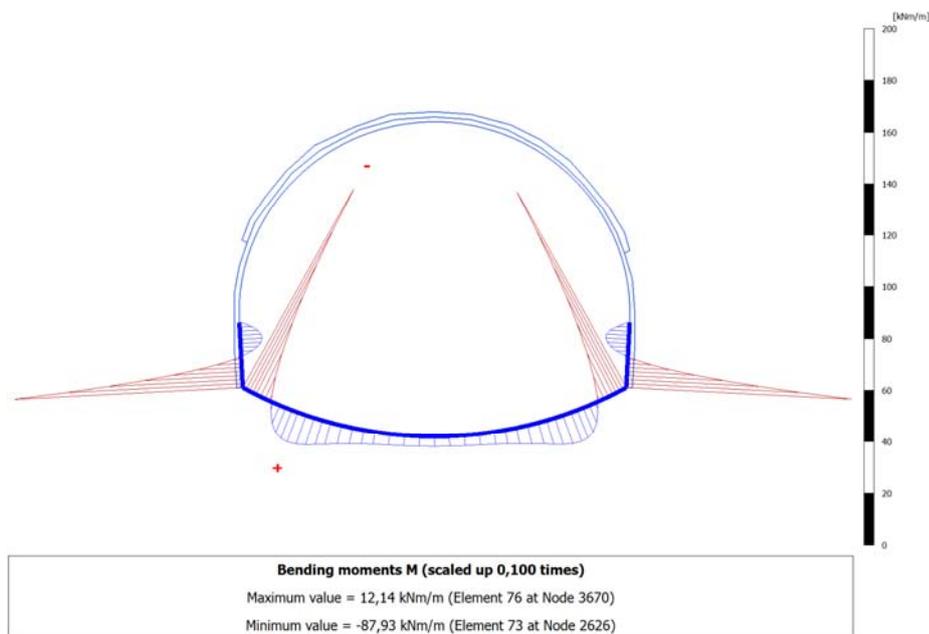
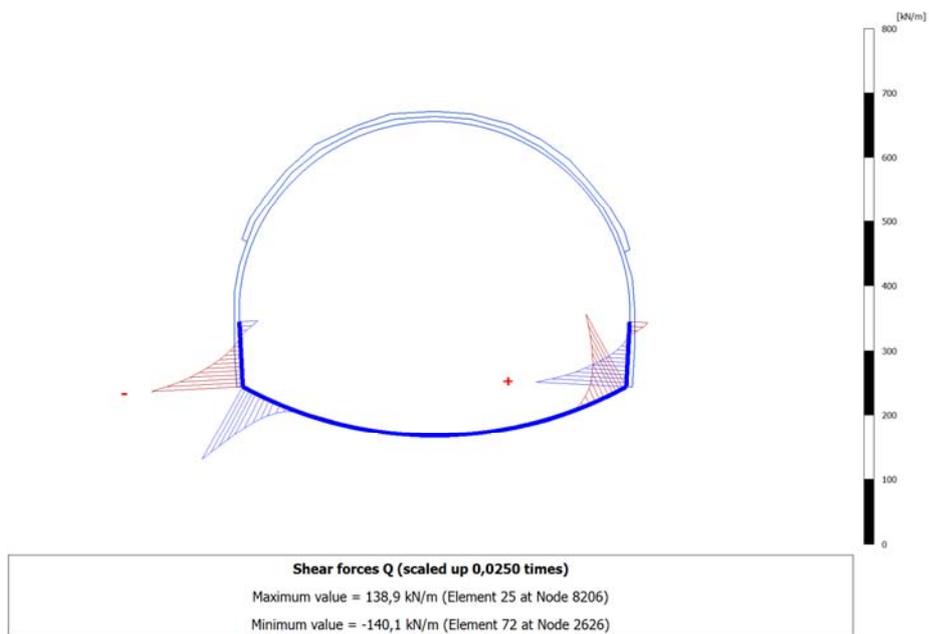
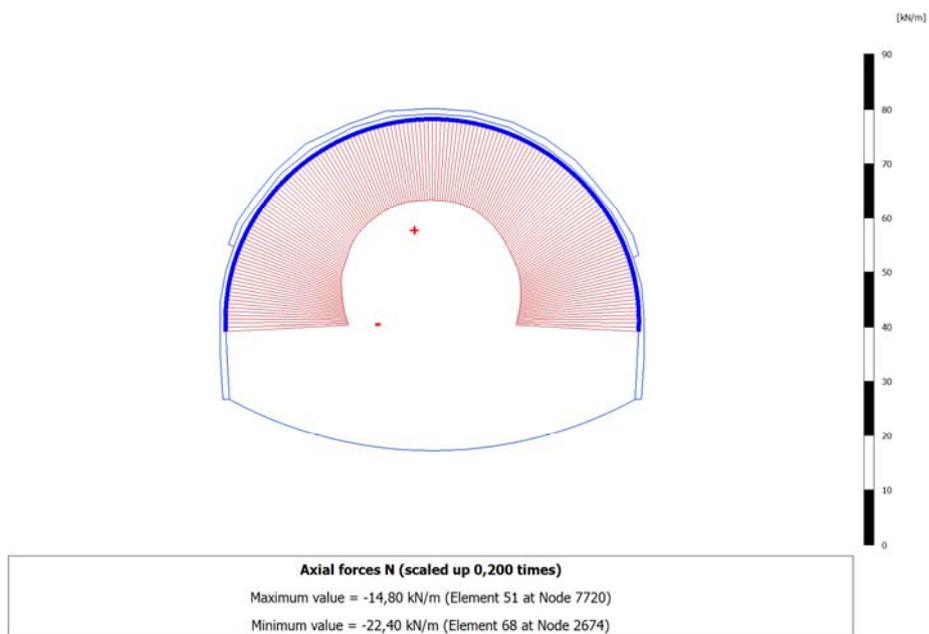


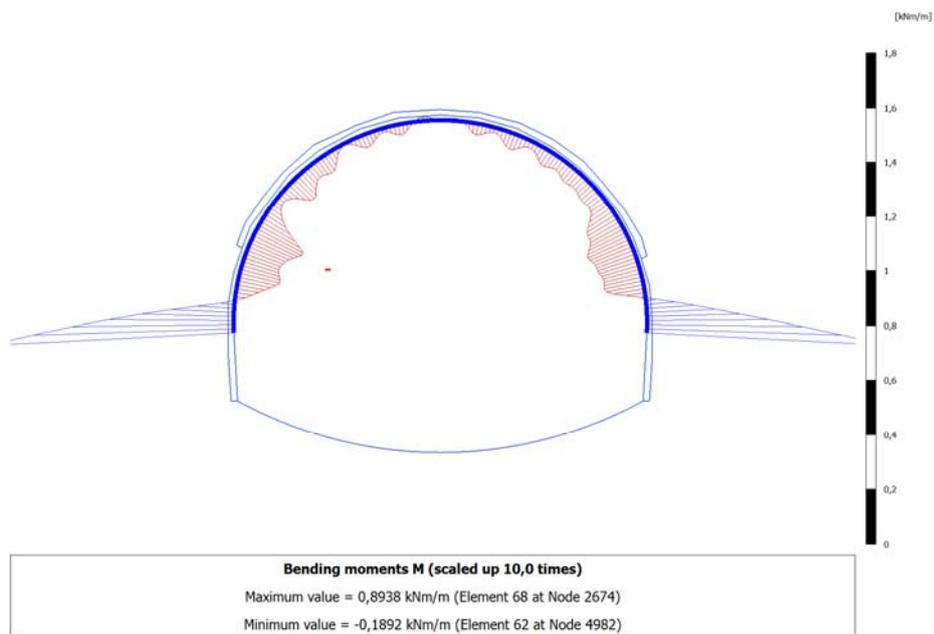
Figura 57 - Sollecitazioni di momento flettente agenti su murette e arco rovescio



