

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE:



DIREZIONE TECNICA

U.O. GALLERIE

PROGETTO DEFINITIVO

ITINERARIO NAPOLI-BARI

RADDOPPIO TRATTA APICE - ORSARA

I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA

USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE

Relazione geotecnica e di calcolo

SCALA:

-

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

IF0G 01 D 07 RB GN0000 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
Ing. Alessandra
Cottone
n° 19946

INDICE

| | | |
|------|---|----|
| 1 | PREMESSA..... | 7 |
| 2 | SCOPO E CONTENUTI DEL DOCUMENTO | 7 |
| 3 | DOCUMENTI DI RIFERIMENTO..... | 8 |
| 3.1 | LEGGI E NORMATIVE COGENTI | 8 |
| 3.2 | NORMATIVE NON COGENTI E RACCOMANDAZIONI | 8 |
| 3.3 | PRESCRIZIONI E SPECIFICHE TECNICHE (RFI, ITF) | 8 |
| 3.4 | DOCUMENTI REFERENZIATI | 8 |
| 3.5 | DOCUMENTI CORRELATI..... | 9 |
| 3.6 | DOCUMENTI SUPERATI..... | 10 |
| 4 | ALLEGATI..... | 10 |
| 5 | DOCUMENTI PRODOTTI A SUPPORTO..... | 11 |
| 6 | DESCRIZIONE DELLE OPERE | 12 |
| 6.1 | USCITA\ACCESSO PEDONALE F1..... | 14 |
| 6.2 | USCITA\ACCESSO PEDONALE F2..... | 14 |
| 6.3 | USCITA COSTRUTTIVA F3..... | 14 |
| 6.4 | USCITA\ACCESSO PEDONALE F4..... | 15 |
| 6.5 | USCITA\ACCESSO PEDONALE F5..... | 15 |
| 6.6 | USCITA COSTRUTTIVA F6..... | 15 |
| 6.7 | USCITA\ACCESSO PEDONALE F7..... | 16 |
| 6.8 | CUNICOLO DI EMERGENZA DELLA GALLERIA MELITO | 16 |
| 6.9 | CUNICOLI DI EMERGENZA DELLA GALLERIA ROCCHETTA..... | 16 |
| 6.10 | INTERFERENZE LUNGO IL TRACCIATO | 16 |
| 7 | FASE CONOSCITIVA..... | 17 |
| 7.1 | INQUADRAMENTO GEOLOGICO..... | 17 |

| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|--|----------|-------|----------|------------|------|----------|
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 3 di 199 |

| | | |
|---------|---|----|
| 7.2 | INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO | 19 |
| 7.2.1 | <i>Uscita di emergenza F1</i> | 19 |
| 7.2.2 | <i>Uscita di emergenza F2</i> | 19 |
| 7.2.3 | <i>Uscita F3</i> | 19 |
| 7.2.4 | <i>Uscita di emergenza F4</i> | 19 |
| 7.2.5 | <i>Uscita di emergenza F5</i> | 19 |
| 7.2.6 | <i>Uscita F6</i> | 19 |
| 7.2.7 | <i>Uscita di emergenza F7</i> | 19 |
| 7.3 | INDAGINI DISPONIBILI | 20 |
| 7.4 | INDAGINI GEOTECNICHE E PROVE IN SITO..... | 21 |
| 7.4.1 | <i>Indagini geofisiche</i> | 21 |
| 7.5 | CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DELLE FORMAZIONI..... | 22 |
| 8 | FASE DI DIAGNOSI | 23 |
| 8.1 | CLASSI DI COMPORTAMENTO DEL FRONTE DI SCAVO | 23 |
| 8.2 | DETERMINAZIONE DELLE CATEGORIE DI COMPORTAMENTO | 24 |
| 8.2.1 | <i>Analisi con il metodo delle linee caratteristiche</i> | 24 |
| 8.2.1.1 | Metodo di analisi | 24 |
| 8.2.1.2 | Sezioni analizzate | 25 |
| 8.2.1.3 | Risultati delle analisi..... | 26 |
| 8.2.2 | <i>Analisi della stabilità del fronte</i> | 29 |
| 8.2.2.1 | Metodi di analisi | 29 |
| 8.2.2.2 | Uscite di emergenza pedonali. Sezioni analizzate..... | 30 |
| 8.2.2.3 | Uscite di emergenza carrabili. Sezioni analizzate | 31 |
| 8.2.3 | <i>Definizione delle tratte a comportamento tensio-deformativo omogeneo</i> | 32 |
| 8.3 | RISCHI POTENZIALI NELLA FASE DI REALIZZAZIONE DELLA GALLERIA..... | 33 |
| 9 | FASE DI TERAPIA..... | 35 |
| 9.1 | DEFINIZIONE DELLE SEZIONI TIPO | 35 |
| 9.1.1 | <i>Finestre Pedonali</i> | 35 |
| 9.1.1.1 | Sezione tipo A2..... | 35 |

| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|--|----------|-------|----------|------------|------|----------|
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 4 di 199 |

| | | |
|---------|--|----|
| 9.1.1.2 | Sezione tipo B1 | 36 |
| 9.1.1.3 | Sezione tipo B2 | 37 |
| 9.1.1.4 | Sezione tipo C1 | 38 |
| 9.1.1.5 | Sezione tipo C2 | 38 |
| 9.1.1.6 | Sezione tipo C2p | 39 |
| 9.1.2 | <i>Finestre Carrabili</i> | 40 |
| 9.1.2.1 | Sezione tipo B1 | 40 |
| 9.1.2.2 | Sezione tipo B2 | 41 |
| 9.1.2.3 | Sezione tipo C1 | 41 |
| 9.1.2.4 | Sezione tipo C2 | 42 |
| 9.2 | CARATTERISTICHE DEI MATERIALI STRUTTURALI | 44 |
| 9.3 | ANALISI E VERIFICA DELLE SEZIONI TIPO | 47 |
| 9.3.1 | <i>Criteri di verifica</i> | 47 |
| 9.3.1.1 | Stabilità del fronte e del cavo..... | 47 |
| 9.3.1.2 | Interazione opera-terreno | 49 |
| 9.4 | SEZIONE TIPO C2 PEDONALE (USCITA F5 P.K. 0+585) | 54 |
| 9.4.1 | <i>Stabilità del fronte e del cavo</i> | 54 |
| 9.4.2 | <i>Interazione opera-terreno</i> | 56 |
| 9.4.3 | <i>Fasi e percentuali di rilascio</i> | 58 |
| 9.4.4 | <i>Esame dei risultati</i> | 61 |
| 9.4.5 | <i>Verifiche strutturali del rivestimento di prima fase</i> | 65 |
| 9.4.6 | <i>Verifiche strutturali SLU del rivestimento definitivo</i> | 66 |
| 9.4.7 | <i>Verifiche strutturali SLE del rivestimento definitivo</i> | 74 |
| 9.5 | SEZIONE B2 PEDONALE (CUNICOLI PARALLELI FINESTRA F6) | 82 |
| 9.5.1 | <i>Stabilità del fronte e del cavo</i> | 82 |
| 9.5.2 | <i>Interazione opera-terreno</i> | 86 |
| 9.5.3 | <i>Fasi e percentuali di rilascio</i> | 87 |
| 9.5.4 | <i>Esame dei risultati</i> | 91 |
| 9.5.5 | <i>Verifiche strutturali del rivestimento di prima fase</i> | 94 |
| 9.5.6 | <i>Verifiche strutturali SLU del rivestimento definitivo</i> | 96 |

| | | | | | | |
|--|----------|-------|----------|------------|------|----------|
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 5 di 199 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 9.5.7 | Verifiche strutturali SLE del rivestimento definitivo..... | 102 |
| 9.6 | SEZIONE TIPO C2P PEDONALE (USCITA F1 INNESTO CON GALLERIA DI LINEA) | 109 |
| 9.6.1 | Stabilità del fronte e del cavo | 109 |
| 9.6.2 | Interazione opera-terreno..... | 111 |
| 9.6.3 | Fasi e percentuali di rilascio | 112 |
| 9.6.4 | Esame dei risultati | 115 |
| 9.6.5 | Verifiche strutturali del rivestimento di prima fase | 118 |
| 9.6.6 | Verifiche strutturali SLU del rivestimento definitivo | 120 |
| 9.6.7 | Verifiche strutturali SLE del rivestimento definitivo..... | 129 |
| 9.7 | SEZIONE TIPO A2 PEDONALE | 138 |
| 9.7.1 | Interazione opera-terreno..... | 138 |
| 9.7.2 | Fasi e percentuali di rilascio | 139 |
| 9.7.3 | Esame dei risultati | 142 |
| 9.7.4 | Verifiche strutturali del rivestimento di prima fase | 145 |
| 9.7.5 | Verifiche strutturali SLU del rivestimento definitivo | 147 |
| 9.7.6 | Verifiche strutturali SLE del rivestimento definitivo..... | 153 |
| 9.8 | SEZIONE TIPO C1 CARRABILE (USCITA F6 P.K. 1+120)..... | 160 |
| 9.8.1 | Stabilità del fronte e del cavo | 160 |
| 9.8.2 | Interazione opera-terreno..... | 162 |
| 9.8.3 | Fasi e percentuali di rilascio | 164 |
| 9.8.4 | Esame dei risultati | 166 |
| 9.8.5 | Verifiche strutturali del rivestimento di prima fase | 170 |
| 9.8.6 | Verifiche strutturali SLU del rivestimento definitivo | 171 |
| 9.8.7 | Verifiche strutturali SLE del rivestimento definitivo..... | 182 |
| 9.9 | AZIONI DI MITIGAZIONE DEI POTENZIALI RISCHI CHE INCIDONO SULLA REALIZZAZIONE DELLA GALLERIA | 194 |

| | | | | | | |
|--|----------|-------|----------|------------|------|----------|
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 6 di 199 |

| | | |
|------|--|-----|
| 10 | FASE DI VERIFICA E MESSA A PUNTO DEL PROGETTO | 195 |
| 10.1 | MONITORAGGIO IN CORSO D'OPERA..... | 195 |
| 10.2 | CRITERI GENERALI PER L'APPLICAZIONE DELLE SEZIONI TIPO | 196 |
| 11 | CONCLUSIONI | 199 |

| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|--|----------|-------|----------|------------|------|----------|
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 7 di 199 |

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 sono presenti 3 gallerie a doppio binario dotate di uscite/accessi di emergenza laterali di tipo pedonale e carrabile ad interasse inferiore di 100m. Tali uscite di emergenza, oggetto della presente relazione, presentano uno sviluppo complessivo di circa 6,4Km di gallerie.

2 SCOPO E CONTENUTI DEL DOCUMENTO

Nel presente documento si affrontano le problematiche progettuali connesse alla realizzazione delle uscite/accessi di emergenza pedonali e carrabili previste in progetto.

Per l’inquadramento generale relativo alle caratteristiche ed ai requisiti funzionali delle opere in sotterraneo si rimanda alla “Relazione tecnica delle opere in sotterraneo”.

La progettazione delle opere in sotterraneo, condotta secondo il metodo ADECO-RS (Rif. [26]), 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 () a cui si rimanda per l’illustrazione del modello geologico; allo studio geotecnico con la definizione del modello geotecnico di sottosuolo e dei parametri di progetto è illustrata nel capitolo 0.
2. Fase di diagnosi: si esegue la valutazione della risposta deformativa dell’ammasso allo scavo in assenza di interventi di stabilizzazione per la determinazione delle categorie di comportamento (cap.8).
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.). 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.

| | | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|---------------------|-------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA | | | | | |
| | USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE Relazione geotecnica e di calcolo | COMMESSA IF0G | LOTTO 01 | CODIFICA D 07 RB | DOCUMENTO GN0000 001 | REV. A |

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;
- Rif. [9] AGI, “Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche”, 1977

3.3 Prescrizioni e specifiche tecniche (RFI, ITF)

- Rif. [10] RFI, doc RFI DTC SI MA IFS 001 A “Manuale di Progettazione delle opere civili ” datato Dic 2016;
- Rif. [11] 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. [12] ITALFERR, Progetto Preliminare (2007);

| | | | | | | |
|--|---------------------------------|-------|----------|------------|------|----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | ITINERARIO NAPOLI – BARI | | | | | |
| | RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA | | | | | |
| I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA | | | | | | |
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 9 di 199 |

Rif. [13] ITALFERR, Aggiornamento del Progetto Preliminare ai requisiti della Legge Obiettivo (2009);

Rif. [14] 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. [15] ITALFERR, Dossier dati e requisiti di base per avvio PD - IF0G01D05ROMD0000001A – Gennaio 2016

Rif. [16] U.O. Geologia, Gestione Terre e Bonifiche, Elaborati Specialistici;

Rif. [17] U.O. Infrastrutture Centro, Elaborati Specialistici;

Rif. [18] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07F6GN0000007B "Profilo geotecnico - Gallerie Grottaminarda - Uscita di emergenza pedonale F1 pk 3+700 " datato Novembre 2017;

Rif. [19] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07F6GN0000008B "Profilo geotecnico - Gallerie Melito - Uscita di emergenza pedonale F2 pk 6+075" datato Novembre 2017;

Rif. [20] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07F6GN0000009B "Profilo geotecnico - Galleria Melito - Finestra costruttiva/Uscita di emergenza carrabile F3 pk 7+825 e cunicolo pedonale pk 7+050" datato Novembre 2017;

Rif. [21] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07F6GN0000010B "Profilo geotecnico - Galleria Melito - Uscita di emergenza pedonale F4 pk 8+800" datato Novembre 2017;

Rif. [22] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07F6GN0000011B "Profilo geotecnico - Galleria Rocchetta - Uscita di emergenza pedonale F5 pk 11+075 e cunicolo pedonale pk 12+000" datato Novembre 2017;

Rif. [23] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07F6GN0000012B "Profilo geotecnico - Galleria Rocchetta - Finestra costruttiva/Uscita di emergenza carrabile F6 pk 13+850 e cunicoli pedonali pk 12+975 e 14+725" datato Novembre 2017;

Rif. [24] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07F6GN0000013B "Profilo geotecnico - Galleria Rocchetta - Uscita di emergenza pedonale F7 pk 15+700" datato Novembre 2017;

Rif. [25] U.O. Gallerie, documento n.° IF0F01D07RHGN0000001 "Relazione tecnica delle opere in sotterraneo" datato Novembre 2017.

3.5 Documenti Correlati

Rif. [26] Lunardi P. (2006). Progetto e Costruzione di Gallerie: Analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli - ADECO-RS – (Hoepli Ed.);

Rif. [27] 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;

| | | | | | | |
|--|----------|-------|----------|------------|------|-----------|
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 10 di 199 |

- Rif. [28] Bernaud D., Rousset G. (1992). La « nouvelle méthode implicite » pour l'étude du dimensionnement des tunnels – Revue Francaise de Géotechnique, N° 60;
- Rif. [29] 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. [30] 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. [31] Hoek E., Brown E.T. (1997), “Practical estimates of rock mass strength”, Intl. J. Rock Mech. & Geomechanics Abstracts, 1165-1186;
- Rif. [32] Hoek E., Carranza-Torres C., Cortkum B. (2002), “Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition”;
- Rif. [33] Tamez E. (1984) “Estabilidad de tuneles excavados en suelos” - Mexican Engineering Academy;
- Rif. [34] Hoek E., Diederichs M. S. (2006), “Empirical Estimation of rock mass Modulus”, Intl. J. Rock Mech. & Mining Sciences 43 (2006), 203-215;
- Rif. [35] 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. [36] Croce P., Flora A., Modoni G. (2004), “Jet-grouting – Tecnica, progetto e controllo”, Hevelius edizioni;
- Rif. [37] Hoek E. (2004), “Numerical Modelling for Shallow Tunnels in Weak Rock”, Rocscience, April 2004.

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 Tipo C2p pedonale (Uscita F5 p.k. 0+585) : risultati delle verifiche”;
- All. [3] “Analisi numerica per la verifica della Sezione Tipo B2 pedonale (cunicoli paralleli finestra F6): risultati delle verifiche”;
- All. [4] “Analisi numerica per la verifica della Sezione Tipo C2p pedonale (uscita F1 innesto con galleria di linea) : risultati delle verifiche”;
- All. [5] “Analisi numerica per la verifica della Sezione Tipo A2 pedonale : risultati delle verifiche”;
- All. [6] “Analisi numerica per la verifica della Sezione Tipo C1 carrabile : risultati delle verifiche”;

| | | | | | | |
|--|----------|-------|----------|------------|------|-----------|
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 11 di 199 |

5 DOCUMENTI PRODOTTI A SUPPORTO

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

- Rif. [38] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07WBG0000004A "Sezione corrente - Sezioni di intradosso " datato Luglio 2017;
- Rif. [39] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07BBG0000015B "Uscita/accesso pedonale - Sezione tipo A2 - Carpenteria, scavo e consolidamenti" datato Novembre 2017;
- Rif. [40] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07BBG0000016B "Uscita/accesso pedonale - Sezione tipo B1 - Carpenteria, scavo e consolidamenti" datato Novembre 2017;
- Rif. [41] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07BBG0000017B "Uscita/accesso pedonale - Sezione tipo B2 - Carpenteria, scavo e consolidamenti" datato Novembre 2017;
- Rif. [42] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07BBG0000018B "Uscita/accesso pedonale - Sezione tipo C1 - Carpenteria, scavo e consolidamenti" datato Novembre 2017;
- Rif. [43] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07BBG0000019B "Uscita/accesso pedonale - Sezione tipo C2 - Carpenteria, scavo e consolidamenti" datato Novembre 2017;
- Rif. [44] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07BBG0000020B "Uscita/accesso pedonale - Sezione tipo C2p - Carpenteria, scavo e consolidamenti" datato Novembre 2017;
- Rif. [45] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07BBG0000021B "Finestra costruttiva - Uscita/accesso carrabile - Sezione tipo B1 - Carpenteria, scavo e consolidamenti" datato Novembre 2017;
- Rif. [46] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07BBG0000022B "Finestra costruttiva - Uscita/accesso carrabile - Sezione tipo B2 - Carpenteria, scavo e consolidamenti" datato Novembre 2017;
- Rif. [47] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07BBG0000023B "Finestra costruttiva - Uscita/accesso carrabile - Sezione tipo C1 - Carpenteria, scavo e consolidamenti" datato Novembre 2017;
- Rif. [48] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07BBG0000024B "Finestra costruttiva - Uscita/accesso
- Rif. [49] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07SPG0000001B "Caratteristiche dei materiali - Note generali" datato Novembre 2017;
- Rif. [50] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07CLG0000001A "Relazione sulla valutazione delle subsidenze e verifica degli effetti indotti sulle interferenze in superficie" datato Luglio 2017;
- Rif. [51] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07SHG0000001A "Relazione fabbricati interferenti con le gallerie naturali" datato Luglio 2017;
- Rif. [52] U.O. Gallerie, documento n.IF0G01D07WAG0000003A "Monitoraggio - Sezioni strumentate finestre costruttive/uscite di emergenza" datato Luglio 2017;
- Rif. [53]

| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|--|----------|-------|----------|------------|------|-----------|
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 12 di 199 |

6 DESCRIZIONE DELLE OPERE

In accordo con quanto richiesto dalle STI-SRT “Sicurezza nelle gallerie ferroviarie” (Rif. [4]), le gallerie di linea in progetto, tutte a singola canna doppio binario, sono dotate di uscite/accessi di emergenza ad interasse inferiore a 1000m.

Secondo quanto già previsto in sede di Progetto Preliminare, al fine di ridurre il numero di uscite verso l'esterno alcune delle uscite/accessi di emergenza laterali presentano una configurazione a “semi-stampella” o a “stampella”, ossia con cunicoli paralleli alle gallerie di linea con innesto dedicato che confluiscono all'interno dell'uscita/accesso principale.

All'innesto con le gallerie di linea le uscite/accessi di emergenza sono dotati di un sottopasso, di larghezza pari a 3 m, che consente l'esodo in sicurezza dei passeggeri anche dal marciapiede del binario opposto al percorso di esodo verso l'esterno.

Per le uscite/accessi di emergenza, la scelta della tipologia, pedonale o carrabile, e le relative sezioni tipo di intradosso sono in accordo con le indicazioni del Manuale di Progettazione RFI (Rif. [10]). A riguardo si segnala in particolare il rispetto del criterio secondo cui, per gallerie di lunghezza superiore a 4 km, è necessario prevedere una uscita/accesso di tipo carrabile con un passo pari a circa 4 km.

Nello specifico per la Galleria Grottaminarda è prevista un'unica uscita F1 alla progressiva km. 3+700 di tipo pedonale.

Per la Galleria Melito sono previste 4 uscite di emergenza realizzate tramite 3 uscite/accessi laterali ed un cunicolo di emergenza, parallelo alla galleria di linea.

Le uscite/accessi laterali sono previste alle seguenti progressive:

- Uscita/accesso pedonale F2 con innesto alla pk di linea 6+075,
- Uscita/accesso carrabile F3 con innesto alla pk di linea 7+825,
- Uscita/accesso pedonale F4 con innesto alla pk di linea 8+800.

Il cunicolo di emergenza, parallelo alla galleria di linea presenta una sezione di tipo pedonale, si innesta alla galleria di linea in corrispondenza della progressiva km 7+050 e confluisce nella finestra di emergenza F3 alla progressiva 7+825.

La Galleria Rocchetta presenta 6 uscite di emergenza realizzate tramite 3 uscite/accessi laterali e 3 cunicoli di emergenza paralleli alla galleria di linea con sezione tipo pedonale.

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 p.k. 12+000 e confluisce nell'uscita di emergenza F5 alla p.k. 11+075.

6.1 Uscita\accesso pedonale F1

La Uscita pedonale F1, prevista per la realizzazione della Galleria Grottaminarda, presenta una lunghezza complessiva di circa 389 metri, a partire dall'imbocco fino alla sezione di innesto con la galleria di linea in corrispondenza della progressiva km 3+700.

L'opera in sotterraneo prevede:

- portale di imbocco di lunghezza pari a 12 m;
- galleria artificiale e dima di lunghezza complessiva pari a 15,50 m;
- galleria naturale di lunghezza pari a 361 m;

La galleria presenta quota di imbocco a circa 335 m s.l.m. e si innesta in galleria di linea alla quota di progetto di 312.81 s.l.m (quota piano ferro). Dall'imbocco il tracciato procede con pendenza del 14% in discesa per circa 150 metri di lunghezza dall'imbocco, e con pendenza del 1.7% fino all'innesto con la galleria di linea; la copertura massima è di circa 40 metri.

6.2 Uscita\accesso pedonale F2

La Uscita pedonale F2 presenta una lunghezza complessiva di circa 305 metri, a partire dall'imbocco fino alla sezione di innesto con la galleria Melito in corrispondenza della progressiva km 6+075.

L'opera in sotterraneo prevede:

- portale di imbocco di lunghezza pari a 12.00m;
- galleria artificiale di imbocco e dima di lunghezza complessiva pari a 32.50 m.
- galleria naturale di lunghezza pari a circa 260 m;

La galleria presenta quota di imbocco a circa 318,4 m s.l.m. e si innesta in galleria di linea alla quota di progetto di 284.59 s.l.m (quota piano ferro). Dall'imbocco il tracciato procede con pendenza del 14% in discesa fino all'innesto con la galleria di linea; la copertura massima è di circa 65 metri.

6.3 Uscita costruttiva F3

La Uscita costruttiva F3, prevista per la realizzazione della Galleria Melito, presenta una lunghezza complessiva di circa 485 metri, a partire dall'imbocco fino alla sezione di innesto con la galleria di linea in corrispondenza della progressiva km 7+825.

L'opera in sotterraneo prevede:

- portale di imbocco di lunghezza pari a 18.00m;
- galleria artificiale di imbocco e dima di lunghezza complessiva pari a 44.50 m.

- galleria naturale di lunghezza pari a circa 422 m;

La galleria presenta quota di imbocco a circa 322 m s.l.m. e si innesta in galleria di linea alla quota di progetto di 263,80 (quota piano ferro). Dall'imbocco il tracciato procede con pendenza del 14% in discesa; le coperture crescono gradatamente fino al valore massimo di circa 100 metri in corrispondenza dell'innesto.

6.4 Uscita\accesso pedonale F4

La uscita di emergenza F4 presenta una lunghezza complessiva di circa 427 metri, a partire dall'imbocco fino alla sezione di innesto con la Galleria Melito in corrispondenza della progressiva km 8+800.

L'opera in sotterraneo prevede:

- portale di imbocco di lunghezza pari a 12.00m;
- galleria artificiale di imbocco e dima di lunghezza complessiva pari a 24.50 m.
- galleria naturale di lunghezza pari a circa 390 m;

La galleria presenta quota di imbocco a circa 302 m s.l.m. e si innesta in galleria di linea alla quota di progetto di 252.22 m. s.l.m (quota piano ferro). Dall'imbocco il tracciato procede con pendenza del 13% in all'innesto con la galleria di linea; la copertura massima è di circa 120 metri.

6.5 Uscita\accesso pedonale F5

L'uscita di emergenza pedonale F5 presenta una lunghezza complessiva di circa 647 metri, a partire dall'imbocco fino alla sezione di innesto con la galleria di linea con la Galleria Rocchetta in corrispondenza della progressiva km 11+125.

L'opera in sotterraneo prevede:

- portale di imbocco di lunghezza pari a 12.00m;
- galleria artificiale di imbocco e dima di lunghezza complessiva pari a 16.90 m.
- galleria naturale di lunghezza pari a circa 618 m;

La galleria presenta quota di imbocco a circa 303 m s.l.m. e si innesta in galleria di linea alla quota di progetto di 228.86 m. s.l.m (quota piano ferro). Dall'imbocco il tracciato procede con pendenza del 11% in discesa fino all'innesto con la galleria di linea; la copertura massima è di circa 100 metri.

6.6 Uscita costruttiva F6

La Uscita costruttiva F6, prevista per la realizzazione della Galleria Rocchetta, presenta una lunghezza complessiva di circa 1120 metri, a partire dall'imbocco fino alla sezione di innesto con la galleria di linea in corrispondenza della progressiva km 13+850.

L'opera in sotterraneo è prevede:

- portale di imbocco di lunghezza pari a 18,00m;
- galleria artificiale di imbocco e dima di lunghezza complessiva pari a 12,00 m.
- galleria naturale di lunghezza pari a circa 1090 m;

La galleria presenta quota di imbocco a circa 267 m s.l.m. e si innesta in galleria di linea alla quota di progetto di 201,56 (quota piano ferro). Dall'imbocco il tracciato procede con pendenza del 6,5% in discesa; le coperture crescono gradatamente fino al valore massimo di circa 330 metri.

6.7 Uscita\accesso pedonale F7

La Uscita pedonale F7 presenta una lunghezza complessiva di circa 617 metri, a partire dall'imbocco fino alla sezione di innesto con la galleria di linea Rocchetta in corrispondenza della progressiva km 15+700.

L'opera in sotterraneo prevede:

- portale di imbocco di lunghezza pari a 11,00 m;
- galleria artificiale di imbocco e dima di lunghezza complessiva pari a 19,60 m;
- galleria naturale di lunghezza pari a circa 586 m;

La galleria presenta quota di imbocco a circa 303 m s.l.m. e si innesta in galleria di linea alla quota di progetto di 250.5 m. s.l.m (quota piano ferro). Dall'imbocco il tracciato procede con pendenza del 6,5% in discesa fino all'innesto con la galleria di linea; la copertura massima è di circa 330 metri.

6.8 Cunicolo di emergenza della Galleria Melito

Il cunicolo di emergenza, parallelo alla galleria di linea presenta una sezione tipo pedonale, si innesta alla galleria di linea in corrispondenza della progressiva km 7+050 e confluisce nella finestra di emergenza F3 (carrabile) alla progressiva km 7+825.

6.9 Cunicoli di emergenza della Galleria Rocchetta

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

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

Per eventuali approfondimenti sullo studio geologico si rimanda agli specifici elaborati progettuali (Rif. [16]).

6.10 Interferenze lungo il tracciato

In prossimità dell'area interessata dagli scavi delle uscite/accessi di emergenza F1, F4 e F5 sono presenti una serie di edifici potenzialmente interferenti con la realizzazione delle opere in progetto (Rif. [50]).

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 delle uscite pedonali e carrabili.

Nel seguito si riporta un breve inquadramento geologico e geomorfologico dell'area di interesse.

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 3) 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).

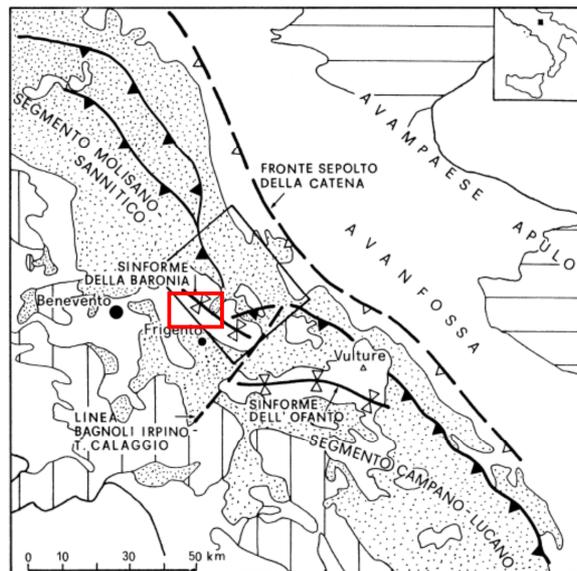


Figura 3. Unità stratigrafico-strutturali dell'Appennino centro-meridionale: unità della piattaforma carbonatica apula (rigato orizzontale), unità della piattaforma carbonatica sud-appenninica (rigato verticale), unità bacinali meso-cenozoiche del bacino lagonegrese-molisano ed associati depositi sinorogeni messiniani (puntinato), depositi elastici e vulcanici del Pliocene-Quaternario (bianco) (da Cinque et alii, 1993). Il riquadro rosso evidenzia l'area di studio.

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;
- Sintema del Calore e depositi continentali quaternari.

Lo studio geologico ha individuato lungo il tracciato delle uscite pedonali le seguenti unità:

- ✓ **Unità del Supersintema di Ariano Irpino:** nell'area in esame è rappresentato dalla Formazione della Baronia appartenente alla successione del ciclo sedimentario del Pliocene inferiore, che si suddivide in:
 - **Membro dei conglomerati e delle sabbie di S. Sossio Baronia - 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.
- **L'unità tettonica di Frigento,** rappresentata dal Flysch Rosso- FYR (Cretacico Superiore – Burdigaliano Superiore), costituito da argille marnose policrome;).

Per eventuali approfondimenti sullo studio geologico si rimanda agli specifici elaborati progettuali (Rif. [16]).

7.2 Inquadramento geomorfologico

7.2.1 Uscita di emergenza F1

L'uscita di emergenza F1 si colloca sulla porzione medio-inferiore di un versante in sinistra idrografica del F. Ufita, che si imposta sui terreni argillitici del Flysch Rosso (FYR); nella zona di imbocco dell'uscita di emergenza, non è segnalata la presenza di corpi di frana.

Sono presenti alcuni corpi di frana sull'impronta del tracciato dell'uscita di emergenza F1 che, in relazione alle coperture della galleria, non sono interferite dall'opera in sotterraneo.

7.2.2 Uscita di emergenza F2

L'uscita di emergenza F2 si colloca su un versante interessato dai litotipi pliocenici della Formazione della Baronia, esente da criticità geomorfologiche, non essendo stati osservati fenomeni di rilievo.

La zona di imbocco risulta localizzata in un'area geomorfologicamente stabile.

7.2.3 Uscita F3

I rilievi e le analisi in sito non hanno evidenziato alcun elemento di criticità di carattere geomorfologico lungo il tracciato della uscita F3, che si colloca sulla dorsale morfologica, allungata in direzione NE-SW, che separa i due corpi di frana individuati tra le pk 7+200÷7+600 circa e tra le pk 7+900 e 8+500 circa.

7.2.4 Uscita di emergenza F4

L'uscita di emergenza F4 risulta localizzata su una dorsale stabile modellata nei pliocenici della Formazione della Baronia; i rilievi e le analisi in sito non hanno evidenziato alcun elemento di criticità lungo tutto il tracciato.

7.2.5 Uscita di emergenza F5

L'uscita di emergenza F5 della galleria Rocchetta corre in affiancamento alla galleria di linea. Sono presenti fenomeni franosi superficiali cartografati che però, date le coperture elevate del cunicolo pedonale, non hanno alcuna interferenza con l'opera. L'imbocco dell'uscita di emergenza si colloca su una porzione di versante in cui affiorano terreni arenacei ascrivibili al membro BNA1b della Formazione della Baronia. Sulla base dei rilievi in campo e delle analisi eseguite, la zona di imbocco appare ubicata in un'area geomorfologicamente stabile.

7.2.6 Uscita F6

L'imbocco della uscita è posizionato al piede di una porzione di versante a forte acclività intestato sui depositi arenacei del BNA3, ed è ubicato a distanza di circa 50-60 metri dal fianco destro di un deposito franoso attivo di tipo complesso; con il quale non interferisce. Lungo il tracciato della uscita non sussiste alcun elemento di criticità di carattere geomorfologico.

7.2.7 Uscita di emergenza F7

In corrispondenza dell'area di imbocco, che interessa la formazione BNA3, non sono cartografati corpi di frana, pertanto l'imbocco è posto in un'area da ritenersi stabile. Dal punto di vista geomorfologico, i rilievi e le analisi in sito non hanno evidenziato alcun elemento di criticità lungo tutto il tracciato dell'uscita di emergenza.

| | | | | | | |
|---|---------------------------------|-------|----------|------------|------|-----------|
|  | ITINERARIO NAPOLI – BARI | | | | | |
| | RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA | | | | | |
| I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA | | | | | | |
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 20 di 199 |

7.3 Indagini disponibili

Ai fini della modellazione e della caratterizzazione geotecnica delle unità che interessano le opere in sotterraneo 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
- Campagna indagini 2017. - Itinerario Napoli – Bari - Raddoppio Apice Orsara – I° Lotto Funzionale Apice - Irpinia

Per ulteriori dettagli relativi alle campagne di indagini si rimanda agli specifici elaborati di progetto specialistici (Rif. [16]).

| | | | | | | |
|---|---------------------------------|-------|----------|------------|------|-----------|
|  | ITINERARIO NAPOLI – BARI | | | | | |
| | RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA | | | | | |
| I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA | | | | | | |
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 21 di 199 |

7.4 Indagini geotecniche e prove in sito

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;

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;
- analisi diffrattometrica per la determinazione dei minerali argillosi;
- determinazione delle sostanze organiche

Sono state inoltre eseguite le seguenti prove di caratterizzazione meccanica:

- prove di Taglio Diretto;
- prove Edometrica;
- prove di rigonfiamento in cella edometrica;
- prove di rigonfiamento a deformazione assiale impedita con misura della pressione di rigonfiamento;
- prove di rigonfiamento del tipo Huder – Amberg;
- prove di rottura ad Espansione Laterale Libera (ELL);
- Prove Triassiali (CID, CIU e UU);
- prove di resistenza a compressione monoassiale e triassiale su roccia con misura delle deformazioni;
- misure della velocità sonica V_P e V_S ;
- Point Load Test;
- prove in colonna risonante.

La descrizione dei campioni e i risultati delle prove eseguite sono allegati agli elaborati di progetto specialistici (Rif. [16]).

7.4.1 Indagini geofisiche

Allo scopo di caratterizzare dal punto di vista sismico i terreni sono state eseguite le seguenti prove geofisiche:

- prove Multi-channel analysis of surface waves (Masw);
- prove sismiche in foro di tipo down-hole;
- profili sismici a rifrazione in onde P.
- I risultati di tali indagini sono allegati agli elaborati specialistici di progetto (Rif. [16]).

7.5 Caratterizzazione geotecnica delle formazioni.

Nel seguito sono riportate le tabelle di sintesi che riportano i valori dei parametri geotecnici rappresentativi delle formazioni interessate dallo scavo delle uscite pedonali.

Tabella 1: Riepilogo parametri geotecnici delle Formazioni

| Unità | Copertura (m) | γ (kN/m ³) | ϕ (°) | c (kPa) | E (MPa) | σ_{ci} (MPa) | GSI |
|-------------|---------------|-------------------------------|------------|-----------|-----------|---------------------|-----|
| BNA3 | 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 | 40 | 25 |
| | 50 ÷ 100 | 20 ÷ 22 | 38 ÷ 43 | 150 ÷ 240 | 300 ÷ 800 | 40 | 25 |
| | 100 ÷ 200 | 20 ÷ 22 | 33 ÷ 38 | 240 ÷ 380 | >= 800 | 40 | 25 |

| Unità | Copertura (m) | γ (kN/m ³) | ϕ (°) | c (kPa) | E (MPa) | σ_{ci} (MPa) |
|-------------|---------------|-------------------------------|------------|-------------|-------------|---------------------|
| BNA2 | p.c ÷ 50 | 20 ÷ 22 | 22 ÷ 25 | 20 ÷ 30 | 200 ÷ 600 | 2 ÷ 8 |
| | 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 |

| Unità | Copertura (m) | γ (kN/m ³) | ϕ (°) | c (kPa) | E (MPa) | σ_{ci} (MPa) |
|--------------|---------------|-------------------------------|------------|---------|---------|---------------------|
| BN1Ab | p.c ÷ 50 | 19 ÷ 20 | 26 ÷ 28 | 0 ÷ 5 | 30 ÷ 60 | --- |

| Unità | Copertura (m) | γ (kN/m ³) | ϕ (°) | c (kPa) | E (MPa) | σ_{ci} (MPa) |
|------------|---------------|-------------------------------|------------|---------|-----------|---------------------|
| FYR | 0-25 | 19 ÷ 20 | 16 ÷ 20 | 10 ÷ 30 | 20 ÷ 160 | --- |
| FYR | 20-40 | 20 ÷ 22 | 18 ÷ 24 | 20 ÷ 35 | 200 ÷ 400 | --- |
| FYR | 40-80 | 20 ÷ 22 | 20 ÷ 26 | 20 ÷ 35 | 260 ÷ 400 | --- |

C = copertura (rispetto alla calotta)

γ = peso per unità di volume

c'_K = coesione drenata

ϕ'_K = angolo di attrito interno

c_{uK} = coesione non drenata

E' = modulo elastico drenato

La caratterizzazione geotecnica delle suddette formazioni è riportata nella relazione geotecnica e di calcolo delle gallerie di linea. Le indicazioni relative alla litologia delle formazioni interessate dallo scavo delle uscite pedonali e carrabile e dei cunicoli di emergenza è riportato nei profili geotecnici di progetto (Rif. [18]÷Rif. [25])

| | | | | | | |
|---|---------------------------------|-------|----------|------------|------|-----------|
|  | ITINERARIO NAPOLI – BARI | | | | | |
| | RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA | | | | | |
| I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA | | | | | | |
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 23 di 199 |

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, di seguito brevemente richiamate, sulla base delle quali il tracciato sotterraneo è suddiviso in tratte a comportamento deformativo omogeneo.

I risultati dell'analisi del comportamento deformativo consentono di individuare gli interventi di precontenimento e/o di contenimento più idonei a garantire condizioni di stabilità della galleria in fase di scavo e a lungo termine.

8.1 Classi di comportamento del fronte di scavo

Secondo l'approccio ADECO-RS (Rif. [26]) 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. La risposta tensio-deformativa può essere opportunamente controllata con adeguati interventi di preconsolidamento del fronte e/o di consolidamento al contorno del cavo. In tal modo si fornisce l'opportuno contenimento

| | | | | | | |
|---|---------------------------------|-------|----------|------------|------|-----------|
|  | ITINERARIO NAPOLI – BARI | | | | | |
| | RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA | | | | | |
| I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA | | | | | | |
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 24 di 199 |

all'ammasso perché mantenga un comportamento stabile. Nel caso non si prevedano interventi, lo stato tensio-deformativo può evolvere verso situazioni di instabilità del cavo in fase di realizzazione. 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 incremento dell'estensione della zona dell'ammasso decompressa ed plasticizzata al contorno della cavità, con rapido decadimento delle caratteristiche meccaniche del materiale. L'espansione della fascia di materiale decompresso al contorno del cavo deve essere contenuta prima dell'arrivo del fronte di scavo, mediante interventi di preconsolidamento in avanzamento, che consentono di creare artificialmente l'effetto arco per far evolvere la risposta tensio-deformativa verso configurazioni di stabilità.

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, 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 λ 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.

| | | | | | | |
|---|---------------------------------|-------|----------|------------|------|-----------|
|  | ITINERARIO NAPOLI – BARI | | | | | |
| | RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA | | | | | |
| I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA | | | | | | |
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 25 di 199 |

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), che consente di ottenere risultati affidabili sia in termini di convergenze, sia in termini di carichi di lavoro sui sostegni.

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 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 sezioni di analisi, riassunte nella Tabella 2 e caratterizzate con tutti i dati di input necessari per il calcolo.

Le sezioni analizzate sono le seguenti:

Finestre pedonali

Sezione 1P – Rappresentativa delle coperture massime nella formazione FYR per le Uscite F1 e F2.

Sezione 2P – Rappresentativa delle coperture massime nella formazione BNA2 per le Uscite F4, F5,

Sezione 3P – Rappresentativa delle coperture massime nella formazione BNA3 per l'Uscita F7

Finestre carrabili

Sezione 1C – Rappresentativa delle coperture massime nella formazione BNA3 per l'Uscite F6

Sezione 2C – Rappresentativa delle coperture massime nella formazione BNA2 per l'Uscita F3

Sezione 3C – Rappresentativa delle coperture massime nella formazione BNA2 per l'Uscita F6

Tabella 2 - Sezioni analizzate con il metodo delle curve caratteristiche: dati di input

| Sezione di calcolo | Unità | H [m] | σ_0 [MPa] | p_{w0} [MPa] | p_{wR} [MPa] | R_w [m] | γ [kN/m ³] | c'_{kp} [kPa] | ϕ'_{kp} [°] | c'_{kr} [kPa] | ϕ'_{kr} [°] | E_k [MPa] |
|--------------------|-------|-------|------------------|----------------|----------------|-----------|-------------------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-------------|
| 1P | FYR | 65 | 1,3 | 0,55 | 0 | 2,5 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 400 |
| 2P | BNA2 | 100 | 2,4 | 0 | 0 | 2,5 | 24 | 500 | 26 | 500 | 26 | 400 |
| 3P | BNA3 | 200 | 4 | 0,6 | 0 | 2,5 | 20 | 240 | 33 | 240 | 33 | 800 |
| 1C | BNA3 | 100 | 2,2 | 0,1 | 0 | 10 | 22 | 150 | 38 | 150 | 38 | 500 |
| 2C | BNA2 | 100 | 2,4 | - | 0 | - | 24 | 500 | 26 | 500 | 26 | 400 |
| 3C | BNA2 | 330 | 7,92 | - | 0 | - | 24 | 1000 | 30 | 1000 | 30 | 1600 |

H = copertura rispetto al piano dei centri della galleria

σ_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}

γ = peso dell'unità di volume dell'ammasso

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

ϕ'_{kp} = valore caratteristico dell'angolo di attrito di picco dell'ammasso

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

ϕ'_{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 delle finestre pedonali sono svolte con riferimento allo scavo di una galleria di raggio equivalente R_{eq} pari a 2,50 m.

Tutte le analisi delle finestre carrabili sono svolte con riferimento allo scavo di una galleria di raggio equivalente R_{eq} pari a 4,70 m.

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 σ_c e la pressione critica al fronte $p_c = (3\sigma_0 - 2\sigma_c) / (1 + 2K_p)$, 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:

| σ_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 3 - 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 4 - 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 Allegato.

| Sezione di calcolo | σ_c [MPa] | p_c [MPa] | σ_c/p_c [-] | u_F [m] | u_F/R_{eq} [%] | R_{PF} [m] | R_{PF}/R_{eq} [-] | u_{∞} [m] | R_P [m] | Categoria |
|--------------------|------------------|-------------|--------------------|-----------|------------------|--------------|---------------------|------------------|-----------|-----------|
| 1P | 0,06 | 0,75 | 0,08 | >> | >> 0,5 | >> | >> 1,5 | >> | >> | "C" |
| 2P | 1,60 | 0,65 | 2,45 | 0,01 | 0,48% | 2,93 | 1,17 | 0,03 | 3,74 | "B" |
| 3P | 0,88 | 1,31 | 0,67 | >> | >> 0,5 | >> | >> 1,5 | >> | >> | "C" |
| 1C | 0,62 | 0,57 | 1,08 | 0,032 | 0,68% | 6,52 | 1,38 | 0,089 | 9,34 | "C" |
| 2C | 1,60 | 0,65 | 2,45 | 0,023 | 0,49% | 5,51 | 1,17 | 0,057 | 7,04 | "B" |
| 3C | 3,46 | 2,40 | 1,44 | 0,023 | 0,49% | 5,85 | 1,24 | 0,059 | 7,86 | "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_{∞} = convergenza finale del cavo

R_P = raggio plastico finale al contorno del cavo

R_{eq} = raggio di scavo equivalente della galleria (=4,70 m carrabili, 2,50m pedonali)

Tabella 5 – Sezioni analizzate col metodo delle linee 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) in condizioni drenate e con il metodo di Broms e Bennermark (1969) in condizioni non drenate.

Il metodo proposto da Tamez () 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 4, 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.

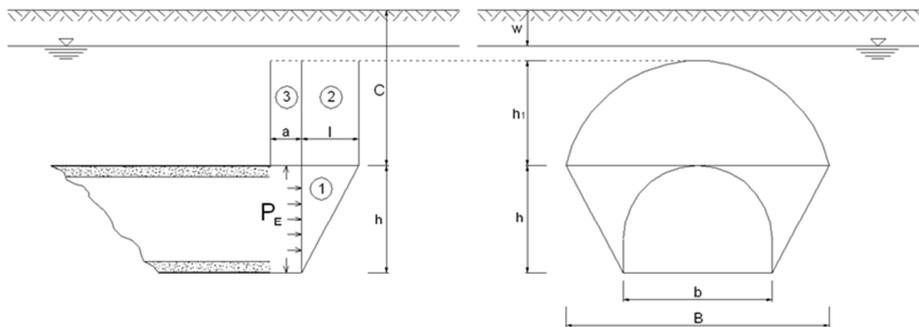


Figura 4 - Stabilità del fronte secondo il Metodo di Tamez (1984)

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 FS₃, 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.

| | | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|---------------------|-------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA | | | | | |
| | USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE Relazione geotecnica e di calcolo | COMMESSA IF0G | LOTTO 01 | CODIFICA D 07 RB | DOCUMENTO GN0000 001 | REV. A |

8.2.2.2 Uscite di emergenza pedonali. 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 nella Tabella 6 con riferimento al metodo di Tamez.

Metodo di Tamez

Tabella 6 - Sezioni analizzate col metodo di Tamez per l'analisi di stabilità del fronte di scavo

| <i>Sez.</i> | <i>Opera</i> | <i>C</i> | <i>Stratigrafia di calcolo</i> |
|-----------------------------|--------------|----------|--------------------------------|
| [n.] | [-] | [m] | <i>Formazione</i> |
| | | | [-] |
| 1P | F1 | 10 | FYR |
| 2P | F2 – F4 – F5 | 10 | BNA1b |
| 3P | F7 | 10 | BNA3 |
| C = copertura sulla calotta | | | |

Le sezioni analizzate riguardano le seguenti sezioni a bassa copertura:

Sezione 1 – Uscita F1 nella formazione FYR

Sezione 2 – Uscita F2 – F4 – F5 nella formazione BNA1b

Sezione 3 – Uscita F7 nella formazione BNA3

In Tabella 7 si riportano in forma sintetica i risultati ottenuti per ciascuna sezione di analisi in termini di coefficiente di sicurezza ottenuto e categoria di comportamento atteso per il nucleo-fronte.

Tabella 7 - Sezioni analizzate col metodo di Tamez per l'analisi di stabilità del fronte di scavo

| <i>Sez.</i> | <i>Progr.</i> | <i>C</i> | <i>Parametri di calcolo</i> | | | <i>h₁</i> | <i>FSF</i> | <i>FS₃</i> | <i>Categoria</i> |
|-------------|---------------|----------|-----------------------------|--------|-----------|----------------------|------------|-----------------------|------------------|
| | | | γ_k | c'_k | ϕ'_k | | | | |
| [n.] | [km] | [m] | [kN/m ³] | [kPa] | [°] | [m] | [-] | [-] | [-] |
| 1C | F1 | 10 | 19 | 10 | 18 | 10 | 0,70 | 1,26 | “C” |
| 2C | F2 – F4 – F5 | 10 | 19 | 5 | 26 | 10 | 0,34 | 0,63 | “C” |
| 3C | F7 | 10 | 20 | 5 | 30 | 10 | 0,32 | 0,60 | “C” |

| | | | | | | |
|--|---------------------------------|-------|----------|------------|------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | ITINERARIO NAPOLI – BARI | | | | | |
| | RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA | | | | | |
| I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA | | | | | | |
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 31 di 199 |

8.2.2.3 Uscite di emergenza carrabili. 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 nella con riferimento al metodo di Tamez.

Metodo di Tamez

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 8 con riferimento al metodo di Tamez.

Tabella 8 - Sezioni analizzate col metodo di Tamez per l'analisi di stabilità del fronte di scavo

| <i>Sez.</i> | <i>Opera</i> | <i>C</i> | <i>Stratigrafia di calcolo</i> |
|-----------------------------|--------------|----------|--------------------------------|
| [n.] | [-] | [m] | <i>Formazione</i> |
| | | | [-] |
| 1C | F3 | 10 | BNA1b |
| 2C | F6 | 10 | BNA3 |
| C = copertura sulla calotta | | | |

Le sezioni analizzate riguardano:

Sezione 1C – Sezione a bassa copertura uscita F3 nella formazione BNA1b

Sezione 2C – Sezione a bassa copertura uscita F6 nella formazione BNA3

Tutte le analisi sono svolte con riferimento ad uno scavo di larghezza b pari a 10 m, altezza h pari a 9 m e lunghezza del tratto non sostenuto a pari a 1 m.

In Tabella 9 si riportano in forma sintetica i risultati ottenuti per ciascuna sezione di analisi in termini di coefficiente di sicurezza ottenuto e categoria di comportamento atteso per il nucleo-fronte.

Tabella 9 - Sezioni analizzate col metodo di Tamez: risultati delle analisi

| <i>Sez.</i> | <i>Progr.</i> | <i>C</i> | <i>Parametri di calcolo</i> | | | h_1 | <i>FSF</i> | <i>FS₃</i> | <i>Categoria</i> |
|-------------|---------------|----------|-----------------------------|--------|--------------|-------|------------|-----------------------|------------------|
| | | | γ_k | c'_k | φ'_k | | | | |
| [n.] | [km] | [m] | [kN/m ³] | [kPa] | [°] | [m] | [-] | [-] | [-] |
| 1C | F3 | 10 | 19 | 5 | 26 | 10 | 0.19 | 0.55 | “C” |
| 2C | F6 | 10 | 19 | 5 | 28 | 10 | 0.19 | 0.55 | “C” |

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

Sulla base dei risultati delle analisi sopra descritte è possibile concludere che:

- Nella formazione FYR è atteso un comportamento del nucleo-fronte di scavo di categoria C (instabile) sia alle basse che alle massime coperture (Uscita pedonale F1);
- Nella formazione BNA2 è atteso un comportamento del nucleo-fronte di scavo di categoria B (stabile a breve termine) alle medie e alte coperture (Uscite pedonali F2, F4, F5, cunicoli F6, F7 e uscite carrabili F3 e F6).
- Nella formazione BNA3, è atteso un comportamento del nucleo-fronte di scavo di categoria C (instabile) sia alle basse che alle massime coperture (Uscita pedonale F7 e uscita carrabile F6)
- Nella formazione BNA1b presente solo nelle zone di imbocco alle basse coperture è atteso un comportamento del nucleo-fronte di scavo di categoria C (instabile) (uscite pedonali F2, F4 e F5 e uscita carrabile F3)

Le previsioni di comportamento lungo il tracciato delle uscite pedonali e carrabili sono illustrate in forma sintetica nei rispettivi profili geotecnici di progetto.

| | | | | | | |
|--|---------------------------------|-------|----------|------------|------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | ITINERARIO NAPOLI – BARI | | | | | |
| | RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA | | | | | |
| I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA | | | | | | |
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 33 di 199 |

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 uscite di emergenza.

Instabilità del fronte e del cavo

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 le tratte scavate nel BNA3 sotto falda.

Comportamento rigonfiante

La porzione pelitica del Flysch Rosso (FYR) e la formazione della Baronina nella facies BNA2 possono presentare un comportamento rigonfiante per variazione dello stato tensionale lungo percorsi tensionali in scarico e in presenza di acqua.

Presenza di trovanti/blocchi

La formazione del Flysch Rosso nelle facies FYR può presentare strati e blocchi lapidei di dimensioni variabili immersi nella matrice argillosa; tali inclusioni sono comunque sporadiche e di potenza generalmente inferiore al metro.

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 di faglia e di discontinuità. In particolare, le formazioni a permeabilità maggiore, ma comunque medio - bassa ($10^{-6} \text{ m/s} < k < 10^{-7} \text{ m/s}$) presenti nella tratta, in studio, sono rappresentate dalle seguenti formazioni:

- Formazione della Baronina – Membro di Appollosa – (BNA3) presente nelle uscite F6 e F7
- Formazione della Baronina – Membro dei conglomerati e delle sabbie di S.Sossio Baronina - BNA1b, presente nei tratti prossimi all'imbocco della uscite F2, F3, F4 e F5.

Considerati i valori di permeabilità e i livelli piezometrici il rischio di venute d'acqua in fase di scavo è basso o nullo.

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. [16]), 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 della parte iniziale della galleria Rocchetta lato Napoli, in corrispondenza dell'Unità BNA3, interessata dallo scavo anche dei tratti iniziali dell'uscita pedonale F7.

| | | | | | | |
|---|---------------------------------|-------|----------|------------|------|-----------|
|  | ITINERARIO NAPOLI – BARI | | | | | |
| | RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA | | | | | |
| I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA | | | | | | |
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 34 di 199 |

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;
- 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. [16]); 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.

Un valido strumento che può essere utilizzato per l'approccio al problema legato alla presenza di gas in galleria è rappresentato dal documento redatto dalle regioni Emilia-Romagna e Toscana *“Lavori in sottoterraneo. Scavo in terreni grisutosi. Grisù 3a ed.”*, che seppur riferito al solo problema metano, può essere un valido riferimento tecnico in merito al problema dello scavo di gallerie in presenza di gas. Questo documento, sviluppato nel corso e con i riscontri diretti degli scavi effettuati nell'appennino Tosco Emiliano, durante la realizzazione delle gallerie dell'Alta Velocità ferroviaria Bologna Firenze, e la variante di valico autostradale, sempre tra Bologna e Firenze, può ragionevolmente essere considerato come *“Linea guida per buone pratiche di lavoro nelle costruzioni in sottoterraneo”*.

In funzione dei risultati derivanti dall'analisi bibliografica e storica e dalle indagini di approfondimento, è stato possibile associare, quindi, ad ogni galleria di linea e uscita di emergenza della tratta la classe di rischio gas 1B come definita nella citata Nota Interregionale: *“Gallerie/tratti per le quali l'analisi geologica strutturale porta a prevedere flussi di grisù, ma non ci sono elementi di riscontro desunti dalle indagini preliminari (studi e ricerche, analisi della storicità, sondaggi) effettuate in fase di progetto e dalla porzione d'opera già realizzata. In definitiva le manifestazioni gassose sono possibili ma con portate prevedibilmente modeste o con modalità che si ritiene non portino a condizioni di rischio”*.

Fenomeni di subsidenza/interferenza con opere preesistenti

In prossimità dell'area interessata dagli scavi delle uscite/accessi di emergenza F1, F4 e F5 sono presenti una serie di edifici potenzialmente interferenti con la realizzazione delle opere in progetto (Rif. [50]).

| | | | | | | |
|---|---------------------------------|-------|----------|------------|------|-----------|
|  | ITINERARIO NAPOLI – BARI | | | | | |
| | RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA | | | | | |
| I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA | | | | | | |
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 35 di 199 |

9 FASE DI TERAPIA

9.1 Definizione delle sezioni tipo

Per la realizzazione delle tratte in naturale delle uscite di emergenza, si utilizzerà la tecnica dello scavo in tradizionale mediante avanzamenti a piena sezione per singoli sfondi di lunghezza variabile in funzione del contesto geotecnico.

In funzione delle caratteristiche geotecniche delle formazioni attraversate e del loro comportamento allo scavo, saranno applicate 4 diverse sezioni tipo per le uscite pedonali e 5 sezioni tipo per le finestre pedonali, intese come complesso inscindibile di modalità operative, fasi di lavoro, interventi di stabilizzazione, confinamento, contenimento, drenaggio e delle relative tecnologie esecutive.

Per ciascuna sezione tipo sono previsti eventuali opportuni interventi di presostegno e precontenimento al fronte ed al contorno, l'installazione a ridosso del fronte di scavo di un rivestimento provvisorio costituito da spritz-beton fibrorinforzato e centine metalliche ed infine il getto dei rivestimenti definitivi di arco rovescio e calotta. La gestione delle acque in sotterraneo è garantita dall'installazione eventuale di 3+3 drenaggi in avanzamento, dall'impermeabilizzazione a tergo dei rivestimenti definitivi di calotta e da un tubo microfessurato, al piede dell'impermeabilizzazione, di presidio per eventuale drenaggio delle acque presenti nelle formazioni attraversate.

Nei paragrafi a seguire si riporta una sintetica descrizione delle sezioni tipo definite, con lo scopo di evidenziare le differenze di natura quantitativa degli interventi rispetto a quanto previsto nelle sezioni delle gallerie di linea. Si precisa che per tutte le sezioni la variabilità del $\pm 20\%$ indicata per gli interventi di precontenimento e presostegno è relativa all'incidenza del consolidamento.

Per la distribuzione delle tratte di applicazione delle diverse sezioni tipo per le due uscite di emergenza si rimanda ai relativi profili geotecnici di progetto.

9.1.1 Finestre Pedonali

9.1.1.1 Sezione tipo A2

La sezione tipo A2 è una sezione cilindrica che prevede solo interventi di contenimento del cavo tramite centine e spritz-beton e bullonatura radiale. Ne è prevista l'applicazione come sezione prevalente all'interno del cunicolo pedonale dell'uscita F3 parallelo alla galleria Melito, nella Formazione del Flysch Rosso – Membro Calcarea (FYR 2) dove, alla scala del fronte, la percentuale della componente litoide è prevalente rispetto alla componente pelitica ($L/P \gg 1$) e il grado di fratturazione dei calcari è medio, o comunque tale da non rendere necessario l'utilizzo di sostegni puntuali.

Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione A2 pedonale, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- scavo a piena sezione per singoli sfondi di dimensioni massime 2,40 m;
- chiodatura radiale mediante $6/7 \pm 20\%$ chiodi ad ancoraggio continuo $\varnothing 24$ disposti in raggiere alternate, lunghezza 3,00 m, interasse longitudinale 1,20 m;

| | | | | | | |
|--|----------|-------|----------|------------|------|-----------|
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 36 di 199 |

- rivestimento provvisorio (ad ogni sfondo) composto da 0,15 m di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN140 con passo 1,20 m \pm 20%;
- arco rovescio (spessore 0,60 m) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri;
- calotta armata (spessore 0,50 cm) gettata ad una distanza non vincolata dal fronte.

9.1.1.2 Sezione tipo B1

La sezione tipo B1 è una sezione tronco-conica che prevede interventi di precontenimento del fronte e presostegno al contorno, con campi di avanzamento da 8,5 m.

Ne è prevista l'applicazione come sezione eventuale nell'ambito delle seguenti formazioni:

- Formazione del Flysch Rosso Membro Calcarea (FYR2).
- Formazione della Baronìa – Membro Pelitico – Arenaceo del Fiume Miscano – (BNA2).
- Formazione della Baronìa – Membro di Appollosa – (BNA3).
- Formazione della Baronìa – Membro dei conglomerati e delle sabbie di S.Sossio Baronìa – (BNA1b)

Nel Flysch Rosso FYR2 la sezione B1 è prevista nel caso in cui il grado di fratturazione della formazione litoide si presenti elevato.

