

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE:



**DIREZIONE TECNICA**

**U.O. GALLERIE**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**ITINERARIO NAPOLI-BARI**

**RADDOPPIO TRATTA APICE - ORSARA**

**I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA**

GALLERIA ROCCHETTA

Relazione geotecnica e di calcolo

SCALA:

-
---

COMMESSA    LOTTO    FASE    ENTE    TIPO DOC.    OPERA/DISCIPLINA    PROGR.    REV.

IF0G    01    D    07    RB    GN0300    001    A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato/Data
A	Emissione Esecutiva	R. Pizzol	Dicembre 2017	P. Pitelli	Dicembre 2017	D. Aprea	Dicembre 2017	A. Sciotti Dicembre 2017

ITALFERR S.p.A.  
 U.O. GALLERIE  
 Dott. Ing. Alessandra Sciotti  
 Ordine degli Ingegneri di Roma  
 n° 19848

GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	2 di 141

## INDICE

1	PREMESSA .....	6
2	SCOPO E CONTENUTI DEL DOCUMENTO.....	6
3	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	7
3.1	LEGGI E NORMATIVE COGENTI .....	7
3.2	NORMATIVE NON COGENTI E RACCOMANDAZIONI.....	7
3.3	PRESCRIZIONI E SPECIFICHE TECNICHE (RFI, ITF).....	7
3.4	DOCUMENTI REFERENZIATI .....	7
3.5	DOCUMENTI CORRELATI.....	8
3.6	DOCUMENTI SUPERATI.....	9
4	ALLEGATI.....	9
5	DOCUMENTI PRODOTTI A SUPPORTO.....	9
6	DESCRIZIONE DELL'OPERA .....	11
6.1	IL TRACCIATO E LE OPERE IN SOTTERRANEO .....	11
6.2	INTERFERENZE LUNGO IL TRACCIATO.....	11
7	FASE CONOSCITIVA.....	12
7.1	INQUADRAMENTO GEOLOGICO.....	12
7.2	INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO.....	13
7.3	INDAGINI GEOTECNICHE.....	13
7.4	METODI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI E DELLE ROCCE. ....	17
7.4.1	<i>Terreni granulari</i> .....	17
7.4.2	<i>Terreni coesivi</i> .....	19
7.4.3	<i>Rocce</i> .....	20
7.5	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI E DELLE ROCCE .....	23
7.5.1	<i>Caratterizzazione geotecnica della Formazione della Baronìa – litofacies sabbiosa (BNA3)</i> .....	23

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	3 di 141

7.5.2	<i>Caratterizzazione geotecnica della Formazione della Baronina – litofacies argillosa (BNA2)</i> .....	35
7.5.3	<i>Caratterizzazione geotecnica della Formazione della Baronina – litofacies BNA1b</i> .....	46
7.6	REGIME IDRAULICO.....	47
8	FASE DI DIAGNOSI .....	49
8.1	CLASSI DI COMPORTAMENTO DEL FRONTE DI SCAVO.....	49
8.2	DETERMINAZIONE DELLE CATEGORIE DI COMPORTAMENTO .....	50
8.2.1	<i>Analisi con il metodo delle linee caratteristiche</i> .....	50
8.2.1.1	Metodo di analisi .....	50
8.2.1.2	Sezioni analizzate .....	51
8.2.1.3	Risultati delle analisi .....	52
8.2.2	<i>Analisi della stabilità del fronte</i> .....	53
8.2.2.1	Metodi di analisi .....	53
8.2.2.2	Sezioni analizzate .....	54
8.2.2.3	Risultati delle analisi .....	55
8.2.3	<i>Definizione delle tratte a comportamento tensio-deformativo omogeneo</i> .....	55
8.3	RISCHI POTENZIALI NELLA FASE DI REALIZZAZIONE DELLA GALLERIA.....	56
9	FASE DI TERAPIA.....	58
9.1	DEFINIZIONE DEL METODO DI SCAVO .....	58
9.1.1	<i>Scelta della tipologia di TBM</i> .....	59
9.1.2	<i>Sezione in scavo meccanizzato</i> .....	61
9.2	AZIONI DI MITIGAZIONE DEI POTENZIALI RISCHI NELLA FASE DI REALIZZAZIONE DELLA GALLERIA .....	63
9.3	CARATTERISTICHE DEI MATERIALI STRUTTURALI .....	64
9.4	ANALISI E VERIFICA DELLE SEZIONI TIPO .....	66
9.4.1	<i>Criteri di verifica</i> .....	66
9.4.1.1	Stabilità del fronte e del cavo .....	66
9.4.1.2	Interazione opera-terreno.....	67
9.5	SEZIONE MECCANIZZATO P.K. 10+190 .....	69
9.5.1	<i>Stabilità del fronte e del cavo</i> .....	69
9.5.2	<i>Interazione opera-terreno</i> .....	70
9.5.3	<i>Fasi e percentuali di rilascio</i> .....	72

 <b>ITALFERR</b> <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</b>	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA					
	GALLERIA ROCCHETTA Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	<b>COMMESSA</b> IF0G	<b>LOTTO</b> 01	<b>CODIFICA</b> D 07 RB	<b>DOCUMENTO</b> GN0300 001	<b>REV.</b> A

9.5.4	<i>Sismicità del'area e definizione della modalità di simulazione del carico sismico</i>	74
9.5.5	<i>Esame dei risultati</i>	78
9.5.6	<i>Verifiche strutturali SLU del rivestimento definitivo</i>	82
9.5.7	<i>Verifiche strutturali SLE del rivestimento definitivo</i>	88
9.6	<b>SEZIONE MECCANIZZATO P.K. 16+090</b>	92
9.6.1	<i>Stabilità del fronte e del cavo</i>	92
9.6.2	<i>Interazione opera-terreno</i>	94
9.6.3	<i>Fasi e percentuali di rilascio</i>	97
9.6.4	<i>Esame dei risultati</i>	99
9.6.5	<i>Verifiche strutturali SLU del rivestimento definitivo</i>	105
9.6.6	<i>Verifiche strutturali SLE del rivestimento definitivo</i>	108
9.7	<b>SEZIONE MECCANIZZATO P.K. 12+680</b>	110
9.7.1	<i>Interazione opera-terreno</i>	110
9.7.2	<i>Fasi e percentuali di rilascio</i>	112
9.7.3	<i>Esame dei risultati</i>	114
9.7.4	<i>Verifiche strutturali SLU del rivestimento definitivo</i>	120
9.7.5	<i>Verifiche strutturali SLE del rivestimento definitivo</i>	123
9.8	<b>VERIFICHE STATICHE CONCI PREFABBRICATI IN FASE TRANSITORIA</b>	125
9.8.1	<i>Rimozione dei casseri</i>	127
9.8.2	<i>Prima movimentazione</i>	128
9.8.3	<i>Stoccaggio dei conci dalla scasseratura alla completa maturazione</i>	129
9.8.4	<i>Stoccaggio dei conci in cantiere (alla completa maturazione)</i>	131
9.8.5	<i>Montaggio dei conci</i>	133
9.8.6	<i>Sforzi dovuti alla spinta dei martinetti</i>	134
9.8.7	<i>Verifica del carico concentrato per il singolo Martinetto</i>	136



 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA</p>												
<p>GALLERIA ROCCHETTA Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IF0G</td> <td>01</td> <td>D 07 RB</td> <td>GN0300 001</td> <td>A</td> <td>5 di 141</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	5 di 141
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	5 di 141								

9.8.8	<i>Sollecitazioni dovute al peso del concio:errata manovra dei martinetti.....</i>	138
10	FASE DI VERIFICA E MESSA A PUNTO DEL PROGETTO .....	140
10.1	MONITORAGGIO IN CORSO D’OPERA.....	140
11	CONCLUSIONI.....	141

	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA					
GALLERIA ROCCHETTA Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	COMMESSA IF0G	LOTTO 01	CODIFICA D 07 RB	DOCUMENTO GN0300 001	REV. A	FOGLIO 6 di 141

## 1 PREMESSA

La presente relazione è parte integrante del progetto definitivo per il raddoppio della linea ferroviaria Apice – Hirpinia; tale progetto si inserisce nel più ampio ambito di riqualificazione e potenziamento dell’itinerario ferroviario Roma - Napoli – Bari.

Nell’ambito di questa tratta è presente la galleria Rocchetta, oggetto della presente relazione, che si estende per oltre 6 Km.

## 2 SCOPO E CONTENUTI DEL DOCUMENTO

Nel presente documento si affrontano le problematiche progettuali connesse alla realizzazione della galleria Rocchetta, ubicata fra le progressive km 10+074.00 (inizio imbocco lato Bari) e km16+623 (imbocco lato Napoli) per una lunghezza totale di 6549 m..

Per l’inquadramento generale relativo alle caratteristiche ed ai requisiti funzionali delle opere in sottterraneo si rimanda alla “Relazione tecnica delle opere in sottterraneo” (Rif. [20]).

La progettazione della galleria Rocchetta, condotta secondo il metodo ADECO-RS (Rif. [22]), si è articolata nelle seguenti fasi:

1. Fase conoscitiva: è finalizzata allo studio e all’analisi del contesto geologico e geotecnico in cui sarà realizzata la galleria; i risultati dello studio geologico sono descritti nella specifica Relazione Geologica e Idrogeologica (Rif. [15]) a cui si rimanda per l’illustrazione del modello geologico; lo studio geotecnico con la definizione del modello geotecnico di sottosuolo e dei parametri di progetto è illustrato nel capitolo 7.
2. Fase di diagnosi: è stata valutata della risposta deformativa dell’ammasso allo scavo in assenza di interventi di stabilizzazione per la determinazione delle categorie di comportamento (cap.7).
3. Fase di terapia: sulla base dei risultati delle precedenti fasi progettuali, si individuano le modalità di scavo e gli interventi di stabilizzazione idonei (sezioni tipo) per realizzare l’opera in condizioni di sicurezza (cap. 9). Le soluzioni progettuali sono state analizzate per verificarne l’adeguatezza: nel capitolo 9 sono illustrati metodi e risultati delle analisi condotte per la verifica della stabilità globale della cavità, per il dimensionamento/verifica degli interventi di stabilizzazione e dei rivestimenti, nelle diverse fasi costruttive e in condizioni di esercizio, e per la valutazione dei risentimenti attesi in superficie.
4. Fase di verifica e messa a punto: il progetto è completato dal piano di monitoraggio da predisporre ed attuare nella fase realizzativa (cap 10). Nel piano di monitoraggio sono individuati i valori delle grandezze fisiche a cui riferirsi in corso d’opera per controllare la risposta deformativa dell’ammasso al procedere dello scavo, verificare la rispondenza con le previsioni progettuali e mettere a punto le soluzioni progettuali nell’ambito delle variabilità previste in progetto.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	7 di 141

### 3 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

#### 3.1 LEGGI E NORMATIVE COGENTI

- Rif. [1] Decreto Ministero delle Infrastrutture e Trasporti 14/01/2008, “Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni”;
- Rif. [2] C.S.LL.PP., Circolare n°617 del 02/02/2009, “Istruzioni per l’applicazione delle “nuove norme tecniche per le costruzioni” di cui al DM 14/01/2008”;
- Rif. [3] Decreto Ministeriale 28/10/2005. “Sicurezza nelle gallerie ferroviarie”;
- Rif. [4] Regolamento del 18/11/2014 della Commissione dell’Unione Europea – 1303/2014 - relativa alla Specifica Tecnica di Interoperabilità concernente “la sicurezza nelle gallerie ferroviarie” nel sistema ferroviario transeuropeo convenzionale e ad alta velocità;
- Rif. [5] Regolamento del 18/11/2014 della Commissione dell’Unione Europea – 1300/2014 - relativa ad una Specifica Tecnica di Interoperabilità concernente le “persone a mobilità ridotta” nel sistema ferroviario transeuropeo convenzionale e ad alta velocità;
- Rif. [6] Regolamento del 18/11/2014 della Commissione dell’Unione Europea – 1299/2014 - relativa ad una Specifica Tecnica di Interoperabilità per il sottosistema “infrastruttura” del sistema ferroviario transeuropeo ad alta velocità.

#### 3.2 NORMATIVE NON COGENTI E RACCOMANDAZIONI

- Rif. [7] SIG, “Linee guida per la progettazione, l’appalto e la costruzione di opere in sotterraneo”, 1997;
- Rif. [8] ITA, “Guidelines for the design of tunnels”, 1988;

#### 3.3 PRESCRIZIONI E SPECIFICHE TECNICHE (RFI, ITF)

- Rif. [9] RFI, doc RFI DTC SI MA IFS 001 A “Manuale di Progettazione delle opere civili ” datato Dic 2016;
- Rif. [10] ITALFERR, Specifica Tecnica PPA.0002403 “Linee guida per la progettazione geotecnica delle gallerie naturali” datato Dicembre 2015.

#### 3.4 DOCUMENTI REFERENZIATI

Come input per il presente documento sono stati utilizzati gli elaborati di progetto relativi alle precedenti fasi progettuali:

- Rif. [11] ITALFERR, Progetto Preliminare (2007);
- Rif. [12] ITALFERR, Aggiornamento del Progetto Preliminare ai requisiti della Legge Obiettivo (2009);

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	8 di 141

Rif. [13] Ordinanza n°27 (e relativi Allegati) di approvazione del Progetto Preliminare da parte del Commissario Straordinario, contenente prescrizioni e raccomandazioni per la Progettazione Definitiva (2016).

Nel presente documento si fa inoltre riferimento ai seguenti elaborati allegati al progetto:

Rif. [14] ITALFERR, Dossier dati e requisiti di base per avvio PD - IF0G01D05ROMD0000001A – Gennaio 2016

Rif. [15] U.O. Geologia, Gestione Terre e Bonifiche, Elaborati Specialistici;

Rif. [16] U.O. Infrastrutture Centro, Elaborati Specialistici;

Rif. [17] U.O. Gallerie, doc IF0G01D07F6GN0000004A “Profilo geotecnico – Galleria Rocchetta - Tav. 1 di 3” datato Novembre 17

Rif. [18] U.O. Gallerie, doc IF0G01D07F6GN0000005A “Profilo geotecnico – Galleria Rocchetta - Tav. 2 di 3” datato Novembre 17

Rif. [19] U.O. Gallerie, doc IF0G01D07F6GN0000006A “Profilo geotecnico – Galleria Rocchetta - Tav. 3 di 3” datato Novembre 17

Rif. [20] U.O. Gallerie, documento n.° IF0F01D07RHGN0000001A “Relazione tecnica delle opere in sotterraneo” datato Novembre 2017.

Rif. [21] U.O. Gallerie, documento n.° IF0G01D07CLGN0000001A “Relazione sulla valutazione delle subsidenze e verifica degli effetti indotti sulle interferenze in superficie” datato Luglio 2017.

### 3.5 DOCUMENTI CORRELATI

Rif. [22] Lunardi P. (2006). Progetto e Costruzione di Gallerie: Analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli - ADECO-RS – (Hoepli Ed.);

Rif. [23] Bernaud D., Benamar I., Rousset G. (1994). La “nouvelle méthode implicite” pour le calcul des tunnel dans les milieux élastoplastiques et viscoplastiques – Revue Francaise de Géotechnique, N° 68;

Rif. [24] Bernaud D., Rousset G. (1992). La « nouvelle méthode implicite » pour l'étude du dimensionnement des tunnels – Revue Francaise de Géotechnique, N° 60;

Rif. [25] P.J. Sabatini, D.G. Pass, R.C. Bachus (1999). Geotechnical Engineering Circular No. 4 – Ground Anchors and Anchored Systems. Publication No. FHWA-IF-99-015;

Rif. [26] Oreste P.P. (1999). Aspetti notevoli dell'analisi e dimensionamento dei sostegni di gallerie attraverso i metodi di calcolo numerici – Gallerie e grandi opere sotterranee, N.° 57;

Rif. [27] Hoek E., Brown E.T. (1997), “Practical estimates of rock mass strength”, Intl. J. Rock Mech. & Geomechanics Abstracts, 1165-1186;

Rif. [28] Hoek E., Carranza-Torres C., Cortkum B. (2002), “Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition”;

Rif. [29] Tamez E. (1984) “Estabilidad de tuneles excavados en suelos” - Mexican Engineering Academy;

 <b>ITALFERR</b> <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</b>	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	9 di 141

- Rif. [30] Hoek E., Diederichs M. S. (2006), “Empirical Estimation of rock mass Modulus”, Intl. J. Rock Mech. & Mining Sciences 43 (2006), 203-215;
- Rif. [31] Broms B.B., Bennemark H. (1967), “Stability of clay at vertical openings”, J. Soil Mechanics and Foundations, Div. Am. Soc. Civ. Eng., 93: 71-94;
- Rif. [32] Croce P., Flora A., Modoni G. (2004), “Jet-grouting – Tecnica, progetto e controllo”, Hevelius edizioni;
- Rif. [33] Hoek E. (2004), “Numerical Modelling for Shallow Tunnels in Weak Rock”, Rocscience, April 2004.
- Rif. [34] Bilotta E et al (2007), “Pseudostatic and dynamic analyses of tunnels in transversal and longitudinal directions”, 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, June 2007.

### 3.6 DOCUMENTI SUPERATI

Non sono presenti documenti superati.

## 4 ALLEGATI

Il documento è corredato dai seguenti allegati:

- All. [1] “Analisi con il metodo delle linee caratteristiche”;
- All. [2] “Analisi numerica per la verifica della Sezione a pk 10+190;;
- All. [3] “Analisi numerica per la verifica della Sezione a pk 16+090” ;
- All. [4] “Analisi numerica per la verifica della Sezione a pk 12+680”;

## 5 DOCUMENTI PRODOTTI A SUPPORTO

I contenuti della presente relazione sono completati dai seguenti elaborati di progetto:

- Rif. [35] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07P7GN0300001A "Planimetria ubicazione nicchie" datato Luglio 2017;
- Rif. [36] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07BZGN0300001A "Andamento plano-altimetrico del marciapiede a ciglio variabile" datato Luglio 2017;
- Rif. [37] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07SPGN0300001A "Scavo meccanizzato - Specifiche tecniche TBM" datato Luglio 2017;
- Rif. [38] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07PZGN0300001A "Scavo meccanizzato - Sistema di smaltimento delle acque in galleria" datato Luglio 2017;
- Rif. [39] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07BBGN0300001B "Scavo meccanizzato - Rivestimento conci prefabbricati - Sezione tipo di avanzamento e carpenteria anello" datato Novembre 2017;
- Rif. [40] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07BBGN0300002A "Scavo meccanizzato - Rivestimento conci prefabbricati - Anello universale carpenteria e sviluppata" datato Luglio 2017;

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA</p>												
<p>GALLERIA ROCCHETTA Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IF0G</td> <td>01</td> <td>D 07 RB</td> <td>GN0300 001</td> <td>A</td> <td>10 di 141</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	10 di 141
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	10 di 141								

- Rif. [41] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07BKGN0300001A "Scavo meccanizzato - Rivestimento conci prefabbricati - Carpenteria concio tipo" datato Luglio 2017;
- Rif. [42] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07BZGN0300002A "Scavo meccanizzato - Rivestimento conci prefabbricati - Particolari costruttivi" datato Luglio 2017;
- Rif. [43] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07WAGN0000002A "Monitoraggio - Sezioni strumentate galleria di linea" datato Luglio 2017;
- Rif. [44] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07P7GN0000004A "Monitoraggio - Planimetria tav. 1 di 3" datato Luglio 2017;
- Rif. [45] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07P7GN0000005A "Monitoraggio - Planimetria tav. 2 di 3" datato Luglio 2017;
- Rif. [46] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07P7GN0000006A "Monitoraggio - Planimetria tav. 3 di 3" datato Luglio 2017

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	11 di 141

## 6 DESCRIZIONE DELL'OPERA

### 6.1 IL TRACCIATO E LE OPERE IN SOTTERRANEO

La galleria di linea ha una lunghezza complessiva di circa 6549 m, di cui circa 94 m in galleria artificiale e 6455 m in galleria naturale, come di seguito dettagliato con riferimento alla progressivazione del binario dispari:

- da pk 10+074 a pk 10+110 (L=36 m) galleria artificiale a sezione policentrica;
- da pk 10+110 a pk 16+656 (L=6455 m) galleria naturale;
- da pk 16+565 a pk 16+623 (L=58 m) galleria artificiale a sezione policentrica;

La quota di imbocco lato Napoli è pari a circa 172 m s.l.m. mentre quella lato Bari è pari a circa 237 m s.l.m.; il tracciato presenta una pendenza costante del 9,84‰ in discesa dall'imbocco lato Bari fino alla progressiva 16+410 circa, e una pendenza costante pari al 10,86‰ in discesa fino all'imbocco lato Napoli.

Procedendo dall'imbocco lato Bari le coperture crescono con pendenza costante fino al valore massimo di circa 400 metri alla progressiva 12+700 circa. A seguire, le coperture degradano mantenendosi variabili tra 200 e 300 metri; solo in prossimità dell'imbocco lato Napoli le coperture tornano a valori compresi tra 50 e 100 metri, fino a raggiungere circa 5 metri in corrispondenza dell'imbocco.

La Galleria Rocchetta presenta 6 uscite di emergenza realizzate tramite 3 uscite/accessi laterali e 3 cunicoli di emergenza paralleli alla galleria di linea che si connettono alle uscite/accessi laterali.

Le uscite/accessi laterali della Galleria Rocchetta sono previste alle seguenti progressive

- Uscita/accesso pedonale F5 con innesto alla pk di linea 11+125,
- Uscita/accesso carrabile F6 con innesto alla pk di linea 13+850,
- Uscita/accesso pedonale F7 con innesto alla pk di linea 15+700.

Uno dei cunicoli di emergenza paralleli si innesta sulla galleria di linea alla pk 12+000 e confluisce nell'uscita di emergenza F5 alla pk 11+075.

Gli altri due cunicoli di emergenza si innestano sulla galleria di linea alle pk 12+975 e pk 14+725 e confluiscono nell'uscita di emergenza F6 alla pk 13+850.

### 6.2 INTERFERENZE LUNGO IL TRACCIATO

Nella zona prossima all'imbocco della galleria lato Bari, lo studio geologico ha rilevato aree con presenza di depositi franosi ed aree ad instabilità diffusa, in particolare tra le pk 10+220 e 10+300, tra le pk 10+660 e 11+030 e tra le pk 11+100 e 11+450. Tali depositi interessano la coltre superficiale per spessori compresi tra 5 e 10 metri. Nei tratti di sottoattraversamento della zone sopra indicate le coperture della galleria risultano variabili tra 30 e 90 metri, pertanto lo scavo della galleria non interferisce con le coltri in frana superficiali.

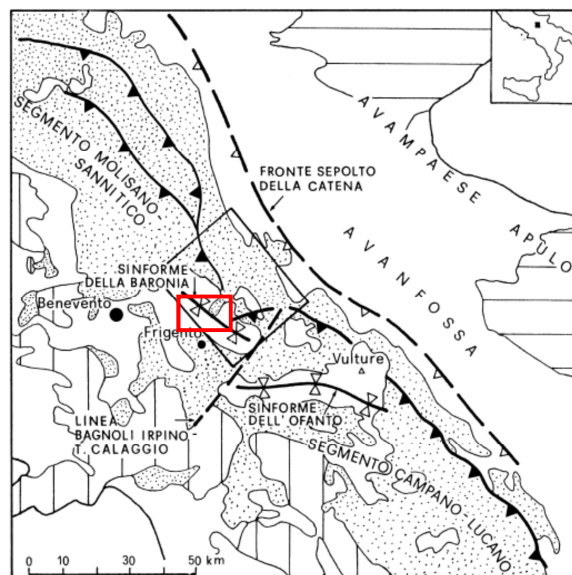
Sempre in prossimità dell'imbocco lato Bari, la galleria è caratterizzata da una copertura inferiore a 30m sino alla progressiva km 10+300 circa, ed in tale area sono presenti una serie di edifici potenzialmente interferenti con la realizzazione delle opere in progetto ubicati fra le progressive km 10+150.00 e km 10+250.00. A monte della progressiva km 10+450.00 si ritiene che le coperture della galleria in essere, presentando valori superiori ai 50 m, determinino effetti di fatto trascurabili sugli edifici presenti lungo la restante parte di tracciato.

## 7 FASE CONOSCITIVA

La fase conoscitiva prevede l'acquisizione degli elementi necessari alla caratterizzazione e modellazione geologica del sito e alla caratterizzazione e modellazione geotecnica del volume significativo interessato dallo scavo della galleria Rocchetta e delle relative opere accessorie.

### 7.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

L'area oggetto di studio è ubicata nel settore irpino-dauno dell'Appennino meridionale. Più in particolare il settore irpino-dauno ricade (Figura 1) nella zona di giunzione fra l'arco molisano-sannitico, a nord, definitosi durante il Pliocene superiore e caratterizzato da strutture ad orientazione NNW-SSE e NW-SE, e l'arco campano lucano, a sud, strutturatosi durante il Pleistocene inferiore e caratterizzato da strutture ad andamento WNW-ESE (Cinque et alii, 1993).



**Figura 1. Unità stratigrafico-strutturali dell'Appennino centro-meridionale: unità della piattaforma carbonatica apula (rigato orizzontale), unità della piattaforma carbonatica sud-appenninica (rigato verticale), unità bacinali meso-cenozoiche del bacino lagonegrese-molisano ed associati depositi sinorogeni messiniani (puntinato), depositi clastici e vulcanici del Pliocene-Quaternario (bianco) (da Cinque et alii, 1993). Il riquadro rosso evidenzia l'area di studio (Rif. [15]).**

All'interno dell'area in studio sono presenti esclusivamente le unità tettoniche della falda inferiore. Si tratta di unità deformate in maniera molto intensa a partire dal Tortoniano. Le varie formazioni geologiche possono essere raggruppate in unità stratigrafico-strutturali differenziate tra loro per la collocazione paleogeografica e l'evoluzione geodinamica; si tratta di grandi corpi geologici, unitari e/o in frammenti non necessariamente continui, con caratteri litologici specifici e comportamento meccanico generalmente omogeneo alla grande scala. Le unità stratigrafico-strutturali, dalla più antica alla più recente, sono:

- Unità Tettonica di Frigento;
- Unità Tettonica del Fortore;
- Unità sin-orogeniche del Miocene Medio Superiore;
- Gruppo di Altavilla;
- Supersintema di Ariano;



	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	13 di 141

- Sintema del Calore e depositi continentali quaternari.

Lo studio geologico ha individuato lungo il tracciato della galleria Rocchetta le Unità del Supersintema di Ariano Irpino; nell'area in esame è rappresentato dalla **Formazione della Baronìa** appartenente alla successione del ciclo sedimentario del Pliocene inferiore, che si suddivide in:

- **Membro dei conglomerati e delle sabbie di S. Sossio Baronìa - BNA1** costituito da due litofacies principali, considerate eteropiche: la prima litofacies è formata da conglomerati cui si intercalano lenti di arenarie e sabbie (BNA1a); la seconda è formata da sabbie con intercalazioni siltoso-argillose (BNA1b).
- **Membro pelitico - arenaceo del F. Miscano - BNA2:** marne ed argille marnose di colore grigiastro.
- **Membro sabbioso di Apollosa - BNA3:** sabbie alternate ad areniti giallastre a grana media e fine, poco cementate.

Per i dettagli dello studio geologico si rimanda agli elaborati specialistici di progetto (Rif. [15]).

## 7.2 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

L'area di studio è caratterizzata da un paesaggio collinare, il cui rilievo massimo è rappresentato dal Monte Rocchetta, posto ad una quota di circa 630 metri slm.

Nella zona prossima all'imbocco della galleria lato Bari, lo studio geologico ha rilevato aree con presenza di depositi franosi ed aree ad instabilità diffusa, in particolare tra le pk 10+220 e 10+300, tra le pk 10+660 e 11+030 e tra le pk 11+100 e 11+450. Tali depositi interessano la coltre superficiale per spessori compresi tra 5 e 10 metri. Nei tratti di sottoattraversamento della zona sopra indicate le coperture della galleria risultano variabili tra 30 e 90 metri, pertanto lo scavo della galleria non interferisce con le coltri in frana.

Dalla progressiva pk 16+000 fino all'imbocco lato Napoli la galleria attraversa, sotto falda, sabbie ed arenarie appartenenti alla formazione BNA3; in questo tratto non si segnalano fenomeni franosi nell'area interessata dalla galleria in progetto.

## 7.3 INDAGINI GEOTECNICHE

Per la definizione del modello geotecnico dell'opera in progetto sono stati utilizzati i dati relativi alle campagne geotecniche di seguito elencate:

- Campagna indagini 1984-1985 (Concessione delle prestazioni integrate occorrenti per la progettazione definitiva del raddoppio e potenziamento della linea Caserta - Foggia e per la progettazione esecutiva e la realizzazione delle opere occorrenti per una prima fase di raddoppio e potenziamento della suddetta linea);
- Campagna indagini Italferr 2005 – Linea Apice Orsara
- Campagna indagini Italferr 2006 – Linea Caserta Foggia
- Campagna indagini Italferr 2008 - Progettazione preliminare per il "Raddoppio tratta Orsara – Apice - Soluzione Sud");
- Campagna indagini 2015 – Itinerario Napoli – Bari - Raddoppio Apice Orsara – Progetti DSI: PD Apice Orsara – Tratta Apice – Stazione Irpinia

 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</b>	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	14 di 141

- Campagna indagini 2017. - Itinerario Napoli – Bari - Raddoppio Apice Orsara – I° Lotto Funzionale Apice - Hirpinia

Per ulteriori dettagli relativi alle campagne di indagini si rimanda agli specifici elaborati di progetto specialistici (Rif. [15]).

Nella Tabella 1 si riporta l'elenco delle verticali di sondaggio ricadenti nel tratto interessato dalla Galleria Rocchetta, con indicazione della quota di testa foro, della profondità e della strumentazione installata.

ID Sondaggio	Periodo esecuzione	di	Quota boccaforo [m. s.l.m.]	Prof. sondaggio [metri]	Coordinate Gauss-Boaga*		Strumentazione di monitoraggio
					E	N	
XIF02GA01	n.d.		163,40	20,00	2514043,628	4554222,593	Piezometro tubo aperto 20 m

ID Sondaggio	Periodo esecuzione	di	Quota boccaforo [m. s.l.m.]	Prof. sondaggio [metri]	Coordinate Gauss-Boaga*		Strumentazione di monitoraggio
					E	N	
PNIF61G3	20/10-05/11/2008		410,00	230,00	2515892,044	4553620,264	Piezometro tubo aperto 230 m (fessurato tra 190 e 225 m da p.c.)
PNIF61G36	01/10-05/12/2008		510,00	300,00	2517352,609	4553137,858	Piezometro tubo aperto 300 m (fessurato tra 260 e 295 m da p.c.)

ID Sondaggio	Periodo esecuzione	di	Quota boccaforo [m. s.l.m.]	Prof. sondaggio [metri]	Coordinate Gauss-Boaga*		Strumentazione di monitoraggio
					E	N	
S20	10-12/08/2015		249,32	30,00	2520124,777	4552668,101	Piezometro Norton 3" 30 m (fessurato tra 3 e 30 m da p.c.)
S20bis	n.d.		249,32	30,00	2520124,777	4552668,101	Inclinometro 30 m
S21	19-21/08/2015		306,72	30,00	2519732,941	4552450,732	Piezometro Norton 3" 30 m (fessurato tra 3 e 30 m da p.c.)

ID Sondaggio	Periodo esecuzione	di	Quota boccaforo [m. s.l.m.]	Prof. sondaggio [metri]	Coordinate Gauss-Boaga*		Strumentazione di monitoraggio
					E	N	
S23	31/08-02/09/2015		270,37	30,00	2516717,343	4554688,256	Piezometro Norton 2" 30 m (fessurato tra 3 e 30 m da p.c.)
S25	25-28/08/2015		254,89	30,00	2514736,265	4554541,633	Piezometro Norton 3" 30 m (fessurato tra 3 e 30 m da p.c.)
S26	25-31/08/2015		177,90	50,00	2513966,482	4553996,432	Piezometro Norton 2" 50 m (fessurato tra 3 e 50 m da p.c.)

ID Sondaggio	Periodo esecuzione	di	Quota boccaforo [m. s.l.m.]	Prof. sondaggio [metri]	Coordinate Gauss-Boaga*		Strumentazione di monitoraggio
					E	N	
C20	11-12/04/2017		256,45	30,00	2516701,598	4554821,315	-
ENS1	28/03-05/04/2017		330,42	70,00	2519328,866	4552574,464	Inclinometro 70,0 m
ENS2	19-21/04/2017		235,11	50,00	2520272,029	4552603,219	Inclinometro 50,0 m
G5	14-30/03/2017		357,29	140,00	2519206,853	4552574,535	Piez. Casagrande 139,5 m da p.c.
G6	30/01-24/03/2017		521,75	350,00	2516709,103	4553440,479	Piez. Norton 2" 350 m (fessurato tra 266 e 320 m da p.c.)
G7	03-12/04/2017		248,50	120,00	2514249,614	4553863,197	Piezometro elettrico 108 m (fessurato tra 100 e 115 m da p.c.)
G8	06-08/02/2017		205,47	30,00	2514030,064	4553817,583	Piez. Casagrande 24 m da p.c.
G9	23-27/03/2017		273,25	50,00	2519941,941	4552637,361	Inclinometro 50,0 m
G13	26-28/04/2017		272,70	40,00	2520153,475	4552561,939	Piez. Casagrande 39,5 m da p.c.

**Tabella 1 - Sondaggi di interesse per la caratterizzazione geotecnica della galleria Rocchetta**

 <b>ITALFERR</b> <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</b>	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	16 di 141

Ai fini della caratterizzazione dei terreni e delle rocce interessate dalle opere in sotterraneo e dalle opere di sostegno degli scavi previste agli imbocchi delle gallerie, sono state eseguite numerose prove in foro di sondaggio, in particolare:

- Standard Penetration Test;
- prove di permeabilità Lefranc;
- prove di permeabilità Lugeon;
- prove pressiometriche;
- prove dilatometriche;

I risultati di tali indagini sono allegati agli elaborati specialistici di progetto (Rif. [15])

Sono stati prelevati numerosi campioni di laboratorio per lo studio delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni e delle rocce, mediante prove di laboratorio.

Per la caratterizzazione fisica sono state eseguite le seguenti analisi:

- Analisi granulometria per setacciatura e sedimentazione;
- Determinazione del peso di volume;
- Determinazione del peso specifico;
- determinazione del contenuto naturale d'acqua;
- limiti di ritiro, di plasticità e di liquidità;
- determinazione delle sostanze organiche

Sono state inoltre eseguite le prove di laboratorio per la determinazione delle caratteristiche meccaniche; in particolare:

- nella formazione del membro di pelitico-arenaceo del F. Miscano (BNA2) sono stati prelevati 67 campioni (47 indisturbati e 20 rimaneggiati) e sono state eseguite le prove sotto riportate:
  - 10 Prove di Taglio diretto
  - 2 Prove non consolidate non drenate (UU) in Cella Triassiale;
  - 2 Prove consolidate non drenate (CIU) in Cella Triassiale;
  - 3 Prove consolidate drenate (CD) in Cella Triassiale;
  - 27 Prove di rottura a compressione monoassiale
  - 3 Prove di rottura in cella triassiale su campioni lapidei.
  - 3 Prove di rigonfiamento del tipo Huder Amberg
  - 2 Prove di rigonfiamento impedito in cella edometrica
  -
- nella formazione del membro sabbioso di Appollosa (BNA3) sono stati prelevati 17 campioni (9 indisturbati e 5 rimaneggiati) e sono state eseguite le prove sotto riportate:
  - 3 Prove di Taglio diretto
  - 2 Prove consolidate non drenate (CIU) in Cella Triassiale;
  - 5 Prove a rottura ad espansione laterale libera (ELL);
  - 2 Prove di rottura a compressione monoassiale
  - 3 Prove di rottura in cella triassiale su campioni lapidei.

La descrizione dei campioni e i risultati delle prove eseguite sono allegati agli elaborati di progetto specialistici (Rif. [15]).

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	17 di 141

Sono state eseguite le seguenti prove geofisiche:

- prove sismiche in foro di tipo down-hole;
- profili sismici a rifrazione in onde P;
- prove Multi-channel analysis of surface waves (Masw).

I risultati di tali indagini sono allegati agli elaborati specialistici di progetto (Rif. [15]).

## 7.4 METODI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI E DELLE ROCCE.

### 7.4.1 Terreni granulari

La **Densità relativa** è stata determinata utilizzando la correlazione di Bazaara [1967]:

$$D_r = [N'_{SPT}/(20+0.8\sigma'_{vo})]^{0.5} \quad \text{per } \sigma'_{vo} < 73.2 \text{ kPa}$$

$$D_r = [N'_{SPT}/(65+0.2\sigma'_{vo})]^{0.5} \quad \text{per } \sigma'_{vo} > 73.2 \text{ kPa}$$

In cui:

$N'_{SPT}$  = Numero di colpi risultanti dalla prova SPT, corretto in funzione del rendimento del sistema di infissione;

$\sigma'_{vo}$  = pressione geostatica verticale efficace;

Angolo di resistenza al taglio

L'**angolo di resistenza al taglio di picco  $\phi'$**  è stato determinato utilizzando per confronto diverse correlazioni:

- correlazione dell' American Petroleum Institute (API)
 
$$\phi' = 28.4 + 0.17 \cdot D_r + 16 \cdot D_r^2$$
- correlazione di SCHMERTMANN (1975)
 
$$\phi' (^{\circ}) = 28 + 0.14 \cdot D_r \quad \text{per Sabbia fine uniforme}$$

$$\phi' (^{\circ}) = 31.5 + 0.115 \cdot D_r \quad \text{per Sabbia media uniforme e sabbia fine ben gradata}$$

$$\phi' (^{\circ}) = 34.5 + 0.10 \cdot D_r \quad \text{per Sabbia grossa uniforme e sabbia ben gradata}$$

$$\phi' (^{\circ}) = 38 + 0.08 \cdot D_r \quad \text{per Ghiaia media e fine e sabbia e ghiaia poco limosa}$$
- correlazioni di De Mello (1971)

I **moduli iniziali di taglio ( $G_{o1}$ ) e di Young ( $E_{o1}$ )**, corrispondenti alle pressioni efficaci geostatiche medie  $p_o'$ , sono stati ricavati dai valori delle velocità delle onde di taglio  $V_s$  utilizzando le seguenti equazioni:

$$G_{o1} = \frac{\gamma_t}{9,81} \cdot (V_s)^2 \quad (\text{kPa})$$

 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</b>	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	18 di 141

$$E_{o1} = G_{o1} \cdot 2 \cdot (1 + \nu')$$

essendo:

$\gamma_t$  = peso di volume naturale del terreno in  $\text{kN/m}^3$

$\nu'$  = coefficiente di Poisson del terreno

$V_s$  = velocità di propagazione delle onde di taglio in m/s.

La velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_s$  è stata ricavata da prove geofisiche cross hole e down hole e indirettamente, interpretando i risultati delle prove SPT.

La velocità delle onde di taglio da prove SPT in sabbie e ghiaie normalmente consolidate, silicee non cementate, è stata ricavata sulla base alla correlazione proposta da Ohta & Goto (1978); in base a tale correlazione vale quanto segue:

$$V_s = (C \cdot N_{SPT})^{0.171} \cdot z^{0.2} \cdot A \cdot B \quad (\text{Ohta e Goto [1978]})$$

essendo:

$$C = 67,3$$

$z$  = profondità dal p.c. in metri

$f_A$  = coefficiente funzione dell'epoca geologica del deposito (vedi la Tabella 2)

$f_G$  = coefficiente funzione della composizione granulometrica (vedi la Tabella 3)

**Tabella 2: Relazione di Ohta e Goto, 1978 - Coefficiente  $f_A$**

(funzione dell'epoca geologica del deposito)

$f_A$	Olocene	Pleistocene
	1,0	1,3

**Tabella 3: Relazione di Ohta e Goto, 1978 - Coefficiente  $f_G$**

(funzione della composizione granulometrica del deposito)

$f_G$	Ghiaie	Sabbie ghiaiose	Sabbie grosse	Sabbie medie	Sabbie fini
	1,45	1,15	1,14	1,09	1,07

I **moduli elastici** sono stati ricavati con riferimento alle correlazioni di seguito riportate:.

Jamiolkowski et al. (1988):

$$E'_{25} = (10,5 - 3,5 \cdot D_r) \cdot N_{SPT} / 10 \quad \text{MPa} \quad \text{nel caso dei terreni normalmente consolidati}$$

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	19 di 141

$$E'_{25} = (525 - 35 \cdot D_r) \cdot N_{SPT} / 10 \quad \text{MPa} \quad \text{nel caso dei terreni sovraconsolidati}$$

essendo:

$E'_{25}$  = modulo di Young secante cui corrisponde un grado di mobilitazione della resistenza ultima pari al 25%;

$D_r$  = densità relativa espressa come frazione dell'unità;

$N_{SPT}$  = numero di colpi in prova SPT.

Si è fatto inoltre riferimento alle formulazioni di D'Appollonia di seguito riportate:

$E = 0.756 N_{SPT} + 18.75$  (MPa) per sabbia e ghiaia NC

$E = 1.043 N_{SPT} + 36.79$  (MPa) per sabbia OC

#### 7.4.2 Terreni coesivi

La classificazione dei terreni a grana fine è stata effettuata facendo riferimento ai risultati delle prove di laboratorio in termini di analisi granulometriche, determinazione dei limiti di Atterberg e contenuto naturale d'

La **resistenza al taglio non drenata**, in termini di coesione non drenata **cu**, dei terreni limoso-argillosi saturi è stata valutata facendo riferimento ai risultati delle prove triassiali di compressione (TX-UU) effettuate su campioni indisturbati. Ove appropriato, i risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli ottenibili dagli indici di resistenza "pocket penetrometer" registrati sulle carote prelevate nei sondaggi

I **parametri di resistenza in termini di sforzi efficaci** sono stati determinati sulla base dei risultati delle prove di laboratorio di taglio diretto (TD) e triassiali consolidate non drenate (TX-CIU) e drenate (TX-CID).

I **moduli iniziali di taglio ( $G_{o1}$ ) e di Young ( $E_{o1}$ ) iniziali**, corrispondenti alle pressioni efficaci geostatiche medie  $p_o'$ , sono stati ricavati dai valori delle velocità delle onde di taglio  $V_s$  utilizzando le seguenti equazioni:

$$G_{o1} = \frac{\gamma_t}{9,81} \cdot (V_s)^2 \quad (\text{kPa})$$

$$E_{o1} = G_{o1} \cdot 2 \cdot (1 + \nu')$$

essendo:

$\gamma_t$  = peso di volume naturale in  $\text{kN/m}^3$

$\nu'$  = rapporto di Poisson = 0,15 ÷ 0,20

$V_s$  = velocità di propagazione delle onde di taglio in m/s

I moduli iniziali di taglio ( $G_o$ ) e di Young ( $E_o$ ) iniziali, corrispondenti alle pressioni efficaci medie generiche  $p'$ , sono stati ricavati dalle seguenti espressioni:

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	20 di 141

$$G_o = G_{o1} \cdot \left( \frac{p'_1}{p'_o} \right)^{0.5} \quad (\text{kPa})$$

$$E_o = G_o \cdot 2 \cdot (1 + \nu') \quad (\text{kPa})$$

### 7.4.3 Rocce

La caratterizzazione fisica e meccanica delle rocce presenti lungo il tracciato delle opere in oggetto è stata condotta mediante l'interpretazione di prove in sito ed in laboratorio.

In particolare, sono state eseguite le seguenti prove in foro di sondaggio:

- prove dilatometriche
- prove Lugeon

In laboratorio sono state eseguite:

- prova di resistenza a compressione monoassiale e triassiale su roccia con misura delle deformazioni;
- misura della velocità delle onde soniche  $V_P$  e  $V_S$ ;
- Point Load Test;
- prove a trazione (metodo brasiliano)

I **parametri di resistenza** delle rocce sono stati valutati a partire dai valori delle sollecitazioni a rottura misurati nel corso delle prove di compressione triassiale e monoassiale eseguite sui campioni indisturbati. Rappresentando tali valori sul piano  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ , dove:

$\sigma_1$  = Pressione assiale a rottura

$\sigma_3$  = Pressione di cella

è stata definita la curva di resistenza limite del materiale (curva intrinseca) e sono stati valutati i parametri equivalenti  $c'$  e  $\phi'$ , secondo il criterio di resistenza lineare di Mohr-Coulomb, stabilendo una profondità (e dunque una pressione) di riferimento, nell'intorno della quale linearizzare il criterio di resistenza.

Per le rocce che presentano discontinuità indotte da famiglie di giunti, si è adottato il criterio di resistenza definito da Hoek e Brown (1980), espresso dalla seguente funzione:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} + s \right)^a$$

in cui  $\sigma'_1$  e  $\sigma'_3$  rappresentano rispettivamente le tensioni principali efficaci (maggiore e minore) in condizioni di rottura,  $\sigma_{ci}$  rappresenta la resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta,  $m_b$ ,  $s$  ed  $a$  sono parametri che dipendono dall'indice GSI e dal fattore di disturbo  $D$  (variabile tra 0 e 1).

Il GSI ( Geological Strenght Index for Jointed Rocks) può essere valutato analiticamente in funzione dell'indice RMR (*Rock Mass Rating System*), secondo la relazione:



$$GSI = RMR - 5$$

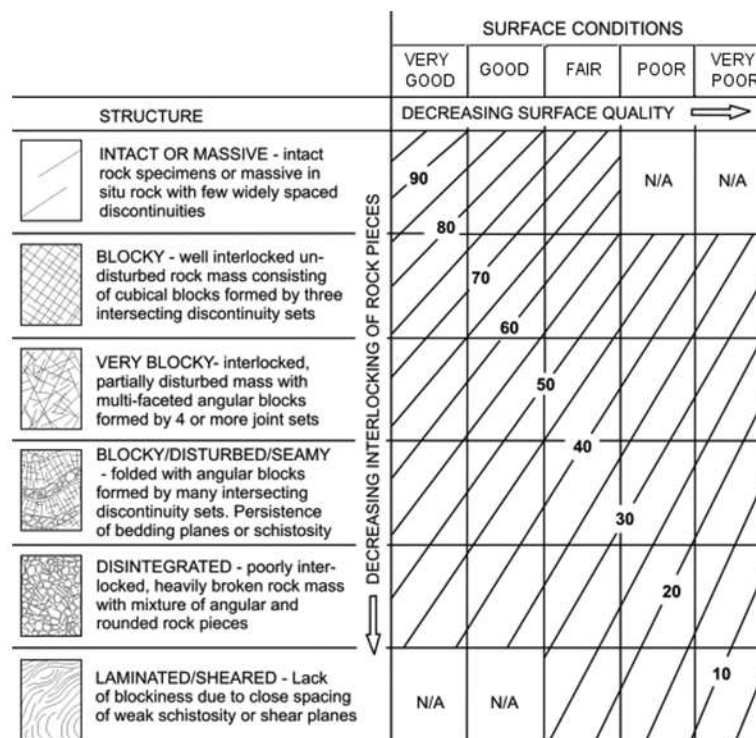
Il sistema RMR, proposto da Bieniawski nel 1989, associa a ciascuna caratteristica dell'ammasso roccioso un indice numerico così come di seguito definito:

- Resistenza a compressione monoassiale della roccia:  $R1$ ;
- Indice RQD (Rock Quality Designation):  $R2$ ;
- Spaziatura delle discontinuità:  $R3$ ;
- Condizioni delle discontinuità:  $R4$ ;
- Condizioni idrauliche:  $R5$ .

La somma algebrica dei valori degli indici parziali fornisce l'indice di qualità dell'ammasso  $RMR_{base}$ :

$$RMR_{base} = R1 + R2 + R3 + R4 + R5$$

Nella figura seguente è riportato l'abaco proposto da Hoek et al. per la determinazione del valore di GSI.



A partire dal criterio di resistenza non lineare di Hoek e Brown così definito, è possibile calcolare i parametri equivalenti  $c'$  e  $\phi'$ , secondo il criterio di resistenza lineare di Mohr-Coulomb, definendo una profondità (e dunque una pressione) di riferimento, nell'intorno della quale linearizzare il criterio di resistenza di Hoek e Brown.

	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA												
GALLERIA ROCCHETTA Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IF0G</td> <td>01</td> <td>D 07 RB</td> <td>GN0300 001</td> <td>A</td> <td>22 di 141</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	22 di 141
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	22 di 141								

Il **modulo elastico della matrice rocciosa** è stato definito sulla base dei risultati delle prove dilatometriche eseguite nei fori di sondaggio in sito e delle prove di compressione monoassiale e triassiale con misurazione della deformazione assiale eseguite in laboratorio.

Il **modulo elastico dell'ammasso roccioso  $E_{rm}$**  è stato determinato a partire da quello relativo alla roccia intatta  $E_i$ , in funzione dell'indice GSI e del fattore di disturbo D, secondo quanto proposto da Hoek e Diederichs (Rif. [30]).

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA					
	GALLERIA ROCCHETTA Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	COMMESSA IF0G	LOTTO 01	CODIFICA D 07 RB	DOCUMENTO GN0300 001	REV. A

## 7.5 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI E DELLE ROCCE

### 7.5.1 Caratterizzazione geotecnica della Formazione della Baronina – litofacies sabbiosa (BNA3)

Lo scavo della Galleria Rocchetta interessa per un breve tratto, di lunghezza pari a circa 500 m, le sabbie e arenarie dell'Unità BNA3. Le stratigrafie dei sondaggi mostrano, nei primi trenta metri circa da piano campagna, la presenza prevalente di sabbie, da poco addensate a addensate, con livelli parzialmente cementati o livelli di arenarie di spessore metrico; a profondità maggiori sono presenti arenarie, con grado di cementazione variabile, alternate a sabbie dense.