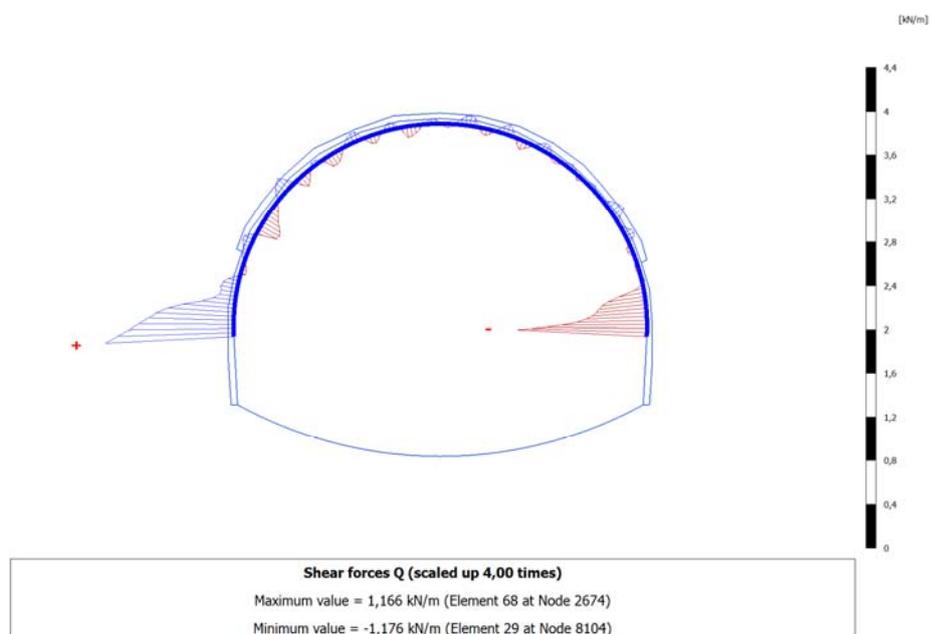
*Figura 58 - Sollecitazioni di taglio agenti su murette e arco rovescio*



*Figura 59 - Sollecitazioni di sforzo normale agenti sulla calotta*



*Figura 60 - Sollecitazioni di momento flettente agenti sulla calotta*



*Figura 61 - 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 Truncafila, nella sezione alla progressiva 3+200 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 7 – 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	140
Muretta	-253	88	10

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 62, Figura 63 e Figura 69 si riporta altresì la distribuzione degli sforzi normali agenti sulle sezioni considerate per effetto della corrispondente sollecitazione di presso-flessione.

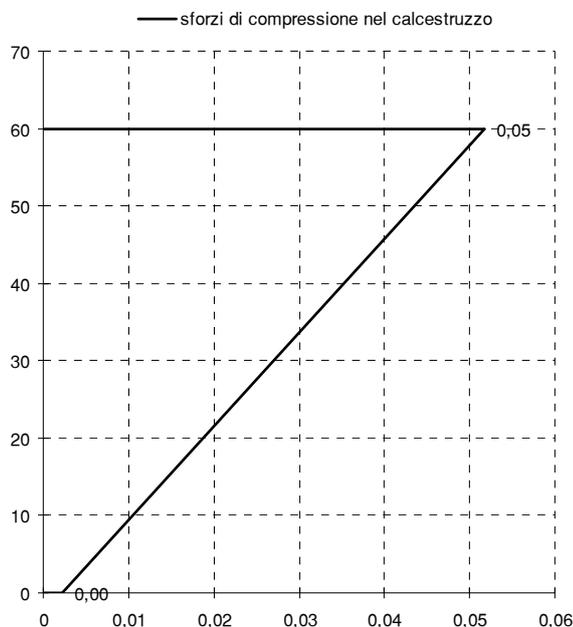
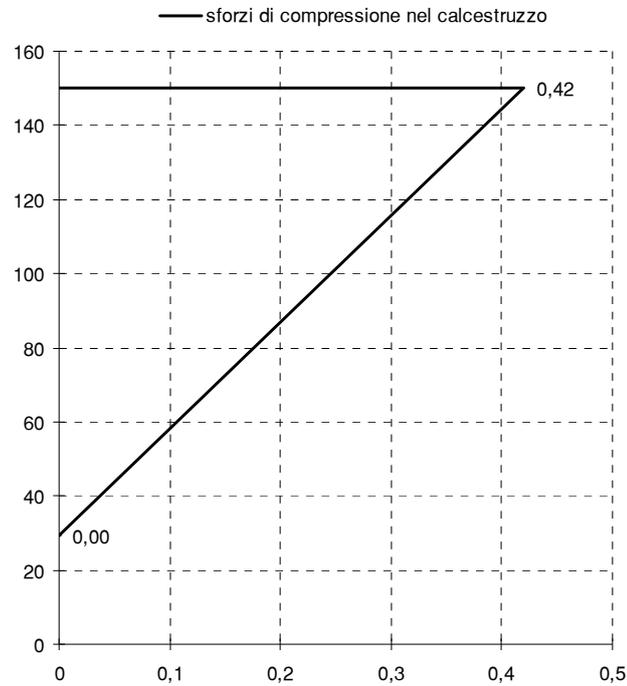
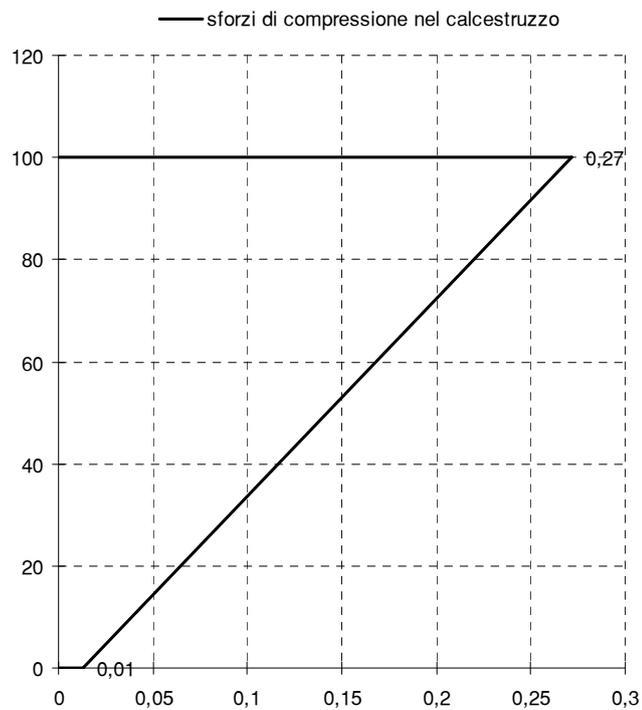


Figura 62 – Compressione nel calcestruzzo, calotta



*Figura 63 - Compressione nel calcestruzzo, muretta*



*Figura 64 - Compressione nel calcestruzzo, arco rovescio*

**Tabella 8 – Verifiche strutturali per la sezione BOV alla progr. 3+200 km**

Elemento strutturale	sezione	b	h	N <sub>max</sub>	M <sub>max</sub>	V <sub>max</sub>	x	σ <sub>c,max</sub>	0,25·f <sub>ck</sub>	F <sub>s,σ</sub>	A*	τ <sub>c,max</sub>	0,21·f <sub>ctk</sub>	F <sub>s,τ</sub>
		cm	cm	kN	kNm	kN	cm	MPa	MPa		cm <sup>2</sup>	MPa	MPa	
Calotta	1-1	100	60	22	0,9	0,0	112,5	0,54	7,3	<b>0,1</b>	6000	0,00	0,42	<b>0,0</b>
Muretta	2-2	100	150	253	88	140	120,7	0,42	7,3	<b>0,1</b>	12070	0,17	0,42	<b>0,4</b>
Arco rovescio	3-3	100	100	200	12	10	188,9	0,27	7,3	<b>0,0</b>	10000	0,02	0,42	<b>0,0</b>

### 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 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 0.275 g.

METODO DI PROPAGAZIONE DELLE ONDE		
INPUT		
Eg (modulo elastico terreno)	3,15E+09	kPa
νg (poisson terreno)	0,2	
EI (modulo elastico lining)	2,50E+07	kPa
νI (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	0,275	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	0,275	g
H (spessore deposito dal bedrock)	1	m
γ (peso di volume terreno)	23	kN/m <sup>3</sup>
φ inclinazione onda S	45	°
φ inclinazione onda P	0	°
CALCOLI		
Ic (momento inerzia trasv)	2,68483789	m <sup>4</sup>
Ag (sezione trasv)	31,219577	m <sup>2</sup>
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	<b>flessibile</b>

Figura 65 – Dati di ingresso dell'analisi sismica dei rivestimenti

 <b>INGENIERIA</b>	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 95
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

In Figura 65 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:

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

In Figura 66 e Figura 67 sono illustrati i risultati del calcolo sismico, considerando due diverse configurazioni di sollecitazione sismica:

- onde P con angolo di deviazione  $0/90^\circ$  dall'asse galleria,  $45^\circ$  di deviazione per le onde S;
- onde P con angolo di deviazione  $45^\circ$  dall'asse galleria,  $0^\circ$  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.