Nella formazione BNA2 e nella formazione BNA3, la sezione B1 è applicata quando, alla scala del fronte, la presenza della componente litoide (marne o arenarie) è prevalente e presenta un grado di fratturazione elevato

Nella formazione BNA1b, presente sempre alle basse coperture, la sezione B1 è applicata quando in calotta si riscontrano fenomeni di instabilità localizzati ma il nucleo-fronte mostra comunque un comportamento stabile a breve termine (categoria B)

Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione B1, ordinati secondo le fasi esecutive previste.

- precontenimento del fronte realizzato mediante 11 elementi strutturali in VTR, L=14,5 m (sovrapposizione minima 6,0 m) cementati in foro con miscele cementizie. L'incidenza del preconsolidamento (numero o lunghezza degli elementi) potrà avere una variabilità del \pm 20%;
- presostegno al contorno (entro un angolo di 120° in calotta) realizzato mediante 13 tubi in acciaio valvolati, L=12,0 m (sovrapposizione minima 3,5 m, interasse 0,4 \pm 20% m);
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1,0 m secondo campi di avanzamento tronco-conici di lunghezza pari a 8,5 m;
- rivestimento provvisorio (ad ogni sfondo) composto da 0,20 m di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN160 con passo 1,0 m;

- arco rovescio (spessore 0,60 m) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 1,5 diametri;
- calotta armata (spessore variabile da 0,40 m a 1,05 m) gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 4 diametri.
- calotta armata (spessore 0,60 m) gettata ad una distanza non vincolata dal fronte.

9.1.1.3 Sezione tipo B2

La Sezione tipo B2 è una sezione cilindrica che prevede interventi di precontenimento del fronte, con campi di avanzamento da 8,0 m.

Ne è prevista l'applicazione come sezione prevalente nella formazione BNA2 quando, alla scala del fronte, la presenza della componente marnosa è prevalente rispetto a quella argillosa.

La sezione B2 è prevista applicata invece come sezione eventuale nelle seguenti formazioni:

- Formazione del Flysch Rosso – (FYR) quando alla scala del fronte la componente marnosa risulta prevalente e il fronte mostra un comportamento stabile a breve termine.
- Formazione della Baronia – Membro di Appollosa – (BNA3) quando alla scala del fronte la componente arenacea risulta prevalente e il fronte mostra un comportamento stabile a breve termine.
- Nella formazione della Baronia – Membro dei conglomerati e delle sabbie di S.Sossio Baronia – (BNA1b), presente sempre alle basse coperture, quando alla scala del fronte la componente argillosa risulta prevalente e il fronte mostra un comportamento stabile a breve termine (categoria B)

Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione B2, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- precontenimento del fronte realizzato mediante 15 elementi strutturali in VTR, L=15,0 m (sovrapposizione minima 7,0 m) cementati in foro con miscele cementizie. L'incidenza del preconsolidamento (numero o lunghezza degli elementi) potrà avere una variabilità del $\pm 20\%$;
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1,0 m secondo campi di avanzamento di lunghezza pari a 8,0 m;
- rivestimento provvisorio (ad ogni sfondo) composto da 0,20 m di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN160 con passo 1,0 m $\pm 20\%$;
- arco rovescio (spessore 0,60 m) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 1,5 diametri;
- calotta armata (spessore 0,50 m) gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 4 diametri.
- calotta armata (spessore 0,70 m) gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 4 diametri.

| | | | | | | |
|---|-------------------------------------|-------|----------|------------|------|-----------|
|  | ITINERARIO NAPOLI – BARI | | | | | |
| | RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA | | | | | |
| | I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA | | | | | |
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 38 di 199 |

9.1.1.4 Sezione tipo C1

La sezione tipo C1 è una sezione tronco-conica che prevede interventi di precontenimento del fronte e del contorno, con campi di avanzamento da 8,0 m.

Ne è prevista l'applicazione come sezione prevalente nelle seguenti formazioni con comportamento del nucleo-fronte instabile (categoria C):

- Formazione della Baronia – Membro di Appollosa – (BNA3) quando alla scala del fronte la componente sabbiosa risulta prevalente.
- Nella formazione della Baronia – Membro dei conglomerati e delle sabbie di S.Sossio Baronia – (BNA1b), presente sempre alle basse coperture, quando alla scala del fronte la componente sabbiosa risulta prevalente.

Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione C1, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- precontenimento del fronte realizzato mediante 11 microtrattamenti in jet-grouting Ø300 armati con elementi strutturali in VTR, L=15,0 m (sovrapposizione minima 7,0 m). L'incidenza del preconsolidamento (numero o lunghezza degli elementi) potrà avere una variabilità del $\pm 20\%$;
- precontenimento al contorno realizzato mediante 27 colonne in jet-grouting Ø600, L=12,5 m (sovrapposizione minima 4,5 m). L'incidenza del preconsolidamento potrà avere una variabilità del $\pm 20\%$;
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1,0 m secondo campi di avanzamento tronco-conici di lunghezza pari a 8,0 m;
- rivestimento provvisorio (ad ogni sfondo) composto da 0,25 m di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN180 con passo 1,0 m;
- arco rovescio (spessore 0,60 m) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 1 diametro;
- calotta in calcestruzzo armato (spessore variabile da 0,40 m a 1,05 m) gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri.

9.1.1.5 Sezione tipo C2

La C2 è una sezione cilindrica che prevede interventi di precontenimento del fronte e del contorno, con campi di avanzamento da 6,0 m.

Ne è prevista l'applicazione nelle gallerie con comportamento del nucleo-fronte instabile (categoria C). Nello specifico è prevista l'applicazione come sezione eventuale della sezione C2 nelle seguenti formazioni:

- Formazione del Flysch Rosso – (FYR – facies pelitica) nel caso di risposta deformativa contenuta.
- Formazione della Baronia – Membro Pelitico – Arenaceo del Fiume Miscano – (BNA2) quando, alla scala del fronte, la componente argillosa della formazione risulta prevalentemente.

| | | | | | | |
|---|-------------------------------------|-------|----------|------------|------|-----------|
|  | ITINERARIO NAPOLI – BARI | | | | | |
| | RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA | | | | | |
| | I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA | | | | | |
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 39 di 199 |

E' prevista l'applicazione come sezione prevalente della sezione tipo C2 solo nel tratto a basse coperture prossimo all'imbocco dell'uscita F5, in cui lo scavo della galleria, all'interno della formazione BNA3, sottopassa il Membro conglomeratico della formazione della Baronia (BNA1b).

Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione C2, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- precontenimento del fronte realizzato mediante 15 elementi strutturali in VTR, L=13,0 m (sovrapposizione minima 7,0 m) cementati in foro con miscele cementizie. L'incidenza del preconsolidamento (numero o lunghezza degli elementi) potrà avere una variabilità del $\pm 20\%$;
- precontenimento al contorno realizzato mediante 25 elementi strutturali in VTR, L=11,0 m (sovrapposizione minima 5,0 m) cementati in foro con miscele espansive. L'incidenza del preconsolidamento potrà avere una variabilità del $\pm 20\%$;
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1,0 m secondo campi di avanzamento di lunghezza pari a 6,0 m;
- rivestimento provvisorio (ad ogni sfondo) composto da 0,20 m di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine HEA180 con passo 1,0 m $\pm 20\%$;
- arco rovescio (spessore 0,60 m) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 1 diametro;
- calotta in calcestruzzo armato (spessore 0,50 m) gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri.

9.1.1.6 Sezione tipo C2p

La sezione tipo C2p è una sezione cilindrica che prevede interventi di precontenimento del fronte e del contorno con campi di avanzamento di 8,0m; è previsto inoltre l'impiego della centina puntone come rivestimento provvisorio in arco rovescio.

Ne è prevista l'applicazione come sezione prevalente nella formazione del Flysch Rosso (FYR- facies pelitica) nel caso di risposta deformativa elevata.

Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione C2p, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- precontenimento del fronte realizzato mediante 15 elementi strutturali in VTR, L=16,0 m (sovrapposizione minima 8,0 m) cementati in foro con miscele cementizie. L'incidenza del preconsolidamento (numero o lunghezza degli elementi) potrà avere una variabilità del $\pm 20\%$;
- precontenimento al contorno realizzato mediante 25 elementi strutturali in VTR, L=16,0 m (sovrapposizione minima 8,0 m) cementati in foro con miscele espansive. L'incidenza del preconsolidamento potrà avere una variabilità del $\pm 20\%$;
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1,0 m secondo campi di avanzamento di lunghezza pari a 8,0 m;

- rivestimento provvisorio (ad ogni sfondo) composto da 0,20 m di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine HEA180 con passo 1,0 m \pm 20%; chiusura dell'arco rovescio provvisorio con centina puntone HEB180 con passo 1.00 m \pm 20% e 0,20 m di spritz-beton
- arco rovescio (spessore 0,60 m) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 0.5 diametri;
- calotta in calcestruzzo armato (spessore 0,50 m) gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 2 diametri.

9.1.2 Finestre Carrabili

9.1.2.1 Sezione tipo B1

La sezione tipo B1 è una sezione tronco-conica che prevede interventi di precontenimento del fronte e presostegno al contorno, con campi di avanzamento da 8,5 m.

Ne è prevista l'applicazione come sezione eventuale nell'ambito delle seguenti formazioni:

- Formazione della Baronìa – Membro dei conglomerati e delle sabbie di S. Sossio Baronìa – (BNA1b).
- Formazione della Baronìa – Membro Pelitico – Arenaceo del Fiume Miscano – (BNA2).
- Formazione della Baronìa – Membro di Appollosa – (BNA3).

Nella formazione BNA2 e nella formazione BNA3, la sezione B1 è applicata quando, alla scala del fronte, la presenza della componente litoide (marne o arenarie) è prevalente e presenta un grado di fratturazione elevato

Nella formazione BNA1b, presente sempre alle basse coperture, la sezione B1 è applicata quando in calotta si riscontrano fenomeni di instabilità localizzati ma il nucleo-fronte mostra comunque un comportamento stabile a breve termine (categoria B)

Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione B2, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- precontenimento del fronte realizzato mediante 20 elementi strutturali in VTR, L=13,5 m (sovrapposizione minima 5,0 m) cementati in foro con miscele cementizie. L'incidenza del preconsolidamento (numero o lunghezza degli elementi) potrà avere una variabilità del \pm 20%;
- presostegno al contorno (entro un angolo di 120° in calotta) realizzato mediante 23 tubi in acciaio valvolati, L=12,0 m (sovrapposizione minima 3,5 m, interasse 0,4 \pm 20% m);
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1,0 m secondo campi di avanzamento tronco-conici di lunghezza pari a 8,5 m;
- rivestimento provvisorio (ad ogni sfondo) composto da 0,20 m di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN160 con passo 1,0 m;

- arco rovescio (spessore 0,80 m) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 1,5 diametri;
- calotta armata (spessore variabile da 0,50 m a 1,15 m) gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 4 diametri.

9.1.2.2 Sezione tipo B2

La Sezione tipo B2 è una sezione cilindrica che prevede interventi di precontenimento del fronte, con campi di avanzamento da 10,0 m.

Ne è prevista l'applicazione come sezione prevalente nella formazione BNA2 quando, alla scala del fronte, la presenza della componente marnosa è prevalente rispetto a quella argillosa.

La sezione B2 è prevista applicata invece come sezione eventuale nelle seguenti formazioni:

- Formazione della Baronia – Membro di Appollosa – (BNA3) quando alla scala del fronte la componente arenacea risulta prevalente e il fronte mostra un comportamento stabile a breve termine.
- Nella formazione della Baronia – Membro dei conglomerati e delle sabbie di S.Sossio Baronia – (BNA1b), presente sempre alle basse coperture, quando alla scala del fronte la componente argillosa risulta prevalente e il fronte mostra un comportamento stabile a breve termine (categoria B)

Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione B2, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- precontenimento del fronte realizzato mediante 30 elementi strutturali in VTR, L=17,0 m (sovrapposizione minima 7,0 m) cementati in foro con miscele cementizie. L'incidenza del preconsolidamento (numero o lunghezza degli elementi) potrà avere una variabilità del $\pm 20\%$;
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1,0 m secondo campi di avanzamento di lunghezza pari a 10,0 m;
- rivestimento provvisorio (ad ogni sfondo) composto da 0,20 m di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN160 con passo 1,0 m $\pm 20\%$;
- arco rovescio (spessore 0,80 m) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 1,5 diametri;
- calotta armata (spessore 0,70 m) gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 4 diametri.

9.1.2.3 Sezione tipo C1

La sezione tipo C1 è una sezione tronco-conica che prevede interventi di precontenimento del fronte e del contorno, con campi di avanzamento da 10,0 m.

Ne è prevista l'applicazione come sezione prevalente nelle seguenti formazioni con comportamento del nucleo-fronte instabile (categoria C):

- Formazione della Baronia – Membro di Appollosa – (BNA3) quando alla scala del fronte la componente sabbiosa risulta prevalente.
- Nella formazione della Baronia – Membro dei conglomerati e delle sabbie di S.Sossio Baronia – (BNA1b), presente sempre alle basse coperture, quando alla scala del fronte la componente sabbiosa risulta prevalente.

Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione C1, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- precontenimento del fronte realizzato mediante 20 microtrattamenti in jet-grouting Ø300 armati con elementi strutturali in VTR, L=17,0 m (sovrapposizione minima 7,0 m). L'incidenza del preconsolidamento (numero o lunghezza degli elementi) potrà avere una variabilità del ±20%;
- precontenimento al contorno realizzato mediante 49 colonne in jet-grouting Ø600, L=14,5 m (sovrapposizione minima 4,5 m) e ulteriori 5+5 colonne al piede centina. L'incidenza del preconsolidamento potrà avere una variabilità del ±20%;
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1,0 m secondo campi di avanzamento tronco-conici di lunghezza pari a 10,0 m;
- rivestimento provvisorio (ad ogni sfondo) composto da 0,25 m di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN180 con passo 1,0 m;
- arco rovescio (spessore 0,90 m) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 1 diametro;
- calotta in calcestruzzo armato (spessore variabile da 0,55 m a 1,30 m) gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri.

9.1.2.4 Sezione tipo C2

La C2 è una sezione cilindrica che prevede interventi di precontenimento del fronte e del contorno, con campi di avanzamento da 10,0 m

Ne è prevista l'applicazione come sezione eventuale nella Formazione della Baronia – Membro Pelitico – Arenaceo del Fiume Miscano – (BNA2) quando, alla scala del fronte, la componente argillosa della formazione risulta prevalentemente e il comportamento del nucleo-fronte risulta instabile (categoria C)..

Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione C2, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- precontenimento del fronte realizzato mediante 25 elementi strutturali in VTR, L=18,0 m (sovrapposizione minima 8,0 m) cementati in foro con miscele cementizie. L'incidenza del preconsolidamento (numero o lunghezza degli elementi) potrà avere una variabilità del ±20%;
- precontenimento al contorno realizzato mediante 39 elementi strutturali in VTR, L=15,0 m (sovrapposizione minima 5,0 m) cementati in foro con miscele espansive e 5+5 elementi aggiuntivi al

piede centina $L=13,5$ m (sovrapposizione minima 5,0 m). L'incidenza del preconsolidamento potrà avere una variabilità del $\pm 20\%$;

- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1,0 m secondo campi di avanzamento di lunghezza pari a 10,0 m;
- rivestimento provvisorio (ad ogni sfondo) composto da 0,25 m di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine HEA180 con passo 1,0 m $\pm 20\%$;
- arco rovescio (spessore 0,90 m) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 1 diametro;
- calotta in calcestruzzo armato (spessore 0,80 m) gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri.

9.2 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 ().

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 ().

Interventi di precontenimento

| Elementi in vetroresina strutturali | |
|--|----------------------------|
| Resistenza a trazione caratteristica | $f_{tk} = 450 \text{ MPa}$ |
| Resistenza a taglio | $\tau = 85 \text{ MPa}$ |
| Diametro di perforazione | $> 100 \text{ mm}$ |

| Elementi in vetroresina a 3 piatti | |
|---|-----------------------------|
| Resistenza a trazione caratteristica | $f_{tk} = 1000 \text{ MPa}$ |
| Resistenza a taglio | $\tau = 140 \text{ MPa}$ |
| Diametro di perforazione | $> 100 \text{ mm}$ |

| Acciaio per infilaggi al contorno | |
|--|---------------------------------|
| Tipo | S 355 |
| Tensione caratteristica di rottura | $f_{tk} \geq 510 \text{ MPa}$ |
| Tensione caratteristica di snervamento | $f_{yk} \geq 355 \text{ MPa}$ |
| Tensione di snervamento di calcolo | $f_{yd} \geq 338.0 \text{ MPa}$ |

Rivestimento provvisorio

| Calcestruzzo proiettato (fibrorinforzato) | |
|---|---|
| Classe di resistenza | C 20/25 |
| Resistenza di progetto a compressione a 28 giorni | $f_{cd} = f_{ck}/1.5 = 13.33 \text{ MPa}$ |
| Resistenza di progetto a compressione a 2 giorni | $f_{cd} = f_{ck}/1.5 = 8.67 \text{ MPa}$ |
| Modulo elastico a 28 giorni | $E_{cm} = 22000(f_{cm}/10)^{0.3} = 29962 \text{ MPa}$ |
| Modulo elastico a 2 giorni | $E_{cm} = 22000(f_{cm}/10)^{0.3} = 27485 \text{ MPa}$ |

| Acciaio per centine | |
|--|---------------------------------|
| Tipo | S 275 |
| Tensione caratteristica di rottura | $f_{tk} \geq 430 \text{ MPa}$ |
| Tensione caratteristica di snervamento | $f_{yk} \geq 275 \text{ MPa}$ |
| Tensione di snervamento di calcolo | $f_{yd} \geq 261.9 \text{ MPa}$ |

Rivestimenti definitivi

| Calcestruzzo armato | |
|---|---|
| Classe di resistenza di calcolo | C 25/30 |
| Resistenza di progetto a compressione a 28 giorni | $f_{cd} = 0,85 f_{ck} / 1,5 = 14,17 \text{ MPa}$ |
| Modulo elastico a 28 giorni | $E_{cm} = 22000 (f_{cm} / 10)^{0,3} = 31476 \text{ MPa}$ |
| Tensione massima di compressione in esercizio (RFI DTC SI MA IFS 001 A. Rif. [10]) | $\sigma_c = 0,55 f_{ck} = 13,75 \text{ MPa}$ combinazione caratteristica (rara) $\sigma_c = 0,40 f_{ck} = 10,00 \text{ MPa}$ combinazione quasi permanente |
| Tensione massima in condizioni di esercizio (NTC 2008.) | $\sigma_c = 0,6 f_{ck} = 15,00 \text{ MPa}$ combinazione caratteristica (rara) $\sigma_c = 0,45 f_{ck} = 11,25 \text{ MPa}$ combinazione quasi permanente |

| Acciaio per barre di armatura | |
|---|--|
| Tipo | B450C |
| 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.) | $\sigma_{lim} = 0,80 f_{yk} = 360 \text{ MPa}$ |

| | | | | | | |
|---|---------------------------------|-------|----------|------------|------|-----------|
|  | ITINERARIO NAPOLI – BARI | | | | | |
| | RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA | | | | | |
| I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA | | | | | | |
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 47 di 199 |

9.3 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 0 e nel rispetto delle indicazioni della normativa vigente (Rif. [1]).

9.3.1 Criteri di verifica

Le analisi di stabilità del fronte di scavo sono state condotte secondo il metodo di Broms & Bennermark (Rif. [35]) e con il metodo delle linee caratteristiche (§ 8.2.1).

Le analisi di interazione, in grado di simulare il comportamento del sistema opera-terreno nelle diverse fasi costruttive 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.

9.3.1.1 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.

Gli interventi di consolidamento del fronte, realizzati mediante elementi strutturali in VTR, sono simulati mediante un incremento di coesione equivalente del fronte (Δc) valutato attraverso il calcolo di una pressione equivalente al fronte (σ_3) determinata sulla base del valore minimo tra resistenza a trazione e resistenza a sfilamento dei singoli elementi di consolidamento, secondo le seguenti relazioni:

$$\Delta c = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{k_p} \cdot \sigma_3^{VTR} \quad \text{con } \sigma_3^{VTR} = \min(\sigma_{3,A}^{VTR}, \sigma_{3,B}^{VTR})$$

$$\sigma_{3,A}^{VTR} = \frac{\tau_{bk} \cdot L_A \cdot p_A}{A_i} \quad \sigma_{3,B}^{VTR} = \frac{f_{tk} \cdot A_T}{A_i}$$

dove τ_{bk} è la tensione di aderenza all'interfaccia col terreno, L_A è la lunghezza utile dei consolidamenti resistente a sfilamento, p_A è il perimetro dell'interfaccia col terreno, f_{tk} è la resistenza a trazione dell'elemento in VTR, A_T è la sezione resistente a trazione dell'elemento in VTR e A_i rappresenta l'area di influenza del singolo elemento di consolidamento.

Per gli interventi di precontenimento al fronte che non prevedono l'impiego di elementi resistenti a trazione e sfilamento (colonne in jet-grouting utilizzate nella sezione tipo C1), l'effetto è simulato agendo direttamente sulle proprietà di rigidità e resistenza dell'ammasso, mediando sull'area di scavo i parametri del terreno naturale e delle colonne trattate:

$$\Delta c'_k \cdot A_{jet} + c'_k \cdot A_{terr} = c^*_k \cdot A^*$$

dove:

| | | | | | | |
|--|----------|-------|----------|------------|------|-----------|
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 48 di 199 |

$\Delta c'_k$ = coesione del materiale trattato;

A_{jet} = area delle colonne in jet-grouting;

c'_k = coesione del terreno non interessato dal trattamento;

A_{terr} = area di terreno non interessato dal trattamento;

c^*_k = coesione equivalente;

A^* = area totale del fronte.

La coesione ($\Delta c'_k$) del materiale trattato è stata calcolata a partire dalla resistenza a compressione monoassiale attribuibile al materiale consolidato ($\sigma_{c,jet}$), ipotizzando di mantenere immutato l'angolo d'attrito del materiale naturale, attraverso la seguente relazione:

$$\sigma_{c,jet} = \frac{2 \cdot \Delta c'_k \cdot \cos \varphi'_k}{(1 - \sin \varphi'_k)}$$

I valori di resistenza a compressione monoassiale ($\sigma_{c,jet}$) attribuiti al materiale consolidato sono stati ricavati da dati sperimentali di letteratura per formazioni analoghe a quelle di interesse.

Per gli interventi di precontenimento al contorno l'effetto dei consolidamenti viene tenuto in conto direttamente nei modelli numerici e simulato come un arco di materiale al contorno dello scavo avente proprietà meccaniche migliori rispetto a quelle iniziali del terreno. In particolare, nella regione consolidata sono incrementati i valori di coesione e di modulo elastico, mantenendo immutato l'angolo d'attrito del materiale naturale.

Le valutazioni relative all'effetto dei consolidamenti vengono condotte a partire dai parametri geotecnici caratteristici, ed adottando coefficienti parziali unitari sulle resistenze dei materiali; agli incrementi di coesione equivalente così calcolati può quindi essere applicato lo stesso coefficiente parziale previsto per la coesione dell'ammasso.

Per le verifiche eseguite con il metodo di Tamez, i risultati delle analisi sono stati esaminati in funzione dei valori dei coefficienti di sicurezza FSF e FS₃ calcolati secondo quanto riportato nei paragrafi precedenti (cfr. analisi diagnosi). Le verifiche si ritengono soddisfatte per valori del minore dei due coefficiente di sicurezza suddetti superiori a 1.0.

Per le verifiche eseguite con il metodo di Broms & Bennermark, i risultati delle analisi sono stati esaminati in funzione del rapporto di stabilità N calcolato attraverso la seguente relazione:

$$N = \frac{q_s - s}{c_u} + \frac{\gamma}{c_u} \cdot (C + R)$$

dove:

q_s = sovraccarico eventualmente presente in superficie;

s = eventuale pressione di sostegno applicata al fronte (definita a partire dagli interventi di precontenimento previsti al fronte, come descritto nel presente paragrafo);

c_u = resistenza al taglio, in condizioni non drenate, presente alla profondità della galleria;

| | | | | | | |
|---|---------------------------------|-------|----------|------------|------|-----------|
|  | ITINERARIO NAPOLI – BARI | | | | | |
| | RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA | | | | | |
| I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA | | | | | | |
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 49 di 199 |

γ = peso dell'unità di volume del terreno;

C = spessore del terreno di copertura della galleria;

R = raggio della galleria.

Le verifiche si ritengono soddisfatte per valori di N inferiori a 4.

9.3.1.2 Interazione opera-terreno

Il comportamento del sistema opera-terreno è stato analizzato nelle diverse fasi costruttive fino alla configurazione finale e in condizioni di esercizio. Le analisi sono mirate alla previsione del comportamento deformativo al contorno dello scavo e dei carichi attesi sui sostegni provvisori e 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 che costituiscono gli interventi di stabilizzazione, del rivestimento di prima fase e del rivestimento definitivo (stato limite ultimo di tipo STR);
- stati limite di esercizio SLE per il rivestimento definitivo.

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 interventi di stabilizzazione: $\gamma_E = 1,3$ applicato alle caratteristiche delle sollecitazioni N, M, T ;
- verifiche SLU rivestimento di prima fase: $\gamma_E = 1,3$ applicato alle caratteristiche delle sollecitazioni N, M, T ;
- 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. [1]; Rif. [2]).

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.

Nel caso di sezioni con campo di avanzamento tronco-conico, per la definizione della geometria della sezione di scavo si fa riferimento alla sezione media. Congruentemente, i rivestimenti definitivi di calotta (a carpenteria variabile) sono verificati secondo lo spessore medio.

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

L'effetto dei consolidamenti del fronte di scavo viene tenuto in conto in modo indiretto, nella definizione della percentuale di rilascio delle forze di scavo in corrispondenza del fronte.

Per interventi al fronte realizzati con elementi strutturali in vetroresina l'incremento di coesione equivalente è valutato attraverso il calcolo della pressione equivalente al fronte (σ_3) determinata sulla base del valore più basso tra resistenza a trazione e resistenza a sfilamento dei singoli elementi, secondo le seguenti relazioni:

$$\Delta c = \frac{1}{2} \sqrt{K_p} \cdot \sigma_3^{VTR}$$

con:

$$K_p = \frac{1 + \text{sen}\varphi}{1 - \text{sen}\varphi}$$

$$\sigma_3^{VTR} = \text{minimo} (\sigma_{3,A}^{VTR}, \sigma_{3,B}^{VTR})$$

$$\sigma_{3,A}^{VTR} = \frac{\tau_{bk} \cdot L_A \cdot p_A}{A_i}$$

$$\sigma_{3,B}^{VTR} = \frac{f_{tk} \cdot A_T}{A_i}$$

dove:

τ_{bk} = tensione di aderenza all'interfaccia con il terreno,

L_A = lunghezza utile dell'elemento,

p_A = perimetro dell'interfaccia con il terreno,

f_{tk} = resistenza a trazione dell'elemento in VTR,

A_T = sezione resistente a trazione dell'elemento in VTR

A_i = area di influenza del singolo elemento di consolidamento.

Per interventi di precontenimento al fronte che prevedono l'esecuzione di microtrattamenti in jet-grouting armati con vetroresina, l'incremento di coesione equivalente è valutato attraverso il calcolo della pressione equivalente al fronte (σ_3) determinata sulla base del valore più basso tra resistenza a trazione dell'elemento tubolare in vetroresina e la resistenza a sfilamento del micro-jet, secondo le seguenti relazioni:

$$\Delta c = \frac{1}{2} \sqrt{K_p} \cdot \sigma_3$$

con:

$$K_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

$$\sigma_3 = \text{minimo} (\sigma_{3,A}^{\text{JET}}, \sigma_{3,B}^{\text{JET}}, \sigma_{3,A}^{\text{VTR}}, \sigma_{3,B}^{\text{VTR}})$$

$$\sigma_{3,A}^{\text{JET}} = \frac{\tau_{bk} \cdot L_A \cdot p_A}{A_i}$$

$$\sigma_{3,B}^{\text{VTR}} = \frac{f_{tk} \cdot A_T}{A_i}$$

dove:

τ_{bk} = tensione di aderenza all'interfaccia tra il micro-jet e il terreno,

L_A = lunghezza utile del micro-jet,

p_A = perimetro dell'interfaccia del micro-jet con il terreno,

f_{tk} = resistenza a trazione dell'elemento in VTR,

A_T = sezione resistente a trazione dell'elemento in VTR

A_i = area di influenza del singolo VTR.

Per gli interventi di precontenimento al contorno l'effetto dei consolidamenti viene tenuto in conto direttamente nei modelli numerici e simulato come un arco di materiale al contorno dello scavo avente proprietà meccaniche migliori rispetto a quelle iniziali del terreno. In particolare, nella regione consolidata sono incrementati i valori di coesione e di modulo elastico, mantenendo immutato l'angolo d'attrito del materiale naturale.

Le strutture di rivestimento provvisorio della galleria vengono simulate con elementi beam elastico-lineari, con proprietà di rigidità ed inerzia definite considerando la sola sezione di spritz-beton, trascurando il contributo delle centine. In fase di verifica degli elementi strutturali, le sollecitazioni ottenute dalla modellazione (previa

applicazione dei coefficienti parziali di Normativa), vengono gestite ripartendo lo sforzo normale (N) tra centine e spritz-beton in base alle rigidzze assiali relative, mentre il taglio (T) e il momento flettente (M) vengono assegnati interamente alle centine.

In definitiva, dunque, lo spritz-beton viene verificato a semplice compressione secondo la seguente disuguaglianza (in accordo con la relazione 2.2.1 del D.M. 14/01/2008):

$$\sigma_{sb,d,max} = \frac{N_{Sd, sb}}{A_{sb}} \leq f_{cd}$$

dove:

- $N_{Sd, sb}$ rappresenta lo sforzo normale di calcolo sullo spritz-beton:

$$N_{Sd, sb} = N_{Sd} \frac{E_{sb} \cdot A_{sb}}{E_{sb} \cdot A_{sb} + E_{cent} \cdot A_{cent}} ;$$

- N_{Sd} rappresenta lo sforzo normale di calcolo;
- A_{sb} rappresenta l'area resistente dello spritz-beton;
- $E_{sb} \cdot A_{sb}$ rappresenta la rigidzza assiale dello spritz-beton;
- $E_{cent} \cdot A_{cent}$ rappresenta la rigidzza assiale della centina.

La verifica delle centine a taglio e pressoflessione (per tutte le classi di sezione, tenendo in conto eventuali instabilità locali) può essere condotta confrontando la tensione ideale calcolata a partire dalle tensioni indotte da ciascuna caratteristica della sollecitazione, con la resistenza di calcolo dell'acciaio, come di seguito specificato (cfr D.M. 14/01/2008 nel § 4.2.4.1.2):

$$\sigma_{cent,d,max} = \frac{N_{Sd, cent}}{A_{cent}} + \frac{M_{Sd}}{W_{cent}} ;$$

$$\tau_{cent,d} = \frac{V_{Sd}}{A_{V, cent}}$$

$$\sigma_{id, cent, d} = \sqrt{\sigma_{cent,d,max}^2 + 3 \tau_{cent,d}^2} \leq f_{yd}$$

dove:

- $N_{Sd, cent}$ rappresenta lo sforzo normale di calcolo sulla centina:

$$N_{Sd, cent} = N_{Sd} \frac{E_{cent} \cdot A_{cent}}{E_{sb} \cdot A_{sb} + E_{cent} \cdot A_{cent}} ;$$

- N_{Sd} rappresenta lo sforzo normale di calcolo;
- A_{cent} rappresenta l'area resistente della centina;

- $E_{sb} \cdot A_{sb}$ rappresenta la rigidezza assiale dello spritz-beton;
- $E_{cent} \cdot A_{cent}$ rappresenta la rigidezza assiale della centina;
- W_{cent} rappresenta il modulo resistente elastico della centina;
- M_{Sd} e V_{Sd} rappresentano il momento flettente e il taglio di calcolo;
- $A_{V,cent}$ rappresenta l'area resistente a taglio della centina.

La verifica dello spritz-beton e delle centine deve essere effettuata nella fase di installazione del rivestimento di prima fase, nella fase di installazione dell'arco rovescio e in quella di installazione del rivestimento definitivo di calotta.

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 rigidezza molto bassa (modulo elastico degli elementi diviso per un fattore di scala $F=106$). A causa della loro bassa rigidezza 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.

La verifica del rivestimento definitivo di arco rovescio è effettuata nella fase di installazione dell'arco rovescio, nella fase di installazione del rivestimento definitivo di calotta e nella fase che simula la condizione di lungo termine (decadimento del rivestimento di prima fase e dell'eventuale consolidamenti al contorno). La verifica del rivestimento definitivo di calotta deve essere eseguita nelle fasi di lungo termine, considerando la perdita di funzionalità degli interventi di stabilizzazione e miglioramento e del rivestimento di prima fase, con una conseguente redistribuzione dello stato tensio-deformativo al contorno e nel rivestimento definitivo.

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.

Sia per le uscite/accessi di tipo pedonale che carrabile sono state eseguite analisi di interazione opera-terreno volte alla valutazione di eventuali incrementi in termini di sollecitazioni in arco rovescio dovute a potenziali fenomeni di rigonfiamento. Le relative verifiche non mostrano incrementi significativi di sollecitazioni e pertanto non si prevedono incrementi di armature rispetto alle incidenze derivanti da calcoli in assenza di pressione di rigonfiamento.

9.4 SEZIONE TIPO C2 PEDONALE (Uscita F5 p.k. 0+585)

Le analisi e le verifiche riportate di seguito sono relative al tratto a basse coperture prossimo all'imbocco dell'uscita F5 in cui la galleria attraversa la formazione BNA2 e la sezione C2 è prevista applicata come sezione prevalente.

9.4.1 Stabilità del fronte e del cavo

Nelle seguenti tabelle si riassumono i dati di input e i risultati dell'analisi di stabilità del fronte della sezione tipo C2 pedonale condotta con il metodo di Metodo di Broms & Bennermark.

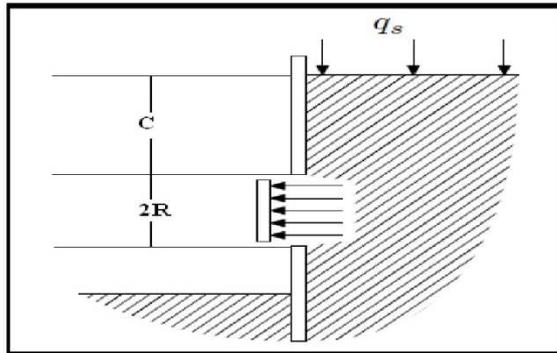
I parametri geotecnici utilizzati nelle analisi (valori di progetto) così come i valori dell'incremento di coesione equivalente al fronte, indotto dagli interventi di consolidamento, sono stati definiti coerentemente con quanto indicato nei criteri di verifica.

| n_{VTR} | L_A | ϕ_{perf} | τ_{bk} | σ_{3A}^{VTR} | A_{VTR} | f_{tk} | σ_{3B}^{VTR} | σ_3 | ΔC_{uk} |
|-----------|-------|---------------|-------------|---------------------|-------------------|----------|---------------------|------------|-----------------|
| [-] | [m] | [m] | [kPa] | [kPa] | [m ²] | [MPa] | [kPa] | [kPa] | [kPa] |
| 46 | 10 | 0.1 | 150 | 181 | 7.200E-04 | 900 | 249 | 181 | 90 |

n_{VTR} = numero di VTR al fronte
 L_A = lunghezza minima di sovrapposizione del VTR
 ϕ_{perf} = diametro di perforazione
 τ_{bk} = tensione di aderenza all'interfaccia col terreno
 σ_{3A}^{VTR} = resistenza a sfilamento dell'elemento strutturale in VTR
 A_{VTR} = area del VTR
 f_{tk} = resistenza a trazione del VTR
 σ_{3B}^{VTR} = resistenza a rottura dell'elemento strutturale in VTR
 σ_3 = tensione minima resistente al fronte
 ΔC_{uk} = coesione non drenata caratteristica equivalente indotta dall'intervento di consolidamento del fronte

Tabella 10 - Analisi di stabilità del fronte Sez. C2 pedonale: Determinazione della coesione equivalente per simulare l'intervento di consolidamento al fronte di scavo

Metodo di Broms & Bennermark (Broms et al., 1967)



Ipotesi:

- 1) Stabilità di fori non supportati praticati su sostegni verticali
- 2) Terreno puramente coesivo (criterio di Tresca)
- 3) Condizioni non drenate
- 4) Assenza di falda



$$N = \frac{q_s - s}{c_u} + \frac{\gamma}{c_u} \cdot (C + R)$$

| | | |
|-------|-------------|-----|
| Input | q_s (kPa) | 0 |
| | s (kPa) | 42 |
| | c_u | 450 |
| | γ | 20 |
| | C | 50 |
| | R | 2,5 |

| | | |
|-------|-------------|--------|
| A2+M2 | q_s (kPa) | 0 |
| | s (kPa) | 42 |
| | c_u | 321,43 |
| | γ | 20 |
| | C | 50 |
| | R | 2,5 |

| | | |
|--------|------|------------------|
| Output | N | Deformazioni |
| | 3,14 | Elasto-plastiche |

| | | |
|-------------------|-------|------------------|
| Attewell & Geddes | N | Deformazioni |
| | <1 | Trascurabili |
| | 1 - 2 | Elastiche |
| | 2 - 4 | Elasto-plastiche |
| | 4 - 6 | Plastiche |
| | > 6 | Collasso |

Tabella 11 - Analisi di stabilità del fronte Sez. C2 pedonale: 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, il rapporto di stabilità N risulta inferiore a 4. Si ritiene pertanto che il nucleo-fronte sia stabile e quindi la verifica di stabilità del fronte è soddisfatta.

9.4.2 Interazione opera-terreno

Nella tabella seguente si riassumono i dati di input che caratterizzano la sezione geotecnica utilizzata per le analisi numeriche della sezione tipo Finestra Pedonale C2.

La sezione di analisi è relativa ad una condizione di copertura limitata. La presenza della falda è stata simulata nell'analisi alla quota indicata in tabella.

| Stratigrafia di calcolo | | C | Falda | γ | c'_k | ϕ'_k | c_{uK} | E' | k_0 |
|-------------------------|--------------------|-----|-------------|----------------------|--------|-----------|----------|-------|-------|
| Formazione | Profondità da p.c. | | | | | | | | |
| [-] | [m] | [m] | [m da p.c.] | [kN/m ³] | [kPa] | [°] | [kPa] | [MPa] | [-] |
| BNA2 | 0 ÷ 25 | 20 | 20 | 20 | 20 | 24 | - | 100 | 0.59 |
| BNA2 | >25 | | | 21 | 25 | 24 | - | 200 | 0.59 |

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

Tabella 12 - Analisi di interazione Sez. Finestra Pedonale C2: definizione della stratigrafia di calcolo

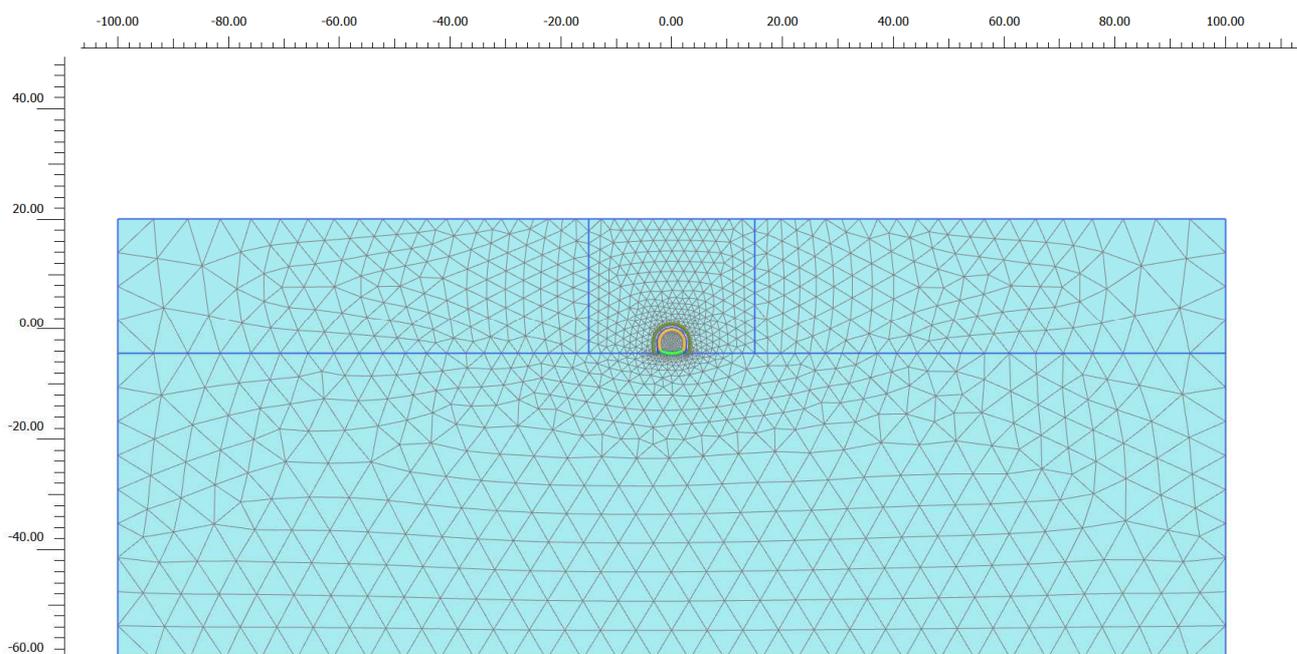


Figura 5 - Modello di calcolo - Geometria mesh

Il consolidamento del fronte tramite VTR, simulato mediante una pressione equivalente σ_3^{VTR} applicata al fronte di scavo, interviene nella modellazione FEM in maniera implicita attraverso l'applicazione delle percentuali di rilascio.

| SEZIONE TIPO | Interventi al fronte | | |
|-------------------------------------|--|---------------|-------------------|
| area di scavo | A | 23.46 | [m ²] |
| diametro medio galleria | D | 5.47 | [m] |
| diametro esterno barre VTR | ϕ_{est} | 0.06 | [m] |
| spessore barre VTR | δ | 0.01 | [m] |
| diametro interno barre VTR | ϕ_{int} | 0.04 | [m] |
| diametro di perforazione barre | ϕ_{perf} | 0.1 | [m] |
| area trasversale barre | A_t | 0.00157 | [m ²] |
| lunghezza min. di sovr. barre | L | 7 | [m] |
| superficie laterale barre | S_L | 2.199 | [m ²] |
| numero barre | N_b | 15 | [-] |
| resistenza a rottura barra | σ_b | 450000 | [kPa] |
| resistenza al taglio barra-terreno | τ_a | 100 | [kPa] |
| pressione lim. per rottura barre | $\sigma_{T,1}$ | 452 | [kPa] |
| pressione lim. per sfilamento barre | $\sigma_{T,2}$ | 141 | [kPa] |
| | $\sigma_{T,fronte} = \min(\sigma_{T1}; \sigma_{T2})$ | 141 | [kPa] |
| coesione | c | 20 | [kPa] |
| angolo di attrito | ϕ | 24 | [°] |
| coefficiente di spinta passiva | K_p | 2.37 | [-] |
| incremento di coesione equivalente | Δc | 108 | [kPa] |
| | $\Delta c + c'$ | 128 | |

Tabella 13 - Determinazione della pressione equivalente per simulare l'intervento di consolidamento al fronte

Il consolidamento al contorno, applicato su una fascia di circa 1.00 m, è caratterizzato dai parametri di seguito riportati, definiti come il minimo fra il valore del trattamento al fronte e quelli al contorno.

| γ | c_{uk} | E |
|----------------------|----------|-------|
| [kN/m ³] | [kPa] | [MPa] |
| 20 | 128 | 130 |

Tabella 14 - Parametri per la modellazione del consolidamento al contorno

| SEZIONE TIPO | Interventi al contorno | | |
|---|------------------------|---------------|-------------------|
| <i>area zona trattata</i> | A | 13.5 | [m ²] |
| <i>diametro esterno barre VTR</i> | ϕ_{est} | 0.06 | [m] |
| <i>spessore barre VTR</i> | δ | 0.01 | [m] |
| <i>diametro interno barre VTR</i> | ϕ_{int} | 0.04 | [m] |
| <i>area trasversale barre</i> | A_t | 0.00157 | [m ²] |
| <i>numero barre</i> | N_b | 25 | [-] |
| <i>resistenza a rottura barra</i> | σ_b | 450000 | [kPa] |
| <i>resistenza a taglio barra</i> | σ_τ | 85000 | [kPa] |
| <i>Incremento resistenza</i> | F_τ | 3337.942 | [kN] |
| <i>Incremento di coesione equivalente</i> | τ_{barre} | 247.255 | [kPa] |
| | | | |
| <i>coesione</i> | c | 20 | [kPa] |
| <i>angolo di attrito</i> | ϕ | 24 | [°] |
| | $\Delta C+C'$ | 267 | [kPa] |

Tabella 15 – Calcolo dei parametri per la modellazione del consolidamento al contorno

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 80 m. Il numero complessivo degli elementi è pari a circa 2634 mentre i nodi sono circa 21424.

9.4.3 Fasi e percentuali di rilascio

I tassi di deconfinamento sono stati calcolati mediante analisi assialsimmetrica e curva caratteristica numerica (come indicato nella figura soprastante con riferimento alla fase di scavo al fronte). Nell'analisi assialsimmetrica è stato inserito il consolidamento del fronte tramite VTR simulato mediante i parametri equivalenti.

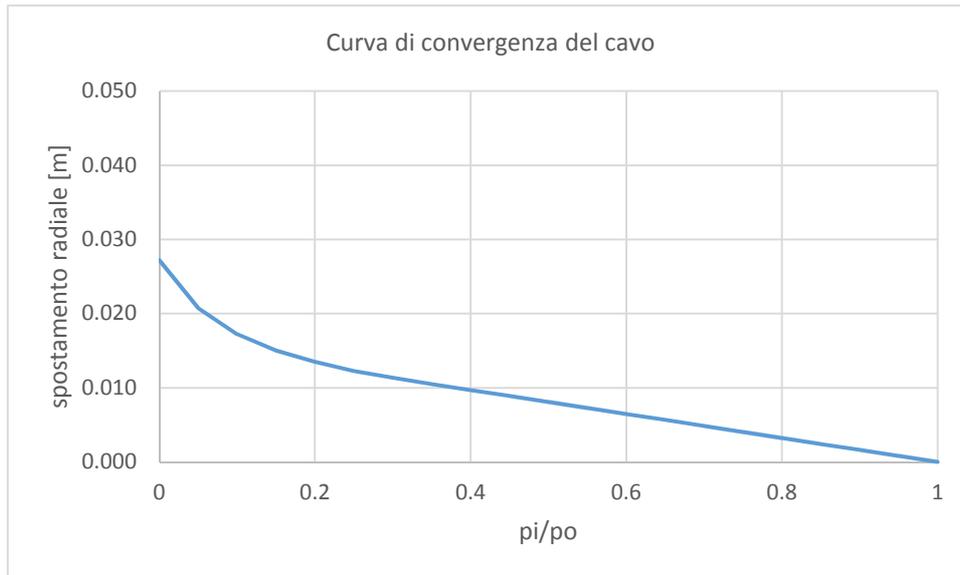


Figura 6 - Sez. Finestra Pedonale C2 – Curva caratteristica di convergenza numerica

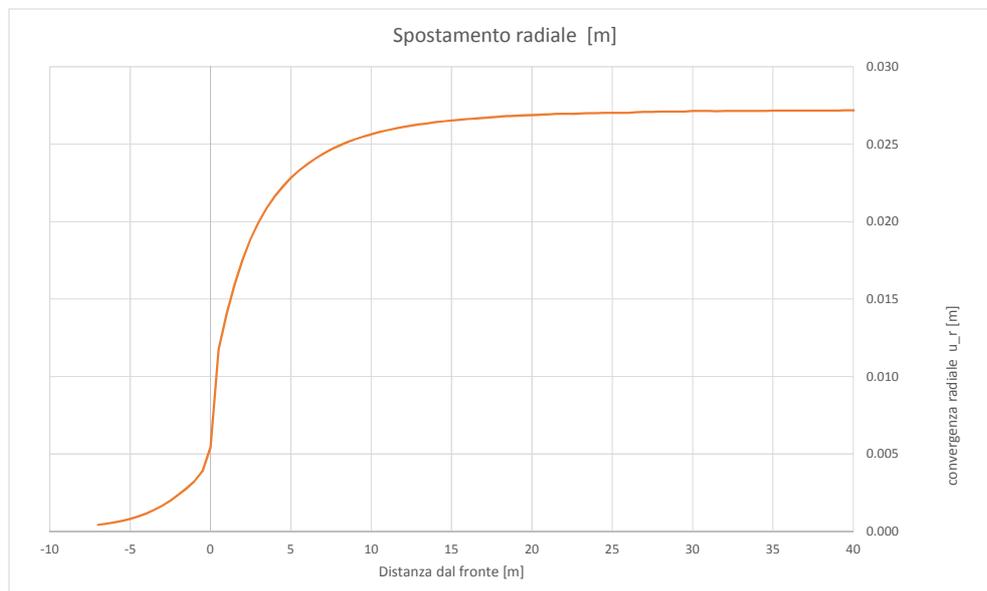


Figura 7 - Sez. Finestra Pedonale C2 – Spostamenti radiali modello assialsimmetrico in funzione della distanza dal fronte

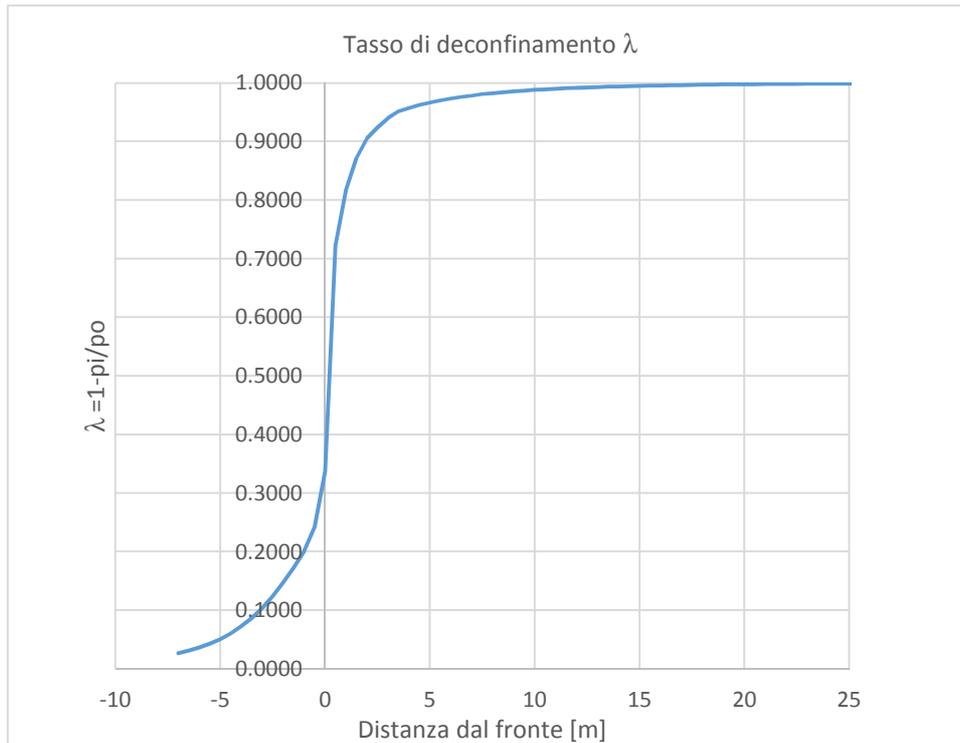


Figura 8 - Sez. Finestra Pedonale C2 – Calcolo percentuale di rilascio λ_F - al fronte

Nella tabella successiva è schematizzata la successione delle fasi di calcolo nelle quali è articolata l'analisi di interazione opera-terreno. Le fasi di scavo sono state modellate in condizioni di drenaggio della galleria, in ragione della limitata permeabilità del materiale. Al termine del processo di scavo è stata simulata la fase di lungo termine in cui è stata attivata la falda al completo contorno dello scavo, a simulare una condizione particolarmente gravosa con mancato funzionamento dei dreni, con la falda è stata posta alla quota indicata nella Tabella 12.

| Fase | Descrizione | Rilascio forze scavo (λ) |
|------|--|------------------------------------|
| 0-1 | Inizializzazione stato tensionale geostatico | 0.00 |
| 2 | Posizione limite della zona di consolidamento al contorno del cavo | 0.05 |
| 3 | Attivazione consolidamenti al contorno e rilascio a cavo libero in corrispondenza del fronte | 0.34 |
| 4 | Esecuzione dello sfondo elementare di 1 m | 0.81 |
| 5 | Installazione del rivestimento di prima fase e scarico a 8 m dal fronte | 0.98 |
| 6 | Scarico a 12 m dal fronte | 0.99 |
| 7 | Installazione dell'arco rovescio e scarico a 24 m dal fronte | 0.998 |
| 8 | Installazione del rivestimento definitivo di calotta (scarico completo) | 1.00 |
| 9 | Condizione di lungo termine (decadimento del rivestimento di prima fase/innalzamento falda con decadimento dei consolidamenti al contorno) | 1.00 |

Tabella 16 - Analisi di interazione – Sezione Finestra Pedonale C2: fasi di calcolo

9.4.4 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 nell'allegato relativo alle sezione in esame (All. [2]).

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 Tabella 17 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 9 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 | calotta | | | piedritti | | | | | | arco rovescio | | | Fascia plasticizzata |
|------|---------|------------------|------------------|-----------|------------------|------------------|---------|------------------|------------------|---------------|------------------|------------------|--|
| | u [cm] | σ_1 [kPa] | σ_3 [kPa] | u [cm] | σ_1 [kPa] | σ_3 [kPa] | u [cm] | σ_1 [kPa] | σ_3 [kPa] | u [cm] | σ_1 [kPa] | σ_3 [kPa] | |
| 2 | 0.16 | -190 | -121 | 0.10 | -247 | -129 | 0.10 | -247 | -129 | -0.03 | -237 | -186 | Non sono presenti zone plastiche |
| 3 | 1.06 | -269 | -135 | 0.71 | -377 | -89 | 0.71 | -377 | -89 | -0.19 | -248 | -168 | Punti isolati alla base dei piedritti |
| 4 | 2.59 | -499 | -45 | 1.86 | -457 | -27 | 1.86 | -457 | -27 | -0.09 | -205 | -54 | Fascia di circa 2m ai piedritti e 3m in arco rovescio |
| 5 | 3.51 | -546 | -90 | 3.44 | -392 | -15 | 3.44 | -392 | -15 | -0.82 | -103 | -13 | Presenti nella zona piedritto e reni con spessori massimi di 2.5m ed in arco rovescio con spessori sino a 4m |
| 6 | 3.54 | -549 | -93 | 3.49 | -393 | -16 | 3.49 | -393 | -16 | -0.86 | -100 | -11 | |
| 7 | 3.60 | -551 | -94 | 3.54 | -395 | -18 | 3.54 | -395 | -18 | -0.80 | -104 | -20 | Presenti nella zona piedritto e reni con spessori massimi di 2.5m |
| 8 | 3.68 | -550 | -88 | 3.60 | -399 | -23 | 3.60 | -399 | -23 | -0.73 | -108 | -29 | |
| 9 | 1.99 | -307 | -221 | 2.46 | -286 | -228 | 2.46 | -286 | -228 | -2.26 | -325 | -249 | Spessori che variano da 1m in calotta a 5m ai piedritti, mentre in arco rovescio da 1 a 4m |

u| = spostamento totale cumulativo (positivo se abbassamento, negativo se sollevamento)
 σ_1 = sforzo principale totale massimo
 σ_3 = sforzo principale totale minimo

Tabella 17 - Analisi di interazione – Sezione tipo Finestra Pedonale C2: risultati dell'analisi

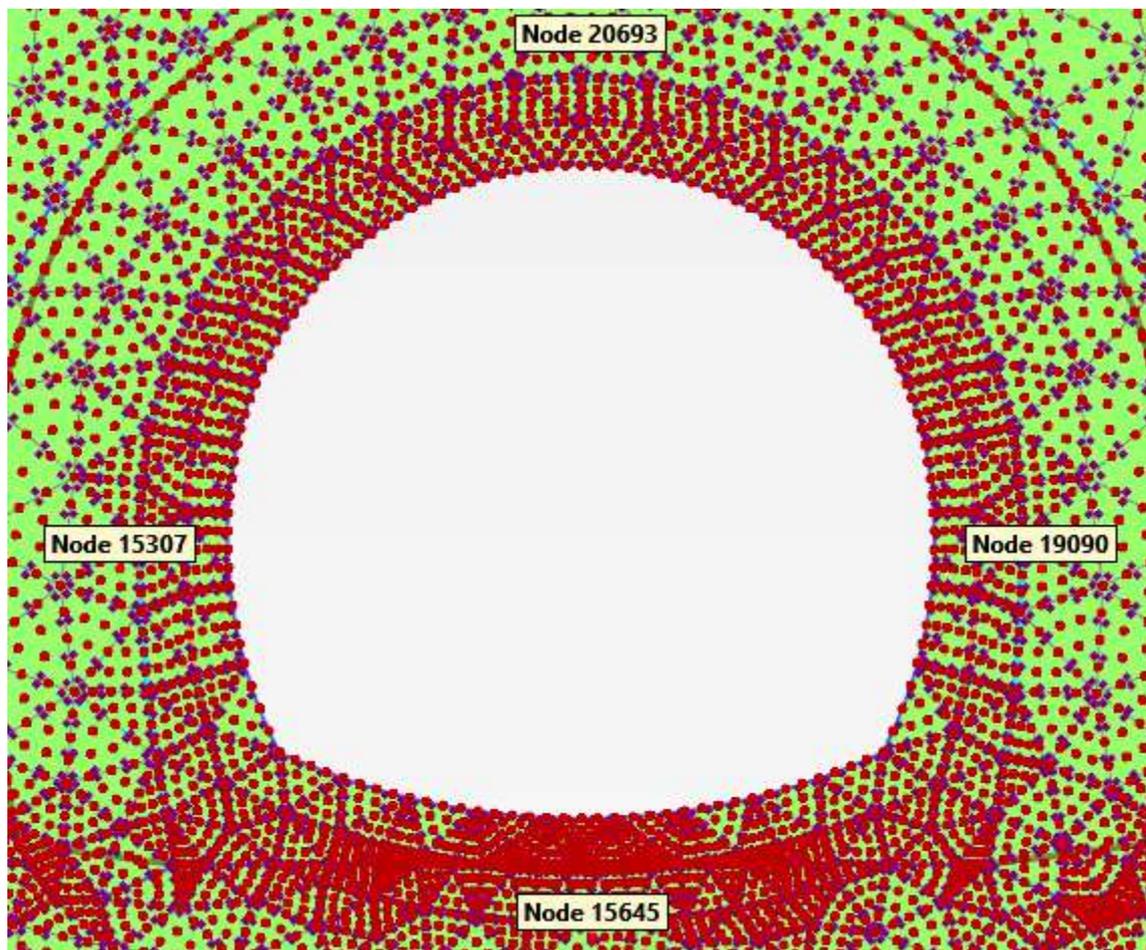


Figura 9 - Nodi rilevati nella zona del cavo

FASE 2

Viene simulato il rilascio a cavo libero in corrispondenza del momento precedente all'attivazione del consolidamento al contorno dello scavo fronte di scavo. Il campo di spostamenti risulta trascurabile (max 0.2 cm). Non sono presenti zone plastiche. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 247 kPa (piedritti) mentre la massima tensione principale minima è di 121 kPa (calotta).