Per gli strati sabbiosi le analisi granulometriche mostrano la presenza di una frazione fina, composta da limo e in subordine argilla: i terreni sono classificabili come sabbie con limo e sabbie limose debolmente argillose (AGI, 1977). Il passante al setaccio 200 ASTM (0.074 mm) risulta compreso tra il 20 ed il 60 % (Figura 2).

Il peso dell'unità di volume è compreso tra  $20 \div 22 \text{ KN/m}^3$  (Figura 4), mentre il peso di volume del materiale secco varia tra  $17 \text{ e } 20 \text{ KN/m}^3$  (Figura 5). Il peso specifico è variabile tra  $25 \div 27 \text{ KN/m}^3$ .

Il contenuto naturale d'acqua risulta compreso tra il 12% ed il 28% nei primi 20 metri di profondità dal piano campagna, mentre per profondità superiori il contenuto d'acqua diminuisce varia tra 8% e 12% (Figura 6).

Sui campioni caratterizzati dalla prevalenza di terreno a grana fine sono stati eseguiti i limiti di Atterberg, i cui valori risultano compresi in un ampio range come riportato di seguito:

- Limite di plasticità:  $15\% \div 18\%$
- Limite di liquidità:  $20\% \div 40\%$
- Indice di Plasticità:  $6\% \div 20\%$ .

Sui campioni indisturbati prelevati dai livelli di arenaria sono stati determinati il peso dell'unità di volume ( $25 \div 26 \text{ KN/m}^3$ ) e il peso specifico ( $26 \div 26.5 \text{ KN/m}^3$ ).

Progressiva	Sondaggio	formazione	Campione	Nome	Profondità	Profondità	Passante 200	G	S	L	A
					(m)	m slm	%	%	%	%	%
13850	G6	BNA3	R		125,00	396,75		2,00	76,00	21,00	1,00
16350	G7	BNA3	I	1	9,40	239,10	30,90	0,00	76,00	17,00	7,00
16350	G7	BNA3	R	1	43,30	205,20					
16350	G7	BNA3	I	3	49,20	199,30	48,62	2,00	55,00	26,00	17,00
16350	G7	BNA3	I	5	69,20	179,30					
16350	G7	BNA3	I	6	74,00	174,50	35,27	0,00	66,00	27,00	7
16350	G7	BNA3	I	7	79,30	169,20					
16350	G7	BNA3	I	8	84,00	164,50	21,65	0,00	81,00	17,00	2,00
16550	G8	BNA3	I	1	2,50	202,97	41,40	0,00	67,00	31,00	2,00
16550	G8	BNA3	R	1	14,50	190,97		0,00	69,00	31,00	0,00
14700	PNIF61G3	BNA3	I	1	30,00	380,00	33,00	0,20	71,40	28,40	
14700	PNIF61G3	BNA3	I	2	45,40	364,60	24,15	0,00	78,90	21,00	
14700	PNIF61G3	BNA3	I	3	60,00	350,00	62,31	0,00	40,90	46,20	12,90
14700	PNIF61G3	BNA3	I	4	65,00	345,00	45,12	0,00	60,20	33,90	5,90
13120	PNIF61G36	BNA3	I	2	40,00	470,00	25,86	0,00	77,00	23,00	
13120	PNIF61G36	BNA3	R	2	80,00	430,00	40,20	0,10	62,60	30,50	6,80
13120	PNIF61G36	BNA3	R	3	90,60	419,40	50,37	0,00	53,30	38,60	8,10
F6	S23	BNA3	I	1	16,00	254,37	61,49	6,37	39,86	40,58	13,19
16640	S26	BNA3	I	2	26,4	151,5	23,26	0,02	82,29	16,21	1,48

Tabella 4. BNA3 – Analisi Granulometriche

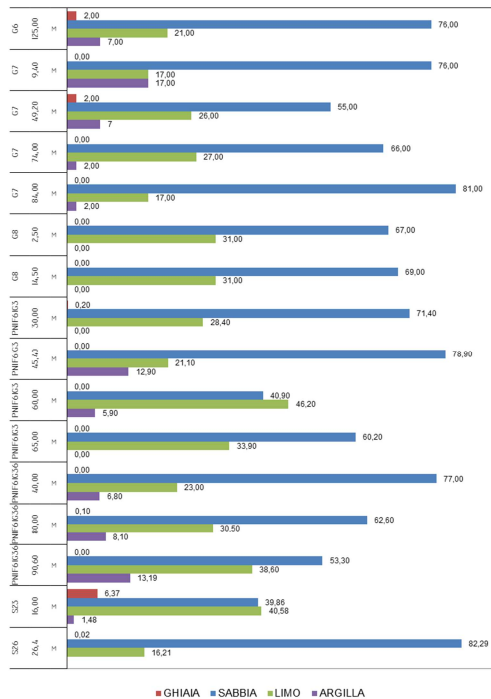


Figura 2. BNA3 – Analisi Granulometrica

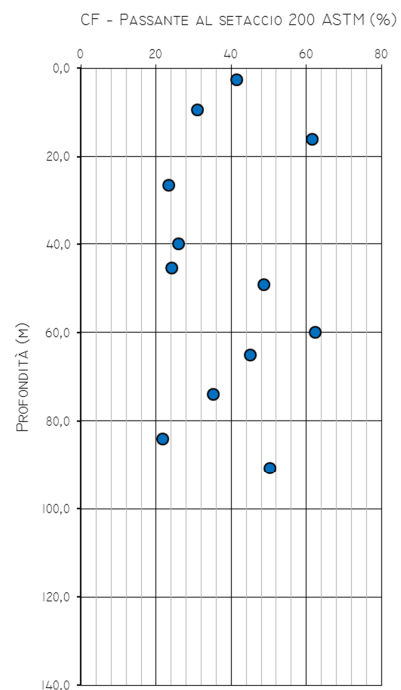
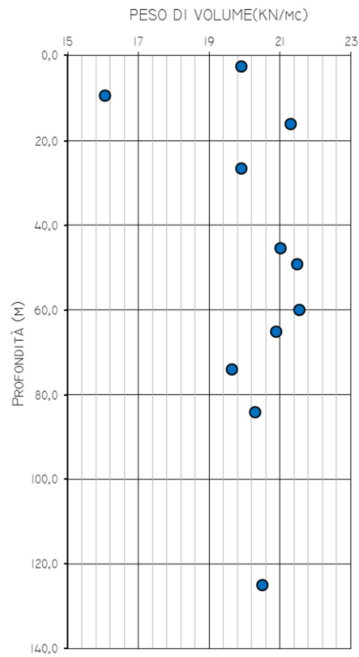
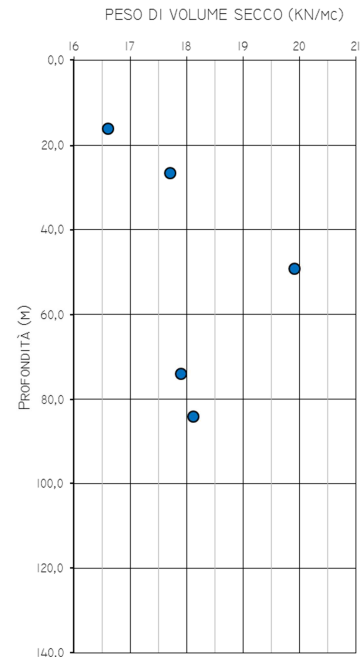


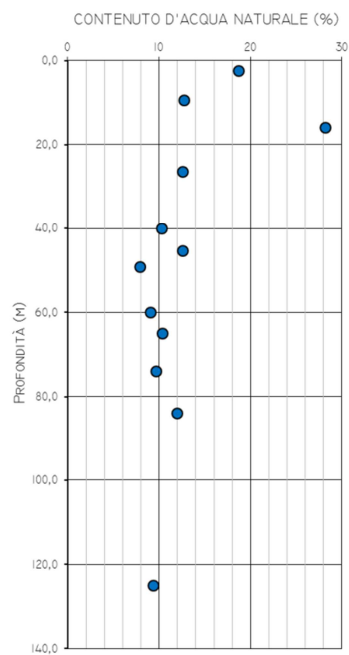
Figura 3. BNA3 - Passante al setaccio 200



**Figura 4. BNA3 – Peso dell'unità di volume**



**Figura 5. BNA3 – Peso di volume secco**



**Figura 6. BNA3 – Contenuto d'acqua naturale**

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	26 di 141

Le caratteristiche meccaniche sono state determinate mediante prove eseguite nei fori di sondaggio ed prove di laboratorio.

Per la caratterizzazione degli strati più superficiali, prevalentemente sabbiosi, sono state utilizzate le indicazioni ricavate dalle prove SPT realizzate nei fori di sondaggio; queste hanno fornito valori generalmente crescenti con la profondità, e variabili mediamente tra 20 e 40, escludendo i valori ‘a rifiuto’ (Figura 7). La densità relativa, applicando la correlazione di Baazara, è compresa tra il 40% ed il 60% (Figura 8).

I valori dell’angolo di attrito, ricavati in funzione delle correlazioni indicate nel § 7.4.1, sono riportati in Figura 9, Figura 10, e Figura 11. I valori dell’angolo di attrito crescono con la profondità ed assumono i valori compresi nei seguenti range:

$$30^\circ \leq \varphi' \leq 32^\circ \quad \text{per } 0 \leq z \leq 15 \text{ m}$$

$$32^\circ \leq \varphi' \leq 35^\circ \quad \text{per } 15 \leq z \leq 30 \text{ m}$$

I parametri di resistenza al taglio sono stati determinati con prove di taglio diretto e con prove triassiali CIU, definendo i seguenti intervalli di valori:

$$0 \leq c' \leq 5 \text{ KPa} \quad \text{per } z \leq 15 \text{ m};$$

$$0 < c' \leq ' \leq 10 \text{ KPa} \quad \text{per } 15 \leq z \leq 30 \text{ m}$$

Per la definizione dei parametri di deformabilità del materiale sono state utilizzati i risultati delle prove pressiometriche e delle prove SPT, utilizzando la correlazione di Jamolkowski (Figura 16). Nelle stessa figure sono riportati anche i valori di deformabilità ricavati come frazione del modulo elastico a piccole deformazioni ( $E = 0.10 \div 0.15 E_0$ ).

Il modulo elastico  $E_0$  è stato ricavato da prove sismiche di tipo MASW (Figura 15): le prove disponibili, denominate MASW AU9 e MASW C20, sono state eseguite in aree in cui la formazione BNA3 oggetto di studio è presente solo nei primi 10 ÷ 12 metri di profondità.

I valori di velocità delle onde di taglio ricavati da tali prove sono stati confrontati anche con la correlazione empirica di Otha e Goto (cfr. § 7.4.1) dai valori di  $N_{SPT}$  (Figura 7): i valori della velocità delle onde di taglio crescono con la profondità e sono compresi tra 150 e 400 m/s.

Sono stati quindi definiti i valori dei moduli iniziali,  $G_0$  e  $E_0$ , che variano come segue:

$$50 \leq G_0 \leq 150 \text{ MPa} \quad \text{per } 0 \leq z \leq 15 \text{ m}$$

$$150 \leq G_0 \leq 300 \text{ MPa} \quad \text{per } 15 \leq z \leq 30 \text{ m}$$

$$100 \leq E_0 \leq 400 \text{ MPa} \quad \text{per } 0 \leq z \leq 15 \text{ m}$$

$$400 \leq E_0 \leq 700 \text{ MPa} \quad \text{per } 15 \leq z \leq 30 \text{ m}$$

L’insieme dei dati ha consentito di definire il seguente intervallo di variazione del modulo elastico E:

$$30 \leq E \leq 80 \text{ MPa} \quad \text{per } 0 \leq z \leq 15 \text{ m}$$

$$80 \leq E \leq 120 \text{ MPa} \quad \text{per } 15 \leq z \leq 30 \text{ m}$$

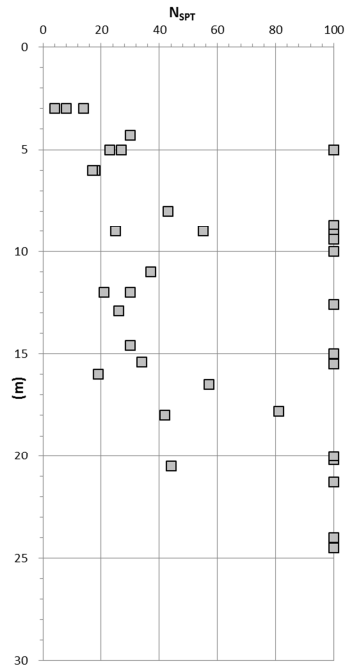


Figura 7. BNA3 – Valore di  $N_{SPT}$

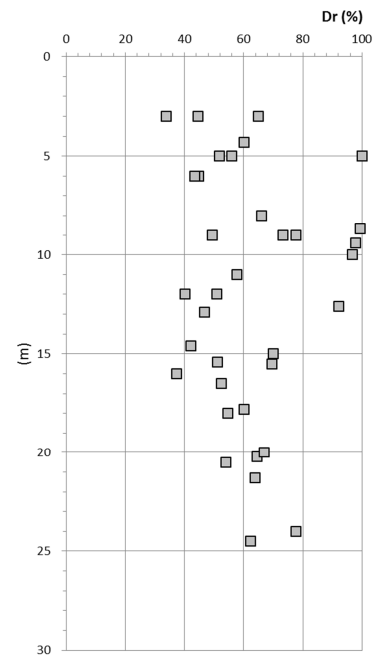


Figura 8. BNA3 – Densità Relativa

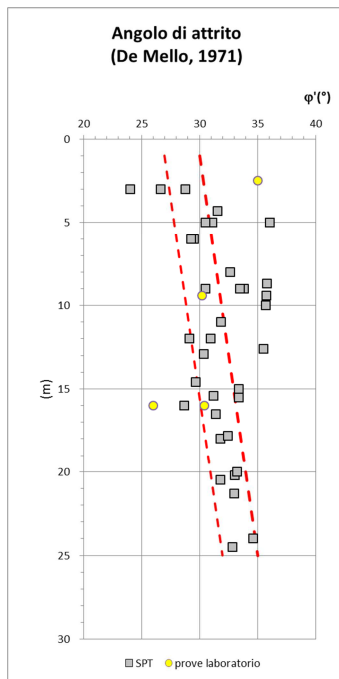


Figura 9. BNA3 – Angolo di Attrito (correlazione di De Mello)

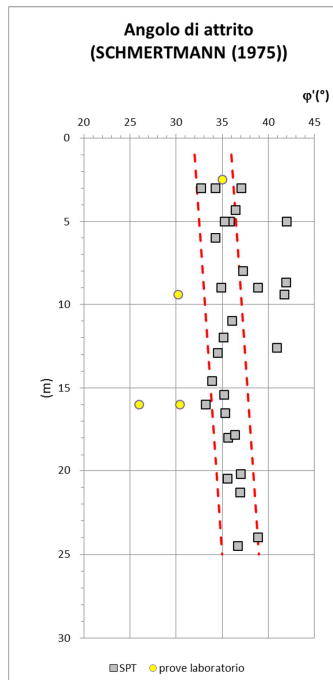


Figura 10. BNA3 – Angolo di Attrito (correlazione di Schmetrmann)

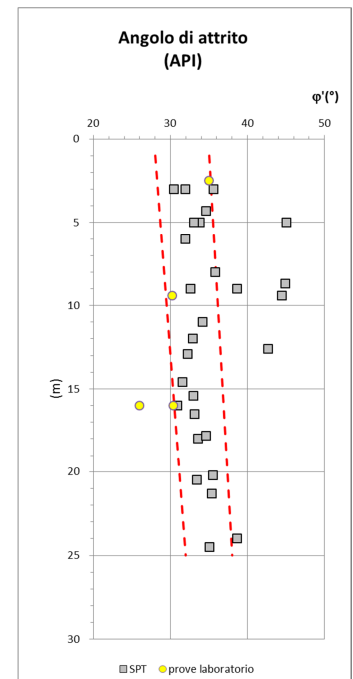


Figura 11. BNA3 – Angolo di Attrito (correlazione API)

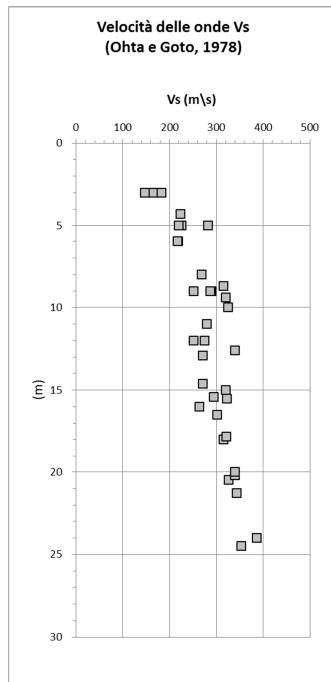


Figura 12. BNA3 – Velocità delle onde Vs (Ohta e Goto, 1978)

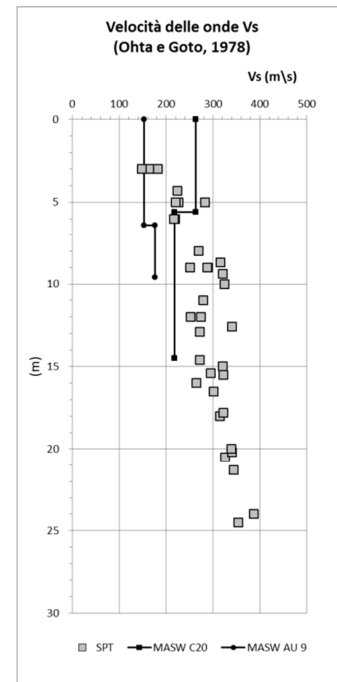


Figura 13. BNA3 – Velocità delle onde Vs (Ohta e Goto, 1978) e da indagine diretta MASW

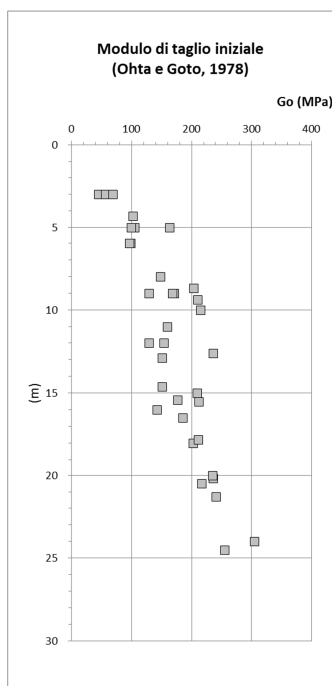


Figura 14. BNA3 – Modulo  $G_0$

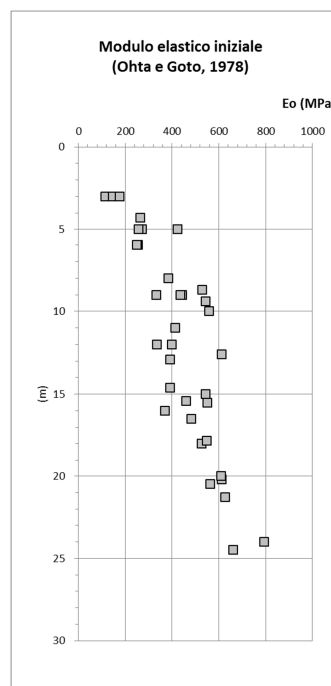


Figura 15. BNA3 – Modulo  $E_0$

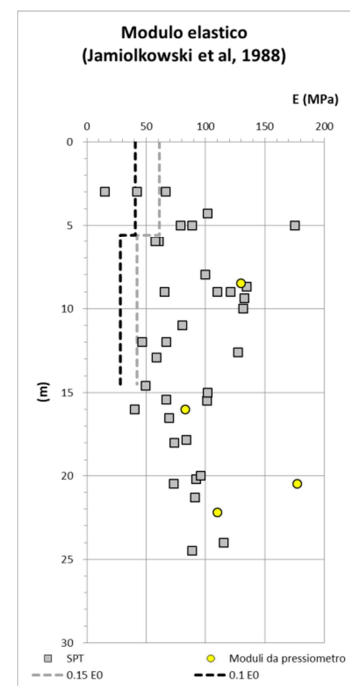


Figura 16. BNA3 – Modulo Elastico



 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	29 di 141

Per profondità superiori a 30 metri dal piano campagna, i parametri meccanici della formazione BNA3 sono stati valutati esclusivamente in funzione dei dati ricavati dalle indagini di laboratorio ed in sito (prove TD).

Nella Figura 17 sono mostrati i valori dell'angolo di attrito di picco e della coesione ricavati da prove di laboratorio; dall'analisi dei dati si definisce il seguente intervallo di variazione dei parametri:

$$20 \leq c' \leq 200 \text{ KPa} \quad \text{per } z > 30 \text{ m}$$

$$30 \leq \varphi' \leq 38^\circ \quad \text{per } z > 30 \text{ m}$$

I campioni di arenaria prelevati dai sondaggi sono stati sottoposti a prove di compressione monoassiale e triassiale in laboratorio; i dati forniti dalle prove sono riportati nella Figura 18 e nella Figura 19. Al fine di caratterizzare il comportamento meccanico della formazione arenacea, alle profondità di interesse, si è fatto riferimento al criterio di Hoek e Brown.

Sulla scorta delle indagini geostrutturali eseguite in corrispondenza degli affioramenti della formazione è stato valutato un valore del GSI pari a 25. I valori della resistenza a compressione della roccia intatta  $\sigma_{ci}$  e del parametro  $m_i$  sono stati calcolati a partire dai risultati delle prove a compressione triassiale, ottenendo:  $\sigma_{ci} = 40$  MPa;  $m_i = 14$ . Da Figura 20 a Figura 22 sono illustrati i valori dei parametri geotecnici ricavati dall'applicazione del criterio di Hoek e Brown per diversi intervalli di copertura. Nella tabella che segue sono riportati i valori dei parametri di resistenza al taglio secondo il criterio di Mohr Coulomb:

Unità	Copertura (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\varphi$ (°)	c (kPa)
<b>BNA3</b>	50 ÷ 100	22	38 ÷ 43	150 ÷ 240
	100 ÷ 200	22	33 ÷ 38	240 ÷ 380

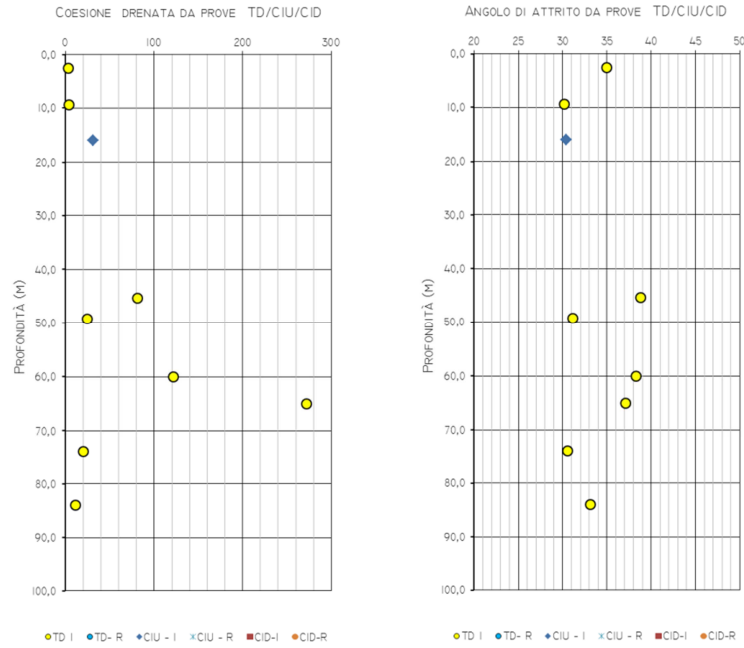
**Tabella 5: Formazione BNA3 – Parametri geotecnici**

I parametri di deformabilità dell'ammasso sono stati valutati in funzione dei risultati delle prove pressiometriche e dilatometriche realizzate nei fori di sondaggio. Come mostrato nella Figura 23, i valori dei moduli elastici aumentano generalmente con la profondità, variando nel seguente range:

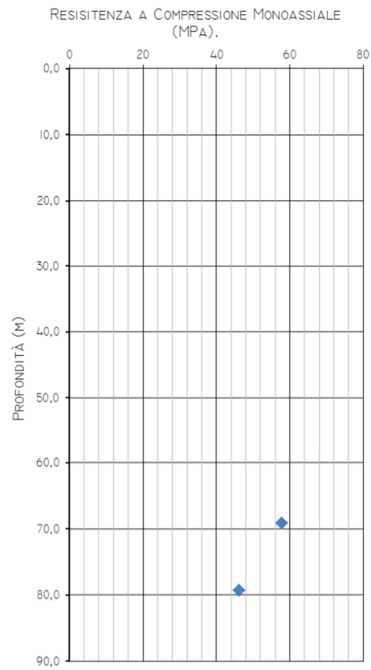
$$200 \leq E \leq 300 \text{ MPa} \quad \text{per } 30 \leq z \leq 50 \text{ m}$$

$$300 \leq E \leq 800 \text{ MPa} \quad \text{per } 50 \leq z \leq 80 \text{ m}$$

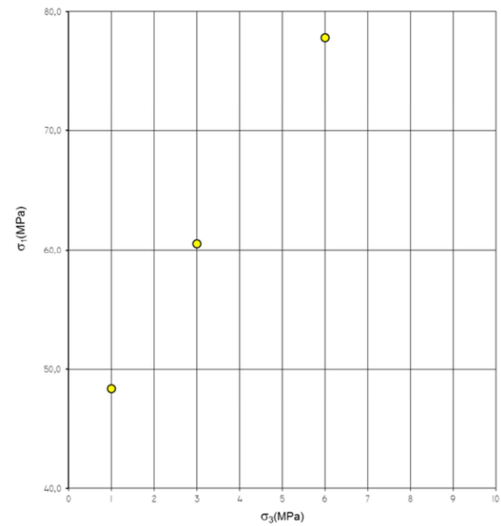
$$E \geq 800 \text{ MPa} \quad \text{per } z \geq 80 \text{ m}$$



**Figura 17. BNA3 – Coesione drenata e angolo di attrito**



**Figura 18. BNA3 – Prove di compressione monoassiale**



**Figura 19. BNA3 – Prove di compressione triassiale**

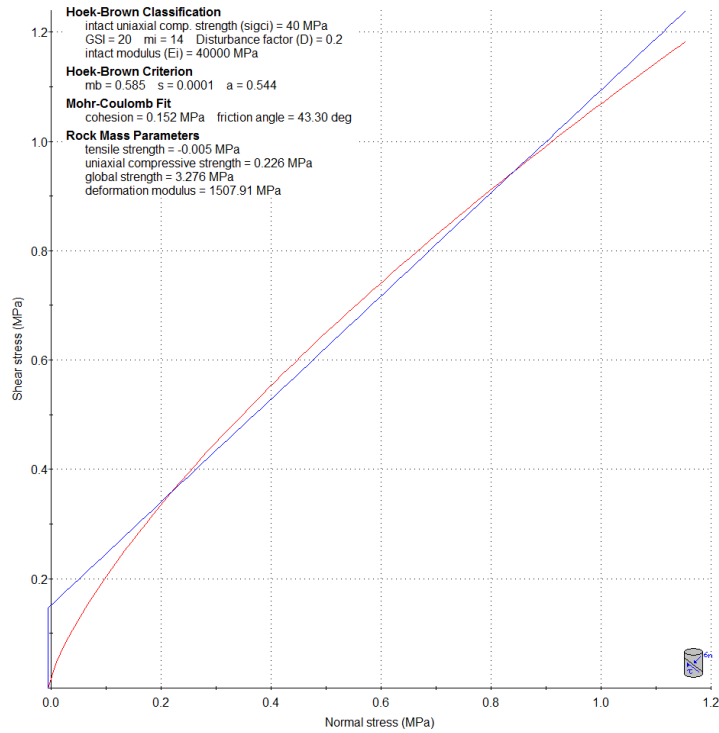


Figura 20. BNA3 – Criterio di Hoek – Brown – Copertura 50 m

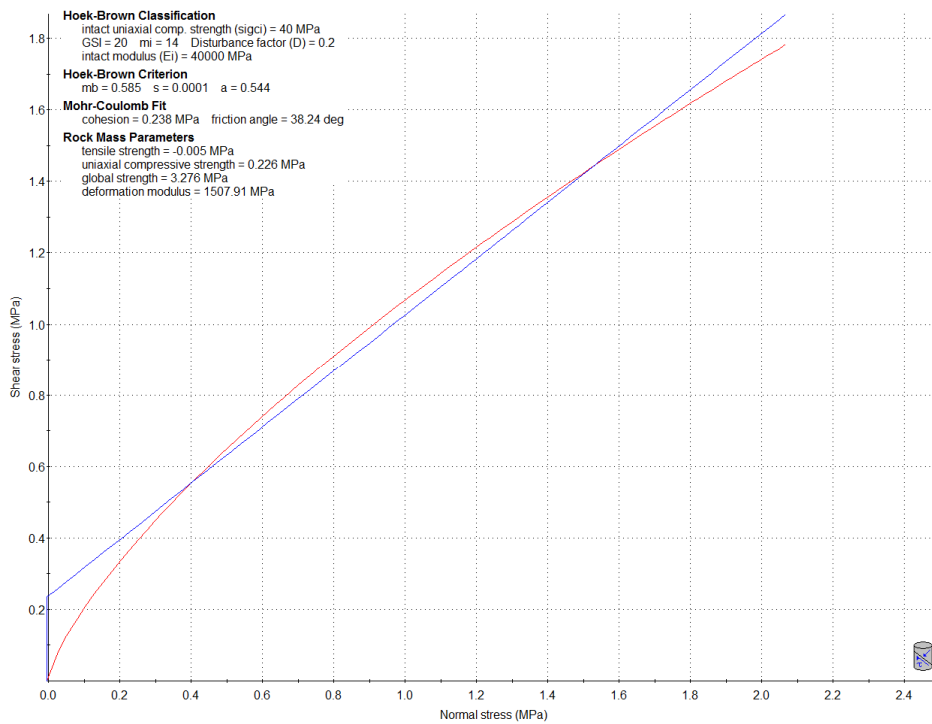


Figura 21. BNA3 – Criterio di Hoek – Brown – Copertura 100 m

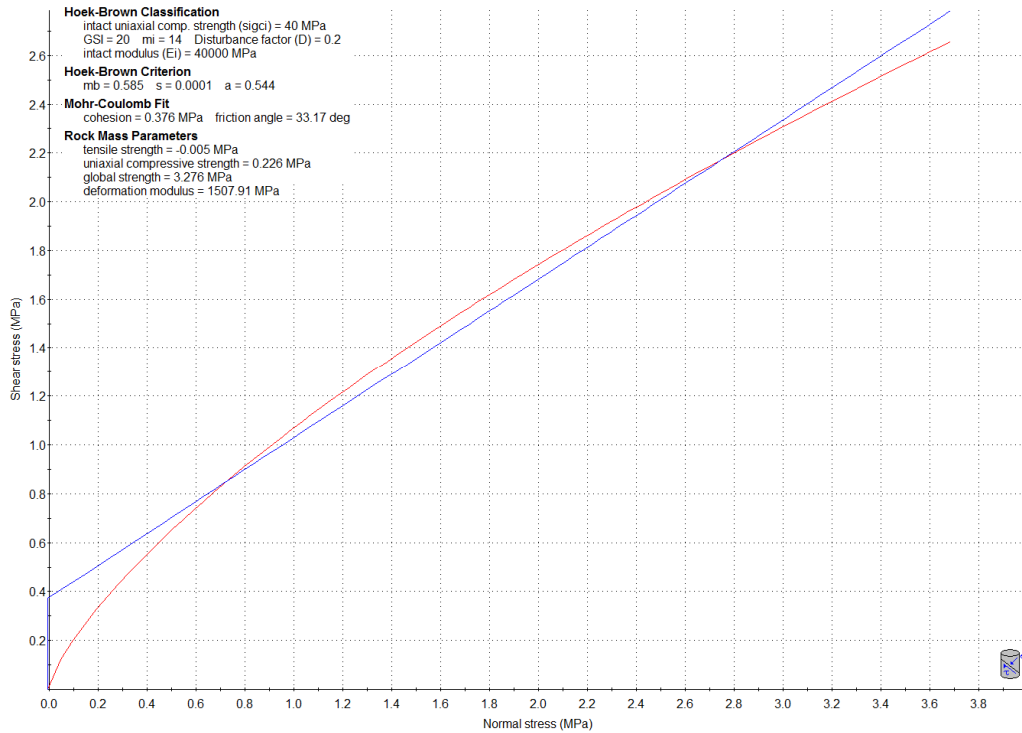


Figura 22. BNA3 – Criterio di Hoek – Brown – Copertura 200 m

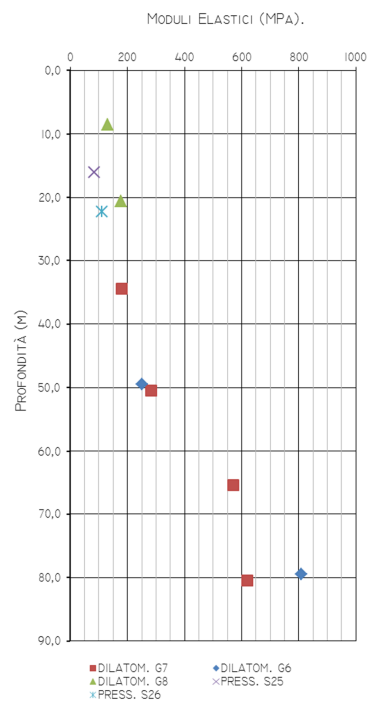
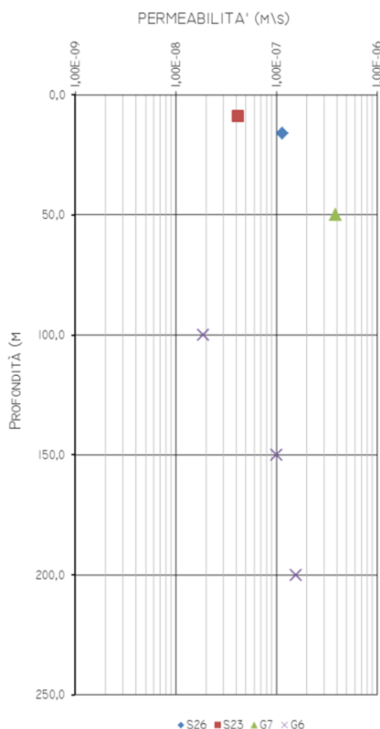


Figura 23. BNA3 – Moduli elastici da prove dilatometriche

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	34 di 141

In base alle indicazioni fornite dalle prove in sito (Lefranc e Lugeon) la formazione BNA3 è caratterizzata da permeabilità variabili, anche in funzione del grado di cementazione. Le prove forniscono valori compresi tra  $5 \times 10^{-6}$  m/s e  $5 \times 10^{-8}$  m/s, con un valore medio pari a  $1 \times 10^{-7}$  m/s. (Figura 24).



**Figura 24. BNA3 – Permeabilità**

La caratterizzazione geotecnica, condotta sulla base delle indagini e prove descritte nei paragrafi precedenti, ha condotto alla definizione dei seguenti intervalli di valori rappresentativi dei principali parametri geotecnici per l'Unità BNA3:

Unità	Copertura (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	c (kPa)	E (MPa)
<b>BNA3</b>	p.c ÷ 15	20 ÷ 22	30 ÷ 32	0 ÷ 5	30 ÷ 80
	15 ÷ 30	20 ÷ 22	32 ÷ 35	0 ÷ 10	80 ÷ 120
	30 ÷ 50	20 ÷ 22	30 ÷ 38	20 ÷ 200	200 ÷ 300
	50 ÷ 100	20 ÷ 22	38 ÷ 43	150 ÷ 240	300 ÷ 800
	100 (*)	20 ÷ 22	35	20	500
	100 ÷ 200	20 ÷ 22	33 ÷ 38	240 ÷ 380	>= 800

**Tabella 6: BNA3 – Riepilogo parametri geotecnici**

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA					
	GALLERIA ROCCHETTA Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	COMMESSA IF0G	LOTTO 01	CODIFICA D 07 RB	DOCUMENTO GN0300 001	REV. A

### 7.5.2 Caratterizzazione geotecnica della Formazione della Baronìa – litofacies argillosa (BNA2)

Lo scavo della Galleria Rocchetta interessa per quasi tutto il suo sviluppo longitudinale le “marne e argille marnose” dell’Unità BNA2 (Membro pelitico - arenaceo del F. Miscano). Infatti, i nuovi dati provenienti dal sondaggio G6, eseguito nella campagna di indagine del 2017, hanno permesso di reinterprete le informazioni dei sondaggi PNIF61G3 e PNIF61G36, eseguiti nella campagna 2008, ricostruendo con maggior dettaglio il contatto stratigrafico tra la formazione BNA2 e la formazione BNA3. Da ciò è stato possibile accertare che lo scavo della galleria Rocchetta interesserà l’Unità BNA2 per un’estensione maggiore rispetto a quanto noto nel progetto preliminare.

Le indagini in sito e in laboratorio hanno mostrato che la formazione BNA2 presenta prevalentemente le caratteristiche di una argilla marnosa consistente, che ad elevate profondità assume le caratteristiche proprie di una roccia tenera.



Le analisi granulometriche eseguite sui campioni prelevati dai fori di sondaggio mostrano la prevalenza dei termini limo-argillosi e subordinatamente sabbiosi; dal punto di vista granulometrico tale materiale è classificabile come limo con argilla debolmente sabbioso. Le analisi granulometriche sono state eseguite anche sui campioni con caratteristiche litoidi, previa destrutturazione del materiale in laboratorio. Nella tabella seguente e nella Figura 25 sono riportati i dati delle analisi granulometriche.

Sondaggio	Profondità (m)	Ghiaia (%)	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)
G6	245	0	12	65	23
G6	266,7	0	9	73	18
G6	284	0	9	68	23
G7	29	0	3	67	30
G7	54,7	0	2	64	34
G8	7,5	0	1	42	57
G8	22,5	0	4	47	49
PNIF61G3	165	0,1	13,5	59,3	27,1
PNIF61G3	180	0,1	15,4	58	26,5
PNIF61G3	225	0	15,8	57,8	26,4
PNIF61G36	199,5	0	2,2	57,6	40,2
PNIF61G36	210	0	8,5	63,4	28,2
PNIF61G36	260	0	2,7	62,7	34,7
PNIF61G36	280	0	3,5	59,6	36,9
PNIF61G36	298	0	1,3	59	39,7
PNIF61G36	231,5	0	6,1	60,1	33,7
PNIF61G36	255,15	0,3	5,5	94,3	
PNIF61G36	259,35	0	2,4	97,6	
PNIF61G36	289,6	0	3,8	58,3	37,9
S20	5	0	5,3	64,74	29,97
S20	10	0,01	6,45	68,31	25,23
S20	15	0,61	6,92	64,56	27,91
S20	19,4	0,01	6,27	66,76	26,95

Sondaggio	Profondità (m)	Ghiaia (%)	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)
ENS2	5	0	1	70	29
ENS2	10	0	0	49	41
ENS2	15	0	0	61	39
ENS2	20	0	0	48	52
ENS2	25	0	0	49	51
ENS2	30	0	0	49	51
ENS3	4,5	0	1	67	32
ENS3	9	0	0	69	31
ENS3	14,5	0	2	74	24
ENS3	20	0	1	48	51
G5	119	0	4	62	34
G5	129	0	9	61	30
G5	139,4	0	8	63	29
G6	301,3	0	9	68	23
G6	320	0	12	67	21
G6	83	1	11	66	22
G6	93	0	16	61	23
G6	145	0	8	64	28
G6	163	0	15	60	25
G6	184,7	0	8	60	32
G6	205	0	8	69	23
G6	225,2	0	6	72	22

Tabella 7: BNA2 – Analisi Granulometriche

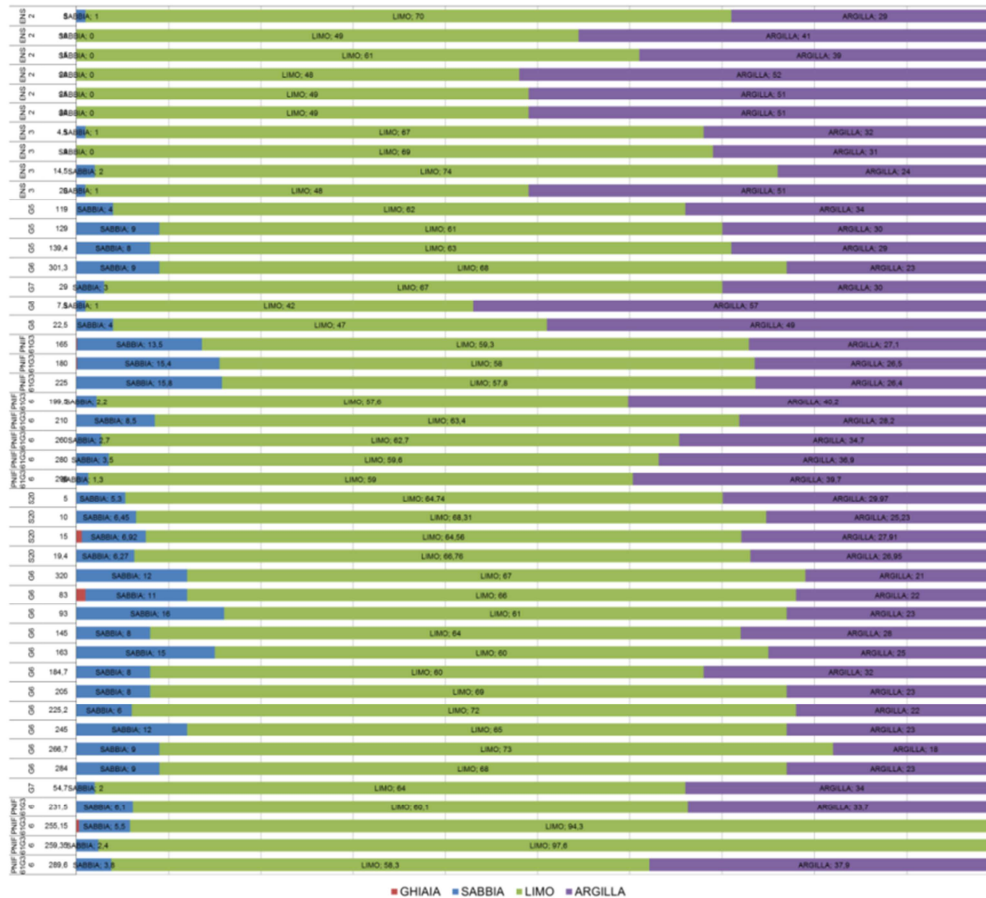


Figura 25 –BNA2 – Analisi Granulometrica



 <b>ITALFERR</b> <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</b>	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	37 di 141

Il peso dell'unità di volume è variabile tra  $20 \div 22 \text{ KN/m}^3$  (

Figura 26) fino a circa 30 metri di profondità; in particolare i dati riportati nel grafico per tali profondità si riferiscono ai campioni prelevati nei sondaggi realizzati nelle aree di imbocco della Galleria Rocchetta lato Bari e Galleria Melito lato Napoli. A profondità superiori ai 30 metri il peso di volume della formazione è variabile tra  $23 \text{ e } 25 \text{ KN/m}^3$ . Il peso specifico è variabile tra  $25.5 \div 27.5 \text{ KN/m}^3$  (Figura 27) .

Il contenuto naturale d'acqua (Figura 28) fino a 15 m di profondità dal piano campagna è compreso tra il 10% e il 20%; a profondità maggiori è pari a circa il 5%, con valori anche inferiori alle massime profondità di interesse (250-300 m).

I limiti di Atterberg risultano variabili nei seguenti intervalli di valore (Figura 29 e Figura 31):

per profondità fino a 30m dal piano campagna:

- Limite di plasticità:  $17\% \div 25\%$
- Limite di liquidità:  $40\% \div 72\%$
- Indice di Plasticità:  $25\% \div 48\%$

per profondità superiori a 30 metri dal piano campagna:

- Limite di plasticità:  $17\% \div 18\%$
- Limite di liquidità:  $28\% \div 40\%$
- Indice di Plasticità:  $16\% \div 24\%$

L'indice di consistenza  $I_c$  assume valori sempre superiori all'unità; a partire da 100 metri di profondità  $I_c$  assume valori prossimi o superiore a 2.

La prova di reazione con acido cloridrico eseguita sui campioni di laboratorio ha mostrato sempre una forte reazione al contatto con l'acido; le prove eseguite per la determinazione del contenuto di carbonato di calcio, hanno fornito valori compresi tra 200 e 240 g/kg, ovvero  $20 \div 24\%$  di  $\text{CaCO}_3$  in peso. I dati si riferiscono a campioni prelevati a profondità tra 20 e 30 metri dal piano campagna nel sondaggio G5bis.

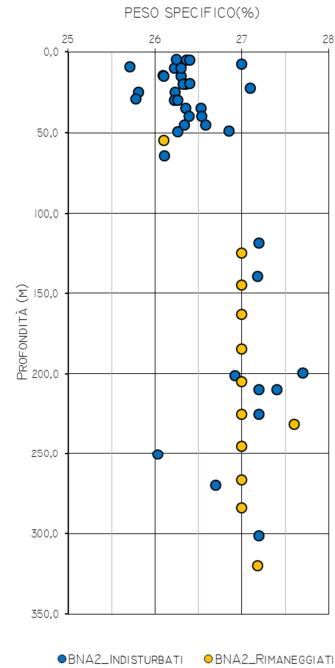
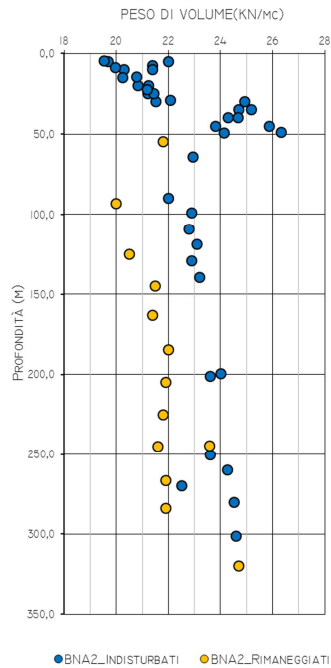


Figura 26 –BNA2 – Peso dell'unità di volume

Figura 27 –BNA2 – Peso specifico

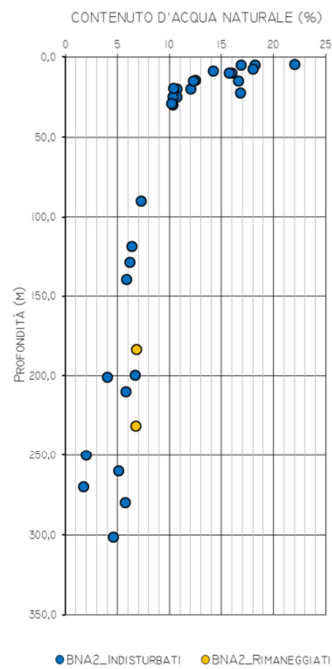


Figura 28 –BNA2 – Contenuto d'acqua naturale

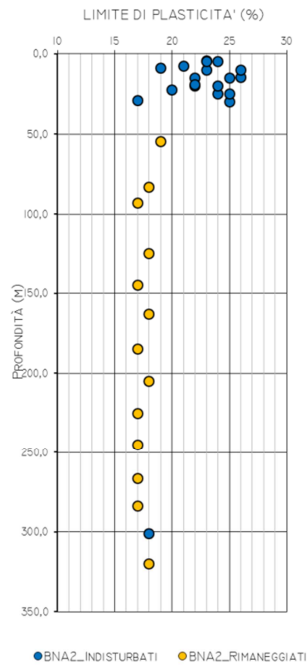


Figura 29 –BNA2 – Limite di plasticità

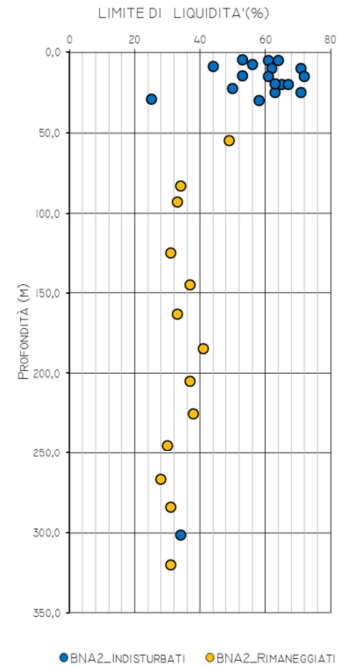


Figura 30 –BNA2 – Limite di liquidità

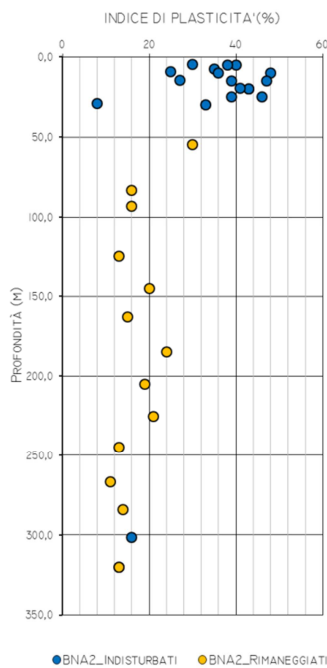


Figura 31 –BNA2 – Indice di plasticità

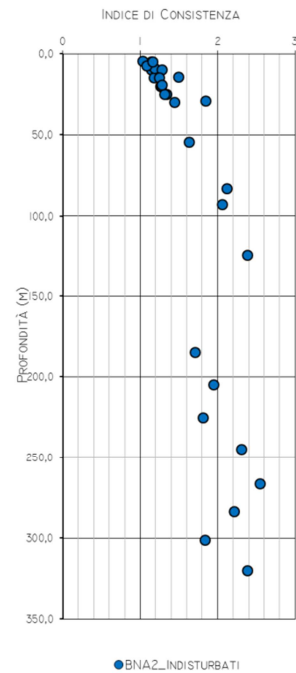
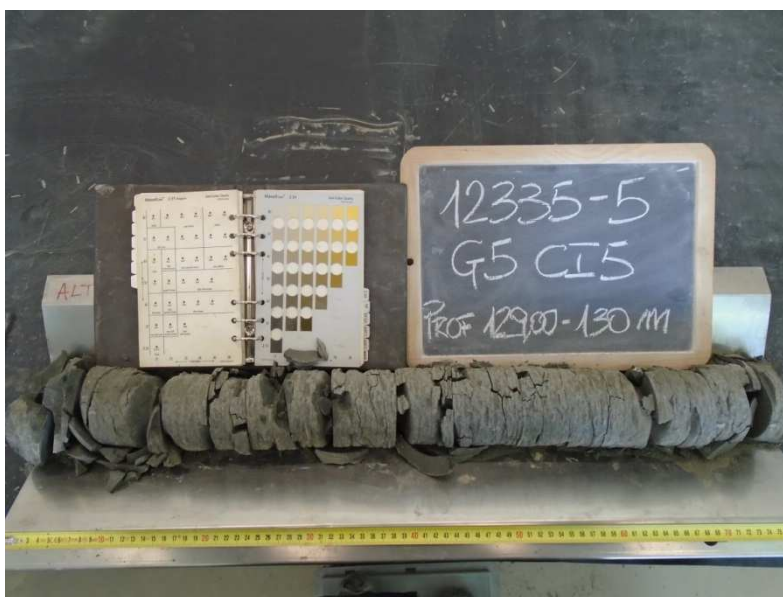


Figura 32 –BNA2 – Indice di consistenza

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	40 di 141

Il materiale ha presentato difficoltà di preparazione di provini da sottoporre a prove di laboratorio, a causa della predisposizione della roccia a separarsi naturalmente ‘in dischi’ al momento dell’estrazione del campione indisturbato dalla fustella (Figura 33).