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	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														

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
	$\sigma$ kPa assiale	$\sigma$ kPa assiale	$\sigma$ kPa fless	$\sigma$ kPa assiale
ONDE P	3208,333333	0	0	0
ONDE S	0	0	70,2101791	0
$\varepsilon$ max onda S		0,000003 < $\varepsilon$ amm		
$\varepsilon$ max onda P		0,000128 < $\varepsilon$ amm		

Figura 66 – 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
	$\sigma$ kPa assiale	$\sigma$ kPa assiale	$\sigma$ kPa fless	$\sigma$ kPa assiale
ONDE P	1604,166667	1604,166667	17,55254478	1172,242182
ONDE S	0	0	198,584375	0
$\varepsilon$ max onda S		0,000008 < $\varepsilon$ amm		
$\varepsilon$ max onda P		0,000065 < $\varepsilon$ amm		

Figura 67 - 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 3+300 km

Copertura 35 m da livelletta

Distanza fra i piedritti delle due gallerie affiancate = 44 m

Sezioni di scavo diverse nelle due direzioni di marcia

Per i parametri geotecnici adottati nella presente sezione di calcolo si rimanda al capitolo 11.3.

La sezione di calcolo rappresenta una delle sezioni a maggiore copertura entro la Formazione Ragusa, caratterizzata da un indice RMR89 pari a 56 punti.

La sezione tipo adottata è la Ac.

Si elencano ora i parametri geotecnici adottati per la sezione di calcolo per caratterizzare il comportamento tenso-deformativo dei calcari della Formazione Ragusa:

R medio galleria = 7 m

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 97
	Pr	Strada			Lotto	Macro opera		Opera			Parte di opera	Tipo elab	N. Elab.		Rev								

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**

Sequenza di calcolo	Sezione tipo Ac	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 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(40), indicando con il valore tra parentesi l'entità dell'allargamento della sezione corrente, limitatamente alla canna direzione Gela, in centimetri.

**Tabella 10 - Caratteristiche dei rivestimenti previsti per la sezione in esame**

		Sezione Ac
Rivestimento preliminare	Centine	1 HEA 160 / 1.5 m
	A	38.8 cm <sup>2</sup>
	J	1673 cm <sup>4</sup>
	w	30.4 kg/m
	Spritz, spessore	25 cm
	Sostegno equivalente	
Rivestimento definitivo	E eq	31980 MPa
	spessore eq	25 cm
	Arco rovescio	
	spessore medio	0.7 m
	EA	2.1 e7 kN/m
	EJ	857500 kNm <sup>2</sup> /m
	Calotta	
	spessore medio	0.6 m
	EA	1.8 e7 kN/m
	EJ	540000 kNm <sup>2</sup> /m
	Muretta	
	spessore medio	0.7 m
EA	2.1 e7 kN/m	
EJ	857500 kNm <sup>2</sup> /m	

 <b>TRUNCAFILA</b>	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 98
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

### 13.3.1. 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, quella a sezione maggiore, con i detensionamenti precedentemente elencati.

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 dell'ordine di 45-50 m nella, rimanendo tale o aumentando di estensione lungo la parte di tracciato che compete alla galleria Truncafila;
- 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.

Inoltre, l'analisi dell'interazione fra le due canne autostradali in fase di scavo è già stata realizzata per quanto riguarda la sezione alla progressiva 2+900 km, entro le più scadenti marne della Formazione Tellarò. In corrispondenza di quella sezione si è dimostrata l'assenza di una mutua influenza tra le due canne di scavo, si ritiene dunque che tale affermazione sia estendibile al caso in esame.

Nelle pagine seguenti si riportano i risultati dell'analisi Plaxis. L'analisi è stata realizzata considerando una copertura di 35 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.

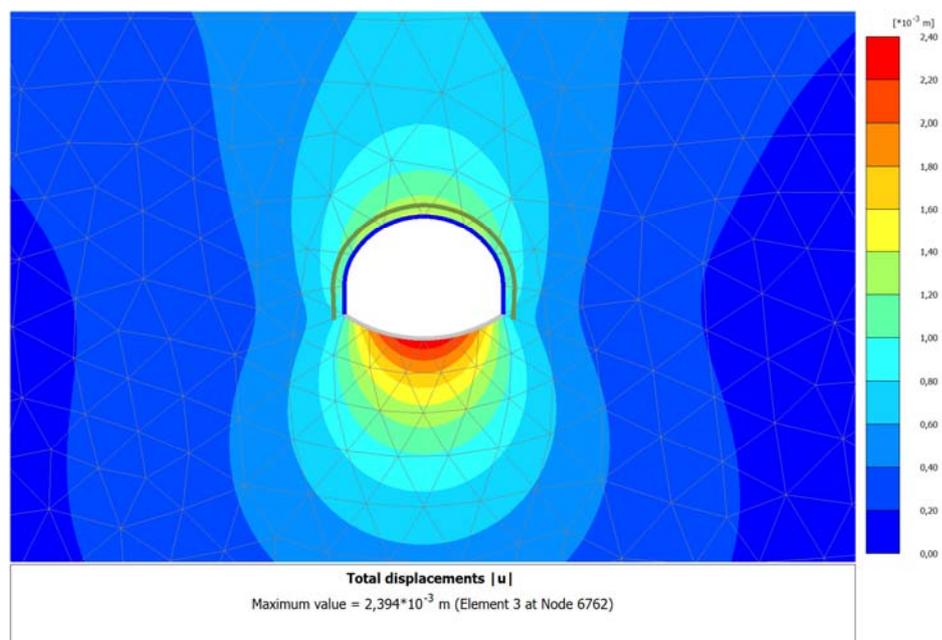
Le Figura 68 e Figura 69 riportano la distribuzione degli spostamenti radiali al contorno di scavo e la distribuzione delle zone plasticizzate al termine del detensionamento: si osserva che i calcari presentano una buona capacità di autosostegno, con spostamenti millimetrici ed una plasticizzazione corticale. Quest'osservazione è in accordo con quanto previsto dalle classificazioni geomeccaniche per un ammasso di classe III. Il calcare presenta infatti un indice RMR di base di 56 punti, per il quale secondo l'abaco di Bieniawski riportato in Figura 70 è possibile prevedere una lunghezza libera autoportante superiore ai 3 m di avanzamento senza sostegni, come previsto dalla sezione Ac. Questa affermazione risulta leggermente discrepante con quanto previsto applicando l'analisi all'equilibrio limite del metodo di Tamez, che associa alla chiave un fattore di sicurezza pari all'unità. A riprova della validità di quanto previsto dalle classificazioni geomeccaniche, si evidenzia che in prossimità del tracciato sono

presenti numerose caverne scavate in calcare, completamente prive di sostegni, Figura 23.

In Figura 71 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 72 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.

In Figura 73, Figura 74, Figura 75 e Figura 76 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. 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 68 – Spostamenti radiali al contorno galleria a fine detensionamento*