FASE 3

Viene simulata l'esecuzione dello scavi sino alla posizione del fronte. Il cedimento cumulato in calotta è pari a 1 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 0.7 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 0.2 cm. Le zone plasticizzate si presentano come punti singoli alla base dei piedritti. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 377 kPa (piedritti) mentre la massima tensione principale minima è di 89 kPa (piedritti).

FASE 4

Viene simulata l'esecuzione dello sfondo elementare di 1 m. Il cedimento cumulato in calotta è pari a 2.6 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 1.9 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 0.1 cm. Le zone plastiche sono costituite da una fascia di circa 2m ai piedritti e 3m in arco rovescio. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 499 kPa (calotta) mentre la massima tensione principale minima è di 54 kPa (arco rovescio).

FASE 5

Viene simulata l'installazione del rivestimento di prima fase e l'avanzamento a 8 m dal fronte (distanza di getto dell'arco rovescio dal fronte). Il cedimento cumulato in calotta è pari a 3.5 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 3.5 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 0.8 cm. Le zone plastiche risultano presenti nella zona piedritto e reni con spessori massimi di 2.5m ed in arco rovescio con spessori sino a 4m. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 546 kPa (calotta) mentre la massima tensione principale minima è di 13 kPa (arco rovescio).

FASE 6

Viene simulato l'avanzamento a 12 m dal fronte. Il campo di spostamenti non risulta variare significativamente rispetto alla fase precedente. Le zone plastiche risultano presenti nella zona piedritto e reni con spessori massimi di 2.5m ed in arco rovescio con spessori sino a 4m. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 549 kPa (calotta) mentre la massima tensione principale minima è di 11 kPa (arco rovescio).

FASE 7

Viene simulata l'installazione dell'arco rovescio e l'avanzamento a 24 m dal fronte. Il campo di spostamenti non risulta variare significativamente rispetto alla fase precedente. Le zone plastiche risultano presenti nella zona piedritto e reni con spessori massimi di 2.5m. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 551 kPa (calotta) mentre la massima tensione principale minima è di 20 kPa (piedritti).

FASE 8

Viene simulata l'installazione del rivestimento definitivo e lo scarico totale all'interno del cavo. Il cedimento cumulato in calotta raggiunge 3.7 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 3.6 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio diventa pari a 0.8 cm. Le zone plastiche risultano presenti nella zona piedritto e reni con spessori massimi di 2.5m. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 550 kPa (calotta) mentre la massima tensione principale minima è di 29 kPa (arco rovescio).

FASE 9

Viene simulato il comportamento di lungo termine caratterizzato dalla presenza della falda agente sul rivestimento definitivo ed il decadimento del rivestimento di prima fase con conseguente trasferimento degli sforzi sul rivestimento definitivo ed il decadimento dei parametri del consolidamento al contorno che tornano ad essere quelli del terreno originario. Il cedimento cumulato in calotta raggiunge 2 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 2.5 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio diventa pari a 2.3 cm. Le zone plastiche risultano estese all'intero contorno dello scavo, con spessori che variano da 1m in calotta a 5m ai piedritti, mentre in arco rovescio da 1 a 4m. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 325 kPa (arco rovescio) mentre la massima tensione principale minima è di 221 kPa (calotta).

| | | | | | | |
|--|---------------------------------|-------|----------|------------|------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | ITINERARIO NAPOLI – BARI | | | | | |
| | RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA | | | | | |
| I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA | | | | | | |
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 65 di 199 |

9.4.5 Verifiche strutturali del rivestimento di prima fase

Le verifiche strutturali sul rivestimento di prima fase sono state eseguite per le fasi di calcolo 5, 6 7 e 8. Le caratteristiche del rivestimento provvisorio sono riportate nella seguente tabella.

| Caratteristiche | Spritz beton/Centine |
|--|----------------------|
| Spessore dello spritz beton[m] | 0.20 |
| Area resistente dello spritz beton A_{sb} [m ²] | 0.20 |
| Tipologia profilati | HEA180 |
| Interasse longitudinale profilato [m] | 1 |
| Area resistente della centina A_{cent} [cm ²] | 45.2 |
| Modulo resistente elastico della centina W_{cent} [cm ³] | 294 |
| Area resistente a taglio della centina $A_{V,cent}$ [cm ²] | 14.47 |

Tabella 18 - Analisi di interazione – Sezione tipo Finestra Pedonale C2: definizione delle caratteristiche del rivestimento provvisorio

La tabella seguente sintetizza le sollecitazioni ottenute, per ogni fase, nelle zone di maggiore interesse del rivestimento: zona di calotta, di contatto calotta-piedritti e dei piedritti, rilevate in corrispondenza dei nodi indicati nella figura a seguire.

| | Sollecitazioni | Calotta | zona di contatto calotta-piedritto | | piedritto | |
|---------------|----------------|---------|------------------------------------|--------|-----------|----------|
| | | | Sinistro | Destro | Sinistro | Destro |
| | | | | | | |
| Fase 5 | N [kN/m] | -169 | -160 | -155 | -61 | -63.8614 |
| | M [kNm/m] | -14 | -34 | -34 | -16 | -18 |
| | T [kN/m] | 0 | -10 | 9 | 5 | -7 |
| Fase 6 | N [kN/m] | -180 | -171 | -166 | -66 | -68.8956 |
| | M [kNm/m] | -15 | -35 | -35 | -15 | -17 |
| | T [kN/m] | 0 | -11 | 9 | 6 | -8 |
| Fase 7 | N [kN/m] | -187 | -177 | -172 | -68 | -70.8952 |
| | M [kNm/m] | -15 | -35 | -35 | -15 | -17 |
| | T [kN/m] | 0 | -10 | 9 | 4 | -6 |
| Fase 8 | N [kN/m] | -202 | -180 | -174 | -59 | -61.5711 |
| | M [kNm/m] | -15 | -35 | -35 | -15 | -17 |
| | T [kN/m] | 0 | -10 | 9 | 4 | -6 |

Tabella 19 - Analisi di interazione – Sezione tipo Finestra Pedonale C2: Sollecitazioni nelle zona di maggior interesse del rivestimento di prima fase

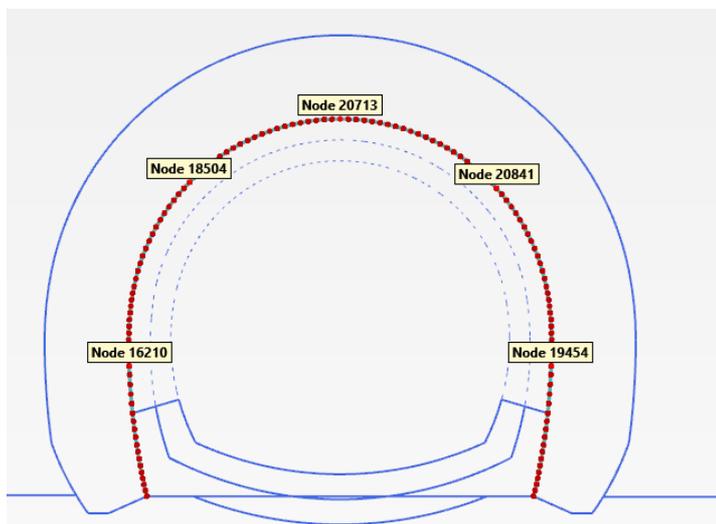


Figura 10 - Nodi rilevati del rivestimento di prima fase

In allegato si riportano, per ogni nodo del rivestimento, le sollecitazioni scaturite dall'analisi e le conseguenti verifiche: le verifiche strutturali del rivestimento di prima fase sono soddisfatte, per ciascuna fase, in tutti i punti.

9.4.6 Verifiche strutturali SLU del rivestimento definitivo

Nella tabella seguente si riportano le caratteristiche simulate dei rivestimenti di prima fase e definitivi.

| Tipo di prerinvestimento | Spritz beton/Rivestimento definitivo |
|--|--------------------------------------|
| Spessore dello spritz [m] | 0.20 |
| Spessore simulato del rivestimento definitivo di arco rovescio [m] | 0.60 |
| Spessore simulato del rivestimento definitivo di calotta [m] | 0.50 |

Tabella 20 - Analisi di interazione – Sezione tipo Finestra Pedonale C2: 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.

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).

Il rivestimento definitivo è previsto armato sia in calotta che in arco rovescio. L'incidenza delle armature in calotta è di 70kg di acciaio per m³ e in arco rovescio è di 60kg di acciaio per m³.

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 | zona di contatto calotta-piedritto | | pedritto | |
|---------------|----------------|---------|------------------------------------|--------|----------|--------|
| | | | sinistro | destro | sinistro | destro |
| Fase 8 | N [kN/m] | 12 | -9 | -9 | -40 | -39 |
| | M [kNm/m] | 5 | 0 | 0 | -6 | -6 |
| | T [kN/m] | 0 | -4 | 4 | 0 | 0 |
| Fase 9 | N [kN/m] | -556 | -565 | -560 | -575 | -573 |
| | M [kNm/m] | -1 | -1 | 1 | -9 | -10 |
| | T [kN/m] | 0 | 2 | -3 | -38 | 38 |

Tabella 21 - Analisi di interazione – Sezione tipo Finestra Pedonale C2: Sollecitazioni nelle zone calotta-piedritto del rivestimento definitivo

| | Sollecitazioni | arco rovescio | zona di contatto piedritto-arco | |
|---------------|----------------|---------------|---------------------------------|--------|
| | | | sinistro | destro |
| Fase 7 | N [kN/m] | -15 | -14 | -14 |
| | M [kNm/m] | -3 | -3 | -3 |
| | T [kN/m] | 0 | 0 | 0 |
| Fase 8 | N [kN/m] | -21 | -25 | -25 |
| | M [kNm/m] | 7 | -1 | -1 |
| | T [kN/m] | 0 | 10 | -10 |
| Fase 9 | N [kN/m] | -503 | -560 | -560 |
| | M [kNm/m] | 97 | -30 | -30 |
| | T [kN/m] | 5 | 153 | -153 |

Tabella 22 - Analisi di interazione – Sezione tipo Finestra Pedonale C2: Sollecitazioni nelle zone arco rovescio-piedritto del rivestimento definitivo

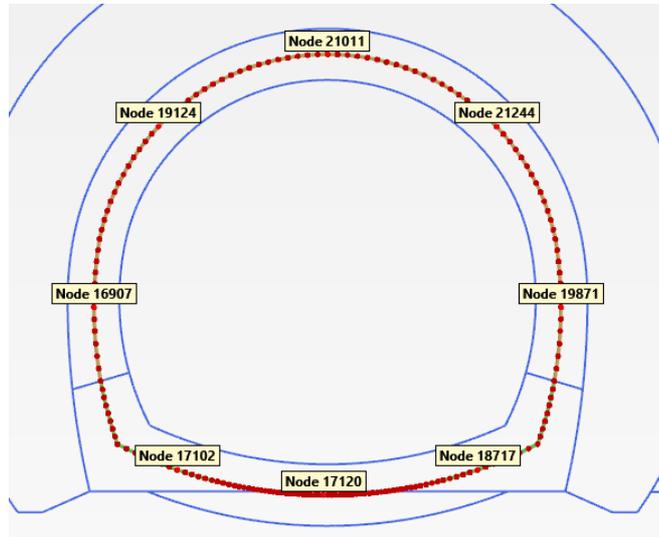


Figura 11 - Nodi rilevati del rivestimento definitivo

In **calotta e piedritti** si dispongono 1+1 $\phi 20/20$ con un copriferro netto di 4 cm. L'armatura longitudinale di ripartizione è costituita da barre $\phi 12/30$. L'armatura a taglio è sufficiente la minima del tipo $\phi 12/40\text{cm}/30\text{cm}$.

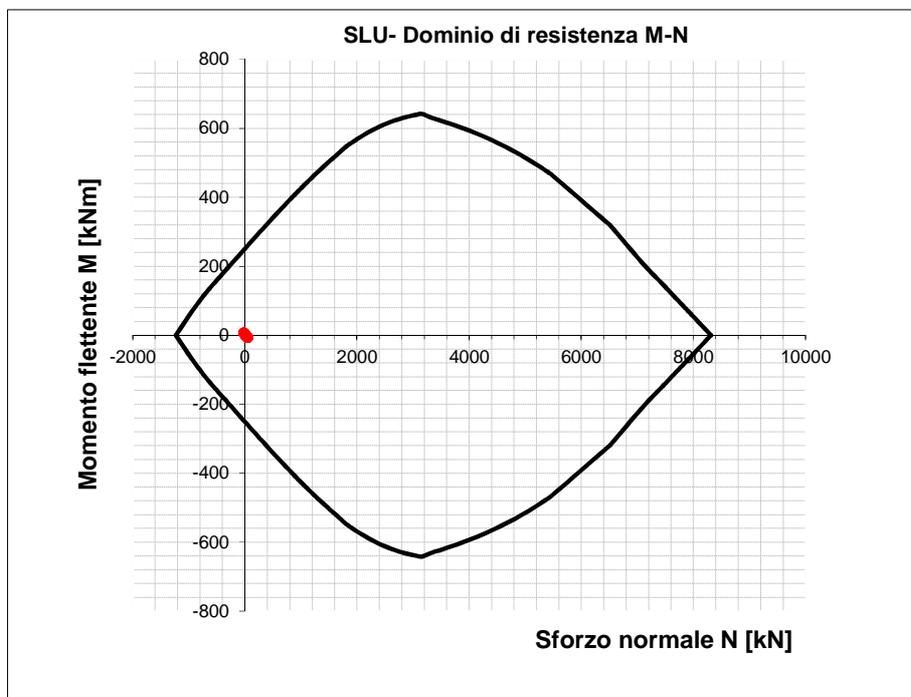


Figura 12 - Dominio resistente SLU calotta (B=1.00 m, H=0.50 m) – Fase 8

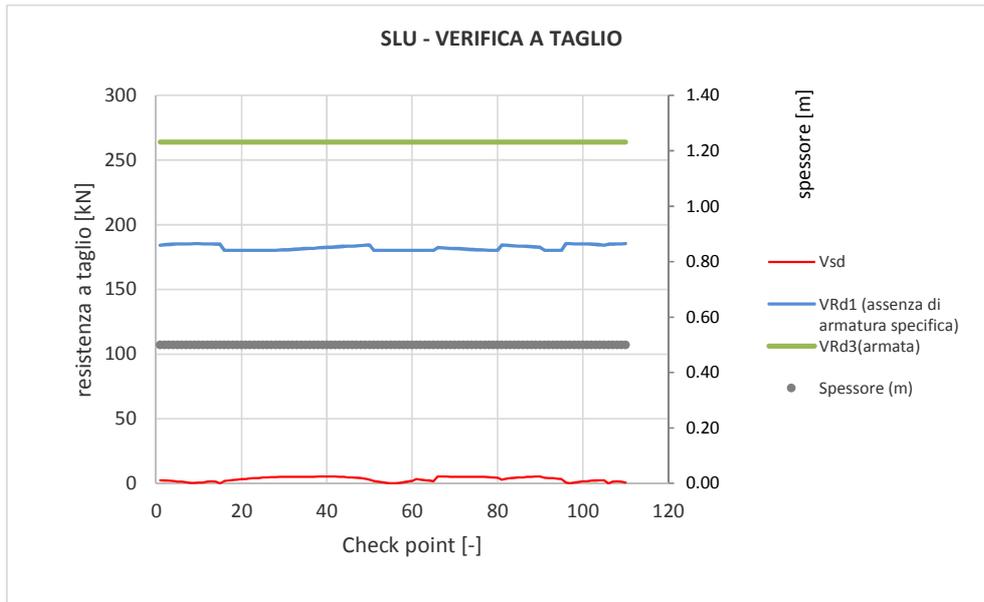


Figura 13 - Verifica SLU taglio calotta – Fase 8

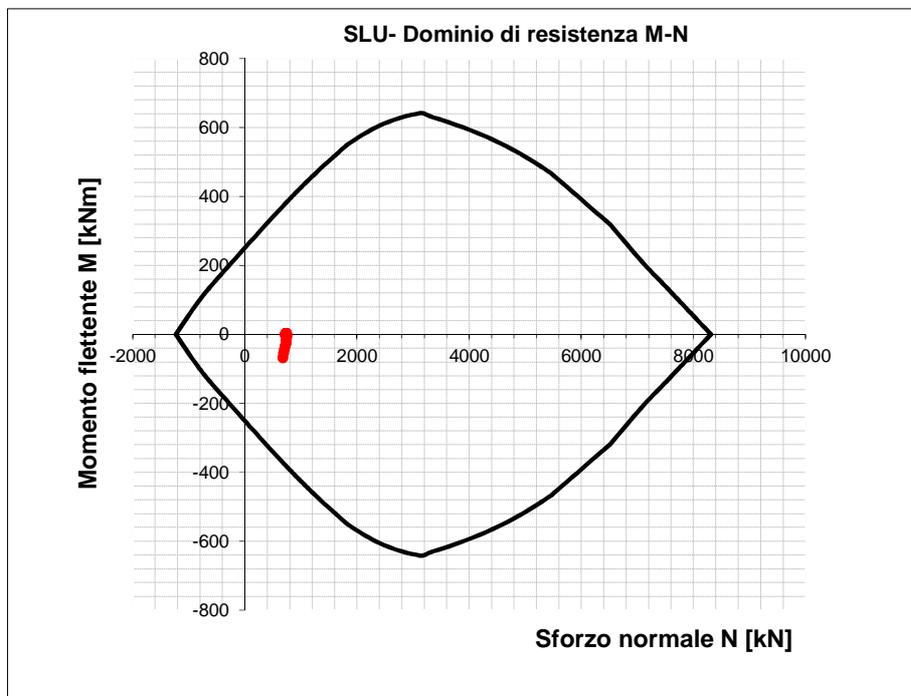


Figura 14 - Dominio resistente SLU calotta (B=1.00 m, H=0.50 m) – Fase 9

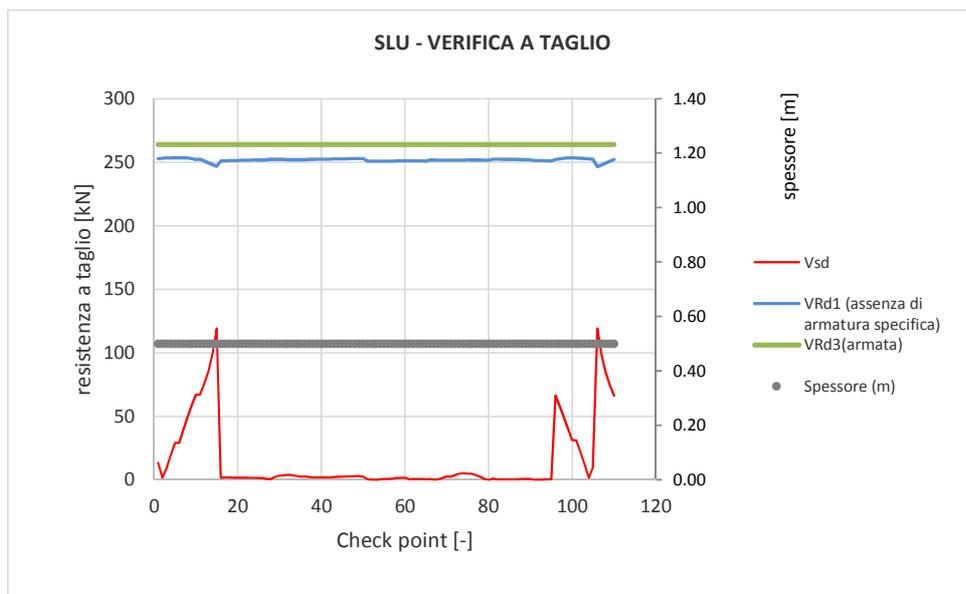


Figura 15 - Verifica SLU taglio calotta – Fase 9

In **arco rovescio** si dispongono 1+1 $\phi 20/20$ con un copriferro netto di 4 cm. L'armatura longitudinale di ripartizione è costituita da barre $\phi 12/30$. L'armatura a taglio è sufficiente la minima del tipo $\phi 12/40\text{cm}/30\text{cm}$.

Figura 16 - Dominio resistente SLU arco rovescio (B=1.00 m, H=0.60 m) – Fase 7

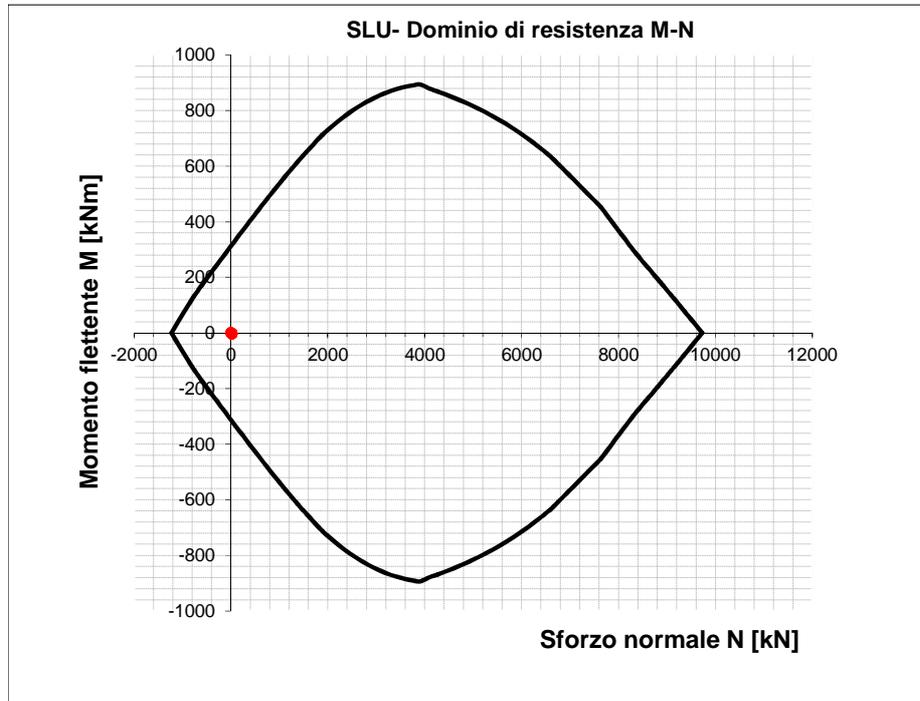


Figura 17 - Verifica SLU taglio arco rovescio – Fase 7

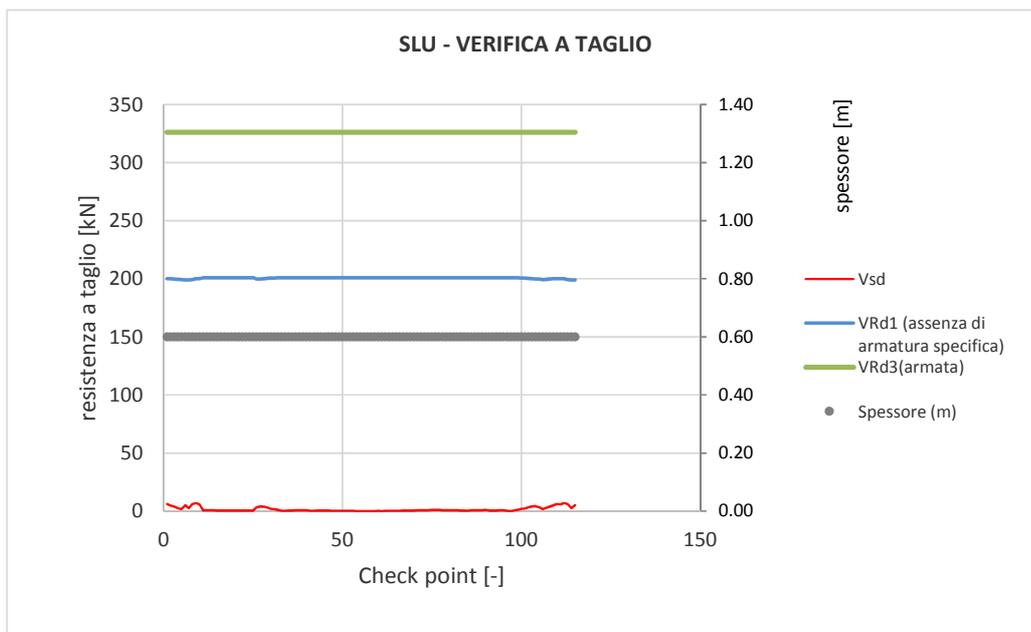


Figura 18 - Dominio resistente SLU arco rovescio (B=1.00 m, H=0.60 m) – Fase 8

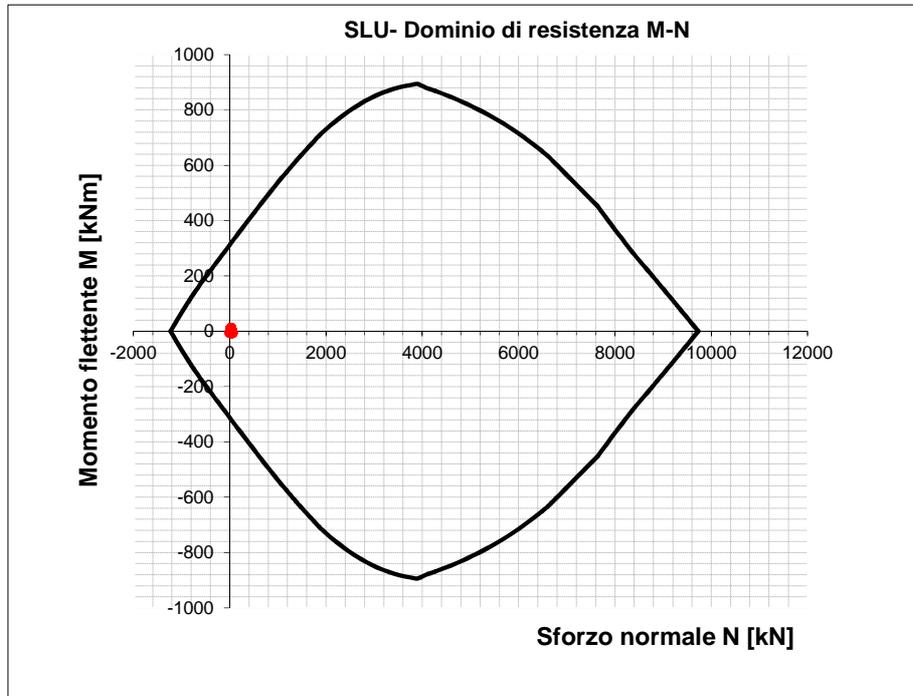


Figura 19 - Verifica SLU taglio arco rovescio – Fase 8

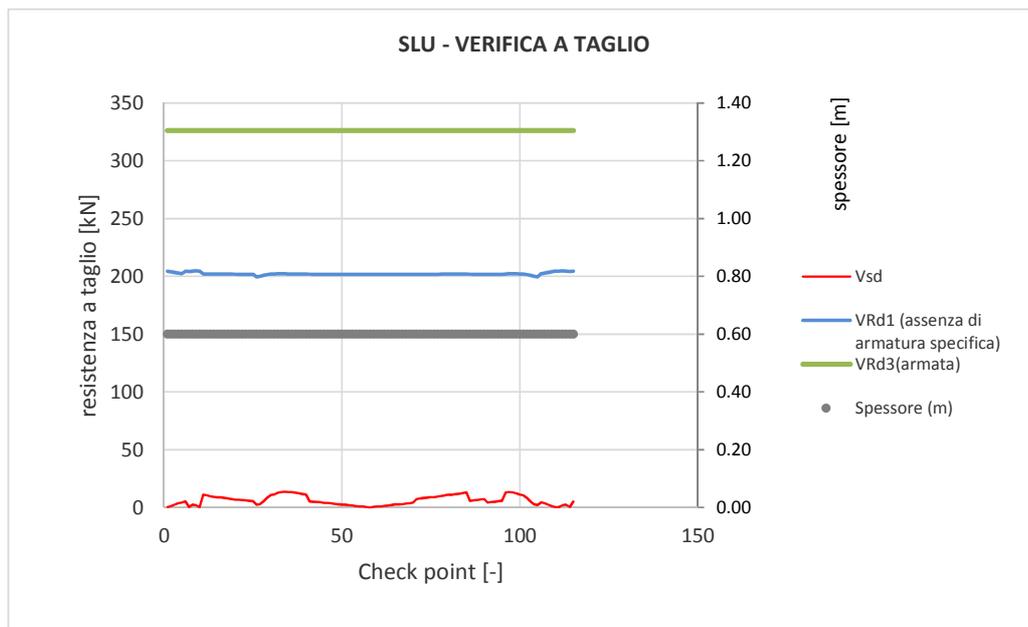


Figura 20 - Dominio resistente SLU arco rovescio (B=1.00 m, H=0.90 m) – Fase 9

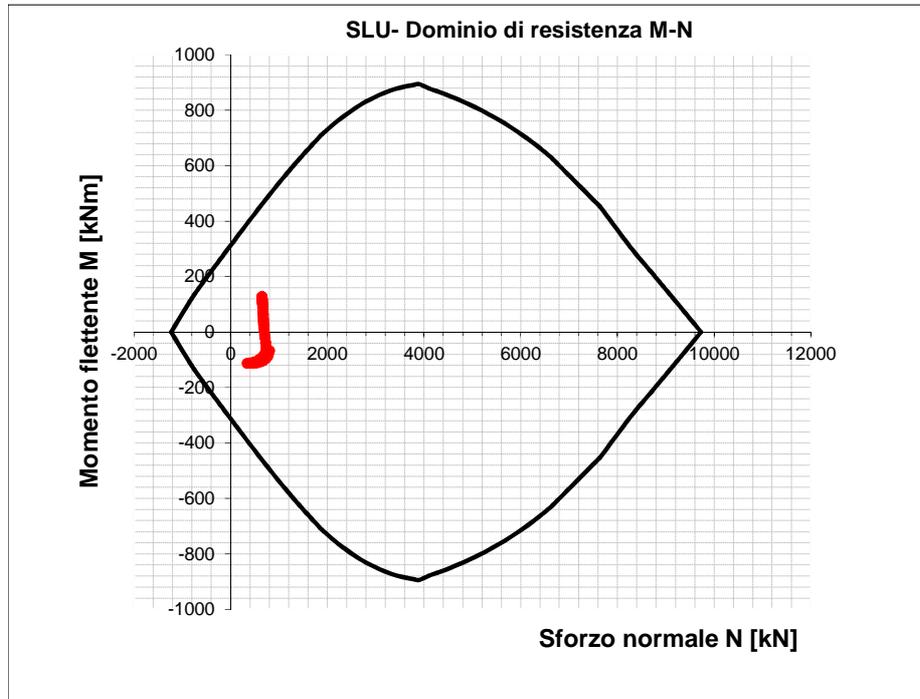
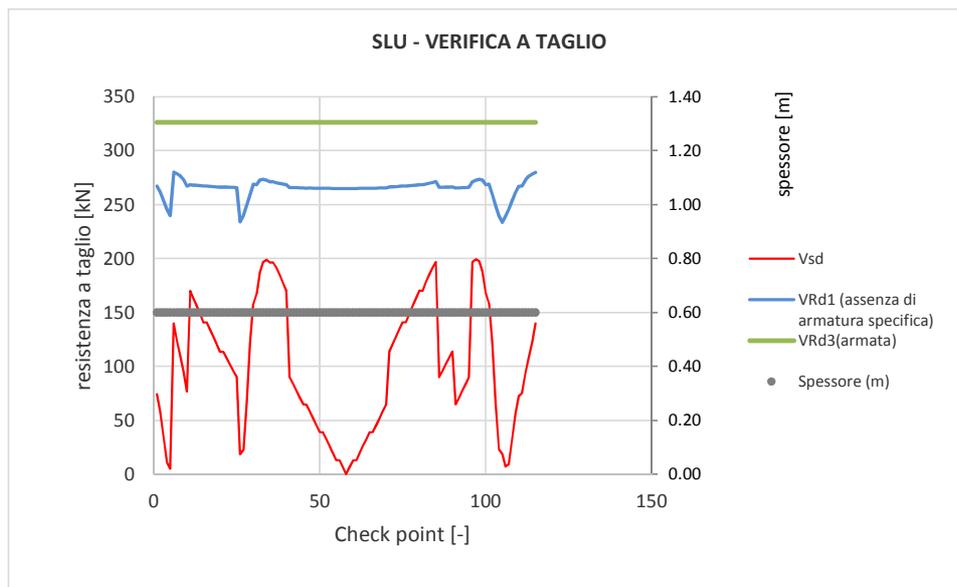


Figura 21 - Verifica SLU taglio arco rovescio – Fase 9



9.4.7 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.

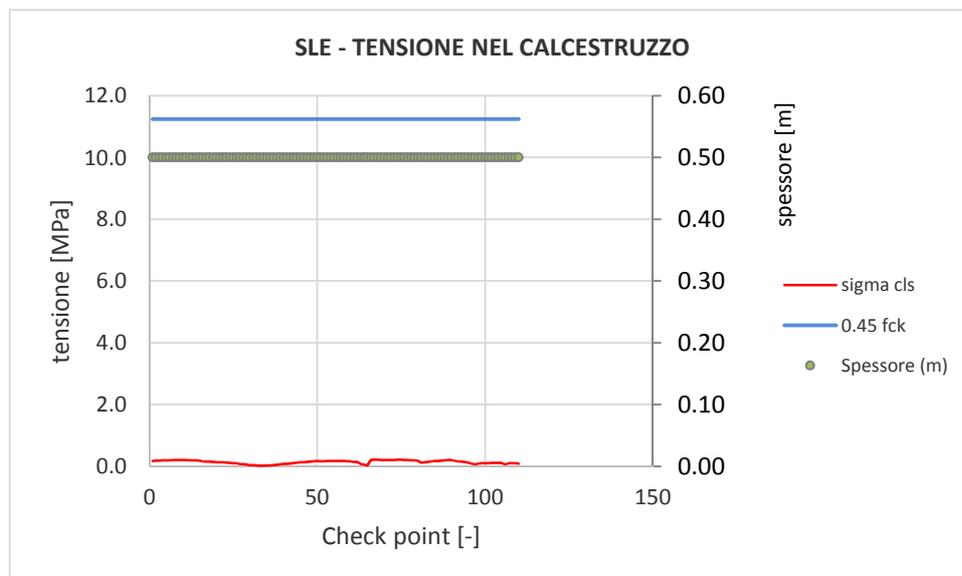


Figura 22 - Verifiche SLE tensione cls calotta – Fase 8

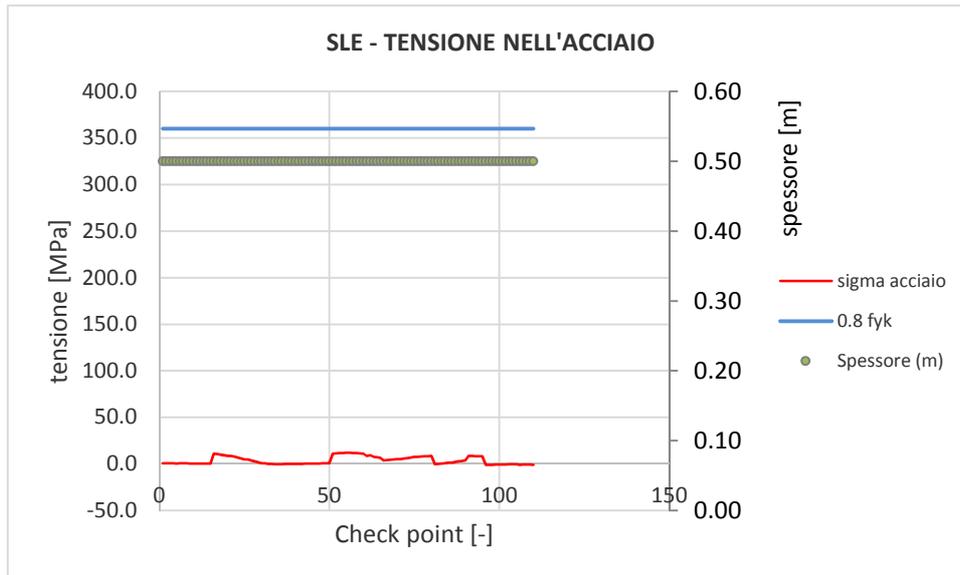


Figura 23 - Verifiche SLE tensione acciaio calotta – Fase 8

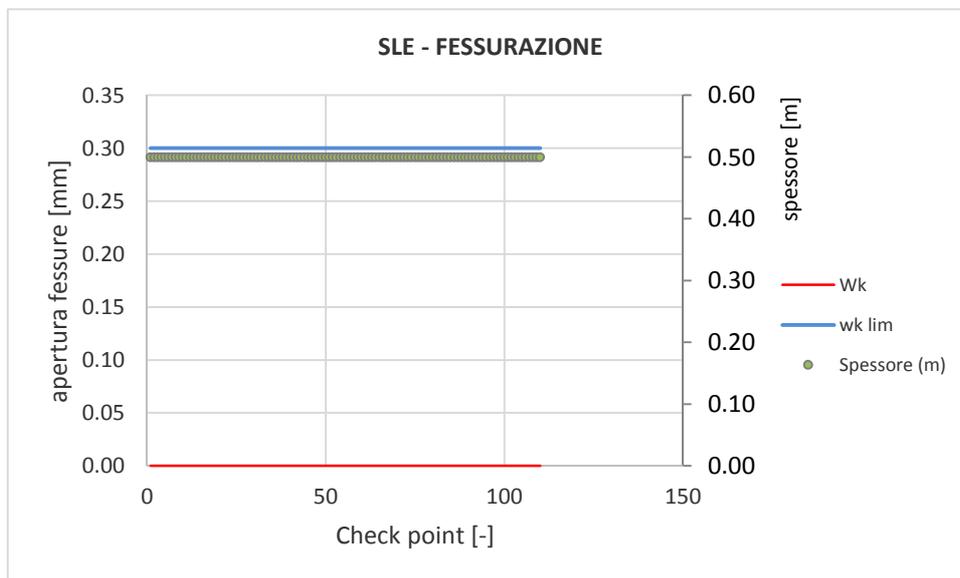


Figura 24 - Verifiche SLE fessurazione calotta – Fase8

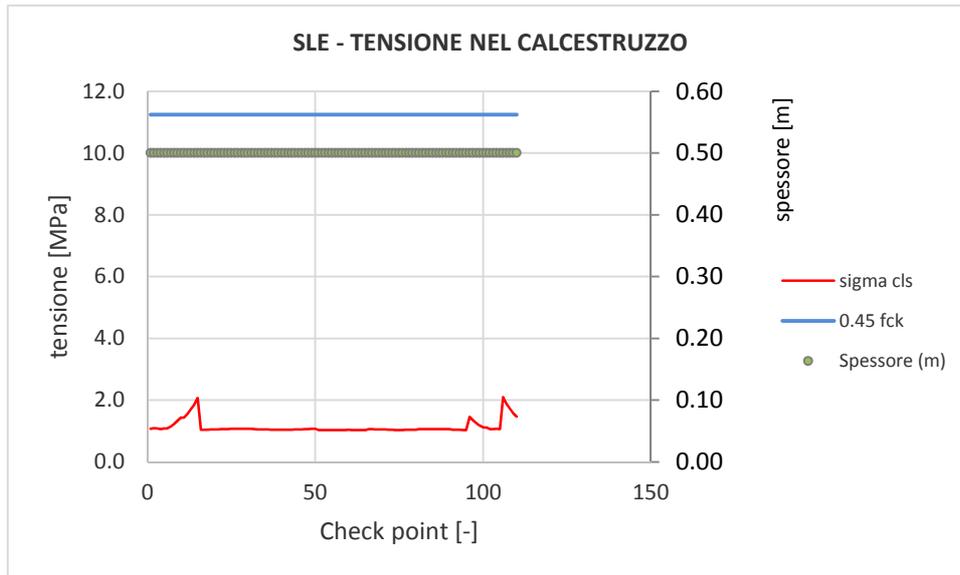


Figura 25 - Verifiche SLE tensione cls calotta – Fase 9

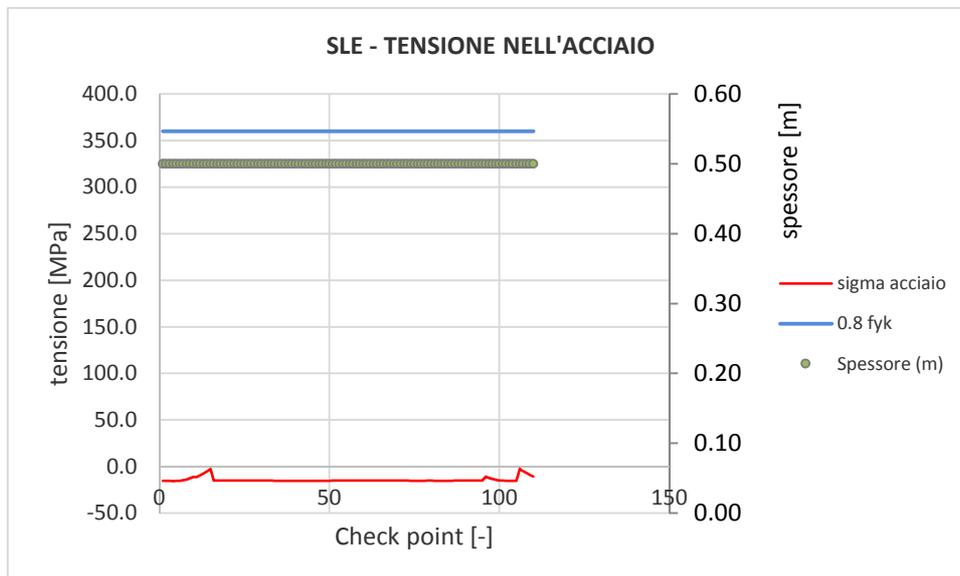


Figura 26 - Verifiche SLE tensione acciaio calotta – Fase 9

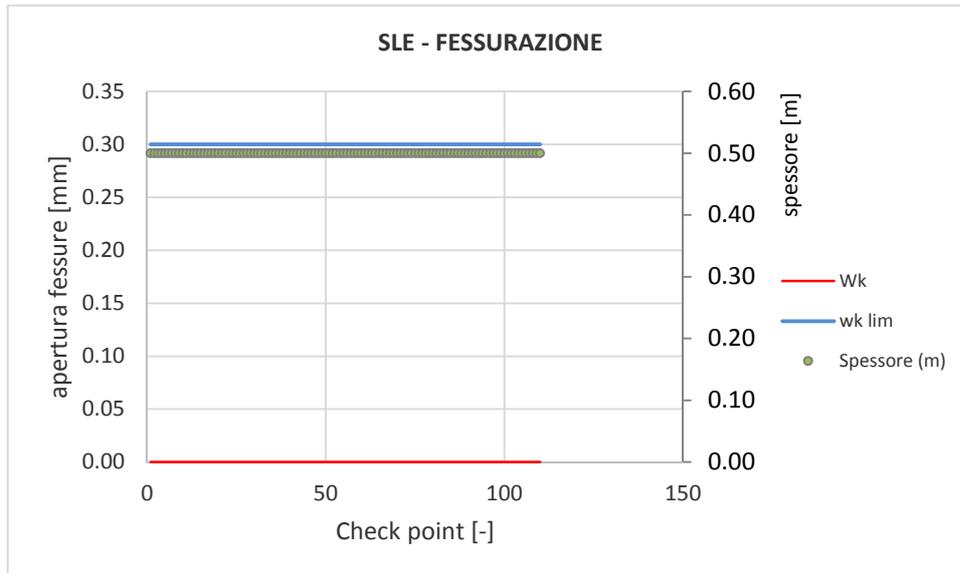


Figura 27 - Verifiche SLE fessurazione calotta – Fase 9

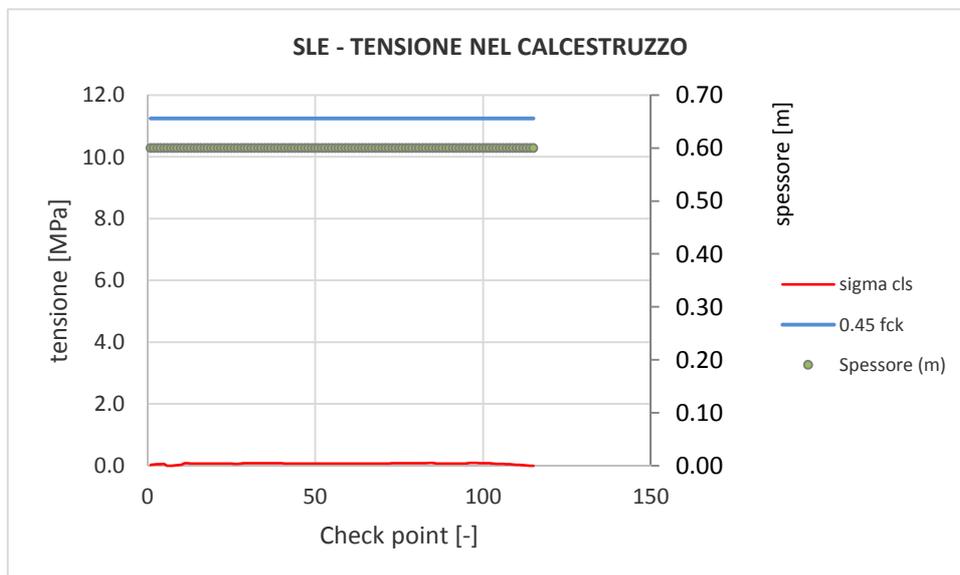


Figura 28 - Verifiche SLE tensione cls arco rovescio – Fase 7

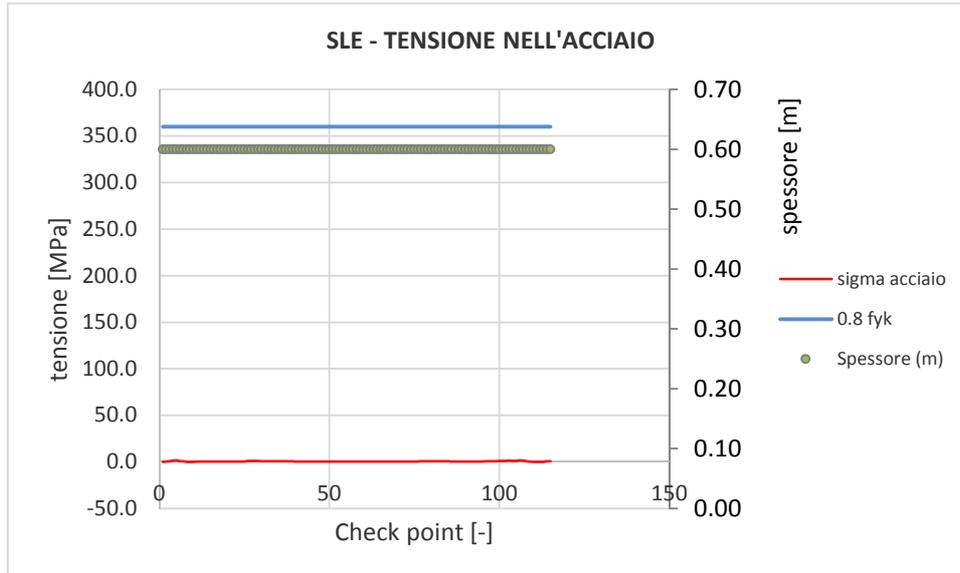


Figura 29 - Verifiche SLE tensione acciaio arco rovescio – Fase 7

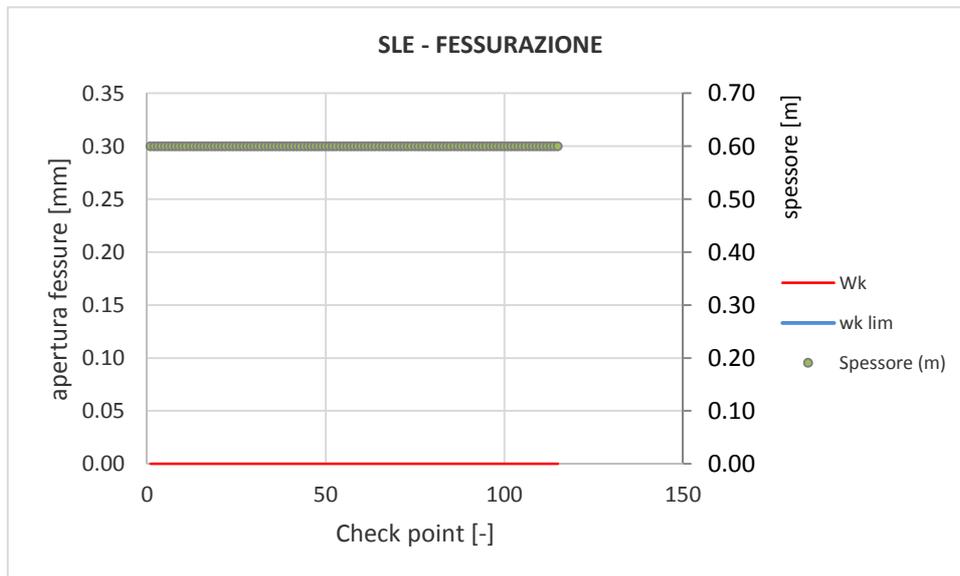


Figura 30 - Verifiche SLE fessurazione arco rovescio – Fase 7

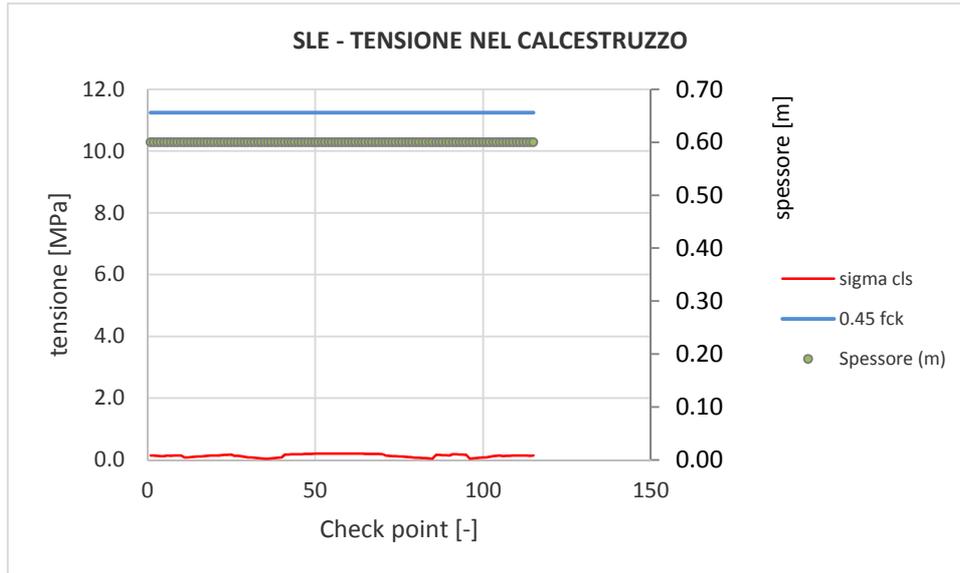


Figura 31 - Verifiche SLE tensione cls arco rovescio – Fase 8

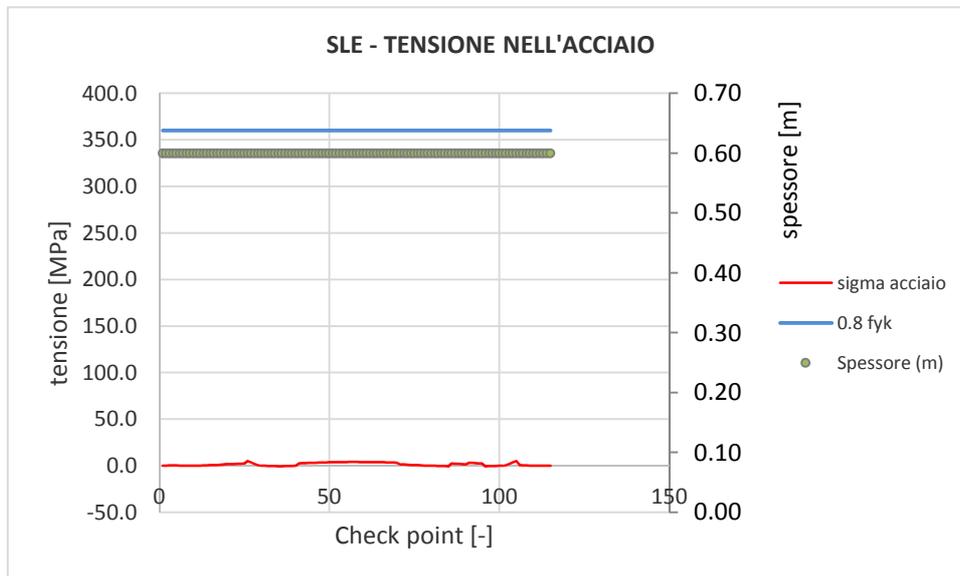


Figura 32 - Verifiche SLE tensione acciaio arco rovescio – Fase 8

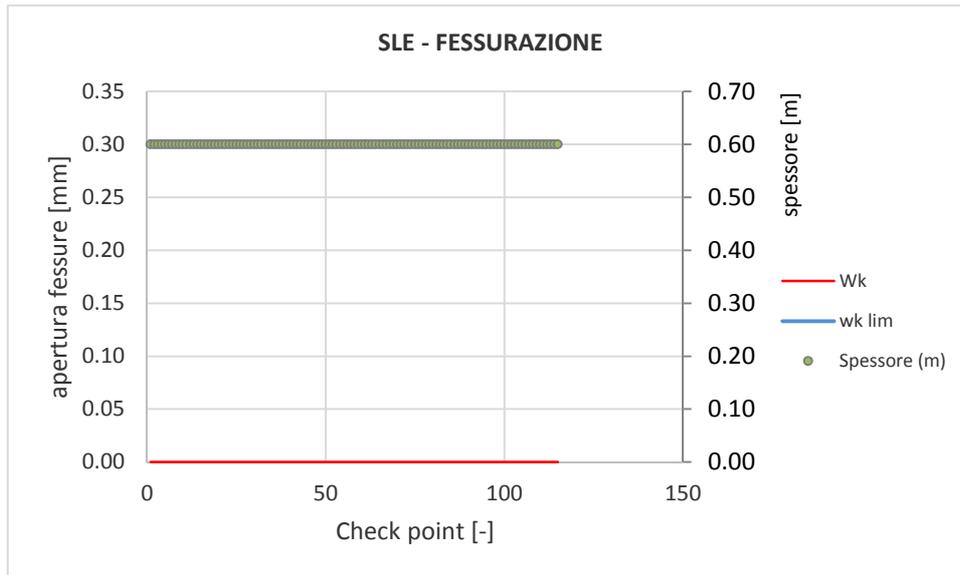


Figura 33 - Verifiche SLE fessurazione arco rovescio – Fase 8

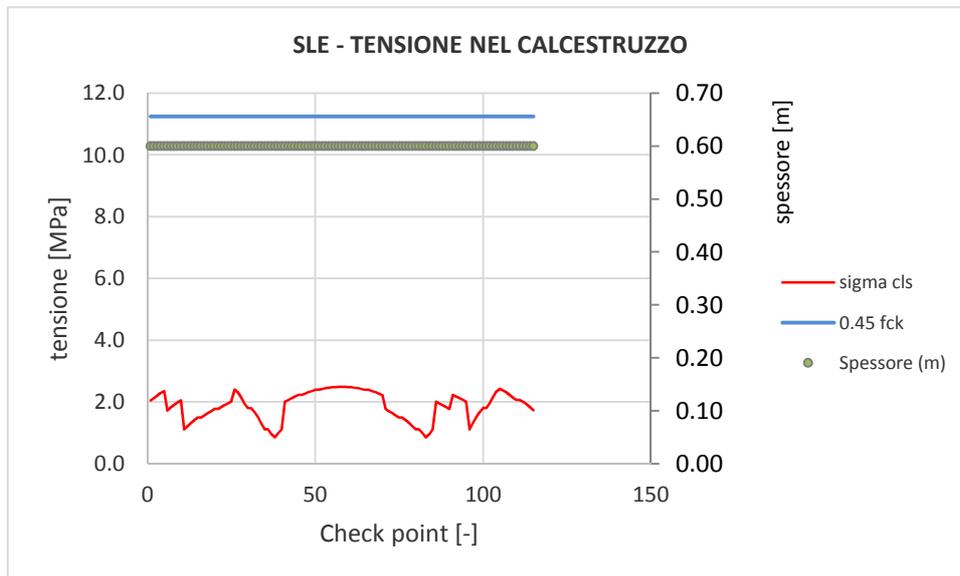


Figura 34 - Verifiche SLE tensione cls arco rovescio – Fase 9

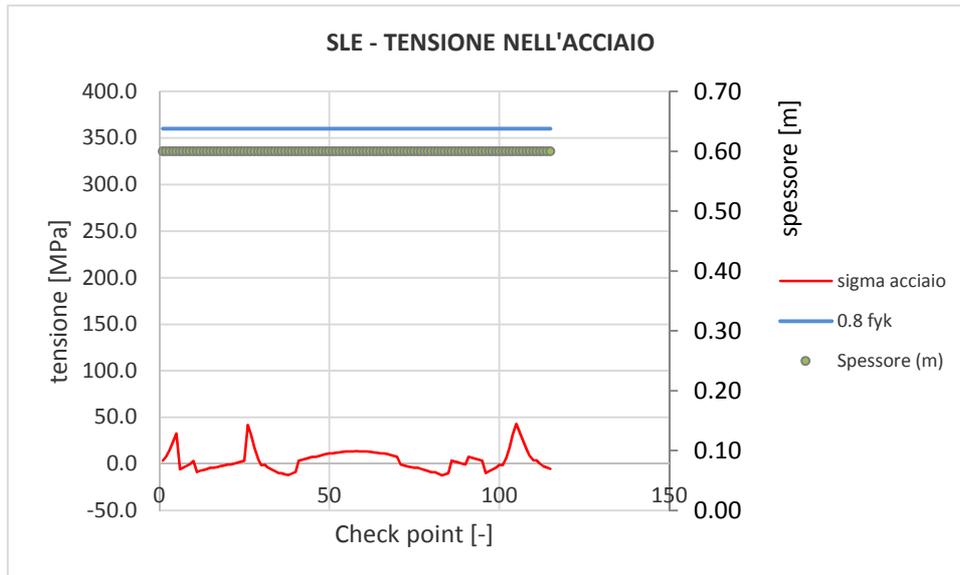


Figura 35 - Verifiche SLE tensione acciaio arco rovescio – Fase 9

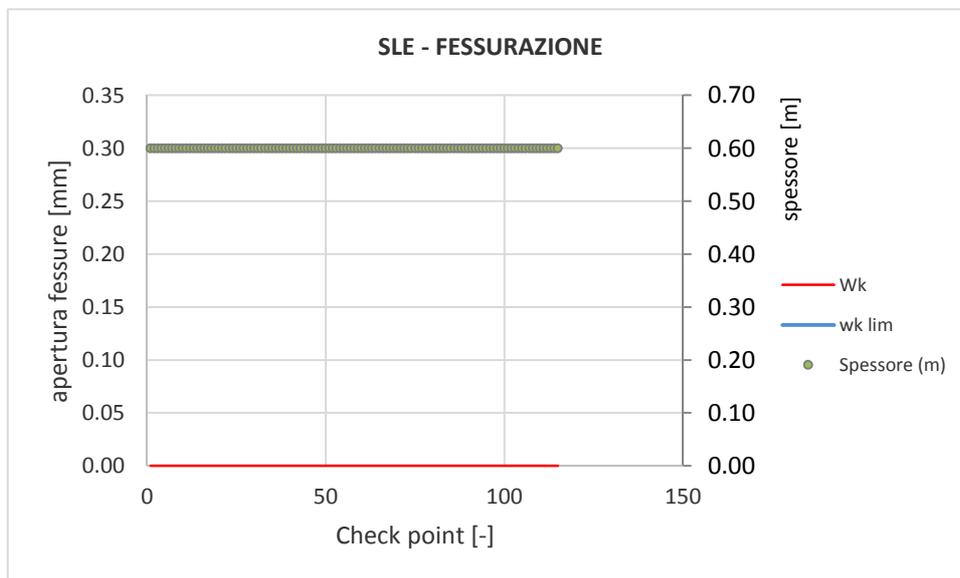


Figura 36 - Verifiche SLE fessurazione arco rovescio – Fase 9

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

| | | | | | | |
|--|----------|-------|----------|------------|------|-----------|
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 82 di 199 |

9.5 SEZIONE B2 PEDONALE (cunicoli paralleli finestra F6)

Le analisi e le verifiche riportate di seguito sono relative alla sezione di massima copertura dei cunicoli pedonali della finestra F6 paralleli alla galleria Rocchetta. In tale tratto la galleria attraversa la formazione BNA2 e la sezione B2 pedonale è prevista applicata come sezione prevalente.