**Figura 33 –BNA2 – Fratturazione ‘in dischi’ dei campioni estratti da fustella.**

Le prove di compressione in cella triassiale sono state eseguite su campioni prelevati a diverse profondità; i risultati delle prove sono stati interpretati con due interpolazioni, una per le coperture comprese tra 50 e 200 m, una per coperture comprese tra 200 e 400 m.

Nella Figura 35 è mostrato l’andamento della linea che interpola nel piano  $s = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2}$ ,  $t = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2}$  i dati relativi alle prove triassiali eseguite su campioni prelevati a profondità corrispondenti alle alte coperture della galleria, comprese tra 200 e 400 metri. Nella Figura 36 è mostrato lo stesso grafico, escludendo dall’interpolazione i due valori massimi.

Si definiscono i seguenti intervalli di variazione dei parametri di resistenza al taglio nell’intervallo compreso tra 200 e 400 metri di copertura:

$$1,3 \leq c \leq 2,3 \text{ MPa}$$

$$31^\circ \leq \varphi \leq 38^\circ$$

Nella Figura 37 è mostrato l’andamento della linea che interpola nel piano  $s = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2}$ ,  $t = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2}$  i risultati delle prove triassiali eseguite su campioni prelevati a profondità comprese tra 50 e 200 metri. Si ottengono i seguenti intervalli di variazione dei parametri di resistenza al taglio:

$$0,5 \leq c \leq 1,3 \text{ MPa}$$

$$26^\circ \leq \varphi \leq 31^\circ$$

	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	41 di 141

Nella Figura 34 sono riportati i risultati delle prove di compressione monoassiale, che evidenziano un aumento crescente della resistenza con la profondità da piano campagna; si possono individuare i seguenti range di variazione (vedi figura Figura 34):

$$4 \leq \sigma_c \leq 6 \text{ MPa per } 50 \leq z \leq 200 \text{ m}$$

$$6 \leq \sigma_c \leq 12 \text{ MPa per } 200 \leq z \leq 320 \text{ m con alcuni valori misurati superiori a 20 MPa.}$$

Sono state realizzate anche prove di trazione indiretta (metodo Brasiliano) che hanno fornito valori compresi tra  $0.3 < \sigma_t < 0.6 \text{ MPa}$

In corrispondenza degli imbocchi ed alle basse coperture inferiori ai 50 metri, le stratigrafie dei sondaggi mostrano la presenza di uno strato di alterazione delle argille dell'Unità BNA2. Nella Figura 38 sono riportati i dati relativi ai valori di coesione drenata ed angolo di attrito determinati mediante prove di laboratorio (taglio diretto e prova triassiale CIU), tramite i quali è stato possibile definire il range di seguito riportato:

$$20 \leq c' \leq 30 \text{ kPa}$$

$$22 \leq \phi' \leq 25^\circ$$

I moduli elastici ricavati dalle prove dilatometriche eseguite in foro di sondaggio sono riportati nella Figura 39; nello stesso grafico, sono riportati, per confronto, i valori dei moduli ricavati dalle misure di deformazione misurati nelle prove triassiali di laboratorio.

I valori del modulo elastico E risultano crescenti con la profondità e variabili nei seguenti range:

$200 \leq E \leq 600 \text{ MPa}$	per $0 \leq z \leq 50 \text{ m}$
$400 \leq E \leq 800 \text{ MPa}$	per $50 < z \leq 200 \text{ m}$
$600 \leq E \leq 1200 \text{ MPa}$	per $200 < z \leq 300 \text{ m}$
$1800 \leq E \leq 2600 \text{ MPa}$	per $300 < z \leq 400 \text{ m}$

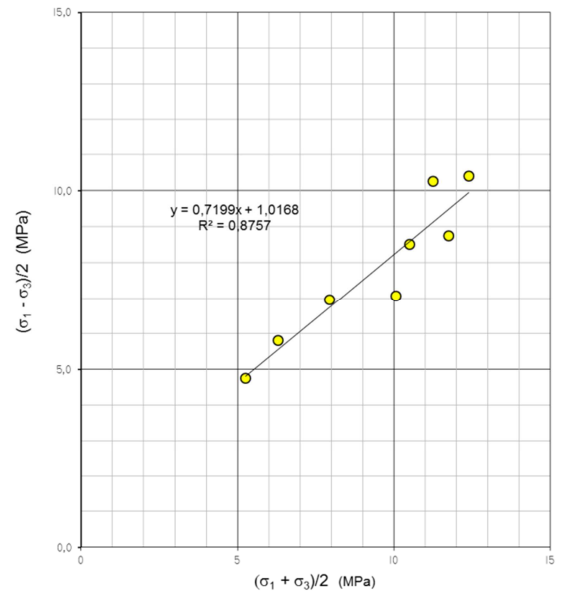
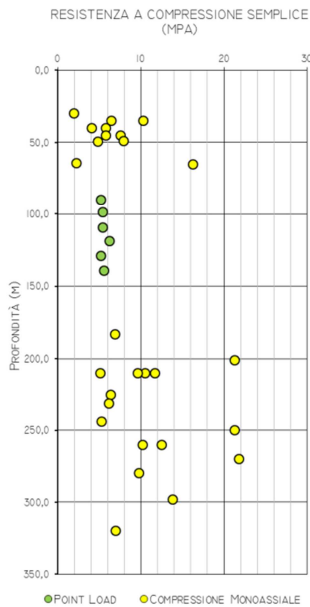


Figura 34 –BNA2 – Prove di compressione monoassiale

Figura 35 –BNA2 – Criterio di Mohr Coulomb – copertura tra 200 e 400 m

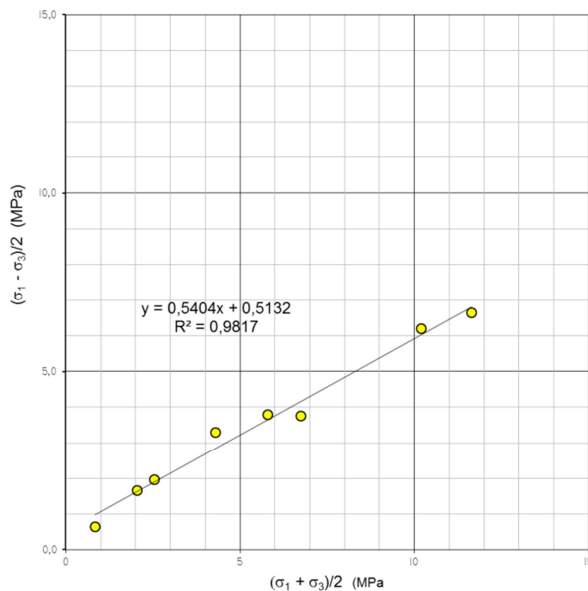


Figura 36 –BNA2 – Criterio di Mohr Coulomb – copertura 50 ÷ 200 m

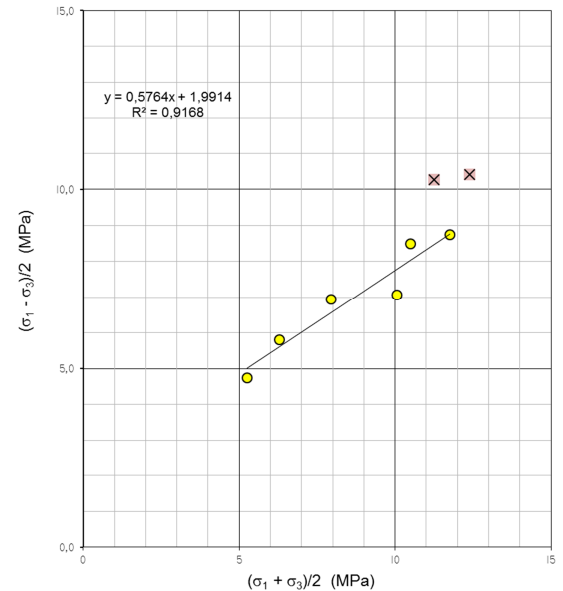
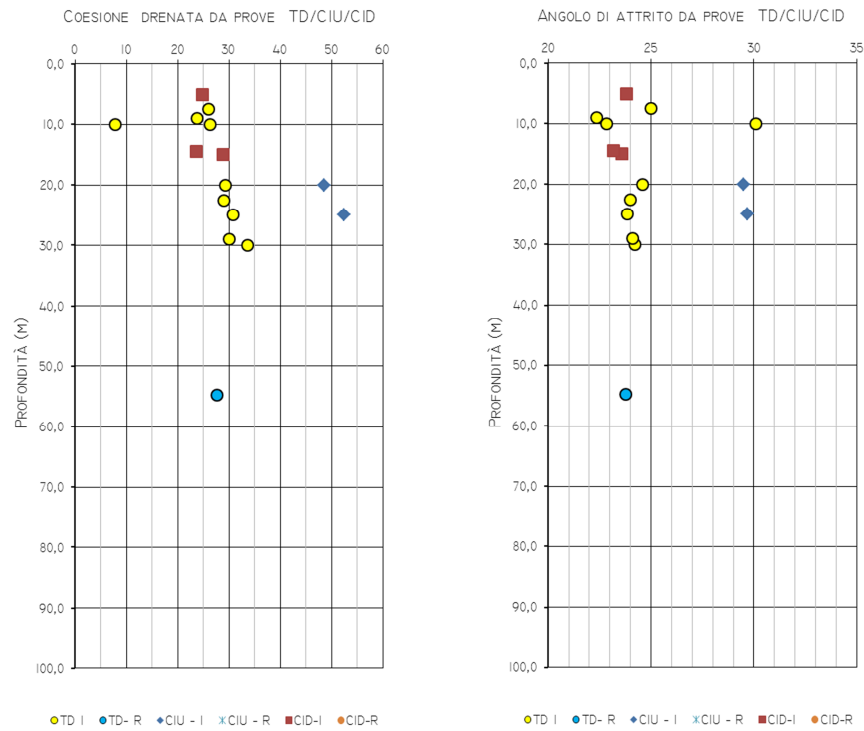
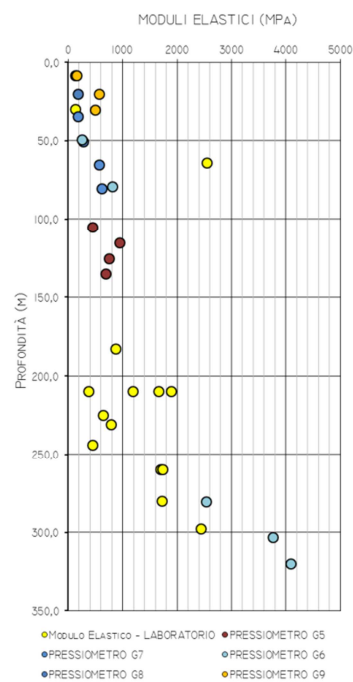


Figura 37 –BNA2 – Criterio di Mohr Coulomb – copertura tra 200 e 400 m



**Figura 38 –BNA2 – Coesione drenata e angolo di attrito.**

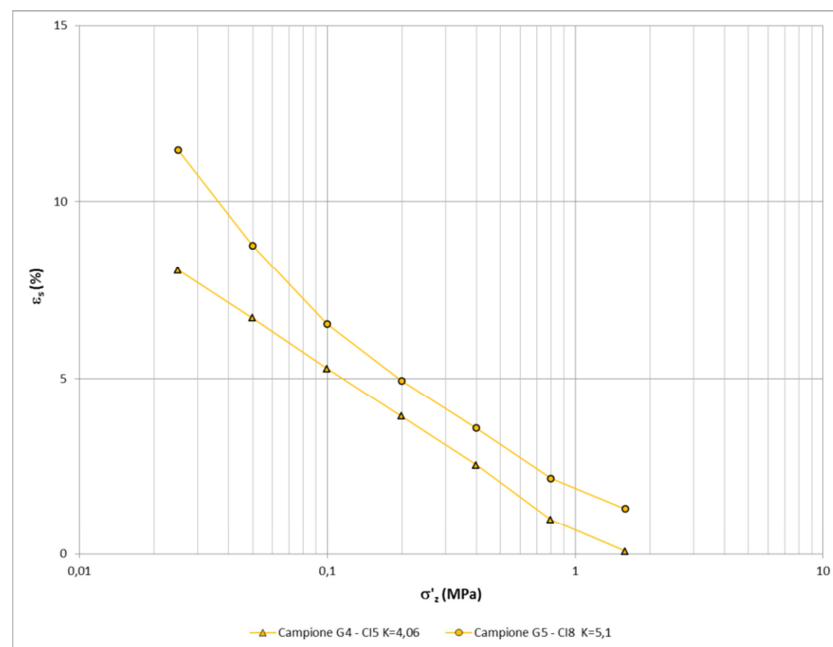


**Figura 39 – Formazione BNA2 – Moduli elastici da prove dilatometriche**

Al fine di individuare il potenziale di rigonfiamento sono state eseguite le seguenti prove in cella edometrica:

- prove di rigonfiamento libero;
- prove di rigonfiamento impedito con valutazione della pressione di rigonfiamento;
- prove di rigonfiamento tipo Huder Amberg;

I risultati delle prove Huder Amberg (Figura 40) mostrano che la formazione BNA2 ha un comportamento potenzialmente rigonfiante; le prove a rigonfiamento impedito in cella edometrica hanno fornito valori medi di pressione di rigonfiamento compresi tra 250 e 350 KPa.



**Figura 40 –BNA2 – Prove Huder Amberg**

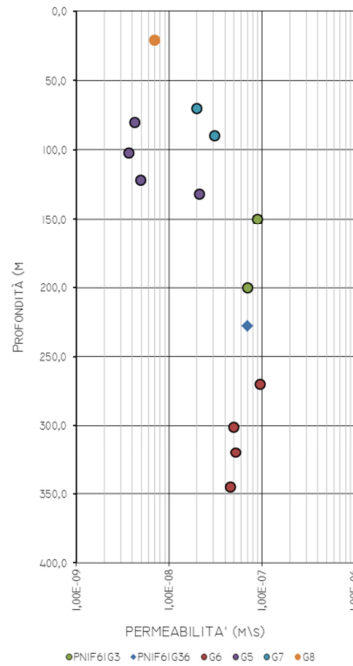
I risultati delle prove di permeabilità eseguite nei fori di sondaggio mostrano che l'unità BNA2 è caratterizzata da permeabilità molto basse comprese tra:

$$1 \times 10^{-9} \text{ m/s} < k < 1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$$

I valori di permeabilità determinati dall'elaborazione delle prove edometriche hanno fornito, come atteso, valori di permeabilità inferiori, pari a circa  $1 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ .

Peraltro, la formazione argillosa alle profondità interessate dalla scavo ha le caratteristiche proprie di una roccia tenera, la cui permeabilità è prevalentemente condizionata dalle caratteristiche strutturali più che dalla porosità.





**Figura 41 –BNA2 – Permeabilità da prove in sito**

La caratterizzazione geotecnica, sulla base delle indagini e prove descritte nei paragrafi precedenti, ha condotto alla definizione dei seguenti intervalli di valori rappresentativi dei principali parametri geotecnici per l'Unità BNA2:

Unità	Copertura (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	c (kPa)	E (MPa)	$\sigma_{ci}$ (MPa)
<b>BNA2</b>	p.c ÷ 50	20 ÷ 22	22 ÷ 25	20 ÷ 30	200 ÷ 600	---
	50 ÷ 200	23 ÷ 24	26 ÷ 31	500 ÷ 1300	400 ÷ 800	4 ÷ 6
	200 ÷ 300	23 ÷ 24	31 ÷ 38	1300 ÷ 2300	600 ÷ 2600	6 ÷ 12
	300 ÷ 400	23 ÷ 24	31 ÷ 38	1300 ÷ 2300	1800 ÷ 2600	6 ÷ 12

**Tabella 8: Formazione BNA2 – Riepilogo parametri geotecnici**

 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</b>	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA					
	GALLERIA ROCCHETTA Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	COMMESSA IF0G	LOTTO 01	CODIFICA D 07 RB	DOCUMENTO GN0300 001	REV. A

### 7.5.3 Caratterizzazione geotecnica della Formazione della Baronia – litofacies BNA1b

La galleria Rocchetta interessa l'Unità BNA1b (sabbie con intercalazioni argillose) della Formazione della Baronia solo nella zona di imbocco lato Napoli; è inoltre presente nelle zone di imbocco degli accessi/uscite i emergenza F4 ed F5.

I sondaggi eseguiti all'imbocco della galleria Rocchetta (S21, G13) hanno intercettato tale formazione per uno spessore di circa 8m, caratterizzato da arenarie (S21) e sabbie (G13), al di sotto del quale sono state rinvenute le argille marnose dell'Unità BNA2.

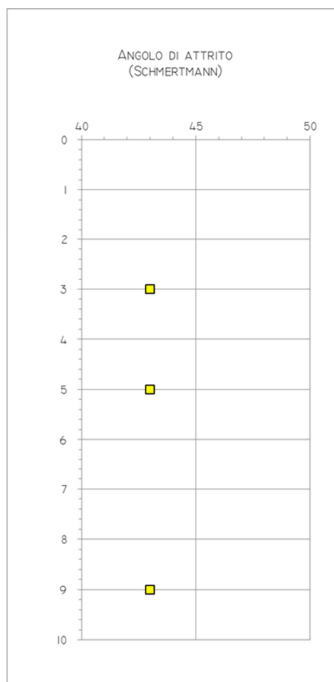
In tabella sono riportati i valori delle prove  $N_{spt}$ :

Prova	Prof. prova (m dal p.c.)	$N_{SPT}$
S21	5	100
G13	3	100
G13	9	100

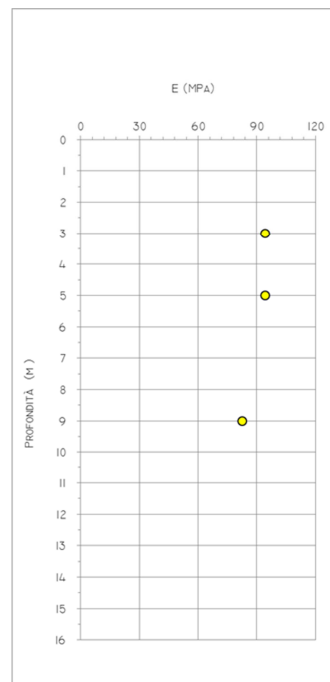
**Tabella 9: BNA1b – Prove  $N_{SPT}$  in foro di sondaggio**

Le prove SPT eseguite nei due sondaggi hanno consentito di valutare:

- l'angolo d'attrito, variabile tra  $35^\circ$  e  $40^\circ$ , secondo la correlazione di Schmertmann;
- il valore del modulo elastico E, dalla correlazione di D'Appollonia.



**Figura 42 - BNA1b – Angolo d'attrito (Schmertmann)**



**Figura 43 - BNA1b – Modulo Elastico (D'Appollonia)**

 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</b>	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	47 di 141

La prova dilatometrica eseguita nel sondaggio G13 a 8 metri di profondità ha fornito valori del modulo elastico E pari a 75 MPa.

Dall'analisi dei dati a disposizione si definiscono i seguenti valori rappresentativi dei principali parametri geotecnici per l'Unità BNA1b:

Formazione	Profondità da p.c.	$\gamma$	c'	$\phi'$	E'
[-]	[m]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kPa]	[°]	[MPa]
BNA1b	0-8	20 ÷ 21	0 ÷ 10	35 ÷ 40	30 ÷ 75

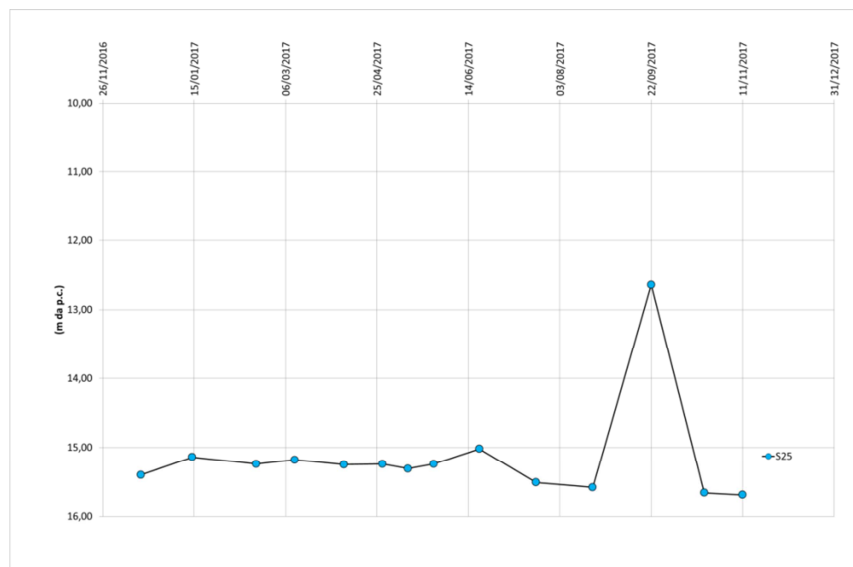
**Tabella 10: BNA1b – Riepilogo parametri geotecnici**

## 7.6 REGIME IDRAULICO

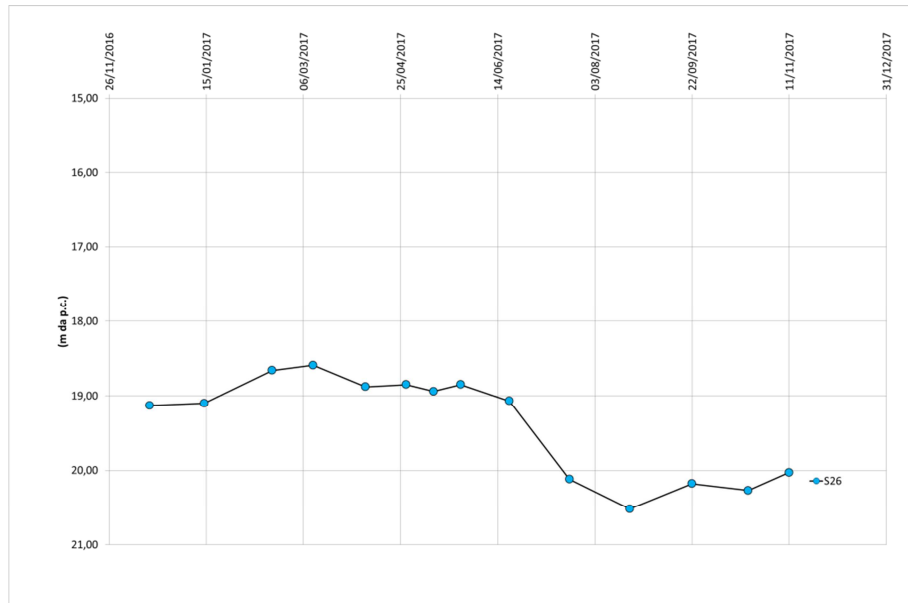
L'Unità BNA3, costituita da sabbie e arenarie, è al tetto dell'Unità BNA2, marnoso- argillosa, che presenta permeabilità più basse di circa due ordini di grandezza rispetto alla sovrastante formazione. Tale differenza di permeabilità tra le due formazioni fa sì che il flusso idrico che interessa il versante, circondato dal fiume Ufita, sia concentrato prevalentemente nella formazione arenacea.

La presenza di una circolazione idrica nella Unità BNA3 è testimoniata dalla presenza di numerosi pozzi di emungimento presenti nell'area del versante in cui affiora tale Unità ; una sintesi delle indicazioni relative ai pozzi censiti è riportata nello studio idrogeologico di progetto (Rif. [15]).

La quota della falda freatica è stata individuata tramite l'installazione di piezometri all'interno dei fori di sondaggio. Nelle figure seguenti sono riportate le indicazioni relative ai piezometri con tratto filtrante nella formazione BNA3. I livelli piezometrici sono compresi tra i 10 ed i 20 metri dal piano campagna con oscillazioni stagionali, nel periodo di osservazione disponibile.



**Figura 44 – Piezometro S25 -- Variazione livelli piezometrici**



**Figura 45 – Piezometro S26– Variazione livelli piezometrici**

Nel corso delle diverse campagne di indagine geotecnica sono stati installati alcuni piezometri con tratto filtrante all'interno della formazione BNA2, a profondità comprese tra 200 e 300 m. I piezometri a tubo aperto installati nei sondaggi profondi denominati PNIF61G3 e PNIF61G36 (campagna 2008) mostravano livelli piezometrici pari a quelli misurati nelle sabbie e arenarie sovrastanti, come dimostrato dal complesso dei dati da piezometri e pozzi nell'area di affioramento di BNA3. Poiché tale informazione appariva in contrasto con la caratteristiche dell'Unità BNA2, nella campagna di indagine del 2017 è stato realizzato un ulteriore piezometro a tubo aperto di acciaio, con tratto filtrante tra 266 e 320 m di profondità (G6). Al fine di limitare la possibilità di infiltrazione dell'acqua all'interno del tubo piezometrico dagli strati sabbiosi sovrastanti, è stato installato un packer tra il tubo di acciaio ed il terreno, a protezione del tratto filtrante. Ad oggi il livello piezometrico non ha ancora raggiunto l'equalizzazione, mostrando una progressiva diminuzione con velocità pressoché costante e ciò rende necessario proseguire il monitoraggio fino alla successiva fase progettuale. Risulta tuttavia evidente che il campo delle pressioni interstiziali nella formazione argillosa non può correlarsi ai livelli piezometrici misurati nella sovrastante formazione sabbioso-arenacea.

Peraltro, la formazione argillosa alle profondità interessate dalla scavo nelle tratte di copertura profonda assume le caratteristiche proprie di una roccia tenera, con bassa permeabilità secondaria per fratturazione, pertanto, l'eventuale circolazione idrica è di regola discontinua, concentrata nelle zone a maggiore fratturazione.

	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	49 di 141

## 8 FASE DI DIAGNOSI

Nella fase di diagnosi, sulla base del modello geotecnico scaturito dagli studi e dalle indagini effettuati nella fase conoscitiva, si procede alla previsione della risposta tensio-deformativa dell'ammasso allo scavo, in assenza di interventi di stabilizzazione. La valutazione della risposta deformativa dell'ammasso allo scavo è condotta con riferimento alle tre categorie di comportamento fondamentali individuate nel metodo ADECO-RS (Rif. [22]), di seguito brevemente richiamate, sulla base delle quali il tracciato sotterraneo è suddiviso in tratte a comportamento deformativo omogeneo.

### 8.1 CLASSI DI COMPORTAMENTO DEL FRONTE DI SCAVO

Secondo l'approccio ADECO-RS (Rif. [22]) la previsione dell'evoluzione dello stato tensionale a seguito dell'apertura di una galleria è possibile attraverso l'analisi dei fenomeni deformativi, che forniscono indicazioni sul comportamento della cavità nei riguardi della stabilità a breve e a lungo termine. Dati sperimentali e analisi teoriche hanno dimostrato che il comportamento della cavità è significativamente condizionato, oltre che dalle caratteristiche geometriche della galleria stessa e dai carichi litostatici, anche dalle caratteristiche di resistenza e di rigidità del nucleo d'avanzamento, inteso come il volume di terreno a monte del fronte di scavo. Se il nucleo non è costituito da materiale sufficientemente rigido e resistente da mantenere in campo elastico il proprio comportamento tensio-deformativo, si sviluppano fenomeni deformativi e plasticizzazioni rilevanti in avanzamento, a cui consegue l'evoluzione verso condizioni di instabilità del fronte e del cavo. Se, invece, il comportamento del nucleo d'avanzamento si mantiene in campo elastico, il nucleo stesso svolge un'azione di precontenimento del cavo, che si mantiene a sua volta in condizioni elastiche, conservando le caratteristiche di massima resistenza del materiale attraversato e quindi configurazioni di stabilità.

Sulla base di tali considerazioni, il comportamento del nucleo-fronte di scavo, al quale è legato quello della cavità, può essere sostanzialmente ricondotto alle seguenti tre categorie:

#### Categoria A: nucleo-fronte stabile

Tale categoria corrisponde alla condizione in cui lo stato tensionale nel terreno al fronte e al contorno della cavità non supera le caratteristiche di resistenza dell'ammasso; in tal caso le deformazioni sono prevalentemente elastiche, di piccola entità e tendono ad esaurirsi rapidamente con la distanza dal fronte. Il fronte di scavo e il cavo sono stabili e quindi non si rendono necessari interventi preventivi di stabilizzazione, se non localizzati e in misura ridotta. Il rivestimento definitivo costituisce il margine di sicurezza per la stabilità a lungo termine.

#### Categoria B: nucleo-fronte stabile a breve termine

Tale categoria corrisponde alla condizione in cui lo stato tensionale nel terreno al fronte e al contorno della cavità, a seguito delle operazioni di scavo, raggiunge la resistenza dell'ammasso. I fenomeni deformativi tensioni sono di tipo elasto-plastico, di maggiore entità rispetto al caso precedente. Nell'ammasso può prodursi una eventuale riduzione delle caratteristiche di resistenza con decadimento verso i parametri residui. Il rivestimento definitivo costituisce il margine di sicurezza per la stabilità a lungo termine.

#### Categoria C: nucleo-fronte instabile

Tale categoria corrisponde alla condizione in cui, superata la resistenza del terreno, i fenomeni deformativi evolvono molto rapidamente in campo plastico, producendo la progressiva instabilità del fronte di scavo e un

	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	50 di 141

incremento dell'estensione della zona dell'ammasso decompressa ed plasticizzata al contorno della cavità, con rapido decadimento delle caratteristiche meccaniche del materiale.

## 8.2 DETERMINAZIONE DELLE CATEGORIE DI COMPORTAMENTO

La valutazione del comportamento deformativo del fronte è stata condotta utilizzando:

- il metodo delle linee caratteristiche (per le tratte ad alta copertura);
- i metodi di analisi della stabilità del fronte (per le tratta a bassa copertura).

Le analisi nella fase di diagnosi sono state condotte con riferimento ai valori caratteristici dei parametri geotecnici e delle azioni.

### 8.2.1 *Analisi con il metodo delle linee caratteristiche*

#### 8.2.1.1 Metodo di analisi

Il metodo delle linee caratteristiche (o convergenza-confinamento) è un metodo di calcolo che consente l'analisi 3D semplificata dello scavo di gallerie in relazione alle proprietà meccaniche dell'ammasso attraversato, alle caratteristiche geometriche dell'opera, agli interventi previsti di precontenimento e contenimento, e all'installazione dei rivestimenti provvisori e definitivi.

Il comportamento delle strutture di rivestimento e dell'ammasso vengono studiati separatamente: la curva caratteristica del cavo (o curva di convergenza) rappresenta l'evoluzione della convergenza radiale del cavo al diminuire della tensione radiale agente sul contorno del profilo di scavo, espressa in funzione del tasso di deconfinamento  $\lambda$  con cui viene simulato l'effetto dello scavo in avanzamento; la curva caratteristica dei sostegni (o curva di confinamento) rappresenta l'evoluzione della loro convergenza radiale al crescere della pressione radiale agente sugli stessi. L'intersezione tra la curva di convergenza e la curva di confinamento individua il punto di equilibrio rappresentativo dello stato finale della galleria rivestita.

Le ipotesi alla base del metodo sono le seguenti:

- simmetria cilindrica e stato piano di deformazione;
- ammasso omogeneo ed isotropo;
- stato tensionale iniziale omogeneo ed isotropo.

L'ideale campo di applicazione è pertanto costituito da gallerie profonde a sezione circolare.

Per l'ammasso si utilizza un modello costitutivo elasto-plastico, con criterio di resistenza di Mohr-Coulomb.

Ove necessario, per la definizione del comportamento deformativo della galleria in funzione della distanza dal fronte, si utilizza il Nuovo Metodo Implicito (NMI) (Rif. [23], Rif. [24]).

Per il calcolo della convergenza al fronte si utilizzano le soluzioni analitiche per cavità sferiche.

Per le analisi di seguito riportate, relative alla fase di diagnosi, e finalizzate quindi alla sola valutazione del comportamento deformativo dell'ammasso per la determinazione della categoria di comportamento, non viene

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	51 di 141

presa in considerazione l'interazione con i sostegni, per cui la soluzione del problema è ridotta alla valutazione della sola curva caratteristica del fronte (e del cavo) in assenza di interventi.

### 8.2.1.2 Sezioni analizzate

Sulla base dei risultati della caratterizzazione geotecnica di cui al precedente paragrafo, in funzione delle condizioni idrauliche previste e della distribuzione delle diverse classi di copertura lungo il tracciato, sono state definite le seguenti sezioni di analisi, riassunte nella Tabella 2 e caratterizzate con tutti i dati di input necessari per il calcolo.

Sezione di calcolo	Unità	H [m]	$\sigma_0$ [MPa]	$p_{w0}$ [MPa]	$p_{wR}$ [MPa]	$R_w$ [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c'_{kp}$ [kPa]	$\phi'_{kp}$ [°]	$c'_{kr}$ [kPa]	$\phi'_{kr}$ [°]	$E_k$ [MPa]
Sez. 1	BNA3	100	2,1	0,5	0	6,4	21	150	38	150	38	500
Sez. 2	BNA2	200	4,8	-	-	-	24	800	26	800	26	1000
Sez. 3	BNA2	400	9,6	-	-	-	24	1000	30	1000	30	2500

H = copertura rispetto al piano dei centri della galleria

$\sigma_0$  = tensione totale iniziale al livello del cavo

$p_{w0}$  = pressione interstiziale al livello del cavo in condizioni indisturbate

$p_{wR}$  = pressione interstiziale sul profilo di scavo

$R_w$  = raggio di influenza idraulica oltre il quale si ristabilisce  $p_{w0}$

$\gamma$  = peso dell'unità di volume dell'ammasso

$c'_{kp}$  = valore caratteristico della coesione efficace di picco dell'ammasso

$\phi'_{kp}$  = valore caratteristico dell'angolo di attrito di picco dell'ammasso

$c'_{kr}$  = valore caratteristico della coesione efficace residua dell'ammasso

$\phi'_{kr}$  = valore caratteristico dell'angolo di attrito residuo dell'ammasso

$C_{uk}$  = valore caratteristico della coesione non drenata dell'ammasso

$E_k$  = valore caratteristico del modulo elastico dell'ammasso: (\*) drenato (\*\*\*) non drenato

Tutte le analisi sono svolte con riferimento allo scavo di una galleria di raggio equivalente  $R_{eq}$  pari a 6.40 m.

**Tabella 11 - Sezioni analizzate con il metodo delle curve caratteristiche: dati di input**

Nello specifico le sezioni analizzate riguardano:

Sezione 1 – Sezione con copertura di 100 metri (progressiva km 16+100) e battente idraulico di 50 metri, nella Formazione arenacea sabbiosa BNA3

Sezione 2 –Sezione con copertura di 200 metri (progressiva km ) nella Formazione pelitica BNA2.

Sezione 3 –Sezione con copertura di 400 metri (progressiva km 10+200) nella Formazione pelitica BNA2.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	52 di 141

### 8.2.1.3 Risultati delle analisi

I risultati delle analisi sono stati esaminati alla luce di due aspetti:

- confronto tra la resistenza a compressione monoassiale dell'ammasso  $\sigma_c$  e la pressione critica al fronte  $p_c = (3\sigma_o - 2\sigma_c) / (1 + 2K_p)$ , che individua il passaggio dal comportamento elastico a quello plastico,
  - sviluppo dei fenomeni deformativi e di plasticizzazione nella sezione al fronte e al contorno del cavo,
- prendendo a riferimento per la definizione della categoria di comportamento i seguenti due criteri:

$\sigma_c / p_c$	Classe di comportamento
$\geq 1,2$	A
$< 1,2$ e $\geq 0,8$	A/B
$< 0,8$ e $\geq 0,2$	B/C
$< 0,2$	C

**Tabella 12 - Criterio 1**

$u_F/R_{eq}$	$R_{plF}/R_{eq}$	Classe di comportamento
$\leq 0,5 \%$	$\leq 1,5$	B
$> 0,5 \%$	$> 1,5$	C
$u_F$ = convergenza al fronte $R_{plF}$ = raggio plastico al fronte $R_{eq}$ = raggio di scavo equivalente della galleria		

**Tabella 13 - Criterio 2**

Sulla base di queste valutazioni quantitative, unitamente all'analisi critica dei risultati ottenuti rispetto all'affidabilità dei dati di ingresso in termini di parametri di ammasso (rigidezza e resistenza) e condizioni idrauliche al contorno, in relazione ad eventuali variabilità attese lungo il tracciato della galleria e alle possibili conseguenze per comportamenti imprevisti, è stata definita la categoria di comportamento del fronte di scavo.

I risultati delle analisi sono riassunti nella tabella seguente; la rappresentazione delle curve caratteristiche è invece riportata integralmente in All. [1]



 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</b>	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA					
	GALLERIA ROCCHETTA Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	COMMESSA IF0G	LOTTO 01	CODIFICA D 07 RB	DOCUMENTO GN0300 001	REV. A

Sezione di calcolo	$\sigma_c$ [MPa]	$p_c$ [MPa]	$\sigma_c/p_c$ [-]	$u_F$ [m]	$u_F/R_{eq}$ [%]	$R_{PF}$ [m]	$R_{PF}/R_{eq}$ [-]	$u_\infty$ [m]	$R_p$ [m]	Categoria
Sez. 1	0,6	0,5389128	1,141356	>>	>>0,5	>>	>>1,5	>>	>>	C
Sez. 2	2,6	1,51563468	1,689415	0,036	0,56%	7,9	1,234375	0,09	10,64	B
Sez. 3	3,5	3,1245424	1,108675	0,028	0,44%	8,29	1,295313	0,073	11,61	B

$\sigma_c = (2c \cos \varphi) / (1 - \sin \varphi)$  = resistenza a compressione monoassiale dell'ammasso (parametri di picco)

$p_c = (3\sigma_o - 2\sigma_c) / (1 + 2K_p)$  = pressione critica al fronte (con  $K_p$  coefficiente di spinta passiva)

$u_F$  = convergenza al fronte (soluzione cavità sferica)

$R_{PF}$  = raggio plastico al fronte

$u_\infty$  = convergenza finale del cavo

$R_p$  = raggio plastico finale al contorno del cavo

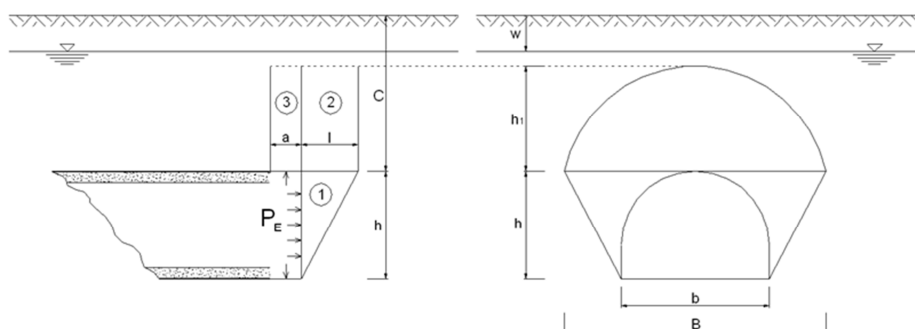
$R_{eq}$  = raggio di scavo equivalente della galleria (=6.40 m)

**Tabella 14 - Sezioni analizzate con il metodo delle curve caratteristiche: risultati delle analisi**

## 8.2.2 Analisi della stabilità del fronte

### 8.2.2.1 Metodi di analisi

Le analisi di stabilità del nucleo-fronte sono state condotte all'equilibrio limite con il metodo di Tamez (1984). Il metodo proposto da Tamez (Rif. [29]) è basato sull'ipotesi di risposta del fronte di scavo in condizioni drenate e pertanto il calcolo viene eseguito in tensioni efficaci. Si ipotizza che al fronte si formi un meccanismo di rottura approssimabile mediante solidi prismatici, come mostrato in Figura 46, e si valuta il coefficiente di sicurezza FSF rispetto a tale condizione di collasso, come rapporto tra i momenti delle forze resistenti e i momenti delle forze agenti.



**Figura 46 - Stabilità del fronte secondo il Metodo di Tamez (1984)**

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	54 di 141

Talvolta la stabilità del solo prisma 3 gravante sulla zona di galleria non ancora sostenuta dal rivestimento, può risultare più critica rispetto all'insieme dei tre prismi; è definito in tal senso un secondo coefficiente di sicurezza  $FS_3$ , per cui ai fini della stabilità del fronte si assume il coefficiente di sicurezza minimo tra i due.

$$FSF = \frac{(A + B + C)}{D}$$

$$A = \left[ \frac{2(\tau_{m2} - \tau_{m3})}{(1 + a/l)^2} + 2\tau_{m3} \right] \times \frac{h_1}{b}$$

$$B = \left[ \frac{2\tau_{m3}}{(1 + a/l) \times \sqrt{K_A}} \right] \times \frac{h_1}{h}$$

$$C = \left[ \frac{3.4C_1}{(1 + a/l)^2 \times \sqrt{K_A}} \right]$$

$$D = \left[ 1 + \frac{2h}{3Z(1 + a/l)^2} \right] \times (\gamma Z - P_E)$$

$$FS_3 = \frac{2\tau_{m3}}{(\gamma Z - P_E)} \times \frac{h_1}{b} \times \left( 1 + \frac{b}{a} \right)$$

Il fronte di scavo viene considerato stabile per valori di  $FSF > 1,5$ . Per valori di  $FSF$  superiori a 2, il sostegno del fronte può considerarsi non necessario.

### 8.2.2.2 Sezioni analizzate

Sulla base dei risultati della caratterizzazione geotecnica di cui al precedente paragrafo, e con particolare riferimento ai valori caratteristici definiti per i parametri geotecnici, in funzione delle condizioni idrauliche previste e della distribuzione delle diverse classi di copertura lungo il tracciato, sono state definite le sezioni di analisi riassunte in Tabella 15 con riferimento al metodo di Tamez.

Sez.	Progr.	C	Stratigrafia di calcolo	Parametri di calcolo		
			Formazione	$\gamma_k$	$c'_k$	$\varphi'_k$
[n.]	[km]	[m]	[-]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kPa]	[°]
I	10+200	23	BNA2	22	20	24

**Tabella 15 - Sezioni analizzate col metodo di Tamez per l'analisi di stabilità del fronte di scavo**

Nello specifico la sezione analizzata è relativa al tratto a bassa copertura prossimo all'imbocco lato Bari nella formazione BNA2

Tutte le analisi sono svolte con riferimento ad uno scavo di larghezza  $b$  pari a 13 m, altezza  $h$  pari a 10 m e lunghezza del tratto non sostenuto  $\alpha$  pari a 1 m.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	55 di 141

### 8.2.2.3 Risultati delle analisi

I risultati delle analisi sono stati esaminati in funzione dei valori dei coefficienti di sicurezza  $FSF$  e  $FS_3$  calcolati secondo quanto riportato nel paragrafo precedente. In particolare per la definizione della categoria di comportamento si è preso a riferimento il seguente criterio:

$FS = \min(FSF; FS_3)$	Classe di comportamento
$\geq 2$	A
$< 2$ e $\geq 1,5$	B
$< 1,5$	C

**Tabella 16 - Criterio per la definizione della categoria di comportamento**

Sulla base di queste valutazioni quantitative, unitamente all'analisi critica dei risultati ottenuti rispetto all'affidabilità dei dati di ingresso in termini di parametri del terreno (resistenza) e condizioni idrauliche al contorno, in relazione ad eventuali variabilità attese lungo il tracciato della galleria e alle possibili conseguenze per comportamenti imprevisti, è stata definita la categoria di comportamento del fronte di scavo da cui deriva l'individuazione degli eventuali interventi di precontenimento e contenimento necessari.

I risultati delle analisi sono riassunti nella tabella seguente:

<i>Sez.</i>	<i>FSF</i>	<i>FS<sub>3</sub></i>	<i>Categoria</i>
[n.]	[-]	[-]	[-]
<i>1</i>	0,49	1,96	"C"

**Tabella 17 - Sezioni analizzate col metodo di Tamez: risultati delle analisi**

### 8.2.3 Definizione delle tratte a comportamento tensio-deformativo omogeneo

Sulla base dei risultati delle analisi sopra descritte è possibile concludere che per l'intero tratto interessato dalla formazione arenacea sabbiosa BNA3 è atteso un comportamento del nucleo-fronte di scavo di categoria C (instabile). All'interno della formazione BNA2 è atteso invece un comportamento del nucleo-fronte allo scavo di categoria B (stabile a breve termine) ad eccezione delle tratte a ridotta copertura in prossimità dell'imbocco lato Bari in cui è atteso un comportamento del nucleo-fronte di scavo di categoria C (instabile).

Le previsioni di comportamento lungo il tracciato della galleria sono illustrate in forma sintetica nell'elaborato di progetto "Profilo geotecnico Galleria Rocchetta" (Rif. [17] ÷ Rif. [19]).

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	56 di 141

### 8.3 RISCHI POTENZIALI NELLA FASE DI REALIZZAZIONE DELLA GALLERIA

Di seguito si descrivono le principali criticità, legate al contesto geologico, idrogeologico e geotecnico, che potrebbero avere ripercussioni sulla fase realizzativa delle gallerie:

#### *Interferenze con corpi di frana*

La Galleria Rocchetta sottoattraversa aree con presenza di depositi franosi e con instabilità diffusa, in particolare tra le pk 10+220 e 10+300, tra le pk 10+660 e 11+030 e tra le pk 11+100 e 11+450. Tali depositi interessano la coltre superficiale per spessori compresi tra 5 e 10 metri, come riportato negli elaborati relativi allo studio geologico di progetto (Rif. [15]). Nei tratti di sottoattraversamento della zona sopra indicate le coperture della galleria risultano variabili tra 30 e 90 metri, pertanto lo scavo della galleria non interferisce con tali fenomeni.

#### *Venute d'acqua*

Il potenziale rischio di venute d'acqua in galleria in fase di scavo è stato definito in funzione dei principali caratteri idrogeologici delle formazioni di interesse. Tale rischio dipende dalla conducibilità idraulica dei materiali attraversati, dal carico idraulico e dall'eventuale presenza di zone con discontinuità. In particolare, tale rischio è presente con grado basso nell'Unità BNA3 e nell'Unità BNA2 solo nelle zone di bassa e media copertura in prossimità dell'imbocco lato Bari, a causa della transizione litologica con l'Unità BNA1b.

#### *Interferenza pozzi e sorgenti*

Lo studio dell'interferenza dello scavo delle gallerie di linea con le sorgenti ubicate nell'intorno del cavo è riportato nello Studio Idrogeologico (Rif. [15]), al quale si rimanda per i dettagli relativi ai metodi di calcolo ed ai risultati delle analisi. Sono stati censiti 181 tra pozzi e sorgenti ubicati in prossimità del tracciato; le sorgenti e i pozzi a maggior rischio di interferenza sono ubicate in corrispondenza del tratto iniziale della galleria Rocchetta lato Napoli, in corrispondenza dell'Unità BNA3.

#### *Instabilità del fronte*

Potenziali rischi di instabilità del fronte e del cavo possono interessare le tratte di galleria a basse coperture, che riguardano le zone di imbocco, quelle di attraversamento di zone di transizione litologica e la tratta scavata nel BNA3 sotto falda.

#### *Comportamento rigonfiante delle argille*

La formazione della Baronina nella facies BNA2 può presentare un comportamento rigonfiante per variazione dello stato tensionale lungo percorsi tensionali in scarico e in presenza di acqua.

#### *Fenomeni di subsidenza/interferenza con opere preesistenti*

In prossimità dell'imbocco lato Bari la galleria è caratterizzata da una copertura inferiore a 30m sino alla progressiva km 10+300 circa, ed in tale area sono presenti una serie di edifici potenzialmente interferenti con la realizzazione delle opere in progetto, ubicati fra le progressive km 10+150.00 e km 10+250.00 (Rif. [21]).