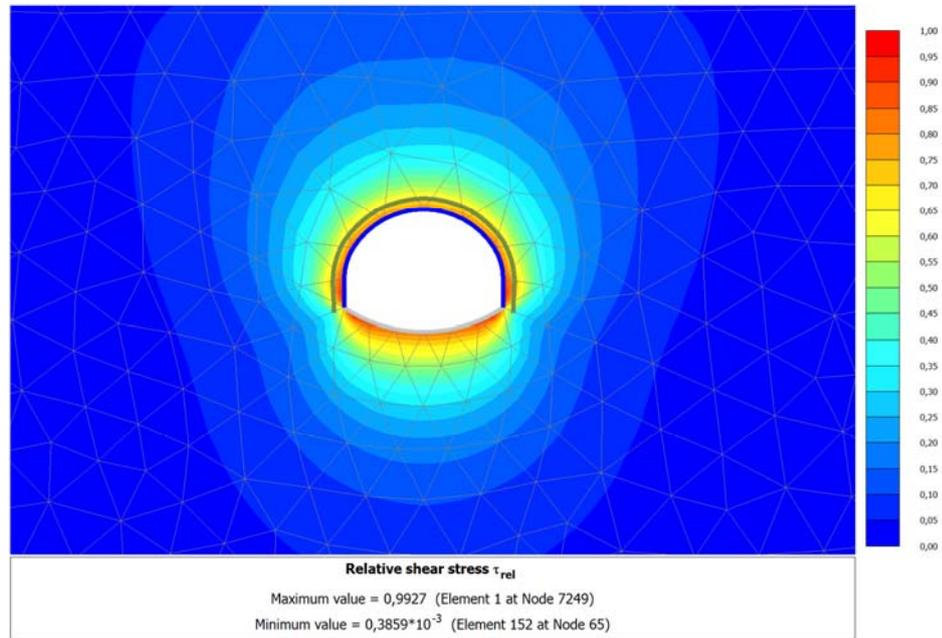


Figura 69 – Zone plasticizzate al contorno galleria a fine detensionamento

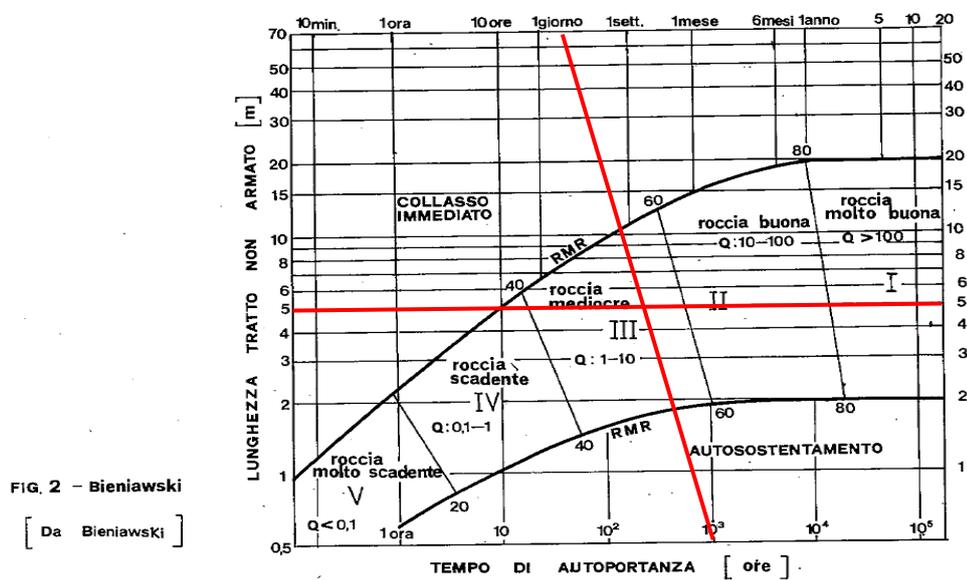


Figura 70 – Abaco di Bieniawski per la determinazione della lunghezza libera e del tempo di autoportanza in relazione alla qualità della massa rocciosa

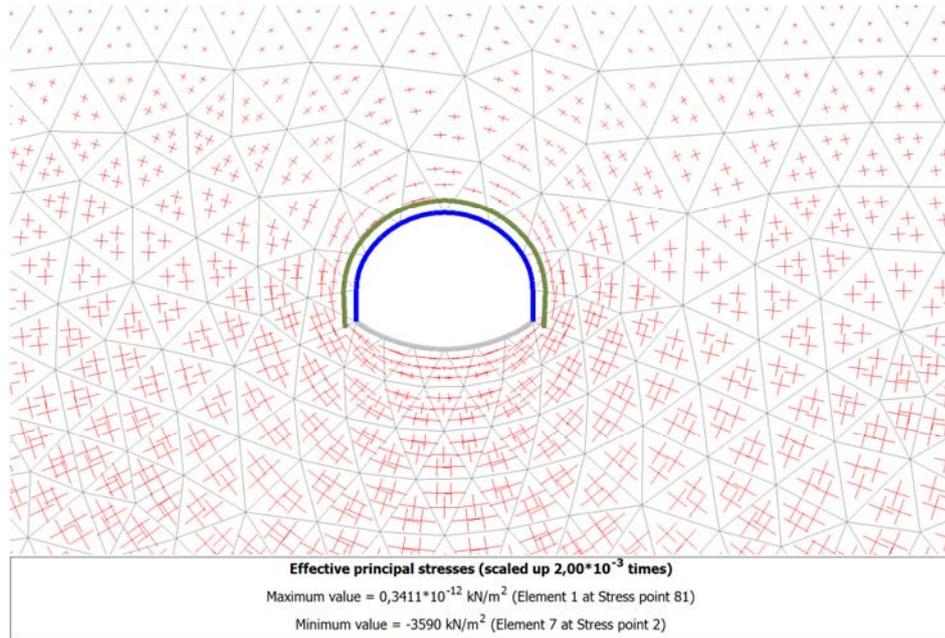


Figura 71 – Orientazione delle tensioni principali al contorno del cavo

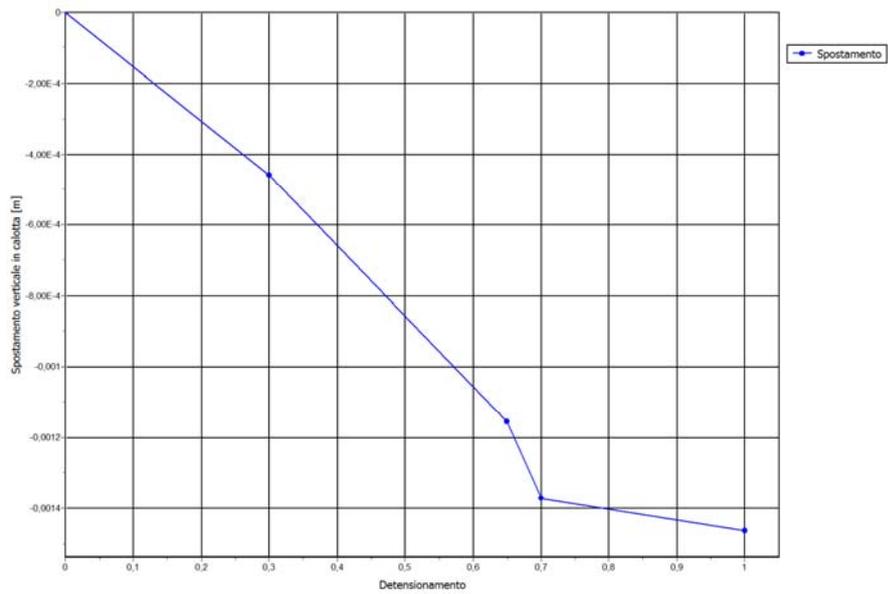
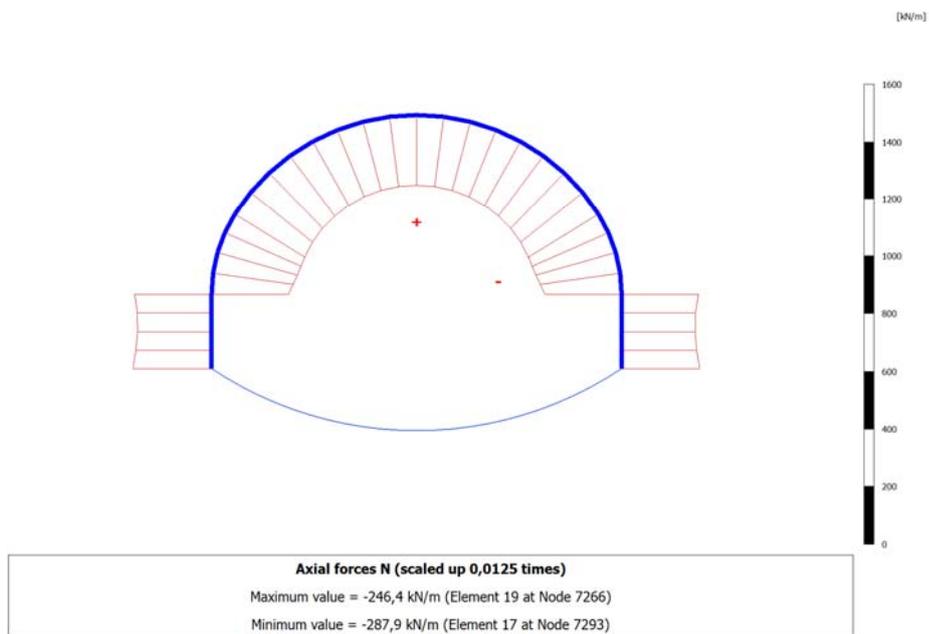
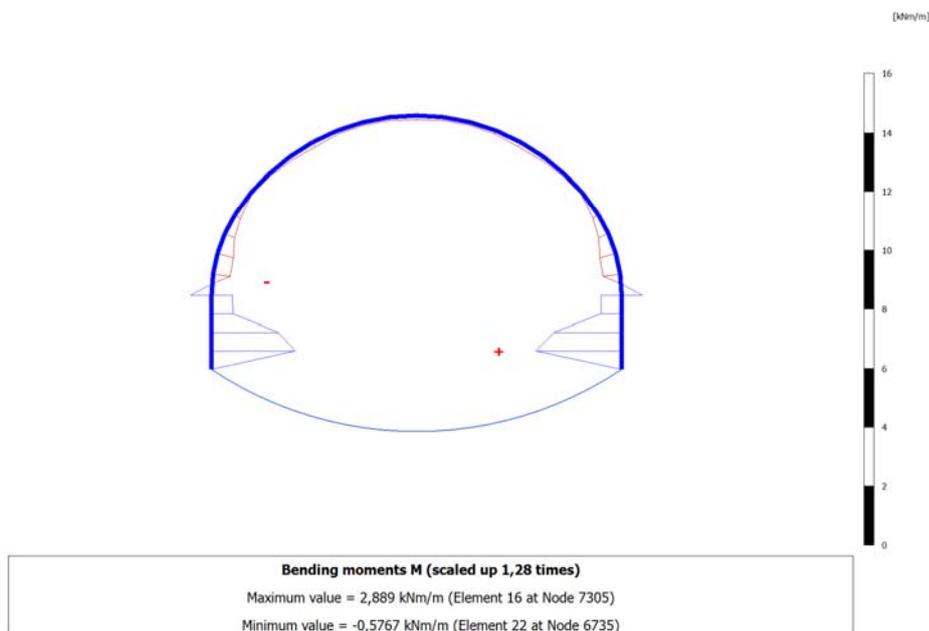