Le verifiche riportate di seguito sono da intendersi rappresentative anche per la sezione B2 carrabile nelle tratte di attraversamento della stessa formazione BNA2 in cui è prevista l'applicazione di tale sezione come sezione prevalente.

Nelle analisi di interazione opera-terreno eseguite si è tenuto conto dell'interazione tra lo scavo della sezione di cunicolo pedonale con quello della galleria di linea Rocchetta localizzata a circa 20m di distanza del cunicolo stesso.

9.5.1 Stabilità del fronte e del cavo

Nelle seguenti tabelle si riassumono i dati di input e i risultati dell'analisi di stabilità del fronte della sezione tipo B2 pedonale condotta con il metodo delle linee caratteristiche.

I parametri geotecnici utilizzati nelle analisi (valori di progetto) così come i valori dell'incremento di coesione equivalente al fronte, indotto dagli interventi di consolidamento, sono stati definiti coerentemente con quanto indicato nei criteri di verifica.

| Sez di calcolo | Unità | pk. (m) | H [m] | σ_0 [MPa] | p_{w0} [MPa] | p_{wR} [MPa] | R_w [m] | γ [kN/m ³] | c'_{dp} [MPa] | Δc_{dVTR} [MPa] | φ'_{dp} [°] | E_d [MPa] |
|-------------------|----------|------------|----------|---------------------|-------------------|-------------------|--------------|----------------------------------|--------------------|----------------------------|------------------------|----------------|
| B2 pedonale | BNA 3 | - | 332.5 | 7.98 | - | - | - | 24 | 0.96 | 0.284 | 29.26 | 3000 |

H = copertura rispetto al piano dei centri della galleria

σ_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}

g = peso dell'unità di volume dell'ammasso

c'_{dp} = valore di calcolo della coesione efficace di picco dell'ammasso

$\Delta c'_{dp}$ = valore di calcolo di incremento della coesione per consolidamento al fronte

φ'_{dp} = valore di calcolo dell'angolo di attrito di picco dell'ammasso

E_d = valore di calcolo del modulo elastico dell'ammasso

Tutte le analisi sono svolte con riferimento allo scavo di una galleria di raggio equivalente pari a 2,5 m in scavo tradizionale.

Tabella 23 - Analisi di stabilità del fronte Sez. B2 pedonale: dati di input

| Sezione di analisi | σ_c [MPa] | p_c [MPa] | $\frac{\sigma_c}{p_c}$ [-] | u_F [m] | $\frac{u_F}{R_{eq}}$ [%] | R_{PF} [m] | $\frac{R_{PF}}{R_{eq}}$ [-] | u_∞ [m] | R_P [m] | Categoria Criterio 1 | Categoria Criterio 2.1 | Categoria Criterio 2.2 |
|--------------------|------------------|-------------|----------------------------|-----------|--------------------------|--------------|-----------------------------|----------------|-----------|----------------------|------------------------|------------------------|
| B2 pedonale | 4.24 | 2.26 | 1.87 | 0.0060 | 0.24 | 3.01 | 1.20313 | 0.02 | 4.4 | A | B | B |

$p_c = (3\sigma_o - 2\sigma_c) / (1 + 2K_p)$ = 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_∞ = convergenza finale del cavo
 R_P = raggio plastico finale al contorno del cavo
 R_{eq} = raggio di scavo equivalente della galleria

Tabella 24 - Analisi di stabilità del fronte Sez. B2 pedonale: 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, il nucleo-fronte risulta stabile e quindi la verifica di stabilità del fronte è soddisfatta.

nuovo lavoro
nuova analisi
analisi base

criterio di resistenza: MOHR COULOMB

Pressione Prerivestimento [MPa]: 0,00
Pressione Rivestimento [MPa]: 0,00

— GALLERIA B.T.
— GALLERIA L.T.
— FRONTE SFERICO
— PRERIVESTIMENTO
— RIVESTIMENTO

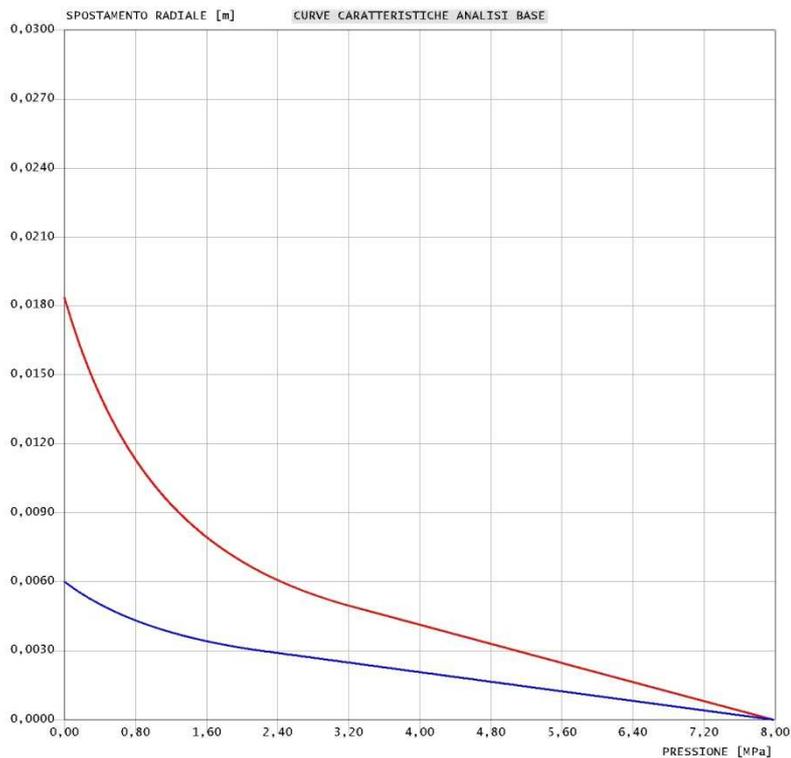


Tabella 26 – Analisi di stabilità del fronte Sez. B2 pedonale: risultati delle analisi (curve caratteristiche)

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 della sezione tipo Cunicolo Pedonale B2 .

| Stratigrafia di calcolo | | C | Falda | γ | c'_k | ϕ'_k | c_{uK} | E' | k_0 |
|-------------------------|--------------------|-----|-------------|----------------------|--------|-----------|----------|-------|-------|
| Formazione | Profondità da p.c. | | | | | | | | |
| [-] | [m] | [m] | [m da p.c.] | [kN/m ³] | [kPa] | [°] | [kPa] | [MPa] | [-] |
| BNA3 | 0 ÷ 180 | 330 | - | 23 | 100 | 26 | - | 250 | 1.0 |
| BNA3 | >180 | | | 24 | 1200 | 35 | - | 3000 | 1.0 |

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

Tabella 27 - Analisi di interazione Sez. Cunicolo Pedonale B2 : definizione della stratigrafia di calcolo

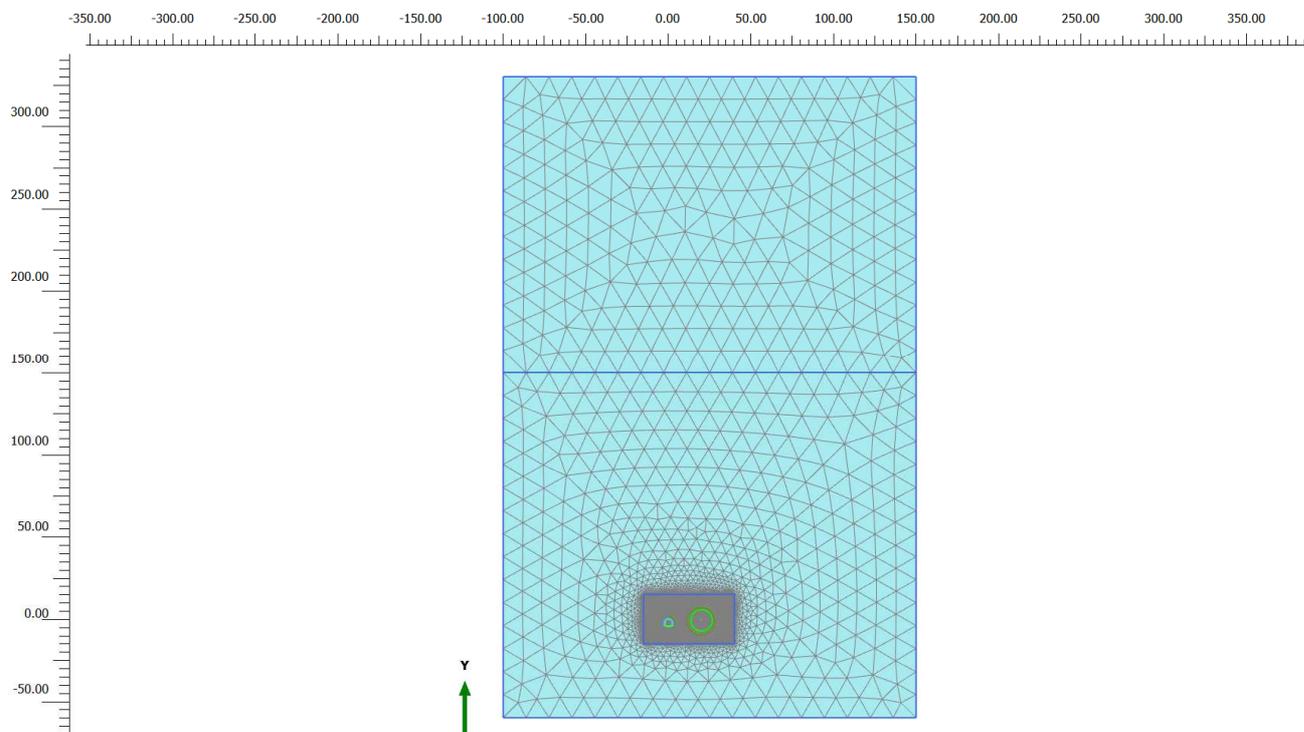


Figura 37 - Modello di calcolo - Geometria mesh

Con riferimento all'asse della galleria, la griglia di calcolo presenta una larghezza totale di 250 m e un'altezza complessiva di 390 m. Il numero complessivo degli elementi è pari a circa 12804 mentre i nodi sono circa 102975.

Il consolidamento del fronte è previsto mediante n.15 VTR cementati con miscele espansive, con sovrapposizione minima di 7m. Al contorno dello scavo in corrispondenza del fronte si assiste alla presenza di una fascia plasticizzata molto esigua, mentre al centro del fronte la fascia plasticizzata risulta pari a 1.5m. La sezione risulta quindi in condizioni di tipo B, con interventi al fronte atti non tanto a fornire un contributo alla stabilità globale, ma a prevenire fenomeni di instabilità locale e mantenere le condizioni del mezzo in accordo alle caratterizzazione effettuata, evitando il passaggio ad un comportamento discontinuo.

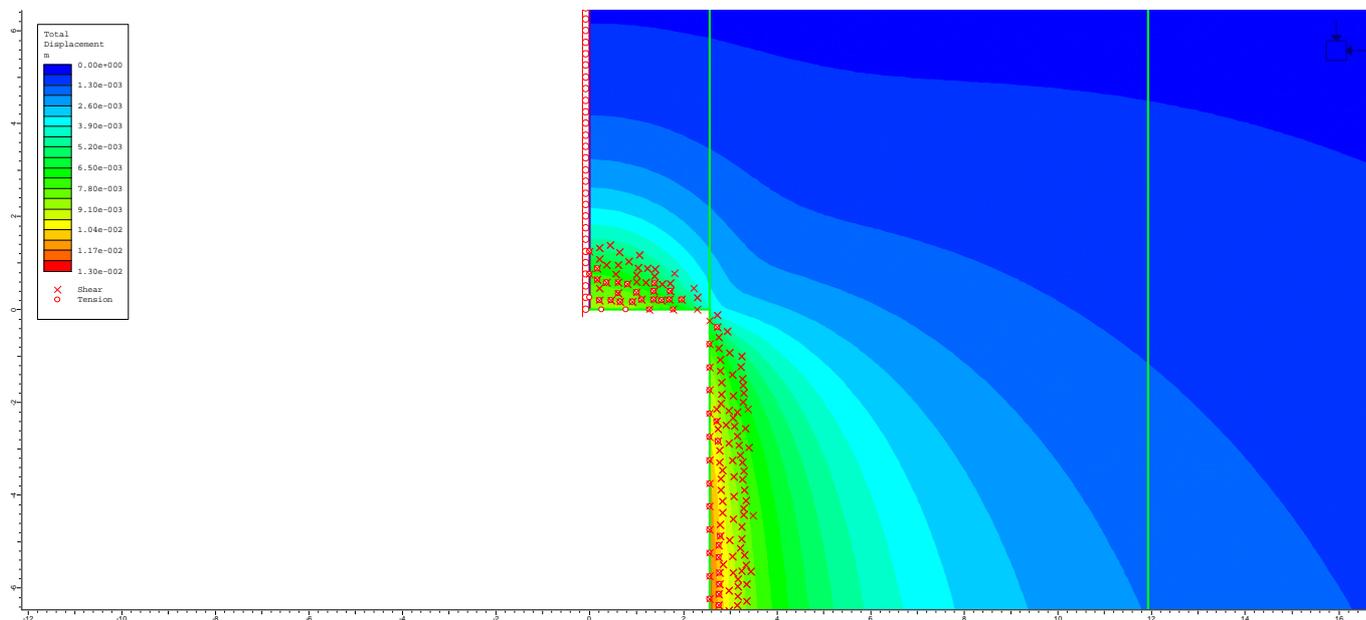


Figura 38 – Condizioni al fronte sulla base del modello assialsimmetrico: zone plastiche e spostamenti totali (in metri)

9.5.3 Fasi e percentuali di rilascio

I tassi di deconfinamento sono stati calcolati mediante analisi assialsimmetrica e curva caratteristica numerica (come indicato nella figura soprastante con riferimento alla fase di scavo al fronte). Nell'analisi assialsimmetrica è stato inserito il consolidamento del fronte tramite VTR simulato mediante la pressione equivalente σ_3^{VTR} applicata al fronte di scavo.

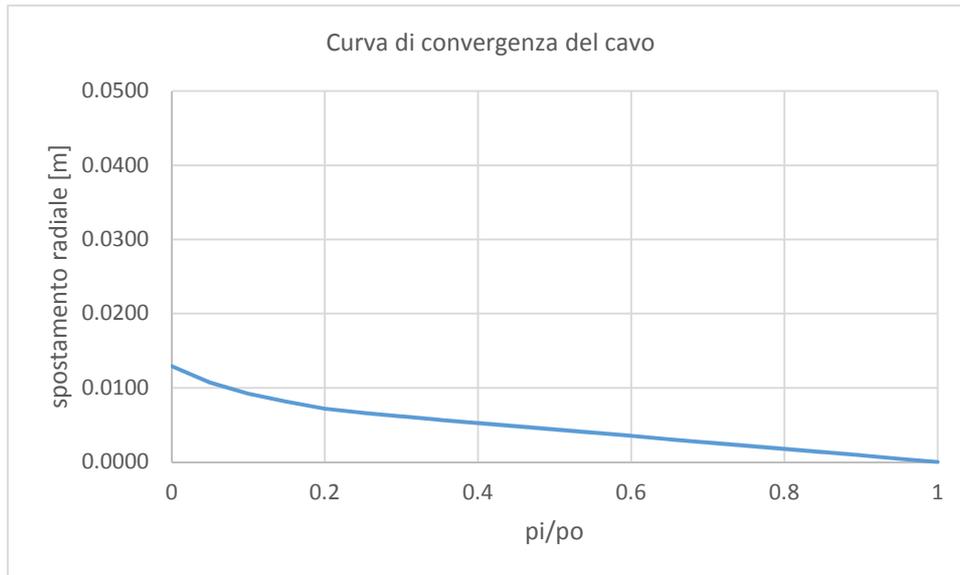


Figura 39 - Sez. Cunicolo Pedonale B2 – Curva caratteristica di convergenza numerica

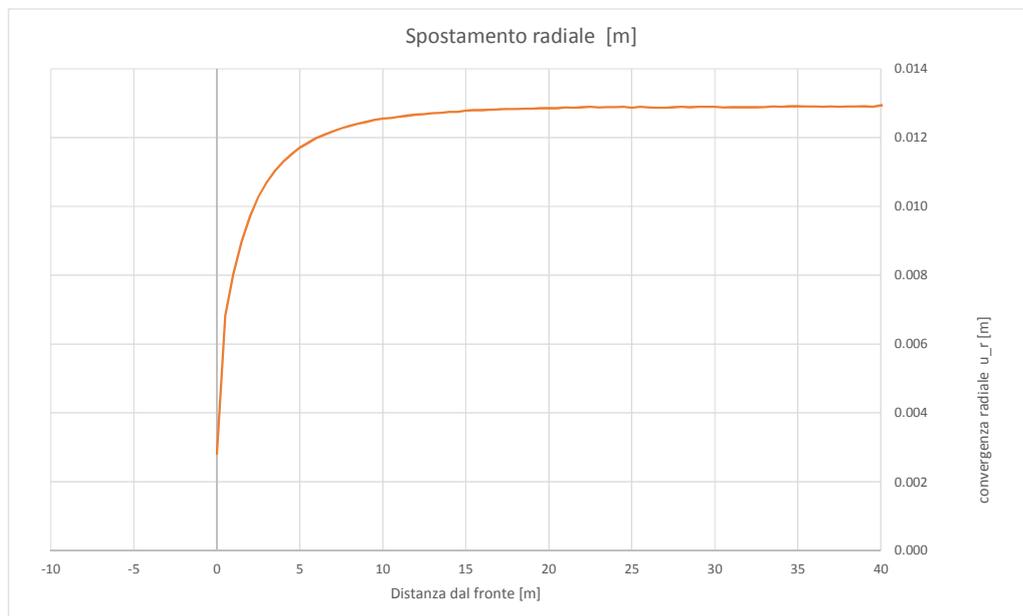


Figura 40 - Sez. Cunicolo Pedonale B2 – Spostamenti radiali modello assialsimmetrico in funzione della distanza dal fronte

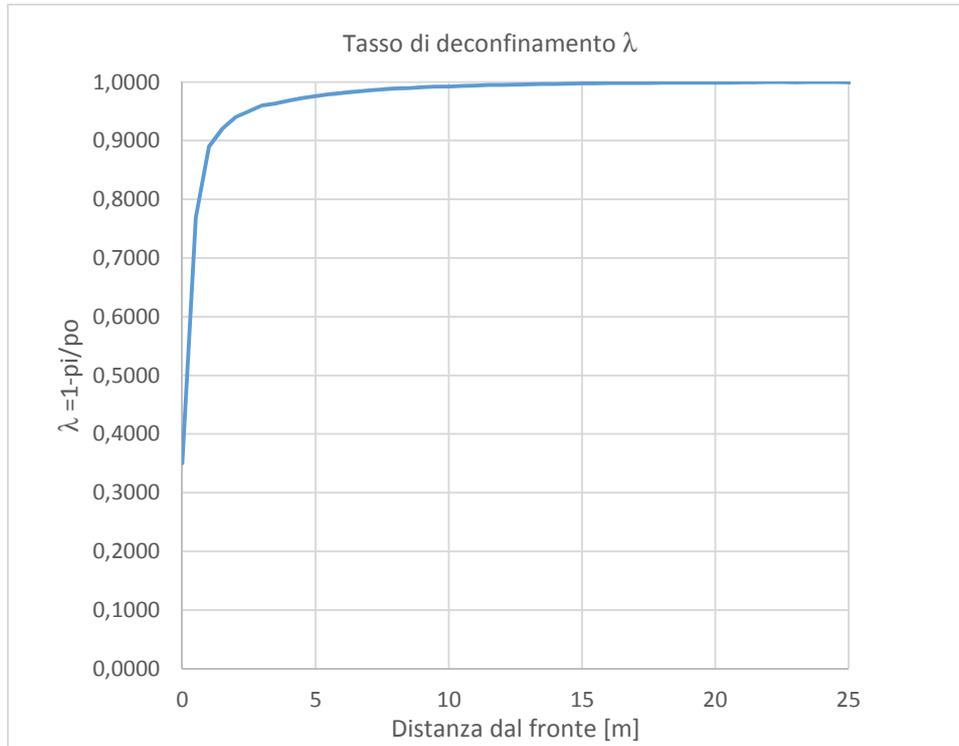


Figura 41 - Sez. Cunicolo Pedonale B2 – Calcolo percentuale di rilascio λ_F - al fronte

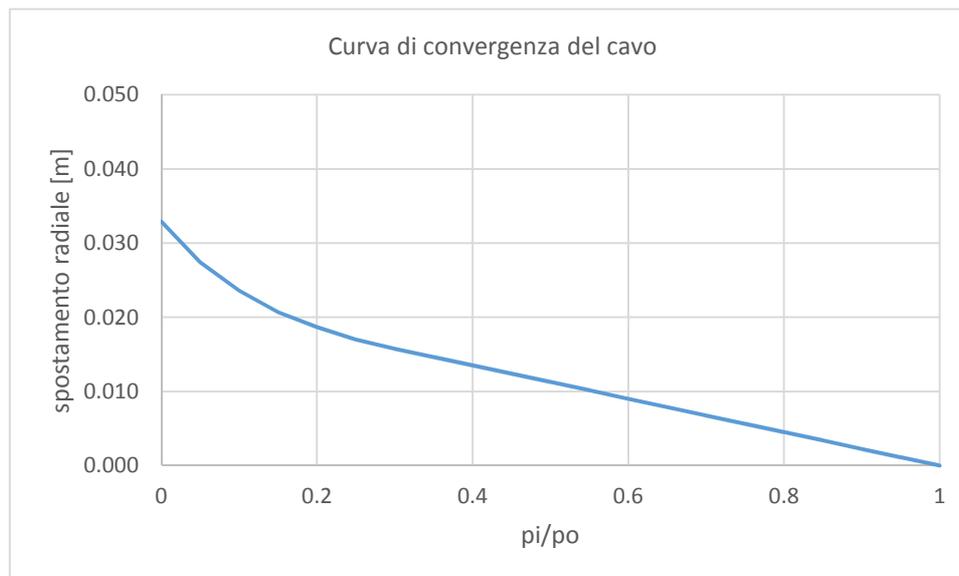


Figura 42 - Sez. Scavo meccanizzato – Curva caratteristica di convergenza numerica

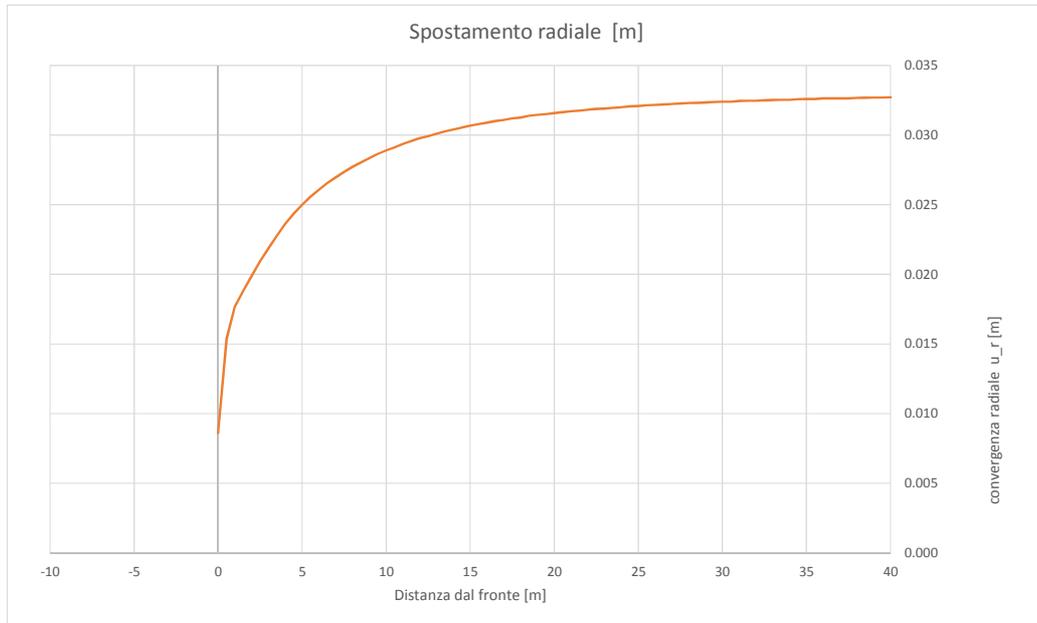


Figura 43 - Sez. Scavo meccanizzato – Spostamenti radiali modello assialsimmetrico in funzione della distanza dal fronte

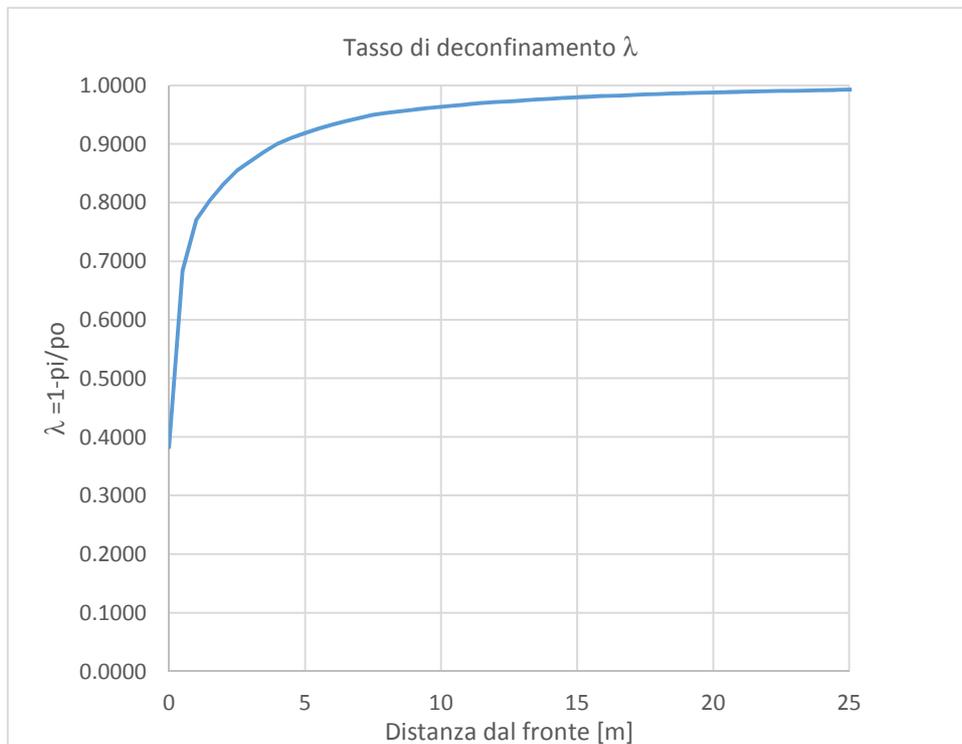


Figura 44 - Sez. Scavo meccanizzato – Calcolo percentuale di rilascio λ_F - al fronte

| | | | | | | |
|---|---------------------------------|-------|----------|------------|------|-----------|
|  | ITINERARIO NAPOLI – BARI | | | | | |
| | RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA | | | | | |
| I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA | | | | | | |
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 91 di 199 |

Nella tabella successiva è schematizzata la successione delle fasi di calcolo nelle quali è articolata l'analisi di interazione opera-terreno. Al termine del processo di scavo è stata simulata la fase di lungo termine.

| Fase | Descrizione | Rilascio forze scavo (λ) |
|-------------|--|------------------------------------|
| 0-1 | Inizializzazione stato tensionale geostatico | 0.00 |
| CP2 | Rilascio a cavo libero in corrispondenza del fronte | 0.32 |
| CP3 | Esecuzione dello sfondo elementare di 2 m | 0.96 |
| CP4 | Simulazione scavo a distanza dal fronte, con scarico totale | 1.00 |
| TBM1 | Simulazione scavo TBM e scarico a 12 m dal fronte | 0.97 |
| TBM2 | Installazione anello di rivestimento e scarico totale | 1.00 |
| CP5 | Installazione del rivestimento definitivo di calotta (scarico completo) | 1.00 |
| CP6 | Condizione di lungo termine (decadimento del rivestimento di prima fase/ decadimento dei consolidamenti al contorno) | 1.00 |

Tabella 28 - Analisi di interazione – Sezione Cunicolo Pedonale B2 : fasi di calcolo

9.5.4 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 nell'allegato relativo alle sezione in esame (All. [3]).

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 Tabella 17 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 9 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 | calotta | | | piedritti | | | | | | arco rovescio | | | Fascia plasticizzata |
|------|---------|------------------|------------------|-----------|------------------|------------------|---------|------------------|------------------|---------------|------------------|------------------|---|
| | u [cm] | σ_1 [kPa] | σ_3 [kPa] | u [cm] | σ_1 [kPa] | σ_3 [kPa] | u [cm] | σ_1 [kPa] | σ_3 [kPa] | u [cm] | σ_1 [kPa] | σ_3 [kPa] | |
| Cp2 | 0.30 | -6680 | -561 | 0.26 | -6183 | -426 | 0.26 | -6183 | -426 | -0.33 | -5379 | -505 | Non sono presenti zone plastiche |
| Cp3 | 1.08 | -6680 | -561 | 0.99 | -6183 | -426 | 0.99 | -6183 | -426 | -1.17 | -5379 | -505 | Al contorno del cavo, con spessori di 0.6m in calotta e 1m ai piedritti. Bande in arco rovescio |
| cp4 | 1.11 | -6667 | -557 | 1.09 | -5411 | -217 | 1.09 | -5411 | -217 | -1.33 | -4476 | -124 | Al contorno del cavo, con spessori di 0.6m in calotta e 1.2m ai piedritti. Bande in arco rovescio |
| Tbm1 | 1.79 | -4054 | -211 | 0.47 | -5966 | -384 | 0.47 | -5966 | -384 | -1.62 | -3708 | -58 | Zone plastiche ai piedritti al di sotto dell'arco rovescio |
| Tbm2 | 1.80 | -4035 | -166 | 0.46 | -5982 | -384 | 0.46 | -5982 | -384 | -1.63 | -3702 | -58 | |
| Cp5 | 1.80 | -4006 | -90 | 0.47 | -5963 | -390 | 0.47 | -5963 | -390 | -1.62 | -3709 | -72 | |
| Cp6 | 1.73 | -4446 | -599 | 0.42 | -5818 | -822 | 0.42 | -5818 | -822 | -1.67 | -4429 | -648 | Zone plastiche ai piedritti al di sotto dell'arco rovescio, limitati punti in calotta |

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

σ_1 = sforzo principale totale massimo

σ_3 = sforzo principale totale minimo

Tabella 29 - Analisi di interazione – Sezione tipo Cunicolo Pedonale B2 risultati dell'analisi

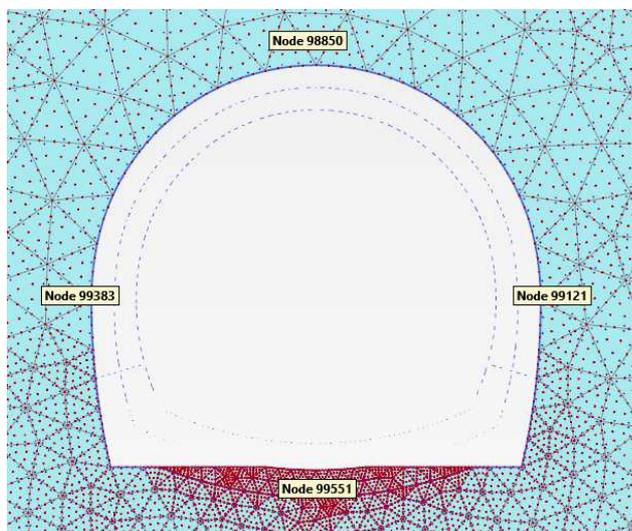


Figura 45 - Nodi rilevati nella zona del cavo

FASE CP2

Viene simulata l'esecuzione dello scavi sino alla posizione del fronte. Il campo di spostamenti risulta trascurabile (intorno a 0.3cm). Non sono presenti zone plastiche. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 6680 kPa (calotta) mentre la massima tensione principale minima è di 426 kPa (piedritti).

FASE CP3

Viene simulata l'esecuzione dello sfondo elementare di 2 m. Il cedimento cumulato in calotta è pari a 1.1 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 1 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 1.2 cm. Le zone plasticizzate si rilevano al contorno del cavo, con spessori di 0.6m in calotta e 1m ai piedritti, e sono presenti bande che partono dalla zona al di sotto delle murette e si uniscono con forma a V al di sotto dell'arco rovescio. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 6680 kPa (calotta) mentre la massima tensione principale minima è di 426 kPa (piedritti).

FASE CP4

Viene simulata l'esecuzione dello scavo a grande distanza dal fronte. Il cedimento cumulato in calotta e piedritti è pari a 1.1 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 1.3 cm. Le zone plasticizzate si rilevano al contorno del cavo, con spessori di 0.6 m in calotta e 1.2 m ai piedritti, e sono presenti bande che partono dalla zona al di sotto delle murette e si uniscono con forma a V al di sotto dell'arco rovescio. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 6667 kPa (calotta) mentre la massima tensione principale minima è di 124 kPa (arco rovescio).

FASE TBM1

Viene simulato il passaggio della TBM a 12m dal fronte. Nel cunicolo, il cedimento cumulato in calotta è pari a 1.8 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 0.4 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 1.6 cm. Le zone plastiche sono localizzate ai piedritti (max 1.3m) e al di sotto dell'arco rovescio si sviluppano trazioni derivanti dall'nfluenza dello scavo della galleria adiacente. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 5966 kPa (piedritti) mentre la massima tensione principale minima è di 58 kPa (arco rovescio).

FASE TBM2

Viene simulata l'installazione del rivestimento in conci e lo scarico totale della galleria in scavo meccanizzato. Nel cunicolo, il campo di spostamenti non risulta variare significativamente rispetto alla fase precedente. Le zone plastiche non risultano variare significativamente rispetto alla fase precedente. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 5982 kPa (piedritti) mentre la massima tensione principale minima è di 58 kPa (arco rovescio).

FASE CP5

Viene simulata l'installazione del rivestimento definitivo del cunicolo pedonale. Non vi sono variazioni significative rispetto alla fase precedente.

FASE CP6

Viene simulato il comportamento di lungo termine caratterizzato dal decadimento del rivestimento di prima fase con conseguente trasferimento degli sforzi sul rivestimento definitivo. Il cedimento cumulato in calotta raggiunge 1.7 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 0.5 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio diventa pari a 1.6 cm. Le zone plastiche risultano estese all'intero contorno dello scavo, con spessori che variano da 5m in calotta e arco rovescio a 8m ai piedritti e reni. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 5818 kPa (piedritti) mentre la massima tensione principale minima è di 599 kPa (calotta).

9.5.5 Verifiche strutturali del rivestimento di prima fase

Le verifiche strutturali sul rivestimento di prima fase sono state eseguite per le fasi di calcolo CP4, TBM1, TBM2, CP5. Le caratteristiche del rivestimento provvisorio sono riportate nella seguente tabella.

| Caratteristiche | Spritz beton/Centine |
|--|----------------------|
| Spessore dello spritz beton[m] | 0.25 |
| Area resistente dello spritz beton A_{sb} [m ²] | 0.25 |
| Tipologia profilati | HEA 240 |
| Interasse longitudinale profilato [m] | 1 |
| Area resistente della centina A_{cent} [cm ²] | 76.81 |
| Modulo resistente elastico della centina W_{cent} [cm ³] | 675 |
| Area resistente a taglio della centina $A_{V,cent}$ [cm ²] | 25.2 |

Tabella 30 - Analisi di interazione – Sezione tipo Cunicolo Pedonale B2 : definizione delle caratteristiche del rivestimento provvisorio

La tabella seguente sintetizza le sollecitazioni ottenute, per ogni fase, nelle zone di maggiore interesse del rivestimento: zona di calotta, di contatto calotta-piedritti e dei piedritti, rilevate in corrispondenza dei nodi indicati nella figura a seguire.

| | Sollecitazioni | Calotta | zona di contatto calotta-piedritto | | piedritto | |
|------------------|----------------|---------|------------------------------------|--------|-----------|----------|
| | | | Sinistro | Destro | Sinistro | Destro |
| Fase CP4 | N [kN/m] | -969 | -876 | -973 | -1061 | -954 |
| | M [kNm/m] | -4 | -12 | -19 | 38 | 55 |
| | T [kN/m] | 1 | -19 | 19 | 38 | -42 |
| Fase TBM1 | N [kN/m] | -1395 | -1633 | -1593 | -2545 | -1711.56 |
| | M [kNm/m] | 86 | -29 | -60 | 40 | 50 |
| | T [kN/m] | 94 | -51 | 96 | 75 | -67 |
| Fase TBM2 | N [kN/m] | -1389 | -1635 | -1589 | -2546 | -1706.82 |
| | M [kNm/m] | 86 | -29 | -60 | 40 | 49 |
| | T [kN/m] | 93 | -52 | 97 | 76 | -66 |

| Fase CP5 | N [kN/m] | -1388 | -1631 | -1593 | -2544 | -1704.59 |
|----------|-----------|-------|-------|-------|-------|----------|
| | M [kNm/m] | 86 | -30 | -60 | 40 | 49 |
| | T [kN/m] | 90 | -52 | 97 | 76 | -66 |

Tabella 31 - Analisi di interazione – Sezione tipo Cunicolo Pedonale B2 : Sollecitazioni nelle zona di maggior interesse del rivestimento di prima fase

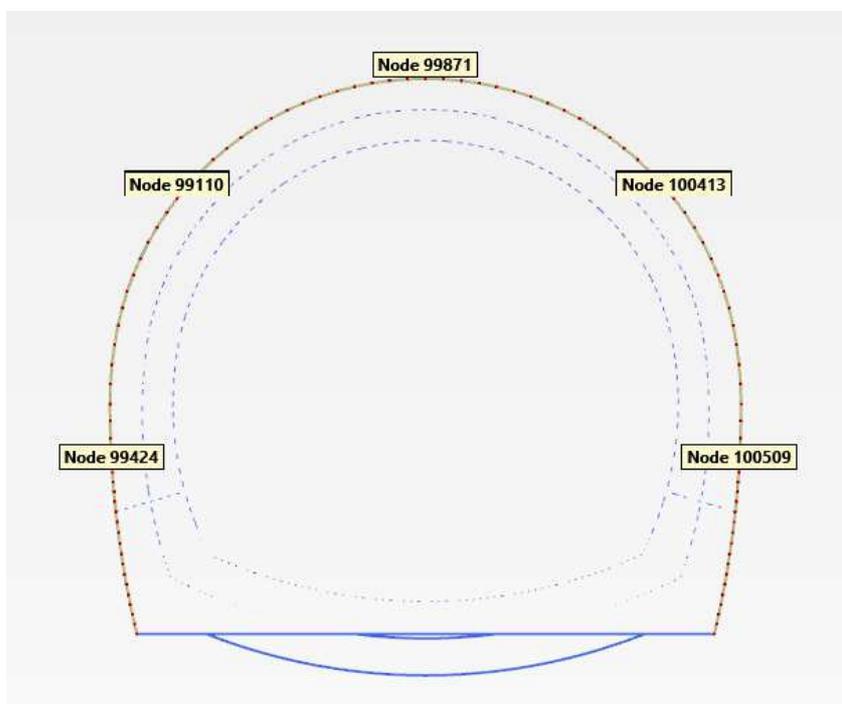


Figura 46 - Nodi rilevati del rivestimento di prima fase

In allegato si riportano, per ogni nodo del rivestimento, le sollecitazioni scaturite dall'analisi e le conseguenti verifiche: le verifiche strutturali del rivestimento di prima fase sono soddisfatte, per ciascuna fase, in tutti i punti.

9.5.6 Verifiche strutturali SLU del rivestimento definitivo

Nella tabella seguente si riportano le caratteristiche simulate dei rivestimenti di prima fase e definitivi.

| Tipo di prerivestimento | Spritz beton/Rivestimento definitivo |
|--|--------------------------------------|
| Spessore dello spritz [m] | 0.20 |
| Spessore simulato del rivestimento definitivo di arco rovescio [m] | 0.60 |
| Spessore simulato del rivestimento definitivo di calotta [m] | 0.50 |

Tabella 32 - Analisi di interazione – Sezione tipo Cunicolo Pedonale B2 : 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.

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).

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 | zona di contatto calotta-piedritto | | piedritto | |
|-----------------|----------------|---------|------------------------------------|--------|-----------|--------|
| | | | sinistro | destro | sinistro | destro |
| Fase CP5 | N [kN/m] | 1 | -8 | 0 | -27 | -30 |
| | M [kNm/m] | 0 | -1 | 1 | 0 | -3 |
| | T [kN/m] | -3 | -3 | 3 | 3 | 1 |
| Fase CP6 | N [kN/m] | -1832 | -1945 | -2327 | -2864 | -2460 |
| | M [kNm/m] | 4 | -60 | 5 | 73 | 37 |
| | T [kN/m] | -328 | 143 | 51 | -41 | 28 |

Tabella 33 - Analisi di interazione – Sezione tipo Cunicolo Pedonale B2 : Sollecitazioni nelle zone calotta-piedritto del rivestimento definitivo

| | Sollecitazioni | arco rovescio | zona di contatto piedritto- arco | |
|-----------------|----------------|---------------|----------------------------------|--------|
| | | | sinistro | destra |
| Fase CP5 | N [kN/m] | -39 | -53 | -40 |
| | M [kNm/m] | -1 | 5 | 4 |
| | T [kN/m] | 0 | -5 | 4 |
| Fase CP6 | N [kN/m] | -963 | -1356 | -1654 |
| | M [kNm/m] | 132 | -152 | -250 |
| | T [kN/m] | -18 | 295 | -209 |

Tabella 34 - Analisi di interazione – Sezione tipo Cunicolo Pedonale B2 : Sollecitazioni nelle zone arco rovescio-piedritto del rivestimento definitivo

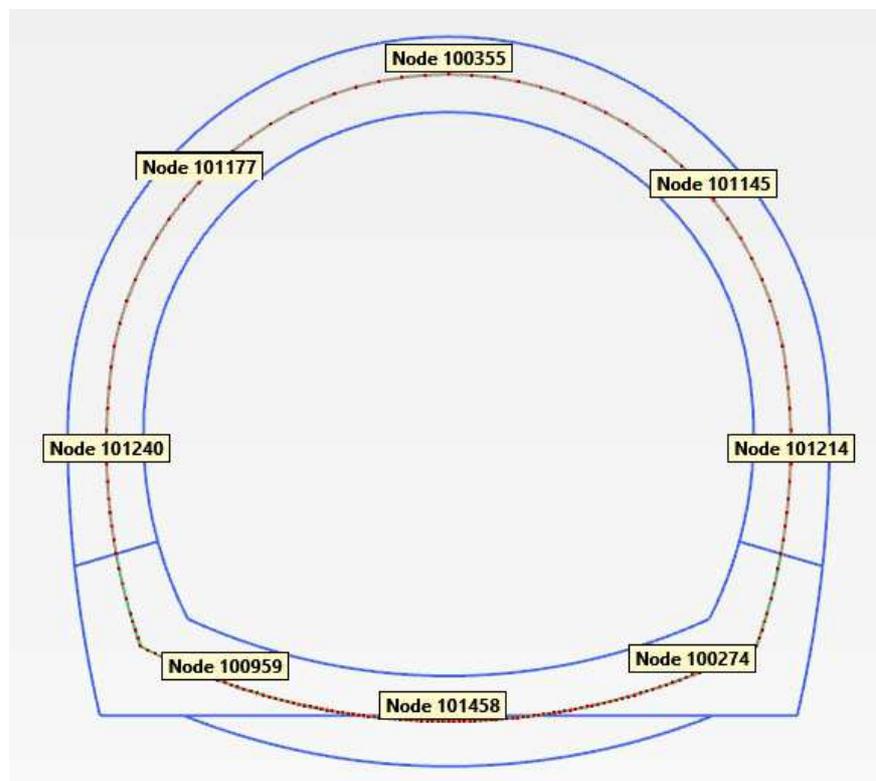


Figura 47 - Nodi rilevati del rivestimento definitivo

In **calotta e piedritti** si dispongono 1+1 $\phi 20/20$ con un copriferro netto di 4 cm. L'armatura longitudinale di ripartizione è costituita da barre $\phi 12/30$. L'armatura a taglio è sufficiente la minima del tipo $\phi 12/40\text{cm}/30\text{cm}$.

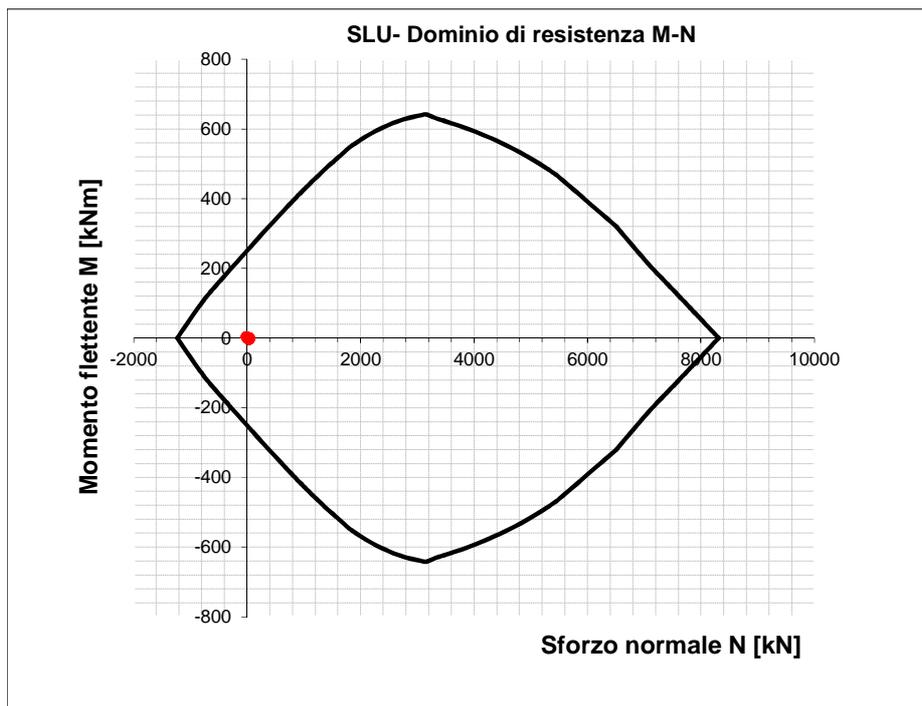


Figura 48 - Dominio resistente SLU calotta (B=1.00 m, H=0.50 m) – Fase CP5

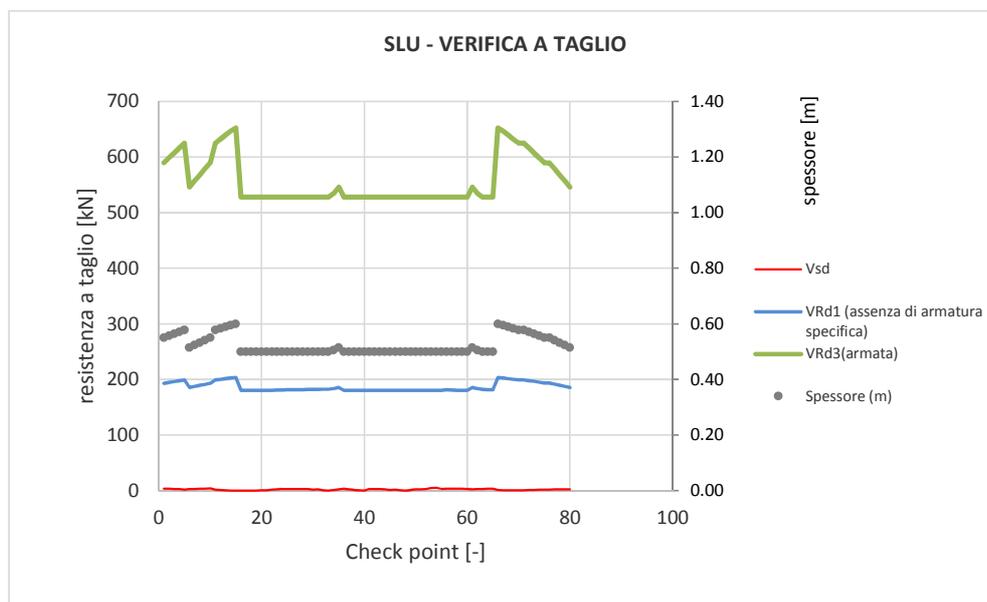


Figura 49 - Verifica SLU taglio calotta – Fase CP5

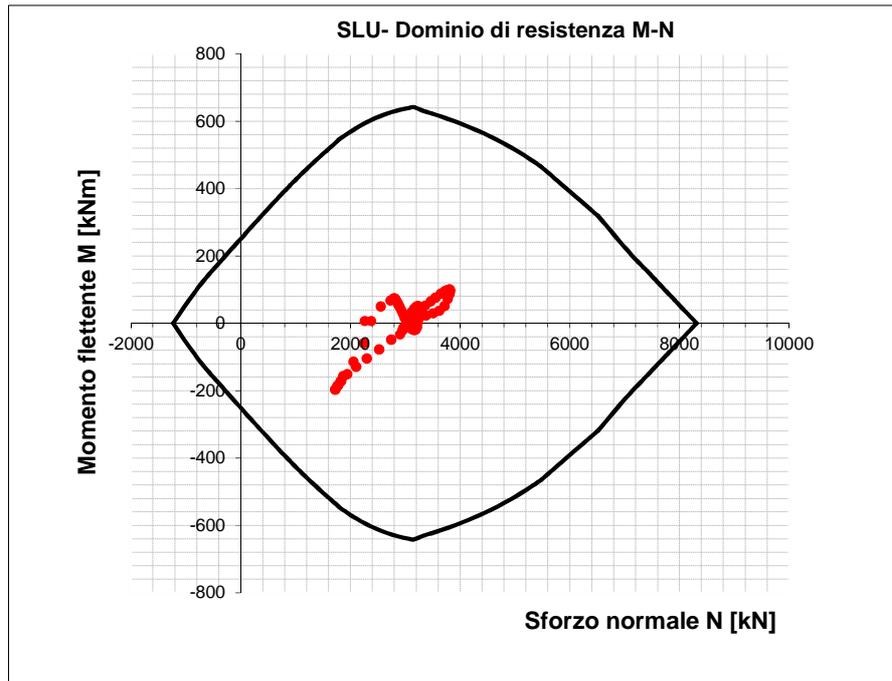


Figura 50 - Dominio resistente SLU calotta (B=1.00 m, H=0.50 m) – Fase CP6

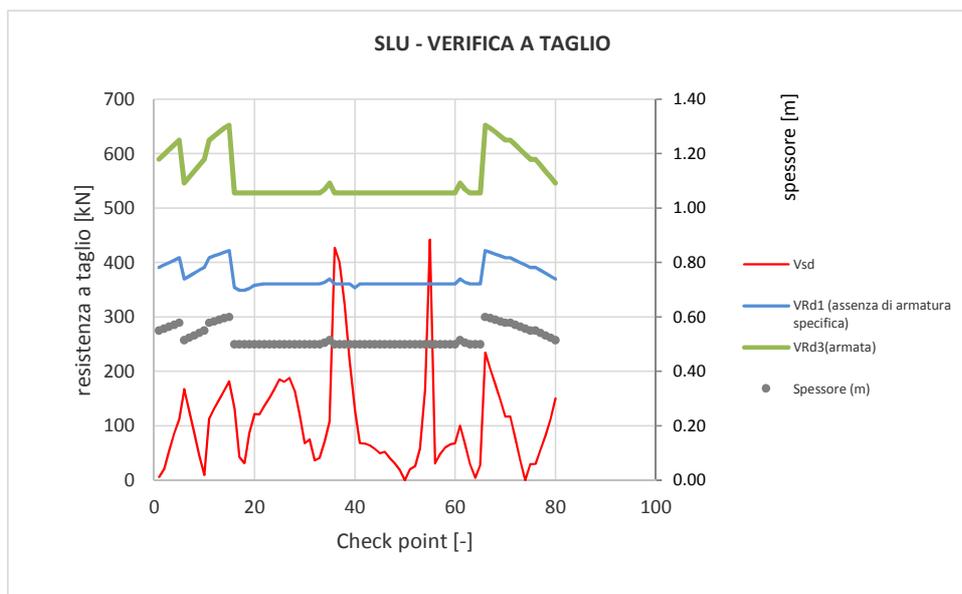


Figura 51 - Verifica SLU taglio calotta – Fase CP6

In **arco rovescio** si dispongono 1+1 $\phi 20/20$ con un copriferro netto di 4 cm. L'armatura longitudinale di ripartizione è costituita da barre $\phi 12/30$. L'armatura a taglio è sufficiente la minima del tipo $\phi 12/40\text{cm}/30\text{cm}$.

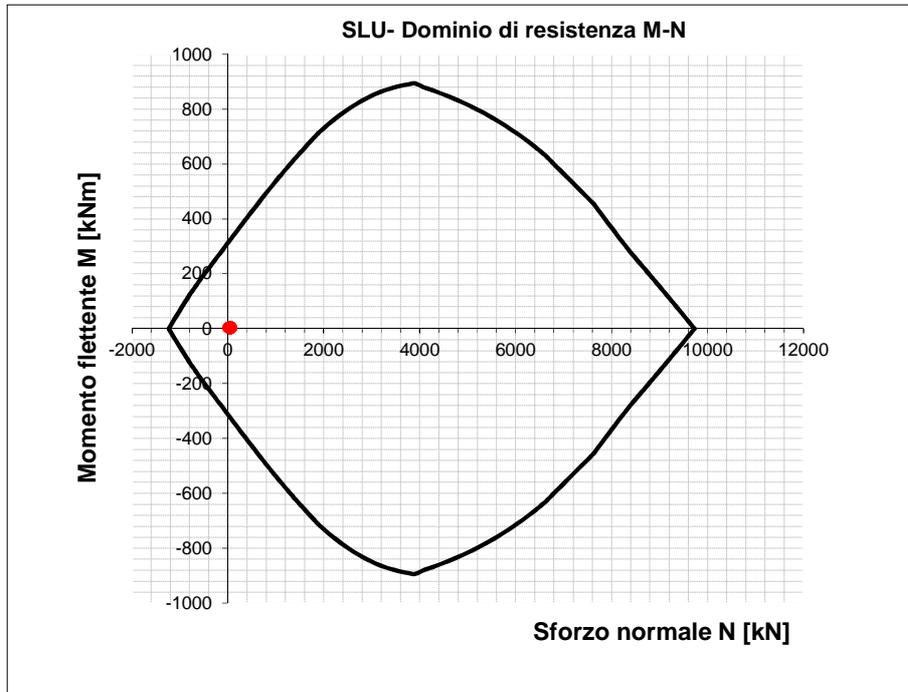


Figura 52 - Dominio resistente SLU arco rovescio (B=1.00 m, H=0.60 m) – Fase CP5

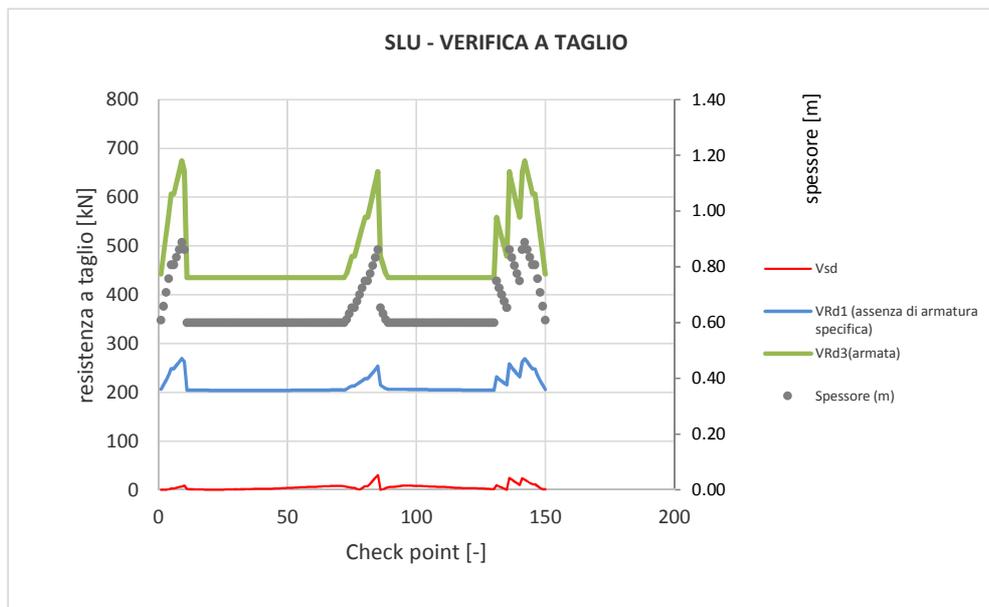


Figura 53 - Verifica SLU taglio arco rovescio – Fase CP5

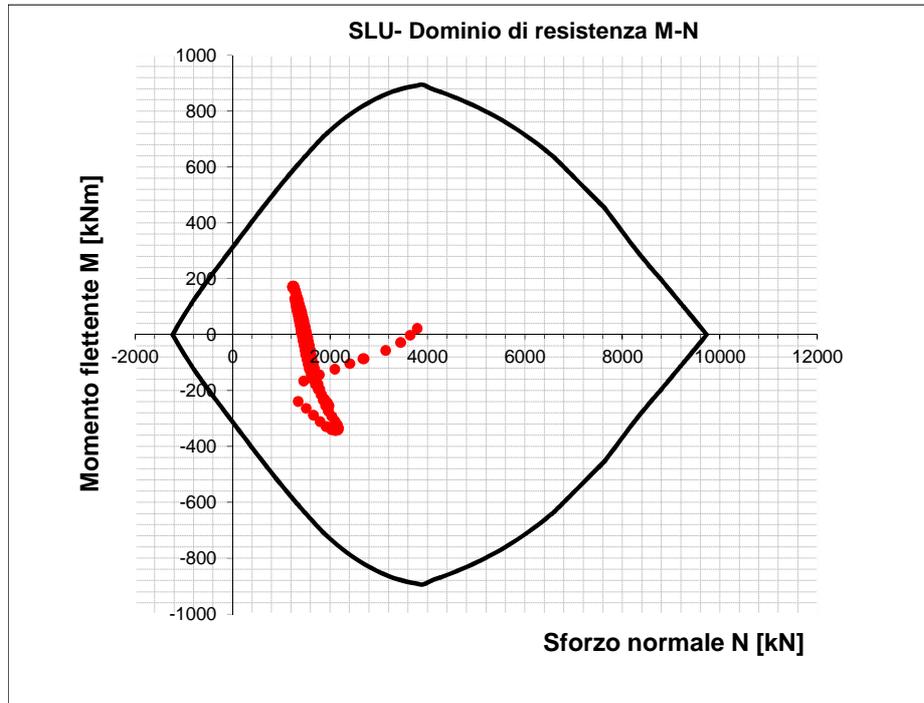


Figura 54 - Dominio resistente SLU arco rovescio (B=1.00 m, H=0.60 m) – Fase CP6

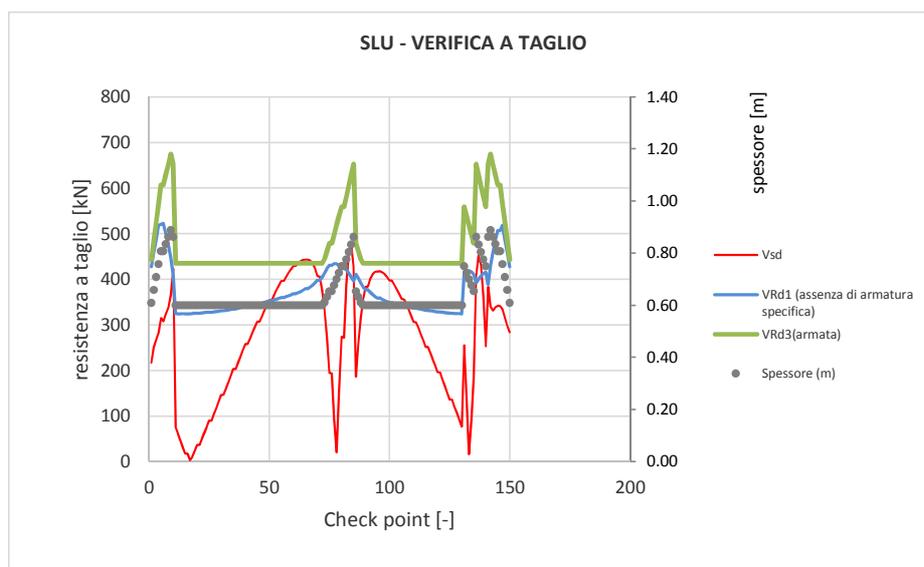


Figura 55 - Verifica SLU taglio arco rovescio – Fase CP6

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.