#### *Presenza di gas*

Le analisi per la determinazione del rischio gas sono state condotte per fasi di approfondimento successivo. Preliminarmente, è stata condotta un'analisi bibliografica e storica volta a verificare, in relazione alle differenti unità geologiche individuate e direttamente interessate dal progetto, l'eventuale presenza di termini geologici favorevoli alla presenza di gas. Hanno fornito elementi di giudizio orientativi per la valutazione:

- relazione geologica geotecnica e idrogeologica;

	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA												
GALLERIA ROCCHETTA Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IF0G</td> <td>01</td> <td>D 07 RB</td> <td>GN0300 001</td> <td>A</td> <td>57 di 141</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	57 di 141
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	57 di 141								

- carte geologiche, geomorfologiche ed idrogeologiche;
- planimetria generale con ubicazione dei sondaggi geognostici;
- sezioni geologiche con ubicazione dei sondaggi;
- campagna di monitoraggio effettuata durante l’esecuzione di alcuni sondaggi.

Successivamente sono state condotte indagini di approfondimento (Rif. [15]); in particolare, sono stati eseguiti:

- rilievi di gas a bocca foro durante la perforazione dei sondaggi;
- monitoraggio dell’aria realizzata mediante analizzatore di gas a bocca foro in corrispondenza delle verticali di sondaggio;
- analisi gascromatografica su campioni di acqua prelevati da piezometro.

Sulla base degli elementi di conoscenza, derivanti tra l'altro anche dalle considerazioni geologiche e strutturali e in considerazione della tecnologia di scavo utilizzata è possibile definire il seguente scenario: all'interno delle formazioni attraversate il potenziale metano può essere correlato a quello contenuto nella matrice della roccia con una fenomenologia emissiva legata alla mobilità del metano verosimilmente a bassa pressione in rocce a bassa permeabilità isotropa. Non si può escludere la possibile presenza di metano disciolto in acqua in grado di liberarsi in atmosfera in corrispondenza di venute di acqua dal massiccio, o lungo il percorso dell’acqua nel sottterraneo. Le emissioni di metano associate all’acqua possono essere caratterizzate da portate continue nel tempo.

	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	58 di 141

## 9 FASE DI TERAPIA

Nel presente capitolo sono definiti gli interventi necessari per garantire la stabilità del cavo a breve e a lungo termine, in accordo con le indicazioni provenienti dalla fase conoscitiva e dall'analisi del comportamento deformativo allo scavo (fase di diagnosi).

### 9.1 DEFINIZIONE DEL METODO DI SCAVO

Per la realizzazione della tratta in naturale della galleria si prevede l'adozione dello scavo meccanizzato, diversamente da quanto indicato nel Progetto Preliminare, che prevedeva scavo in tradizionale con avanzamenti a piena sezione. La scelta del metodo di scavo meccanizzato deriva dalle considerazioni di seguito esposte.

Nel Progetto Preliminare, che si sviluppava da Apice fino ad Orsara, il metodo di scavo delle gallerie era stato individuato anche in relazione ai lunghi tempi di realizzazione previsti per la costruzione della galleria di valico, denominata Galleria Irpinia, di lunghezza pari a circa 24 km. In tale ambito lo scavo in tradizionale della Galleria Rocchetta, di lunghezza pari a circa 6,5 km non avrebbe comportato elementi critici nel bilancio complessivo dei tempi previsti per il completamento della intera linea. Con la suddivisione del tracciato nei due lotti Apice - Hirpinia e Hirpinia - Orsara, la Galleria Rocchetta è l'opera in sotterraneo di maggiore estensione nel I lotto funzionale; di conseguenza i tempi di costruzione di tale galleria assumono rilevanza fondamentale per l'opera ferroviaria. Il metodo di scavo meccanizzato consente di realizzare maggiori produzioni, rispetto a quanto conseguibile con lo scavo tradizionale, consentendo il completamento della galleria di linea in tempi confrontabili con quelli previsti per le due gallerie Melito e Grottaminarda, realizzate in tradizionale.

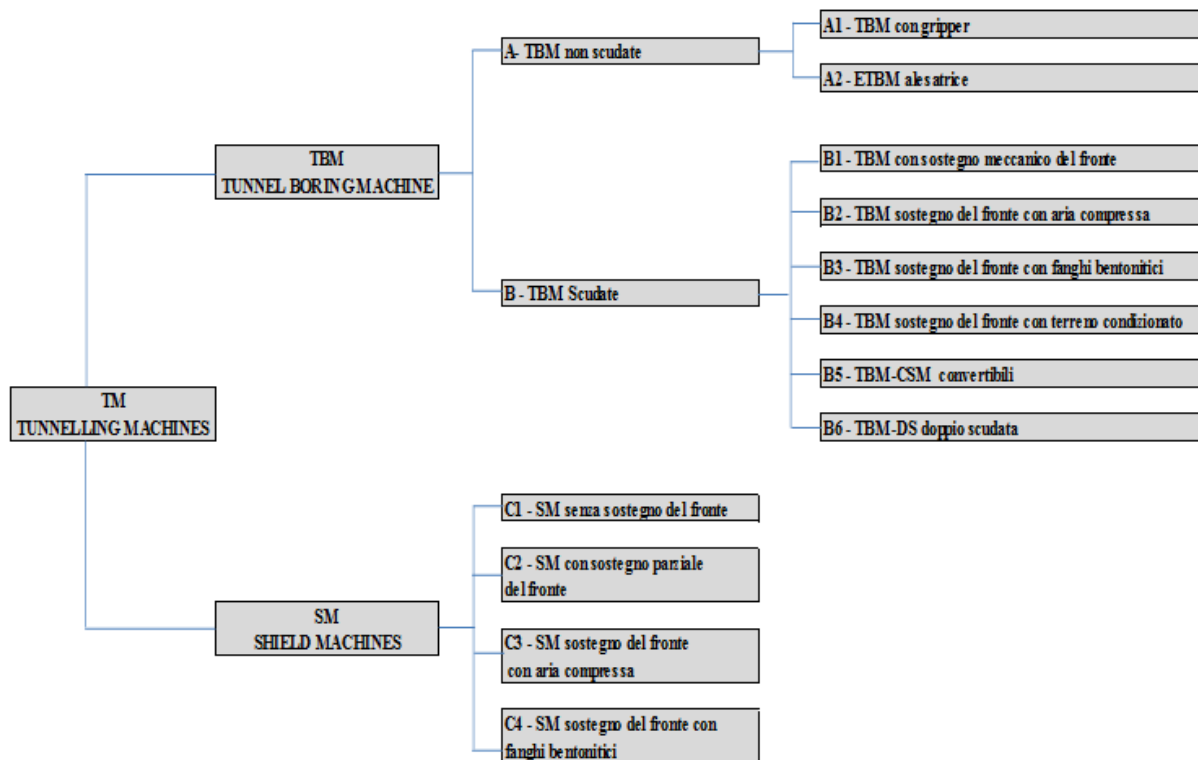
Inoltre, l'adozione della tecnologia dello scavo meccanizzato con fresa Tunnel Boring Machine (TBM) con la possibilità di applicare una pressione al fronte, consente il superamento di condizioni complesse dal punto di vista geologico e geomorfologico, presenti nelle tratte iniziali a partire dai due imbocchi, limitando sensibilmente i risentimenti indotti al contorno dalla realizzazione dell'opera in sotterraneo.

Procedendo dall'imbocco lato Napoli la galleria attraversa, sotto falda, sabbie ed arenarie appartenenti alla sabbie/arenarie dell'Unità BNA3: lo scavo con una TBM con fronte in pressione permette di bilanciare la pressione dell'acqua sul fronte di scavo, impedendo l'innescò di moti di filtrazione verso la galleria durante l'avanzamento. Inoltre l'installazione immediata all'interno dello scudo del rivestimento definitivo costituito da anelli in conci prefabbricati dotati di guarnizioni idrauliche a tenuta garantisce nel lungo termine una ridotta interferenza con la falda acquifera.

Nel tratto in prossimità dell'imbocco lato Bari, sono presenti aree interessate da movimenti gravitativi di superficie, definiti quiescenti (Rif. [15]), non interferiti dalla galleria di linea, che nel tratto in oggetto presenta coperture dell'ordine di 50 ÷ 70 m. In tale tratta la galleria attraversa le argille marnose dell'Unità BNA2. In questo contesto l'avanzamento con scavo meccanizzato con fronte in pressione consente di limitare l'evoluzione dei fenomeni deformativi al contorno dell'area di scavo, nelle zone di sottoattraversamento delle aree suddette, sia pure ad alte e medie coperture.

### 9.1.1 Scelta della tipologia di TBM

Nel seguente schema si riportano, sinteticamente, le varie tipologie delle Tunnelling Machines (TM) suddivise per famiglie tipologiche in relazione al campo d'impiego previsto (condizioni geologiche e caratteristiche geotecniche-geomeccaniche, condizioni progettuali).



Per la verifica del campo di utilizzo delle TBM è stato fatto riferimento alla correlazione tra le tipologie delle “Tunnelling Machines” con le classi di comportamento deformativo del fronte di scavo secondo il metodo ADECO-RS sintetizzato nella seguente tabella.

Tipologie di TM	Categorie tipo di comportamento del fronte		
	A (stabile)	B (stabile a breve termine)	C (instabile)
A1	X		
A2	X		
B1	X	X	
B2			X
B3			X
B4			X

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	60 di 141

B5		X	X
B6	X	X	
C1	X		
C2		X	
C3			X
C4			X

**Tabella 18 – Correlazione tra tipologie di TBM e categorie tipo di comportamento del front**

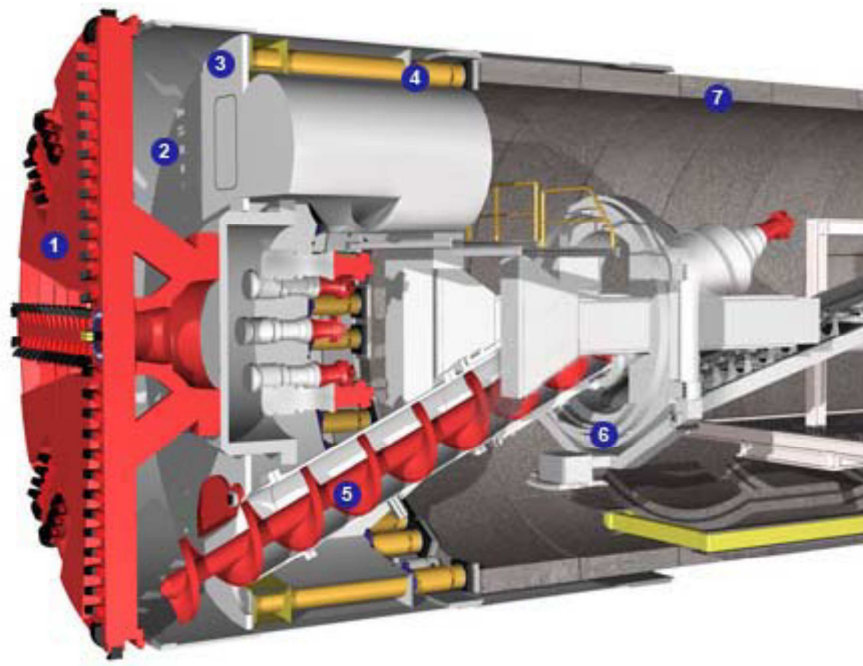
Per la galleria Rocchetta sono state valutate diverse tipologie di TBM, individuando quella ritenuta più valida in base alle fasi conoscitiva e di diagnosi, che hanno evidenziato una categoria di comportamento B/C per l'attraversamento delle formazioni della Baronina (BNA3, BNA2). La scelta si è orientata sull'impiego di TBM-EPB (Earth Balance Pressure) tipologia B4 (v. schema classificativo delle TM), monoscudata, che esercita una pressione attiva sul fronte, con contrasto sul rivestimento definitivo costituito da anelli in conci prefabbricati con guarnizioni perimetrali di tenuta idraulica (Figura 47).

Tale tipologia di macchina consente il superamento di condizioni critiche complesse dal punto di vista geologico e geomorfologico, presenti nelle tratte iniziali a partire dai due imbocchi, limitando sensibilmente i risentimenti indotti al contorno dalla realizzazione dell'opera in sotterraneo.

La macchina in ogni caso dovrà essere attrezzata per eseguire sia eventuali fori di prospezione in avanzamento, sia per effettuare eventuali drenaggi ed iniezioni di consolidamento dei terreni, per il superamento di eventuali zone con caratteristiche meccaniche scadenti, mediante fori predisposti sia sulla testa fresante, sia sul contorno superiore del mantello.

Considerata la possibilità di manifestazioni gassose (§ 8.3) per le formazioni oggetto di scavo, la macchina dovrà, inoltre, essere adeguatamente attrezzata. Per dettagli in merito agli apprestamenti previsti a riguardo, e per tutti gli altri aspetti specialistici relativi alla fresa si rimanda all'elaborato di progetto Specifiche Tecniche TBM (Rif. [37]).





**Figura 47 - Schema di una macchina TBM, tipo EPB (1. Testa Fresante; 2. Camera di scavo; 3. Parete dicontenimento dotata di sistema d'accesso (camera iperbarica) alla camera di scavo; 4. Pistoni di avanzamento; 5. Coclea; 6. Erettore dei conci; 7. Anelli di sostegno già posti in opera)**

### 9.1.2 Sezione in scavo meccanizzato

La sezione tipo di avanzamento in scavo meccanizzato fa riferimento ad una configurazione standard per comportamenti d'ammasso tipo B/C.

La sezione tipo ha le seguenti caratteristiche:

- raggio interno: 5,70 m
- diametro scavo: 12,80 m
- tipologia anello: universale
- numero conci: 8+1
- spessore conci: 0,5 m
- lunghezza conci: 1,50 m
- Rck: 45 MPa
- Guarnizioni in EPDM integrate su ciascun concio per garantire la tenuta idraulica tra i giunti (sia longitudinali che radiali) e precaricate dal serraggio dei bulloni e dai connettori.



**Figura 48– Conci prefabbricati con guarnizioni in neoprene a tenuta idraulica**



**Figura 49– Galleria realizzata con TBM**

Si è scelto di adottare un anello di tipo universale, che consente, mediante la semplice rotazione attorno al proprio asse di un anello rispetto al precedente, di sfalsare i giunti longitudinali e di seguire l'andamento plano-altimetrico del tracciato e di apportare le eventuali necessarie correzioni in corso d'opera, senza ricorrere ad elementi speciali.

I giunti dei conci sono dotati di smussi che rendono tali zone meno soggette a fratture e lesioni locali durante le fasi di movimentazione e montaggio, che facilitano inoltre la scasseratura dei conci stessi e consentono in fase di montaggio ed esercizio leggere rotazioni in corrispondenza dei giunti evitando il danneggiamento del concio stesso.

Per la connessione tra conci di anelli contigui è previsto l'assemblaggio mediante connettori longitudinali.

Per una rappresentazioni completa della sezione in scavo meccanizzato e del rivestimento in conci prefabbricati si rimanda agli specifici elaborati grafici e alla relazione Specifiche Tecniche TBM.

	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	63 di 141

## 9.2 AZIONI DI MITIGAZIONE DEI POTENZIALI RISCHI NELLA FASE DI REALIZZAZIONE DELLA GALLERIA

Di seguito si descrivono le principali criticità, legate al contesto geologico, idrogeologico e geotecnico, che potrebbero avere ripercussioni sulla fase realizzativa delle gallerie, e si illustrano le relative possibili azioni di mitigazione o riduzione del rischio. La mappatura dei diversi rischi individuati nella fase conoscitiva e la relativa gestione definita nella fase di terapia, sono illustrate in forma sintetica negli elaborati dei profili geotecnici (Rif. [17] ÷ Rif. [19]).

### *Interferenza con corpi di frana*

Nei tratti di sottoattraversamento della zona con presenza di depositi franosi ed aree ad instabilità diffusa, in particolare tra le pk 10+220 e 10+300, tra le pk 10+660 e 11+030 e tra le pk 11+100 e 11+450, le coperture della galleria risultano variabili tra 30 e 90 metri, pertanto lo scavo della galleria non interferisce con le coltri in frana. Ad ogni modo, l'avanzamento dello scavo avverrà con fronte in pressione.

### *Instabilità del fronte e del cavo*

Lo scavo meccanizzato mediante TBM – EPB, consente di limitare i rischi legati a fenomeni di instabilità del fronte e del cavo, per mezzo del contrasto esercitato dalla pressione attiva in camera di scavo, e dalla immediata messa in opera dell'anello di rivestimento definitivo in conci prefabbricati.

### *Venute d'acqua in galleria ed interferenza con le sorgenti*

Procedendo dall'imbocco lato Napoli la galleria attraversa, sotto falda, sabbie ed arenarie appartenenti alla formazione BNA3: lo scavo con una TBM con fronte in pressione permette di bilanciare la pressione dell'acqua sul fronte di scavo, impedendo l'innescò di moti di filtrazione verso la galleria durante l'avanzamento. Inoltre l'installazione immediata all'interno dello scudo del rivestimento definitivo costituito da anelli in conci prefabbricati dotati di guarnizioni idrauliche a tenuta garantisce nel lungo termine una ridotta interferenza con la falda acquifera.

### *Comportamento rigonfiante*

La configurazione della galleria Rocchetta, prevista in scavo meccanizzato con sezione circolare in conci prefabbricati, è tale da poter assorbire eventuali incrementi di sollecitazione derivanti da potenziali fenomeni di rigonfiamento.

### *Fenomeni di subsidenza/interferenza con opere preesistenti*

Le analisi condotte (Rif. [21]) hanno evidenziato che gli edifici analizzati ricadono in categoria di danno a cui corrispondono effetti trascurabili.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA					
	GALLERIA ROCCHETTA Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	COMMESSA IF0G	LOTTO 01	CODIFICA D 07 RB	DOCUMENTO GN0300 001	REV. A

### 9.3 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI STRUTTURALI

Si riportano di seguito le principali caratteristiche dei materiali impiegati nelle opere in progetto, con l'indicazione dei valori di resistenza e deformabilità adottati nelle verifiche, nel rispetto delle indicazioni del DM 14/01/2008 e della Circolare n.617/2009 (Rif. [20]).

Con riferimento ai rivestimenti in calcestruzzo, si sottolinea che la classe di resistenza riportata nelle tabelle che seguono è quella utilizzata ai fini della modellazione numerica e delle verifiche strutturali. Per la completa e puntuale definizione delle caratteristiche dei materiali previsti per la realizzazione dell'opera si rimanda all'elaborato dedicato (Rif. [35]).

#### Rivestimenti definitivi in conci prefabbricati

<b>Calcestruzzo armato</b>	
Classe di resistenza di calcolo	C 35/45
Resistenza di progetto a compressione a 28 giorni	$f_{cd} = 0,85 f_{ck}/1,5 = 19,83 \text{ MPa}$
Modulo elastico a 28 giorni	$E_{cm} = 22000 (f_{cm}/10)^{0,3} = 34077 \text{ MPa}$
Tensione massima di compressione in esercizio (RFI DTC SI MA IFS 001 A)	$\sigma_c = 0,55 f_{ck} = 19,25 \text{ MPa}$ combinazione caratteristica (rara) $\sigma_c = 0,40 f_{ck} = 14,00 \text{ MPa}$ combinazione quasi permanente
Tensione massima in condizioni di esercizio (NTC 2008.)	$\sigma_c = 0,6 f_{ck} = 21,00 \text{ MPa}$ combinazione caratteristica (rara) $\sigma_c = 0,45 f_{ck} = 15,75 \text{ MPa}$ combinazione quasi permanente

**Acciaio per barre di armatura**

Tipo	<i>B450C</i>
Tensione caratteristica di rottura	$f_{tk} \geq 540 \text{ MPa}$
Tensione caratteristica di snervamento	$f_{yk} \geq 450 \text{ MPa}$
Resistenza di progetto	$f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s = 391,3 \text{ MPa}$
Tensione massima di compressione in esercizio (RFI DTC SI MA IFS 001 A.	$\sigma_{lim} = 0,75 f_{yk} = 337,5 \text{ MPa}$
Tensione massima in condizioni di esercizio (NTC 2008.	$\sigma_{lim} = 0,80 f_{yk} = 360 \text{ MPa}$

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	66 di 141

## 9.4 ANALISI E VERIFICA DELLE SEZIONI TIPO

Le soluzioni progettuali descritte nel capitolo precedente sono state analizzate per verificarne adeguatezza ed efficacia, con riferimento al modello geotecnico illustrato nel capitolo 7.5 e nel rispetto delle indicazioni della normativa vigente (Rif. [20]).

### 9.4.1 Criteri di verifica

Le analisi di stabilità del fronte di scavo sono state condotte secondo il metodo di Anagnostou & Kovari (Anagnostou et al., 1994)

Le analisi di interazione, in grado di simulare il comportamento del sistema opera-terreno fino alla configurazione finale ed in condizioni di esercizio, sono state condotte mediante modelli numerici agli elementi finiti e attraverso il metodo delle curve caratteristiche.

Per ciascuna sezione tipo oggetto di verifica, le sezioni di analisi sono state definite individuando le condizioni (stratigrafiche e di copertura) più gravose nell'ambito della relativa tratta di applicazione come sezione prevalente.

#### 9.4.1.1 Stabilità del fronte e del cavo

Le analisi di stabilità del fronte e del cavo sono mirate alla valutazione dello sviluppo di possibili meccanismi di collasso, con o senza propagazione verso la superficie, o di deformazioni e spostamenti elevati al contorno ed in superficie. Trattandosi di una verifica per uno stato limite ultimo di tipo GEO, si è utilizzato l'Approccio 1- Combinazione 2 (A2+M2+R2), con R2 =1.

Le analisi sono state eseguite con il metodo di Anagnostou & Kovari determinando attraverso la seguente formula generale la pressione di sostegno necessaria al fronte:

$$s' = F_0 \cdot \gamma' \cdot D - F_1 \cdot c + F_2 \cdot \gamma' \cdot \Delta h - F_3 \cdot c \cdot \frac{\Delta h}{D}$$

dove:

- $\gamma'$  è il peso di volume del terreno alleggerito;
- $c$  è la coesione del terreno in termini di tensioni efficaci;
- $\Delta h = h_0 - h_F$  con  $h_0$  carico piezometrico nel terreno e  $h_F$  carico piezometrico nella camera di scavo;
- $D$  è il diametro della galleria;
- $H$  è la copertura nella sezione analizzata
- $F_0, F_1, F_2, F_3$  sono dei coefficienti adimensionali che dipendono dall'angolo di resistenza al taglio (figura sotto).

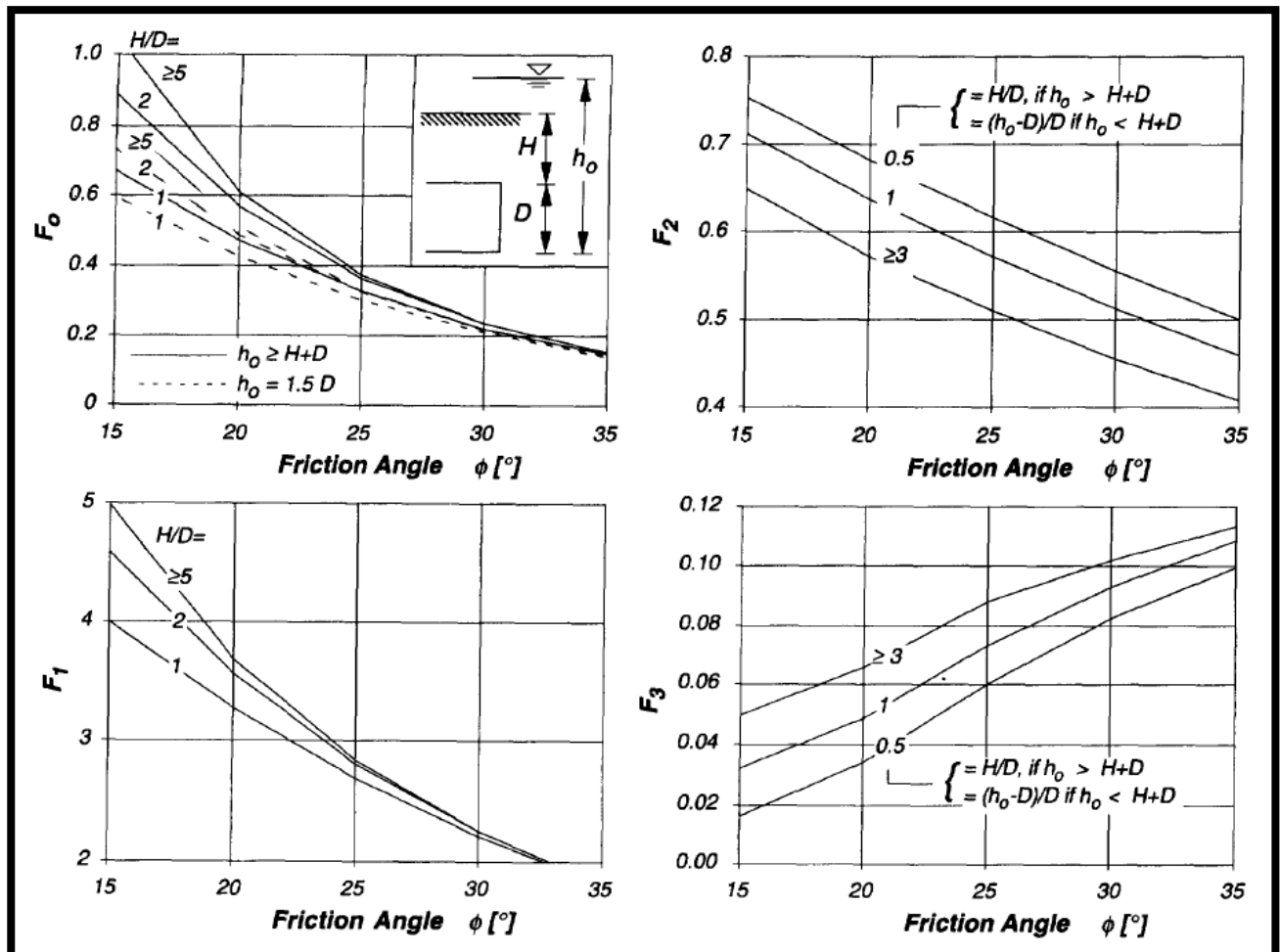


Figura 50 Valori dei coefficienti  $F_0$ ,  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  in funzione dell'angolo di resistenza al taglio.

I risultati delle analisi sono stati esaminati in funzione del valore della suddetta pressione di sostegno valutandone la compatibilità con i valori di pressione al fronte garantiti dalla TBM.

#### 9.4.1.2 Interazione opera-terreno

Le analisi sono mirate alla previsione del comportamento deformativo al contorno dello scavo e dei carichi attesi sui rivestimenti definitivi, e, nel caso delle gallerie superficiali, alla valutazione degli effetti indotti al piano campagna. Le analisi consentono, pertanto, di verificare:

- stati limite ultimi relativi al raggiungimento delle resistenze degli elementi strutturali del rivestimento definitivo (stato limite ultimo di tipo STR);
- stati limite di esercizio SLE per il rivestimento definitivo.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	68 di 141

Per le verifiche di stati limite ultimi STR, le analisi di interazione opera – terreno sono state condotte con i valori caratteristici delle azioni e dei parametri geotecnici, applicando i coefficienti parziali all’effetto delle azioni, adottando l’Approccio 1- Combinazione 1, con  $R1 = 1$ . Pertanto, con la combinazione dei carichi fondamentale si è proceduto secondo questo schema:

- verifiche SLU rivestimento definitivo:  $\gamma_E = 1,3$  applicato alle caratteristiche delle sollecitazioni N, M, T.

Per la verifica degli stati limite di esercizio (SLE) del rivestimento definitivo in calcestruzzo armato, le analisi numeriche sono state condotte con i valori caratteristici delle azioni e dei parametri geotecnici, adottando le pertinenti combinazioni dei carichi per la verifica di fessurazione e la verifica delle tensioni di esercizio, secondo quanto previsto dal DM 14/01/2008 e Circolare n.617 (Rif. [20]).

Le analisi di interazione opera-terreno sono state condotte mediante modelli numerici agli elementi finiti con il codice di calcolo PLAXIS 2D 2017.

Il modello di calcolo è bidimensionale ed è riferito a condizioni di deformazione piana. Lo scavo della galleria viene simulato rilasciando in modo uniforme un sistema di forze equivalenti applicate sul contorno del profilo di scavo, tenendo conto della variazione del tasso di confinamento in funzione della distanza della sezione di calcolo dal fronte; in questo modo il problema tridimensionale dello scavo della galleria viene ricondotto ad un problema piano, con la possibilità di valutare le azioni sulle strutture di rivestimento al progredire degli avanzamenti.

Nello specifico, per la definizione delle percentuali di rilascio delle forze di scavo al variare della distanza dal fronte di scavo, sono state utilizzate le curve di deconfinamento costruite in base ad analisi assialsimmetriche dedicate.

Il terreno viene modellato come un mezzo continuo elastico lineare perfettamente plastico con criterio di resistenza di Mohr-Coulomb.

Le strutture di rivestimento definitivo della galleria vengono simulate con elementi di volume assegnando un legame costitutivo elastico-lineare. Per ottenere le sollecitazioni su quest’ultimi sono introdotti nel modello degli elementi beam in linea d’asse ai rivestimenti definitivi caratterizzati da rigidità molto bassa (modulo elastico degli elementi diviso per un fattore di scala  $F=106$ ). A causa della loro bassa rigidità essi si deformano come il rivestimento definitivo senza interferire con il campo di sforzi e deformazioni agente all’interno dell’elemento di volume del rivestimento. Le sollecitazioni in output devono poi essere moltiplicate per lo stesso fattore di scala  $F$  per ottenere le sollecitazioni di verifica strutturale.

Per gallerie superficiali, oltre ad una modellazione completa in cui sono simulate in successione tutte le fasi esecutive (con le opportune percentuali di rilascio delle forze di scavo), ai fini delle verifiche strutturali la verifica del rivestimento definitivo viene condotta con una modellazione semplificata in termini di fasi, assegnando l’intero carico litostatico al rivestimento, senza alcun preventivo rilascio delle forze di scavo.

Per la sola sezione a p.k. 10+190 le verifiche sono state condotte anche nei confronti dell’azione sismica. La valutazione della condizione sismica è stata effettuata attraverso un’analisi pseudostatica secondo il metodo proposto da Bilotta et Al. (Rif. [34]). Le verifiche sismiche condotte per la suddetta sezione si considerano rappresentative per le tratte a bassa copertura in scavo meccanizzato.

Le verifiche di seguito riportate mostrano la necessità di un avanzamento in TBM con fronte in pressione (circa 200KPa) nell’attraversamento della formazione BNA3 e nel tratto a basse coperture prossimo all’imbocco lato bari all’interno della formazione BNA2. Ad ogni modo si prevede l’avanzamento con fronte



in pressione anche nel tratto in prossimità dell'imbocco lato Bari interessato a piano campagna da aree con presenza di depositi franosi ed aree ad instabilità diffusa (fino a p.k. 10+600.00 circa) comunque non interferite dallo scavo della galleria.

## 9.5 SEZIONE MECCANIZZATO P.K. 10+190

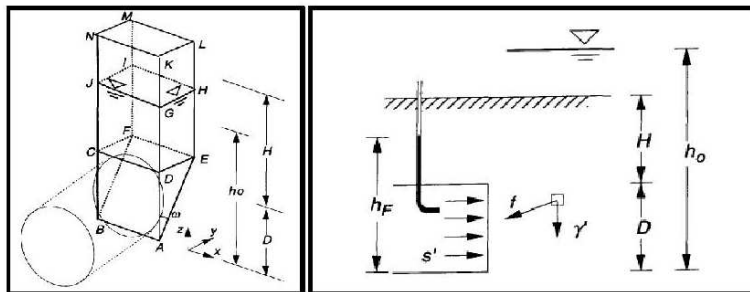
Le analisi e le verifiche riportate di seguito sono relative al tratto a basse coperture prossimo all'imbocco lato Bari in cui la galleria attraversa la formazione BNA2.

### 9.5.1 Stabilità del fronte e del cavo

Nelle tabella seguenti si riassumono i dati di input e i risultati dell'analisi di stabilità del fronte della sezione in esame condotta con il metodo di Anagnostou e Kovari.

L'analisi evidenzia che, anche con l'applicazione dei coefficienti parziali corrispondenti alla combinazione A2+M2+R2 e quindi con i valori di progetto, la pressione di sostegno necessaria per la stabilità del fronte di scavo è compatibile con i valori garantiti dalla TBM.

#### Metodo di Anagnostou & Kovari (Anagnostou et al., 1994)



#### Ipotesi:

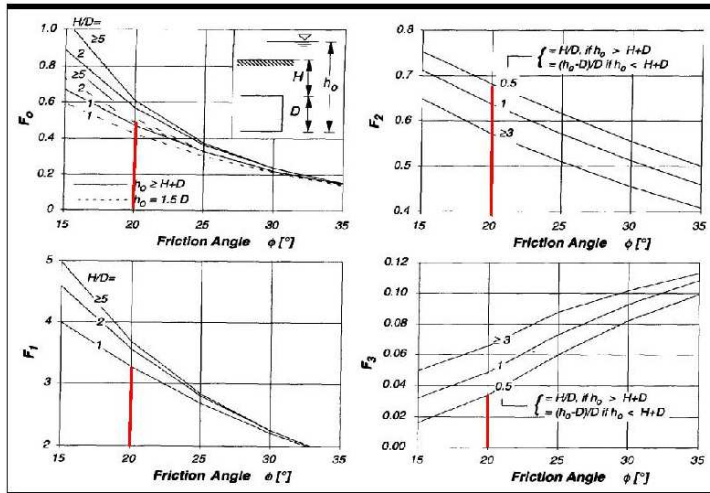
- 1) Terreni caratterizzati da criterio di rottura di Mohr-Coulomb
- 2) Presenza di falda
- 3) Condizioni drenate
- 4) Scavo con scudi a contropressione di fango o terra (EPB)
- 5) Metodo utilizzato per terreni prevalentemente sabbiosi (in terreni di bassa permeabilità, le condizioni drenate possono essere raggiunte durante l'interruzione dello scavo)
- 6) Tensioni efficaci
- 7) Distribuzione delle pressioni interstiziali di tipo idrostatico

$$S' = F_0 \gamma' D - F_1 c' + F_2 \gamma' \Delta h - F_3 c' \frac{\Delta h}{D}$$

Input	
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	22
$\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	10
$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	12
D (m)	12,8
c' (kPa)	20
$\phi'$ (°)	24
$h_0$ (m)	17,8
$h_r$ (m)	0

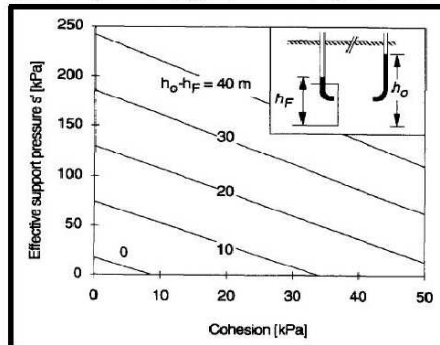


A2+M2	
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	22
$\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	10
$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	12
D (m)	12,8
c' (kPa)	16
$\phi'$ (°)	19,6
$h_0$ (m)	17,8
$h_r$ (m)	0



H (m)	23
D(m)	12.8
H/D	1.80
phi' (°)	19.6
H+D (m)	35.8
1.5*D (m)	19.2
curva	FALSO
F0	0.5
H/D	1.80
phi' (°)	19.6
F1	3.6
H (m)	23
D(m)	12.8
H+D (m)	35.8
phi' (°)	19.6
curva	0.39
F2	0.7
H (m)	23
D(m)	12.8
H+D (m)	35.8
phi' (°)	19.6
curva	0.39
F3	0.28

NB Il valore della pressione di sostegno  $s'$  è legata alla variazione di pressione  $\Delta h$  e alla coesione  $c'$ .  
Si nota dal diagramma che  $h_1=h_0$  ( $\Delta h=0$ ) è sufficiente per garantire la stabilità del fronte in terreni con  $c' \geq 10$  kPa



Output s' (kPa) 152.5

Tabella 19 - Analisi di stabilità del fronte Sez. p.k. 10+190: dati di input e risultati dell'analisi

### 9.5.2 Interazione opera-terreno

Nella tabella seguente si riassumono i dati di input che caratterizzano la sezione geotecnica utilizzata per le analisi numeriche corrispondenti alla zona di ridotta copertura.

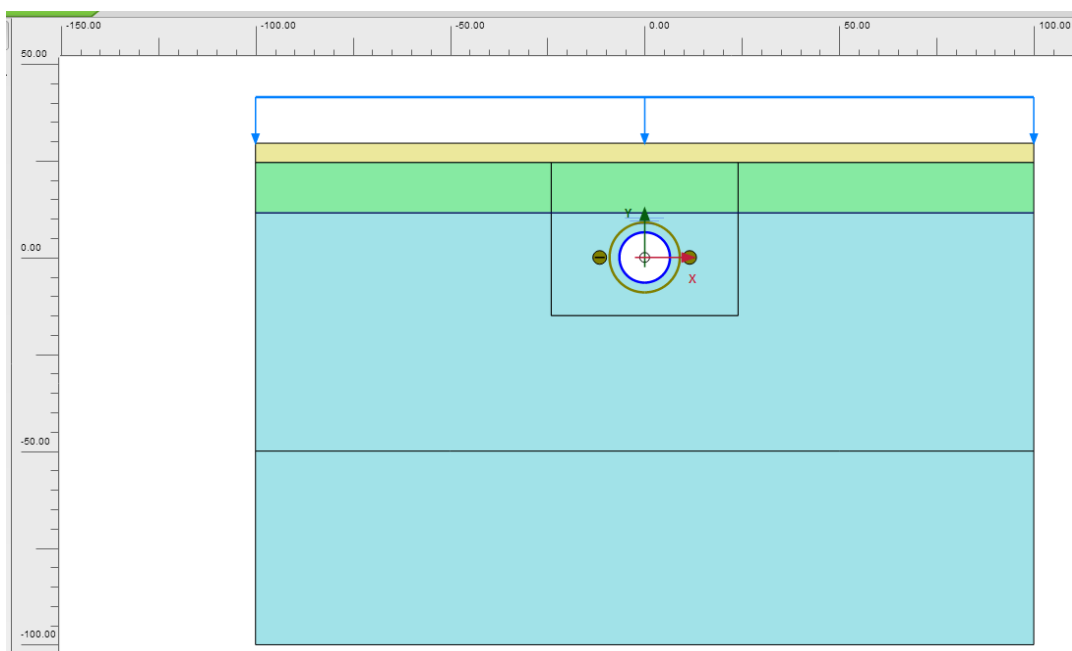
La presenza della falda è stata simulata nell'analisi alla quota indicata in tabella (5m al di sopra della chiave di calotta dello scavo).

Stratigrafia di calcolo		C	Falda	$\gamma$	$c'_k$	$\phi'_k$	$c_{uK}$	E'	$k_0$
Formazione	Profondità da p.c.								
[-]	[m]	[m]	[m da p.c.]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kPa]	[°]	[kPa]	[MPa]	[-]
Coltre	0 ÷ 5.0	23	18	22	0	21	-	15	0.7
BNA1b	5.0 ÷ 18.0			20	10	22	-	50	0.7
BNA2	>18.0			22	20	24	-	175	0.7

C = copertura (rispetto alla calotta)

$\gamma$  = peso per unità di volume  
 $c'_K$  = coesione drenata  
 $\phi'_K$  = angolo di attrito interno  
 $c_{uK}$  = coesione non drenata  
 $E'$  = modulo elastico drenato  
 $K_o$  = coefficiente di spinta a riposo

**Tabella 20 - Analisi di interazione Sez. p.k. 10+190: definizione della stratigrafia di calcolo**



**Figura 51 - Modello di calcolo - Geometria mesh**

La pressione al fronte è stata valutata attraverso la formulazione di Anagnostou e Kovari (1994), e tenuta in conto per la definizione degli scarichi tensionali alle distanze di osservazione di riferimento dal fronte di scavo.

Per gallerie scavate con una TBM tipo EPB, in presenza di moti di filtrazione verso il fronte di scavo, la pressione di stabilizzazione del fronte può essere determinata utilizzando la relazione proposta da Anagnostou e Kovari (1996), che fa riferimento al meccanismo di rottura indicato in figura seguente (trascurando i moti di filtrazione):

$$S' = F_0 \cdot \gamma \cdot D - F_1 \cdot c' + F_2 \cdot \gamma \cdot \Delta h - F_3 \cdot c \cdot \Delta h / D$$

in cui:

$S'$  = pressione efficace al fronte

$$\Delta h = h_0 - h_f$$

$h_0$  = carico idraulico, riferito alla quota dell'arco rovescio, in assenza dello scavo;

$h_f$  = carico idraulico al fronte, riferito alla quota dell'arco rovescio;

$F_0 \rightarrow F_3$  = coefficienti adimensionali che dipendono dall'angolo di attrito ( $\phi$ ), dalla copertura  $H$ , dal diametro della galleria ( $D$ ) e da  $h_0$ , (vedi diagrammi riportati nelle figure seguenti).

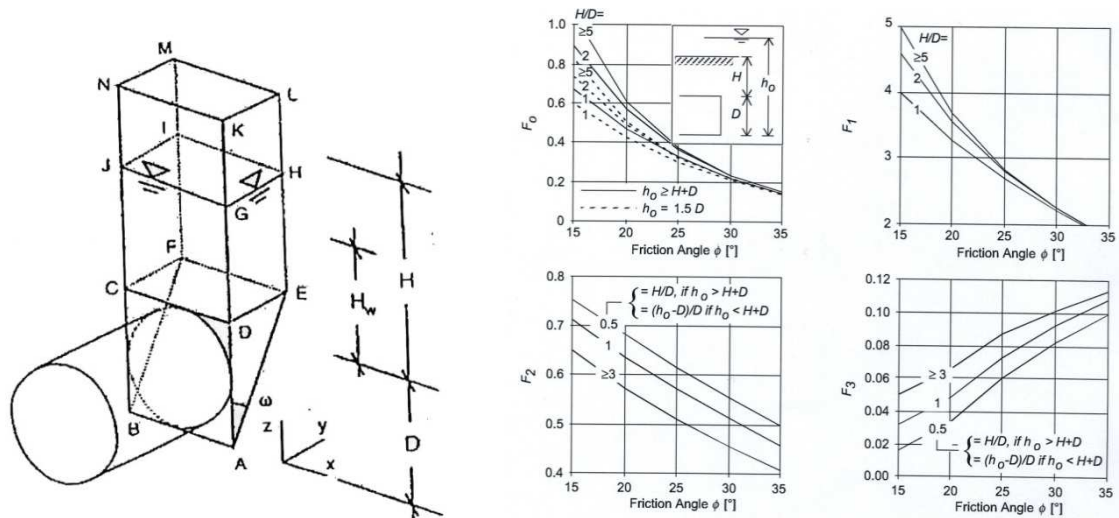


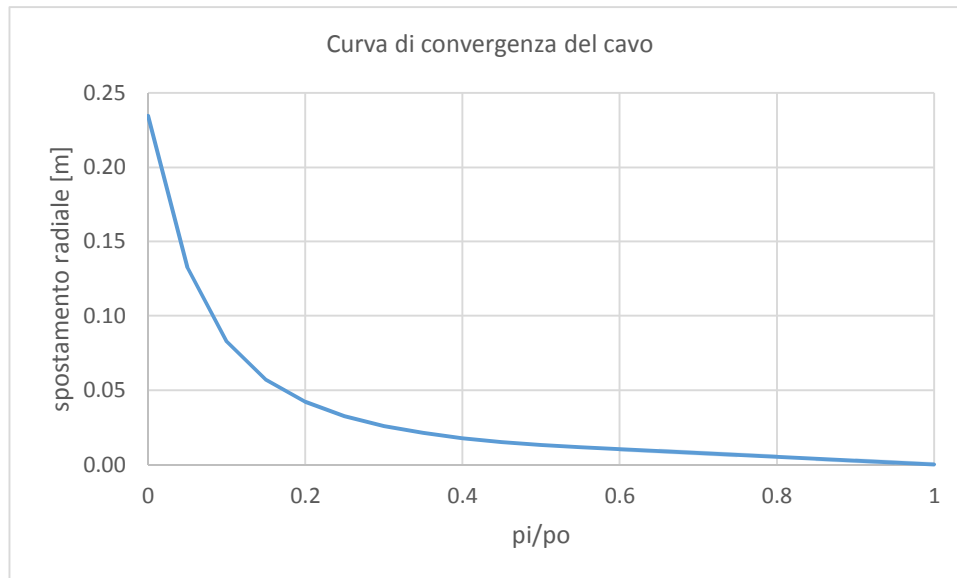
Figura 52 - Schema del metodo di Anagnostou e Kovari [1996] e abachi per la scelta dei coefficienti

Il valore della pressione di contrasto per garantire la stabilità del fronte è pari a 180 kPa.

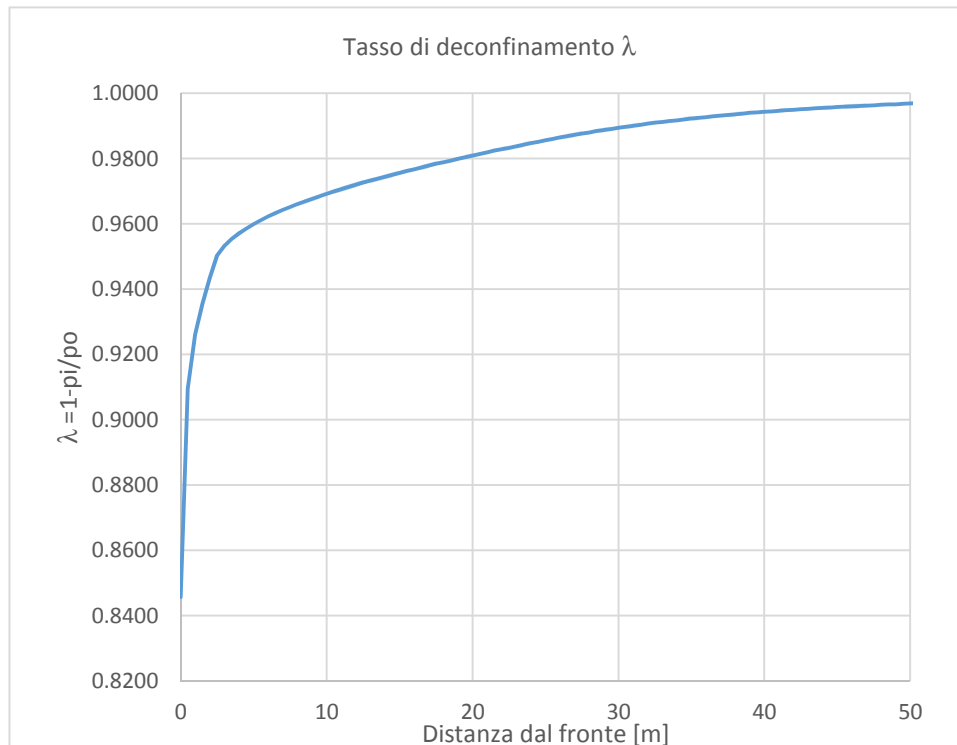
Con riferimento all'asse della galleria, la griglia di calcolo presenta un'estensione laterale di 100 m (per una larghezza totale di 200 m) e un'altezza complessiva di 129.5 m. Il numero complessivo degli elementi è pari a circa 3178 mentre i nodi sono circa 25869.

### 9.5.3 Fasi e percentuali di rilascio

I tassi di deconfinamento sono stati calcolati mediante analisi assialsimmetrica e curva caratteristica analitica (come indicato nella figura soprastante con riferimento alla fase di scavo al fronte). I coefficienti di scarico sono calcolati a partire da tali valori e scontando la pressione al fronte ed al contorno dello scudo, conservativamente considerata costante lungo questo.



**Figura 53 - Sez. Scavo Meccanizzato copertura 23m– Curva caratteristica e di convergenza**



**Figura 54 - Sez. Scavo Meccanizzato copertura 23m – Calcolo percentuale di rilascio  $\lambda_F$ - al fronte**

Nella tabella successiva è schematizzata la successione delle fasi di calcolo nelle quali è articolata l'analisi di interazione opera-terreno.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	74 di 141

Fase	Descrizione	Rilascio forze scavo ( $\lambda$ ) (con pressione / senza pressione TBM)
0-1	Inizializzazione stato tensionale geostatico	0,00
2	Rilascio a cavo libero in corrispondenza del fronte ed attivazione sovraccarico in superficie (23 kPa)	0,467 (0.84)
3	Rilascio a cavo libero in corrispondenza della distanza di 6m dal fronte	0.589 (0.962)
4	Rilascio a cavo libero in corrispondenza della distanza di 10m dal fronte (lunghezza minima TBM)	0.596 (0.97)
5	Attivazione rivestimento definitivo spessore 50cm e condizione di lungo termine	1,00
6	Attivazione rivestimento definitivo spessore 50cm e condizione di lungo termine a partire dalla fase 1 (senza scarichi tensionali)	1,00
5 bis	Attivazione spostamenti al contorno del modello a simulare la condizione sismica a partire dalla fase 5	1,00
6 bis	Attivazione spostamenti al contorno del modello a simulare la condizione sismica a partire dalla fase 6	1,00

**Tabella 21 - Analisi di interazione – Sez. Scavo Meccanizzato copertura 23m: fasi di calcolo**

#### 9.5.4 Sismicità dell'area e definizione della modalità di simulazione del carico sismico

Per la galleria naturale si definisce una vita nominale  $V_N$  pari a 75 anni e una classe d'uso III a cui corrisponde il coefficiente  $C_u$  pari a 1.5 (§ 2.4.2, DM 14/01/2008). Di conseguenza il periodo di riferimento per la definizione dell'azione sismica risulta pari a  $V_R = V_N \cdot C_u = 112.5$  anni.