Figura 72 – Spostamenti verticali in calotta, in presenza del solo prerivestimento



*Figura 73 – Sollecitazioni di sforzo normale agenti sul rivestimento preliminare*



*Figura 74 - Sollecitazioni di momento flettente agenti sul rivestimento preliminare*

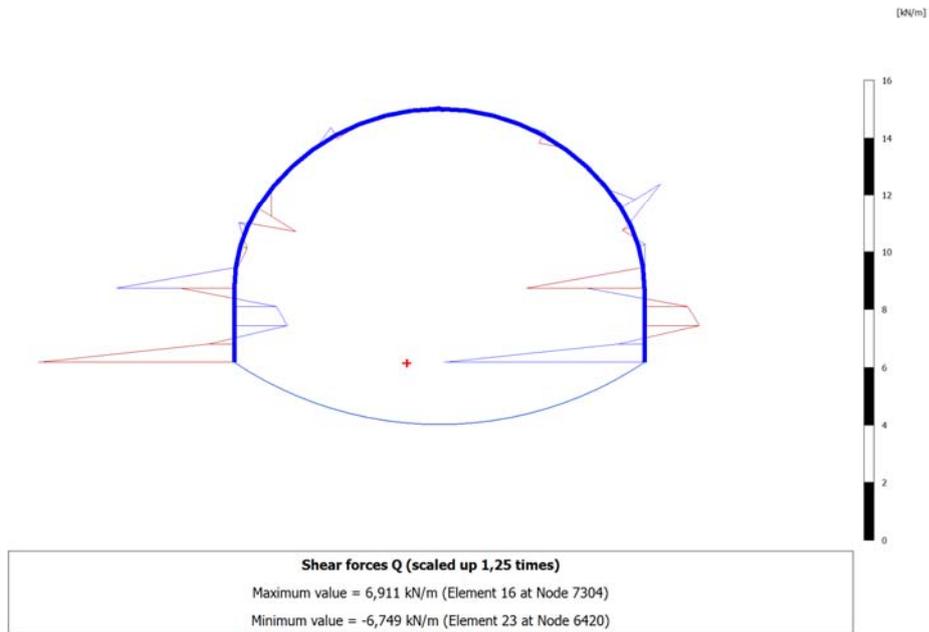


Figura 75 - Sollecitazioni di taglio agenti sul rivestimento preliminare

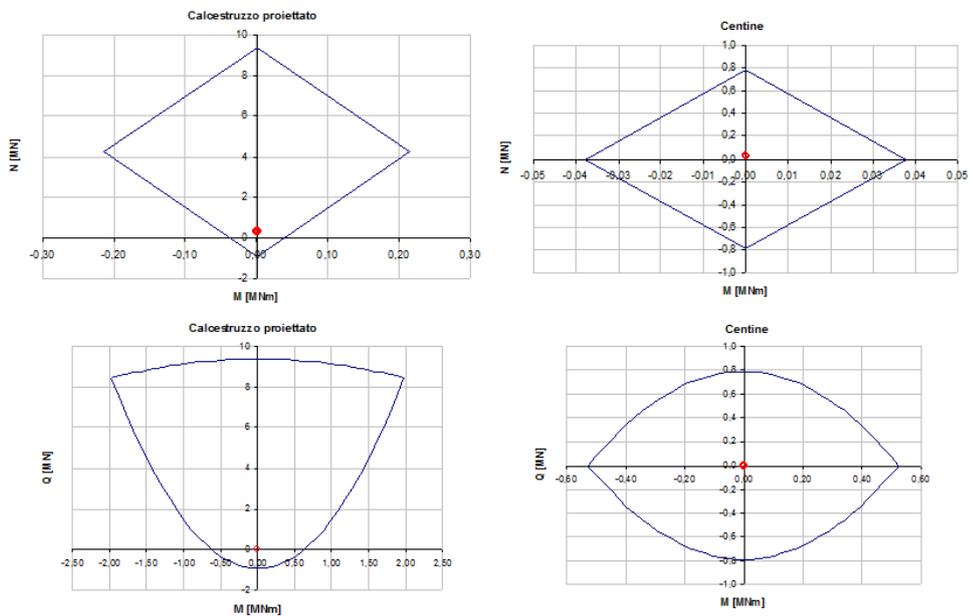


Figura 76 – Diagrammi di interazione dei rivestimenti preliminari