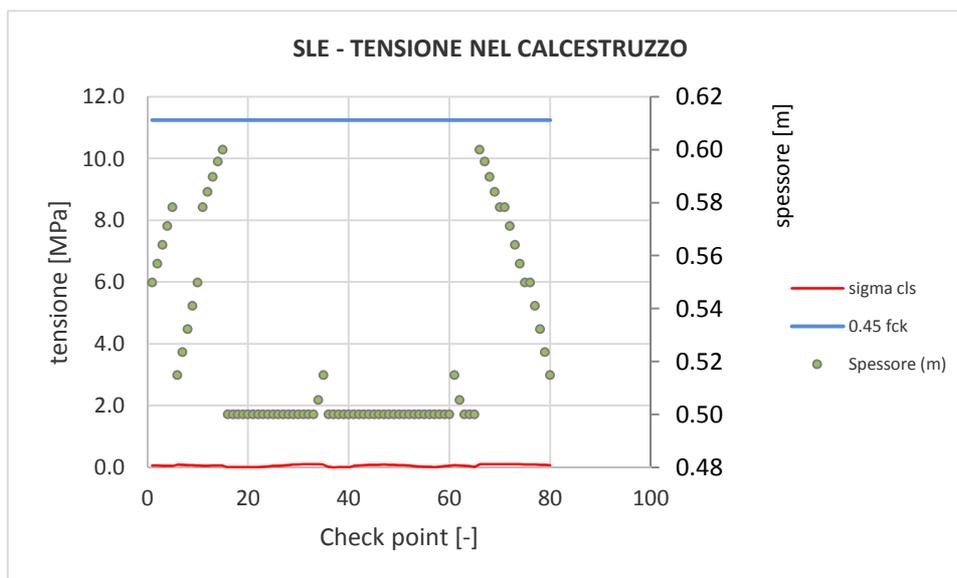


Figura 56 - Verifiche SLE tensione cls calotta – Fase CP5

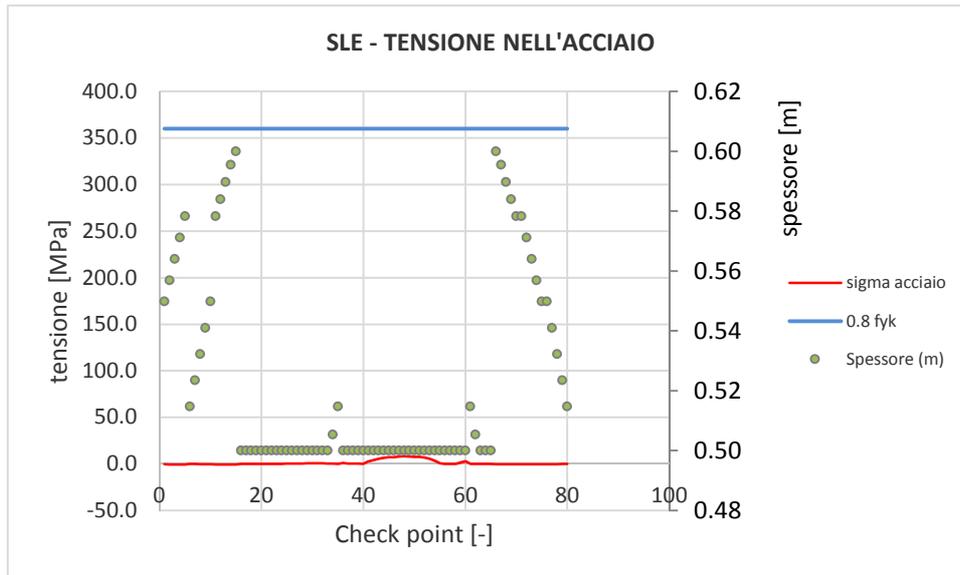


Figura 57 - Verifiche SLE tensione acciaio calotta – Fase CP5

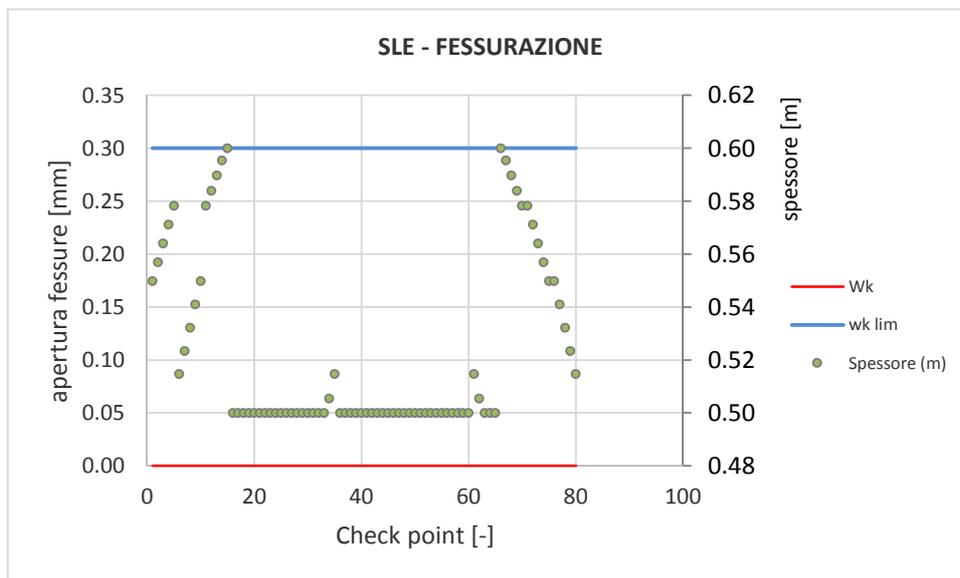


Figura 58 - Verifiche SLE fessurazione calotta – Fase CP5

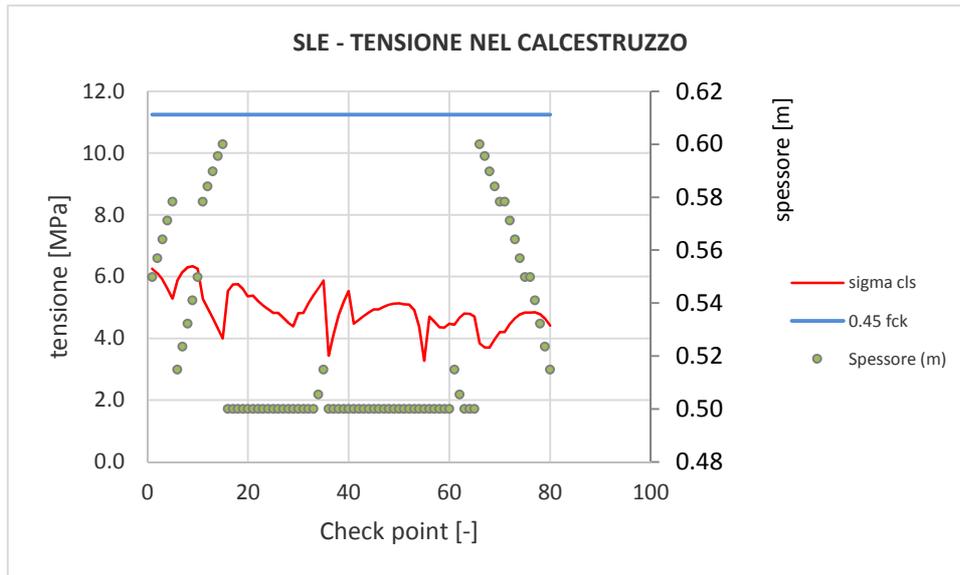


Figura 59 - Verifiche SLE tensione cls calotta – Fase CP6

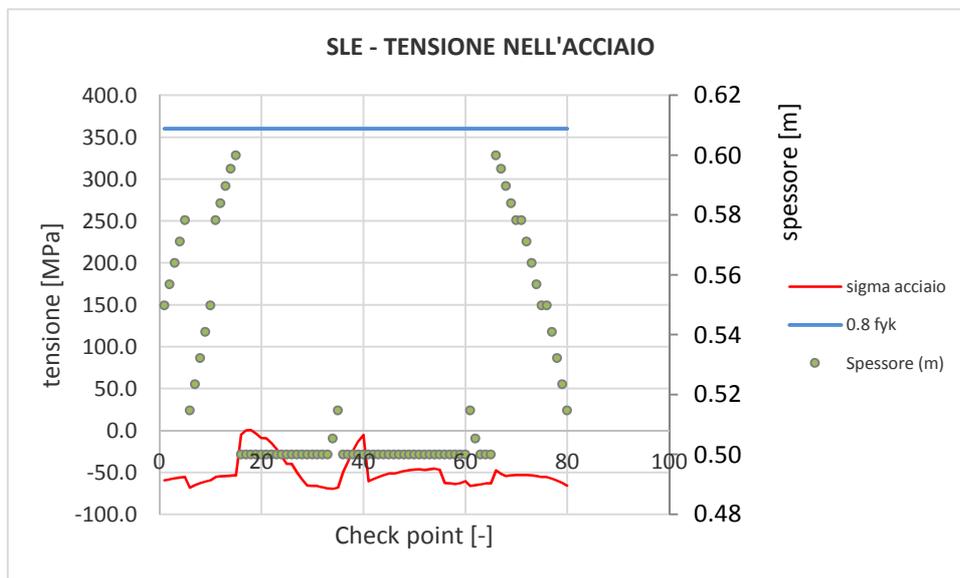


Figura 60 - Verifiche SLE tensione acciaio calotta – Fase CP6

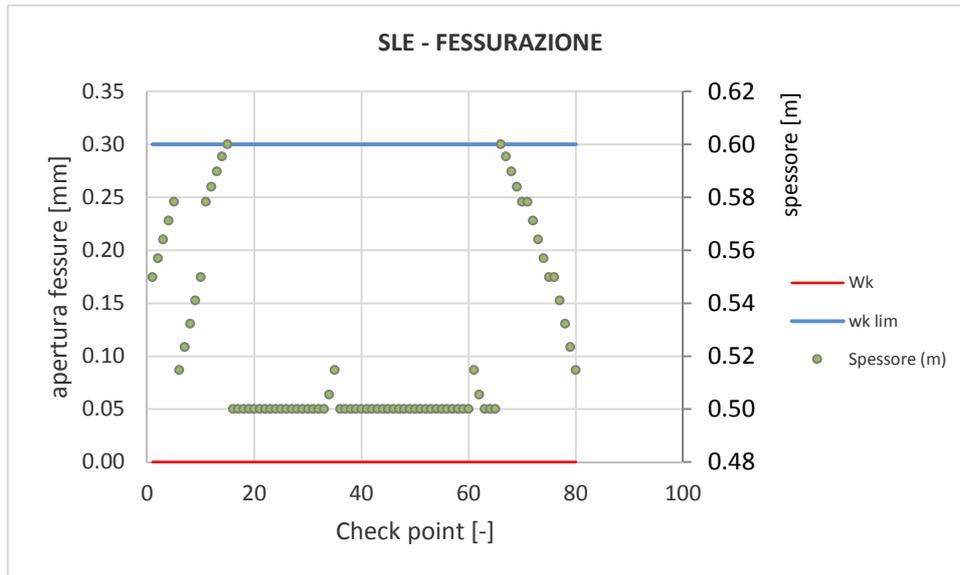


Figura 61 - Verifiche SLE fessurazione calotta – Fase CP6

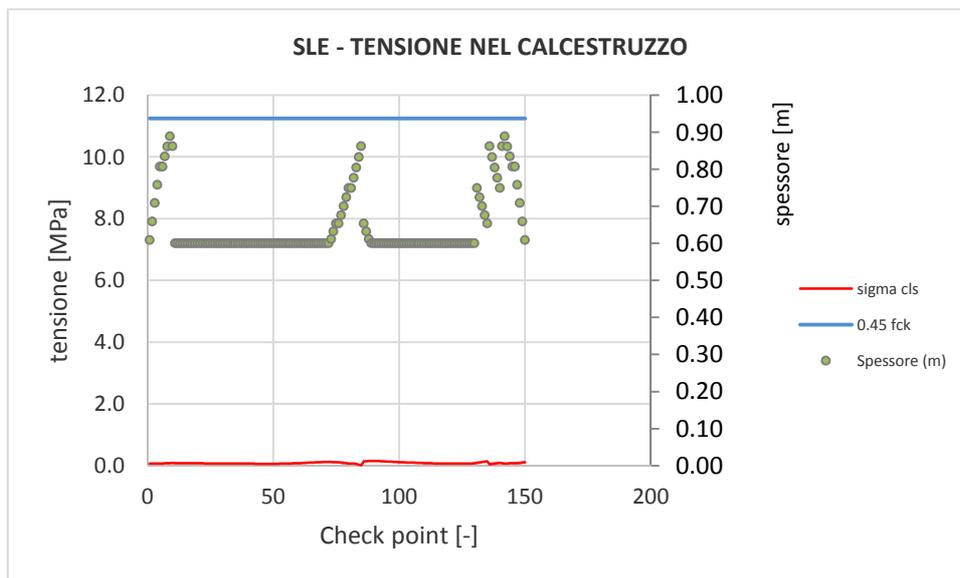


Figura 62 - Verifiche SLE tensione cls arco rovescio – Fase CP5

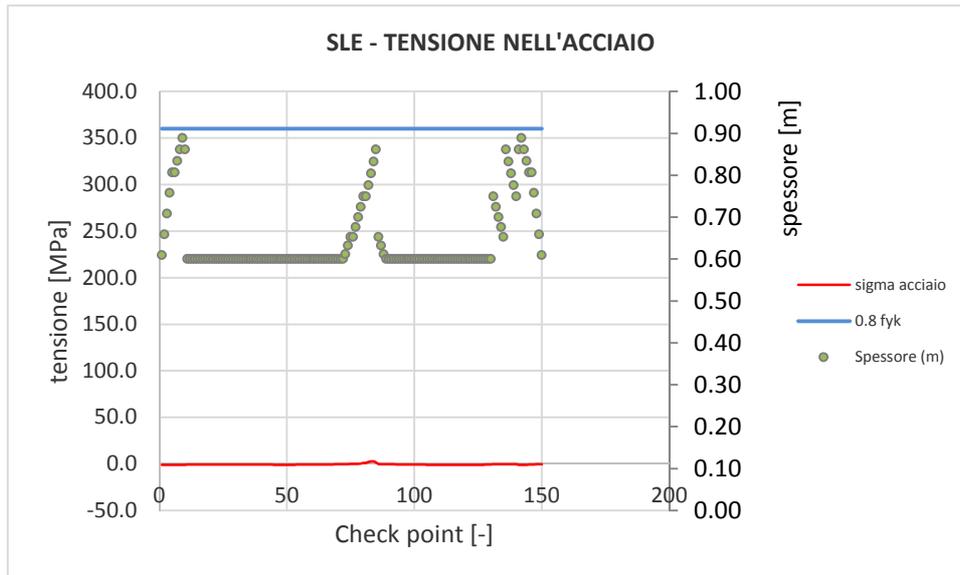


Figura 63 - Verifiche SLE tensione acciaio arco rovescio – Fase CP5

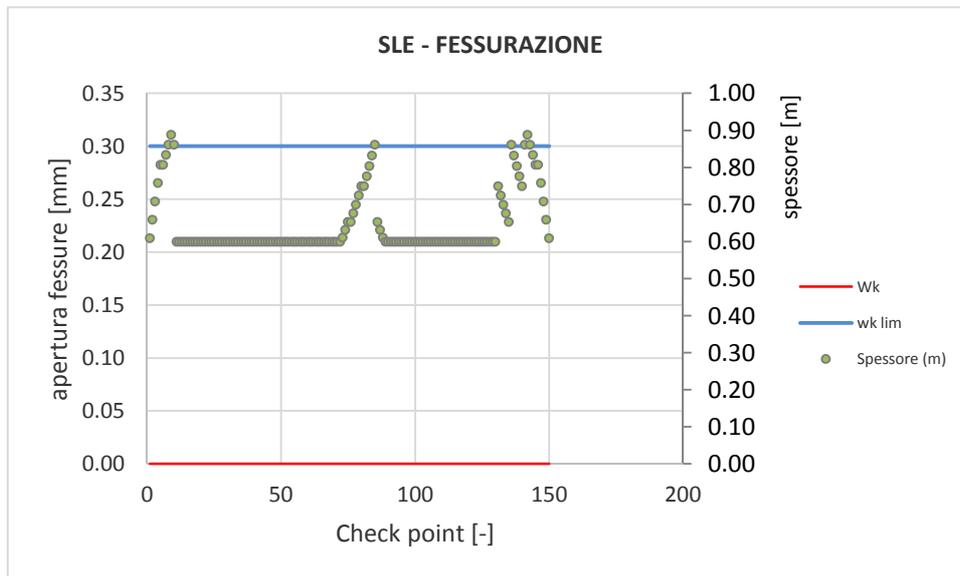


Figura 64 - Verifiche SLE fessurazione arco rovescio – Fase CP5

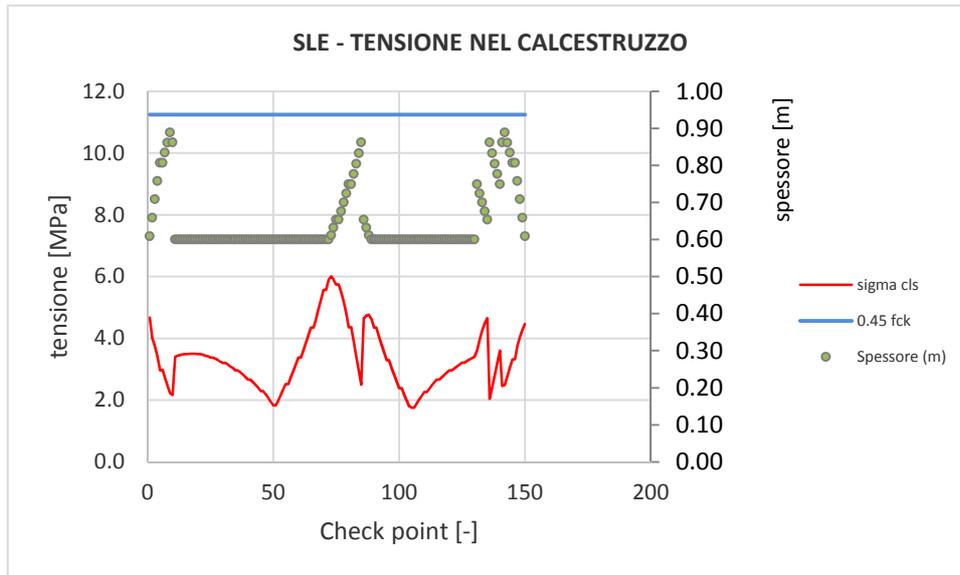


Figura 65 - Verifiche SLE tensione cls arco rovescio – Fase CP6

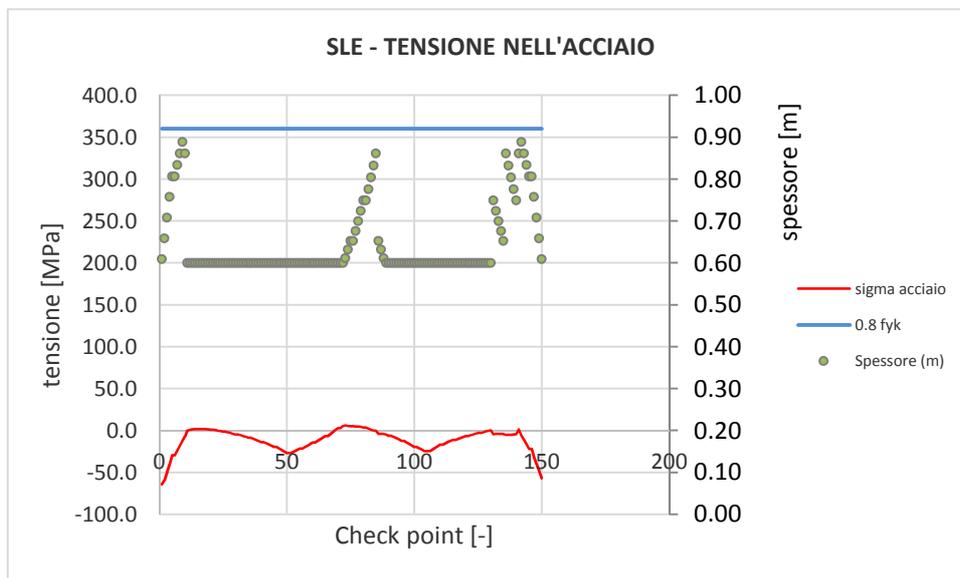


Figura 66 - Verifiche SLE tensione acciaio arco rovescio – Fase CP6

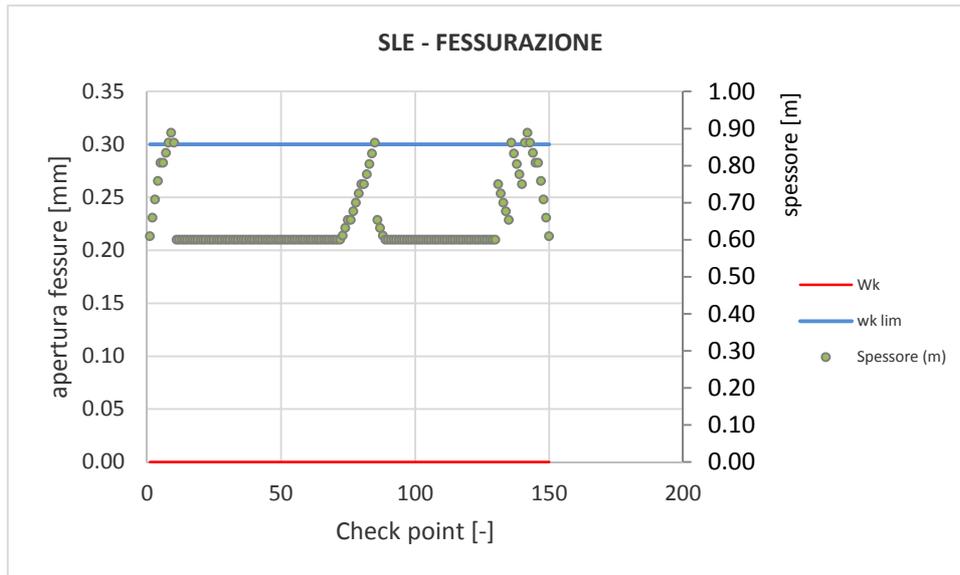


Figura 67 - Verifiche SLE fessurazione arco rovescio – Fase CP6

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

9.6 SEZIONE TIPO C2p PEDONALE (Uscita F1 innesto con galleria di linea)

Le analisi e le verifiche riportate di seguito sono relative al tratto di massima copertura in corrispondenza dell'innesto dell'uscita F1 con la galleria di linea Grottaminarda in cui la galleria attraversa la formazione FYR e la sezione C2p è prevista applicata come sezione prevalente.

9.6.1 Stabilità del fronte e del cavo

Nelle seguenti tabelle si riassumono i dati di input e i risultati dell'analisi di stabilità del fronte della sezione tipo C2p pedonale condotta con il metodo di Metodo di Broms & Bennermark.

I parametri geotecnici utilizzati nelle analisi (valori di progetto) così come i valori dell'incremento di coesione equivalente al fronte, indotto dagli interventi di consolidamento, sono stati definiti coerentemente con quanto indicato nei criteri di verifica.

| n_{VTR} | L_A | ϕ_{perf} | τ_{bk} | σ_{3A}^{VTR} | A_{VTR} | f_{ik} | σ_{3B}^{VTR} | σ_3 | Δc_{uk} |
|-----------|-------|---------------|-------------|---------------------|-------------------|----------|---------------------|------------|-----------------|
| [-] | [m] | [m] | [kPa] | [kPa] | [m ²] | [MPa] | [kPa] | [kPa] | [kPa] |
| 15 | 8 | 0.1 | 150 | 288 | 7.200E-04 | 900 | 495 | 288 | 144 |

n_{VTR} = numero di VTR al fronte

L_A = lunghezza minima di sovrapposizione del VTR

ϕ_{perf} = diametro di perforazione

τ_{bk} = tensione di aderenza all'interfaccia col terreno

σ_{3A}^{VTR} = resistenza a sfilamento dell'elemento strutturale in VTR

A_{VTR} = area del VTR

f_{ik} = resistenza a trazione del VTR

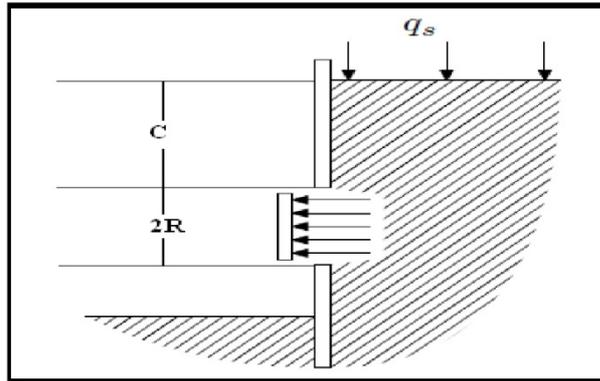
σ_{3B}^{VTR} = resistenza a rottura dell'elemento strutturale in VTR

σ_3 = tensione minima resistente al fronte

Δc_{uk} = coesione non drenata caratteristica equivalente indotta dall'intervento di consolidamento del fronte

Tabella 35 - Analisi di stabilità del fronte Sez. C2p pedonale: Determinazione della coesione equivalente per simulare l'intervento di consolidamento al fronte di scavo

Metodo di Broms & Bennermark (Broms et al., 1967)



Ipotesi:

- 1) Stabilità di fori non supportati praticati su sostegni verticali
- 2) Terreno puramente coesivo (criterio di Tresca)
- 3) Condizioni non drenate
- 4) Assenza di falda



$$N = \frac{q_s - s}{c_u} + \frac{\gamma}{c_u} \cdot (C + R)$$

| | | |
|-------|-------------|-----|
| Input | q_s (kPa) | 0 |
| | s (kPa) | 288 |
| | c_u | 400 |
| | γ | 20 |
| | C | 50 |
| | R | 2,5 |



| | | |
|-------|-------------|--------|
| A2+M2 | q_s (kPa) | 0 |
| | s (kPa) | 288 |
| | c_u | 285,71 |
| | γ | 20 |
| | C | 50 |
| | R | 2,5 |

| | | |
|--------|--------------|------------------|
| Output | N | 2,67 |
| | Deformazioni | Elasto-plastiche |



| | | |
|-------------------|--------------|------------------|
| Attewell & Geddes | N | <1 |
| | Deformazioni | Trascurabili |
| | | 1 - 2 |
| | | Elastiche |
| | | 2 - 4 |
| | | Elasto-plastiche |
| | 4 - 6 | |
| | Plastiche | |
| | > 6 | |
| | Collasso | |

Tabella 36 - Analisi di stabilità del fronte Sez. C2p pedonale: 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, il rapporto di stabilità N risulta inferiore a 4. Si ritiene pertanto che il nucleo-fronte sia stabile e quindi la verifica di stabilità del fronte è soddisfatta.

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 della sezione tipo Finestra Pedonale C2p.

La sezione di analisi è relativa ad una condizione di copertura alta e condizione geotecnica di ammasso integro. La presenza della falda è stata simulata nell'analisi alla quota indicata in tabella.

| Stratigrafia di calcolo | | C | Falda | γ | c'_k | ϕ'_k | c_{uk} | E' | k_0 |
|-------------------------|--------------------|-----|-------------|----------------------|--------|-----------|----------|-------|-------|
| Formazione | Profondità da p.c. | | | | | | | | |
| [-] | [m] | [m] | [m da p.c.] | [kN/m ³] | [kPa] | [°] | [kPa] | [MPa] | [-] |
| FYR | 0 ÷ 55 | 50 | 10 | 20 | 20 | 20 | - | 300 | 0.75 |
| FYR | >55 | | | 21 | 25 | 22 | - | 400 | 0.75 |

C = copertura (rispetto alla calotta)
 γ = peso per unità di volume
 c'_k = coesione drenata
 ϕ'_k = angolo di attrito interno
 c_{uk} = coesione non drenata
E' = modulo elastico drenato
 E_u = modulo elastico non drenato ($E_u = 1.5 \cdot E' / (1 + \nu')$)
 ν' = coefficiente di Poisson
 K_0 = coefficiente di spinta a riposo

Tabella 37 - Analisi di interazione Sez. Finestra Pedonale C2p: definizione della stratigrafia di calcolo

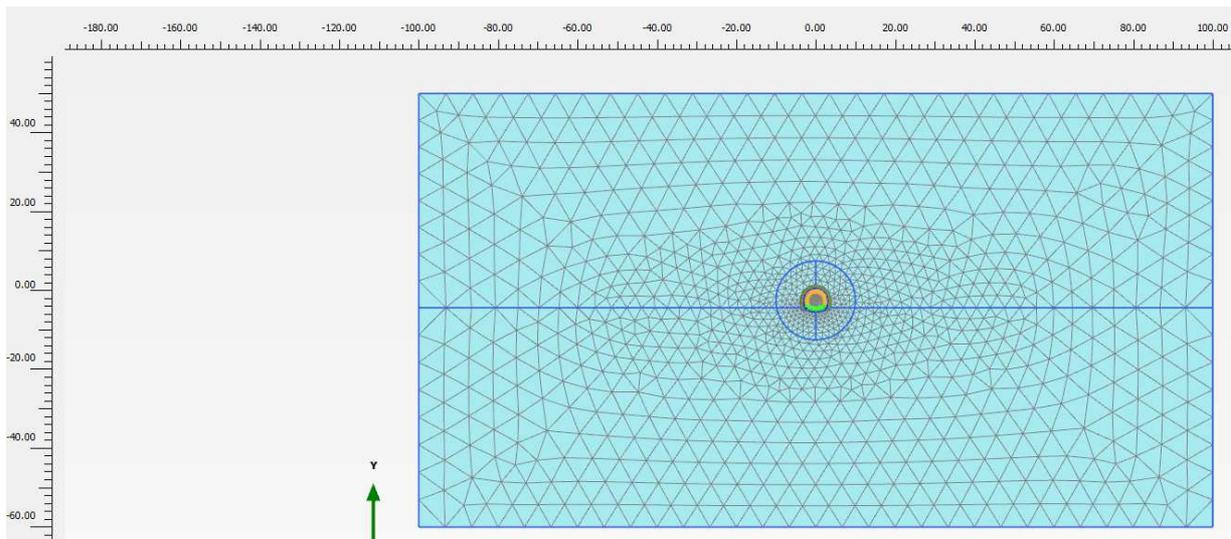


Figura 68 - Modello di calcolo - Geometria mesh

Il consolidamento del fronte tramite VTR, simulato mediante una pressione equivalente σ_3^{VTR} applicata al fronte di scavo, interviene nella modellazione FEM in maniera implicita attraverso l'applicazione delle percentuali di rilascio.

| SEZIONE TIPO | Interventi al fronte | | |
|-------------------------------------|--|---------------|-------------------|
| area di scavo | A | 20.85 | [m ²] |
| diametro medio galleria | D | 5.15 | [m] |
| diametro esterno barre VTR | ϕ_{est} | 0.06 | [m] |
| spessore barre VTR | δ | 0.01 | [m] |
| diametro interno barre VTR | ϕ_{int} | 0.04 | [m] |
| diametro di perforazione barre | ϕ_{perf} | 0.1 | [m] |
| area trasversale barre | A_t | 0.00157 | [m ²] |
| lunghezza min. di sovr. barre | L | 8 | [m] |
| superficie laterale barre | S_L | 2.513 | [m ²] |
| numero barre | N_b | 15 | [-] |
| resistenza a rottura barra | σ_b | 450000 | [kPa] |
| resistenza al taglio barra-terreno | τ_a | 100 | [kPa] |
| pressione lim. per rottura barre | $\sigma_{T,1}$ | 509 | [kPa] |
| pressione lim. per sfilamento barre | $\sigma_{T,2}$ | 181 | [kPa] |
| | $\sigma_{T,fronte} = \min(\sigma_{T1}; \sigma_{T2})$ | 181 | [kPa] |
| coesione | c | 20 | [kPa] |
| angolo di attrito | ϕ | 20 | [°] |
| coefficiente di spinta passiva | K_p | 2.04 | [-] |
| incremento di coesione equivalente | Δc | 129 | [kPa] |
| | $\Delta c + c'$ | 149 | |

Tabella 38 - Determinazione della pressione equivalente per simulare l'intervento di consolidamento al fronte di scavo

Il consolidamento al contorno, applicato su una fascia di circa 2.0 m, è caratterizzato dai parametri di seguito riportati, uguali a quelli relativi al terreno al fronte. Tale assunzione è conservativa, in quanto l'incremento legato alla resistenza al taglio degli elemento fornirebbe un valore pari a 198 kPa.

| γ | c_{uk} | E |
|----------------------|----------|-------|
| [kN/m ³] | [kPa] | [MPa] |
| 20 | 149 | 300 |

Tabella 39 - Parametri per la modellazione del consolidamento al contorno

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 110 m. Il numero complessivo degli elementi è pari a circa 2525 mentre i nodi sono circa 20502.

9.6.3 Fasi e percentuali di rilascio

I tassi di deconfinamento sono stati calcolati mediante analisi assialsimmetrica e curva caratteristica numerica (come indicato nella figura soprastante con riferimento alla fase di scavo al fronte). Nell'analisi

assialsimmetrica è stato inserito il consolidamento del fronte tramite VTR simulato mediante la pressione equivalente σ_3^{VTR} applicata al fronte di scavo.

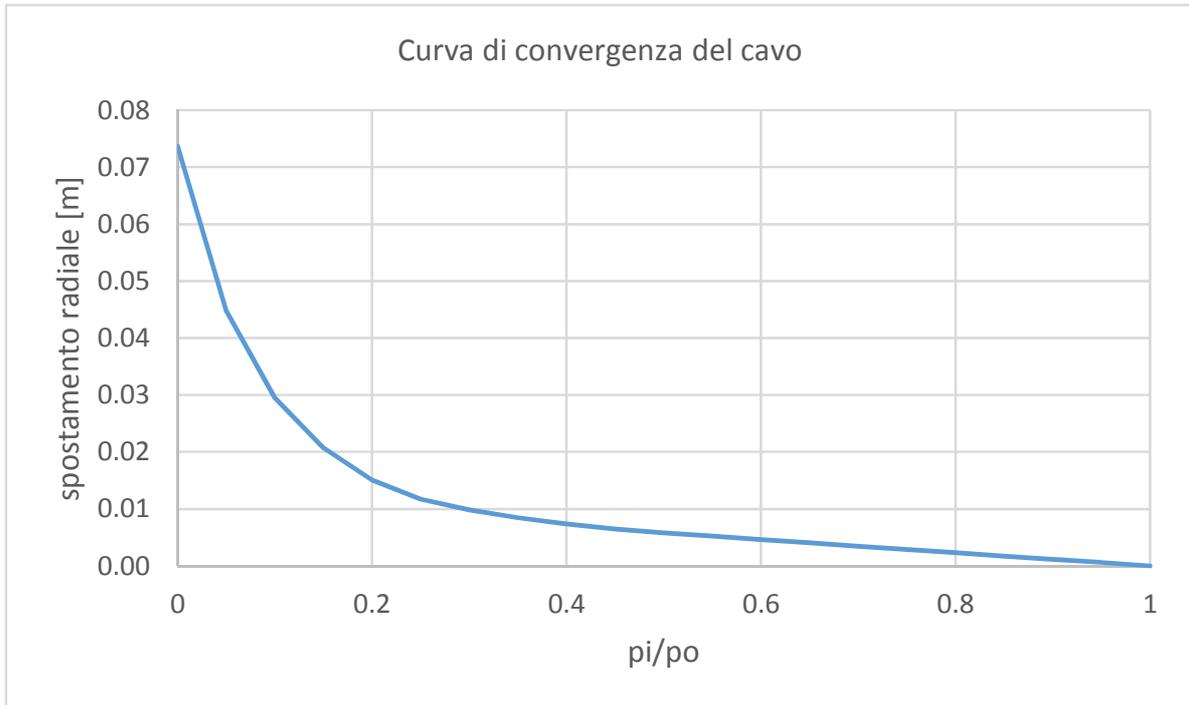


Figura 69 - Sez. Finestra Pedonale C2P – Curva caratteristica di convergenza numerica

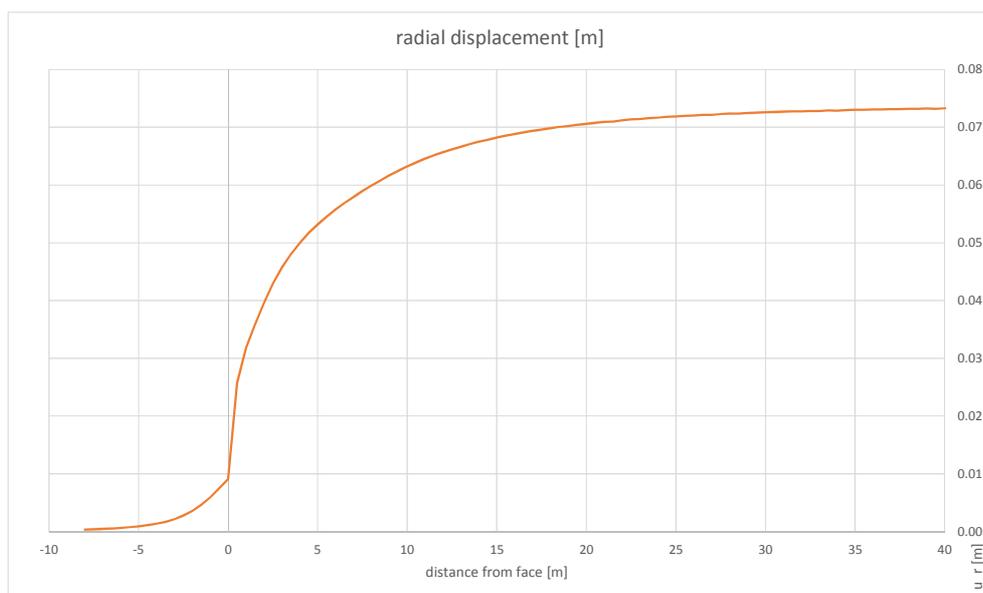


Figura 70 - Sez. Finestra Pedonale C2P – Spostamenti radiali modello assialsimmetrico in funzione della distanza dal fronte

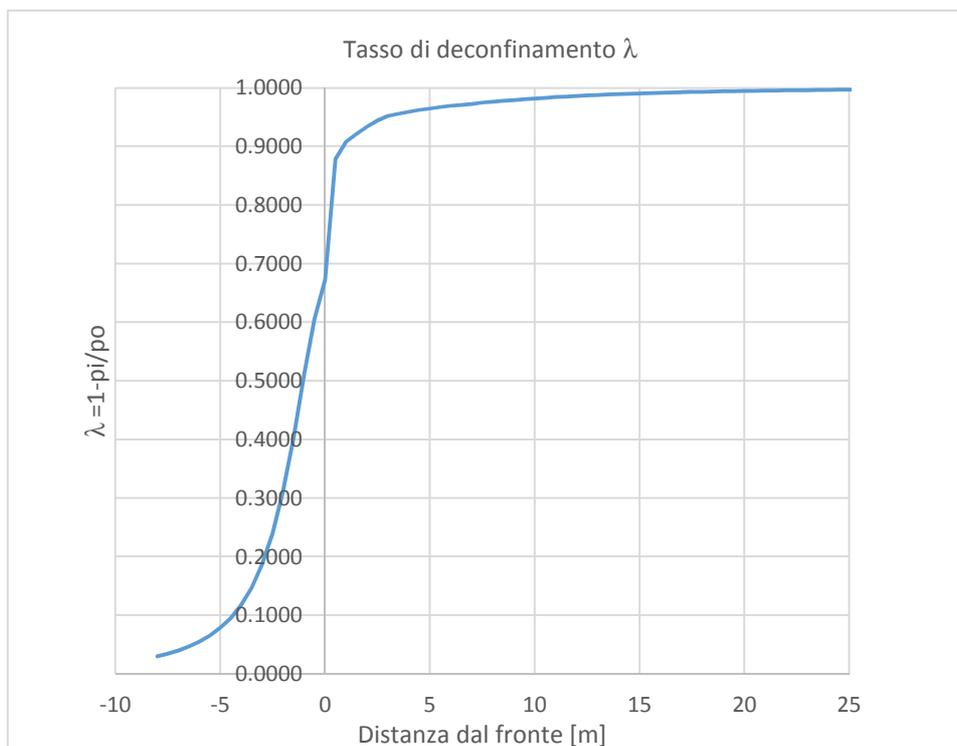


Figura 71 - Sez. Finestra Pedonale C2P – Calcolo percentuale di rilascio λ_F - al fronte

Nella tabella successiva è schematizzata la successione delle fasi di calcolo nelle quali è articolata l'analisi di interazione opera-terreno. Le fasi di scavo sono state modellate in condizioni di assenza di falda, in ragione della limitata permeabilità del materiale. Conservativamente, è stata assunta tale condizione per una dimensione pari ad un diametro nell'intorno dello scavo, in modo che all'esterno di tale area le condizioni risultassero particolarmente gravose, ragion per cui sono attese discontinuità nel campo delle zone plastiche. Come detto, tale assunzione risulta conservativa rispetto ad un modello completamente asciutto.

Al termine del processo di scavo è stata simulata la fase di lungo termine in cui è stata attivata la falda al completo contorno dello scavo, a simulare una condizione particolarmente gravosa con mancato funzionamento dei dreni sono stati sostituiti i parametri in condizioni drenate e la falda è stata posta alla quota indicata nella Tabella 12.

| Fase | Descrizione | Rilascio forze scavo (λ) |
|------|--|------------------------------------|
| 0-1 | Inizializzazione stato tensionale geostatico | 0.00 |
| 2 | Posizione limite della zona di consolidamento al contorno del cavo | 0.03 |
| 3 | Attivazione consolidamenti al contorno e rilascio a cavo libero in corrispondenza del fronte | 0.672 |
| 4 | Esecuzione dello sfondo elementare di 1 m | 0.907 |

| | | |
|----|--|-------|
| 5 | Installazione del rivestimento di prima fase e scarico a 2 m dal fronte | 0.933 |
| 6 | Installazione del puntone provvisorio e e scarico a 12 m dal fronte | 0.986 |
| 7 | Scarico a 24 m dal fronte | 0.996 |
| 8 | Installazione dell'arco rovescio e scarico a 36 m dal fronte | 0.999 |
| 9 | Installazione del rivestimento definitivo di calotta (scarico completo) | 1.000 |
| 10 | Condizione di lungo termine (decadimento del rivestimento di prima fase/innalzamento falda con decadimento dei consolidamenti al contorno) | 1.000 |

Tabella 40 - Analisi di interazione – Sezione Finestra Pedonale C2P: 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 nell'allegato relativo alla sezione in esame

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 Tabella 17 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 9 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 | calotta | | | piedritti | | | | | | arco rovescio | | | Fascia plasticizzata |
|------|---------|------------------|------------------|-----------|------------------|------------------|---------|------------------|------------------|---------------|------------------|------------------|--|
| | u [cm] | σ_1 [kPa] | σ_3 [kPa] | u [cm] | σ_1 [kPa] | σ_3 [kPa] | u [cm] | σ_1 [kPa] | σ_3 [kPa] | u [cm] | σ_1 [kPa] | σ_3 [kPa] | |
| 2 | 0.04 | -584 | -450 | 0.03 | -653 | -457 | 0.03 | -653 | -457 | -0.03 | -631 | -484 | Non sono presenti zone plastiche |
| 3 | 1.11 | -940 | -304 | 1.05 | -788 | -178 | 1.05 | -788 | -178 | -0.85 | -558 | -220 | Fascia di spessore 4m ai piedritti e 3m in a.r. No plasticizzazioni in calotta |
| 4 | 3.51 | -683 | -126 | 5.56 | -557 | -64 | 5.56 | -557 | -64 | -3.28 | -227 | -70 | Fascia di spessore |

| | | | | | | | | | | | | | |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|---|
| 5 | 3.59 | -726 | -202 | 5.98 | -575 | -88 | 5.98 | -575 | -88 | -3.88 | -187 | -52 | pari a 8m ai piedritti, 4m in calotta e 5m in a.r. |
| 6 | 3.61 | -743 | -219 | 5.99 | -588 | -94 | 5.99 | -588 | -94 | -3.95 | -162 | -40 | |
| 7 | 3.62 | -746 | -223 | 6.00 | -590 | -95 | 6.00 | -590 | -95 | -3.97 | -160 | -40 | |
| 8 | 3.64 | -748 | -222 | 6.01 | -591 | -94 | 6.01 | -591 | -94 | -3.95 | -164 | -49 | |
| 9 | 3.68 | -749 | -215 | 6.02 | -594 | -96 | 6.02 | -594 | -96 | -3.91 | -168 | -58 | |
| 10 | 3.62 | -696 | -515 | 6.01 | -646 | -505 | 6.01 | -646 | -505 | -3.97 | -532 | -454 | Fascia di spessore pari a 14m ai piedritti, 10m in calotta e 7m in a.r. |

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

σ_1 = sforzo principale totale massimo

σ_3 = sforzo principale totale minimo

Tabella 41 - Analisi di interazione – Sezione tipo Finestra Pedonale C2P: risultati dell'analisi

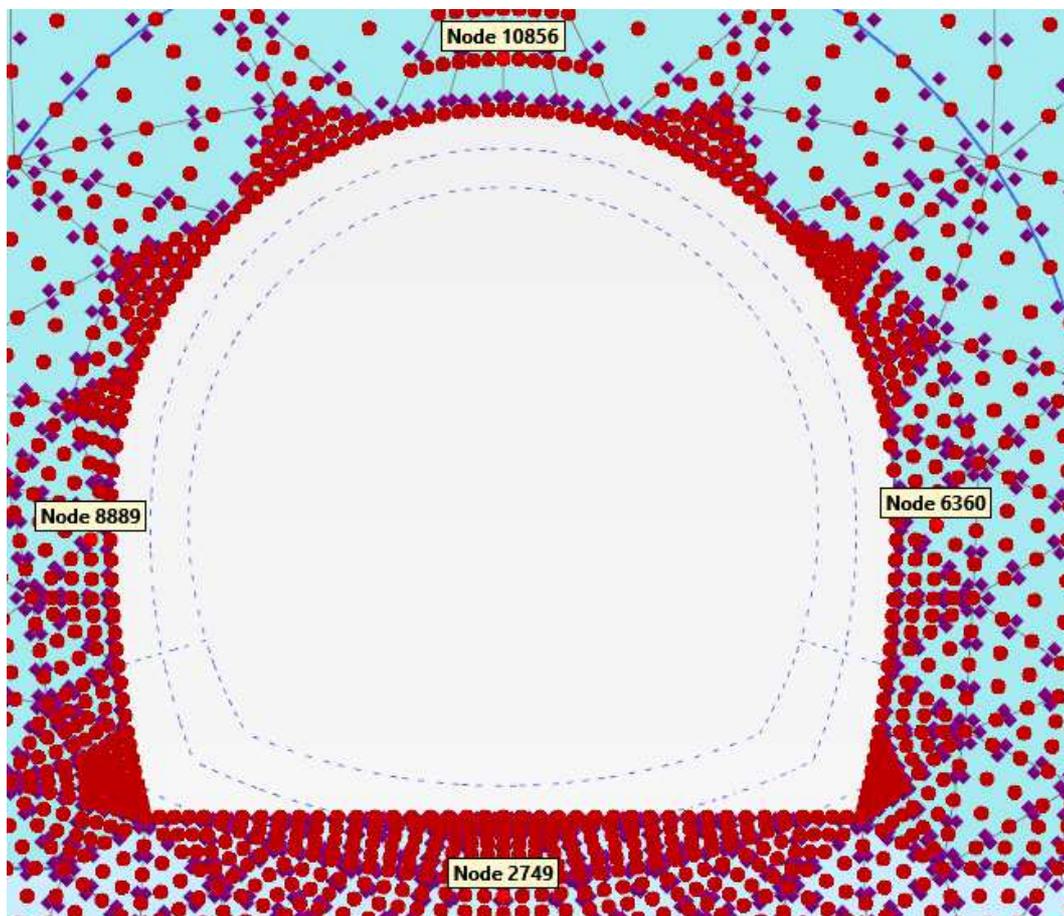


Figura 72 - Nodi rilevati nella zona del cavo

FASE 2

Viene simulato il rilascio a cavo libero in corrispondenza del momento precedente all'attivazione del consolidamento al contorno dello scavo. Il campo di spostamenti risulta trascurabile (circa 0.3 mm in calotta e 0.4mm in arco rovescio, mentre ai piedritti circa 0.3 mm). Non sono presenti zone plastiche. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 653 kPa (piedritti) mentre la massima tensione principale minima è di 450 kPa (calotta).

FASE 3

Viene simulata l'esecuzione dello scavi sino alla posizione del fronte. Il cedimento cumulato in calotta è pari a 1.1 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 1.0 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 1.1 cm. Le zone plastiche sono presenti in piedritto (circa 4m) e arco rovescio (circa 3m). Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 940 kPa (calotta) mentre la massima tensione principale minima è di 160 kPa (piedritti).

FASE 4

Viene simulata l'esecuzione dello sfondo elementare di 1 m. Il cedimento cumulato in calotta è pari a 3.9 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 5.6 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 4.9 cm. Le zone plastiche risultano estese. Nella zona con assenza di pressione neutra risultano pari a 8m ai piedritti, 4m in calotta e 5m in arco rovescio. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 683 kPa (calotta) mentre la massima tensione principale minima è di 48 kPa (piedritti).

FASE 5

Viene simulata l'installazione del rivestimento di prima fase e l'avanzamento a 2 m dal fronte (distanza di getto dell'arco rovescio dal fronte). Il cedimento cumulato in calotta è pari a 4.0 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 6.1 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 5.5 cm. Le zone plastiche risultano simili alla fase precedente. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 726 kPa (calotta) mentre la massima tensione principale minima è di 52 kPa (arco rovescio).

FASE 6

Viene simulata l'installazione dell'arco rovescio provvisorio e l'avanzamento a 12 m dal fronte. Il cedimento cumulato in calotta è pari a 4.0 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 6.1 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 5.5 cm. Le zone plastiche risultano simili alla fase precedente. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 743 kPa (calotta) mentre la massima tensione principale minima è di 40 kPa (arco rovescio).

FASE 7

Viene simulato lo scavo ad una distanza di 24m dal fronte (distanza di getto dell'arco rovescio dal fronte). Il cedimento cumulato in calotta è pari a 4.0 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 6.1 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 5.5 cm. Le zone plastiche risultano simili alla fase precedente. Le zone plastiche non variano sostanzialmente rispetto alla fase precedente. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 746 kPa (calotta) mentre la massima tensione principale minima è di 40 kPa (arco rovescio).

| | | | | | | |
|--|----------|-------|----------|------------|------|------------|
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 118 di 199 |

FASE 8

Viene simulata l'installazione dell'arco rovescio provvisorio e l'avanzamento a 36 m dal fronte (distanza di getto del rivestimento definitivo dal fronte). Il cedimento cumulato in calotta è pari a 4.0 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 6.1 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 5.5 cm. Le zone plastiche risultano simili alla fase precedente. Le zone plastiche non variano sostanzialmente rispetto alla fase precedente. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 748 kPa (calotta) mentre la massima tensione principale minima è di 49 kPa (arco rovescio).

FASE 9

Viene simulata l'installazione del rivestimento definitivo e lo scarico totale all'interno del cavo. Il cedimento cumulato in calotta è pari a 4.0 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 6.1 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 5.5 cm. Le zone plastiche risultano simili alla fase precedente. Le zone plastiche non variano sostanzialmente rispetto alla fase precedente. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 749 kPa (calotta) mentre la massima tensione principale minima è di 58 kPa (arco rovescio).

FASE 10

Viene simulato il comportamento di lungo termine caratterizzato dalla presenza della falda agente sul rivestimento definitivo ed il decadimento del rivestimento di prima fase con conseguente trasferimento degli sforzi sul rivestimento definitivo ed il decadimento dei parametri del consolidamento al contorno che tornano ad essere quelli del terreno originario. Il cedimento cumulato in calotta è pari a 4.0 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 6.1 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 5.5 cm. Le zone plastiche si estendono senza soluzione di continuità oltre la zona precedentemente definita come asciutta, con estension di 14m ai piedritti, 10m in calotta e 7m in a.r.. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 696 kPa (piedritti) mentre la massima tensione principale minima è di 454 kPa (arco rovescio).

9.6.5 Verifiche strutturali del rivestimento di prima fase

Le verifiche strutturali sul rivestimento di prima fase sono state eseguite per le fasi di calcolo 5, 6, 7 e 8. Le caratteristiche del rivestimento provvisorio sono riportate nella seguente tabella.

| Caratteristiche | Spritz beton/Centine |
|--|----------------------|
| Spessore dello spritz beton[m] | 0.20 |
| Area resistente dello spritz beton A_{sb} [m ²] | 0.20 |
| Tipologia profilati | HEA 180 |
| Interasse longitudinale profilato [m] | 1 |
| Area resistente della centina A_{cent} [cm ²] | 45.25 |
| Modulo resistente elastico della centina W_{cent} [cm ³] | 293.6 |
| Area resistente a taglio della centina $A_{V,cent}$ [cm ²] | 14.47 |

Tabella 42 - Analisi di interazione – Sezione tipo Finestra Pedonale C2P: definizione delle caratteristiche del rivestimento provvisorio

La tabella seguente sintetizza le sollecitazioni ottenute, per ogni fase, nelle zone di maggiore interesse del rivestimento: zona di calotta, di contatto calotta-piedritti e dei piedritti, rilevate in corrispondenza dei nodi indicati nella figura a seguire.

| | Sollecitazioni | Calotta | zona di contatto calotta-piedritto | | piedritto | |
|---------------|----------------|---------|------------------------------------|--------|-----------|--------|
| | | | Sinistro | Destro | Sinistro | Destro |
| | | | | | | |
| Fase 5 | N [kN/m] | -230 | -198 | -195 | -83 | -84 |
| | M [kNm/m] | -8 | -14 | -15 | 13 | 14 |
| | T [kN/m] | 0 | 0 | -1 | 9 | -9 |
| Fase 6 | N [kN/m] | -351 | -326 | -323 | -209 | -210 |
| | M [kNm/m] | -8 | -15 | -16 | 19 | 19 |
| | T [kN/m] | 0 | -1 | -1 | 14 | -15 |
| Fase 7 | N [kN/m] | -374 | -350 | -347 | -233 | -233 |
| | M [kNm/m] | -7 | -16 | -17 | 20 | 21 |
| | T [kN/m] | 0 | -1 | 0 | 16 | -16 |
| Fase 8 | N [kN/m] | -377 | -352 | -349 | -230 | -231 |
| | M [kNm/m] | -8 | -16 | -17 | 20 | 21 |
| | T [kN/m] | 0 | -1 | -1 | 15 | -16 |
| Fase 9 | N [kN/m] | -387 | -353 | -349 | -228 | -228 |
| | M [kNm/m] | -7 | -16 | -17 | 20 | 21 |
| | T [kN/m] | 0 | -1 | -1 | 15 | -16 |

Tabella 43 - Analisi di interazione – Sezione tipo Finestra Pedonale C2P: Sollecitazioni nelle zona di maggior interesse del rivestimento di prima fase

| | Sollecitazioni | Chiave a.r. | zona di contatto a.r.-piedritto | |
|---------------|----------------|-------------|---------------------------------|--------|
| | | | Sinistro | Destro |
| | | | | |
| Fase 6 | N [kN/m] | -170 | -168 | -167 |
| | M [kNm/m] | 5 | 8 | 8 |
| | T [kN/m] | 0 | 25 | -12 |
| Fase 7 | N [kN/m] | -206 | -205 | -203 |
| | M [kNm/m] | 7 | 10 | 10 |
| | T [kN/m] | 0 | 31 | -20 |

| | | | | |
|---------------|-----------|------|------|------|
| Fase 8 | N [kN/m] | -199 | -201 | -198 |
| | M [kNm/m] | 6 | 10 | 10 |
| | T [kN/m] | 0 | 31 | -20 |
| Fase 9 | N [kN/m] | -211 | -201 | -199 |
| | M [kNm/m] | 7 | 10 | 10 |
| | T [kN/m] | 0 | 31 | -20 |

Tabella 44 - Analisi di interazione – Sezione tipo Finestra Pedonale C2P: Sollecitazioni nelle zona di maggior interesse dell'arco rovescio provvisorio

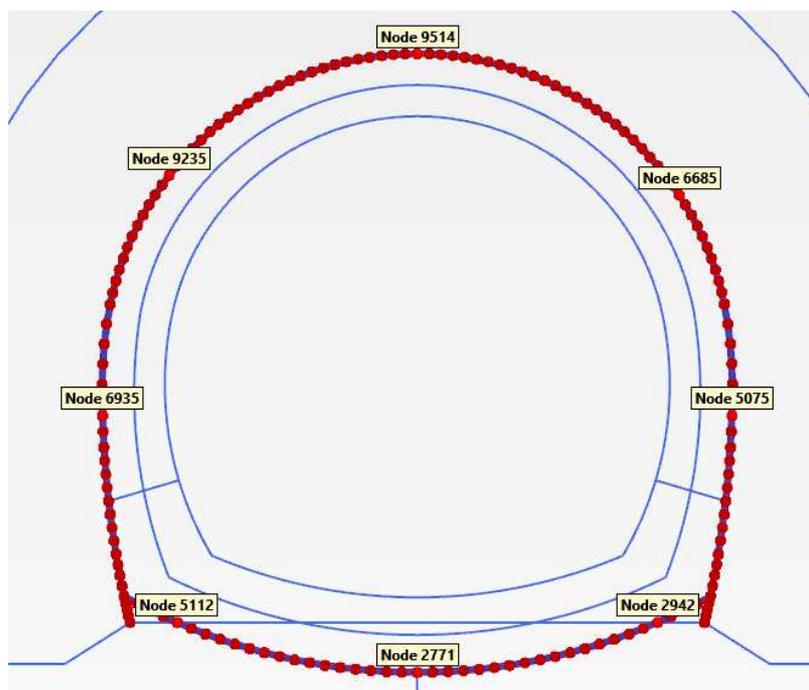


Figura 73 - Nodi rilevati del rivestimento di prima fase

Nella figura sopra si riportano, per ogni nodo del rivestimento, le sollecitazioni scaturite dall'analisi e le conseguenti verifiche: le verifiche strutturali del rivestimento di prima fase sono soddisfatte, per ciascuna fase, in tutti i punti.