Con riferimento alla probabilità di superamento dell'azione sismica,  $P_{VR}$ , attribuita allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (SLV), nel periodo  $V_R$  dell'opera in progetto, si determina il periodo di ritorno  $T_R$  del sisma di progetto. Sulla base delle coordinate geografiche del sito e del tempo di ritorno del sisma di progetto,  $T_R$ , sopra definito, si ricavano i parametri che caratterizzano il sisma di progetto relativo al sito di riferimento, rigido ed orizzontale (Tabella 1 dell'allegato B del D.M. 14/01/2008):

- $a_g$ : accelerazione orizzontale massima
- $F_o$ : valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale
- $T^*_C$ : periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Per le opere provvisorie di imbocco il periodo di ritorno si determina con l'espressione:

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	75 di 141

$$T_R = -\frac{V_R}{\ln(1 - P_{V_R})}$$

Per tenere conto dei fattori locali del sito, l'accelerazione orizzontale massima attesa al sito è valutata con la relazione (DM 14/01/2008):

$$a_{\max} = S_s \cdot S_T \cdot \left( \frac{a_g}{g} \right)$$

dove:

- $a_g$  è l'accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido.
- $S_s$  è il fattore di amplificazione stratigrafica del terreno, funzione della categoria del sottosuolo di fondazione e dei parametri sismici  $F_0$  e  $a_g/g$  (Tabella 3.2.V del D.M. 14/01/2008);
- $S_T$  è il fattore di amplificazione che tiene conto delle condizioni topografiche, il cui valore dipende dalla categoria topografica e dall'ubicazione dell'opera (Tabella 3.2.VI del D.M. 14/01/2008).

I valori delle grandezze necessarie per la definizione dell'azione sismica per le opere d'imbocco sono riassunti nella seguente tabella per le opere di breve termine che per quelle definitive:

Coord. geografiche	41.136231°N 14.929026°E
Stato limite	SLV
$T_R$	1068
$a_g/g$	0.380
$F_0$	2.297
Categoria sottosuolo	C
$S_s$	1.176
Categoria topografica	T1
$S_T$	1

 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</b>	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	76 di 141

$a_{\max}/g$	0.447
--------------	-------

**Tabella 22 - Parametri per la definizione dell'azione sismica di progetto.**

La valutazione della condizione sismica è stata effettuata attraverso un'analisi pseudostatica (Bilotta et Al.).

La deformazione tangenziale massima del terreno alla profondità  $z$  viene calcolata con l'espressione, ricavata dall'equilibrio dinamico di una colonna di terreno:

$$\tau_{\max}(z) = r_d(z) \frac{a_{\max,s}}{g} \sigma_v(z)$$

dove:

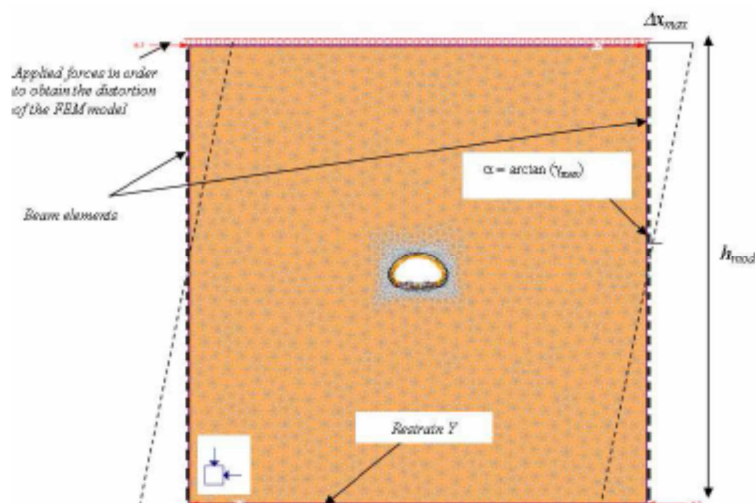
- $\sigma_v$  è la tensione verticale totale;
- $r_d$  è un fattore di riduzione che tiene conto della deformabilità della colonna di terreno. Questo coefficiente può essere considerato una funzione della profondità  $z$  e può essere ricavato da espressioni presenti in letteratura, come ad esempio quelle fornite da Iwasaki *et al.* (1978):

$$r_d = 1 - 0.015z$$

La deformazione tangenziale massima del terreno alla profondità  $z$  viene calcolata dividendo la tensione massima,  $\tau_{\max}(z)$ , per la rigidezza a taglio,  $G(z)$ , alla stessa profondità:

$$\gamma_{\max}(z) = \frac{\tau_{\max}(z)}{G(z)}$$

dalla quale è possibile ricavare la deformazione di taglio da applicare al modello in funzione dell'altezza dello stesso.





 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	77 di 141

**Figura 55 - Schema di deformazione a taglio di un modello numerico (Pescara et Al., 2011)**

Con riferimento all'indagine C18 DH, i valori di VSH riferito agli spessori dei singoli strati individuati dall'interpretazione della prova Down-Hole e valore di VS riferito alla profondità cumulata (depth) sono riportati nella tabella seguente.

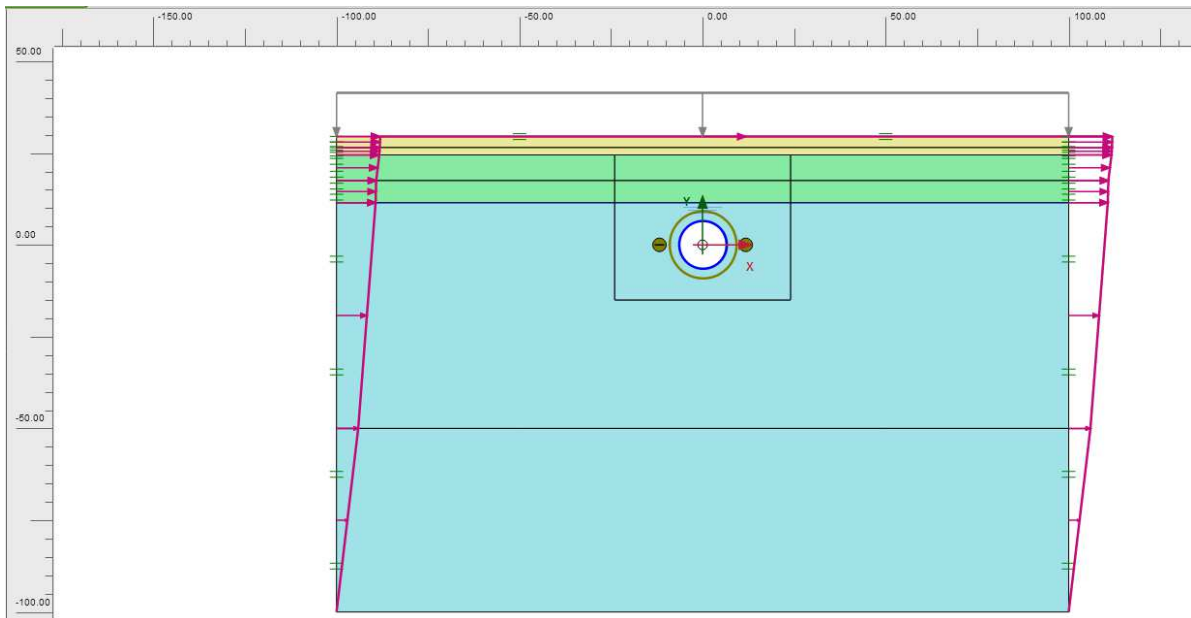
Spessore [m]	VSH [m/s]	Go [kN/m <sup>2</sup> ]
3.0	142	3.60E+04
9.0	163	4.88E+04
18.0	424	3.48E+05

**Tabella 23 - Parametri di dell'area in esame**

Applicando le formulazioni precedentemente citate, i valori di spostamento sono riportati nella tabella seguente.

strato	z tetto	z letto	z medio	rd	sv	Go	$\tau_{max}$	$\gamma_{max}$	spost locale laterale	Spostamento applicato	Spostamento applicato
[-]	[m]	[m]	[m]	[-]	[kPa]	[MPa]	[kPa]	[-]	[m]	letto [m]	tetto [m]
1	0	3	1.5	0.96	33	36	14.1	0.00039	0.00117	0.13696	0.13814
2	3	5	4	0.93	88	49	36.4	0.00075	0.00149	0.13547	0.13696
3	5	12	8.5	0.82	187	49	68.5	0.0014	0.00983	0.12564	0.13547
4	12	18	15	0.73	330	348	107.7	0.00031	0.00186	0.12379	0.12564
5	18	79.5	48.75	0.65	1073	348	311.5	0.0009	0.05506	0.06873	0.12379
6	79.5	117.5	98.5	0.65	2167	348	629.5	0.00181	0.06873	0.00000	0.06873

**Tabella 24 - Definizione dell'azione sismica nel modello.**



**Figura 56 - Schema di applicazione dei carichi nel modello numerico**

### 9.5.5 *Esame dei risultati*

L'analisi si articola in sette successive fasi di calcolo, che permettono di descrivere i differenti interventi costruttivi e di schematizzare le differenti condizioni di carico per i rivestimenti. Le fasi, descritte al paragrafo precedente, sono illustrate in tabella.

Lo stesso allegato illustra, per ciascuna fase, le componenti verticale e orizzontale degli spostamenti totali cumulati, i vettori degli spostamenti totali, i punti al contorno del cavo dove si hanno plasticizzazioni e l'orientamento delle direzioni principali efficaci.

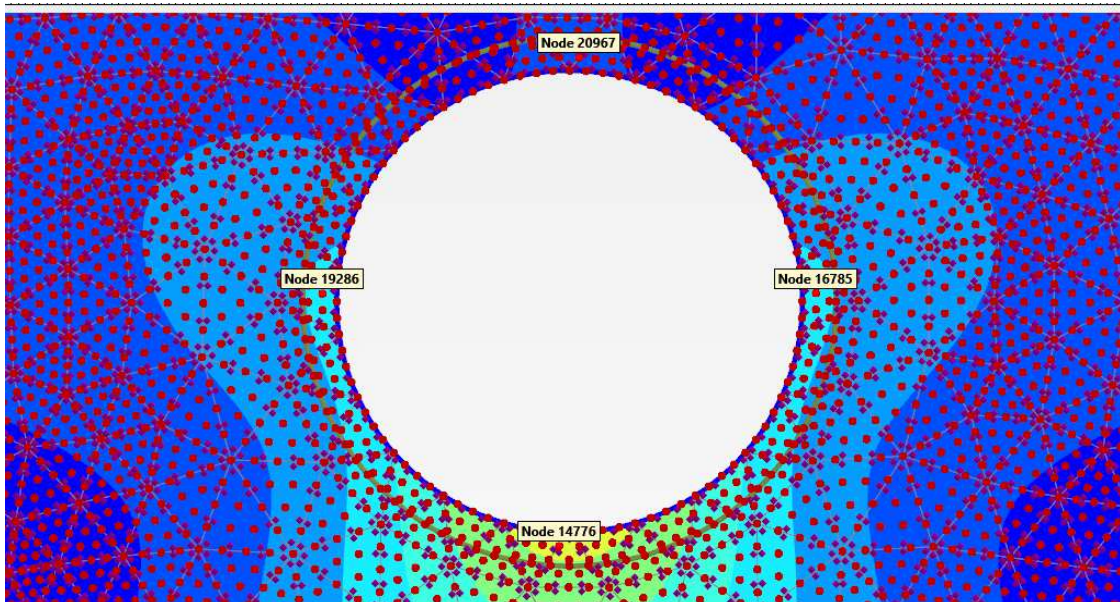
La Tabella 25 riporta, per ogni fase di calcolo, i risultati principali in termini di quadro deformativo e tensionale e di localizzazione delle plasticizzazioni nella zona del cavo, distinguendo tra la zona di calotta, dei piedritti e dell'arco rovescio.

La [Figura 57](#) consente di visualizzare la posizione dei nodi di chiave calotta, dei piedritti e dell'arco rovescio cui si riferiscono i dati riportati nella tabella.

Fase	Piedritto (19286stat/19330sism)			Calotta (20967stat/20897 sism)			Piedritto (16785stat/16153sism)			Arco rovescio (14776stat/13836sism)			Fascia plasticizzata
	u  [cm]	$\sigma_1$ [kPa]	$\sigma_3$ [kPa]	u  [cm]	$\sigma_1$ [kPa]	$\sigma_3$ [kPa]	u  [cm]	$\sigma_1$ [kPa]	$\sigma_3$ [kPa]	u  [cm]	$\sigma_1$ [kPa]	$\sigma_3$ [kPa]	
2	1.11	-681.5	-323.9	2.93	-417.0	-286.8	1.12	-638.0	-307.8	1.14	-684.2	-510.1	Plasticizzazione ai piedritti sp. 2m
3	2.21	-563.5	-274.1	4.83	-368.1	-232.5	2.22	-530.1	-262.3	1.64	-683.8	-438.6	Plasticizzazione ai piedritti sp. 4m con tendenza sviluppo alle reni
4	2.30	-557.2	-271.5	4.99	-364.1	-229.0	2.31	-523.5	-259.6	1.68	-682.2	-433.9	Plasticizzazione ai piedritti sp. 4m con tendenza sviluppo alle reni
5	1.93	-585.3	-308.6	4.70	-333.0	-223.2	1.94	-565.2	-295.3	2.51	-601.2	-332.8	Modesta fascia in arco rovescio
6	0.63	-729.3	-526.0	0.23	-445.7	-272.3	0.63	-761.1	-541.4	1.24	-559.2	-515.3	Punti isolati
5 bis (sisma)	10.48	-531.9	-273.6	9.59	-342.8	-209.8	6.80	-535.4	-277.3	8.86	-538.0	-312.4	Plasticizzazioni che seguono l'andamento a 45° della deformazione applicata
6 bis (sisma)	8.31	-750.3	-531.2	9.03	-438.8	-274.8	9.24	-744.7	-533.9	8.49	-573.8	-504.4	Punti isolati

*u| = spostamento totale cumulativo (positivo se abbassamento, negativo se sollevamento)*  
 $\sigma_1$  = sforzo principale totale massimo  
 $\sigma_3$  = sforzo principale totale minimo

**Tabella 25 - Analisi di interazione – Sez. Scavo Meccanizzato copertura 23m: risultati dell'analisi**



**Figura 57 - Nodi rilevati nella zona del cavo**

#### *FASE 2*

Viene simulato il rilascio a cavo libero in corrispondenza del fronte di scavo. Gli spostamenti al contorno del cavo risultano circa omogenei, con valori di circa 1.1-1.2cm. Le zone plastiche sono localizzate ai piedritti, con estensione di circa 2m che vanno a chiudersi su reni ed arco rovescio. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 684 kPa (arco rovescio) mentre la massima tensione principale minima è di 286 kPa (calotta).

#### *FASE 3*

Viene simulata l'esecuzione dell'avanzamento a 6 m di distanza dal fronte. Il cedimento cumulado in calotta è pari a 4.83 cm, lo spostamento cumulado ai piedritti raggiunge 2.22 cm, mentre il sollevamento cumulado in arco rovescio è di 1.64 cm. Le zone plastiche rispetto al caso precedente subiscono un'estensione laterale (4m di spessore) e tendenza allo sviluppo verticale in corrispondenza delle reni. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 683 kPa (arco rovescio) mentre la massima tensione principale minima è di 232 kPa (calotta).

#### *FASE 4*

Viene simulata l'esecuzione dell'avanzamento a 10 m di distanza dal fronte. Il cedimento cumulado in calotta è pari a 4.99 cm, lo spostamento cumulado ai piedritti raggiunge 2.31 cm, mentre il sollevamento cumulado in arco rovescio è di 1.68 cm. Le zone plastiche rispetto al caso precedente subiscono una leggera estensione, mantenendo la forma della fase precedente. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 683 kPa (arco rovescio) mentre la massima tensione principale minima è di 229 kPa (calotta).

#### *FASE 5*

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA</p>												
<p>GALLERIA ROCCHETTA Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IF0G</td> <td>01</td> <td>D 07 RB</td> <td>GN0300 001</td> <td>A</td> <td>81 di 141</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	81 di 141
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	81 di 141								

Viene simulata l'installazione del rivestimento definitivo in conci prefabbricati, associato allo scarico totale. Il cedimento cumulato in calotta è pari a 4.70 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 1.02 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 1.94 cm. Le zone plastiche sono localizzate lungo una mezzaluna in arco rovescio, di spessore modesto. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 601 kPa (arco rovescio) mentre la massima tensione principale minima è di 223 kPa (calotta).

#### *FASE 6*

Viene simulata l'installazione del rivestimento definitivo con sostituzione del terreno immediatamente a partire dalle fasi di inizializzazione. In tale modo il rivestimento è gravato dall'intero carico del terreno. Il cedimento cumulato in calotta raggiunge 0.23 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 0.63 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio diventa pari a 1.24 cm. Le zone plastiche non variano sostanzialmente rispetto alla fase precedente. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 760 kPa (piedritti) mentre la massima tensione principale minima è di 272 kPa (calotta).

#### *FASE 5 bis sismica*

Viene simulata la condizione sismica a partire dalla fase 5. Lo spostamento in calotta è pari a 9.6cm, mentre ai piedritti risulta variabile fra 10.5 monte e 6.8 valle, mentre in a.r. lo spostamento è pari a circa 9cm. Tali componenti sono prevalentemente si spostamento orizzontale Le zona plastiche seguono l'andamento a 45° della deformazione applicata: in corrispondenza del rene destro (a ore 2) l'ampiezza di tale zona risulta pari a circa 5m, mentre alla diagonale opposta (ore 7-8) lo spessore è pari a circa 4m ma l'astensione al contorno è maggiore. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 538 kPa (arco rovescio) mentre la massima tensione principale minima è di 209 kPa (calotta).

#### *FASE 6 bis sismica*

Viene simulata la condizione sismica a partire dalla fase 6. Lo spostamento in calotta è pari a 8.3cm, mentre ai piedritti risulta pari a circa 9cm, mentre in a.r. lo spostamento è pari a circa 8.5cm. Tali componenti sono prevalentemente si spostamento orizzontale Le zona plastiche presentano solamente punti singolari a rene lato sinistro. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 750 kPa (piedritti) mentre la massima tensione principale minima è di 274 kPa (calotta).

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	82 di 141

### 9.5.6 Verifiche strutturali SLU del rivestimento definitivo

Nella tabella seguente si riportano le caratteristiche simulate dei rivestimenti definitivi.

Tipo di prerivestimento	Rivestimento definitivo				
Spessore simulato del rivestimento definitivo in conci prefabbricati [m]	0.50				
<p>Nel modello numerico il rivestimento è stato modellato mediante elementi "beam", tenendo in considerazione che i conci sono discontinui e sfalsati. Nello specifico, considerando la fascia risultante dall'accostamento di una coppia di anelli consecutivi con posizionamento sfalsato dei giunti, la sezione di verifica a pressoflessione conserva la rigidità assiale di entrambi gli anelli e la rigidità flessionale di uno solo di essi.</p> <p>L'area della coppia di anelli è data da:</p> <p><math>A' = (2 \cdot 1.5) \cdot 0.5 = 1.5 \text{ m}^2</math></p> <p>L'inerzia del singolo anello è espressa da:</p> <p><math>J' = (1/12) \cdot 1.5 \cdot 0.5^4 = 0.015625 \text{ m}^4</math></p> <p>Pertanto nel calcolo, riferito a metro di rivestimento, si ha:</p> <p><math>A = A' / (2 \cdot L) = 1.5 / (2 \cdot 1.5) = 0.5 \text{ m}^2/\text{m}</math></p> <p><math>J = J' / (2 \cdot L) = 1.5 / (2 \cdot 1.5) = 0.005208 \text{ m}^4/\text{m}</math></p> <p>La tabella successiva sintetizza i parametri caratteristici del rivestimento considerato nell'analisi.</p>					
Struttura	$\gamma$	E	$\nu$	EA	EJ
	[kN/m <sup>3</sup> ]	[MPa]	[-]	[kN/m]	[kNm <sup>2</sup> /m]
CONCI PREFABBRICATI	25	34000	0.2	17000000	177072
<p><math>\gamma</math> = volume weight  E = elastic modulus  <math>\nu</math> = Poisson's ratio  EA = axial stiffness  EJ = bending stiffness</p>					

**Tabella 26 - Analisi di interazione – Sez. Scavo Meccanizzato copertura 23m: definizione delle caratteristiche dei rivestimenti**

La verifica strutturale del rivestimento definitivo prevede il confronto tra le sollecitazioni di calcolo, ottenute a partire dai risultati del modello numerico applicando i relativi coefficienti parziali, e le resistenze di calcolo definite dai punti  $M_{Rd}$ ,  $N_{Rd}$  che individuano il dominio resistente nel piano M, N. In ragione della presenza dei giunti (che non dovranno essere accoppiati fra anelli consecutivi), le verifiche sono condotte sulla base di una sezione resistente costituita da due conci affiancati con armatura di un solo concio (considerando, quindi, la presenza del giunto per l'anello adiacente). La verifica a taglio si basa sul contributo del solo anello senza giunto.

La lunghezza di riferimento del concio è pari a 1.50m, da cui le seguenti sezioni di verifica:

- Pressoflessione: 300 x 50cm;
- Taglio: 150 x 50cm.

Per la verifica a taglio, il valore resistente di calcolo è ottenuto in accordo con la normativa vigente (DM 14/01/2008 par.4.1.2.1.3. e Circolare n.617/2009).

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	83 di 141

Il rivestimento definitivo è previsto armato realizzato in conci prefabbricati di spessore 0.50m con la seguente armatura:

- Copriferro 4.0cm
- Armatura longitudinale:  $\phi 12/15$ cm;
- Armatura trasversale:  $\phi 14/15$ cm;
- Armatura a taglio staffe  $\phi 12$  a due bracci passo 15cm
- Armatura perimetrale: 2 ferri  $\phi 10$ .

L'incidenza delle armature è di circa 100kg di acciaio per m<sup>3</sup>.

Le tabelle seguenti sintetizzano le sollecitazioni ottenute, per ogni fase, nelle zone di maggiore interesse del rivestimento: zona di calotta, di contatto calotta-piedritti e piedritti-arco rovescio, dei piedritti e di arco rovescio, rilevate in corrispondenza dei nodi delle figura a seguire.

	Sollecitazioni	Calotta	Piedritto		Arco rovescio
			sinistro	destro	
<b>Fase 5</b>	N [kN/m]	-1491	-1959	-1959	-1962
	M [kNm/m]	30	-40	-40	21
	T [kN/m]	0	-4	4	0
<b>Fase 6</b>	N [kN/m]	-2913	-3805	-3805	-3429
	M [kNm/m]	91	-90	-90	85
	T [kN/m]	0	-1	1	-1
<b>Fase 5bis sismica</b>	N [kN/m]	-1436	-1864	-1821	-1953
	M [kNm/m]	11	-33	-33	-1
	T [kN/m]	11	-17	-8	19
<b>Fase 6bis sismica</b>	N [kN/m]	-2861	-3731	-3703	-3367
	M [kNm/m]	83	-77	-89	79
	T [kN/m]	12	-13	-11	16

**Tabella 27 - Analisi di interazione – Sez. Scavo Meccanizzato copertura 23m: Sollecitazioni nel rivestimento definitivo**

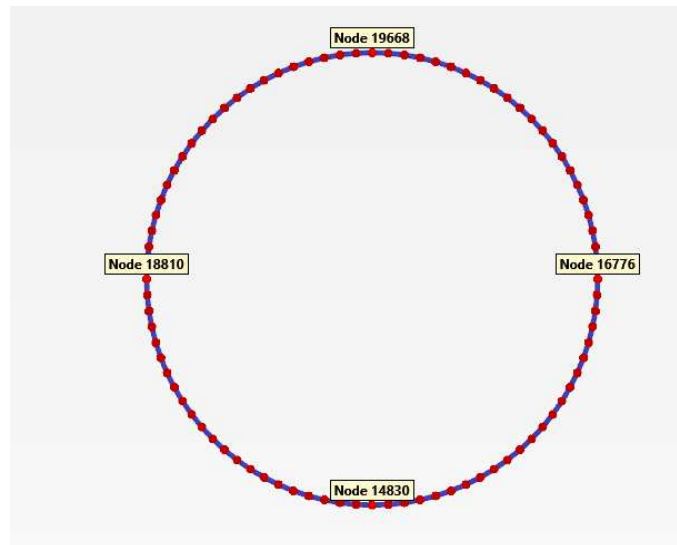


Figura 58 - Sez. Scavo Meccanizzato copertura 23m. Nodi rilevati del rivestimento definitivo

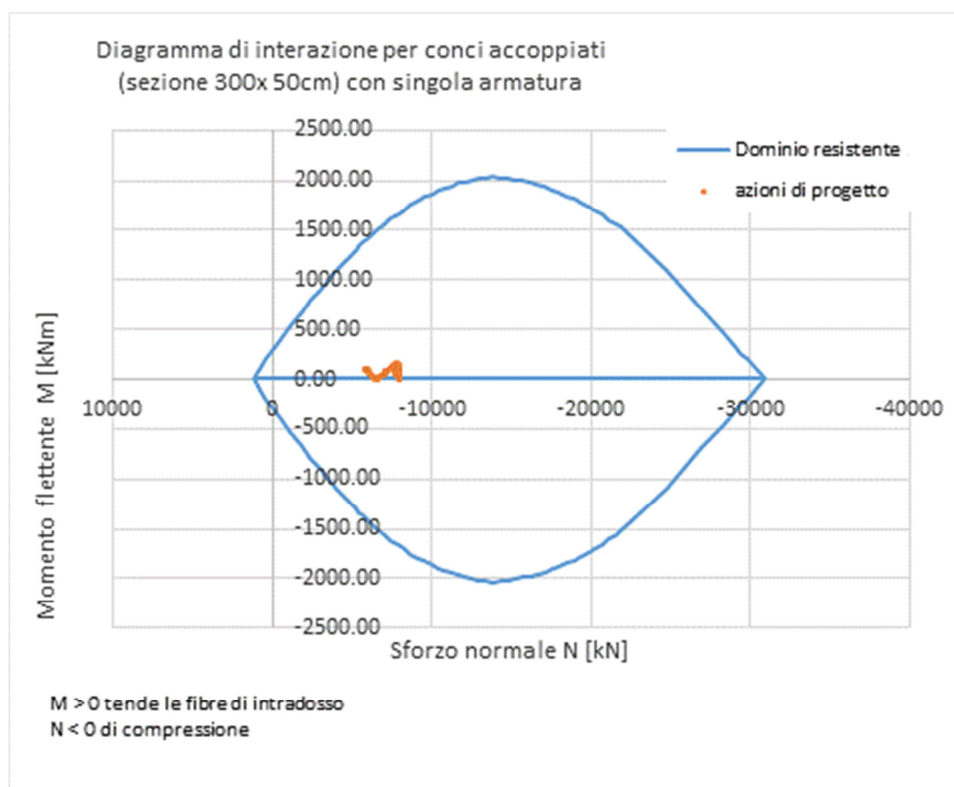


Figura 59 - Dominio resistente SLU calotta (B=3.00 m, H=0.50 m) – Fase 5



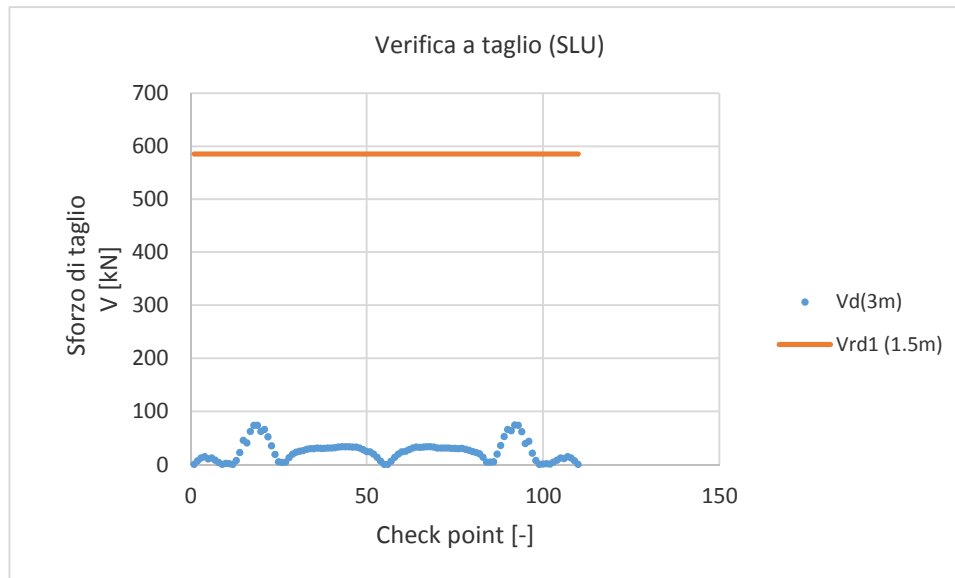


Figura 60 - Verifica SLU taglio (B=1.50 m, H=0.50 m) – Fase 5

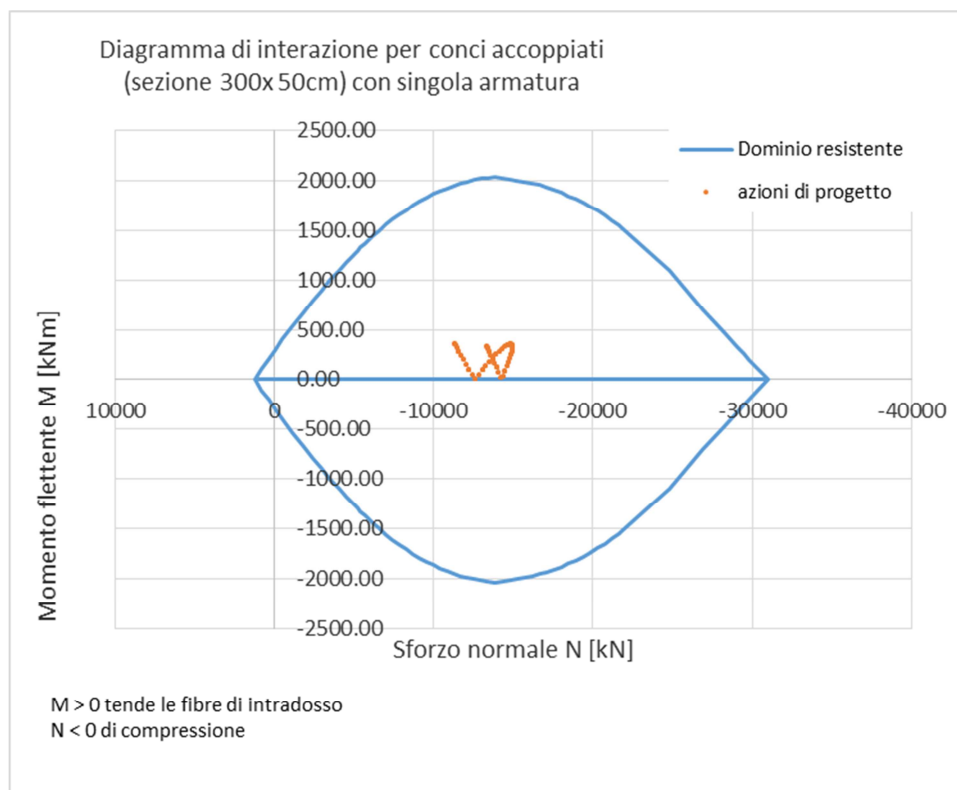
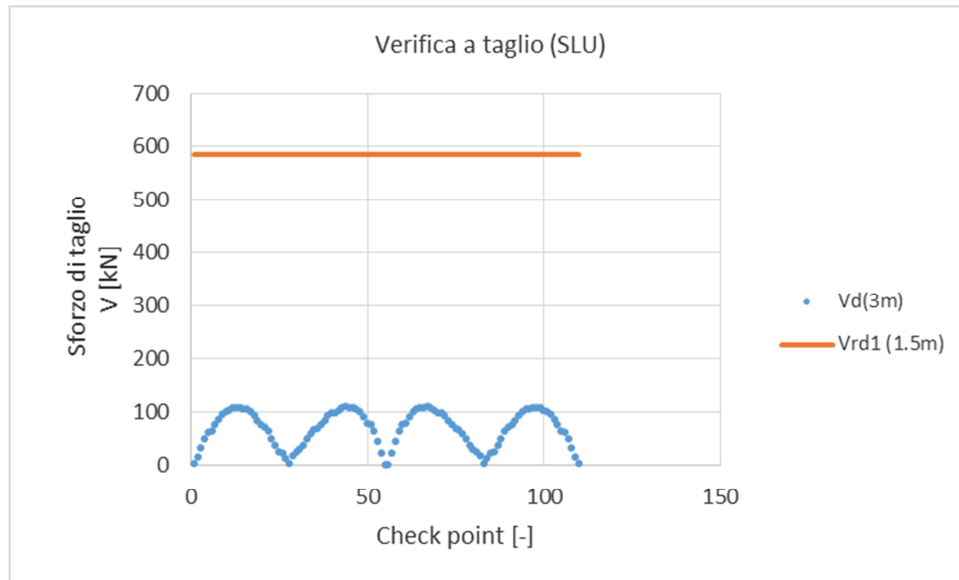
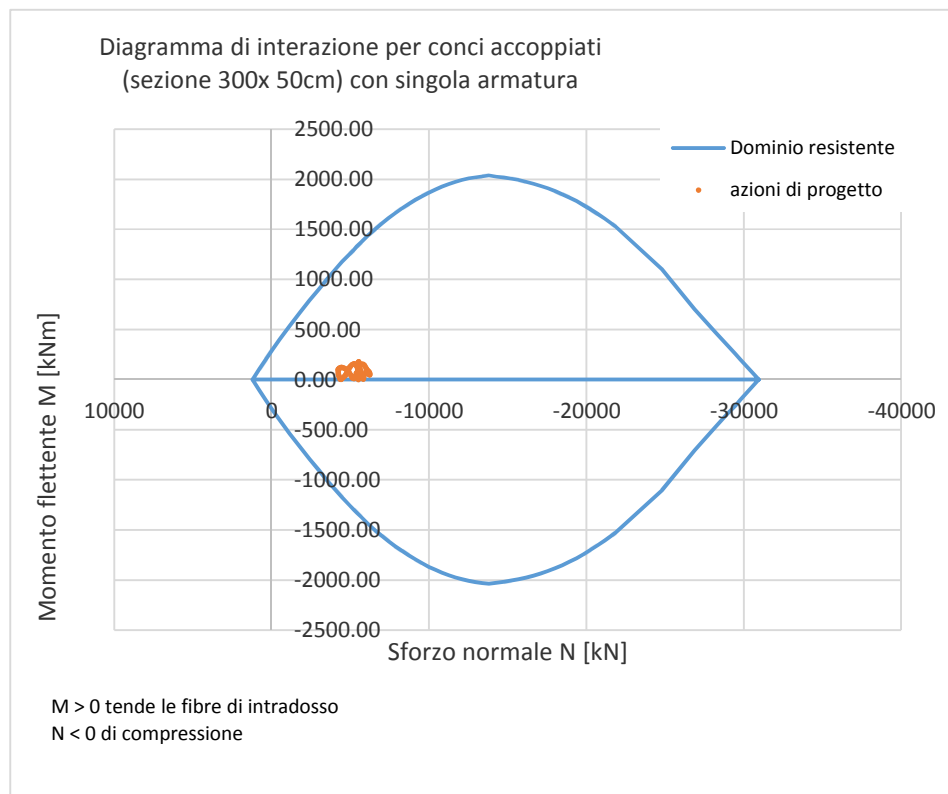


Figura 61 - Dominio resistente SLU (B=3.00 m, H=0.50 m) – Fase 6

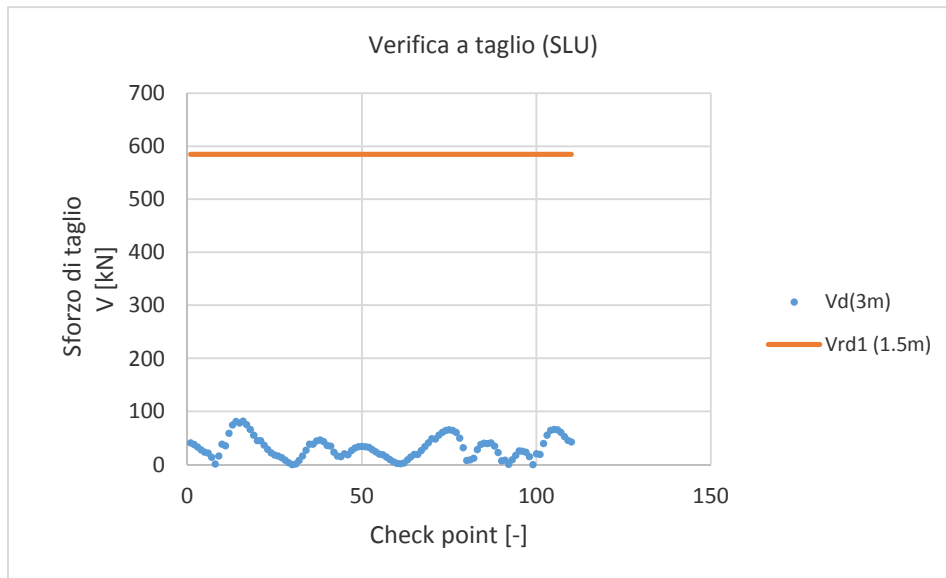


**Figura 62 - Verifica SLU taglio (B=1.50 m, H=0.50 m) – Fase 6**

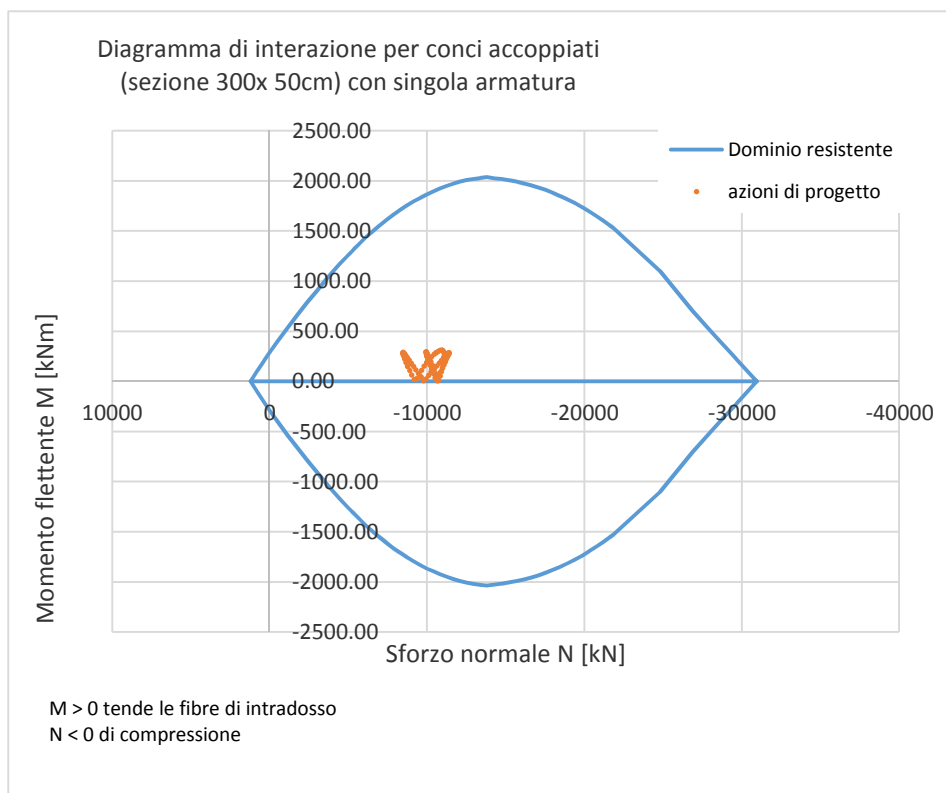
Per le condizioni simiche, le verifiche sono sotto riportate.



**Figura 63 - Dominio resistente SLU (B=3.00 m, H=0.50 m) – Fase 5bis sismica**



**Figura 64 - Verifica SLU taglio (B=1.50 m, H=0.50 m) – Fase 5bis sismica**



**Figura 65 - Dominio resistente SLU (B=3.00 m, H=0.50 m) – Fase 6bis sismica**

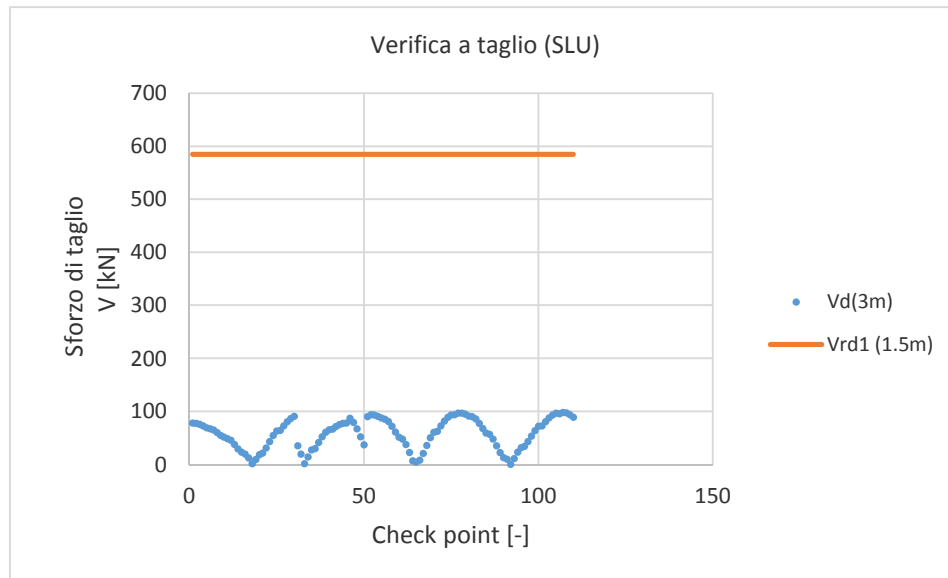


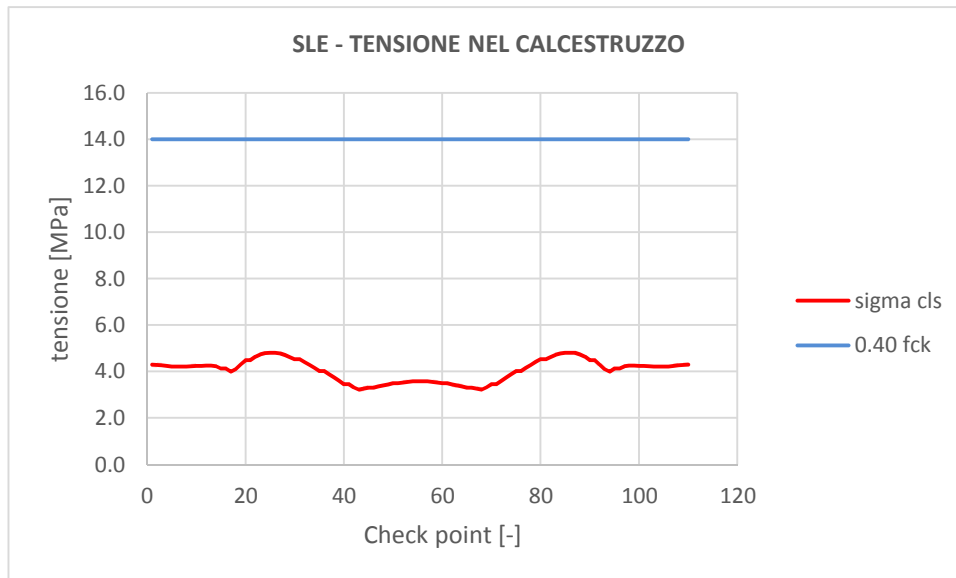
Figura 66- Verifica SLU taglio (B=1.50 m, H=0.50 m) – Fase 6bis sismica

### 9.5.7 Verifiche strutturali SLE del rivestimento definitivo

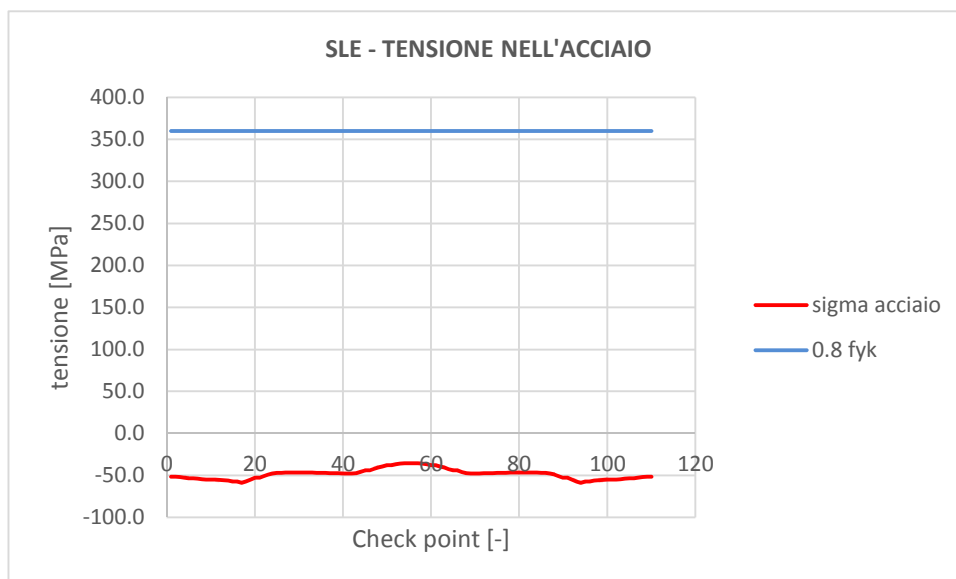
Le verifiche SLE del rivestimento definitivo sono finalizzate a prevenire la formazione di un quadro fessurativo tale da compromettere la durabilità dell'opera. A tal fine la Normativa (DM 14/01/2008 par.4.1.2.1.3. e Circolare n.617/2009) stabilisce un limite massimo all'ampiezza delle fessure (SLE di fessurazione) ed al contempo, impone il rispetto di opportuni limiti tensionali sia nell'acciaio che nel calcestruzzo (SLE di tensione).

Nello specifico, le verifiche agli SLE di fessurazione della calotta e arco rovescio non evidenziano fessure.

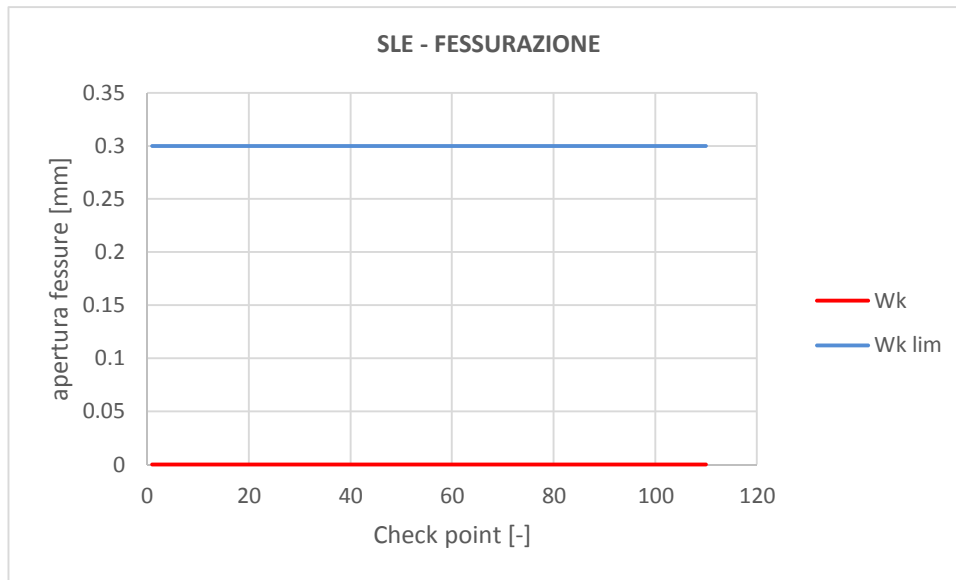
Anche le verifiche SLE di tensione per la calotta e arco rovescio risultano soddisfatte sia lato calcestruzzo che lato acciaio rispettando i valori limite imposti sia dalla normativa NTC2008 che dal Manuale RFI 2016.