### 13.3.2. Sollecitazioni agenti nel rivestimento definitivo

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

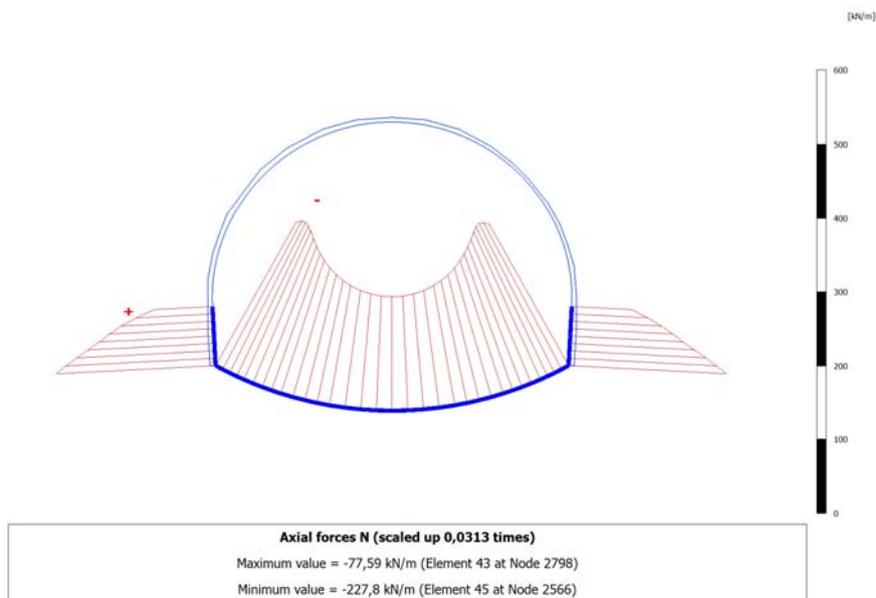


Figura 77 - Sollecitazioni di sforzo normale agenti su arco rovescio e murette

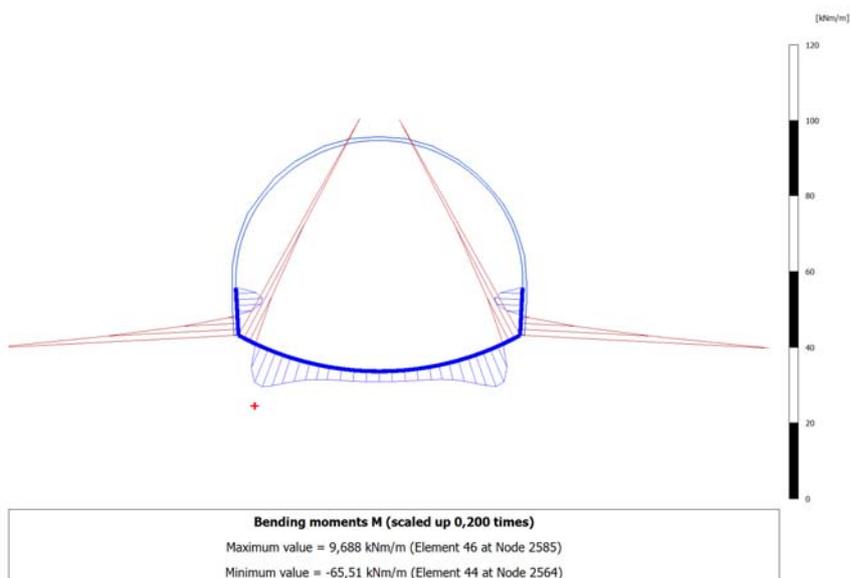
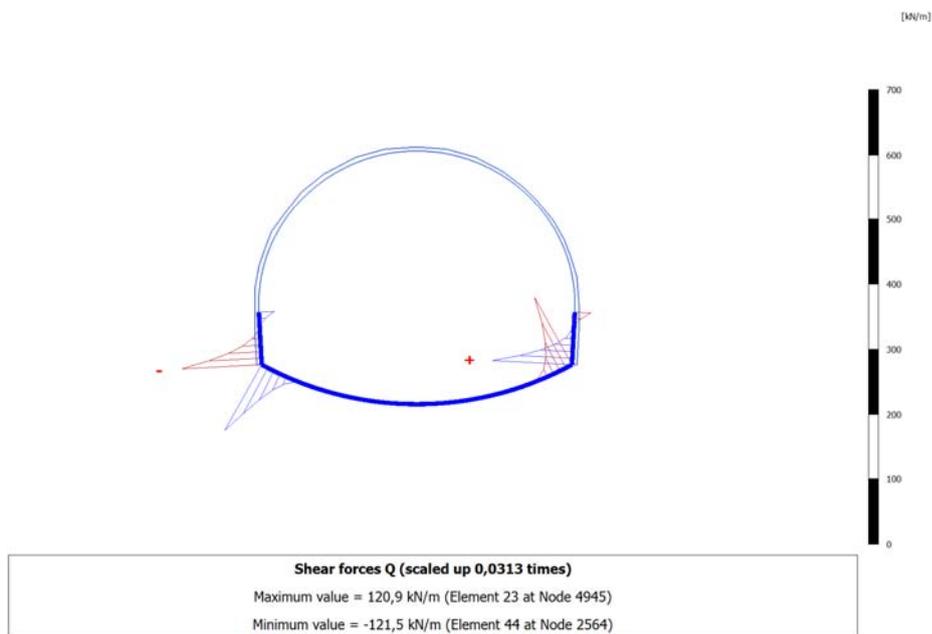
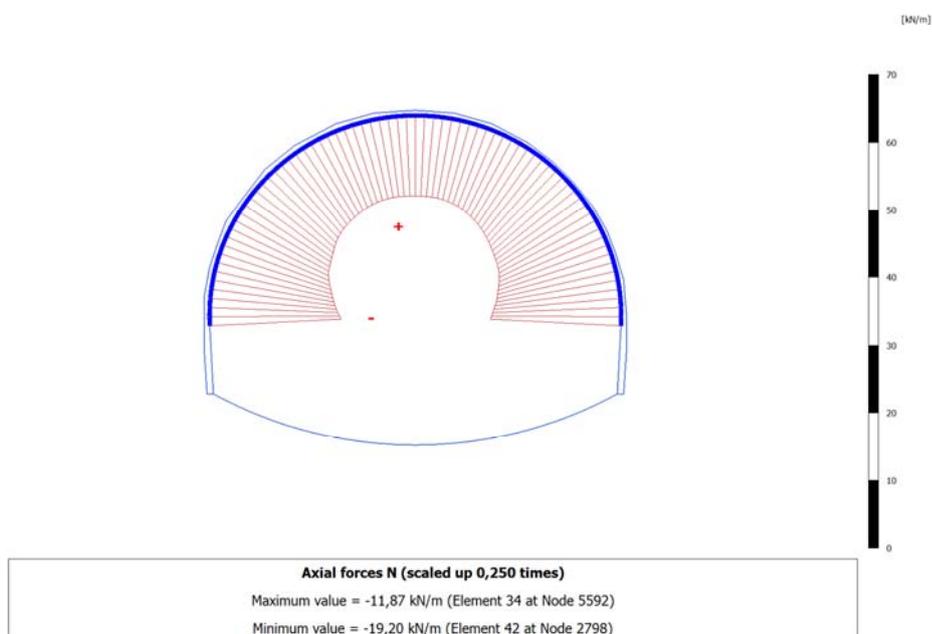


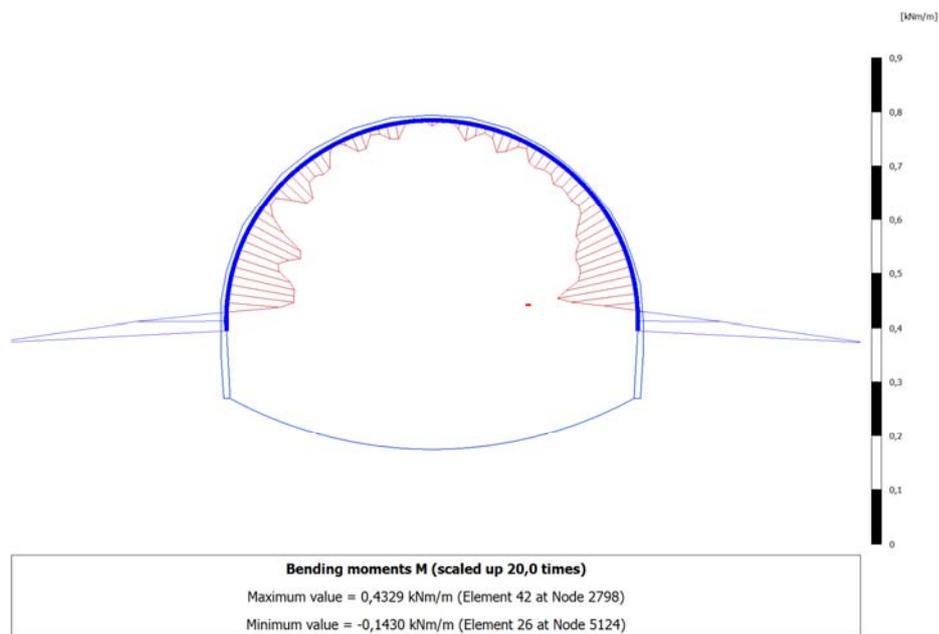
Figura 78 - Sollecitazioni di momento flettente agenti su arco rovescio e murette