9.6.6 Verifiche strutturali SLU del rivestimento definitivo

Nella tabella seguente si riportano le caratteristiche simulate dei rivestimenti di prima fase e definitivi.

| Tipo di prerivestimento | Spritz beton/Rivestimento definitivo |
|---------------------------|--------------------------------------|
| Spessore dello spritz [m] | 0.20 |

| | |
|--|------|
| Spessore simulato del rivestimento definitivo di arco rovescio [m] | 0.60 |
| Spessore simulato del rivestimento definitivo di calotta [m] | 0.50 |

Tabella 45 - Analisi di interazione – Sezione tipo Finestra Pedonale C2P: 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.

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).

Il rivestimento definitivo è previsto armato sia in calotta che in arco rovescio. L'incidenza delle armature in calotta è di 70kg di acciaio per m^3 e in arco rovescio è di 60kg di acciaio per 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 delle figura a seguire.

| | Sollecitazioni | Calotta | zona di contatto calotta-piedritto | | pedritto | |
|----------------|----------------|---------|------------------------------------|--------|----------|----------|
| | | | sinistro | destro | sinistro | destro |
| Fase 9 | N [kN/m] | 5 | -162 | -8 | -27 | -27.1648 |
| | M [kNm/m] | 3 | -9 | 0 | -3 | -3 |
| | T [kN/m] | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| Fase 10 | N [kN/m] | -1291 | | -1259 | -1159 | -1160.77 |
| | M [kNm/m] | -40 | | -10 | 48 | 47 |
| | T [kN/m] | -1 | | -31 | -55 | 54 |

Tabella 46 - Analisi di interazione – Sezione tipo Finestra Pedonale C2P: Sollecitazioni nelle zone calotta-piedritto del rivestimento definitivo

| | Sollecitazioni | arco rovescio | zona di contatto piedritto-arco | |
|---------------|----------------|---------------|---------------------------------|--------|
| | | | sinistro | destro |
| Fase 8 | N [kN/m] | -16 | -8 | -353 |
| | M [kNm/m] | -4 | -3 | 12 |
| | T [kN/m] | 0 | -2 | -16 |
| Fase 9 | N [kN/m] | -9 | -13 | -521 |

| | | | | |
|----------------|-----------|-------|-------|-------|
| | M [kNm/m] | 1 | -2 | 9 |
| | T [kN/m] | 0 | 3 | -37 |
| Fase 10 | N [kN/m] | -1154 | -1052 | -3029 |
| | M [kNm/m] | 104 | -149 | -428 |
| | T [kN/m] | -1 | 171 | -500 |

Tabella 47 - Analisi di interazione – Sezione tipo Finestra Pedonale C2P: Sollecitazioni nelle zone arco rovescio-piedritto del rivestimento definitivo

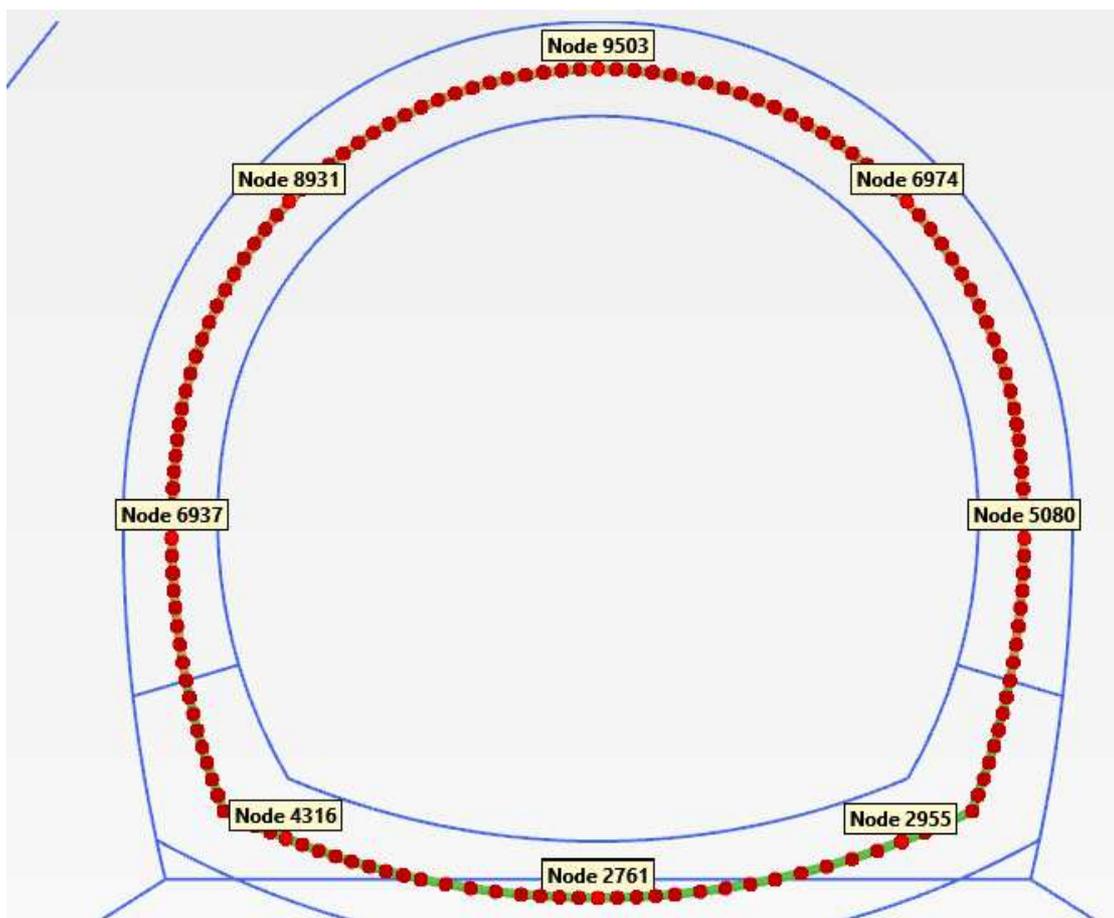


Figura 74 - Nodi rilevati del rivestimento definitivo

In **calotta e piedritti** si dispongono 1+1 $\phi 20/20$ con un copriferro netto di 4 cm. L'armatura longitudinale di ripartizione è costituita da barre $\phi 12/20$. L'armatura a taglio è sufficiente la minima del tipo $\phi 12/40\text{cm}/40\text{cm}$.

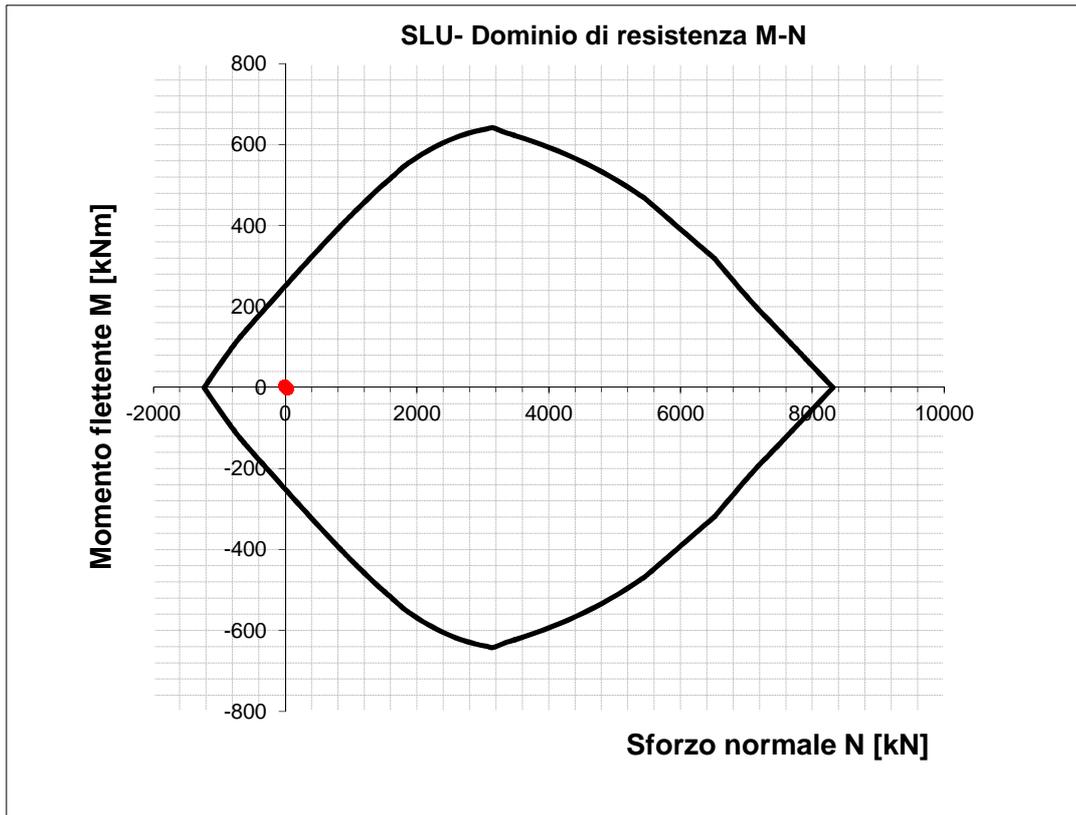


Figura 75 - Dominio resistente SLU calotta (B=1.00 m, H=0.50 m) – Fase 9

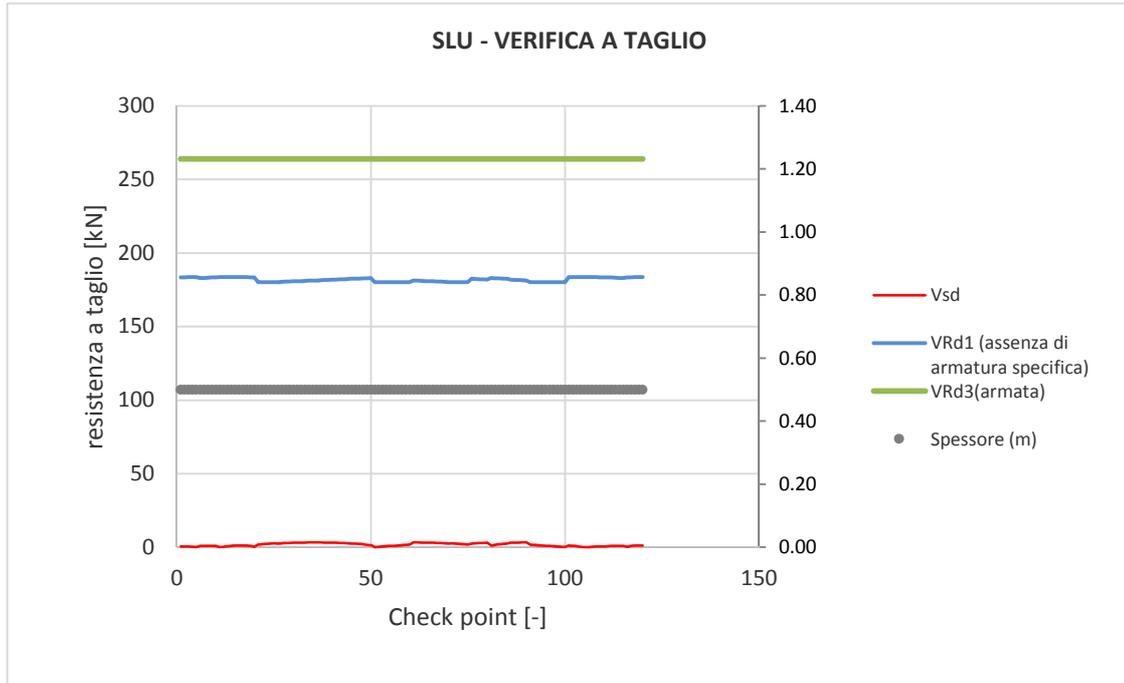


Figura 76 - Verifica SLU taglio calotta – Fase 9

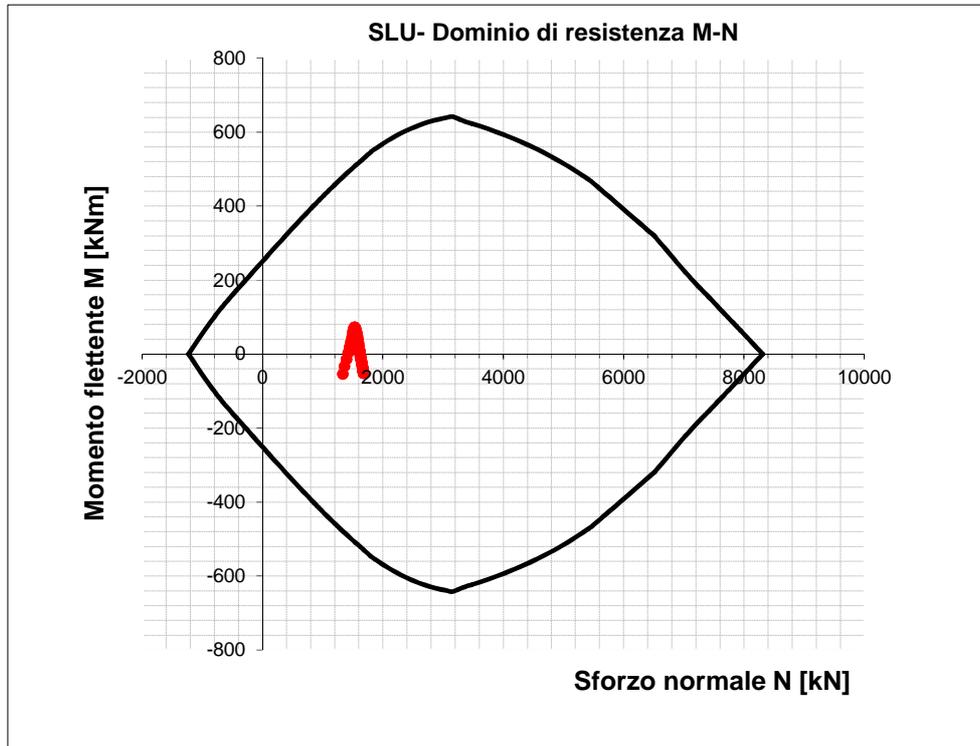


Figura 77 - Dominio resistente SLU calotta (B=1.00 m, H=0.50 m) – Fase 10

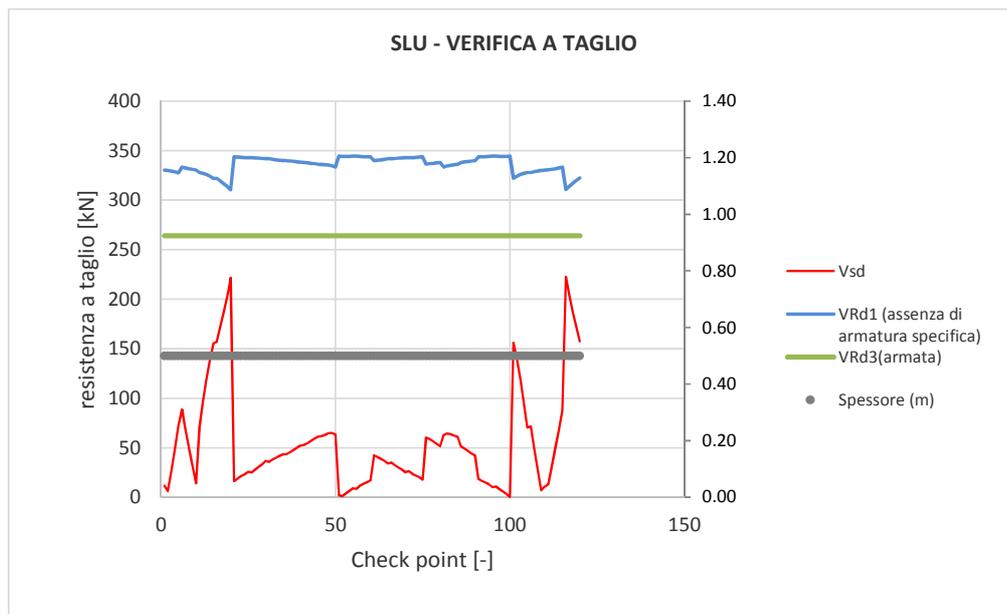


Figura 78 - Verifica SLU taglio calotta – Fase 10

In **arco rovescio** si dispongono 1+1 $\phi 20/20$ con un copriferro netto di 4 cm. L'armatura longitudinale di ripartizione è costituita da barre $\phi 12/20$. L'armatura a taglio è sufficiente la minima del tipo $\phi 12/40\text{cm}/40\text{cm}$.

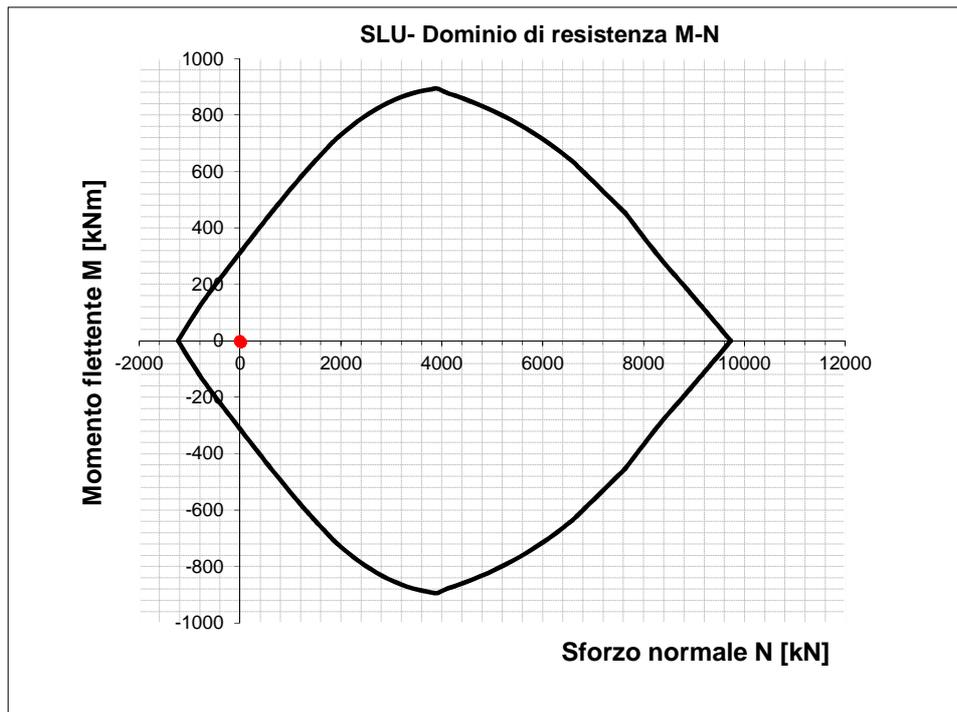


Figura 79 - Dominio resistente SLU arco rovescio (B=1.00 m, H=0.60 m) – Fase 8

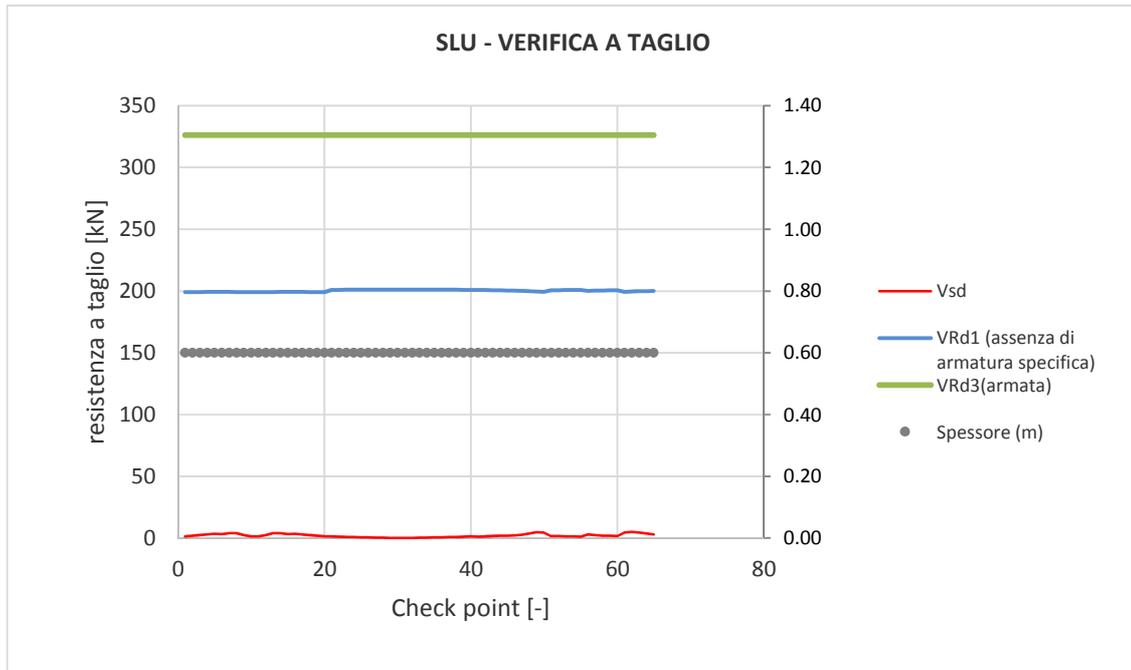


Figura 80 - Verifica SLU taglio arco rovescio – Fase 8

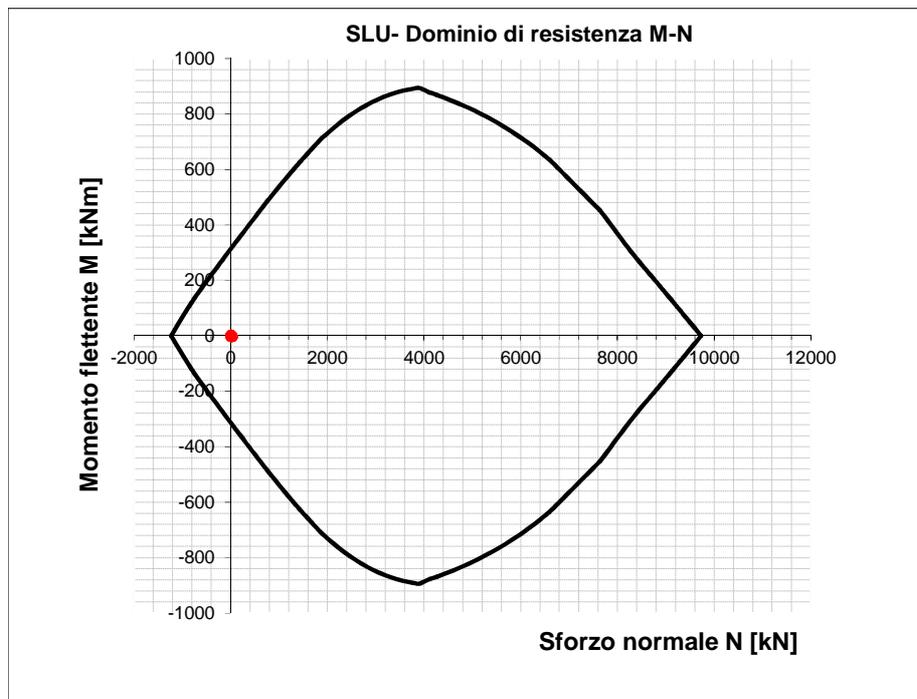


Figura 81 - Dominio resistente SLU arco rovescio (B=1.00 m, H=0.60 m) – Fase 9

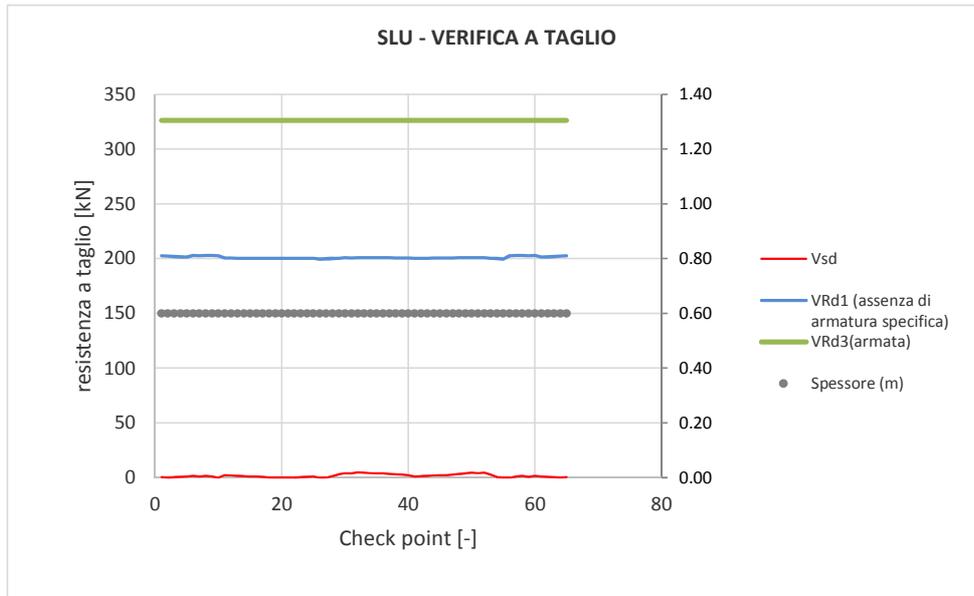


Figura 82 - Verifica SLU taglio arco rovescio – Fase 9

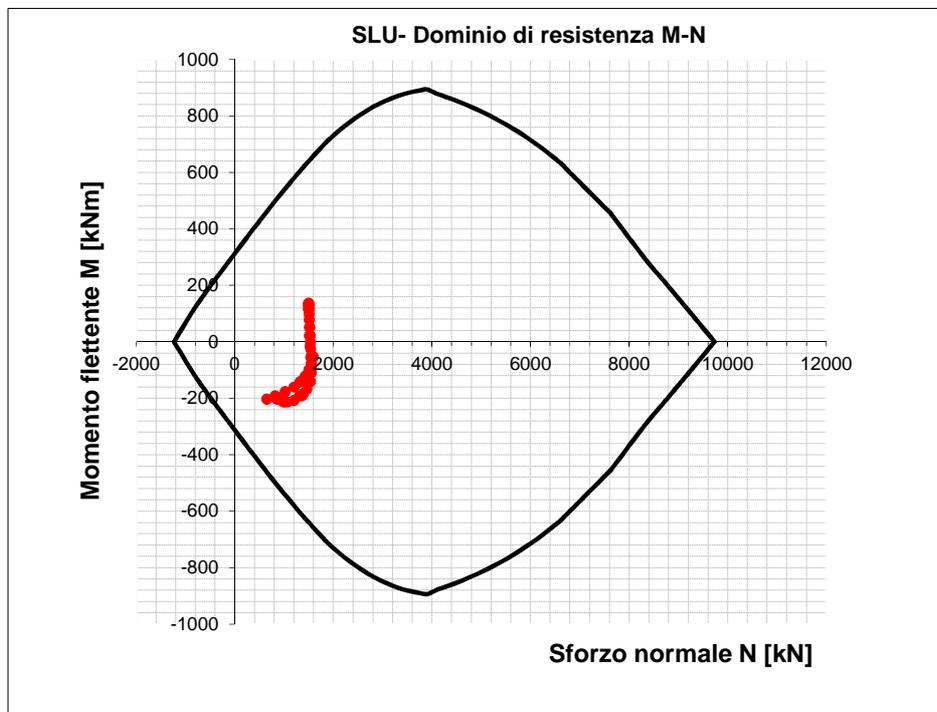


Figura 83 - Dominio resistente SLU arco rovescio (B=1.00 m, H=0.60 m) – Fase 10

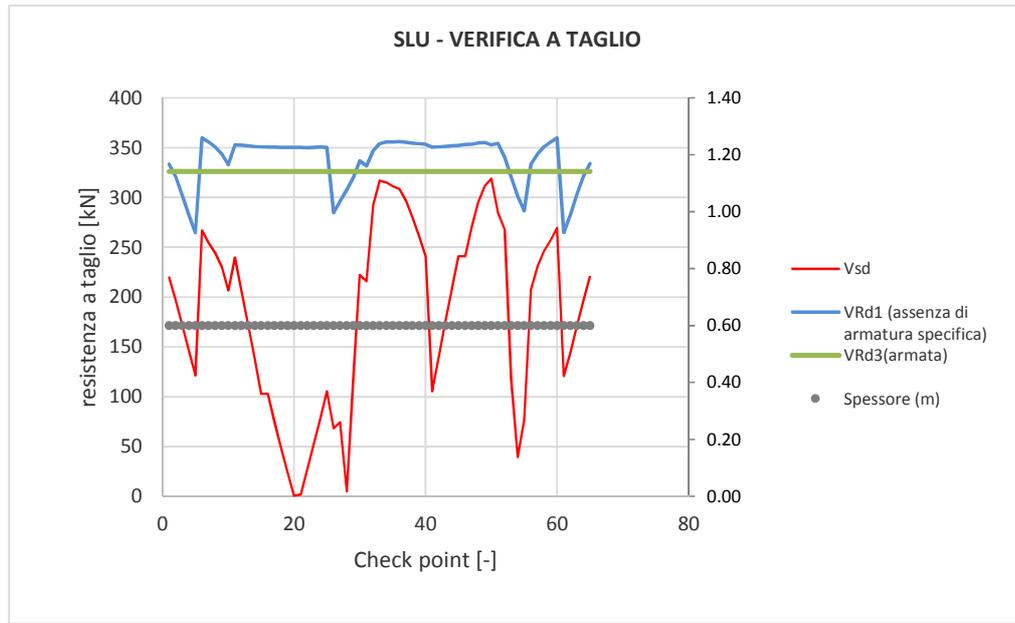


Figura 84 - Verifica SLU taglio arco rovescio – Fase 10

9.6.7 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.

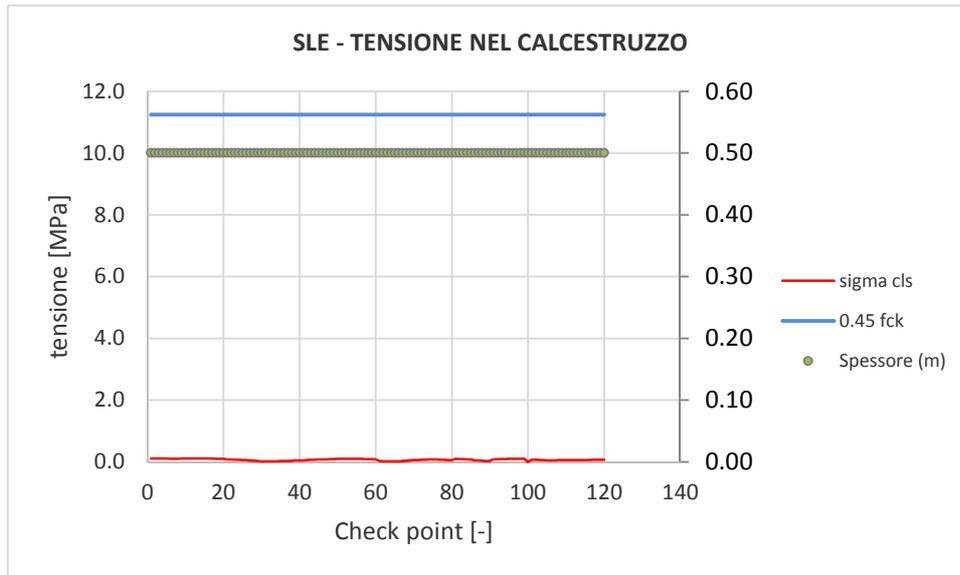


Figura 85 - Verifiche SLE tensione cls calotta – Fase 9

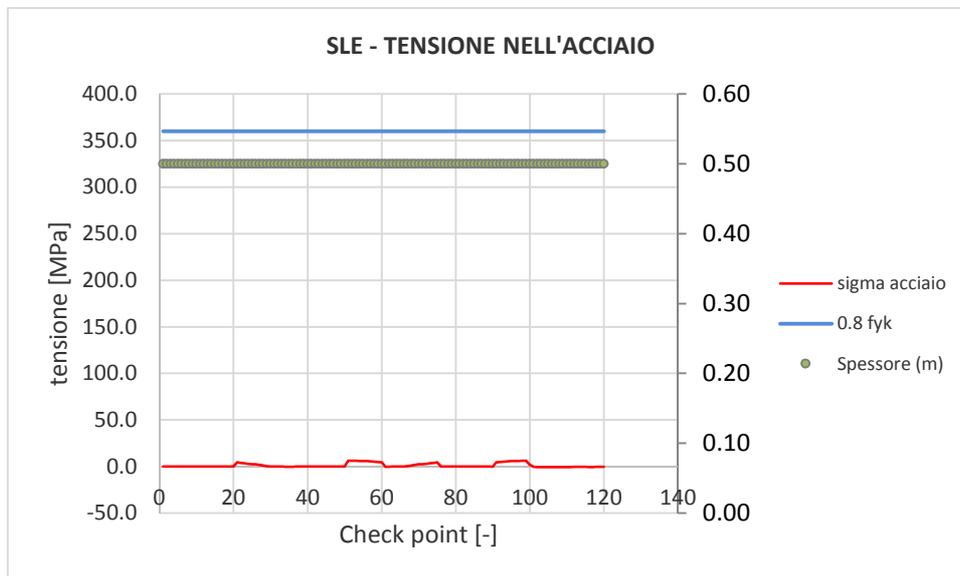


Figura 86 - Verifiche SLE tensione acciaio calotta – Fase 9

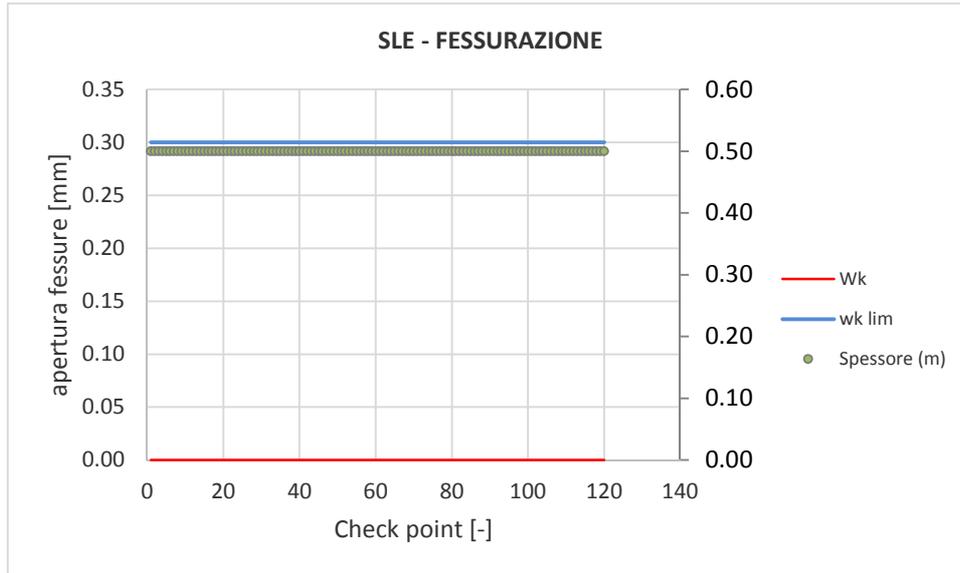


Figura 87 - Verifiche SLE fessurazione calotta – Fase 9

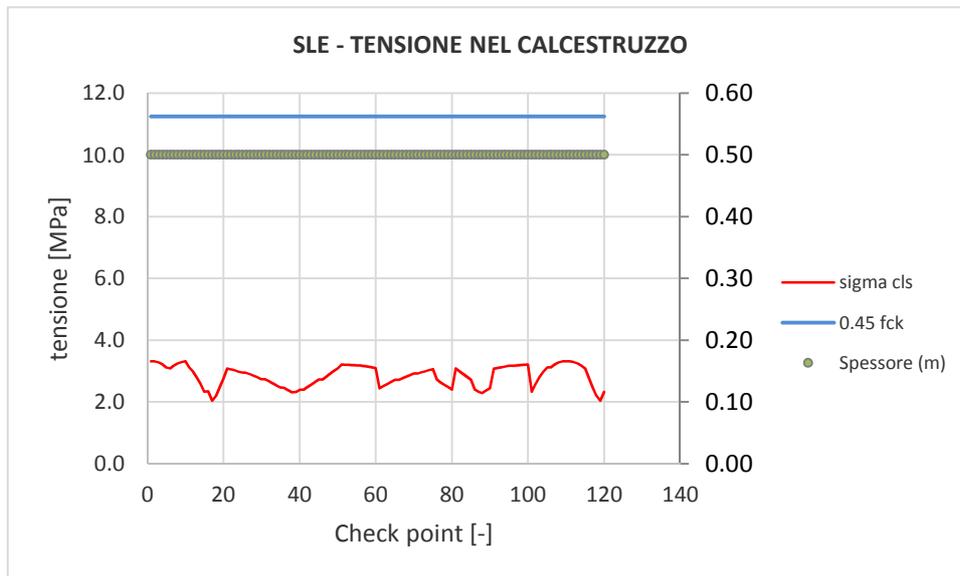


Figura 88 - Verifiche SLE tensione cls calotta – Fase 10

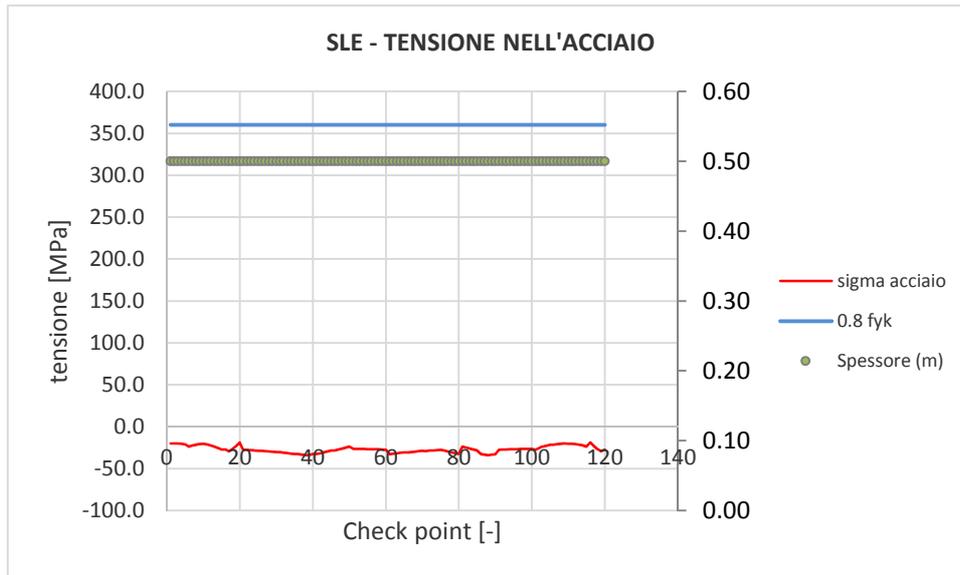


Figura 89 - Verifiche SLE tensione acciaio calotta – Fase 10

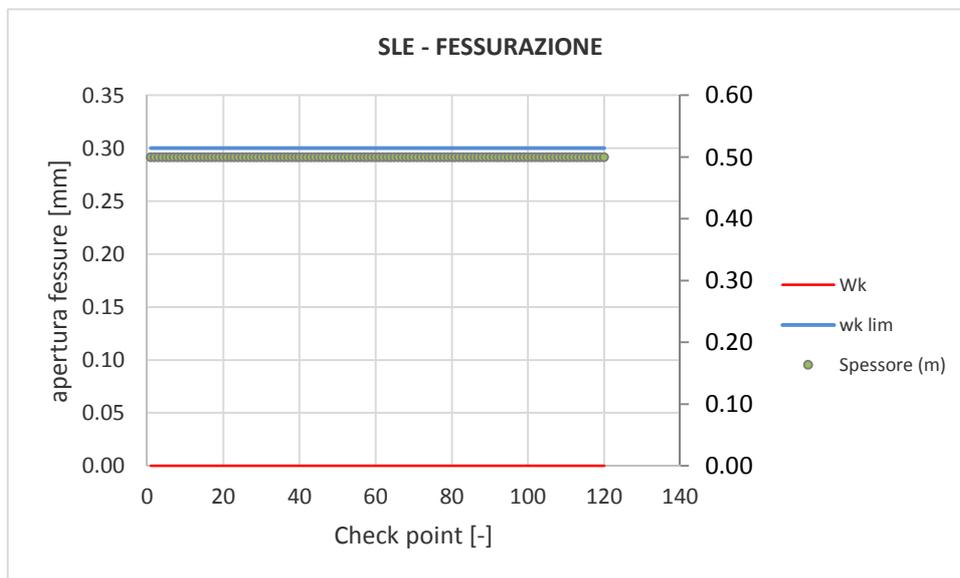


Figura 90 - Verifiche SLE fessurazione calotta – Fase 10

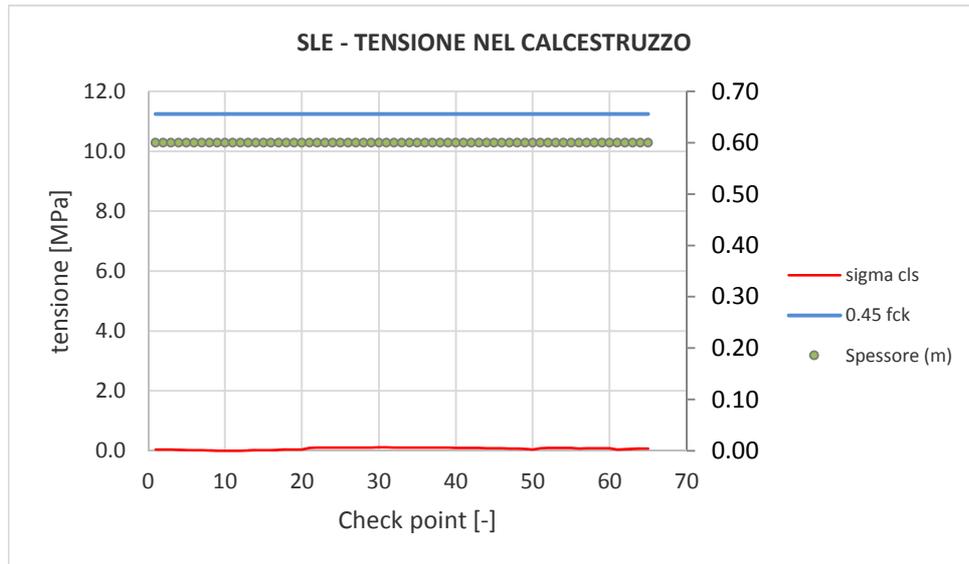


Figura 91 - Verifiche SLE tensione cls arco rovescio – Fase 8

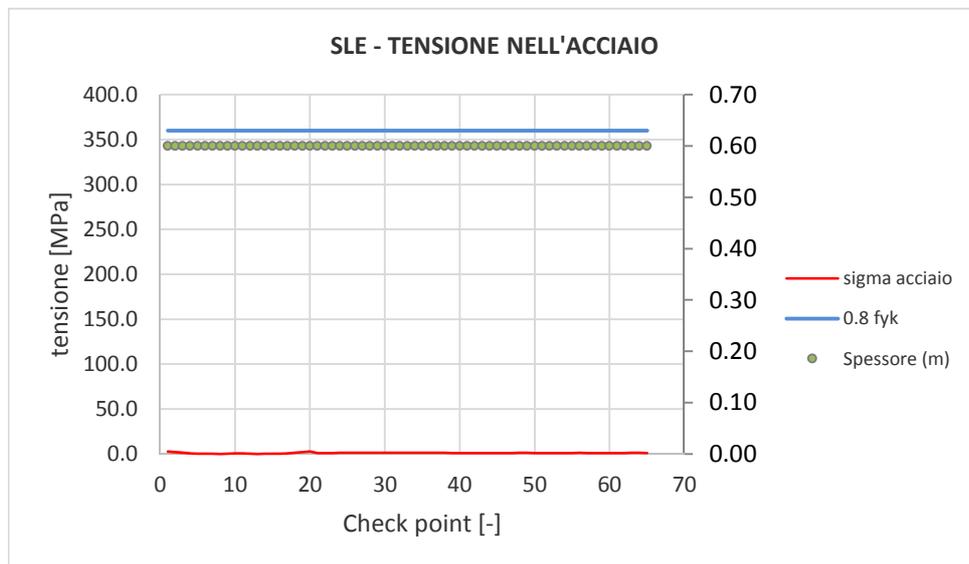


Figura 92 - Verifiche SLE tensione acciaio arco rovescio – Fase 8

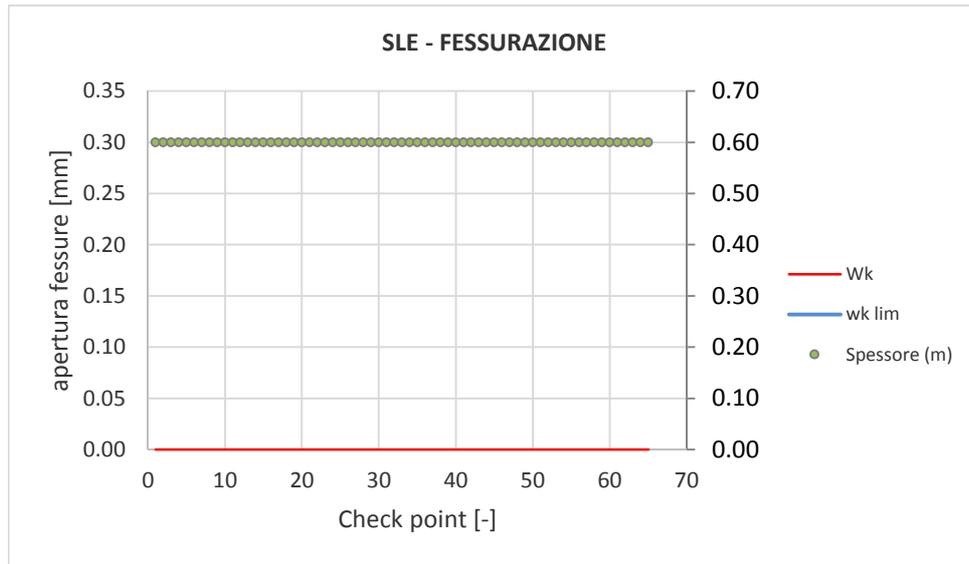


Figura 93 - Verifiche SLE fessurazione arco rovescio – Fase 8

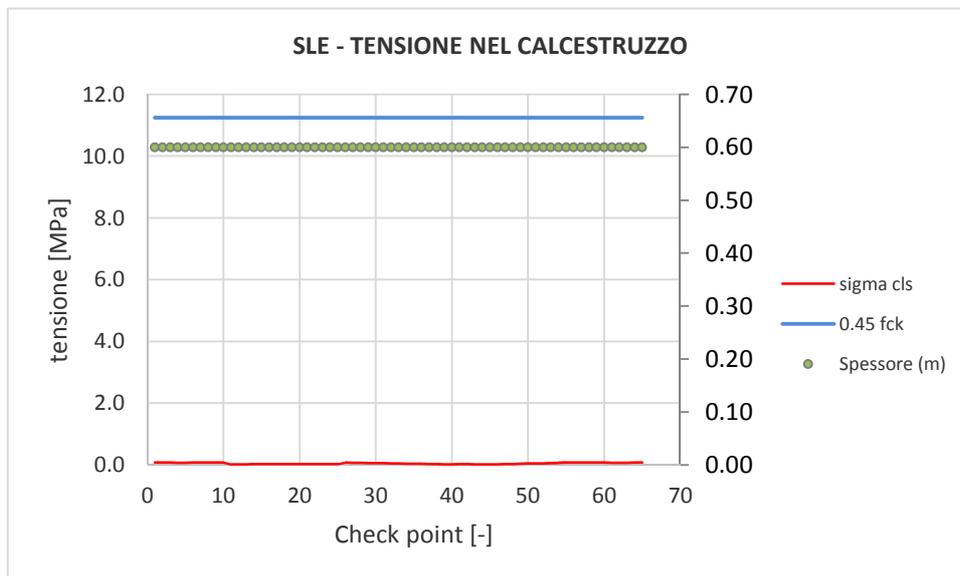


Figura 94 - Verifiche SLE tensione cls arco rovescio – Fase 9

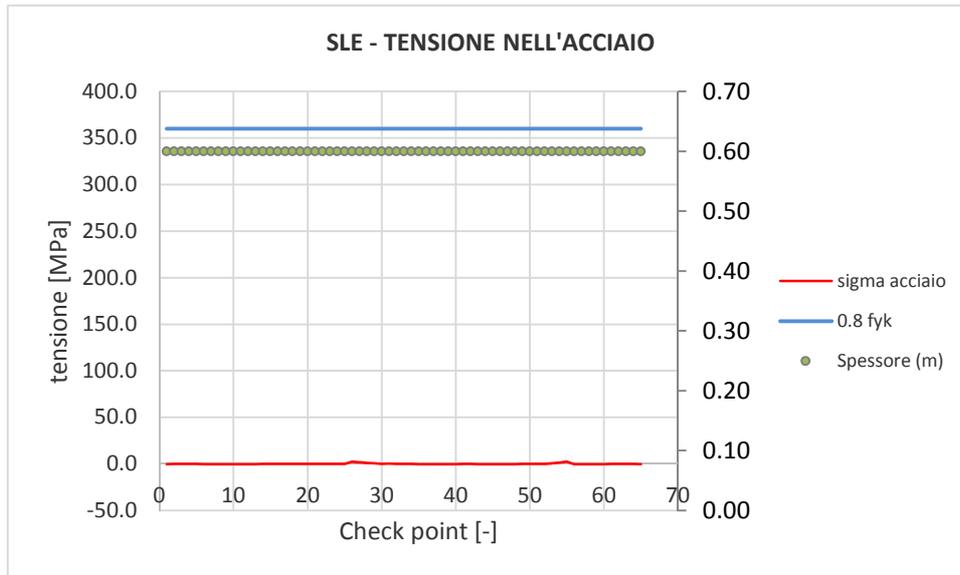


Figura 95 - Verifiche SLE tensione acciaio arco rovescio – Fase 9

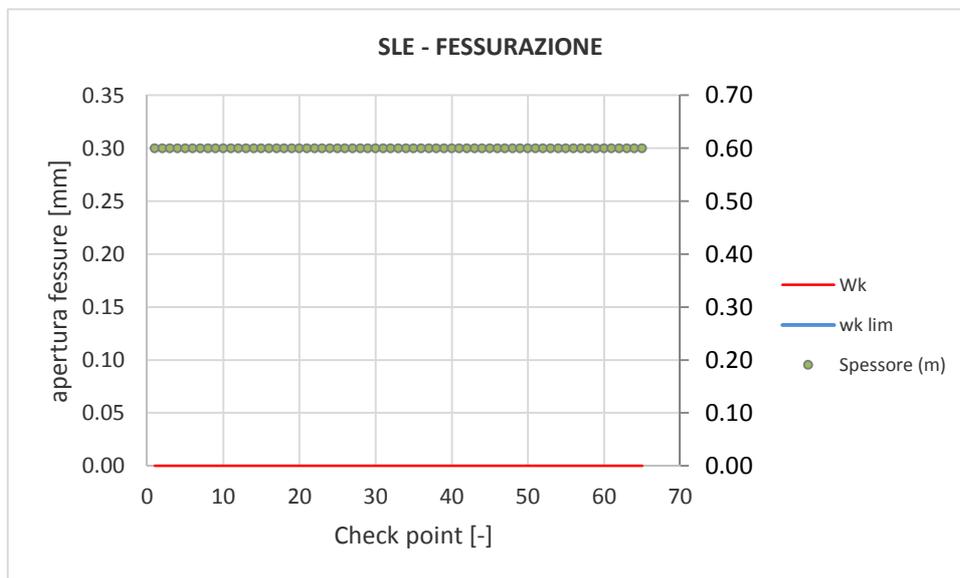


Figura 96 - Verifiche SLE fessurazione arco rovescio – Fase 9

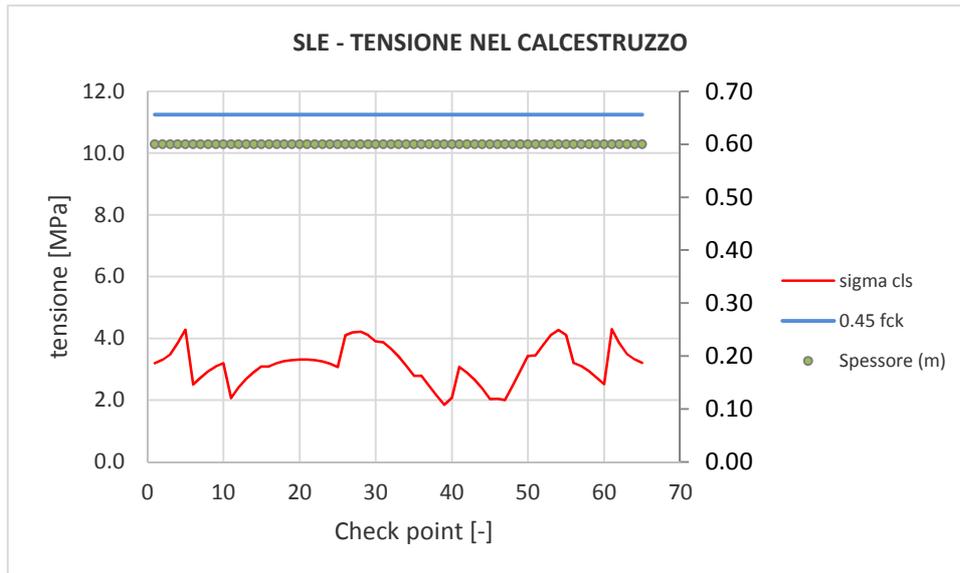


Figura 97 - Verifiche SLE tensione cls arco rovescio – Fase 10

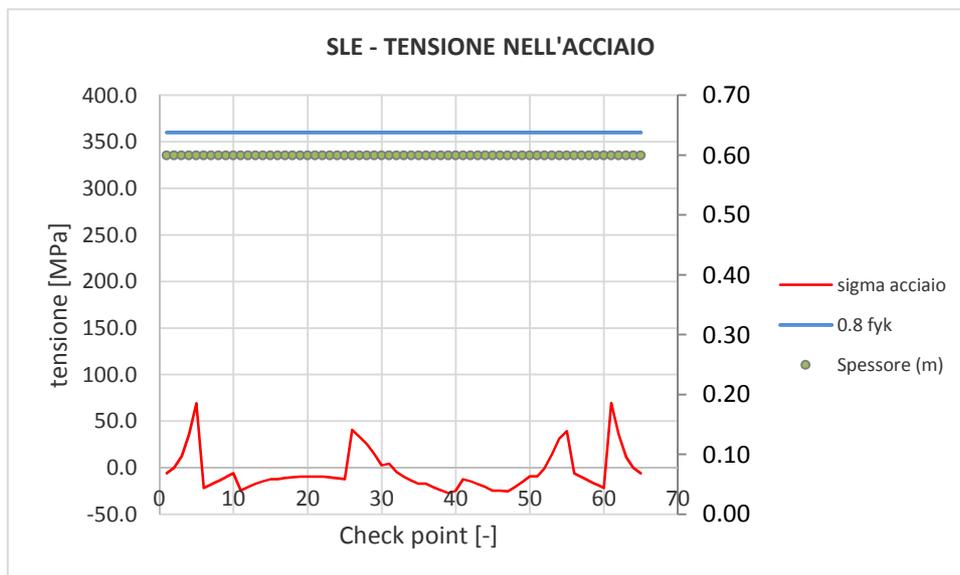


Figura 98 - Verifiche SLE tensione acciaio arco rovescio – Fase 10

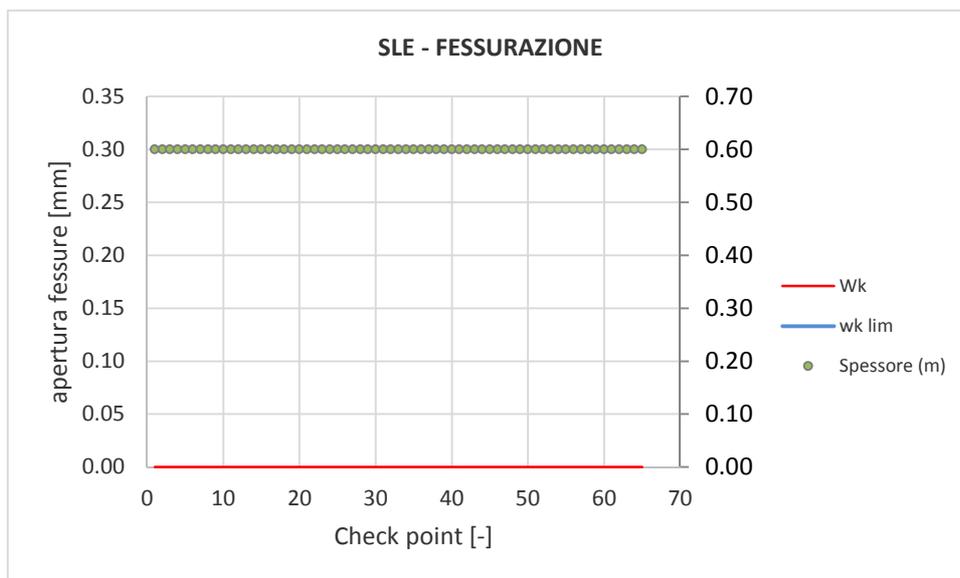


Figura 99 - Verifiche SLE fessurazione arco rovescio – Fase 10

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

9.7 SEZIONE TIPO A2 pedonale

Le analisi e le verifiche riportate di seguito sono relative alla copertura massima nel tratto di cunicolo pedonale della finestra F3 che attraversa la formazione FYR2 e la sezione A2 pedonale è prevista applicata come sezione prevalente.

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 eseguite si è tenuto conto dell'interazione tra lo scavo della sezione di cunicolo pedonale con quello della galleria di linea Melito localizzata a circa 20m di distanza del cunicolo stesso.

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 della sezione tipo A2 pedonale.

La sezione di analisi è relativa ad una condizione di copertura profonda in relazione alla dimensione dello scavo.

| <i>Stratigrafia di calcolo</i> | | C | Falda | γ | c'_k | ϕ'_k | c_{uK} | E' | E_u | k_0 |
|--------------------------------|---------------------------|-----|-------------|----------------------|--------|-----------|----------|-------|-------|-------|
| <i>Formazione</i> | <i>Profondità da p.c.</i> | | | | | | | | | |
| [-] | [m] | [m] | [m da p.c.] | [kN/m ³] | [kPa] | [°] | [kPa] | [MPa] | [MPa] | [-] |
| FYR2 | 0-150 | 100 | 40 | 25 | 150 | 40 | - | 5000 | 5750 | 1.00 |

C = copertura (rispetto alla calotta)
 γ = peso per unità di volume
 c'_k = coesione drenata
 ϕ'_k = angolo di attrito interno
 c_{uK} = coesione non drenata
E' = modulo elastico drenato
 E_u = modulo elastico non drenato ($E_u = 1.5 \cdot E' / (1 + \nu')$)
 ν' = coefficiente di Poisson
 K_0 = coefficiente di spinta a riposo

Tabella 48 - Analisi di interazione Sez. A2 pedonale: definizione della stratigrafia di calcolo

In ragione delle limitate permeabilità dei materiali, si ipotizza un comportamento asciutto durante la fase di scavo. Al fine di tenere conto della condizione di lungo termine in associazione ad un mancato funzionamento dei drenaggi, la falda viene posta a 60m al di sopra del livello della calotta della galleria.