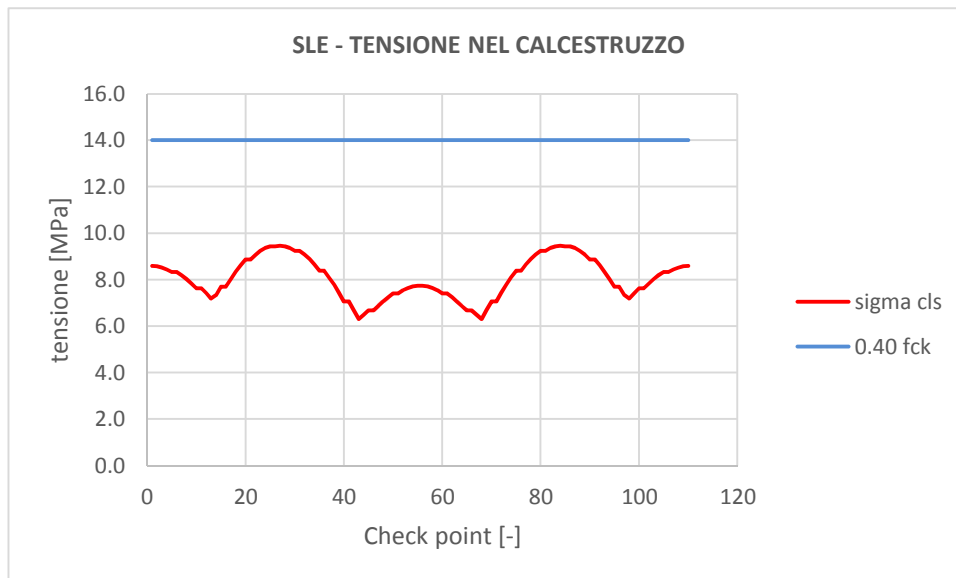
**Figura 67 - Verifiche SLE tensione cls– Fase 5**



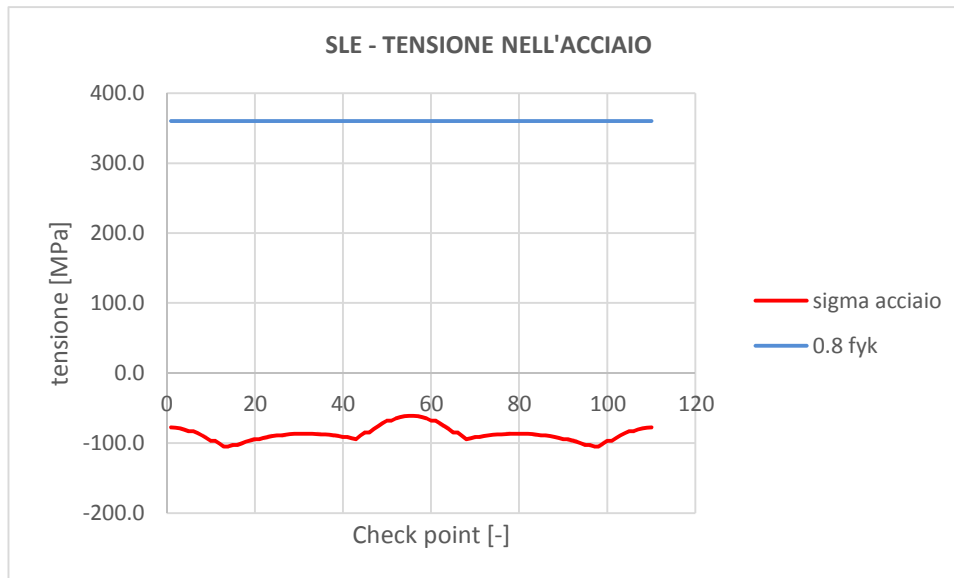
**Figura 68 - Verifiche SLE tensione acciaio– Fase 5**



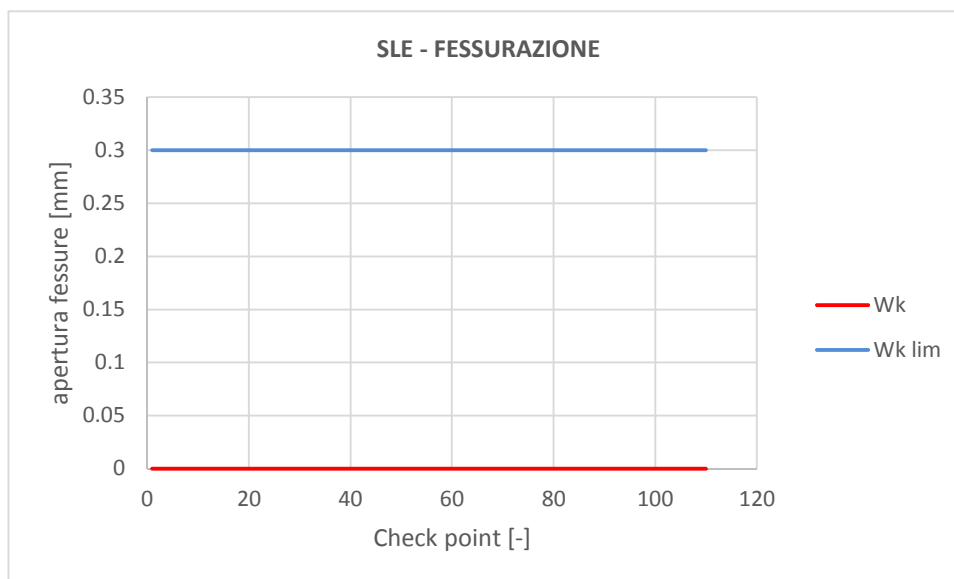
**Figura 69 - Verifiche SLE fessurazione– Fase 5**



**Figura 70 - Verifiche SLE tensione cls– Fase 6**



**Figura 71 - Verifiche SLE tensione acciaio– Fase 6**



**Figura 72 - Verifiche SLE fessurazione– Fase 6**

I risultati delle analisi sono riassunti in tabelle; input e output grafici del modello di calcolo sono riportati integralmente nell'.

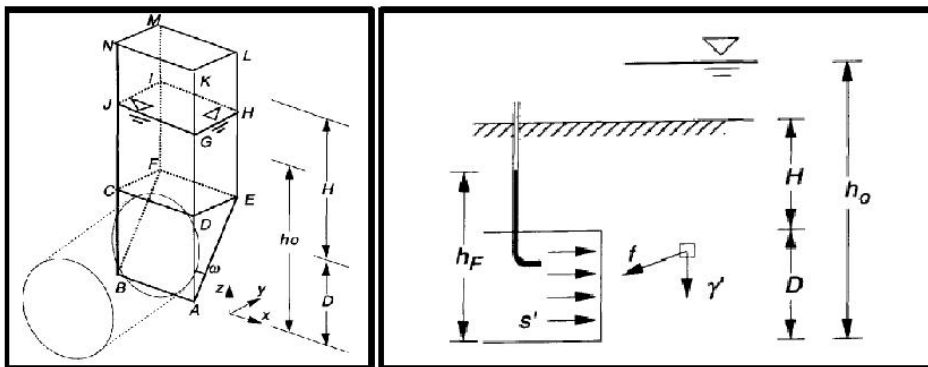
## 9.6 SEZIONE MECCANIZZATO P.K. 16+090

Le analisi e le verifiche riportate di seguito sono relative alle condizioni di massima copertura e battente idraulico all'interno della formazione BNA3.

### 9.6.1 Stabilità del fronte e del cavo

Nelle tabella seguenti si riassumono i dati di input e i risultati dell'analisi di stabilità del fronte della sezione in esame condotta con il metodo di Anagnostou e Kovari.

### Metodo di Anagnostou & Kovari (Anagnostou et al., 1994)



Ipotesi:

- 1) Terreni caratterizzati da criterio di rottura di Mohr-Coulomb
- 2) Presenza di falda
- 3) Condizioni drenate
- 4) Scavo con scudi a contropressione di fango o terra (EPB)
- 5) Metodo utilizzato per terreni prevalentemente sabbiosi (in terreni di bassa permeabilità, le condizioni drenate possono essere raggiunte durante l'interruzione dello scavo)
- 6) Tensioni efficaci
- 7) Distribuzione delle pressioni interstiziali di tipo idrostatico

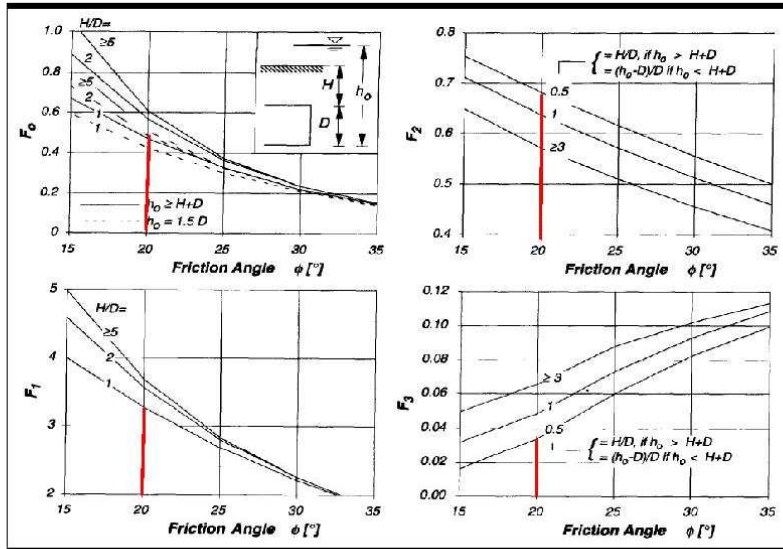
$$S' = F_0 \gamma' D - F_1 c' + F_2 \gamma' \Delta h - F_3 c' \frac{\Delta h}{D}$$

Input	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	21
	$\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	10
	$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	11
	D (m)	12.8
	c' (kPa)	20
	$\phi'$ (°)	35
	$h_0$ (m)	62.8
	$h_f$ (m)	0



A2+M2	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	21
	$\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	10
	$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	11
	D (m)	12.8
	c' (kPa)	16
	$\phi'$ (°)	29.3
	$h_0$ (m)	62.8
	$h_f$ (m)	0

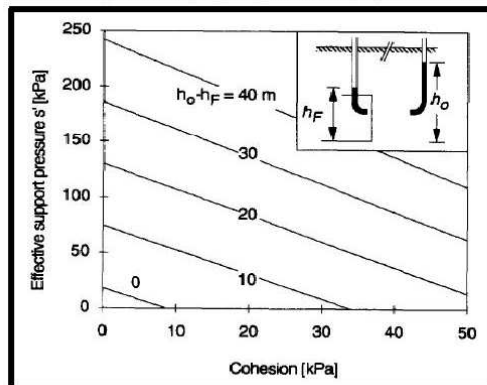




H (m)	100
D(m)	12.8
H/D	7.81
$\phi'$ (°)	29.3
H+D (m)	112.8
1.5*D (m)	19.2
curva	FALSO
$F_0$	0.23
H/D	7.81
$\phi'$ (°)	29.3
$F_1$	2.2
H (m)	100
D(m)	12.8
H+D (m)	112.8
$\phi'$ (°)	29.3
curva	3.91
$F_2$	0.45
H (m)	100
D(m)	12.8
H+D (m)	112.8
$\phi'$ (°)	29.3
curva	3.91
$F_3$	0.09

NB Il valore della pressione di sostegno  $s'$  è legata alla variazione di pressione  $\Delta h$  e alla coesione  $c'$ .

Si nota dal diagramma che  $h_F = h_0$  ( $\Delta h = 0$ ) è sufficiente per garantire la stabilità del fronte in terreni con  $c' \geq 10 \text{ kPa}$



Output  $s'$  (kPa) 303.0

Tabella 28 - Analisi di stabilità del fronte Sez. p.k. 16+090: dati di input e risultati dell'analisi

L'analisi evidenzia che, anche con l'applicazione dei coefficienti parziali corrispondenti alla combinazione A2+M2+R2 e quindi con i valori di progetto, la pressione di sostegno necessaria per la stabilità del fronte di scavo è compatibile con i valori garantiti dalla TBM.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA					
	GALLERIA ROCCHETTA Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	COMMESSA IF0G	LOTTO 01	CODIFICA D 07 RB	DOCUMENTO GN0300 001	REV. A

### 9.6.2 Interazione opera-terreno

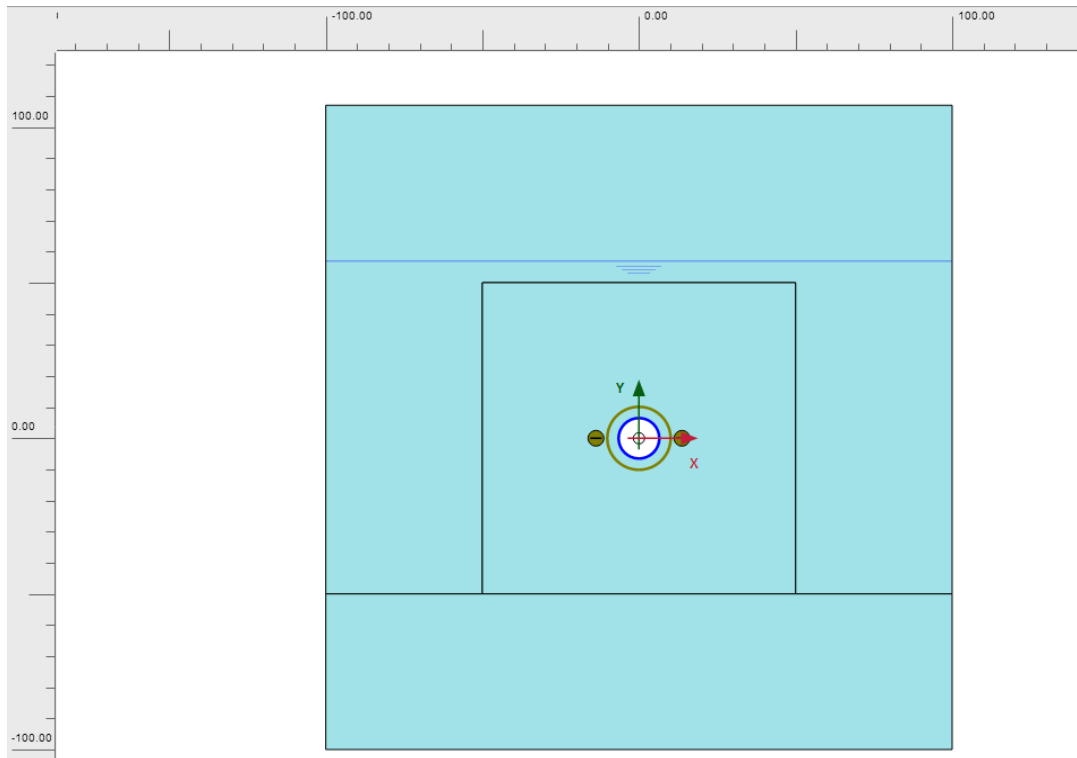
Nella tabella seguente si riassumono i dati di input che caratterizzano la sezione geotecnica utilizzata per le analisi numeriche corrispondenti alla zona di ridotta copertura.

La presenza della falda è stata simulata nell'analisi alla quota indicata in tabella (50 m al di sopra della calotta dello scavo).

<i>Stratigrafia di calcolo</i>		C	Falda	$\gamma$	$c'_k$	$\phi'_k$	$c_{uk}$	E'	E <sub>u</sub>	k <sub>0</sub>
<i>Formazione</i>	<i>Profondità da p.c.</i>									
[-]	[m]	[m]	[m da p.c.]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kPa]	[°]	[kPa]	[MPa]	[MPa]	[-]
BNA3	0-200	100	50	21	20	35	-	500	576	1.0

*C = copertura (rispetto alla calotta)*  
 *$\gamma$  = peso per unità di volume*  
 *$c'_k$  = coesione drenata*  
 *$\phi'_k$  = angolo di attrito interno*  
 *$c_{uk}$  = coesione non drenata*  
*E' = modulo elastico drenato*  
*E<sub>u</sub> = modulo elastico non drenato ( $E_u = 1.5 \cdot E' / (1 + \nu')$ )*  
 *$\nu'$  = coefficiente di Poisson*  
*K<sub>o</sub> = coefficiente di spinta a riposo*

**Tabella 29 - Analisi di interazione Sez. p.k. 16+090: definizione della stratigrafia di calcolo**



**Figura 73 - Modello di calcolo - Geometria mesh**

La pressione al fronte è stata valutata attraverso la formulazione di Anagnostou e Kovari (1994), e tenuta in conto per la definizione degli scarichi tensionali alle distanze di osservazione di riferimento dal fronte di scavo.

Per gallerie scavate con una TBM tipo EPB, in presenza di moti di filtrazione verso il fronte di scavo, la pressione di stabilizzazione del fronte può essere determinata utilizzando la relazione proposta da Anagnostou e Kovari (1996), che fa riferimento al meccanismo di rottura indicato in figura seguente (trascurando i moti di filtrazione):

$$S' = F_0 \cdot \gamma' \cdot D - F_1 \cdot c' + F_2 \cdot \gamma' \cdot \Delta h - F_3 \cdot c \cdot \Delta h / D$$

in cui:

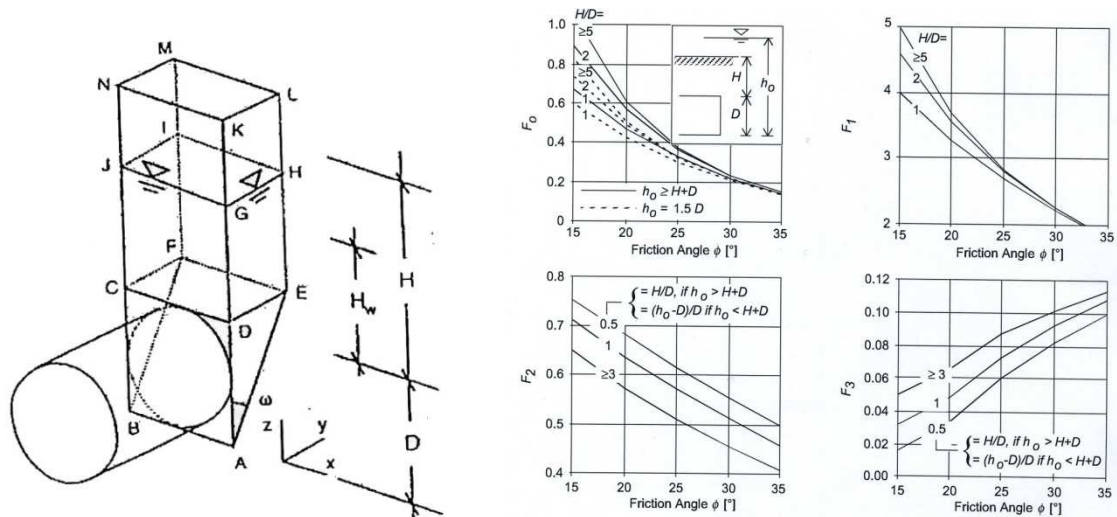
$S'$  = pressione efficace al fronte

$$\Delta h = h_0 - h_f$$

$h_0$  = carico idraulico, riferito alla quota dell'arco rovescio, in assenza dello scavo;

$h_f$  = carico idraulico al fronte, riferito alla quota dell'arco rovescio;

$F_0 \rightarrow F_3$  = coefficienti adimensionali che dipendono dall'angolo di attrito ( $\phi$ ), dalla copertura  $H$ , dal diametro della galleria ( $D$ ) e da  $h_0$ , (vedi diagrammi riportati nelle figure seguenti).



**Figura 74 - Schema del metodo di Anagnostou e Kovari [1996] e abachi per la scelta dei coefficienti**

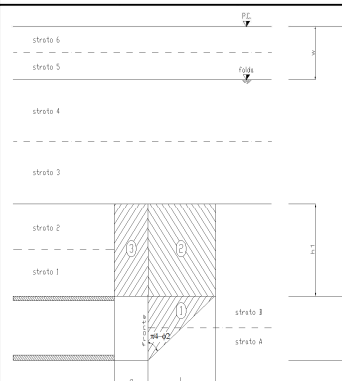
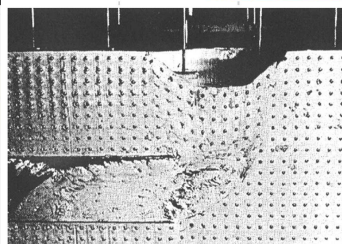
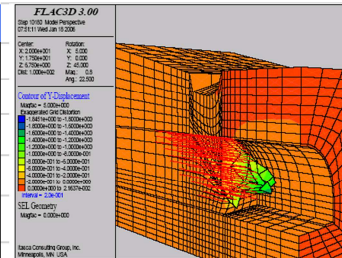
E' stato valutato l'effetto della stabilità nel breve termine tenendo conto del fatto che la permeabilità del materiale è limitata ed il flusso si imposta sulle fratture del materiale. Il calcolo ha evidenziato che il valore di riferimento per la pressione è pari a quello necessario a contrastare il battente idraulico.

Attraverso il metodo di Tamez si conferma tale risultato (FS fronte =1.18 in condizioni intrinseche), e la sovrappressione atta a garantire la stabilità del fronte risulta pari a circa 200 kPa.

Valutando un effetto di drenaggio verso il fronte ed il contorno della macchina di scavo, nel breve termine la pressione necessaria alla stabilizzazione puo' essere valutata in 200 kPa.

**CONDIZIONI INTRINSECHE**

Larghezza della galleria (m)	b=	6.5			
Altezza della galleria (m)	h=	6.5			
Area di scavo (m2)	A=	132.0			
Lunghezza di avanzamento non sostenuta (m)	a=	0.01			
Profondità della falda da p.c. (m)	h <sub>w</sub> =	106.5			
Pressione di contrasto (kPa)	Pe=	0			
<b>MATERIALE (TERR=0 / ROCCIA=1)</b>	mat=	0			
Modulo deformabilità terreno originale [MPa]	E=	500.0			
Coefficiente di spinta laterale a riposo ("-"=au ko		-			
<b>Copertura</b>	m	100			
id strato (dal basso)	Peso di volume [kN/m3]	Potenza strato [m]	c' [kPa]	φ [kPa]	Falda [1=si; 0=no]
6					0
5					0
4					0
3					0
2					0
1	20	100	20.0	35.0	0
mat.al fronte	20	6.5	20.0	35.0	
Stabilità intrinseca	fronte		<b>FSF</b>		<b>1.18</b>
	calotta		<b>FS3</b>		<b>238.67</b>



Tipologia galleria	profonda	z/h > 1.5
Larghezza solido di Terzaghi	[m]	13.23
<b>CONSOLIDAMENTO DEL FRONTE</b>		
Pressione confinamento	Δσ <sub>3</sub>	[kPa] 200

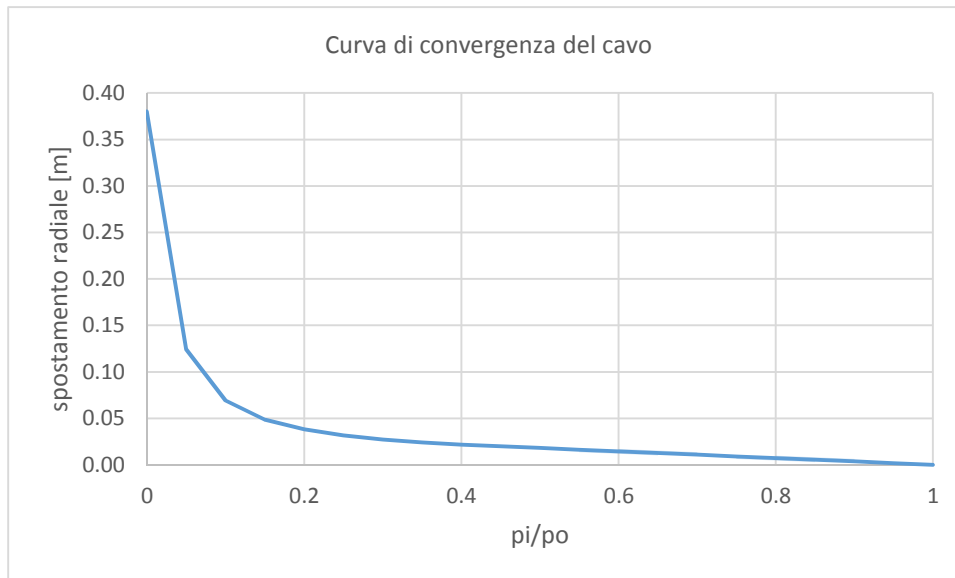
Modulo equiv.	548.9 MPa	c' + Δc'	212.1 kPa
<b>FS FRONTE CON CONSOLIDAMENT</b>	<b>FSF</b>		<b>2.04</b>

$$m3 = c_2 + [0.25 \cdot [w \cdot \gamma + (z - h_1 - w) \cdot (\gamma - \gamma_w)] - u] \cdot g \cdot \rho$$

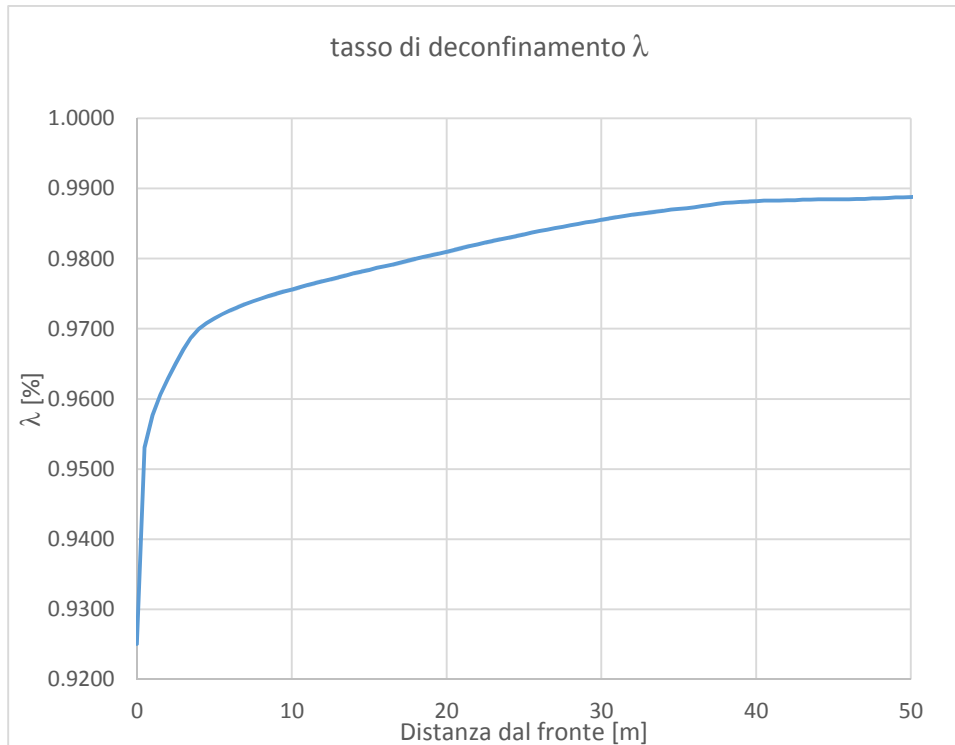
Con riferimento all'asse della galleria, la griglia di calcolo presenta un'estensione laterale di 100 m (per una larghezza totale di 200 m) e un'altezza complessiva di 207 m. Il numero complessivo degli elementi è pari a circa 6026 mentre i nodi sono circa 48469.

**9.6.3 Fasi e percentuali di rilascio**

I tassi di deconfinamento sono stati calcolati mediante analisi assialsimmetrica e curva caratteristica analitica (come indicato nella figura soprastante con riferimento alla fase di scavo al fronte). I coefficienti di scarico sono calcolati a partire da tali valori e scontando la pressione al fronte ed al contorno dello scudo, conservativamente considerata costante lungo questo.



**Figura 75 - Sez. Scavo Meccanizzato copertura 100m– Curva caratteristica e di convergenza**



**Figura 76 - Sez. Scavo Meccanizzato copertura 100m – Calcolo percentuale di rilascio  $\lambda_F$ - al fronte**

Nella tabella successiva è schematizzata la successione delle fasi di calcolo nelle quali è articolata l'analisi di interazione opera-terreno.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	99 di 141

Fase	Descrizione	Rilascio forze scavo ( $\lambda$ ) (con pressione / senza pressione TBM)
0-1	Inizializzazione stato tensionale geostatico	0,00
2	Rilascio a cavo libero in corrispondenza del fronte	0.831 (0.92)
3	Rilascio a cavo libero in corrispondenza della distanza di 6m dal fronte	0.881 (0.97)
4	Rilascio a cavo libero in corrispondenza della distanza di 10m dal fronte (lunghezza minima TBM)	0.888 (0.975)
5	Attivazione rivestimento definitivo spessore 50cm e condizione di lungo termine	1.00

**Tabella 30 - Analisi di interazione – Sez. Scavo Meccanizzato copertura 100m: fasi di calcolo**

#### 9.6.4 *Esame dei risultati*

L'analisi si articola in sette successive fasi di calcolo, che permettono di descrivere i differenti interventi costruttivi e di schematizzare le differenti condizioni di carico per i rivestimenti. Le fasi, descritte al paragrafo precedente, sono illustrate in

Lo stesso allegato illustra, per ciascuna fase, le componenti verticale e orizzontale degli spostamenti totali cumulati, i vettori degli spostamenti totali, i punti al contorno del cavo dove si hanno plasticizzazioni e l'orientamento delle direzioni principali efficaci.

La [Tabella 31](#) riporta, per ogni fase di calcolo, i risultati principali in termini di quadro deformativo e tensionale e di localizzazione delle plasticizzazioni nella zona del cavo, distinguendo tra la zona di calotta, dei piedritti e dell'arco rovescio.

La [Figura 77](#) consente di visualizzare la posizione dei nodi di chiave calotta, dei piedritti e dell'arco rovescio cui si riferiscono i dati riportati nella tabella.



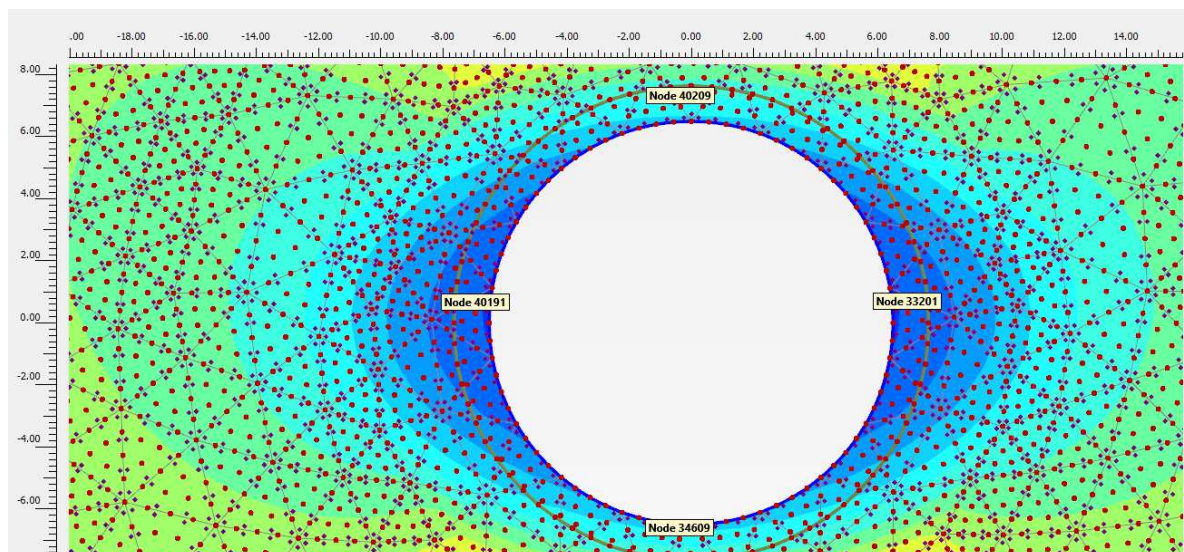
Fase	Piedritto (40191)			Calotta (40209)			Piedritto (33201)			Arco rovescio (34609)			Fascia plasticizzata
	u  [cm]	$\sigma_1$ [kPa]	$\sigma_3$ [kPa]	u  [cm]	$\sigma_1$ [kPa]	$\sigma_3$ [kPa]	u  [cm]	$\sigma_1$ [kPa]	$\sigma_3$ [kPa]	u  [cm]	$\sigma_1$ [kPa]	$\sigma_3$ [kPa]	
2	3.08	-1967.2	-922.7	3.24	-1887.4	-853.8	3.06	-1985.6	-927.6	-2.97	-2159.3	-1031.4	Plasticizzazione anulare sp. 2.3m
3	4.11	-1578.04	817.29	4.39	-1494.07	747.22	4.08	-1593.57	821.33	-3.86	-1749.36	-920.32	Plasticizzazione anulare sp. 3.5m
4	4.24	-1541.39	807.35	4.55	-1458.75	737.65	4.22	-1556.28	811.23	-3.98	-1706.63	-908.74	Plasticizzazione anulare sp. 3.7m
5	4.40	-1498.3	-795.7	4.47	-1473.1	-741.7	4.37	-1512.5	-799.4	-4.37	-1606.8	-881.7	Plasticizzazione anulare sp. 4.0m

$u$  = spostamento totale cumulativo (positivo se abbassamento, negativo se sollevamento)

$\sigma_1$  = sforzo principale totale massimo

$\sigma_3$  = sforzo principale totale minimo

**Tabella 31 - Analisi di interazione – Sez. Scavo Meccanizzato copertura 100m: risultati dell'analisi**

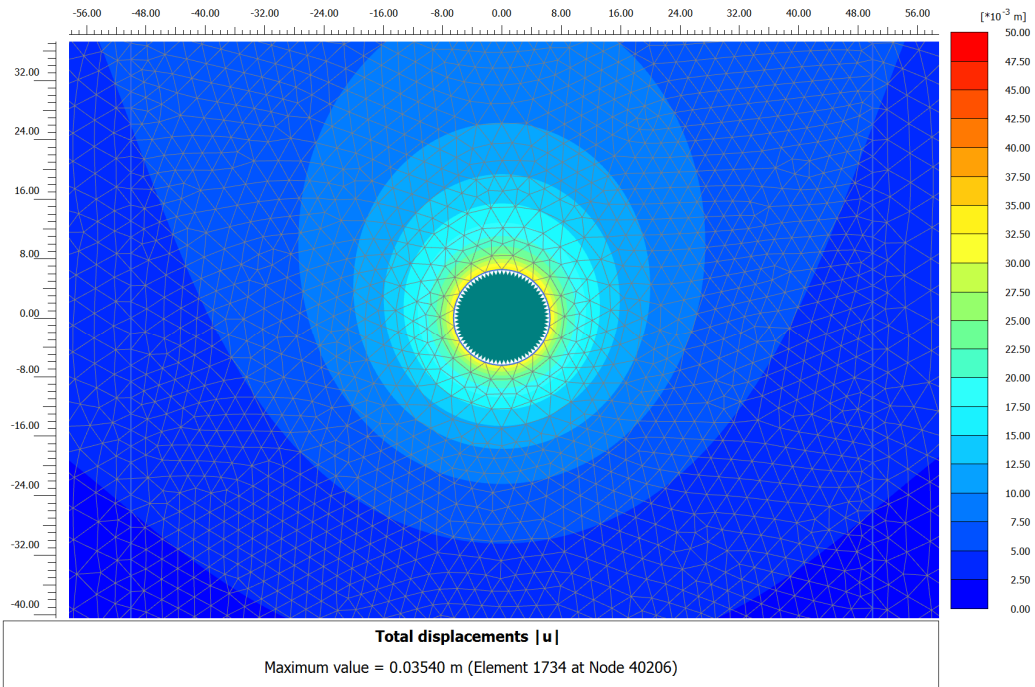


**Figura 77 - Nodi rilevati nella zona del cavo**

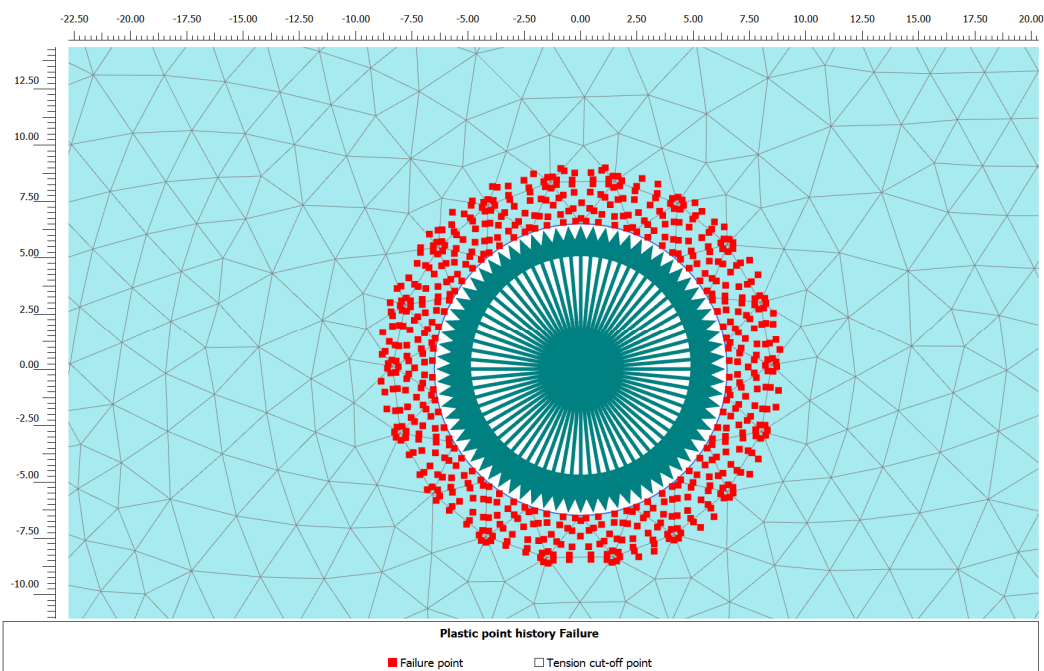
## FASE 2

Viene simulato il rilascio a cavo libero in corrispondenza del fronte di scavo. Gli spostamenti al contorno del cavo risultano circa omogenei, con valori di circa 3cm. Le zone plastiche sono localizzate al completo contorno dello scavo, con estensione di circa 2.3. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 2159 kPa (arco rovescio) mentre la massima tensione principale minima è di 853 kPa (calotta).



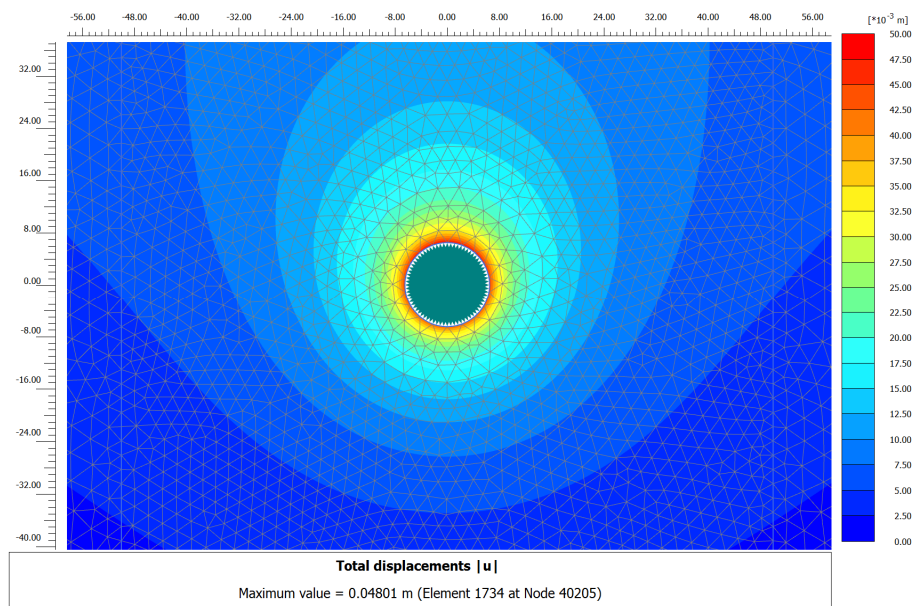


**Figura 78 – Campo spostamenti fase 2**

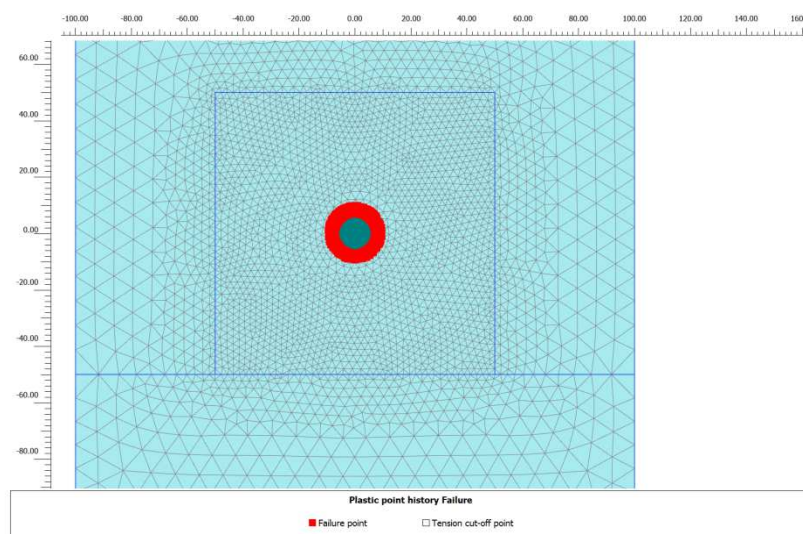


**Figura 79 – Sviluppo zone plastiche fase 2**

Viene simulata l'esecuzione dell'avanzamento a 6 m di distanza dal fronte. Il cedimento cumulo in calotta è pari a 4.39 cm, lo spostamento cumulo ai piedritti raggiunge 4.1 cm, mentre il sollevamento cumulo in arco rovescio è di 3.86 cm. Le zone plastiche rispetto al caso precedente subiscono un'estensione (3.5m di spessore). Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 1749 kPa (arco rovescio) mentre la massima tensione principale minima è di 747 kPa (calotta).

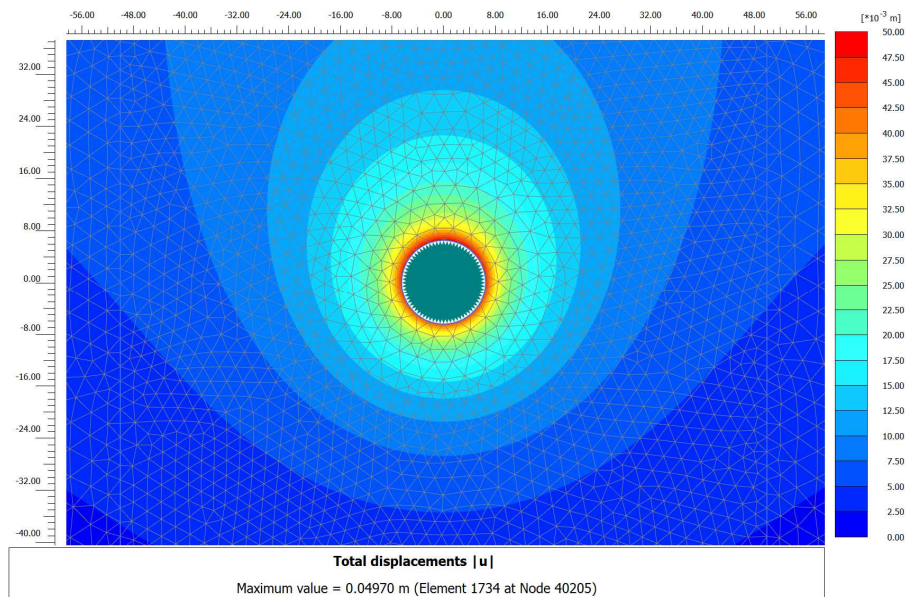


**Figura 80 – Campo spostamenti fase 3**

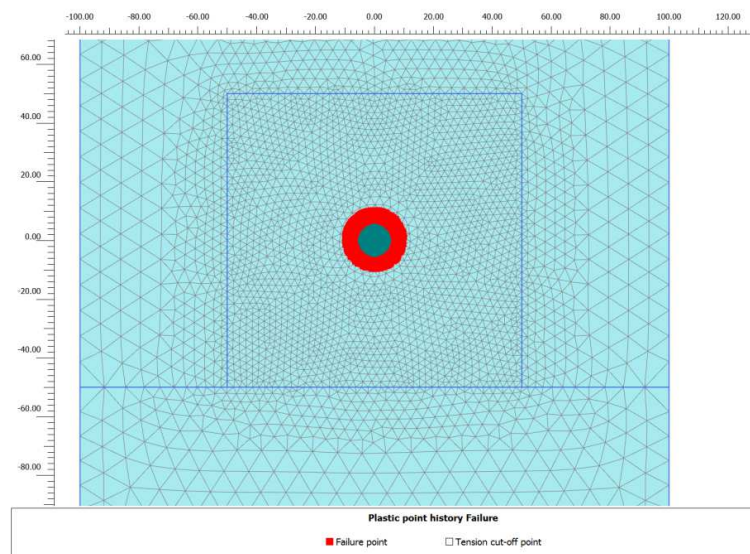


**Figura 81 – Sviluppo zone plastiche fase 3**

Viene simulata l'esecuzione dell'avanzamento a 10 m di distanza dal fronte. Il cedimento cumulado in calotta è pari a 4.55 cm, lo spostamento cumulado ai piedritti raggiunge 4.24 cm, mentre il sollevamento cumulado in arco rovescio è di 3.98 cm. Le zone plastiche raggiungono un'estensione di circa 3.7m. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 1706 kPa (arco rovescio) mentre la massima tensione principale minima è di 737 kPa (calotta).



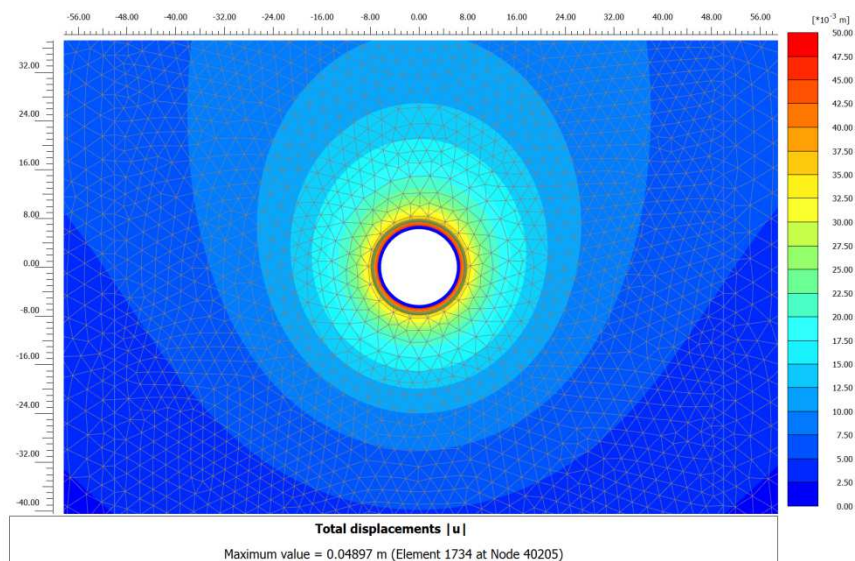
**Figura 82 – Campo spostamenti fase 4**



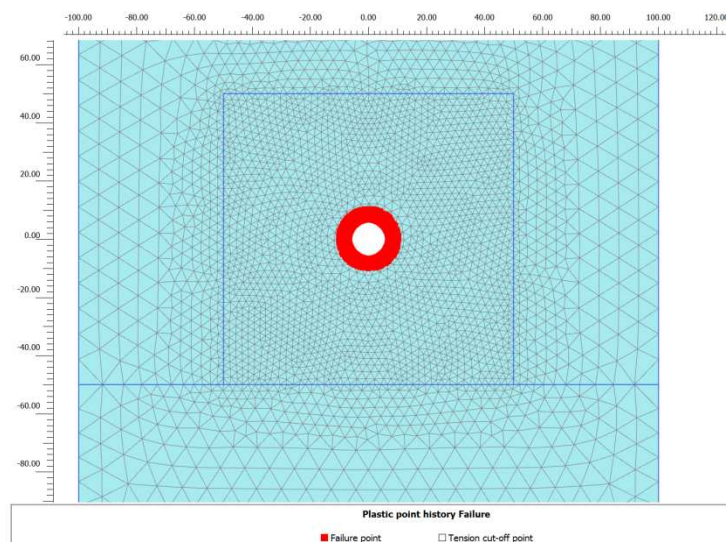
**Figura 83 – Sviluppo zone plastiche fase 4**



Viene simulata l'installazione del rivestimento definitivo in conci prefabbricati, associato allo scarico totale. Il cedimento cumulato in calotta è pari a 4.47 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 4.4 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 4.37 cm. Le zone plastiche raggiungono un'estensione di circa 4.0m. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 1606 kPa (arco rovescio) mentre la massima tensione principale minima è di 741 kPa (calotta).



**Figura 84– Campo spostamenti fase 5**



**Figura 85 – Sviluppo zone plastiche fase 5**

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	105 di 141

### 9.6.5 Verifiche strutturali SLU del rivestimento definitivo

Nella tabella seguente si riportano le caratteristiche simulate dei rivestimenti definitivi.

Tipo di prerivestimento	Rivestimento definitivo				
Spessore simulato del rivestimento definitivo in conci prefabbricati [m]	0.50				
<p>Nel modello numerico il rivestimento è stato modellato mediante elementi "beam", tenendo in considerazione che i conci sono discontinui e sfalsati. Nello specifico, considerando la fascia risultante dall'accostamento di una coppia di anelli consecutivi con posizionamento sfalsato dei giunti, la sezione di verifica a pressoflessione conserva la rigidità assiale di entrambi gli anelli e la rigidità flessionale di uno solo di essi.</p> <p>L'area della coppia di anelli è data da:</p> <p><math>A' = (2 \cdot 1.5) \cdot 0.5 = 1.5 \text{ m}^2</math></p> <p>L'inerzia del singolo anello è espressa da:</p> <p><math>J' = (1/12) \cdot 1.5 \cdot 0.5^4 = 0.015625 \text{ m}^4</math></p> <p>Pertanto nel calcolo, riferito a metro di rivestimento, si ha:</p> <p><math>A = A' / (2 \cdot L) = 1.5 / (2 \cdot 1.5) = 0.5 \text{ m}^2/\text{m}</math></p> <p><math>J = J' / (2 \cdot L) = 1.5 / (2 \cdot 1.5) = 0.00521 \text{ m}^4/\text{m}</math></p> <p>La tabella successiva sintetizza i parametri caratteristici del rivestimento considerato nell'analisi.</p>					
Struttura	$\gamma$	E	$\nu$	EA	EJ
	[kN/m <sup>3</sup> ]	[MPa]	[-]	[kN/m]	[kNm <sup>2</sup> /m]
CONCI PREFABBRICATI	25	34000	0.2	17000000	177072
<p><math>\gamma</math> = volume weight  E = elastic modulus  <math>\nu</math> = Poisson's ratio  EA = axial stiffness  EJ = bending stiffness</p>					

**Tabella 32 - Analisi di interazione – Sez. Scavo Meccanizzato copertura 100m: definizione delle caratteristiche dei rivestimenti**

La verifica strutturale del rivestimento definitivo prevede il confronto tra le sollecitazioni di calcolo, ottenute a partire dai risultati del modello numerico applicando i relativi coefficienti parziali, e le resistenze di calcolo definite dai punti  $M_{Rd}$ ,  $N_{Rd}$  che individuano il dominio resistente nel piano M, N. In ragione della presenza dei giunti (che non dovranno essere accoppiati fra anelli consecutivi), le verifiche sono condotte sulla base di una sezione resistente costituita da due conci affiancati con armatura di un solo concio (considerando, quindi, la presenza del giunto per l'anello adiacente). La verifica a taglio si basa sul contributo del solo anello senza giunto.