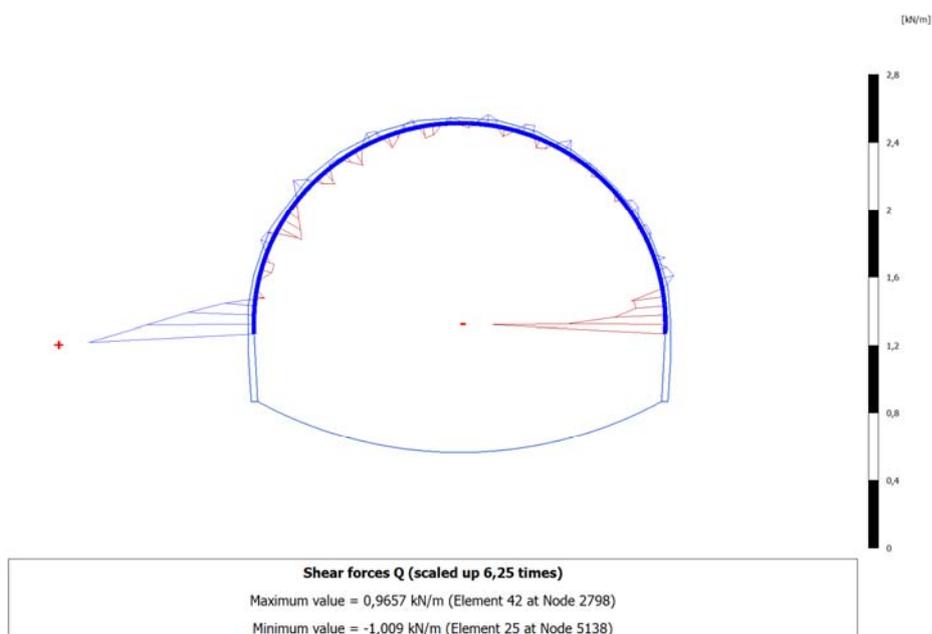
*Figura 79 - Sollecitazioni di taglio agenti su arco rovescio e murette*



*Figura 80 - Sollecitazioni di sforzo normale agenti sulla calotta*



*Figura 81 - Sollecitazioni di momento flettente agenti sulla calotta*



*Figura 82 - Sollecitazioni di taglio agenti sulla calotta*

### 13.3.3. Verifiche strutturali del rivestimento definitivo

Di seguito si presentano le verifiche strutturali realizzate per la Galleria Truncafila, nella sezione alla progressiva 3+300 km.

In corrispondenza di questa sezione si è analizzata con metodi numerici e analitici la sezione tipo di sostegno Ac. La procedura di calcolo ha previsto la realizzazione di due analisi, di cui la prima cautelativamente associa tutti i carichi dovuti al detensionamento della massa rocciosa ai prerivestimenti, una mentre nella seconda analisi 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 11 – 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	-20	0.4	1
Arco rovescio	-150	10	122
Muretta	-228	66	10

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 12 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:

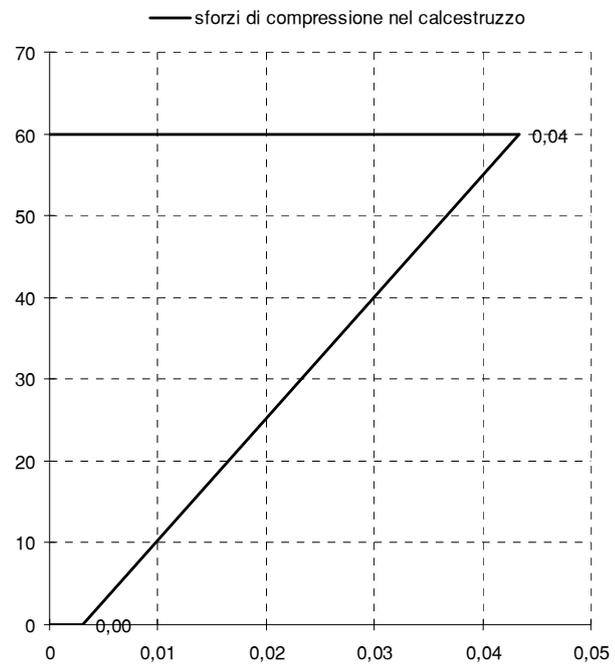
- b base della sezione
- h altezza della sezione

 <b>TECNOFERRAL</b>	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 108
	Pr	Strada		Lotto	Macro opera		Opera		Parte di opera	Tipo elab	N. Elab.		Rev										

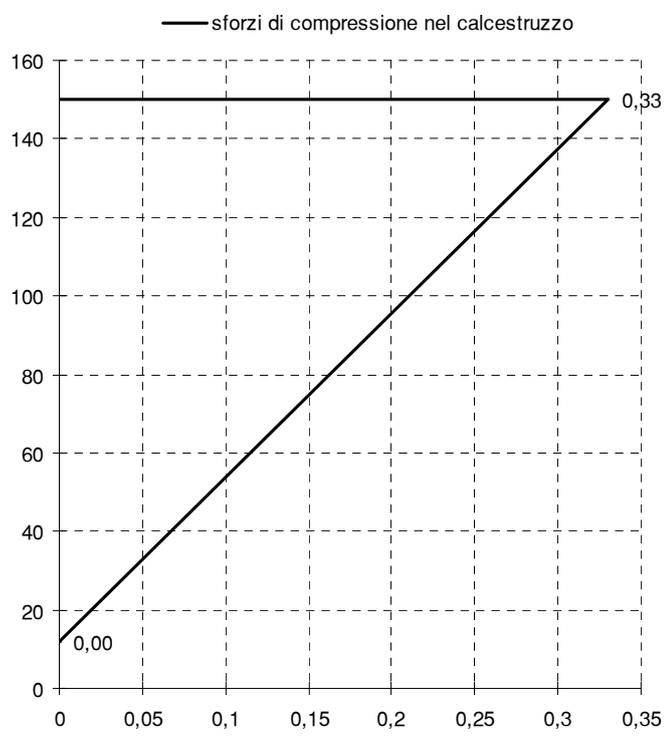
$N_{max}$	massima azione di compressione
$M_{max}$	massimo momento flettente
$V_{max}$	massima azione di taglio
x	distanza dell'asse neutro dal lembo compresso
$\sigma_{c,max}$	massimo sforzo di compressione
$0,25 \cdot f_{ck}$	sforzo di compressione limite
$F_{s,\sigma}$	fattore di sicurezza nei confronti 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.

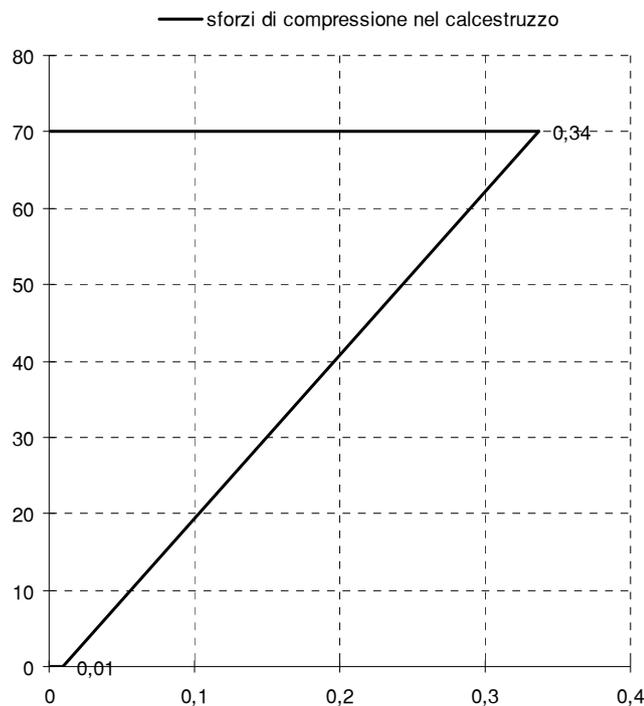
In Figura 83, Figura 84 e Figura 85 si riporta altresì la distribuzione degli sforzi normali agenti sulle sezioni considerate per effetto della corrispondente sollecitazione di presso-flessione.