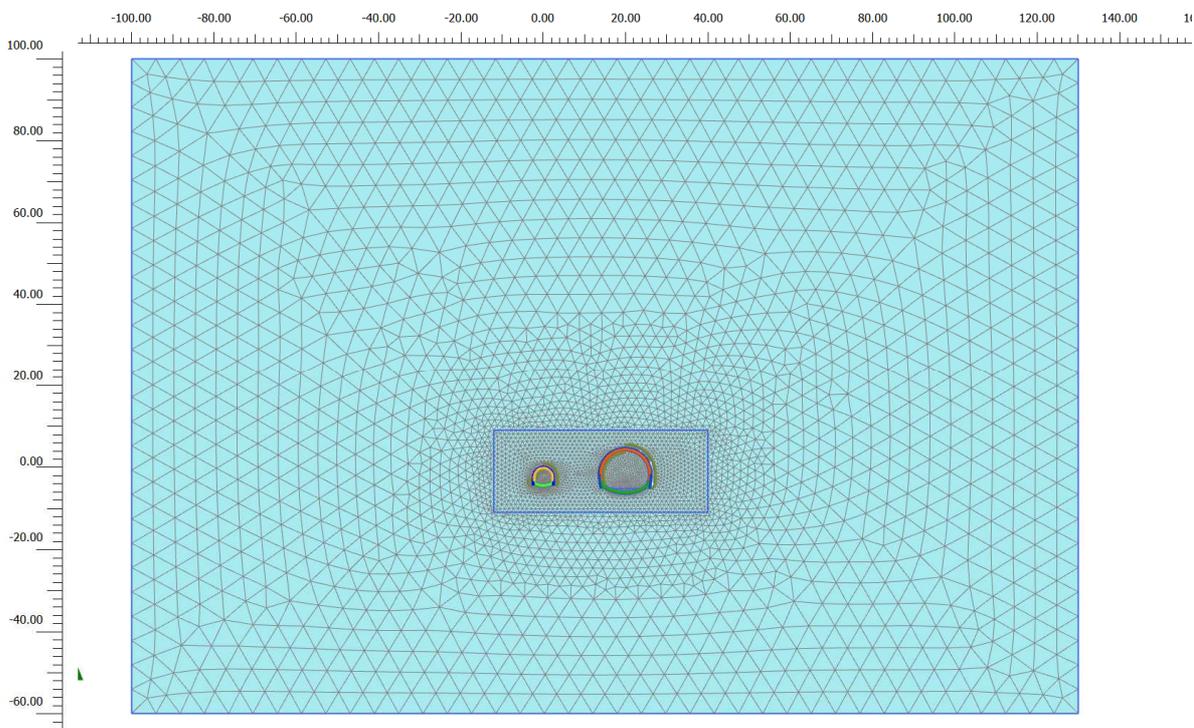


Figura 100 - Modello di calcolo - Geometria mesh

Non è previsto consolidamento del fronte.

La sezione di scavo mostra presenza di bullonatura radiale (6/7 bulloni $\phi 24$ mm oppure tipo Swellex, L=6.0m, maglia 1.2x1.2m), che non viene tenuta in conto nell'analisi, ma il suo scopo è permetterla la cucitura dei blocchi e mantenere il modello geotecnico nell'ambito di un continuo equivalente.

Con riferimento all'asse della galleria, la griglia di calcolo presenta un'estensione complessiva laterale di 230m e un'altezza complessiva di 160 m. Il numero complessivo degli elementi è pari a circa 9392 mentre i nodi sono circa 75768.

9.7.2 Fasi e percentuali di rilascio

I tassi di deconfinamento sono stati calcolati mediante analisi assialsimmetrica e curva caratteristica numerica (come indicato nella figura soprastante con riferimento alla fase di scavo al fronte).

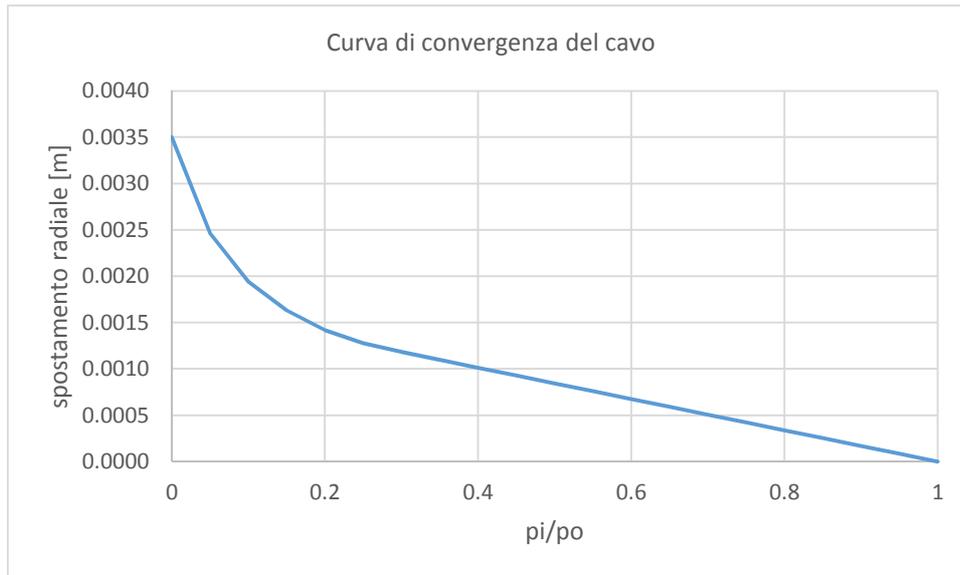


Figura 101 - Sez. A2 – Curva caratteristica di convergenza numerica galleria di linea cunicolo pedonale

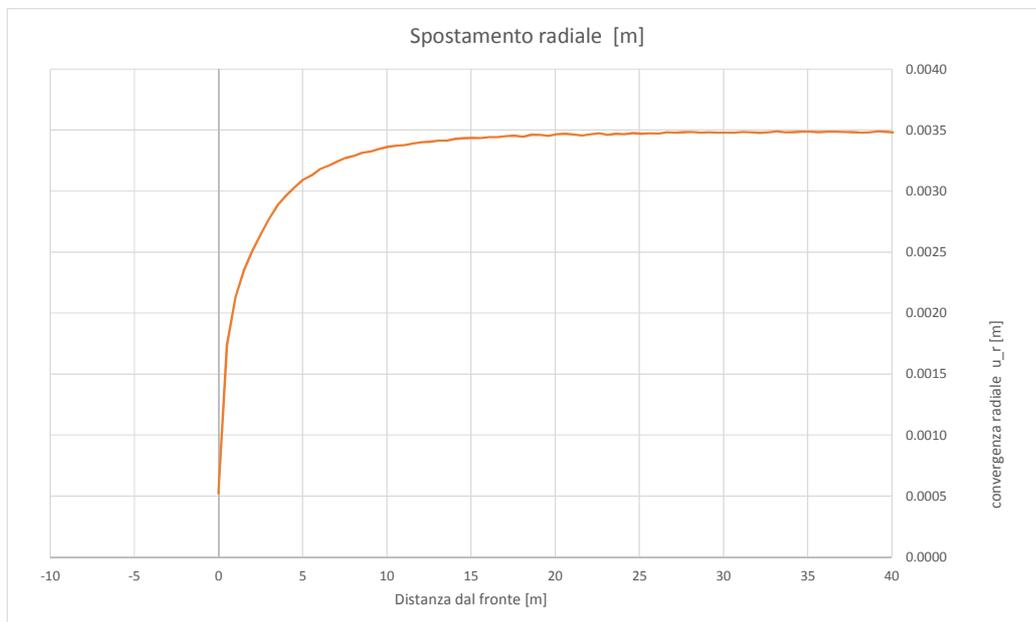


Figura 102 - Sez. A2 – Spostamenti radiali modello assialsimmetrico in funzione della distanza dal fronte cunicolo pedonale

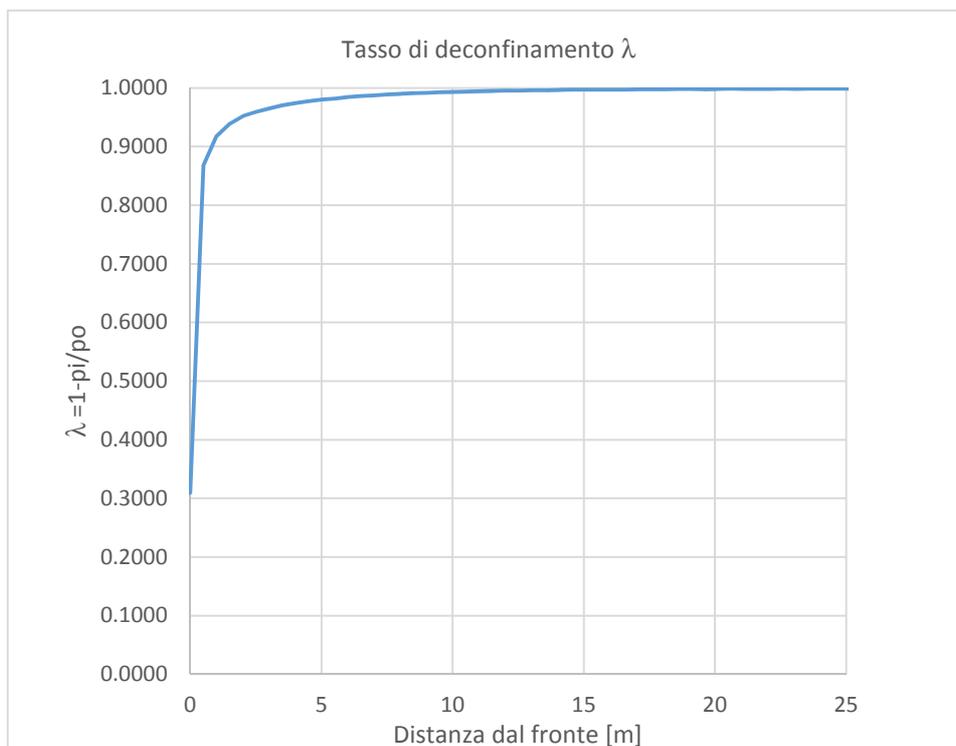


Figura 103 - Sez. A2 – Calcolo percentuale di rilascio λ_F - al fronte cunicolo pedonale

Nella tabella successiva è schematizzata la successione delle fasi di calcolo nelle quali è articolata l'analisi di interazione opera-terreno. Lo scavo risulta interagire con la sezione di cunicolo pedonale localizzato a circa 20m di distanza dall'asse della galleria di linea, per cui si assiste alla seguente fasizzazione generale:

- Scavo della galleria di linea;
- Scavo del cunicolo di emergenza

Al termine del processo di scavo è stata simulata la fase di lungo termine in cui è previsto l'innalzamento del livello di falda e sono stati fatti decadere i parametri dei rivestimenti di prima fase.

| Fase Galleria di linea | Fase Cunicolo Pedonale | Descrizione | Rilascio forze scavo (λ) TR | Rilascio forze scavo (λ) CP |
|------------------------|------------------------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 0-1 | 0-1 | Inizializzazione stato tensionale geostatico | 0.00 | - |
| TR2 | | Rilascio a cavo libero in corrispondenza del fronte | 0.63 | - |
| TR 3 | | Esecuzione dello sfondo elementare di 1.2 m | 0.92 | - |
| TR 4 | | Installazione del rivestimento di prima fase e scarico a 12 m dal fronte | 0.985 | - |
| TR 5 | | Scarico tensionale completo a 60 m dal fronte | 1.00 | - |
| TR 6 | | Installazione del rivestimento definitivo in arco rovescio | 1.00 | - |
| | CP2 | Rilascio a cavo libero in corrispondenza del fronte | 1.00 | 0.31 |
| | CP3 | Esecuzione dello sfondo elementare di 1.2 m | 1.00 | 0.92 |
| | CP4 | Scarico tensionale completo a 60 m dal fronte | 1.00 | 1.00 |
| TR 7 | CP5 | Installazione del rivestimento definitivo in arco rovescio e calotta | 1.00 | 1.00 |
| TR 8 | CP6 | Condizione di lungo termine (innalzamento della falda, decadimento del rivestimento di prima fase) | 1.00 | 1.00 |

Tabella 49 - Analisi di interazione – Sezione A2: 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 Tabella 49.

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 Tabella 17 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 9 consente di visualizzare la posizione dei nodi di chiave calotta, dei piedritti e dell'arco rovescio cui si riferiscono i dati riportati nella tabella seguente.

| Fase | calotta | | | piedritti | | | | | | arco rovescio | | | Fascia Plasticizzata cunicolo pedonale |
|----------------|---------|------------------|------------------|-----------|------------------|------------------|---------|------------------|------------------|---------------|------------------|------------------|--|
| | u [cm] | σ_1 [kPa] | σ_3 [kPa] | u [cm] | σ_1 [kPa] | σ_3 [kPa] | u [cm] | σ_1 [kPa] | σ_3 [kPa] | u [cm] | σ_1 [kPa] | σ_3 [kPa] | |
| CP2 | 0.22 | -2780 | -2027 | 0.17 | -3658 | -1482 | 0.17 | -3658 | -1482 | -0.19 | -2279 | -1985 | No zone plastiche |
| CP3 | 0.39 | -1796 | -251 | 0.17 | -1494 | -197 | 0.17 | -1494 | -197 | -0.32 | -1512 | -262 | Zone plastiche risultano localizzate in limitati punti ai piedritti ed alla base delle murette |
| CP4 | 0.42 | -1381 | -165 | 0.25 | -1227 | -127 | 0.25 | -1227 | -127 | -0.42 | -676 | -7 | Incremento zone plastiche in arco rovescio |
| TR7/CP5 | 0.43 | -1390 | -162 | 0.25 | -1227 | -128 | 0.25 | -1227 | -128 | -0.41 | -681 | -17 | Riduzione delle zone plastiche, specie in arco rovescio dove non risultano più presenti |
| TR8/CP6 | 0.29 | -1243 | -600 | 0.44 | -1210 | -626 | 0.44 | -1210 | -626 | -1.00 | -1292 | -648 | Estensione variabile da 2m in calotta e 3m in a.r., con minimo sui piedritti |

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

σ_1 = sforzo principale totale massimo

σ_3 = sforzo principale totale minimo

Tabella 50 - Analisi di interazione – Sezione tipo C2 allargata: risultati dell'analisi

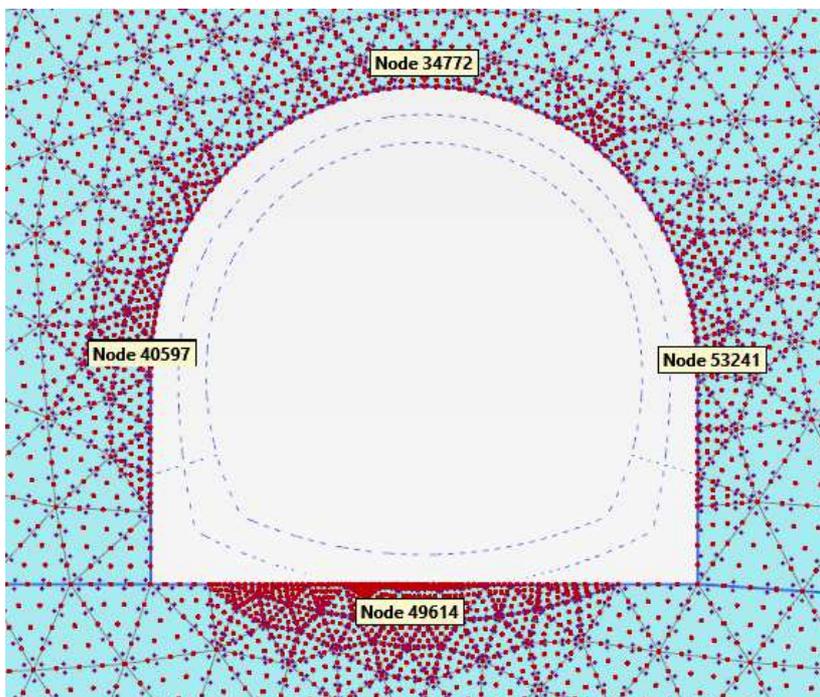


Figura 104 - Nodi rilevati nella zona del cavo

FASE CP2

Viene simulata l'esecuzione dello scavi del cunicolo pedonale sino alla posizione del fronte. Il campo di spostamenti risulta pari a circa 0.2cm al contorno dello scavo. Nell'intorno del cunicolo non sono presenti zone plastiche. Nell'intorno del cunicolo la massima tensione principale massima è di 3658 kPa (piedritti) mentre la massima tensione principale minima è di 1482 kPa (piedritti).

FASE CP3

Viene simulata l'esecuzione dello sfondo elementare di 1.2 m del cunicolo pedonale. Il campo di spostamenti risulta pari a circa 0.42cm in calotta e a.r. e 0.25cm ai piedritti. Nell'intorno del cunicolo sono presenti zone plastiche con spessore variabile da 2m ai piedritti a 1m in calotta, con bande inclinate al di sotto delle murette. Nell'intorno del cunicolo la massima tensione principale massima è di 1796 kPa (calotta) mentre la massima tensione principale minima è di 194 kPa (piedritti).

FASE CP4

Viene simulata la posa dei rivestimenti per la galleria principale e per il cunicolo pedonale. Il campo di spostamenti risulta praticamente invariato rispetto alla fase precedente. Nell'intorno del cunicolo si assiste all'incremento delle zone plastiche, specie in arco rovescio, dove gli spessori raggiungono oi 2m. Nell'intorno del cunicolo la massima tensione principale massima è di 1381 kPa (calotta) mentre la massima tensione principale minima è di 7 kPa (arco rovescio).

FASE TR7/CP5

| | | | | | | |
|---|---------------------------------|-------|----------|------------|------|------------|
|  | ITINERARIO NAPOLI – BARI | | | | | |
| | RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA | | | | | |
| I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA | | | | | | |
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 145 di 199 |

Viene simulata la posa dei rivestimenti per la galleria principale e per il cunicolo pedonale. Il campo di spostamenti risulta praticamente invariato rispetto alla fase precedente. Nell'intorno del cunicolo si assiste alla riduzione delle zone plastiche, specie in arco rovescio dove non risultano più presenti. Nell'intorno del cunicolo la massima tensione principale massima è di 1390 kPa (calotta) mentre la massima tensione principale minima è di 17 kPa (arco rovescio).

FASE TR8/CP6

Viene simulata la condizione di lungo termine, con decadimento dei parametri del rivestimento di prima fase e innalzamento del livello di falda. Il cedimento cumulato in calotta è pari a 0.3 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 0.5 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 1.0 cm. Nell'intorno del cunicolo le zone plastiche mostrano estensioni variabili da 2m in calotta e 3m in a.r., con minimo sui piedritti. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 1292 kPa (arco rovescio) mentre la massima tensione principale minima è di 600 kPa (calotta).

9.7.4 Verifiche strutturali del rivestimento di prima fase

Le verifiche strutturali sul rivestimento di prima fase del cunicolo pedonale sono state eseguite per le fasi di calcolo CP e CP5. Le caratteristiche del rivestimento provvisorio sono riportate nella seguente tabella.

| Caratteristiche | Spritz beton/Centine |
|--|----------------------|
| Spessore dello spritz beton[m] | 0.15 |
| Area resistente dello spritz beton A_{sb} [m ²] | 0.15 |
| Tipologia profilati | 2 IPN140 |
| Interasse longitudinale profilato [m] | 1.2 |
| Area resistente della centina A_{cent} [cm ²] | 18.3 x 2 |
| Modulo resistente elastico della centina W_{cent} [cm ³] | 82 x 2 |
| Area resistente a taglio della centina $A_{V,cent}$ [cm ²] | 7.4 x 2 |

Tabella 51 - Analisi di interazione – Galleria Pedonale. Sezione tipo A2: definizione delle caratteristiche del rivestimento provvisorio

La tabella seguente sintetizza le sollecitazioni ottenute, per ogni fase, nelle zone di maggiore interesse del rivestimento: zona di calotta, di contatto calotta-piedritti e dei piedritti, rilevate in corrispondenza dei nodi indicati nella figura a seguire.

| | Sollecitazioni | Calotta | zona di contatto calotta-piedritto | | piedritto | |
|-----------------|----------------|---------|------------------------------------|--------|-----------|--------|
| | | | Sinistro | Destro | Sinistro | Destro |
| Fase CP4 | N [kN/m] | -575 | -591 | -660 | -641 | -575 |
| | M [kNm/m] | -2 | -6 | 12 | -9 | -2 |
| | T [kN/m] | -15 | -11 | 9 | -10 | -15 |
| Fase CP5 | N [kN/m] | -576 | -592 | -663 | -643 | -576 |
| | M [kNm/m] | -2 | -6 | 12 | -9 | -2 |
| | T [kN/m] | -15 | -11 | 9 | -10 | -15 |

Tabella 52 - Analisi di interazione – Sezione tipo A2: Sollecitazioni nelle zona di maggior interesse del rivestimento di prima fase

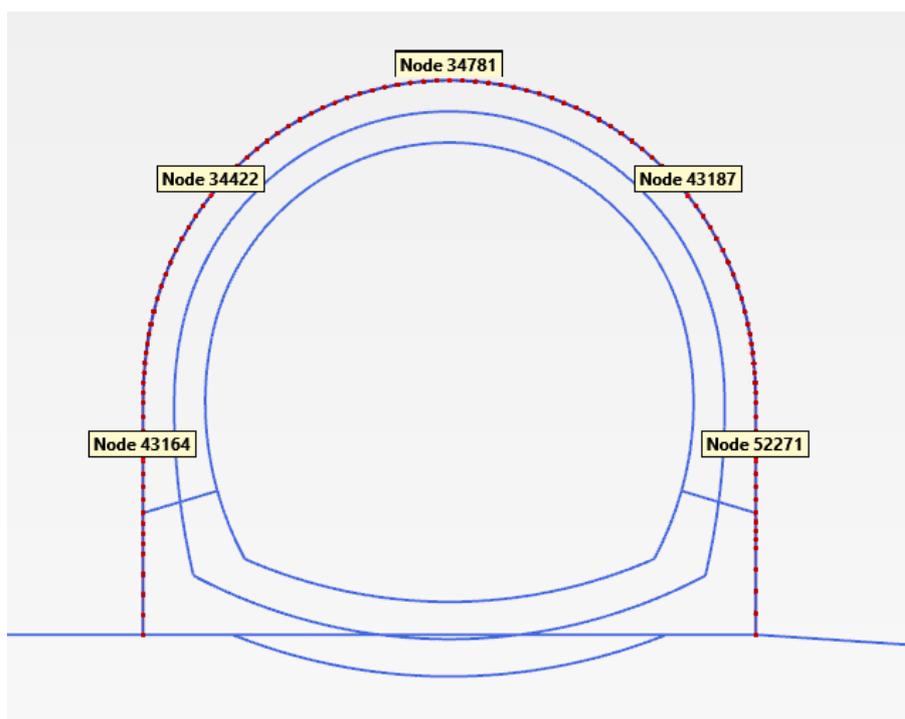


Figura 105 - Nodi rilevati del rivestimento di prima fase

In allegato si riportano, per ogni nodo del rivestimento, le sollecitazioni scaturite dall'analisi e le conseguenti verifiche: le verifiche strutturali del rivestimento di prima fase sono soddisfatte, per ciascuna fase, in tutti i punti.

| | | | | | | |
|--|---------------------------------|-------|----------|------------|------|------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | ITINERARIO NAPOLI – BARI | | | | | |
| | RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA | | | | | |
| I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA | | | | | | |
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 147 di 199 |

9.7.5 Verifiche strutturali SLU del rivestimento definitivo

Nella tabella seguente si riportano le caratteristiche simulate dei rivestimenti di prima fase e definitivi.

| Tipo di prerivestimento | Spritz beton/Rivestimento definitivo |
|--|--------------------------------------|
| Spessore dello spritz [m] | 0.15 |
| Spessore simulato del rivestimento definitivo di arco rovescio [m] | 0.60 |
| Spessore simulato del rivestimento definitivo di calotta [m] | 0.50 |

Tabella 53 - Analisi di interazione – Galleria di linea. Sezione tipo A2: 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.

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).

Il rivestimento definitivo è previsto armato sia in calotta che in arco rovescio. L'incidenza delle armature in calotta e in arco rovescio è di 50kg di acciaio per m³.

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

| | Sollecitazioni | Calotta | zona di contatto calotta-piedritto | | piedritto | |
|-----------------|----------------|---------|------------------------------------|--------|-----------|--------|
| | | | sinistro | destro | sinistro | destro |
| Fase CP4 | N [kN/m] | -5 | -9 | -3 | -6 | -7 |
| | M [kNm/m] | 0 | -1 | 0 | 1 | 0 |
| | T [kN/m] | 0 | 0 | 0 | -1 | 1 |
| Fase CP5 | N [kN/m] | -1777 | -1558 | -1638 | -1304 | -1295 |
| | M [kNm/m] | -89 | 20 | 5 | 25 | 31 |
| | T [kN/m] | 20 | 84 | -92 | -90 | 86 |

Tabella 54 - Analisi di interazione – Sezione tipo A2: Sollecitazioni nelle zone calotta-piedritto del rivestimento definitivo

| | Sollecitazioni | arco rovescio | zona di contatto piedritto-arco | |
|-----------------|----------------|---------------|---------------------------------|--------|
| | | | sinistro | destro |
| Fase CP4 | N [kN/m] | -3 | -6 | -9 |
| | M [kNm/m] | 1 | 0 | -1 |
| | T [kN/m] | 0 | 2 | -2 |
| Fase CP5 | N [kN/m] | -1572 | -1732 | -1630 |
| | M [kNm/m] | 174 | -124 | -129 |
| | T [kN/m] | 25 | 324 | -313 |

Tabella 55 - Analisi di interazione – Sezione tipo A2: Sollecitazioni nelle zone arco rovescio-piedritto del rivestimento definitivo

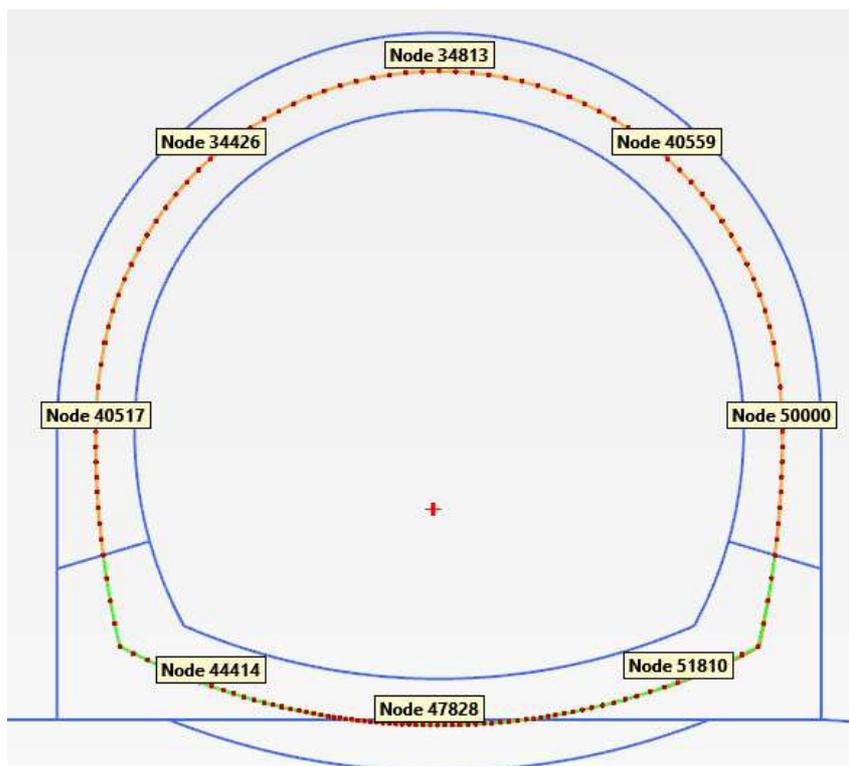


Figura 106 - Nodi rilevati del rivestimento definitivo

In **calotta e piedritti** si dispongono 1+1 $\phi 20/20$ con un copriferro netto di 4 cm. L'armatura longitudinale di ripartizione è costituita da barre $\phi 12/30$. L'armatura a taglio è del tipo $\phi 12/40\text{cm}/30\text{cm}$.

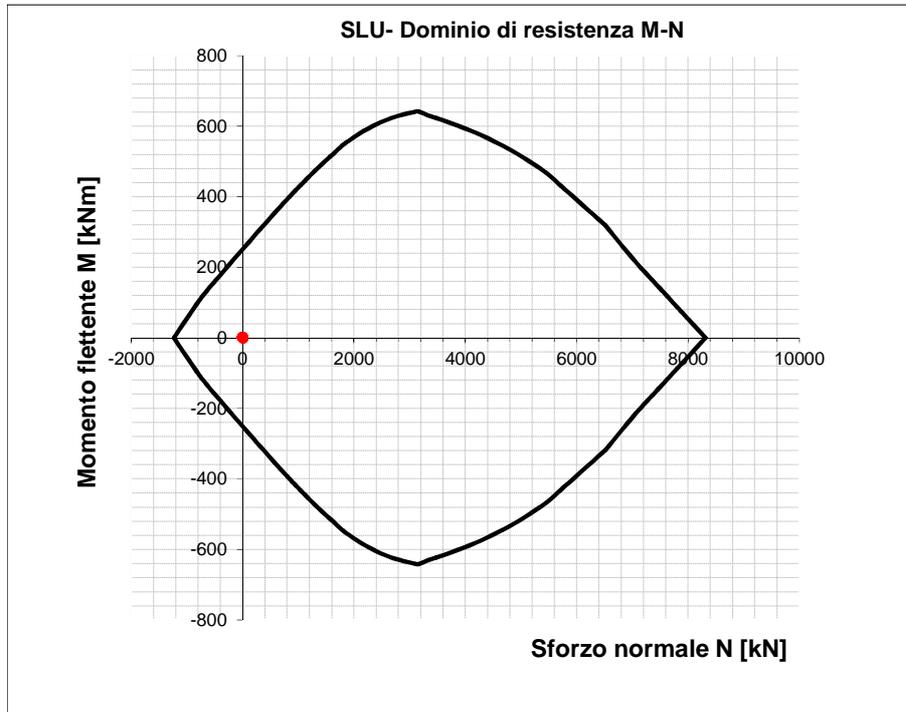


Figura 107 - Dominio resistente SLU calotta (B=1.00 m, H=0.50m) – Fase CP5

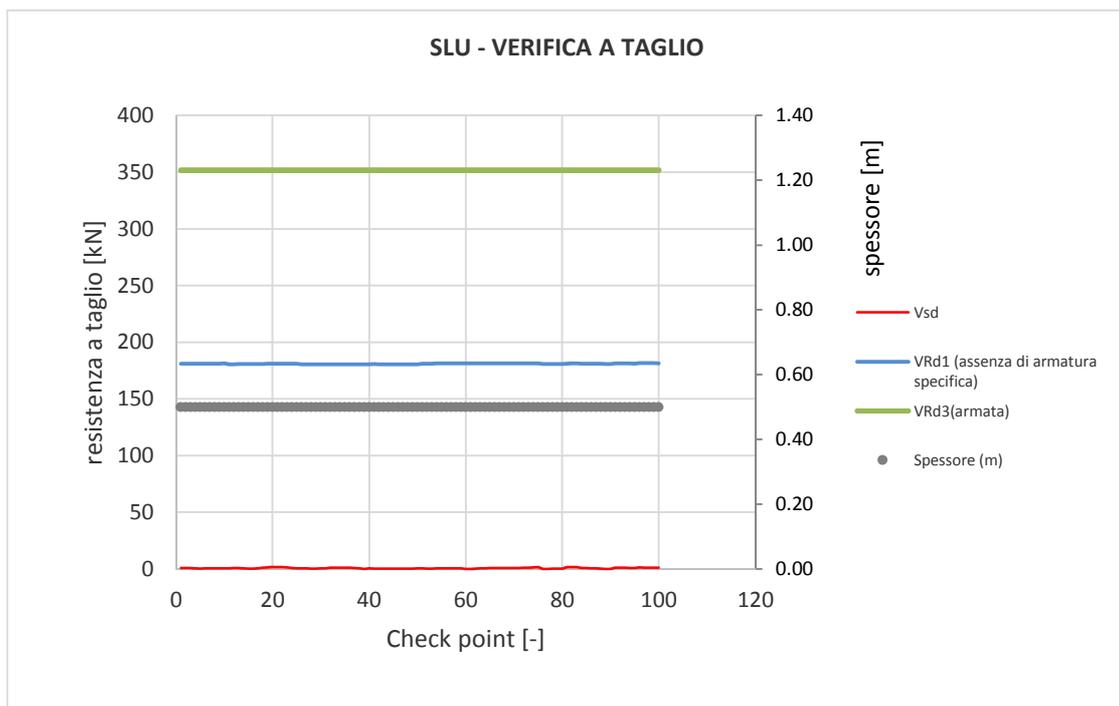


Figura 108 - Verifica SLU taglio calotta – Fase CP5

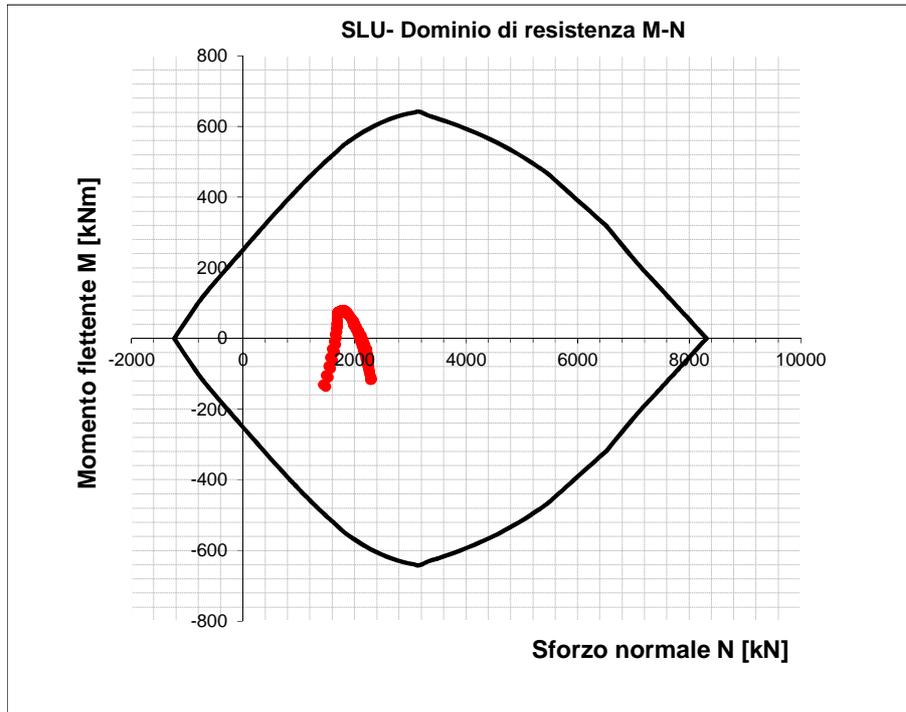


Figura 109 - Dominio resistente SLU calotta (B=1.00 m, H=0.50m) – Fase CP6

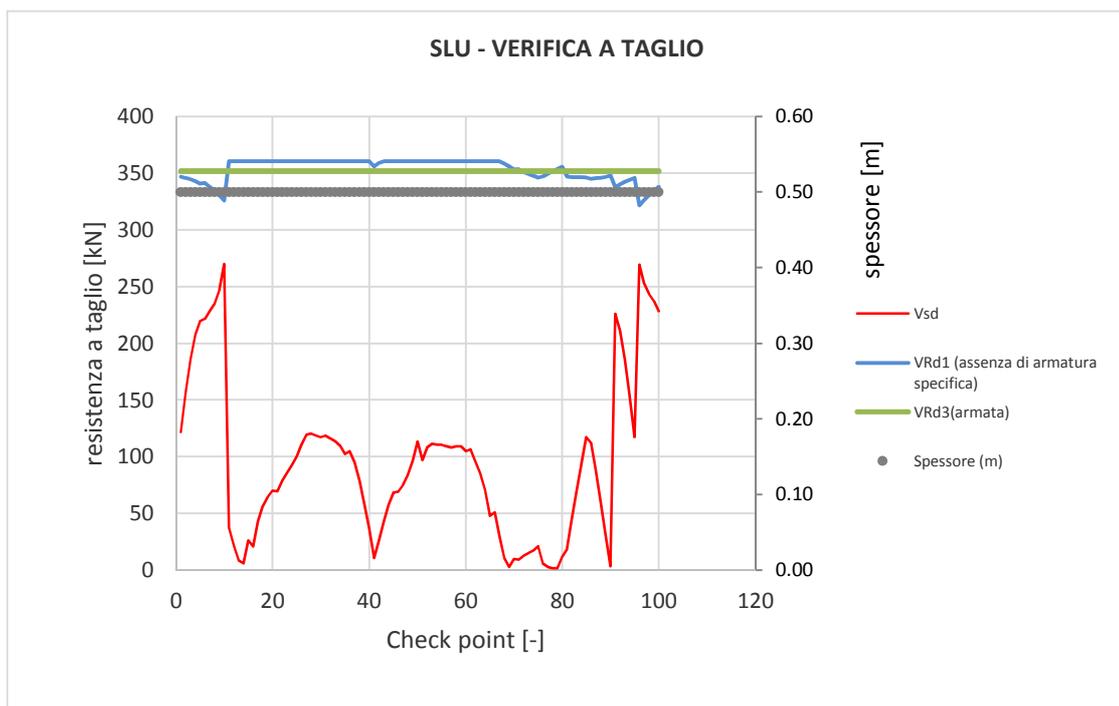


Figura 110 - Verifica SLU taglio calotta – Fase CP6

In **arco rovescio** si dispongono 1+1 $\phi 20/20$ con un copriferro netto di 4 cm. L'armatura longitudinale di ripartizione è costituita da barre $\phi 12/30$. L'armatura a taglio prevista consiste in $\phi 12/40\text{cm}/30\text{cm}$.

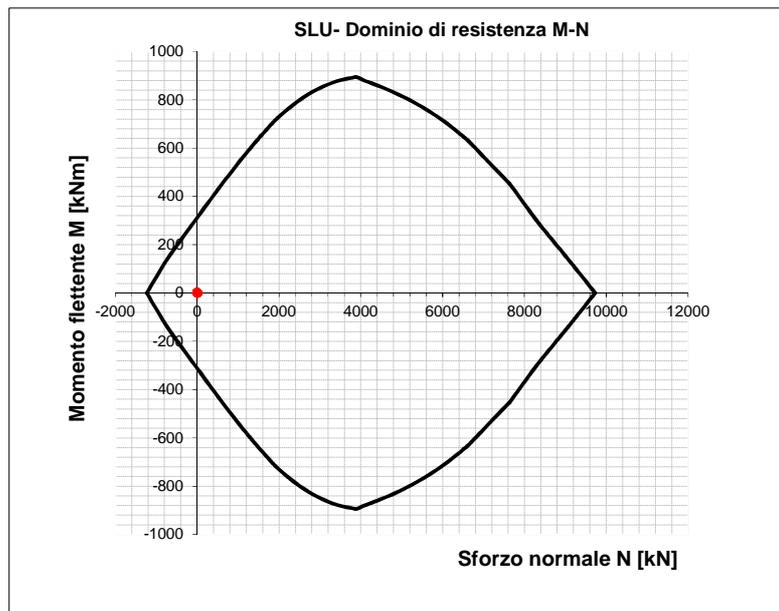


Figura 111 - Dominio resistente SLU arco rovescio (B=1.00 m, H=0.60 m) – Fase CP5

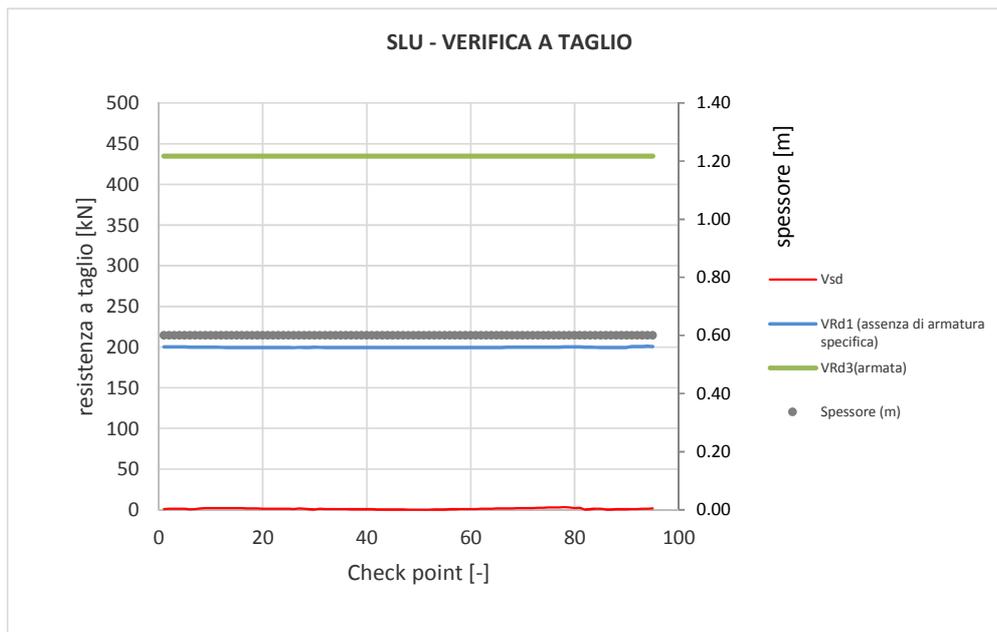


Figura 112 - Verifica SLU taglio arco rovescio – Fase CP5

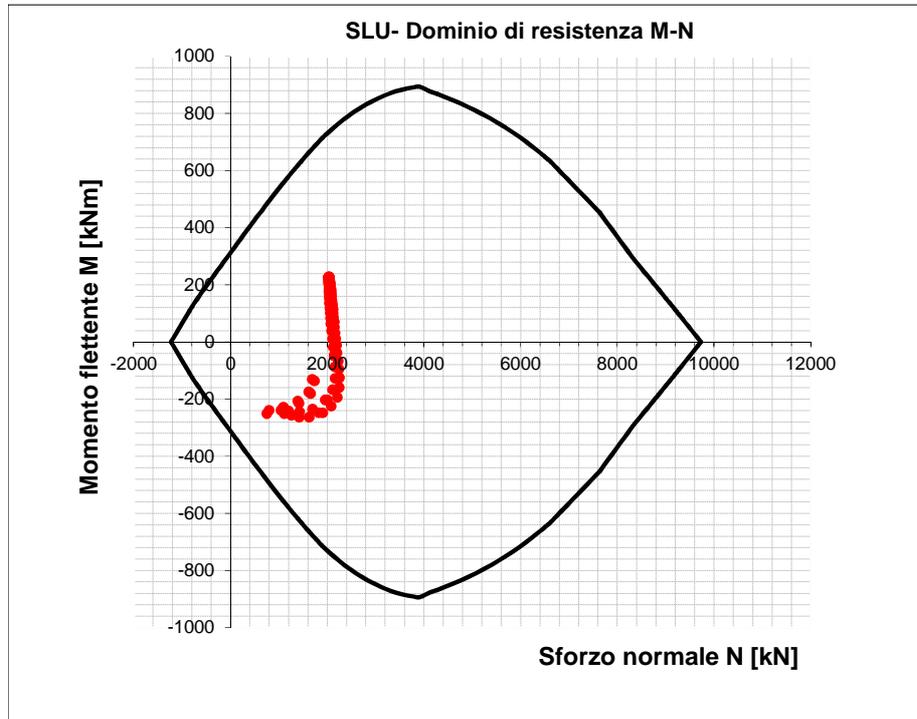


Figura 113 - Dominio resistente SLU arco rovescio (B=1.00 m, H=0.60 m) – Fase CP6

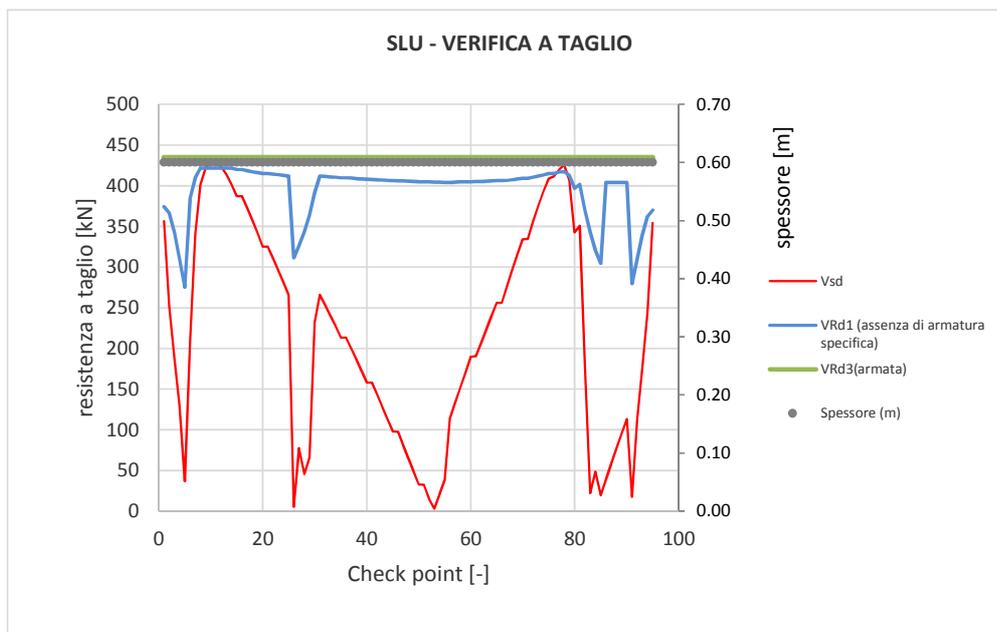


Figura 114 - Verifica SLU taglio arco rovescio – Fase CP6

9.7.6 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.