La lunghezza di riferimento del concio è pari a 1.50m, da cui le seguenti sezioni di verifica:

- Pressoflessione: 300 x 50cm;
- Taglio: 150 x 50cm.

Per la verifica a taglio, il valore resistente di calcolo è ottenuto in accordo con la normativa vigente (DM 14/01/2008 par.4.1.2.1.3. e Circolare n.617/2009).

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	106 di 141

Il rivestimento definitivo è previsto armato realizzato in conci prefabbricati di spessore 0.50m con la seguente armatura:

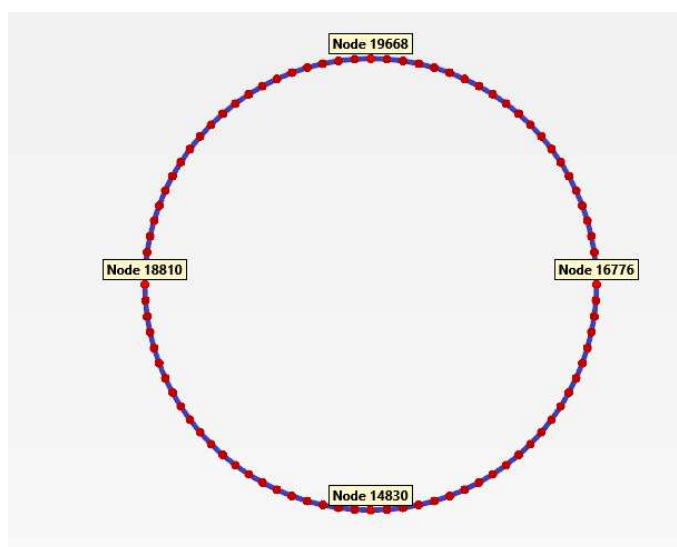
- Copriferro 4.0cm
- Armatura longitudinale:  $\phi 12/15\text{cm}$ ;
- Armatura trasversale:  $\phi 14/15\text{cm}$ ;
- Armatura a taglio staffe  $\phi 12$  a due bracci passo 15cm
- Armatura perimetrale: 2 ferri  $\phi 10$ .

L'incidenza delle armature è di circa 100kg di acciaio per m<sup>3</sup>.

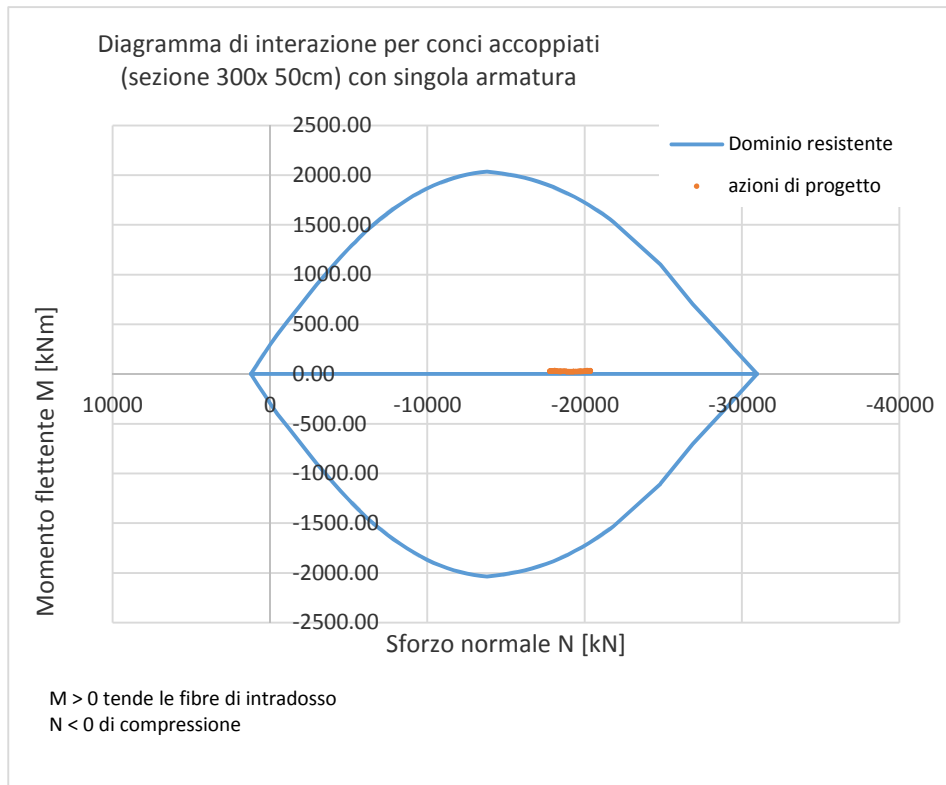
Le tabelle seguenti sintetizzano le sollecitazioni ottenute, per ogni fase, nelle zone di maggiore interesse del rivestimento: zona di calotta, di contatto calotta-piedritti e piedritti-arco rovescio, dei piedritti e di arco rovescio, rilevate in corrispondenza dei nodi della figura a seguire.

Fase 5	Sollecitazioni	Calotta	Piedritto		Arco rovescio
			sinistro	destro	
	N [kN/m]	-4557	-4889	-4889	-5217
	M [kNm/m]	-8	-6	-7	-9
	T [kN/m]	0	0	0	2

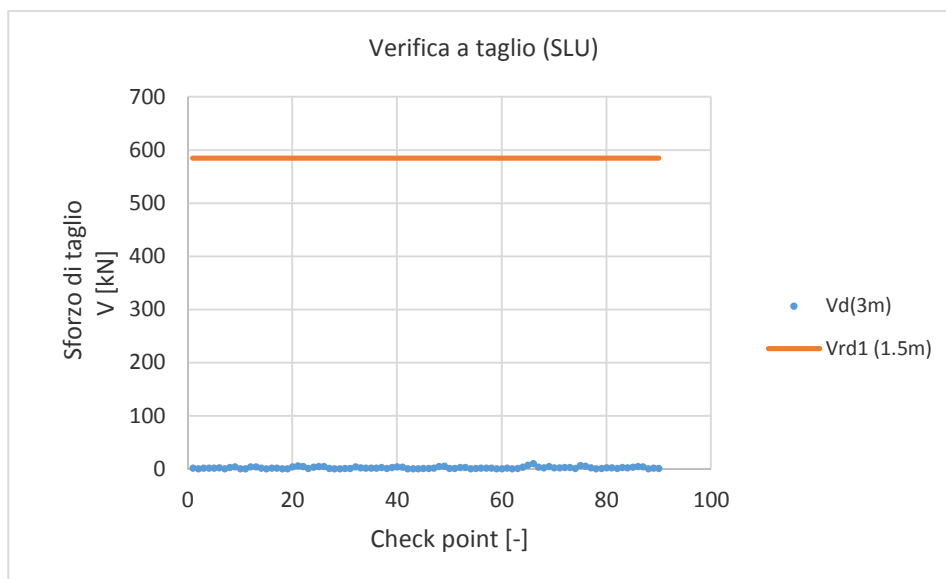
**Tabella 33 - Analisi di interazione – Sez. Scavo Meccanizzato copertura 100m: Sollecitazioni nel rivestimento definitivo**



**F Figura 86 - Sez. Scavo Meccanizzato copertura 100m. Nodi rilevati del rivestimento definitivo**



**Figura 87 - Dominio resistente SLU calotta (B=3.00 m, H=0.50 m) – Fase 5**



**Figura 88 - Verifica SLU taglio (B=1.50 m, H=0.50 m) – Fase 5**

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	108 di 141

### 9.6.6 Verifiche strutturali SLE del rivestimento definitivo

Le verifiche SLE del rivestimento definitivo sono finalizzate a prevenire la formazione di un quadro fessurativo tale da compromettere la durabilità dell'opera. A tal fine la Normativa (DM 14/01/2008 par.4.1.2.1.3. e Circolare n.617/2009) stabilisce un limite massimo all'ampiezza delle fessure (SLE di fessurazione) ed al contempo, impone il rispetto di opportuni limiti tensionali sia nell'acciaio che nel calcestruzzo (SLE di tensione).

Nello specifico, le verifiche agli SLE di fessurazione della calotta e arco rovescio non evidenziano fessure.

Anche le verifiche SLE di tensione per la calotta e arco rovescio risultano soddisfatte sia lato calcestruzzo che lato acciaio rispettando i valori limite imposti sia dalla normativa NTC2008 che dal Manuale RFI 2016.

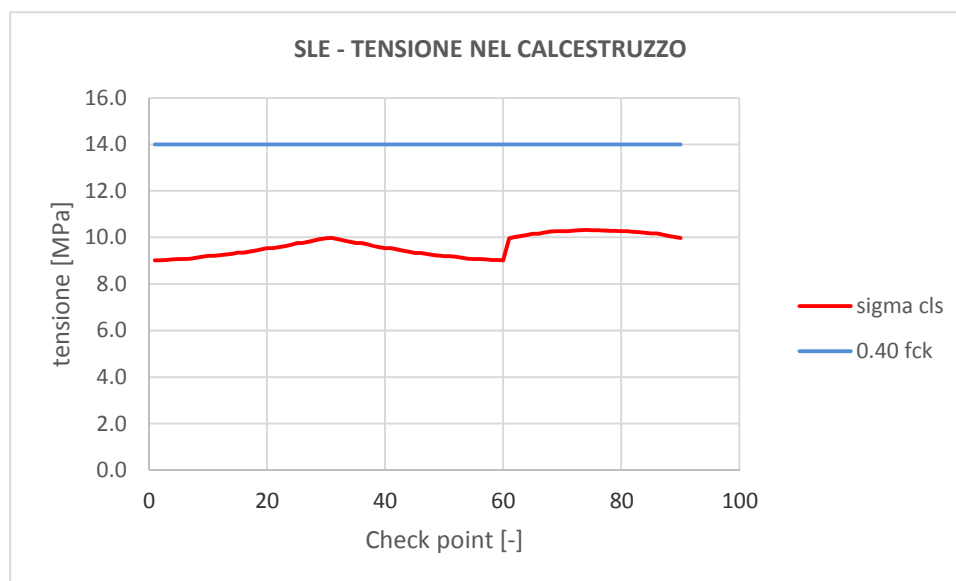
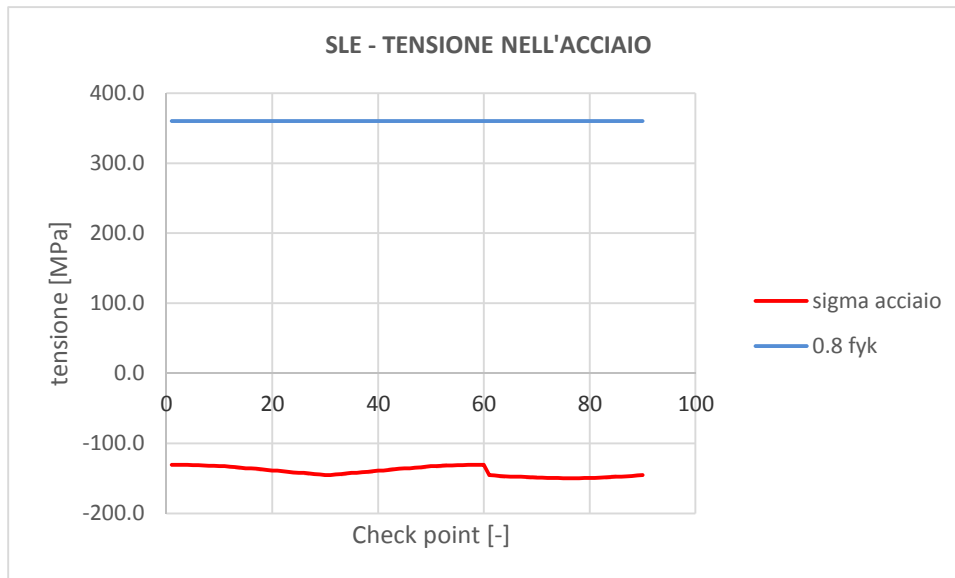
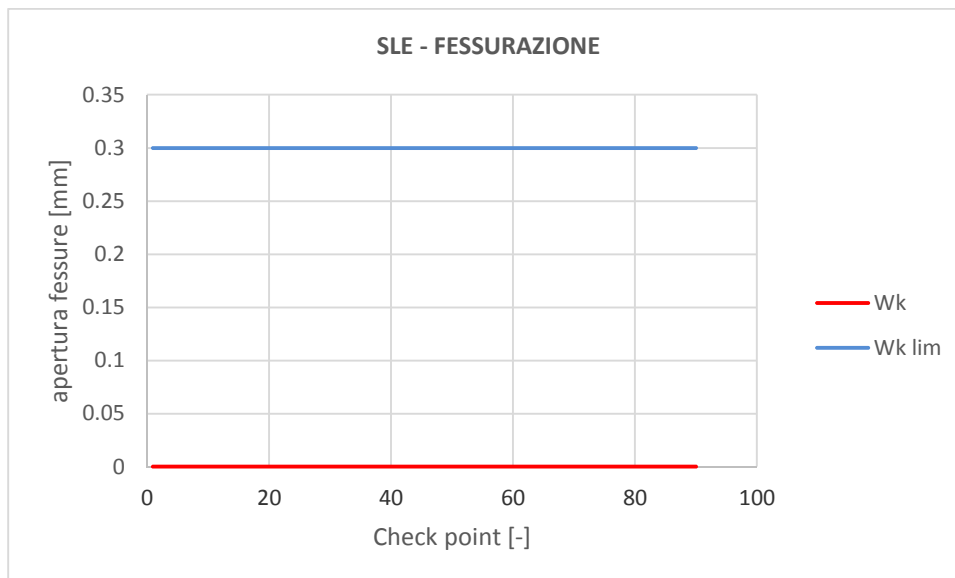


Figura 89 - Verifiche SLE tensione cls– Fase 5





**Figura 90 - Verifiche SLE tensione acciaio– Fase 5**



**Figura 91 - Verifiche SLE fessurazione– Fase 5**

I risultati delle analisi sono riassunti in tabelle; input e output grafici del modello di calcolo sono riportati integralmente in allegato xxx.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	110 di 141

## 9.7 SEZIONE MECCANIZZATO P.K. 12+680

Le analisi e le verifiche riportate di seguito sono relative alle condizioni di massima copertura all'interno della formazione BNA2.

In tali condizioni le analisi di diagnosi eseguite mostrano un comportamento del nucleo fronte stabile. Non sono state pertanto eseguite verifiche di stabilità del fronte.

Nelle analisi di interazione opera terreno è stata considerata a lungo termine la presenza di un battente idraulico di 75m al di sopra la calotta della galleria. Benché si escluda la possibilità di tale condizione idraulica (cfr. § 7.6), si è scelto comunque di verificare il dimensionamento del rivestimento definitivo in conci prefabbricati sotto tale ipotesi. Le verifiche condotte dimostrano che lo spessore (50cm) e l'incidenza di armatura (100 kg/m<sup>3</sup>) previsti in progetto per il rivestimento in conci prefabbricati risultano comunque idonei.

### 9.7.1 Interazione opera-terreno

Nella tabella seguente si riassumono i dati di input che caratterizzano la sezione geotecnica utilizzata per le analisi numeriche corrispondenti alla zona di ridotta copertura.

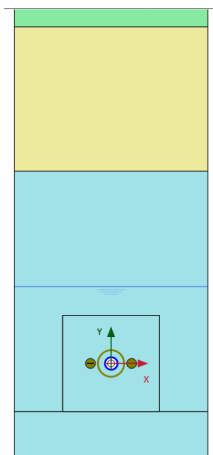
La presenza della falda è stata simulata nell'analisi alla quota indicata in tabella (75 m al di sopra della calotta dello scavo – corrispondente circa al massimo valore di tenuta idraulica delle guarnizioni).

<i>Stratigrafia di calcolo</i>		C	Falda	$\gamma$	$c'_K$	$\phi'_K$	$c_{uK}$	E'	$k_0$
<i>Formazione</i>	<i>Profondità da p.c.</i>								
[-]	[m]	[m]	[m da p.c.]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kPa]	[°]	[kPa]	[MPa]	[-]
BNA2	30		-	24	600	24	-	800	0.7
BNA2	200		75	24	750	25	-	1000	0.7
BNA3	>200	400	75	24	1000	30	-	2500	0.7

C = copertura (rispetto alla calotta)  
 $\gamma$  = peso per unità di volume  
 $c'_K$  = coesione drenata  
 $\phi'_K$  = angolo di attrito interno  
 $c_{uK}$  = coesione non drenata  
 E' = modulo elastico drenato  
 $K_0$  = coefficiente di spinta a riposo

**Tabella 34 - Analisi di interazione p.k. 12+680: definizione della stratigrafia di calcolo**

	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	111 di 141



**Figura 92 - Modello di calcolo - Geometria mesh**

La pressione al fronte è stata valutata attraverso la formulazione di Anagnostou e Kovari (1994), e tenuta in conto per la definizione degli scarichi tensionali alle distanze di osservazione di riferimento dal fronte di scavo.

Per gallerie scavate con una TBM tipo EPB, in presenza di moti di filtrazione verso il fronte di scavo, la pressione di stabilizzazione del fronte può essere determinata utilizzando la relazione proposta da Anagnostou e Kovari (1996), che fa riferimento al meccanismo di rottura indicato in figura seguente (trascurando i moti di filtrazione):

$$S' = F_0 \cdot \gamma' \cdot D - F_1 \cdot c' + F_2 \cdot \gamma' \cdot \Delta h - F_3 \cdot c \cdot \Delta h / D$$

in cui:

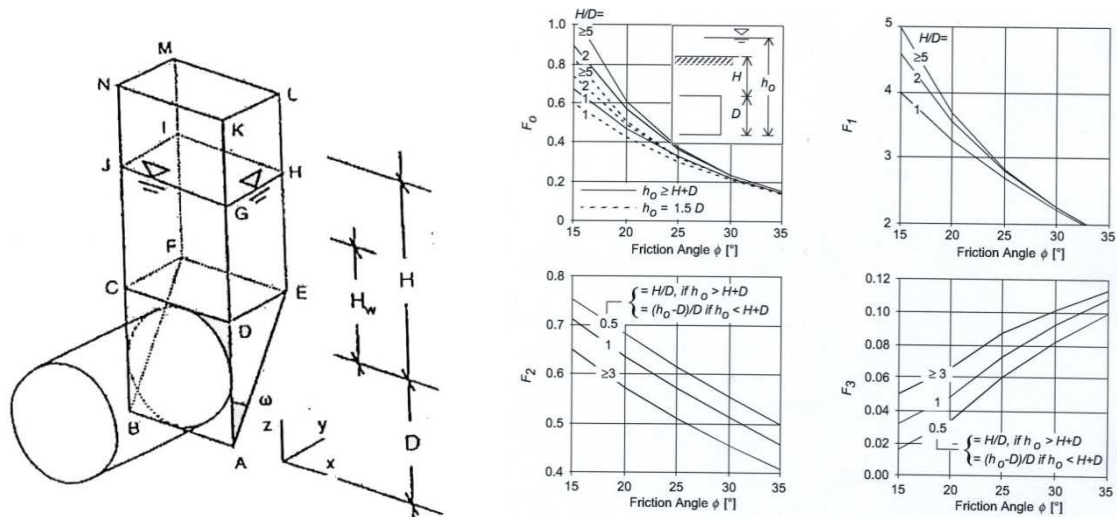
$S'$  = pressione efficace al fronte

$$\Delta h = h_0 - h_f$$

$h_0$  = carico idraulico, riferito alla quota dell'arco rovescio, in assenza dello scavo;

$h_f$  = carico idraulico al fronte, riferito alla quota dell'arco rovescio;

$F_0 \rightarrow F_3$  = coefficienti adimensionali che dipendono dall'angolo di attrito ( $\phi$ ), dalla copertura  $H$ , dal diametro della galleria ( $D$ ) e da  $h_0$ , (vedi diagrammi riportati nelle figure seguenti).



**Figura 93 - Schema del metodo di Anagnostou e Kovari [1996] e abachi per la scelta dei coefficienti**

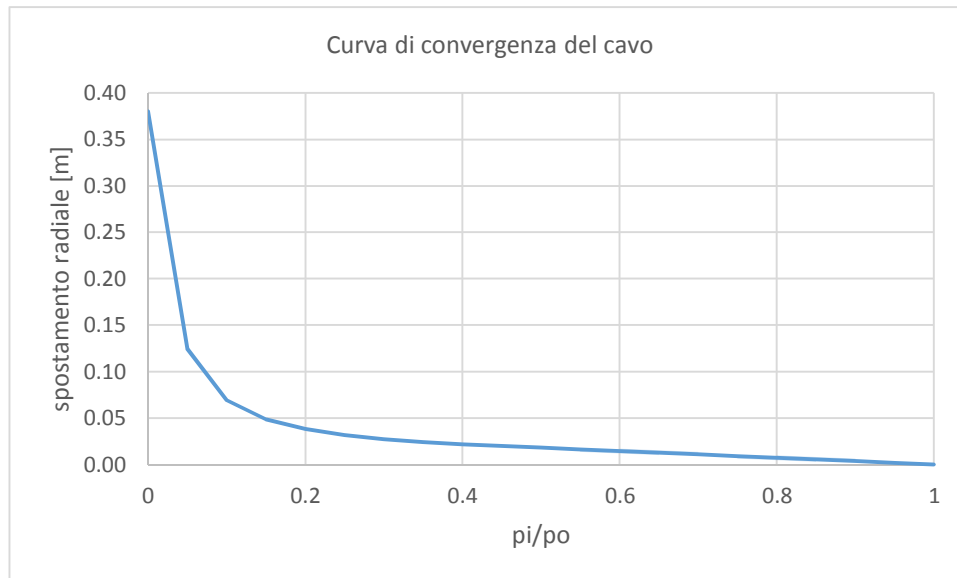
E' stato valutato l'effetto della stabilit  nel breve termine tenendo conto del fatto che la permeabilit  del materiale   limitata ed il flusso si imposta sulle fratture del materiale. Il calcolo ha evidenziato che il valore di riferimento per la pressione   pari a quello necessario a contrastare il battente idraulico.

Attraverso il metodo di Tamez si conferma tale risultato (FS fronte =2.90 in condizioni intrinseche).

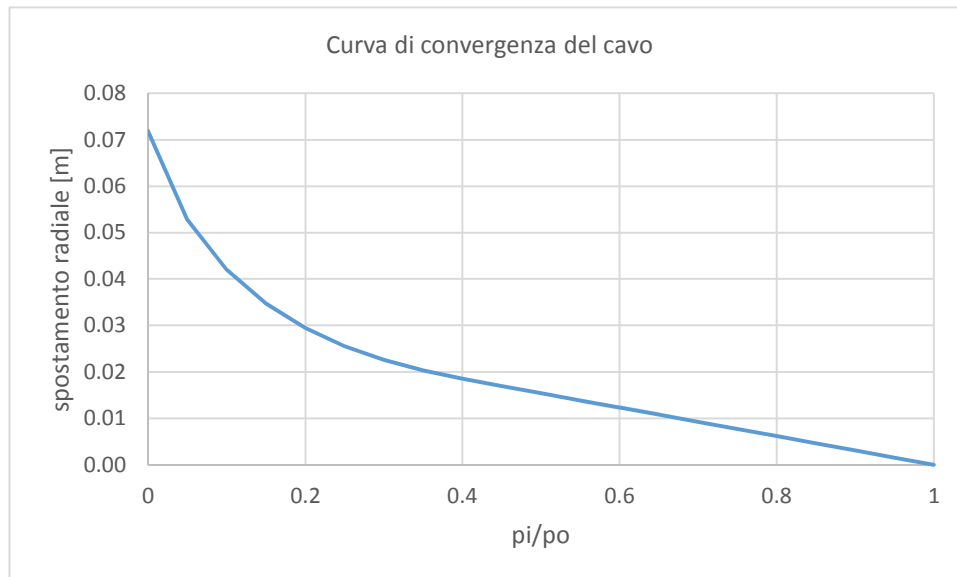
Con riferimento all'asse della galleria, la griglia di calcolo presenta un'estensione laterale di 100 m (per una larghezza totale di 200 m) e un'altezza complessiva di 500 m. Il numero complessivo degli elementi   pari a circa 3796 mentre i nodi sono circa 30593.

### 9.7.2 Fasi e percentuali di rilascio

I tassi di deconfinamento sono stati calcolati mediante analisi assialsimmetrica e curva caratteristica analitica (come indicato nella figura soprastante con riferimento alla fase di scavo al fronte). I coefficienti di scarico sono calcolati a partire da tali valori e scontando la pressione al fronte ed al contorno dello scudo, conservativamente considerata costante lungo questo.



**Figura 94 - Sez. Scavo Meccanizzato copertura 400m– Curva caratteristica e di convergenza**



**Figura 95 - Sez. Scavo Meccanizzato copertura 400m – Calcolo percentuale di rilascio  $\lambda_F$ - al fronte**

Nella tabella successiva è schematizzata la successione delle fasi di calcolo nelle quali è articolata l'analisi di interazione opera-terreno.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	114 di 141

Fase	Descrizione	Rilascio forze scavo ( $\lambda$ ) (con pressione / senza pressione TBM)
0-1	Inizializzazione stato tensionale geostatico	0,00
2	Rilascio a cavo libero in corrispondenza del fronte	0.557
3	Rilascio a cavo libero in corrispondenza della distanza di 6m dal fronte	0.952
4	Rilascio a cavo libero in corrispondenza della distanza di 10m dal fronte (lunghezza minima TBM)	0.97
5	Attivazione rivestimento definitivo spessore 50cm e condizione di lungo termine	1.00

**Tabella 35 - Analisi di interazione – Sez. Scavo Meccanizzato copertura 400m: fasi di calcolo**

### 9.7.3 Esame dei risultati

L'analisi si articola in sette successive fasi di calcolo, che permettono di descrivere i differenti interventi costruttivi e di schematizzare le differenti condizioni di carico per i rivestimenti. Le fasi, descritte al paragrafo precedente, sono illustrate in

Lo stesso allegato illustra, per ciascuna fase, le componenti verticale e orizzontale degli spostamenti totali cumulati, i vettori degli spostamenti totali, i punti al contorno del cavo dove si hanno plasticizzazioni e l'orientamento delle direzioni principali efficaci.

La [Tabella 36](#) riporta, per ogni fase di calcolo, i risultati principali in termini di quadro deformativo e tensionale e di localizzazione delle plasticizzazioni nella zona del cavo, distinguendo tra la zona di calotta, dei piedritti e dell'arco rovescio.

La [Figura 96](#) consente di visualizzare la posizione dei nodi di chiave calotta, dei piedritti e dell'arco rovescio cui si riferiscono i dati riportati nella tabella.

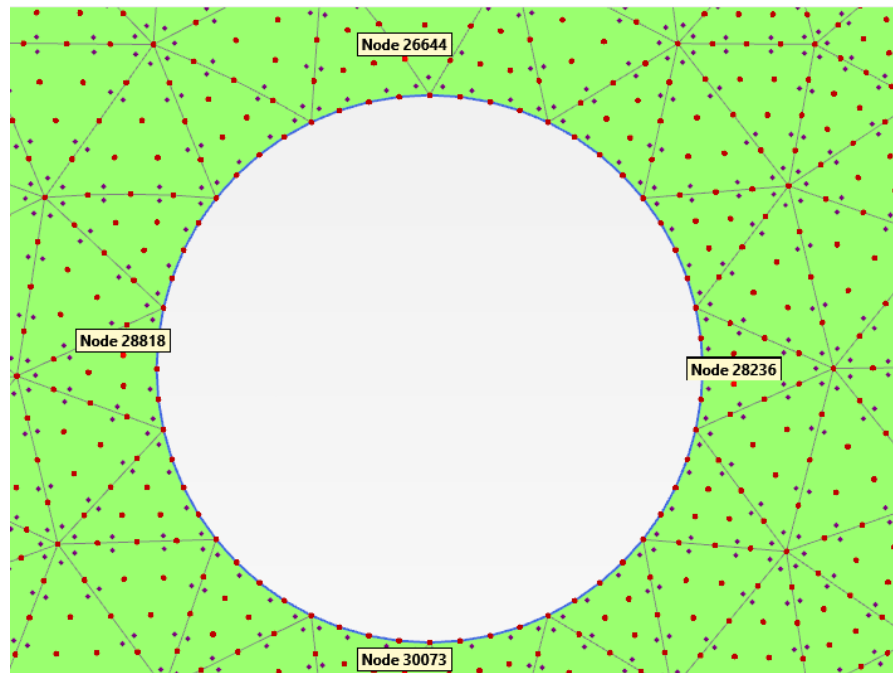
Fase	Piedritto (40191)			Calotta (40209)			Piedritto (33201)			Arco rovescio (34609)			Fascia plasticizzata
	u  [cm]	$\sigma_1$ [kPa]	$\sigma_3$ [kPa]	u  [cm]	$\sigma_1$ [kPa]	$\sigma_3$ [kPa]	u  [cm]	$\sigma_1$ [kPa]	$\sigma_3$ [kPa]	u  [cm]	$\sigma_1$ [kPa]	$\sigma_3$ [kPa]	
2	0.82	-13158	-3762	1.84	-8765	-4936	0.80	-13068	-3731	-1.59	-9045	-4960	Plasticizzazione sp. 1.0m ai piedritti
3	3.19	-5432	-1186	4.57	-6354	-1451	3.16	-5396	-1174	-3.81	-5969	-1413	Plasticizzazione sp. 5.0m ai piedritti e 2.0m in chiave
4	3.51	-5119	-1082	4.83	-5642	-1244	3.48	-5080	-1069	-4.02	-5372	-1266	Plasticizzazione sp. 5.0m ai piedritti e 2.0m in chiave
5	3.67	-5012	-1046	4.98	-5274	-1090	3.66	-4983	-1037	-4.20	-4980	-1083	Plasticizzazione sp. 5.0m ai piedritti e 2.0m in chiave

$u$  = spostamento totale cumulativo (positivo se abbassamento, negativo se sollevamento)

$\sigma_1$  = sforzo principale totale massimo

$\sigma_3$  = sforzo principale totale minimo

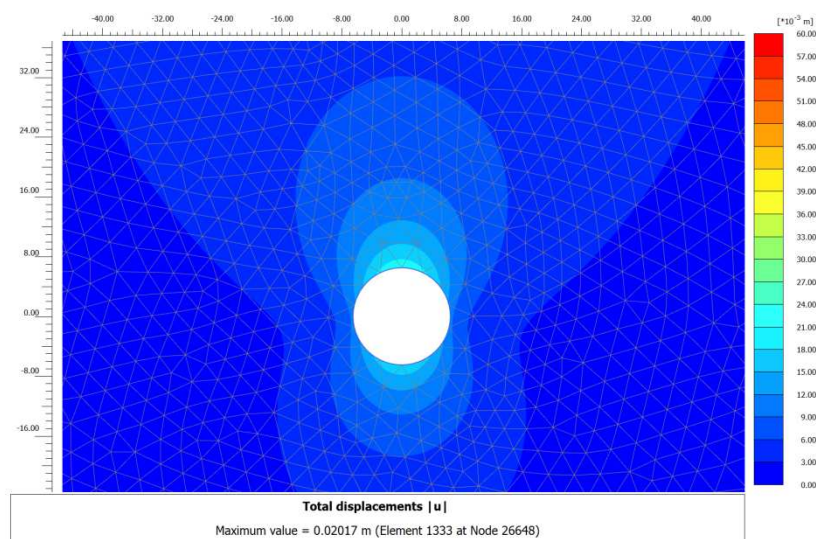
**Tabella 36 - Analisi di interazione – Sez. Scavo Meccanizzato copertura 400m: risultati dell'analisi**



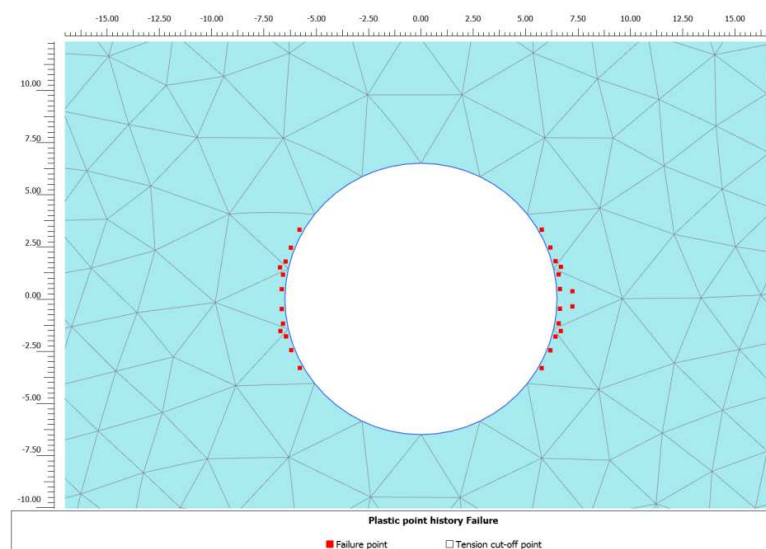
**Figura 96 - Nodi rilevati nella zona del cavo**

### FASE 2

Viene simulato il rilascio a cavo libero in corrispondenza del fronte di scavo. Gli spostamenti al contorno del cavo risultano variabili, con valori di 0.80cm ai piedritti a 1.84 in calotta e 1.60cm in arco rovescio. Le zone plastiche sono poco sviluppate e presenti in corrispondenza del piano dei centri, con estensione massima pari a circa 1m. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 13158 kPa (piano dei centri) mentre la massima tensione principale minima è di 3731 kPa (piano dei centri).



**Figura 97 – Campo spostamenti fase 2**

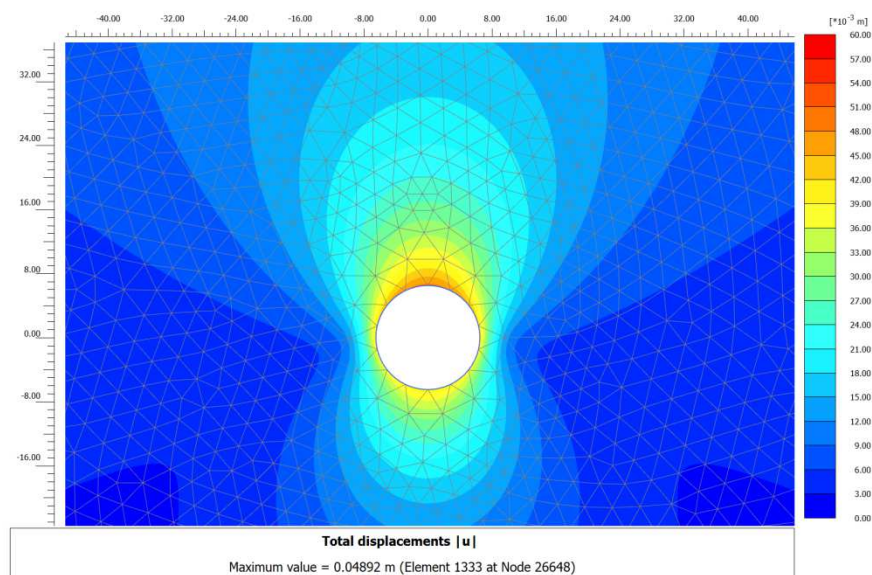


**Figura 98 – Sviluppo zone plastiche fase 2**

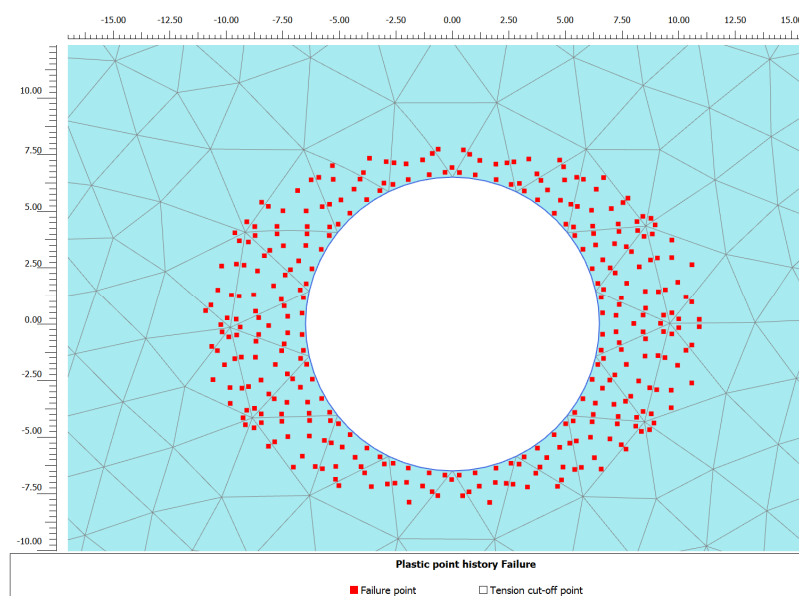
### FASE 3



Viene simulata l'esecuzione dell'avanzamento a 6 m di distanza dal fronte. Il cedimento cumulato in calotta è pari a 4.6 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 3.2 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 3.8 cm. Le zone plastiche rispetto al caso precedente subiscono un'estensione, estendendosi dai piedritti (5.0m di spessore) e nelle due chiavi (2.0m di spessore). Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 6354 kPa (calotta) mentre la massima tensione principale minima è di 1174 kPa (piano dei centri).



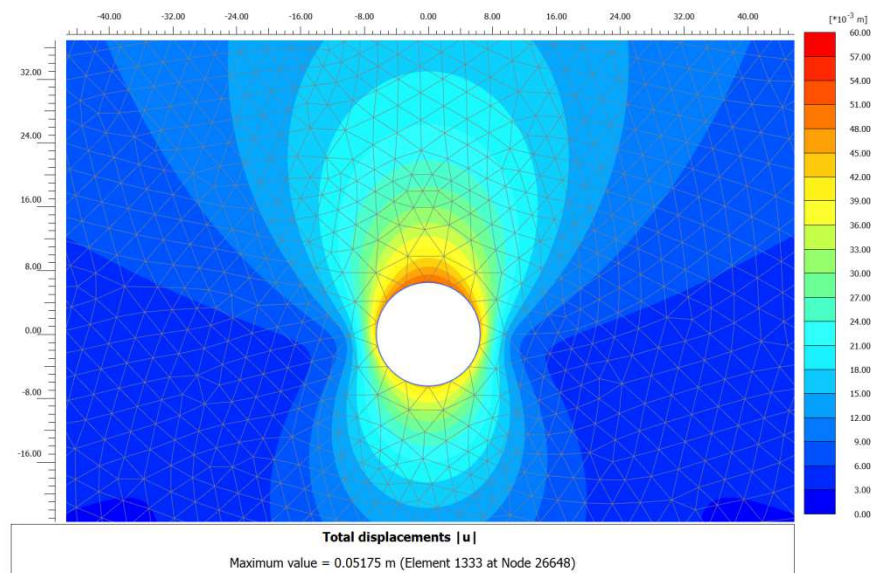
**Figura 99 – Campo spostamenti fase 3**



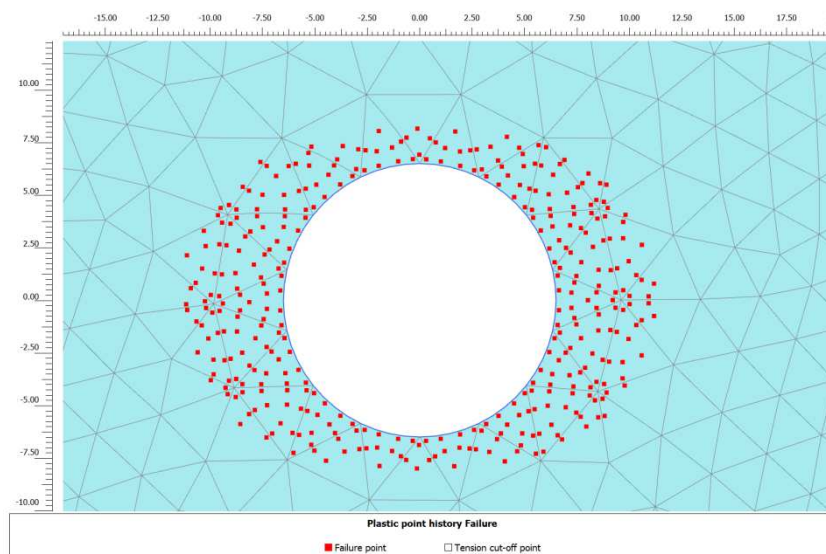
**Figura 100 – Sviluppo zone plastiche fase 3**

#### FASE 4

Viene simulata l'esecuzione dell'avanzamento a 10 m di distanza dal fronte. Il cedimento cumulato in calotta è pari a 5.1 cm al bordo dello scavo, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 3.5 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 4.0 cm. Le zone plastiche rispetto al caso precedente mostrano un'estensione praticamente inalterata, estendendosi dai piedritti (5.0m di spessore) e nelle due chiavi (2.0m di spessore). Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 5642 kPa (calotta) mentre la massima tensione principale minima è di 1068 kPa (piano dei centri).



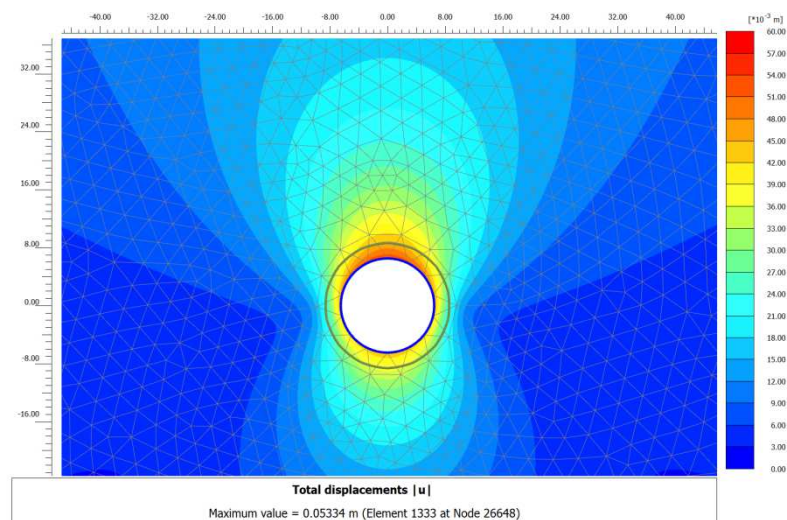
**Figura 101 – Campo spostamenti fase 4**



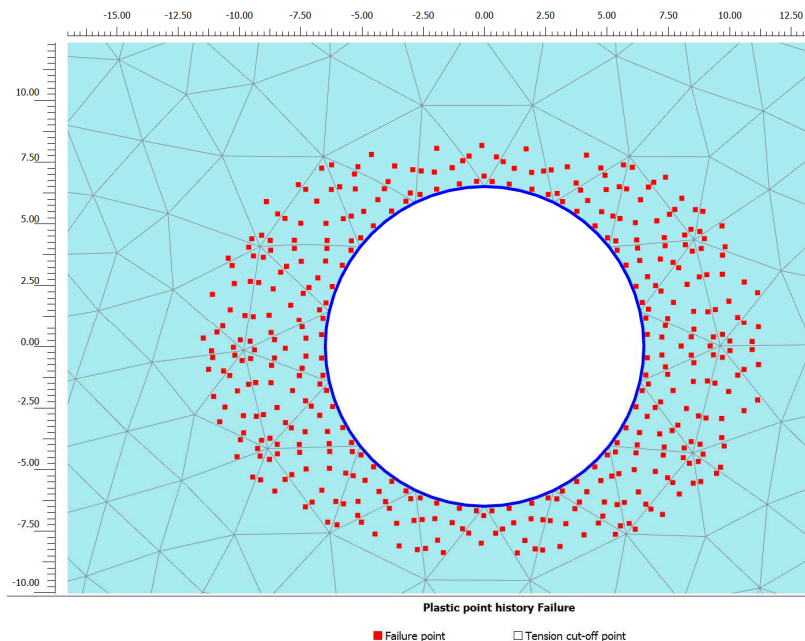
**Figura 102 – Sviluppo zone plastiche fase 4**

### FASE 5

Viene simulata l'installazione del rivestimento definitivo in conci prefabbricati, associato allo scarico totale. Il cedimento cumulato in calotta è pari a 5.53 cm al bordo dello scavo, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 3.7 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 4.2 cm. Le zone plastiche raggiungono un'estensione di circa 4.0m. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 5274 kPa (arco rovescio) mentre la massima tensione principale minima è di 1036 kPa (calotta).



**Figura 103 – Campo spostamenti fase 5**



**Figura 104 – Sviluppo zone plastiche fase 5**

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	120 di 141

#### 9.7.4 Verifiche strutturali SLU del rivestimento definitivo

Nella tabella seguente si riportano le caratteristiche simulate dei rivestimenti definitivi.

Tipo di prerivestimento	Rivestimento definitivo				
Spessore simulato del rivestimento definitivo in conci prefabbricati [m]	0.50				
<p>Nel modello numerico il rivestimento è stato modellato mediante elementi "beam", tenendo in considerazione che i conci sono discontinui e sfalsati. Nello specifico, considerando la fascia risultante dall'accostamento di una coppia di anelli consecutivi con posizionamento sfalsato dei giunti, la sezione di verifica a pressoflessione conserva la rigidità assiale di entrambi gli anelli e la rigidità flessionale di uno solo di essi.</p> <p>L'area della coppia di anelli è data da:</p> <p><math>A' = (2 \cdot 1.5) \cdot 0.5 = 1.5 \text{ m}^2</math></p> <p>L'inerzia del singolo anello è espressa da:</p> <p><math>J' = (1/12) \cdot 1.5 \cdot 0.5^4 = 0.015625 \text{ m}^4</math></p> <p>Pertanto nel calcolo, riferito a metro di rivestimento, si ha:</p> <p><math>A = A' / (2 \cdot L) = 1.5 / (2 \cdot 1.5) = 0.5 \text{ m}^2/\text{m}</math></p> <p><math>J = J' / (2 \cdot L) = 1.5 / (2 \cdot 1.5) = 0.005208 \text{ m}^4/\text{m}</math></p> <p>La tabella successiva sintetizza i parametri caratteristici del rivestimento considerato nell'analisi.</p>					
Struttura	$\gamma$	E	$\nu$	EA	EJ
	[kN/m <sup>3</sup> ]	[MPa]	[-]	[kN/m]	[kNm <sup>2</sup> /m]
CONCI PREFABBRICATI	25	34000	0.2	17000000	177072
<p><math>\gamma</math> = volume weight  E = elastic modulus  <math>\nu</math> = Poisson's ratio  EA = axial stiffness  EJ = bending stiffness</p>					

**Tabella 37 - Analisi di interazione – Sez. Scavo Meccanizzato copertura 400m: definizione delle caratteristiche dei rivestimenti**

La verifica strutturale del rivestimento definitivo prevede il confronto tra le sollecitazioni di calcolo, ottenute a partire dai risultati del modello numerico applicando i relativi coefficienti parziali, e le resistenze di calcolo definite dai punti  $M_{Rd}$ ,  $N_{Rd}$  che individuano il dominio resistente nel piano M, N. In ragione della presenza dei giunti (che non dovranno essere accoppiati fra anelli consecutivi), le verifiche sono condotte sulla base di una sezione resistente costituita da due conci affiancati con armatura di un solo concio (considerando, quindi, la presenza del giunto per l'anello adiacente). La verifica a taglio si basa sul contributo del solo anello senza giunto.

La lunghezza di riferimento del concio è pari a 1.50m, da cui le seguenti sezioni di verifica:

- Pressoflessione: 300 x 50cm;
- Taglio: 150 x 50cm.

Per la verifica a taglio, il valore resistente di calcolo è ottenuto in accordo con la normativa vigente (DM 14/01/2008 par.4.1.2.1.3. e Circolare n.617/2009).



 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA					
	GALLERIA ROCCHETTA Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	COMMESSA IF0G	LOTTO 01	CODIFICA D 07 RB	DOCUMENTO GN0300 001	REV. A

Il rivestimento definitivo è previsto armato realizzato in conci prefabbricati di spessore 0.50m con la seguente armatura:

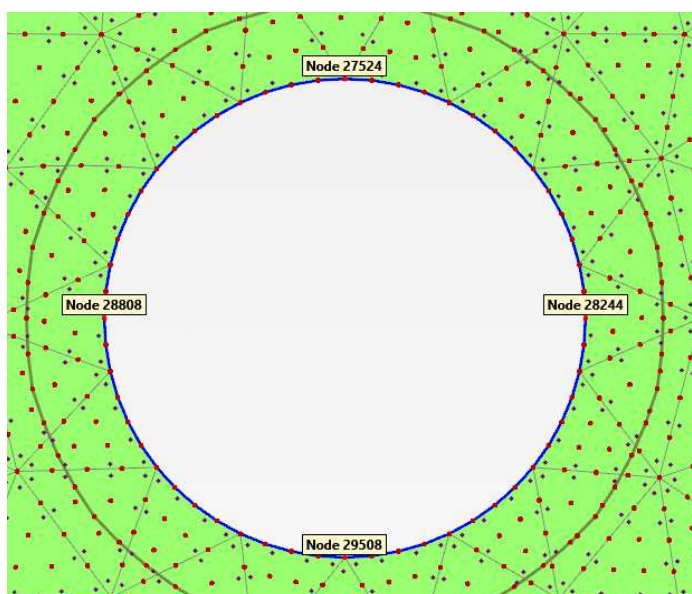
- Copriferro 4.0cm
- Armatura longitudinale:  $\phi 12/15\text{cm}$ ;
- Armatura trasversale:  $\phi 14/15\text{cm}$ ;
- Armatura a taglio staffe  $\phi 12$  a due bracci passo 15cm
- Armatura perimetrale: 2 ferri  $\phi 10$ .