*Figura 83 – Compressione nel calcestruzzo, calotta*



*Figura 84 - Compressione nel calcestruzzo, muretta*



*Figura 85 - Compressione nel calcestruzzo, arco rovescio*

<i>Tabella 12 – Verifiche strutturali per la sezione Ac alla progr. 3+300 km</i>														
Elemento strutturale	sezione	b	h	N <sub>max</sub>	M <sub>max</sub>	V <sub>max</sub>	x	σ <sub>c,max</sub>	0,25·f <sub>ck</sub>	F <sub>s,σ</sub>	A*	τ <sub>c,max</sub>	0,21·f <sub>ctk</sub>	F <sub>s,τ</sub>
		cm	cm	kN	kNm	kN	cm	MPa	MPa		cm <sup>2</sup>	MPa	MPa	
Calotta	1-1	100	60	20	0,4	0,0	195,0	0,04	7,3	<b>0,0</b>	6000	0,00	0,42	<b>0,0</b>
Muretta	2-2	100	150	228	66	122	138,2	0,33	7,3	<b>0,0</b>	13820	0,13	0,42	<b>0,3</b>
Arco rovescio	3-3	100	70	150	10	10	96,3	0,34	7,3	<b>0,0</b>	7000	0,02	0,42	<b>0,1</b>

#### 13.3.4. 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 0.275 g.

METODO DI PROPAGAZIONE DELLE ONDE		
INPUT		
Eg (modulo elastico terreno)	5,60E+09	kPa
$\nu$ g (poisson terreno)	0,2	
EI (modulo elastico lining)	2,50E+07	kPa
$\nu$ 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	0,275	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	0,275	g
H (spessore deposito dal bedrock)	1	m
$\gamma$ (peso di volume terreno)	23	kN/m <sup>3</sup>
$\Phi$ inclinazione onda S	45	°
$\Phi$ inclinazione onda P	0	°
CALCOLI		
Ic (momento inerzia trasv)	2,68483789	m <sup>4</sup>
Ag (sezione trasv)	31,219577	m <sup>2</sup>
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	227650,4	<b>flessibile</b>

*Figura 86 – Dati di ingresso dell'analisi sismica dei rivestimenti*

In Figura 86 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:

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

In Figura 87 e Figura 88 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 3.5 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
	$\sigma$ kPa assiale	$\sigma$ kPa assiale	$\sigma$ kPa fless	$\sigma$ kPa assiale
ONDE P	3208,333333	0	0	0
ONDE S	0	0	70,2101791	0
$\varepsilon$ max onda S	0,000003 < $\varepsilon$ amm			
$\varepsilon$ max onda P	0,000128 < $\varepsilon$ amm			

Figura 87 – 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	0,000007021	0,0000320833
ONDE S	0,0000000000	0,0000000000	0,0000079434	0,0000000000
	$\sigma$ kPa assiale	$\sigma$ kPa assiale	$\sigma$ kPa fless	$\sigma$ kPa assiale
ONDE P	1604,166667	1604,166667	17,55254478	1174,052763
ONDE S	0	0	198,584375	0
$\varepsilon$ max onda S	0,000008 < $\varepsilon$ amm			
$\varepsilon$ max onda P	0,000065 < $\varepsilon$ amm			

Figura 88 - 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

 <b>TRUNCAFILA</b>	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 113
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

#### 14. IMBOCCHI

La Galleria Truncafila prevede imbocchi con attacco diretto sia dal lato Nord che dal lato Sud, i due imbocchi risultano comunque abbastanza diversi fra loro, in quanto dal lato Siracusa (Sud) l'area di imbocco si pone totalmente entro la Formazione delle marne argillose del Tellaro, mentre dal lato Gela (Nord) la zona di scavo in corrispondenza dell'imbocco intercetta i calcari della Formazione Ragusa, caratterizzati da una migliore qualità geomeccanica.

Gli imbocchi Nord e Sud della galleria Truncafila sono realizzati rispettivamente in corrispondenza della Formazione Ragusa, Figura 89, e della Formazione Tellaro, Figura 90.

Per entrambi gli imbocchi, la realizzazione dello scavo è eseguita mediante scarpate con pendenza 1:5 interrotte, ogni 5 metri di altezza, da berme orizzontali di 1 metro di larghezza. In corrispondenza dell'attacco in galleria naturale viene realizzata un'unica scarpata a tutta altezza con pendenza 1:5.

Per quanto riguarda gli interventi da realizzarsi sui versanti nella formazione Ragusa, sono previste le seguenti fasi:

- rimodellazione del versante;
- disaggancio di sicurezza, eseguito in modo sistematico mano a mano che il piano di scavo viene ribassato;
- eventuale posa di bulloni metallici.

La "cucitura" degli eventuali blocchi instabili dovrà essere realizzata mediante bulloni metallici a cementazione lungo foro, di lunghezza 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 immersione pressoché perpendicolare al tracciato, con una disposizione a reggipoggio o franapoggio, ma comunque con una inclinazione non superiore ai 10 gradi.

Per i versanti realizzati nella formazione Tellaro, si prevede il getto di uno strato di circa 10-15 cm di spritz-beton fibro-rinforzato, allo scopo di preservare i versanti da fenomeni di alterazione dovuti agli agenti meteorici.

 <b>TRUNCAFILA</b>	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 114
	Pr	Strada	Lotto	Macro opera	Opera	Parte di opera	Tipo elab	N. Elab.	Rev														



*Figura 89 – Area dell'imbocco Nord della Galleria Truncafila*



*Figura 90 – Area dell'imbocco Sud della Galleria Truncafila*

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 10.

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 115
	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 d'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.

Il "Profilo geotecnico e geomeccanico Galleria Truncafila" in direzione Gela e Siracusa riporta, per ciascuna tratta omogenea, le misure di monitoraggio previste.

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'extrapolazione 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;

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	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														

- le letture siano condotte secondo un programma preciso;
- i dati raccolti siano presentati in modo organico e facilmente interpretabile.

Per il conseguimento di questo obiettivo, vengono fornite di seguito le principali indicazioni per la realizzazione delle due tipologie di sezione strumentata che si prevede di realizzare lungo la galleria.

### 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 tenso-deformativo a tergo delle opere di stabilizzazione, che consente 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 il loro evolversi nel tempo.

La stazione di convergenza prevede l'installazione di 5 barrette o chiodi di convergenza disposti in modo simmetrico lungo il contorno di scavo.

Le barrette di misura dovranno essere installate a ridosso del fronte, prima di iniziare la fase di avanzamento. Ciascuna barretta verrà infissa nella roccia per 10 cm e dovrà presentare una lunghezza sufficiente a 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. 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;

 <b>INGEGNERIA</b>	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 117
	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 scheda di 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:

- a 20 m per quanto riguarda la tratta nelle marne del Tellaro;
- a 40 m per le tratte nei calcari della Formazione Ragusa.

Ulteriori stazioni di convergenza verranno realizzate in corrispondenza delle faglie principali, secondo quanto indicato nel Profilo geotecnico e geomeccanico della Galleria Truncafila, 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

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 118
	Pr	Strada	Lotto	Macro opera	Opera	Parte di opera	Tipo elab	N. Elab.	Rev														

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.

#### *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.

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	T	0	0	G	N	0	0	O	S	T	R	E	0	0	1	A	Pag. n. 119
	Pr	Strada		Lotto		Macro opera		Opera		Parte di opera		Tipo elab		N. Elab.		Rev							

## 16. CONCLUSIONI

Nella presente relazione si è analizzata l'unica galleria naturale in progetto nell'ambito del Progetto esecutivo dell'autostrada Siracusa-Gela, nella tratta compresa fra Scicli e il fiume Irmínio, denominata Lotto 10 "Irmínio".

Il lotto in esame rappresenta la naturale prosecuzione del Lotto 9 "Scicli" che prevede, nella sua parte terminale, la realizzazione dello svincolo autostradale di Scicli ed il suo collegamento alla strada statale Scicli-Donnalucata. Il lotto 10 si snoda quasi interamente entro il territorio comunale di Scicli, per terminare in corrispondenza della sponda destra del fiume Irmínio, il cui impluvio marca il passaggio al Lotto 11.

Nell'ambito del lotto in esame è prevista un'unica galleria naturale denominata Truncafila, il cui sviluppo lineare è pari a circa 860 m. La galleria presenta 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 di 0,40 m che porta la larghezza complessiva della carreggiata a 11,60 m, per ragioni di visibilità.

La presente relazione riporta i risultati delle verifiche di stabilità e strutturali realizzate per la galleria naturale Truncafila, 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.

 <b>PROGETTA</b>	E	A	1	8	1	0	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							

Sulla base delle sollecitazioni ottenute dal modello Plaxis sono state eseguite anche le verifiche strutturali dei rivestimenti preliminari e definitivi. Questa procedura ha permesso da un lato di appurare che i prerivestimenti lavorano al di sotto dei corrispondenti limiti di 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 dimostrano infatti che il rivestimento definitivo non necessita di armatura. Si è comunque previsto di armare il rivestimento gettato in opera in corrispondenza dei tratti ritenuti più critici, ossia in corrispondenza delle faglie principali e delle zone di imbocco a ridotta copertura.

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.