L'incidenza delle armature è di circa 100kg di acciaio per  $\text{m}^3$ .

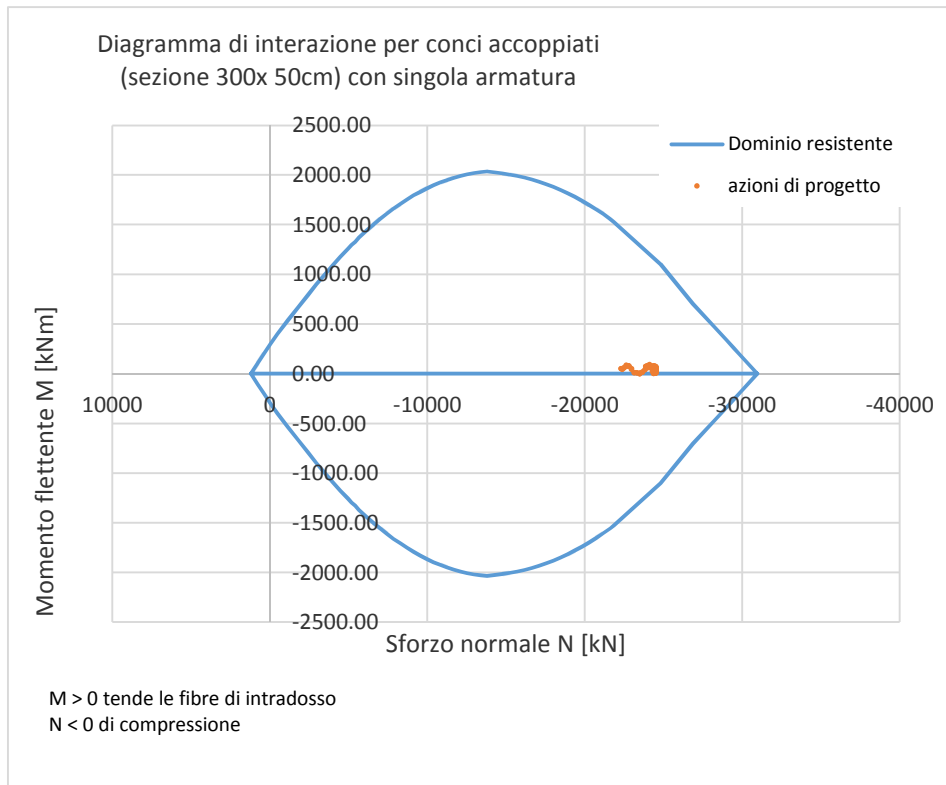
Le tabelle seguenti sintetizzano le sollecitazioni ottenute, per ogni fase, nelle zone di maggiore interesse del rivestimento: zona di calotta, di contatto calotta-piedritti e piedritti-arco rovescio, dei piedritti e di arco rovescio, rilevate in corrispondenza dei nodi della figura a seguire.

	Sollecitazioni	Calotta	Piedritto		Arco rovescio
			sinistro	destro	
<b>Fase 5</b>	N [kN/m]	-5718	-6247	-6248	-6115
	M [kNm/m]	-14	-20	-21	-19
	T [kN/m]	-8	-1	0	2

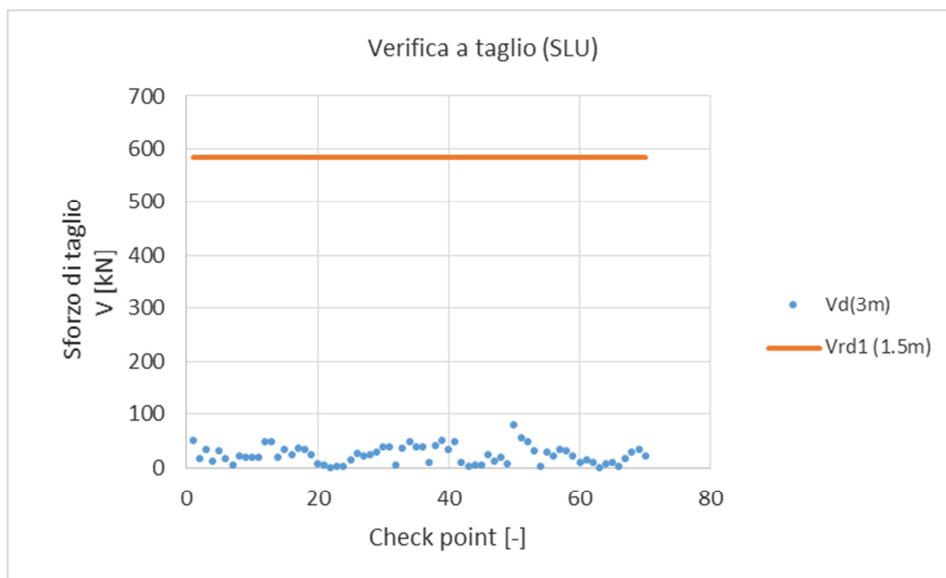
**Tabella 38 - Analisi di interazione – Sez. Scavo Meccanizzato copertura 400m: Sollecitazioni nel rivestimento definitivo**



**Figura 105 - Sez. Scavo Meccanizzato copertura 400m. Nodi rilevati del rivestimento definitivo**



**Figura 106 - Dominio resistente SLU calotta (B=3.00 m, H=0.50 m) – Fase 5**



**Figura 107 - Verifica SLU taglio (B=1.50 m, H=0.50 m) – Fase 5**

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	123 di 141

### 9.7.5 Verifiche strutturali SLE del rivestimento definitivo

Le verifiche SLE del rivestimento definitivo sono finalizzate a prevenire la formazione di un quadro fessurativo tale da compromettere la durabilità dell'opera. A tal fine la Normativa (DM 14/01/2008 par.4.1.2.1.3. e Circolare n.617/2009) stabilisce un limite massimo all'ampiezza delle fessure (SLE di fessurazione) ed al contempo, impone il rispetto di opportuni limiti tensionali sia nell'acciaio che nel calcestruzzo (SLE di tensione).

Nello specifico, le verifiche agli SLE di fessurazione della calotta e arco rovescio non evidenziano fessure.

Anche le verifiche SLE di tensione per la calotta e arco rovescio risultano soddisfatte sia lato calcestruzzo che lato acciaio rispettando i valori limite imposti sia dalla normativa NTC2008 che dal Manuale RFI 2016.

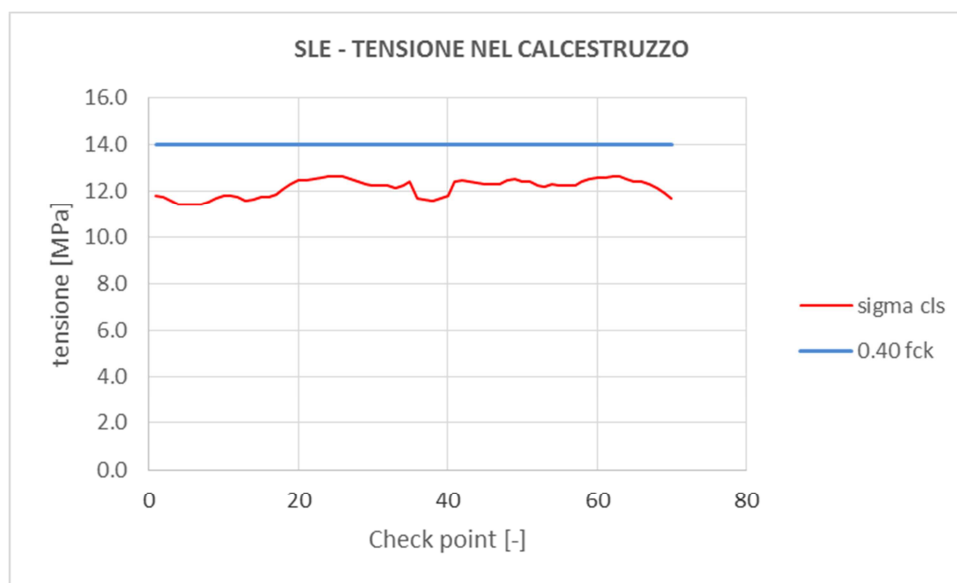
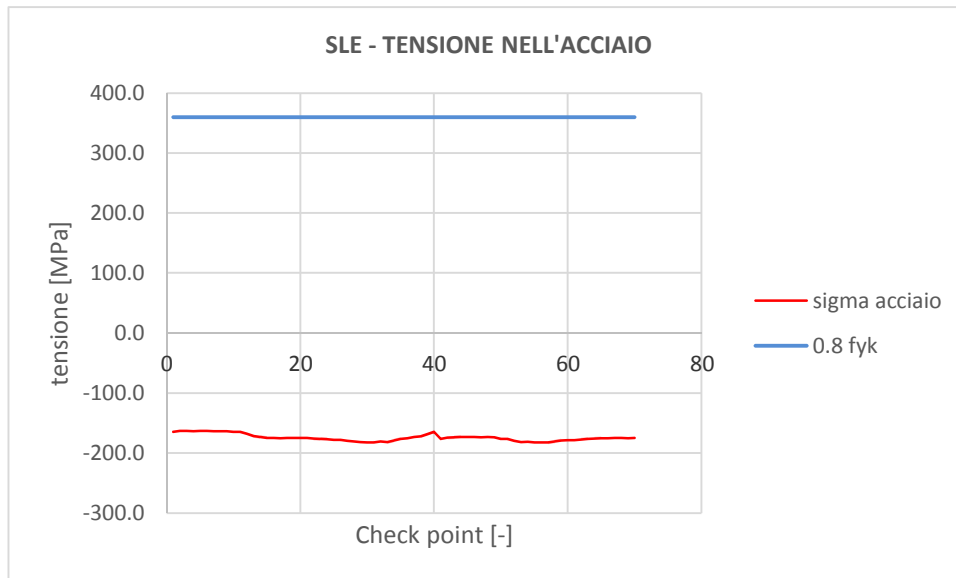
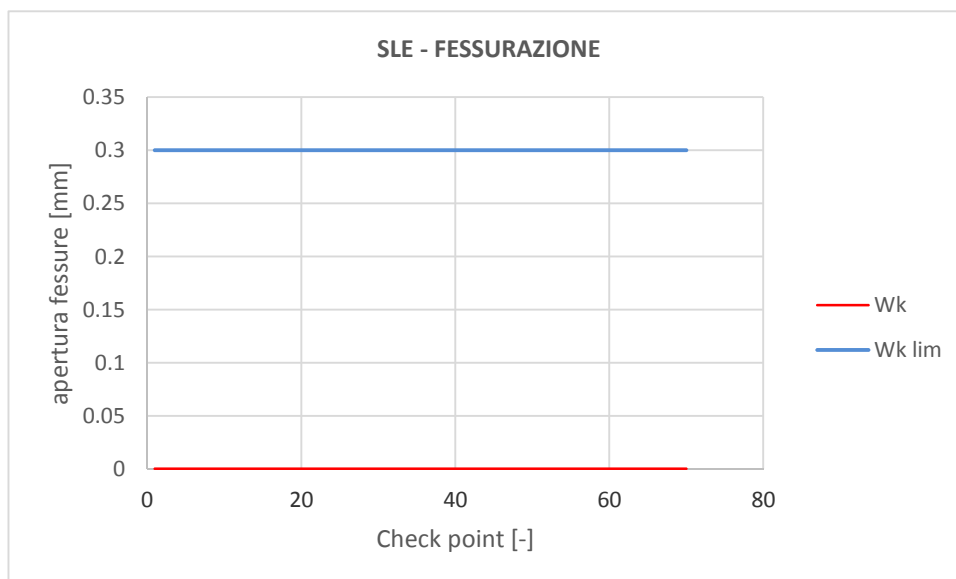


Figura 108 - Verifiche SLE tensione cls- Fase 5



**Figura 109 - Verifiche SLE tensione acciaio- Fase 5**



**Figura 110- Verifiche SLE fessurazione- Fase 5**

I risultati delle analisi sono riassunti in tabelle; input e output grafici del modello di calcolo sono riportati integralmente in Allegato.



 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	125 di 141

## 9.8 VERIFICHE STATICHE CONCI PREFABBRICATI IN FASE TRANSITORIA

Nel presente paragrafo sono riportate le verifiche statiche dei conci prefabbricati nelle seguenti fasi transitorie di costruzione, trasporto e montaggio:

- rimozione dei casseri;
- prima movimentazione;
- stoccaggio dalla scasseratura alla completa maturazione;
- montaggio (verifica al sollevamento del concio dall'erettore);
- spinta dei martinetti (verifica della pressione di contatto sotto le scarpe dei martinetti di spinta – verifica delle trazioni indotte nel calcestruzzo per effetto della pressione applicata dai martinetti di spinta, verifica a pressoflessione sul piano longitudinale).

I conci, realizzati in stabilimento, vengono estratti dai casseri mediante l'apertura degli stessi, sollevati e trasportati all'area di stoccaggio.

Si assume che tali operazioni vengano effettuate quando il calcestruzzo ha raggiunto una resistenza caratteristica  $R_{ck} \geq 15 \text{ N/mm}^2$ .

Dopo un adeguato periodo di stoccaggio, allorché il calcestruzzo ha raggiunto la resistenza caratteristica di progetto ( $R_{ck} \geq 45 \text{ N/mm}^2$ ), si procede al trasporto in cantiere.

La posa in opera in galleria avviene tramite apposito meccanismo erettore, disposto immediatamente a tergo del dispositivo di scavo.

Le verifiche vengono eseguite considerando le condizioni statiche più gravose.

Per le verifiche dei conci prefabbricati è stata considerata un'armatura tipo costituita da:

- copriferro 4 cm;
- armatura trasversale: 10+10 Ø 14;
- armatura longitudinale: 30+30 Ø 12;
- armatura perimetrale : 2+2 Ø 10;
- armatura a taglio staffe  $\phi$  12 a due bracci passo 15cm;

Tale armatura corrisponde ad un'incidenza di circa 100kg/m<sup>3</sup>, in linea con i quantitativi di armatura considerati nelle verifiche strutturali riportate nei paragrafi precedenti.

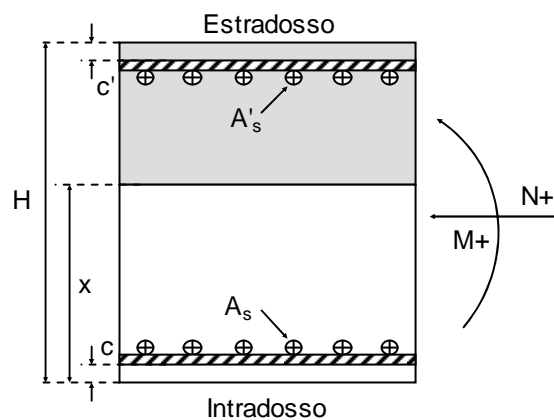
Per il calcolo della resistenza della sezione sono stati utilizzati i seguenti fattori di sicurezza parziali:

- per la resistenza a compressione del cls  $\gamma_c = 1.6$ ;
- per la resistenza dell'acciaio  $\gamma_s = 1.15$

*Conci prefabbricati*

- B = 150 cm

- $H = 40 \text{ cm}$
- $c = 4.0 \text{ cm}$
- $c' = 4.0 \text{ cm}$
- $A_s = 10 \varnothing 15 \text{ mm}$
- $A'_s = 10 \varnothing 15 \text{ mm}$



Per la verifica dei conci in fase provvisoria si è assunta una resistenza a compressione di calcolo riferita a carichi di breve durata pari a:

- Resistenza caratteristica di calcolo SLU ( $R_{ck} = 15 \text{ MPa}$ ):  $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c = 7.5 \text{ MPa}$
- Resistenza caratteristica di calcolo SLU ( $R_{ck} = 45 \text{ MPa}$ ):  $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c = 21.87 \text{ MPa}$

Si riportano di seguito i valori dei momenti resistenti in assenza di sollecitazione normale per  $R_{ck} = 15 \text{ MPa}$  e per  $R_{ck} = 45 \text{ MPa}$ :

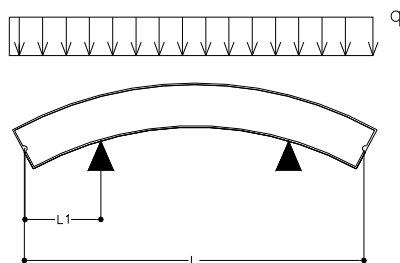
- $M_{rd}(R_{ck}=15\text{MPa}) = 190.8 \text{ KNm}$
- $M_{rd}(R_{ck}=45\text{MPa}) = 198.6 \text{ KNm}$

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	127 di 141

### 9.8.1 Rimozione dei casseri

Durante la fase di scasseratura, oltre al peso proprio del concio ed alla maggiorazione per carichi dinamici, si suppone la presenza delle forze di adesione alla superficie del cassero valutata, sulla base di esperienze analoghe, in circa  $2.0 \text{ kN/m}^2$ .

Il calcolo delle sollecitazioni viene eseguito supponendo, cautelativamente, che il concio venga sollevato ai due lati.



La rimozione dai casseri verrà effettuata solo dopo che il calcestruzzo abbia raggiunto la resistenza  $R_{ck}$  di  $15 \text{ N/mm}^2$ .

Si è ipotizzato che il concio venga agganciato e sollevato dai lati.

Il dimensionamento dei conci tiene conto di un raggio medio:

$$r_m = 5.70 + 0.50/2 = 5.95 \text{ m}$$

Le caratteristiche geometriche e di resistenza del singolo concio risultano pari a:

- $b_m = 2 \cdot \pi \cdot r_m / 8 = 4.673 \text{ m}$
- $f_{ck} = 0.83 \cdot 15 = 12.45 \text{ N/mm}^2$
- $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c = 12.45 \cdot 1.6 = 7.78 \text{ N/mm}^2$
- $f_{ctm} = 0.27 \cdot R_{ck} \cdot 2/3 = 1.64 \text{ N/mm}^2$
- $f_{ctk} = 0.7 \cdot f_{ctm} = 1.15 \text{ N/mm}^2$
- $f_{ctd} = 1.15 / 1.6 = 0.72 \text{ N/mm}^2$

I carichi che agiscono sul singolo concio sono:

$$P_p = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0.5 \text{ m} \cdot 1.5 \text{ m} = 18.75 \text{ kN/m (peso proprio)}$$

$$I P_p = 0.4 \cdot P_p = 7.5 \text{ kN/m (incremento dovuto all'effetto dinamico/vibrazioni)}$$

$$P_q = 2 \cdot 1.5 \text{ m} = 3 \text{ kN/m (incremento dovuto all'aderenza tra concio e cassero di } 2 \text{ kN/m}^2)$$

$$P_{tot} = 29.25 \text{ kN/m}$$

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	128 di 141

Le sollecitazioni massime risultano:

$$M_1 = 29.25 \cdot (4.673)^2/8 = 79.84 \text{ kNm}$$

$$V_1 = 29.25 \cdot (4.673)/2 = 68.34 \text{ kN}$$

$$M_{sd1} = \gamma_q \cdot M_1 = 1.5 \cdot 60.75 = 119.76 \text{ kNm}$$

$$V_{sd1} = \gamma_q \cdot V_1 = 1.5 \cdot 54.00 = 102.51 \text{ kN}$$

Per quanto riguarda la verifica a flessione si ottiene:

$$M_{sd1} = 119.76 \text{ kNm} < M_{rd}(R_{ck}=15\text{MPa}) = 190.8 \text{ KNm}$$

Pertanto, la verifica risulta soddisfatta.

Per la verifica a taglio, considerando le caratteristiche dei materiali precedentemente riportate e la sezione di progetto armata come sopra indicato, si ottiene quanto segue.

*Elementi privi di armatura a taglio:*

$$V_{Rd} = \left\{ 0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} / \gamma_c + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b_w \cdot d \geq (v_{\min} + 0,15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$$

Si ottiene

$$V_{sd1 \max} = 102.51 < 190.8 \text{ kN}$$

Pertanto, la verifica risulta soddisfatta.

Si dispone, tuttavia, di un'armatura a taglio, staffe  $\phi$  12 a due bracci passo 15cm:

Si ottiene:

$$V_{sd1 \max} = 102.51 \text{ kN} < 1057.4 \text{ kN}$$

### 9.8.2 *Prima movimentazione*

I carichi che agiscono sul singolo concio sono:

$$P_p = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0.5 \text{ m} \cdot 1.5 \text{ m} = 18.75 \text{ kN/m (Peso proprio)}$$

$$IP_p = 0.6 \cdot P_p = 11.25 \text{ kN/m (dovuto ad effetti dinamici)}$$

$$P_{tot} = 30 \text{ kN/m}$$

Le sollecitazioni massime risultano:

$$M_2 = 30 \cdot (4.673)^2/8 = 81.89 \text{ kNm}$$

$$V_2 = 30 \cdot (4.673)/2 = 70.10 \text{ kN}$$

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	129 di 141

$$M_{sd2} = \gamma_q \cdot M_1 = 1.5 \cdot 60.75 = 122.84 \text{ kNm}$$

$$V_{sd2} = \gamma_q \cdot V_1 = 1.5 \cdot 54.00 = 105.14 \text{ kN}$$

Le sollecitazioni sui conci sono analoghe ai valori stimati con la combinazione di carico precedente, le verifiche sono pertanto soddisfatte.

### 9.8.3 Stoccaggio dei conci dalla scasseratura alla completa maturazione

I conci saranno accatastati verticalmente in gruppi di 4 elementi più il concio di chiave. Il peso totale della singola catasta si scarica sul terreno attraverso due travetti di legno a sezione rettangolare di 12×10 cm, posti ad un interasse di 120 cm. I conci sono separati da travetti di legno intermedi 10×8, disposti ad un interasse di 100 cm (si considera che possa verificarsi un disallineamento dei travetti distanziatori in legno di 10 cm a destra e a sinistra).

La verifica viene condotta sul concio posizionato in fondo alla catasta. Sul concio in questione agisce il peso proprio ed il peso dei conci superiori trasferiti dai travetti di appoggio. Si è considerato un coefficiente moltiplicativo pari a 1.5 per il peso dell'ultimo concio e del concio di chiave, per tener conto delle sollecitazioni dinamiche durante la fase di accatastamento.

Lo stoccaggio dei conci in questa fase verrà effettuata solo dopo che il calcestruzzo abbia raggiunto la resistenza  $R_{ck}$  di 15 N/mm<sup>2</sup>.

Il dimensionamento dei conci tiene conto di un raggio medio:

$$r_m = 5.70 + 0.50/2 = 5.95 \text{ m}$$

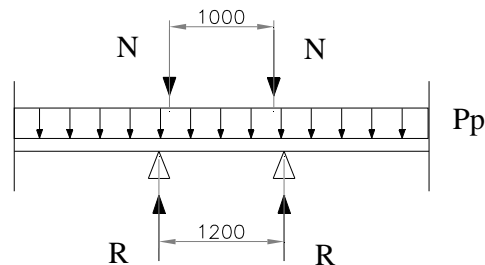
Le caratteristiche geometriche e di resistenza del singolo concio risultano pari a:

- $b_m = 2 \cdot \pi \cdot r_m / 6 = 4.673 \text{ m}$
- $f_{ck} = 0.83 \cdot 15 = 12.45 \text{ N/mm}^2$
- $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c = 12.45 \cdot 1.6 = 7.78 \text{ N/mm}^2$
- $f_{ctm} = 0.27 \cdot R_{ck} \cdot 2/3 = 1.64 \text{ N/mm}^2$
- $f_{ctk} = 0.7 \cdot f_{ctm} = 1.15 \text{ N/mm}^2$
- $f_{ctd} = 1.15 / 1.6 = 0.72 \text{ N/mm}^2$

I carichi che agiscono sul singolo concio sono:

$$P_p = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0.5 \text{ m} \cdot 1.5 \text{ m} = 18.75 \text{ kN/m (peso proprio)}$$

$$N = [(18.75 \cdot 4.673 \cdot 2) + (18.75 \cdot 4.673 \cdot 1.5) + (18.75 \cdot 4.673 \cdot 1.5 \cdot 1.5)] / 2 = 251.9 \text{ kN}$$



La reazione in corrispondenza dei travetti risulta pari a:

$$R = 18.75 \cdot 4.673/2 + 119.7 = 295.71 \text{ kN}$$

Le sollecitazioni nel concio di base risultano:

Sezione di appoggio

$$M_{3a} = 18.75 \cdot (4.673/2 - 0.6)^2/2 = 28.27 \text{ kNm}$$

$$V_{3a} = 18.75 \cdot (4.673/2 - 0.6) = 32.56 \text{ kN}$$

$$M_{sd3a} = 1.5 \cdot 20.42 = 42.40 \text{ kNm}$$

$$V_{sd3a} = 1.5 \cdot 24.75 = 48.84 \text{ kN}$$

Sezione di carico

$$M_{3b} = 18.75 \cdot (4.673/2 - 0.5)^2/2 - 295.71 \cdot 0.1 = 2.05 \text{ kNm}$$

$$V_{3b} = 18.75 \cdot (4.673/2 - 0.5) - 295.71 = -261.28 \text{ kN}$$

$$M_{ud3b} = 1.5 \cdot 7.78 = 3.08 \text{ kNm}$$

$$V_{ud3b} = 1.5 \cdot 125.65 = 391.91 \text{ kN}$$

Mezzeria

$$M_{3c} = 18.75 \cdot (4.673/2)^2/2 - 295.71 \cdot 0.6 + 251.9 \cdot 0.5 = 0 \text{ kNm}$$

$$V_{3c} = 18.75 \cdot (4.673/2) - 295.71 + 251.9 = 0.0 \text{ kN}$$

$$M_{sd3c} = 0.0 \text{ kNm}$$

$$V_{sd3c} = 0.0 \text{ kN}$$

Per la verifica a taglio, considerando le caratteristiche dei materiali precedentemente riportate e la sezione di progetto armata come sopra indicato, si ottiene quanto segue.

*Elementi privi di armatura a taglio:*

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	131 di 141

$$V_{Rd} = \left\{ 0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} / \gamma_c + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b_w \cdot d \geq (v_{\min} + 0,15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$$

Si ottiene

$$V_{sd1 \max} = 391.91 > 190.8 \text{ kN}$$

Pertanto, la verifica risulta non soddisfatta.

Si dispone, tuttavia, di un'armatura a taglio, staffe  $\phi$  12 a due bracci passo 15cm:

Si ottiene:

$$V_{sd1 \max} = 391.91 \text{ kN} < 1057.4 \text{ kN}$$

Pertanto, la verifica risulta soddisfatta.

#### 9.8.4 Stoccaggio dei conci in cantiere (alla completa maturazione)

I conci saranno accatastati verticalmente in gruppi di 8 elementi (un'anello completo) più il concio di chiave. Il peso totale della singola catasta si scarica sul terreno attraverso due travetti di legno a sezione rettangolare di 12×10 cm, posti ad un interrasso di 120 cm. I conci sono separati da travetti di legno intermedi 10×8, disposti ad un interrasso di 100 cm (si considera che possa verificarsi un disallineamento dei travetti distanziatori in legno di 10 cm a destra e a sinistra).

La verifica viene condotta sul concio posizionato in fondo alla catasta. Sul concio in questione agisce il peso proprio ed il peso dei conci superiori trasferiti dai travetti di appoggio. Si è considerato un coefficiente moltiplicativo pari a 1.5 per il peso degli ultimi due conci più il concio di chiave, per tener conto delle sollecitazioni dinamiche durante la fase di accatastamento.

Lo stoccaggio dei conci alla completa maturazione verrà effettuata solo dopo che il calcestruzzo abbia raggiunto la resistenza  $R_{ck}$  di 45 N/mm<sup>2</sup>.

Il dimensionamento dei conci tiene conto di un raggio medio:

$$r_m = 5.70 + 0.50/2 = 5.95 \text{ m}$$

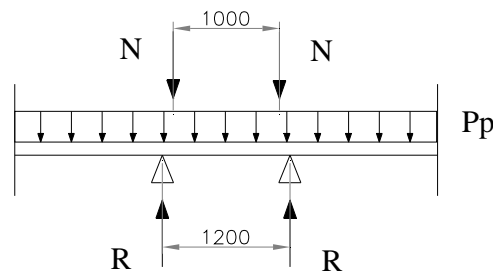
Le caratteristiche geometriche e di resistenza del singolo concio risultano pari a:

- $b_m = 2 \cdot \pi \cdot r_m / 8 = 4.673 \text{ m}$
- $b_{chiave} = 1.5 \text{ m}$
- $f_{ck} = 35 \text{ N/mm}^2$
- $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c = 35 \cdot 1.6 = 21.87 \text{ N/mm}^2$
- $f_{ctm} = 0.27 \cdot R_{ck} \cdot 2/3 = 3.41 \text{ N/mm}^2$
- $f_{ctk} = 0.7 \cdot f_{ctm} = 2.39 \text{ N/mm}^2$
- $f_{ctd} = 2.39 / 1.6 = 1.49 \text{ N/mm}^2$

I carichi che agiscono sul singolo concio sono:

$$P_p = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0.5 \text{ m} \cdot 1.5 \text{ m} = 18.75 \text{ kN/m (peso proprio)}$$

$$N = [(18.75 \cdot 4.673 \cdot 6) + (18.75 \cdot 4.673 \cdot 2 + 18.75 \cdot 1.5) \cdot 1.5] \cdot 0.5 = 415.34 \text{ kN}$$



La reazione in corrispondenza dei travetti risulta pari a:

$$R = 18.75 \cdot 4.673 \cdot 0.5 + 415.34 = 459.20 \text{ kN}$$

Le sollecitazioni nel concio risultano:

Sezione di appoggio

$$M_{3a} = 18.75 \cdot (4.673/2 - 0.6)^2 / 2 = 28.27 \text{ kNm}$$

$$V_{3a} = 18.75 \cdot (4.673/2 - 0.6) = 32.56 \text{ kN}$$

$$M_{sd3a} = 1.5 \cdot 20.42 = 42.40 \text{ kNm}$$

$$V_{sd3a} = 1.5 \cdot 24.75 = 48.84 \text{ kN}$$

Sezione di carico

$$M_{3b} = 18.75 \cdot (4.673/2 - 0.5)^2 / 2 - 459.2 \cdot 0.1 = -14.30 \text{ kNm}$$

$$V_{3b} = 18.75 \cdot (4.673/2 - 0.5) - 459.2 = -424.77 \text{ kN}$$

$$M_{sd3b} = 1.5 \cdot -0.21 = 21.45 \text{ kNm}$$

$$V_{sd3b} = 1.5 \cdot 205.50 = 637.16 \text{ kN}$$

Mezzeria

$$M_{3c} = 18.75 \cdot (4.673/2)^2 / 2 - 459.2 \cdot 0.6 + 415.34 \cdot 0.5 = -16.66 \text{ kNm}$$

$$V_{3c} = 18.75 \cdot (4.673/2) - 459.2 + 415.34 = 0.0 \text{ kN}$$

$$M_{sd3c} = 1.5 \cdot -2.08 = 24.99 \text{ kNm}$$



 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	133 di 141

$$V_{sd3c} = 0.0 \text{ kN}$$

Per la verifica a taglio, considerando le caratteristiche dei materiali precedentemente riportate e la sezione di progetto armata come sopra indicato, si ottiene quanto segue.

*Elementi privi di armatura a taglio:*

$$V_{Rd} = \left\{ 0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} / \gamma_c + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b_w \cdot d \geq (v_{\min} + 0,15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$$

Si ottiene

$$V_{sd1 \max} = 637.16 > 190.8 \text{ kN}$$

Pertanto, la verifica risulta non soddisfatta.

Si dispone, tuttavia, di un'armatura a taglio, staffe  $\phi$  12 a due bracci passo 15cm:

Si ottiene:

$$V_{sd1 \max} = 637.16 \text{ kN} < 1057.4 \text{ kN}$$

Pertanto, la verifica risulta soddisfatta.

### 9.8.5 Montaggio dei conci

Il concio viene sollevato dall'erettore tramite un inserto di presa collocato al suo centro e quindi si comporta come una trave su un unico appoggio.

I carichi che agiscono sul singolo concio sono:

$$P_p = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0.5 \text{ m} \cdot 1.5 \text{ m} = 18.75 \text{ kN/m (peso proprio)}$$

$$I P_p = 0.6 \cdot P_p = 11.25 \text{ kN/m (dovuto all'effetto dinamico)}$$

$$P_{tot} = 30 \text{ kN/m}$$

Le sollecitazioni nel concio di base risultano:

$$M_4 = 30 \cdot 4.673 / 2 \cdot 4.673 / 4 = 81.90 \text{ kNm}$$

$$V_4 = 30 \cdot (4.673) / 2 = 70.10 \text{ kN}$$

$$M_{sd4} = 1.5 \cdot 60.75 = 136.68 \text{ kNm}$$

$$V_{sd4} = 1.5 \cdot 54.00 = 105.14 \text{ kN}$$

Le sollecitazioni sui conci sono inferiori ai valori delle resistenze ultime ricavate precedentemente, le verifiche sono pertanto soddisfatte.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	134 di 141

### 9.8.6 Sforzi dovuti alla spinta dei martinetti

La massima forza prevista per la spinta dello scudo nelle fasi ordinarie di montaggio dei conci risulta pari a  $N_{\max}=75000$  kN; in situazioni del tutto particolari, con l'adozione di opportuni accorgimenti sul sistema oleodinamico di spinta, è possibile raggiungere, per intervalli di tempo molto brevi, il valore eccezionale di  $N=137500$  kN (valore massimo che può essere ottenuto dal circuito idraulico).

La spinta è fornita da 50 martinetti provvisti di piastra di ripartizione dalle dimensioni di 30×90 cm.

#### Verifiche in condizione di spinta di ordinaria

$$Q_{\text{tot}} = 75000 \text{ kN (spinta massima EPB)}$$

Nel calcolo si ipotizza che la spinta è esercitata da 50 martinetti.

Per ogni coppia di martinetti:

$$Q_{\text{coppia martinetti}} = 75000/25 = 3000 \text{ kN}$$

Si considera un'eccentricità di  $\pm 5$  cm.

Si ipotizza che su ogni concio agiscono tre coppie di martinetti:

$$N = 3000 \cdot 3 = 9000 \text{ kN}$$

$$M = 9000 \cdot 0.05 = 450 \text{ KNm}$$

Maggiorando con  $\gamma_q = 1.3$  (EC0, eq. 6.10b) si ha :

$$N_d = 1.3 \cdot 9000 = 11700 \text{ kN}$$

$$M_d = 1.3 \cdot 416.65 = 585 \text{ KNm}$$

$$N_{sd} = 11700/4.673 = 2503.75 \text{ kN/m}$$

$$M_{sd} = 585/4.673 = 125.19 \text{ KNm/m}$$

#### Verifiche in condizione di spinta eccezionale

$$Q_{\text{tot}} = 137500 \text{ kN (spinta massima EPB)}$$

Nel calcolo si ipotizza che la spinta è esercitata da 50 martinetti.

Per ogni coppia di martinetti:

$$Q_{\text{coppia martinetti}} = 137500/25 = 5500 \text{ kN}$$

Si considera un'eccentricità di  $\pm 5$  cm.

Si ipotizza che su ogni concio agiscono tre coppie di martinetti:

GALLERIA ROCCHETTA

Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	135 di 141

$$N = 5500 \cdot 3 = 16500 \text{ kN}$$

$$M = 16500 \cdot 0.05 = 825 \text{ KNm}$$

Adottando in questo caso  $\gamma_q = 1$  si ha:

$$N_d = 1 \cdot 16500 = 16500 \text{ kN}$$

$$M_d = 1 \cdot 825 = 825 \text{ KNm}$$

$$N_{sd} = 16500 / 4.673 = 3350.92 \text{ kN/m}$$

$$M_{sd} = 825 / 4.673 = 176.55 \text{ KNm/m}$$

Si dispone di un armatura longitudinale del concio composta da 30 $\varnothing$ 12 in intradosso ed estradosso equivalenti a ferri  $\varnothing$  12/16 su un metro lineare con copriferro 40 mm.

Momento resistente. Condizione di spinta ordinaria				
Classe CLS	As [cm <sup>2</sup> /ml]	Ferri	Mrd(N=Nsd)	VERIFICA
C35/45	6.79	6- $\varnothing$ 12	559.3	SODDISFATTA
Momento resistente. Condizione di spinta eccezionale				
Classe CLS	As [cm <sup>2</sup> /ml]	Ferri	Mrd(N=Nsd)	VERIFICA
C35/45	6.79	6- $\varnothing$ 12	634.1	SODDISFATTA

 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</b>	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	136 di 141

### 9.8.7 Verifica del carico concentrato per il singolo Martinetto

#### Verifica delle pressioni di contatto

Si ipotizza che il carico concentrato di ogni singolo martinetto sia applicato su una piastra 0.3 m × 0.9 m.

Spessore concio	s	0,50	m
Lunghezza trasversale media 1 concio	$b_{m1}$	4,67	m
n° coppie martinetti per ogni concio		3,00	
n° martinetti per ogni concio		6,00	

#### EUROCODICE (5.4.8.1)

piastra dimens. 0.3m x 0.9m

d1	0,3	
b1	0,9	
Ac1=d1 x b1	0,27	
area di ripartizione (5.4.8.1, Eurocodice 2)		
e	0,05	m
d	0,4	
b	0,779	
Ac=d x b	0,312	
Nu <sub>ordinarie</sub>	1500,000	kN
Nu <sub>eccezionale</sub>	2750,000	
Rck	45	N/mm <sup>2</sup>
fck	37,35	N/mm <sup>2</sup>
γc	1,6	
fcd	23,344	N/mm <sup>2</sup>
Frd <sub>u</sub>	8391,042162	kN
Fmax	20799,28125	

CONDIZIONE	Nu ≤ Frdu ≤ Fmax	
Ordinario 1500,0	8391,0	20799,3
Eccezionale 2750	8391,0	20799,3

La verifica risulta soddisfatta.

 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</b>	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA					
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA						
GALLERIA ROCCHETTA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	137 di 141

### Verifica di resistenza alle trazioni indotte

La spinta del martinetto determina una forza di divaricamento sul concio in direzione radiale che può essere stimata secondo la formula proposta da Leonhardt. (Vol. II - "Casi speciali di dimensionamento nelle costruzioni in c.a. e c.a.p", pag. 60)

Considerata la larghezza della superficie di applicazione del carico:

$a=d$	0,3	m
$d=s$	0,50	m (altezza della sezione, pari allo spessore del concio)
$d/a$	1,67	
$N_{\text{martinetto}}=Nu$	2750,00	kN

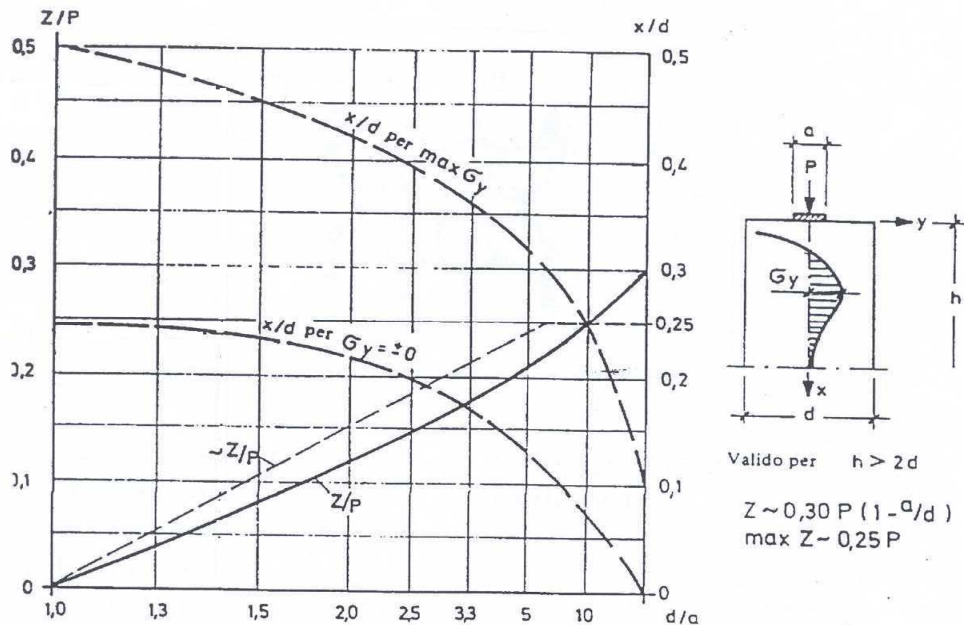
Considerando 6 martinetti per ogni concio, la forza di trazione è pari a:

$n_{\text{martinetti}}$	6,000	
$b=b_{m1}/n_{\text{martinetti}}$	0,7788	m
$Z=0.3*Nu(1-a/d)$	330,00	kN (forza di divaricamento)
$z=Z/b$	423,71	kN/m
$\sigma_{a \text{ adm}}$	450	MPa
Aa minima	9,4158	cm <sup>2</sup> / m (armatura minima necessaria per le trazioni di divaricamento)
Armatura predisposta per il frettaggio: $\phi=$	10	mm
Area barra	0,7854	cm <sup>2</sup>
n° barre	2	1+1 $\phi$ 10
passo	15	cm
Area armatura	10,4720	cm <sup>2</sup> /m

Per valutare la distanza a cui disporri i ferri, dal diagramma sul Leonhardt (pag. 60):

$x/d$ per $\sigma_y=0$	0,22
$x(\sigma_y=0)$	0,11 cm
$x/d$ per $\sigma_{y\text{max}}$	0,47
$x(\sigma_{y\text{max}})$	0,235 cm

L'armatura predisposta per assorbire le forze di trazione di divaricamento è pari a 1+1  $\phi$  10/15 cm e dovrà essere disposta tra i 11 e i 23 cm dal bordo libero sotto le scarpe di spinta dei martinetti.



**Figura 111 : Stato di tensione per forza concentrata**

### 9.8.8 Sollecitazioni dovute al peso del concio: errata manovra dei martinetti.

Viene di seguito presa in considerazione la sollecitazione agente sui bulloni a seguito di una temporanea sospensione del singolo concio ai soli bulloni (errata manovra dei martinetti).

Tale condizione di carico non è in alcun modo prevista nella normale procedura di montaggio. Risulta tuttavia opportuno verificare che, nel caso in cui un evento accidentale provochi la sospensione del concio, la resistenza dei connettori garantisca la sicurezza impedendo la caduta del concio stesso.

Il peso del concio è pari a:

$$P = 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0.50 \text{ m} \cdot 1.5 \text{ m} \cdot 4.673 \text{ m} = 87.62 \text{ kN}$$

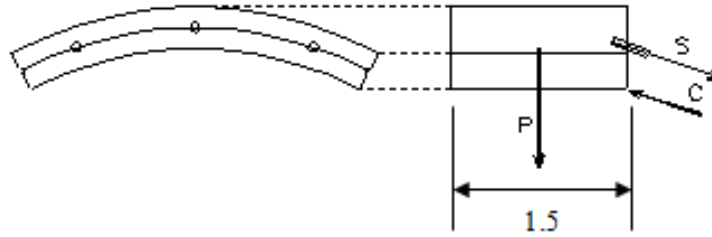
ed agisce con uno sforzo di taglio (ripartita sui 3 connettori) pari a

$$T = P/3 = 29.21 \text{ kN.}$$

Al momento flettente si oppone la coppia di forze data dalla trazione sui connettori e dalla compressione sui punti più bassi dove il concio si appoggia all'anello adiacente. Considerando collaboranti tutti e 3 i connettori a favore di sicurezza si considera il braccio della coppia minimo possibile (65 cm):

$$M = P \cdot (1.5/2) = 65.72 \text{ kN m}$$

$$M = S \cdot b_{\min} \cdot 3$$



Si ricava quindi la forza di trazione sul singolo connettore con riferimento :allo SLU ( $\gamma_q=1.5$ ):

$$S = M / (b_{min} * 3) = 65.72 / (0.65 * 3) = 33.70 \text{ kN}$$

$$S_d = S * \gamma_q = 50.55 \text{ kN}$$

$$T_d = T * \gamma_q = 43.82 \text{ kN}$$

Considerando dei Connettori

- tipo FAMA Smartblock 90-160/300-60 (o equivalenti)
- Resistenza a taglio  $\geq 60 \text{ kN}$
- Forza di estrazione (pull out)  $\geq 90 \text{ kN}$

Le verifiche risultano soddisfatte.

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA</p>												
<p>GALLERIA ROCCHETTA Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IF0G</td> <td>01</td> <td>D 07 RB</td> <td>GN0300 001</td> <td>A</td> <td>140 di 141</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	140 di 141
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	140 di 141								

## 10 FASE DI VERIFICA E MESSA A PUNTO DEL PROGETTO

### 10.1 MONITORAGGIO IN CORSO D'OPERA

Nella fase realizzativa dovrà essere posto in opera un adeguato programma di monitoraggio, volto a verificare la validità delle previsioni progettuali attraverso un confronto in corso d'opera tra le stesse previsioni e il comportamento del terreno al contorno e le prestazioni dei rivestimenti.

Il piano di monitoraggio prevede:

- il controllo dei principali parametri macchina desunti direttamente in fase di scavo dalla fresa tra cui: pressione di supporto del fronte di scavo, densità del materiale nella camera di scavo, pressione e volume del materiale di intasamento iniettato a tergo dei conci prefabbricati, peso e volume del materiale scavato, condizionamento del terreno, situazioni potenzialmente pericolose che possono verificarsi durante lo scavo.
- il monitoraggio delle deformazioni del rivestimento definitivo mediante barrette estensimetriche saldate sui ferri di armatura del concio, come definito negli specifici elaborati di progetto;
- in corrispondenza degli imbocchi e nelle zone di bassa copertura, il controllo degli spostamenti del piano campagna, mediante installazione di sezioni di misura topografica disposte trasversalmente all'asse della galleria, costituite da almeno 5 capisaldi;
- il controllo topografico degli spostamenti sugli edifici interferenti;
- il controllo delle deformazioni dell'ammasso al contorno della galleria mediante stazioni strumentate geotecniche costituite da inclinometri ed estensimetri;
- il controllo delle variazioni del regime delle pressioni interstiziali nel terreno al contorno della galleria mediante piezometri Casagrande o celle piezometriche, in funzione del contesto geotecnico.

Il sistema di monitoraggio dovrà essere predisposto in modo tale da garantire l'esame tempestivo e continuativo dei dati rilevati e la trasmissione sistematica dei dati e delle elaborazioni, avendo precedentemente definito ed assegnato le responsabilità per la lettura, l'elaborazione e l'interpretazione dei dati di monitoraggio, nonché per la loro distribuzione.

Gli strumenti di misura utilizzati dovranno permettere di garantire la precisione e l'affidabilità delle letture in modo da non essere influenzati in modo significativo da cambiamenti di temperatura, umidità, corrente elettrica e vibrazioni indotte.

La strumentazione di monitoraggio dovrà essere installata e predisposta all'uso con sufficiente anticipo rispetto all'arrivo degli scavi in modo da poter effettuare le necessarie misure di zero.



	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA												
GALLERIA ROCCHETTA Relazione geotecnica e di calcolo galleria naturale	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IF0G</td> <td>01</td> <td>D 07 RB</td> <td>GN0300 001</td> <td>A</td> <td>141 di 141</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	141 di 141
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
IF0G	01	D 07 RB	GN0300 001	A	141 di 141								

## 11 CONCLUSIONI

Nella presente relazione sono state affrontate le problematiche progettuali connesse con la realizzazione della galleria Rocchetta, inclusa nel raddoppio della linea ferroviaria Apice – Hirpinia; tale progetto si inserisce nel più ampio ambito di riqualificazione e potenziamento dell'itinerario ferroviario Roma - Napoli – Bari.

La progettazione delle opere in sotterraneo, è stata condotta secondo il metodo ADECO-RS (Rif. [22]), articolandosi nelle seguenti fasi:

1. Fase conoscitiva (cap. 7): questa fase è stata dedicata allo studio e all'analisi del contesto geologico e geotecnico di inserimento in cui sarà realizzata la galleria, considerati anche i dati relativi alle precedenti fasi progettuali, ed ha portato alla definizione del modello geotecnico di sottosuolo utilizzato per le successive fasi del progetto.

2. Fase di diagnosi (cap. 8): in questa fase è stata eseguita la valutazione della risposta deformativa dell'ammasso allo scavo in assenza di interventi di stabilizzazione, per la determinazione delle categorie di comportamento; sulla base delle analisi condotte l'intero tracciato della galleria presenta comportamento di categoria B (stabile a breve termine).

3. Fase di terapia (cap. 9): si prevede di realizzare lo scavo con metodo meccanizzato. Tale soluzione progettuale è stata analizzata verificandone adeguatezza ed efficacia in tutte le fasi costruttive previste ed in condizioni di esercizio.

Il progetto è completato dal piano di monitoraggio (cap. 10) da predisporre ed attuare nella fase realizzativa, nel quale sono individuati i valori delle grandezze fisiche a cui riferirsi in corso d'opera per controllare la risposta deformativa dell'ammasso e della galleria al procedere dello scavo e verificarne la rispondenza con le previsioni progettuali.