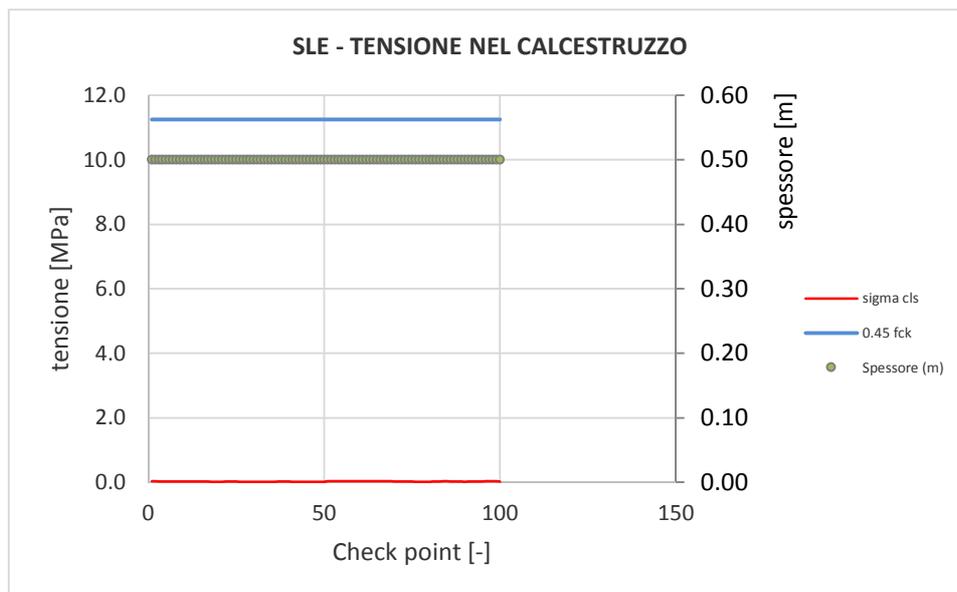


Figura 115 - Verifiche SLE tensione cls calotta – Fase CP5

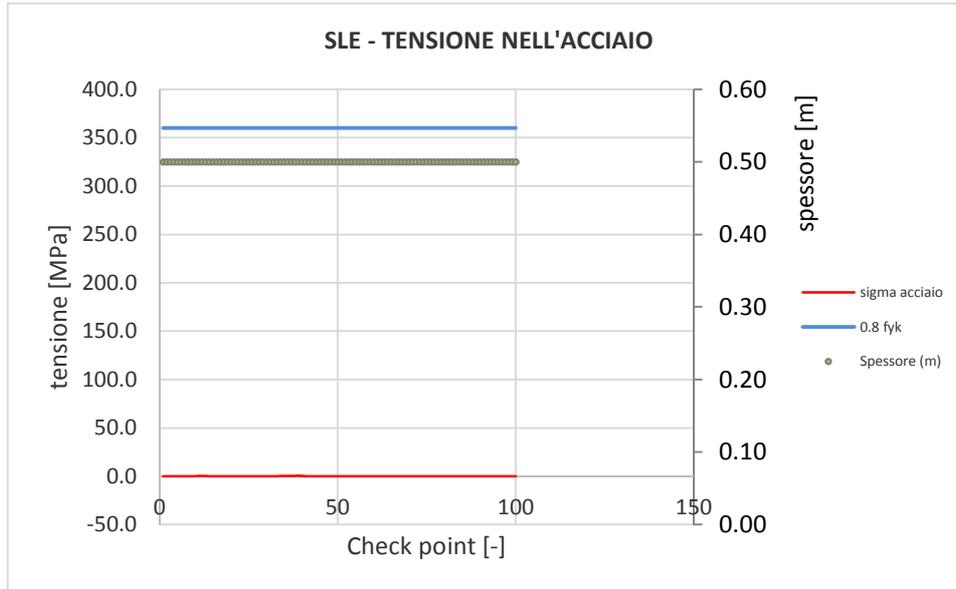


Figura 116 - Verifiche SLE tensione acciaio calotta – Fase CP5

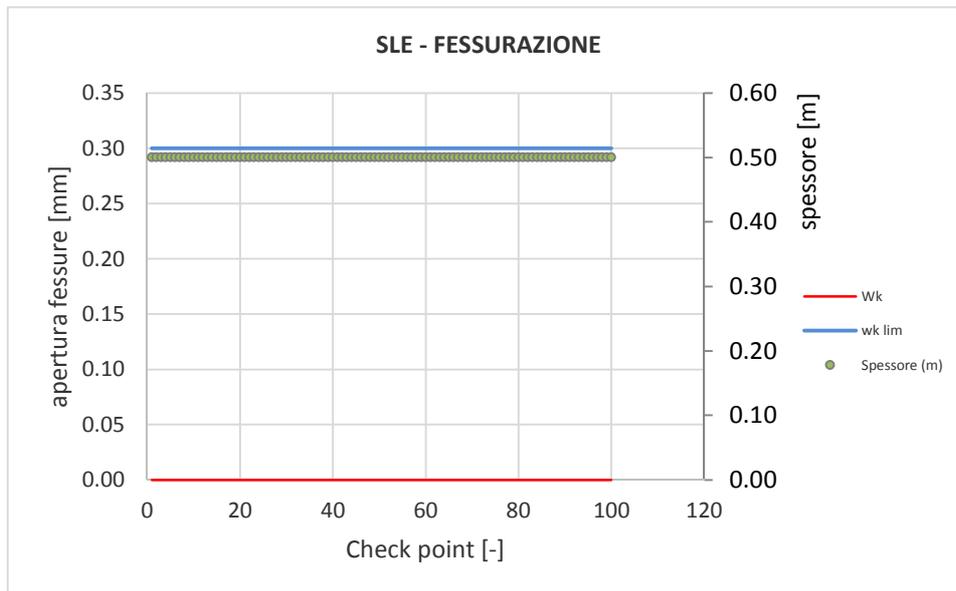


Figura 117 - Verifiche SLE fessurazione calotta – Fase CP5

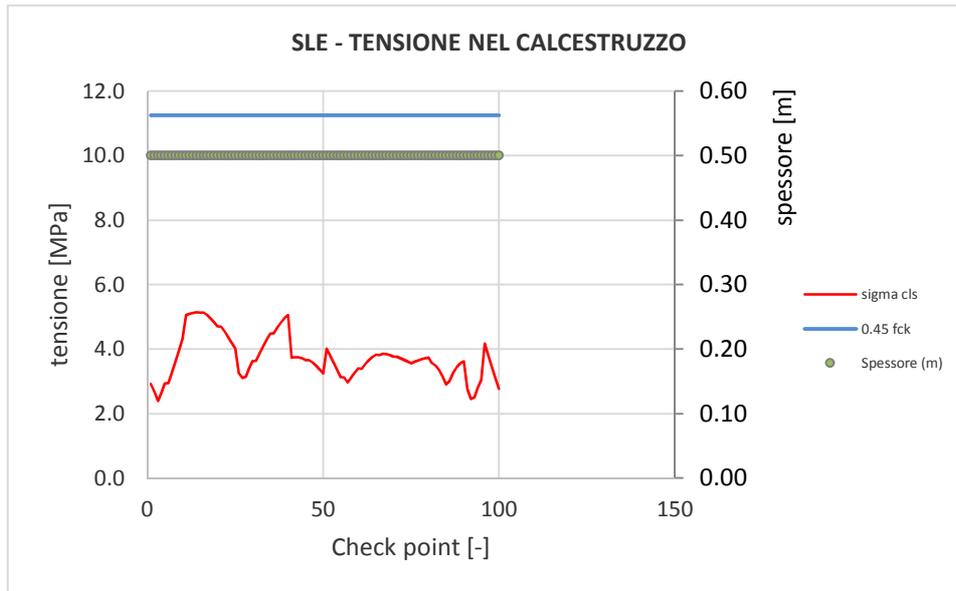


Figura 118 - Verifiche SLE tensione cls calotta – Fase CP6

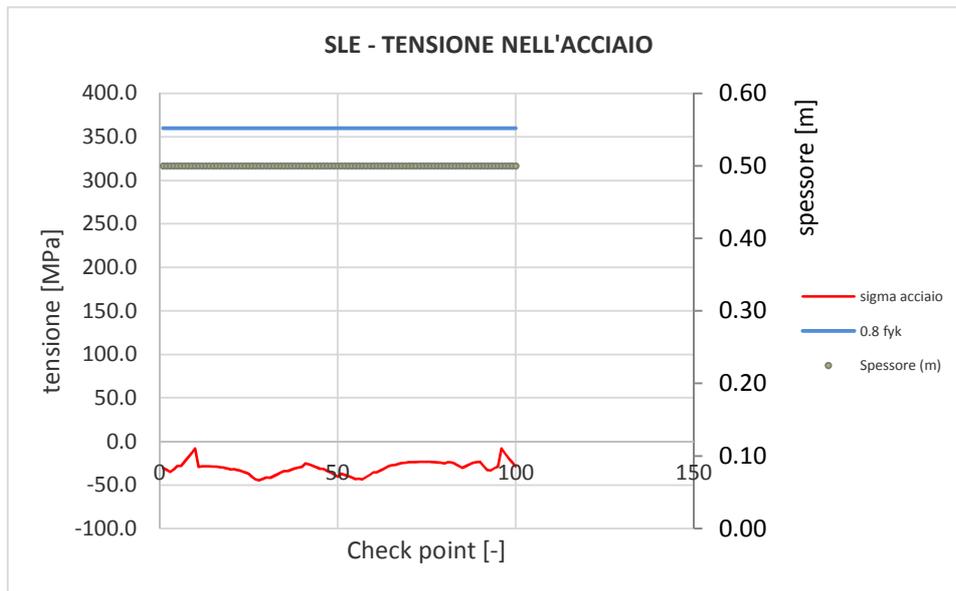


Figura 119 - Verifiche SLE tensione acciaio calotta – Fase CP6

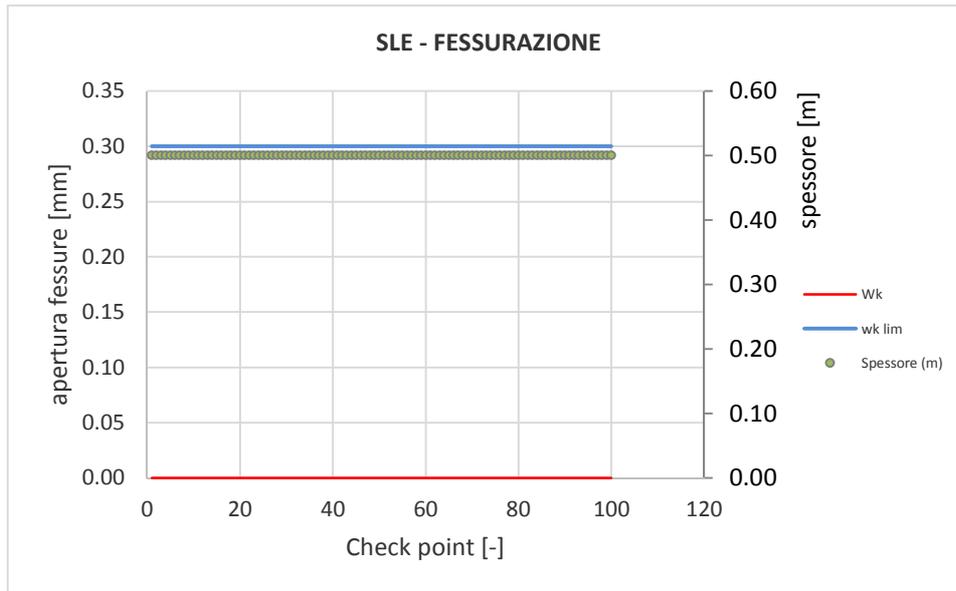


Figura 120 - Verifiche SLE fessurazione calotta – Fase CP6

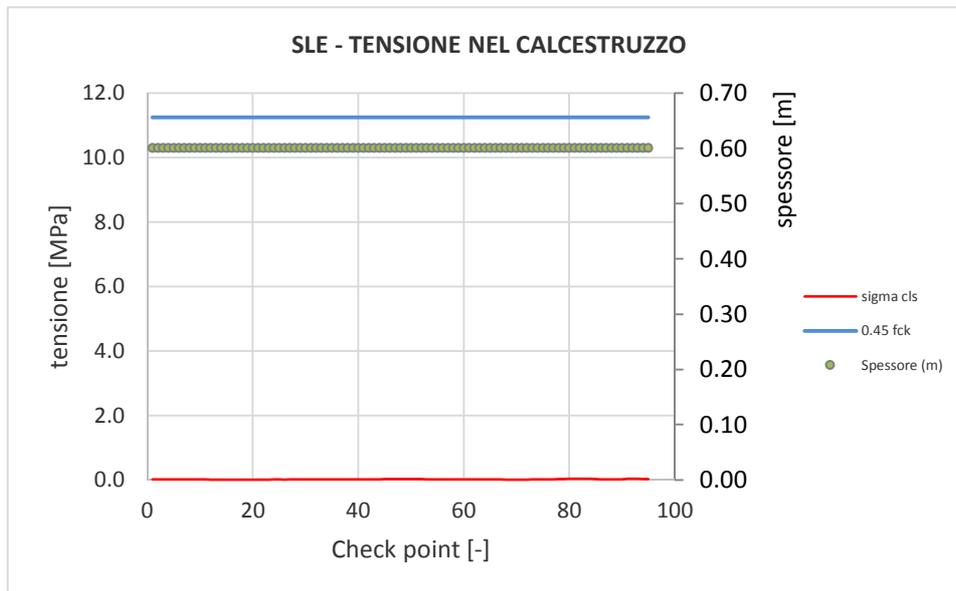


Figura 121 - Verifiche SLE tensione cls arco rovescio – Fase CP5

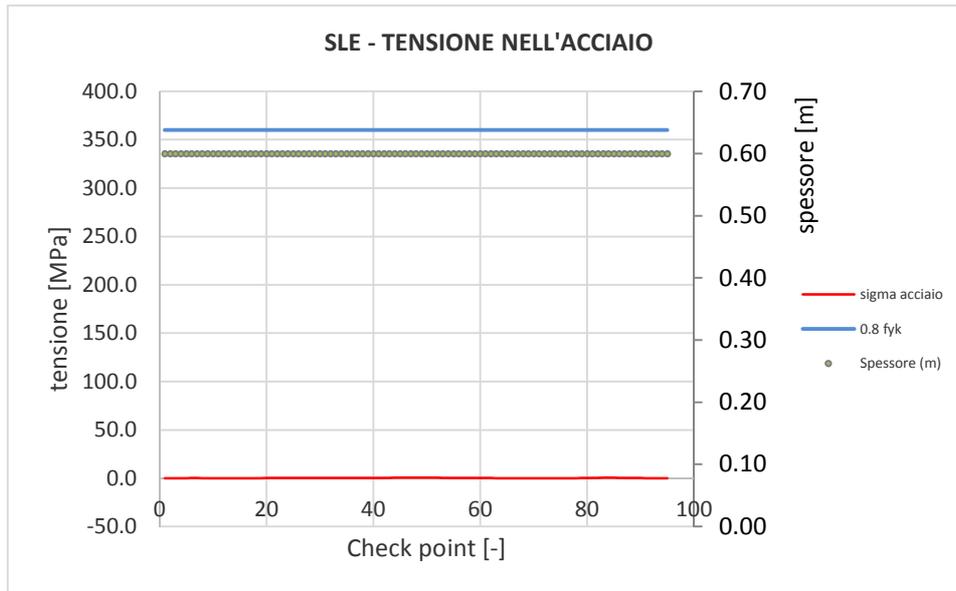


Figura 122 - Verifiche SLE tensione acciaio arco rovescio – Fase CP5

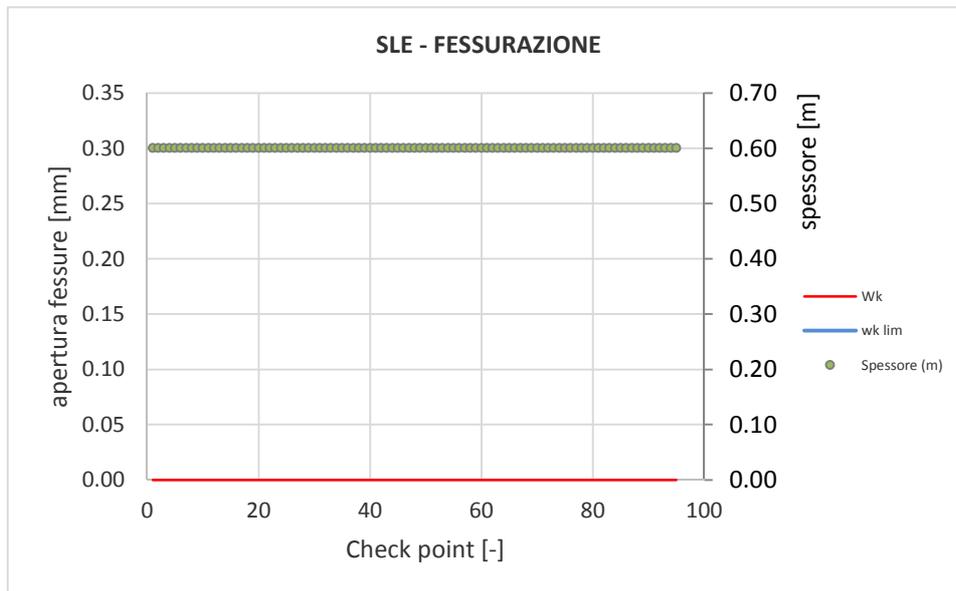


Figura 123 - Verifiche SLE fessurazione arco rovescio – Fase CP5

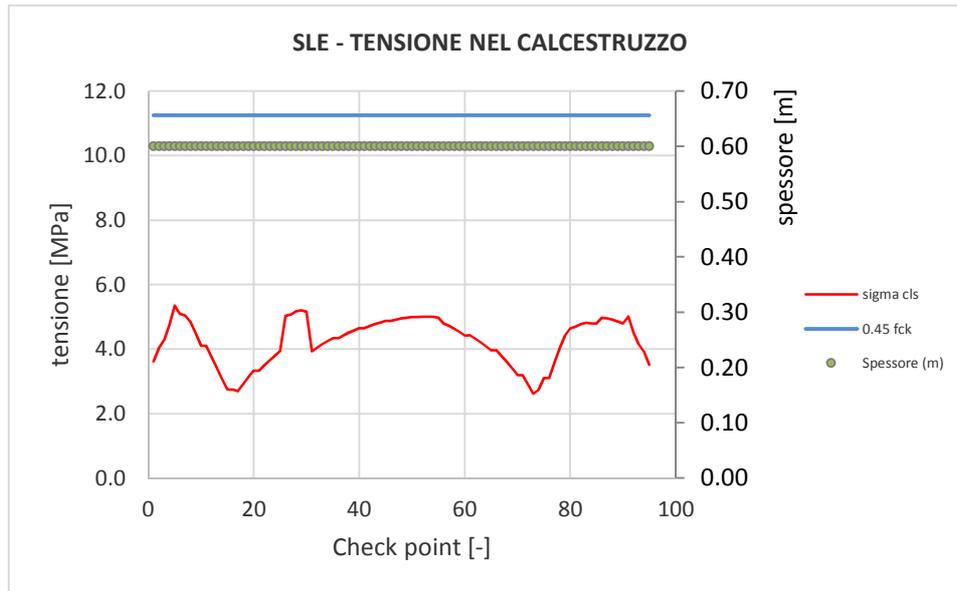


Figura 124 - Verifiche SLE tensione cls arco rovescio – Fase CP6

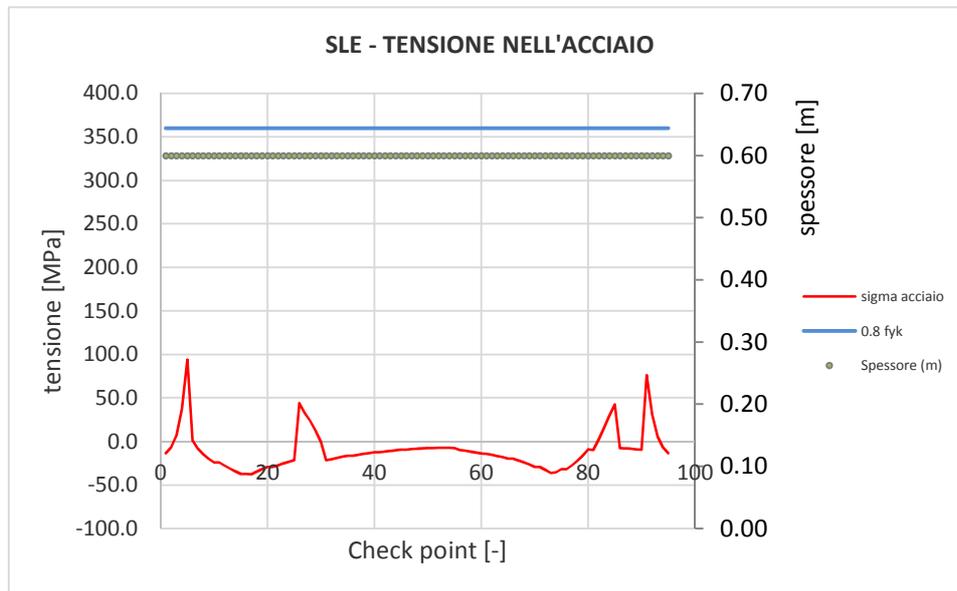


Figura 125 - Verifiche SLE tensione acciaio arco rovescio – Fase CP6

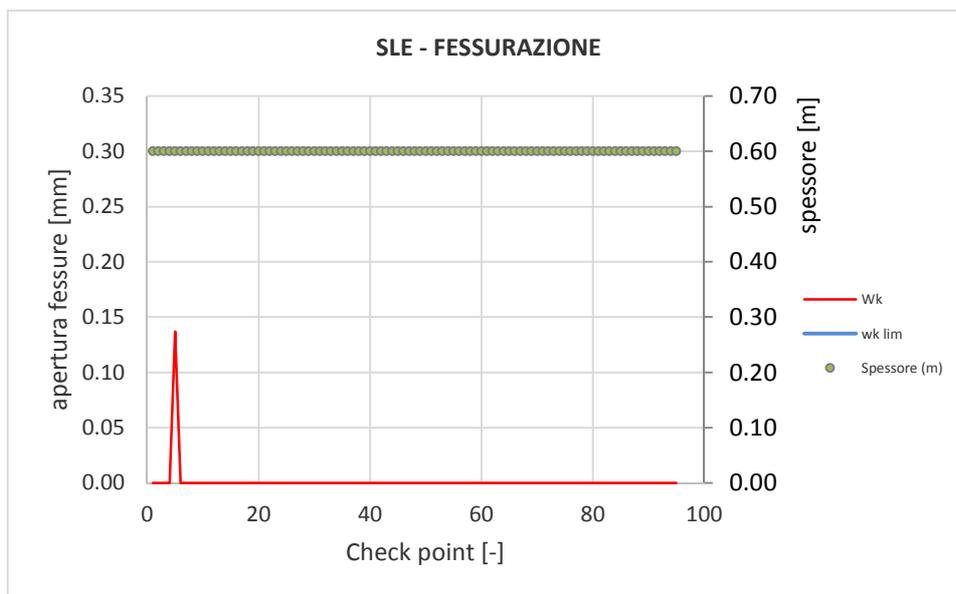


Figura 126 - Verifiche SLE fessurazione arco rovescio – Fase CP6

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

9.8 SEZIONE TIPO C1 carrabile (Uscita F6 p.k. 1+120)

Le analisi e le verifiche riportate di seguito sono relative al tratto a basse coperture prossimo all'imbocco dell'uscita carrabile F3 in cui la galleria attraversa la formazione BNA3 e la sezione C1 è prevista applicata come sezione prevalente.

Le verifiche sono da intendersi rappresentative anche per il tratto prossimo all'imbocco dell'uscita carrabile dell'uscita F6 in cui la galleria attraversa la formazione BNA1b e per le tratte d'imbocco delle finestre pedonali sia in BNA3 che in BNA1b in cui la sezione C1 pedonale è prevista applicata come sezione prevalente.

9.8.1 Stabilità del fronte e del cavo

Nel seguente tabella si riassumono i dati di input e i risultati dell'analisi di stabilità del fronte della sezione tipo C1 carrabile condotta con il metodo di Tamez.

I parametri geotecnici utilizzati nelle analisi (valori di progetto) così come i valori dell'incremento di coesione equivalente al fronte e al contorno, indotto dagli interventi di consolidamento, sono stati definiti coerentemente con quanto indicato nei criteri di verifica.

La resistenza a compressione monoassiale del materiale trattato è stata assunta pari a 5 MPa. A tale valore è stato applicato un fattore di sicurezza di 2,5 da cui un valore di calcolo pari a 2 MPa.

L'analisi evidenzia che, anche con l'applicazione dei coefficienti parziali corrispondenti alla combinazione A2+M2+R2 e quindi con i valori di progetto, il minore dei coefficienti di sicurezza FSF e FSF₃ risulta maggiore di 1. Si ritiene pertanto che il nucleo-fronte sia stabile e quindi la verifica di stabilità del fronte è soddisfatta.

| Metodo di Tamez | |
|---|--|
| DATI GEOMETRICI | |
| Z (m) | 10 copertura sulla calotta |
| W (m) | 10 profondità superficie piezometrica da piano campagna; in assenza di fatti indicare W-Z |
| h (m) | 8,58 altezza dello scavo |
| b (m) | 9,3 larghezza dello scavo |
| a (m) | 1,0 lunghezza non sostenuta |
| DATI GEOTECNICI | |
| γ_1 (kN/m ³) | 19 peso medio dell'unità di volume del terreno sopra la calotta (su h_1) |
| γ_2 (kN/m ³) | 19 peso medio dell'unità di volume del terreno da scavare (su h) |
| γ_3 (kN/m ³) | 19 peso medio dell'unità di volume del terreno sopra falda |
| γ_4 (kN/m ³) | 19 peso medio dell'unità di volume del terreno sotto falda |
| C_1 (kPa) | 172 valore medio della coesione al fronte (su h) |
| C_2 (kPa) | 27,8 valore medio della coesione dalla calotta fino a h_1 |
| C_{2m} (kPa) | 28 valore medio della coesione dalla calotta a piano campagna |
| ϕ_m (°) | 50 valore medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio a piano campagna |
| ϕ_1 (°) | 50 valore medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio fino a h_1 |
| DATI PER IL CALCOLO DEL VOLUME DI TERRENO POTENZIALMENTE INSTABILE | |
| ϕ_m (°) | 43,63 valore medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio a piano campagna |
| C_{2m} (kPa) | 22,24 valore medio della coesione dalla calotta a piano campagna |
| σ_c (kPa) | 103,9 $\sigma_c = 2c\sqrt{Kp}$ |
| f | 1,168 $f = \begin{cases} \operatorname{tg} \phi_m & \text{se } c' = 0 \\ \operatorname{tg} \phi_m + \frac{c'}{\sigma_c} & \text{se } c' \neq 0 \end{cases}$ |
| l (m) | 3,674 $l = h \times \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\phi_m}{2} \right)$ |
| B (m) | 16,649 $B = b + 2h \times \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\phi_m}{2} \right)$ |
| h_1 (m) | 10,000 $h_1 = \frac{B}{2f}$ o $h_1 = Z$ se $h_1 > Z$ |
| s (m) | 0,000 $s = Z - W - h$ coefficiente che entra nel calcolo di τ_{m2} e τ_{m3} |
| DATI PER IL CALCOLO DEL COEFFICIENTE DI STABILITÀ | |
| ϕ_1 (°) | 43,63 valore medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio fino a h_1 |
| C_2 (kPa) | 22,24 valore medio della coesione dalla calotta fino a h_1 |
| C_1 (kPa) | 137,60 valore medio della coesione al fronte (su h) |
| γ_w (kN/m ³) | 10 peso dell'unità di volume dell'acqua |
| γ_1 (kN/m ³) | 19,00 peso medio dell'unità di volume del terreno sopra la calotta (su h_1) |
| γ_2 (kN/m ³) | 19,00 peso medio dell'unità di volume del terreno da scavare (su h) |
| γ_3 (kN/m ³) | 19,00 peso medio dell'unità di volume del terreno sopra falda |
| γ_4 (kN/m ³) | 19,00 peso medio dell'unità di volume del terreno sotto falda |
| K_0 (-) | 0,5 coefficiente di spinta a riposo 0,3099571 |
| K_A (-) | 0,3 coefficiente di spinta attiva 0,183 |
| Z/h (-) | 1,2 discriminante galleria superficiale/galleria profonda $Z/h < 3$ |
| U (kPa) | 0 $U = \gamma_w (Z - W)$ |
| $\gamma \cdot Z$ (kPa) | 190 |
| τ_{m2} (kPa) | 236 $\tau_{m2} = \begin{cases} \left[\frac{C_2 + K_0}{2} \left[\frac{3,4C_1}{\sqrt{K_A}} - \frac{(\gamma_2 - \gamma_w) \times (Z - W)}{2} \right] \right] & \text{per gallerie superficiali } (Z/h < 3) \\ \left[\frac{C_2 + K_0}{2} \left[W\gamma_3 + (Z - h - W) \times (\gamma_1 - \gamma_w) + \frac{3,4C_1}{\sqrt{K_A}} - \frac{(\gamma_2 - \gamma_w) \times (Z - W)}{2} \right] \right] & \text{per gallerie profonde } (Z/h \geq 3) \end{cases}$ |
| τ_{m3} (kPa) | 22 $\tau_{m3} = \begin{cases} \frac{C_2}{2} & \text{per gallerie superficiali } (Z/h < 3) \\ \frac{C_2}{2} + \{ 0,25[W\gamma_3 + (Z - h - W) \times (\gamma_1 - \gamma_w)] - U \} \times \operatorname{tg} \phi_m & \text{per gallerie profonde } (Z/h \geq 3) \end{cases}$ |
| A | 331,6 $A = \frac{2(\tau_{m2} - \tau_{m3})}{(1 + a/l)^2} \times \frac{h}{b}$ |
| B | 74,4 $B = \frac{2\tau_{m3}}{(1 + a/l) \times \sqrt{K_A}} \times \frac{h}{b}$ |
| C | 527,8 $C = \frac{3,4C_1}{(1 + a/l)^2 \times \sqrt{K_A}}$ |
| D | 257,2 $D = \left[1 + \frac{2h}{3Z(1 + a/l)^2} \right] \times (\gamma Z - P_c)$ |
| RISULTATI | |
| P_c (kPa) | 0 Galleria superficiale |
| C.S. (-) | 3,63 $C.S. = \frac{(A + B + C)}{D}$ |
| C.S. ₃ (-) | 2,59 $C.S._3 = \frac{2 \cdot \tau_{m3}}{(\gamma Z - P_c)} \times \frac{h}{b} \times \left(1 + \frac{b}{a} \right)$ |

Tabella 56 - Analisi di stabilità del fronte Sez. C1 carrabile : dati di input e risultati dell'analisi

9.8.2 Interazione opera-terreno

Nella tabella seguente si riassumono i dati di input che caratterizzano la sezione geotecnica utilizzata per le analisi numeriche della sezione tipo Uscita Carrabile C1.

La sezione di analisi è relativa ad una condizione di copertura bassa. La presenza della falda è stata simulata nell'analisi alla quota indicata in tabella.

| Stratigrafia di calcolo | | C | Falda | γ | c'_k | ϕ'_k | c_{uk} | E' | E _u | k ₀ |
|-------------------------|--------------------|-----|-------------|----------------------|--------|-----------|----------|-------|----------------|----------------|
| Formazione | Profondità da p.c. | | | | | | | | | |
| [-] | [m] | [m] | [m da p.c.] | [kN/m ³] | [kPa] | [°] | [kPa] | [MPa] | [MPa] | [-] |
| BNA3 | 0 ÷ 18 | 10 | 0 | 19 | 10 | 50 | - | 50 | 57 | 0.53 |
| BNA3 | 18 ÷ 20 | | | 20 | 20 | 100 | - | 100 | 115 | 0.53 |

C = copertura (rispetto alla calotta)

γ = peso per unità di volume

c'_k = coesione drenata

ϕ'_k = angolo di attrito interno

c_{uk} = coesione non drenata

E' = modulo elastico drenato

E_u = modulo elastico non drenato ($E_u = 1.5 \cdot E' / (1 + \nu')$)

ν' = coefficiente di Poisson

K_o = coefficiente di spinta a riposo

Tabella 57 - Analisi di interazione Sez. Uscita Carrabile C1: definizione della stratigrafia di calcolo

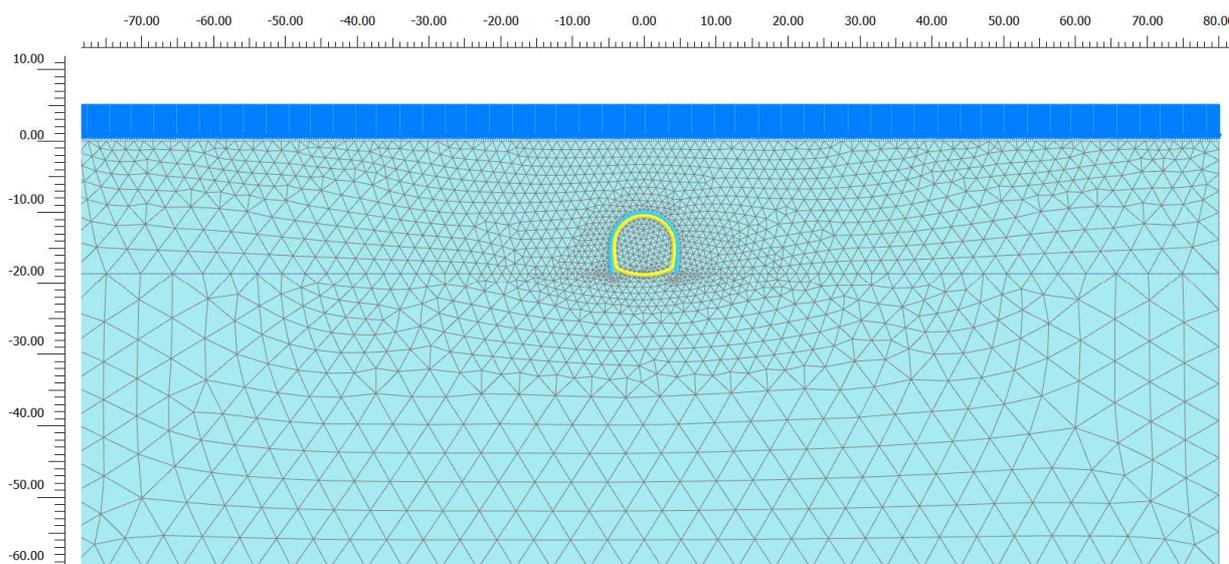


Figura 127 - Modello di calcolo - Geometria mesh

Il consolidamento del fronte tramite VTR, simulato mediante una pressione equivalente σ_3^{VTR} applicata al fronte di scavo, interviene nella modellazione FEM in maniera implicita attraverso l'applicazione delle percentuali di rilascio.

Risultano previsti 30 elementi microjet armati con VTR, con lunghezza minima di sovrapposizione pari a 8m.

| SEZIONE TIPO | Interventi al fronte | | |
|-------------------------------------|--|---------------|-------------------|
| area di scavo | A | 72.8 | [m ²] |
| diametro medio galleria | D | 9.63 | [m] |
| diametro esterno barre VTR | ϕ_{est} | 0.06 | [m] |
| spessore barre VTR | δ | 0.01 | [m] |
| diametro interno barre VTR | ϕ_{int} | 0.04 | [m] |
| diametro di perforazione barre | ϕ_{perf} | 0.3 | [m] |
| area trasversale barre | A_t | 0.00157 | [m ²] |
| lunghezza min. di sovr. barre | L | 7 | [m] |
| superficie laterale barre | S_L | 6.597 | [m ²] |
| numero barre | N_b | 25 | [-] |
| resistenza a rottura barra | σ_b | 450000 | [kPa] |
| resistenza al taglio barra-terreno | τ_a | 100 | [kPa] |
| pressione lim. per rottura barre | $\sigma_{T,1}$ | 243 | [kPa] |
| pressione lim. per sfilamento barre | $\sigma_{T,2}$ | 227 | [kPa] |
| | $\sigma_{T,fronte} = \min(\sigma_{T1}; \sigma_{T2})$ | 227 | [kPa] |
| coesione | C | 10 | [kPa] |
| angolo di attrito | ϕ | 28 | [°] |
| coefficiente di spinta passiva | K_P | 2.77 | [-] |
| incremento di coesione equivalente | ΔC | 189 | [kPa] |
| | $\Delta C + C'$ | 199 | |

Tabella 58 - Determinazione della pressione equivalente per simulare l'intervento di consolidamento al fronte di scavo

Il consolidamento al contorno, applicato su una fascia di circa 0.40m, è caratterizzato dai parametri di seguito riportati, calcolati tenendo conto dell'incremento della coesione e rigidità determinato dalle colonne di jet grouting al contorno dello scavo.

| σ_c | γ | c_k | E |
|------------|----------------------|-------|-------|
| [MPa] | [kN/m ³] | [kPa] | [MPa] |
| 2.0 | 20 | 600 | 2000 |

Tabella 59 - Parametri per la modellazione del consolidamento al contorno

Con riferimento all'asse della galleria, la griglia di calcolo presenta un'estensione laterale di 80 m (per una larghezza totale di 160 m) e un'altezza complessiva di 60 m. Il numero complessivo degli elementi è pari a circa 3920 mentre i nodi sono circa 31733.

9.8.3 Fasi e percentuali di rilascio

I tassi di deconfinamento sono stati calcolati mediante analisi assialsimmetrica e curva caratteristica numerica (come indicato nella figura soprastante con riferimento alla fase di scavo al fronte). Nell'analisi assialsimmetrica è stato inserito il consolidamento del fronte tramite VTR simulato mediante la pressione equivalente σ_3^{VTR} applicata al fronte di scavo.

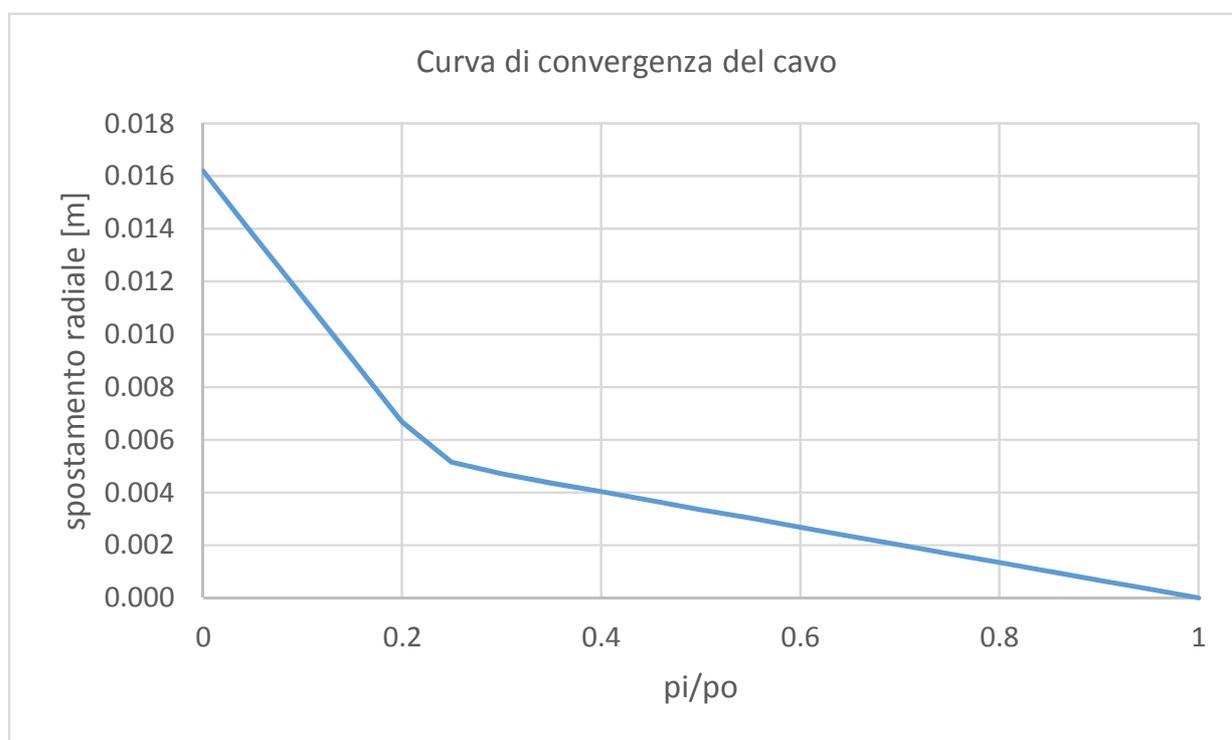


Figura 128 - Sez. Uscita Carrabile C1- Curva caratteristica di convergenza numerica

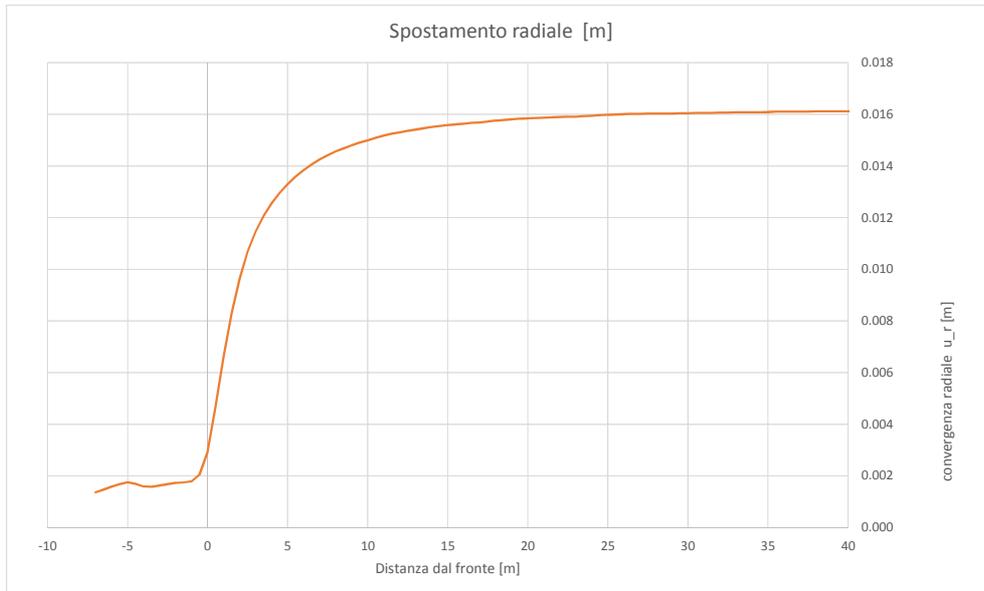


Figura 129 - Sez. Uscita Carrabile C1– Spostamenti radiali modello assialsimmetrico in funzione della distanza dal fronte

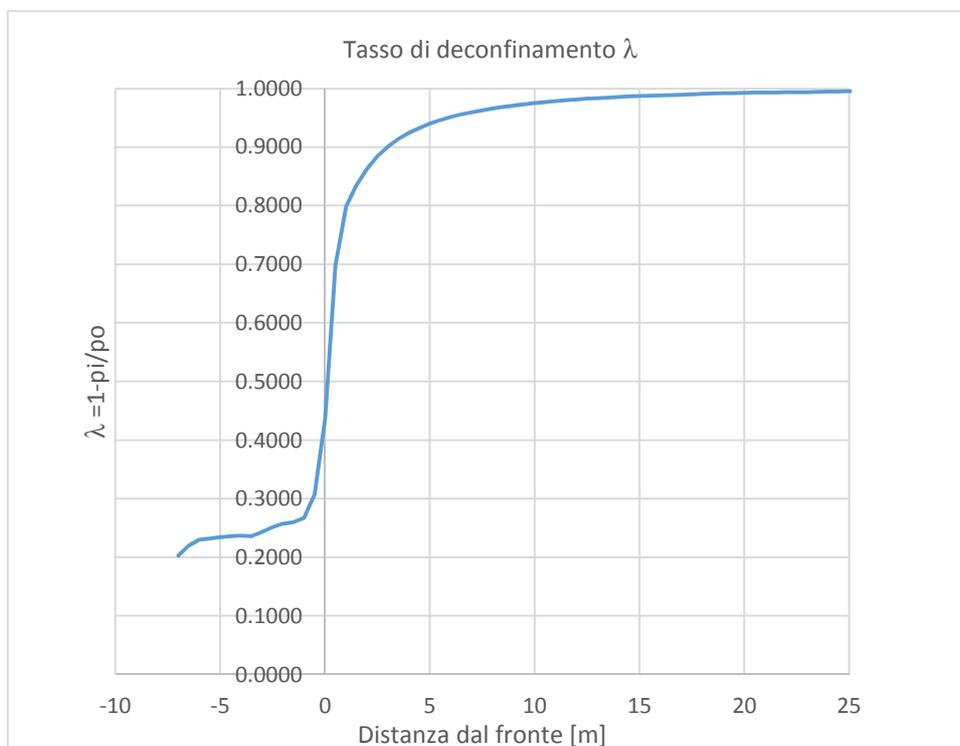


Figura 130 - Sez. Uscita Carrabile C1– Calcolo percentuale di rilascio λ_F - al fronte

| | | | | | | |
|--|---------------------------------|-------|----------|------------|------|------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | ITINERARIO NAPOLI – BARI | | | | | |
| | RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA | | | | | |
| I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA | | | | | | |
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 166 di 199 |

Nella tabella successiva è schematizzata la successione delle fasi di calcolo nelle quali è articolata l'analisi di interazione opera-terreno. Le fasi di scavo sono state modellate in condizioni drenaggio durante lo scavo.

Al termine del processo di scavo è stata simulata la fase di lungo termine in cui è stata innalzata la falda al completo contorno dello scavo, a simulare una condizione particolarmente gravosa con mancato funzionamento dei dreni, e la falda è stata posta alla quota indicata nella Tabella 12.

| Fase | Descrizione | Rilascio forze scavo (λ) |
|------|---|------------------------------------|
| 0-1 | Inizializzazione stato tensionale geostatico | 0.00 |
| 2 | Posizione limite della zona di consolidamento al contorno del cavo | 0.25 |
| 3 | Attivazione consolidamenti al contorno e rilascio a cavo libero in corrispondenza del fronte e abbassamento del livello di falda | 0.44 |
| 4 | Esecuzione dello sfondo elementare di 1 m | 0.79 |
| 5 | Installazione del rivestimento di prima fase e scarico a 6 m dal fronte | 0.94 |
| 6 | Installazione dell'arco rovescio e scarico a 24 m dal fronte | 0.9950 |
| 7 | Installazione del rivestimento definitivo di calotta (scarico completo) | 1.00 |
| 8 | Condizione di lungo termine (decadimento del rivestimento di prima fase/innalzamento falda con decadimento dei consolidamenti al contorno), attivazione sovraccarico in superficie | 1.00 |
| 9 | Condizione di lungo termine (decadimento del rivestimento di prima fase/innalzamento falda con decadimento dei consolidamenti al contorno) a partire dalla fase 1, attivazione sovraccarico in superficie | 1.00 |

Tabella 60 - Analisi di interazione – Sezione Uscita Carrabile C1: fasi di calcolo

9.8.4 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 Tabella 60.

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 Tabella 17 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 9 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 | calotta | | | piedritti | | | | | | arco rovescio | | | Fascia plasticizzata | |
|------|---------|------------------|------------------|-----------|------------------|------------------|---------|------------------|------------------|---------------|------------------|------------------|----------------------|---|
| | u [cm] | σ_1 [kPa] | σ_3 [kPa] | u [cm] | σ_1 [kPa] | σ_3 [kPa] | u [cm] | σ_1 [kPa] | σ_3 [kPa] | u [cm] | σ_1 [kPa] | σ_3 [kPa] | | |
| 2 | 0.42 | -160 | -137 | 0.16 | -310 | -207 | 0.16 | -310 | -207 | - | 0.38 | -86 | -67 | Punti isolati alla base dei piedritti |
| 3 | 1.11 | -92 | -56 | 0.82 | -179 | -59 | 0.82 | -179 | -59 | - | 0.21 | -86 | -63 | Fascia plasticizzata alla base dei piedritti spessore 0.5m |
| 4 | 2.95 | -144 | -86 | 3.00 | -174 | -51 | 3.00 | -174 | -51 | - | 0.12 | -86 | 2.95 | Fascia plasticizzata ai ai piedritti e al di sotto della zona di muretta |
| 5 | 6.33 | -148 | -88 | 7.14 | -125 | -33 | 7.14 | -125 | -33 | - | 0.54 | -86 | -51 | Fascia plasticizzata ai ai piedritti e al di sotto della zona di arco rovescio |
| 6 | 6.65 | -158 | -93 | 7.44 | -134 | -39 | 7.44 | -134 | -39 | - | 0.23 | -86 | -49 | Punti isolati ai piedritti ed alla base dei piedritti |
| 7 | 4.89 | -156 | -92 | 5.88 | -144 | -40 | 5.88 | -144 | -40 | - | 1.40 | -86 | -49 | Fascia plasticizzata ai ai piedritti e al di sotto della zona di muretta |
| 8 | 0.16 | -200 | -123 | 0.12 | -208 | -174 | 0.12 | -208 | -174 | - | 0.08 | -109 | -77 | Fascia plasticizzata ai ai piedritti e al di sotto della zona di muretta, con tendenza alla verticalizzazione verso la superficie |
| 9 | 0.16 | -212 | -153 | 0.12 | -300 | -230 | 0.12 | -300 | -230 | - | 0.08 | -109 | -77 | No zona plastiche al contorno della galleria |

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

σ_1 = sforzo principale totale massimo

σ_3 = sforzo principale totale minimo

Tabella 61 - Analisi di interazione – Sezione tipo Uscita Carrabile C1: risultati dell’analisi

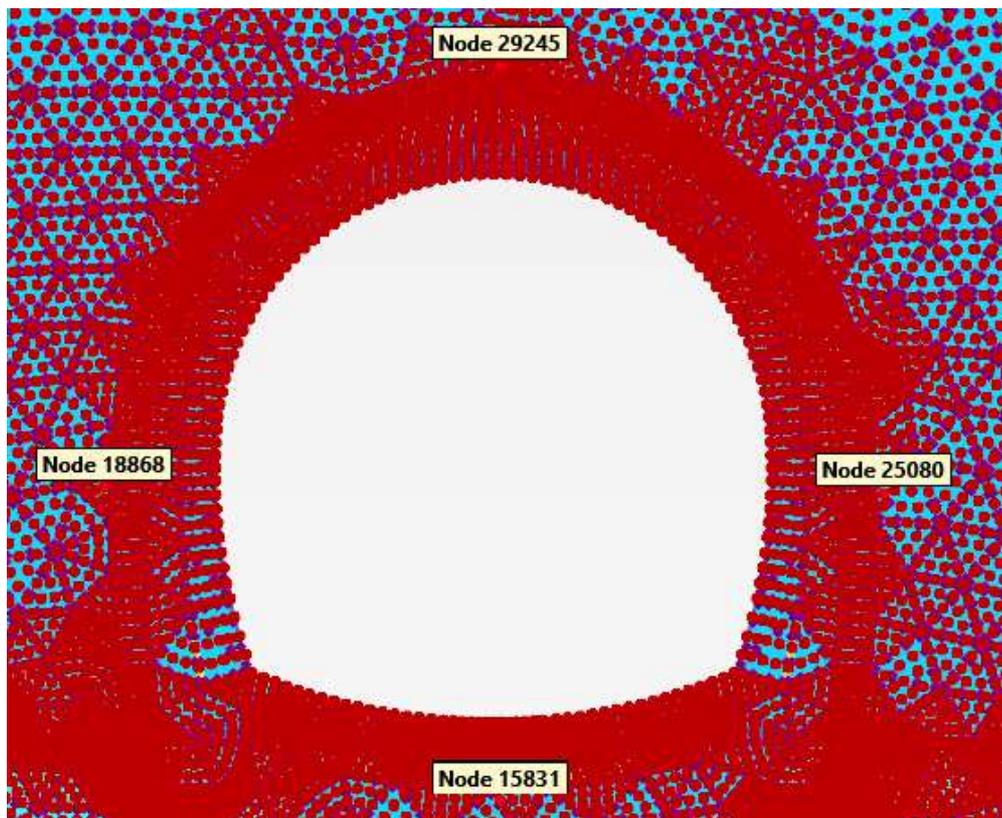


Figura 131 - Nodi rilevati nella zona del cavo

FASE 2

Viene simulato il rilascio a cavo libero in corrispondenza del momento precedente all’attivazione del consolidamento al contorno dello scavo. Il campo di spostamenti mostra spostamenti pari a circa .4cm in calotta e a.r. e 0.2 cm ai piedritti. Le zone plastiche rappresentate da punti isolati alla base dei piedritti. Nell’intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 207 kPa (piedritti) mentre la massima tensione principale minima è di 37 kPa (arco rovescio).

FASE 3

Viene simulata l’esecuzione dello scavi sino alla posizione del fronte. Il cedimento cumulato in calotta è pari a 1.1 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 0.8 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 0.3 cm. Le zone plastiche sono presenti alla base dei piedritti (spessore circa 0.5m). Nell’intorno del cavo la massima tensione principale massima all’esterno della zona consolidata è di 179 kPa (piedritti) mentre la massima tensione principale minima è di 56 kPa (calotta).

FASE 4

Viene simulata l'esecuzione dello sfondo elementare di 1.0 m. Il cedimento cumulato in calotta è pari a 3.0 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 3.0 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 0.9 cm. Le zone plastiche risultano ai piedritti (spessore massimo 2.0m) e al di sotto della zona di muretta (1.80m). Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima all'esterno della zona consolidata è di 107 kPa (piedritti) mentre la massima tensione principale minima è di 51 kPa (piedritti).

FASE 5

Viene simulata l'installazione del rivestimento di prima fase e l'avanzamento a 6 m dal fronte (distanza di getto dell'arco rovescio dal fronte). Il cedimento cumulato in calotta è pari a 6.7 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 7.1 cm al piano dei centri e 8.1cm alla base di questi, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 5.4 cm. Le zone plastiche sono presenti ai piedritti (spessore variabile da 4m in corrispondenza delle reni a 1.20m alla base dei piedritti) e al di sotto della zona di arco rovescio (3m). Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima all'esterno della zona consolidata è di 148 kPa (calotta) mentre la massima tensione principale minima è di 33 kPa (piedritti).

FASE 6

Viene simulata l'installazione dell'arco rovescio provvisorio e l'avanzamento a 24 m dal fronte. Il cedimento cumulato in calotta è pari a 7.0 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 7.5 cm al piano dei centri e 8.1cm alla base di questi, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 5.0 cm. Le zone plastiche sono rappresentate da punti isolati ai piedritti ed alla base dei piedritti. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 158 kPa (calotta) mentre la massima tensione principale minima è di 39 kPa (piedritti).

FASE 7

Viene simulata l'installazione del rivestimento definitivo e lo scarico totale all'interno del cavo. Il cedimento cumulato in calotta è pari a 7.5cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 6.0 cm al piano dei centri e 8.1cm alla base di questi, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 4.6 cm. Le zone plastiche sono presenti ai piedritti all'esterno della zona consolidata, con spessori variabili da 2m in corrispondenza delle reni sino a 0.2m alla base dei piedritti passando parzialmente al di sotto della zona di muretta. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 156 kPa (calotta) mentre la massima tensione principale minima è di 40 kPa (arco rovescio).

FASE 8

Viene simulato il comportamento di lungo termine caratterizzato dalla presenza della falda agente sul rivestimento definitivo ed il decadimento del rivestimento di prima fase con conseguente trasferimento degli sforzi sul rivestimento definitivo ed il decadimento dei parametri del consolidamento al contorno che tornano ad essere quelli del terreno originario. Il cedimento cumulato in calotta è pari a 6.3 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti (base dei piedritti) raggiunge 8.1 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 6.3 cm. Le zone plastiche presentano una forma a "farfalla" sviluppata verso il p.c., con estensione delle zone plastiche variabile da 6m all'altezza delle reni e 3m nella zona delle murette. Lungo il contorno, tutta la zona in precedenza consolidata risulta ora plasticizzata. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 208 kPa (piedritti) mentre la massima tensione principale minima è di 77 kPa (arco rovescio).

FASE 9

La fase risulta rappresentativa al solo fine della valutazione delle azioni ui rivestimenti.

In ogni modo, il cedimento cumulato in calotta è pari a 1.3 cm, lo spostamento cumulato ai piedritti raggiunge 0.2 cm, mentre il sollevamento cumulato in arco rovescio è di 0.08 cm. Le zone plastiche si presentano solo in corrispondenza del p.c. e non al contorno dello scavo. Nell'intorno del cavo la massima tensione principale massima è di 300 kPa (piedritti) mentre la massima tensione principale minima è di 77 kPa ((arco rovescio).

9.8.5 Verifiche strutturali del rivestimento di prima fase

Le verifiche strutturali sul rivestimento di prima fase sono state eseguite per le fasi di calcolo 5, 6, e 7. Le caratteristiche del rivestimento provvisorio sono riportate nella seguente tabella.

| Caratteristiche | Spritz beton/Centine |
|--|----------------------|
| Spessore dello spritz beton[m] | 0.25 |
| Area resistente dello spritz beton A_{sb} [m ²] | 0.25 |
| Tipologia profilati | IPN 180 |
| Interasse longitudinale profilato [m] | 2 |
| Area resistente della centina A_{cent} [cm ²] | 27.9 x2 |
| Modulo resistente elastico della centina W_{cent} [cm ³] | 161 x2 |
| Area resistente a taglio della centina $A_{V,cent}$ [cm ²] | 10.53 x2 |

Tabella 62 - Analisi di interazione – Sezione tipo Uscita Carrabile C1: definizione delle caratteristiche del rivestimento provvisorio

La tabella seguente sintetizza le sollecitazioni ottenute, per ogni fase, nelle zone di maggiore interesse del rivestimento: zona di calotta, di contatto calotta-piedritti e dei piedritti, rilevate in corrispondenza dei nodi indicati nella figura a seguire.

| | Sollecitazioni | Calotta | zona di contatto calotta-piedritto | | piedritto | |
|---------------|----------------|---------|------------------------------------|--------|-----------|--------|
| | | | Sinistro | Destro | Sinistro | Destro |
| Fase 5 | N [kN/m] | -13 | -192 | -186 | 174 | 188 |
| | M [kNm/m] | 4 | -60 | -60 | 15 | 25 |
| | T [kN/m] | 0 | -2 | -2 | 8 | -9 |
| Fase 6 | N [kN/m] | -78 | -259 | -252 | 119 | 130 |
| | M [kNm/m] | 4 | -60 | -61 | 17 | 27 |
| | T [kN/m] | 0 | -2 | -2 | 4 | -4 |
| Fase 7 | N [kN/m] | -138 | -250 | -241 | 145 | 155 |
| | M [kNm/m] | 5 | -61 | -61 | 17 | 26 |
| | T [kN/m] | 0 | -2 | -2 | 4 | -4 |

| | | | | | | |
|--|---------------------------------|-------|----------|------------|------|------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | ITINERARIO NAPOLI – BARI | | | | | |
| | RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA | | | | | |
| I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA | | | | | | |
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 171 di 199 |

Tabella 63 - Analisi di interazione – Sezione tipo Uscita Carrabile C1: Sollecitazioni nelle zona di maggior interesse del rivestimento di prima fase

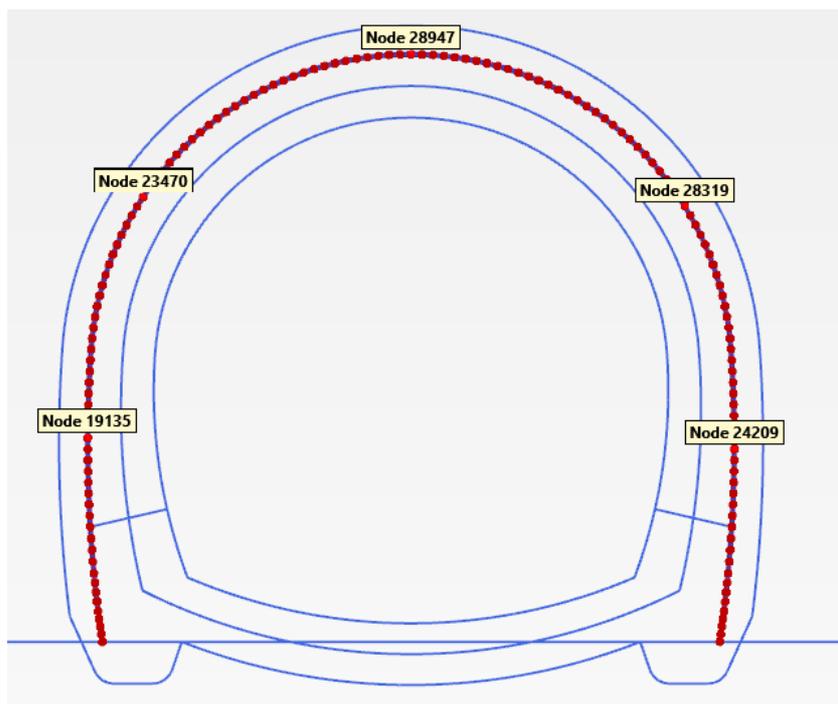


Figura 132 - Nodi rilevati del rivestimento di prima fase

In allegato si riportano, per ogni nodo del rivestimento, le sollecitazioni scaturite dall'analisi e le conseguenti verifiche: le verifiche strutturali del rivestimento di prima fase sono soddisfatte, per ciascuna fase, in tutti i punti.

9.8.6 Verifiche strutturali SLU del rivestimento definitivo

Nella tabella seguente si riportano le caratteristiche simulate dei rivestimenti di prima fase e definitivi.

| Tipo di prerinvestimento | Spritz beton/Rivestimento definitivo |
|--|--------------------------------------|
| Spessore dello spritz [m] | 0.25 |
| Spessore simulato del rivestimento definitivo di arco rovescio [m] | 0.55-1.30 (0.925) |
| Spessore simulato del rivestimento definitivo di calotta [m] | 0.90 |

Tabella 64 - Analisi di interazione – Sezione tipo Uscita Carrabile C1: 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.

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).

Il rivestimento definitivo è previsto armato sia in calotta che in arco rovescio. L'incidenza delle armature in calotta e in arco rovescio è di 50kg di acciaio per m³.

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 | zona di contatto calotta-piedritto | | piedritto | |
|---------------|----------------|---------|------------------------------------|--------|-----------|--------|
| | | | sinistro | destro | sinistro | destro |
| Fase 7 | N [kN/m] | 42 | -57 | -57 | -158 | -158 |
| | M [kNm/m] | 46 | -6 | -6 | -42 | -42 |
| | T [kN/m] | 0 | -23 | 23 | 5 | -5 |
| Fase 8 | N [kN/m] | -759 | -889 | -893 | -862 | -867 |
| | M [kNm/m] | 79 | -63 | -67 | 31 | 33 |
| | T [kN/m] | 1 | -33 | 36 | -6 | 2 |
| Fase 9 | N [kN/m] | -858 | -1002 | -1004 | -1170 | -1171 |
| | M [kNm/m] | 165 | -23 | -23 | -140 | -140 |
| | T [kN/m] | 1 | -80 | 80 | -34 | 34 |

Tabella 65 - Analisi di interazione – Sezione tipo Uscita Carrabile C1: Sollecitazioni nelle zone calotta-piedritto del rivestimento definitivo

| | Sollecitazioni | arco rovescio | zona di contatto piedritto- arco | |
|---------------|----------------|------------------|-------------------------------------|--------|
| | | | sinistro | destro |
| Fase 6 | N [kN/m] | -93 | -87 | -80 |
| | M [kNm/m] | 29 | 1 | 0 |
| | T [kN/m] | 1 | 12 | -11 |
| Fase 7 | N [kN/m] | -113 | -134 | -123 |
| | M [kNm/m] | 91 | -14 | -19 |
| | T [kN/m] | 2 | 45 | -36 |
| Fase 8 | N [kN/m] | -630 | -756 | -707 |
| | M [kNm/m] | 243 | -168 | -186 |
| | T [kN/m] | 8 | 175 | -127 |
| Fase 9 | N [kN/m] | -1065 | -1212 | -1109 |
| | M [kNm/m] | 538 | -284 | -327 |
| | T [kN/m] | 14 | 376 | -289 |

Tabella 66 - Analisi di interazione – Sezione tipo Uscita Carrabile C1: Sollecitazioni nelle zone arco rovescio-piedritto del rivestimento definitivo

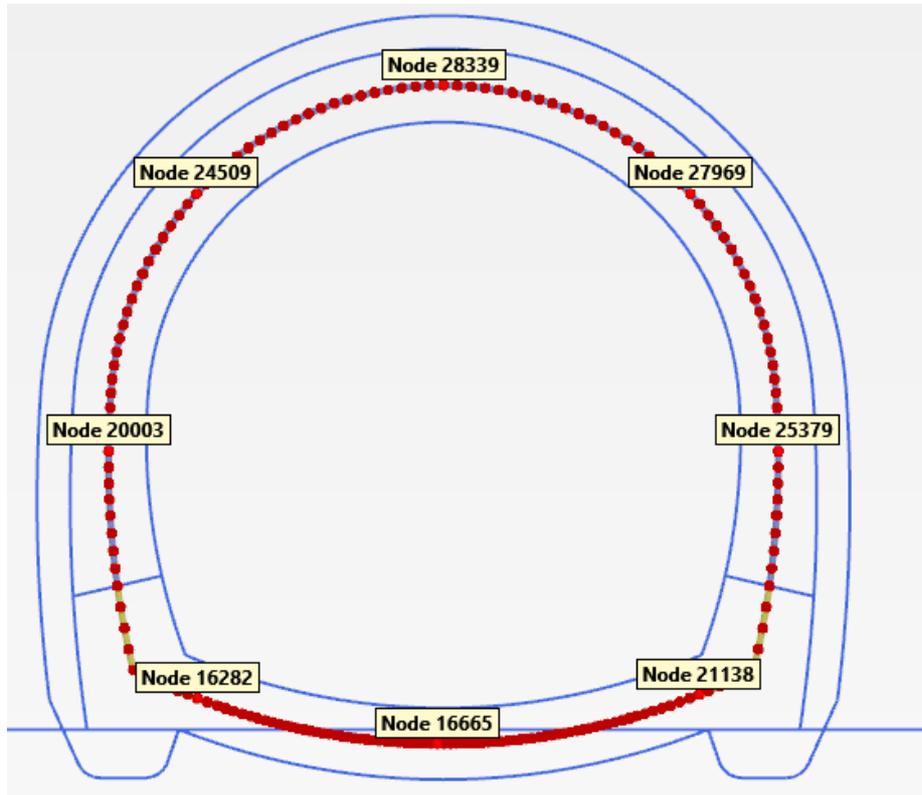


Figura 133 - Nodi rilevati del rivestimento definitivo

In **calotta e piedritti** si dispongono 1+1 $\phi 20/20$ con un copriferro netto di 4 cm. L'armatura longitudinale di ripartizione è costituita da barre $\phi 12/20$. L'armatura a taglio è del tipo $\phi 12/40\text{cm}/40\text{cm}$. La verifica viene condotta su di un'altezza della sezione pari a 90cm.

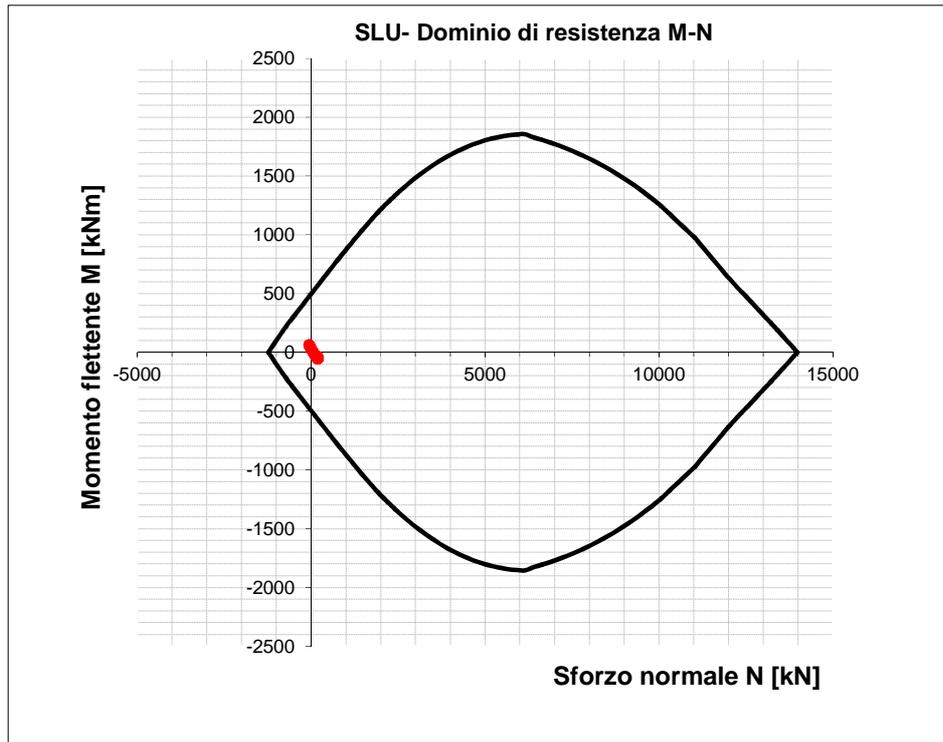


Figura 134 - Dominio resistente SLU calotta (B=1.00 m, H=0.90 m) – Fase 7

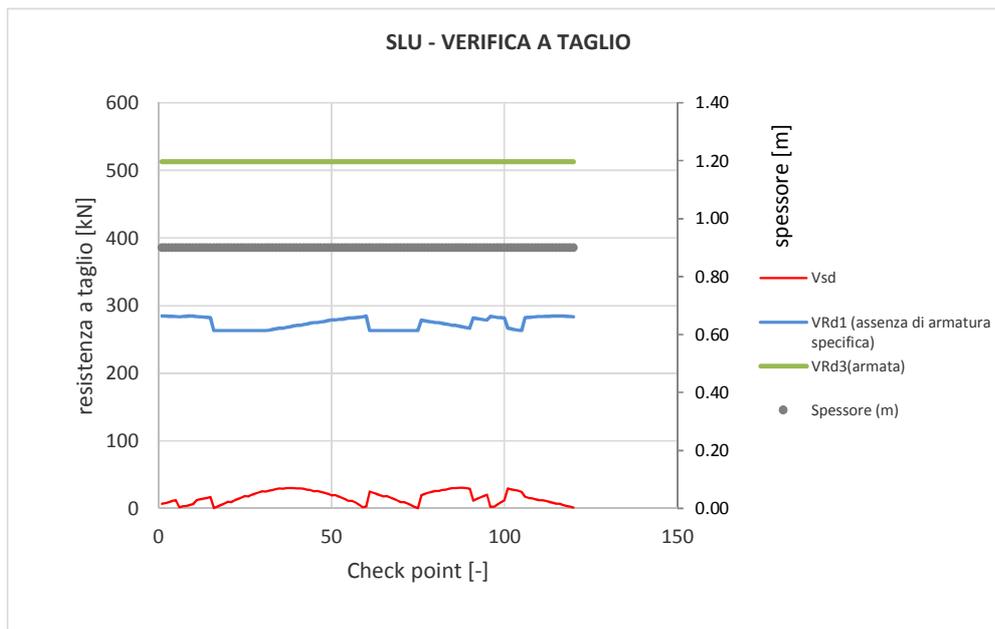


Figura 135 - Verifica SLU taglio calotta – Fase 7

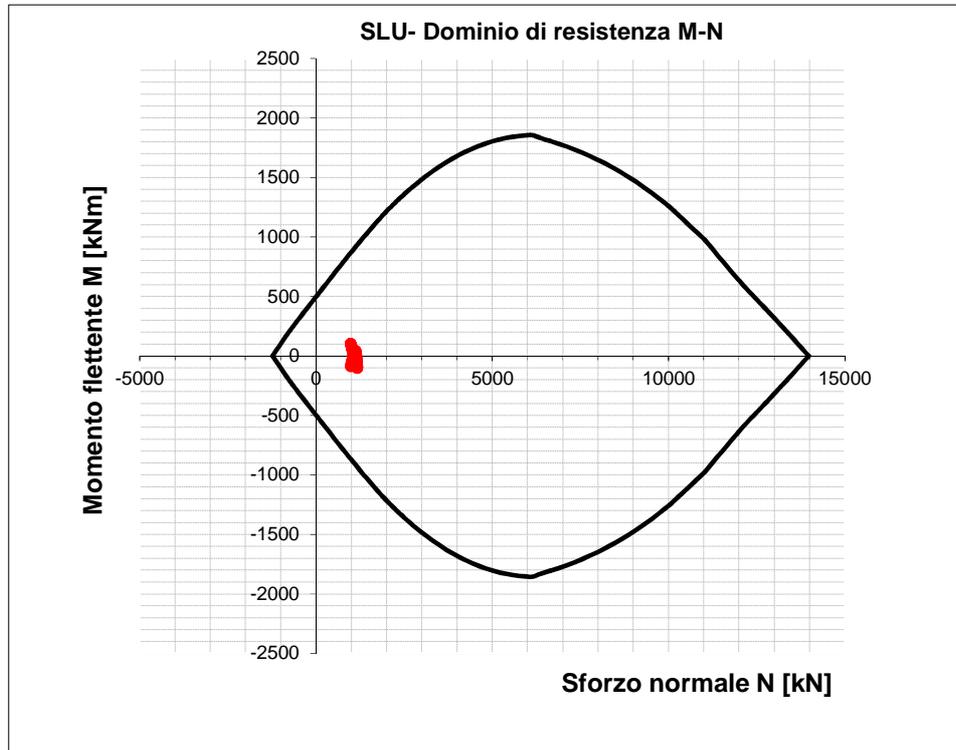


Figura 136 - Dominio resistente SLU calotta (B=1.00 m, H=0.90 m) – Fase 8

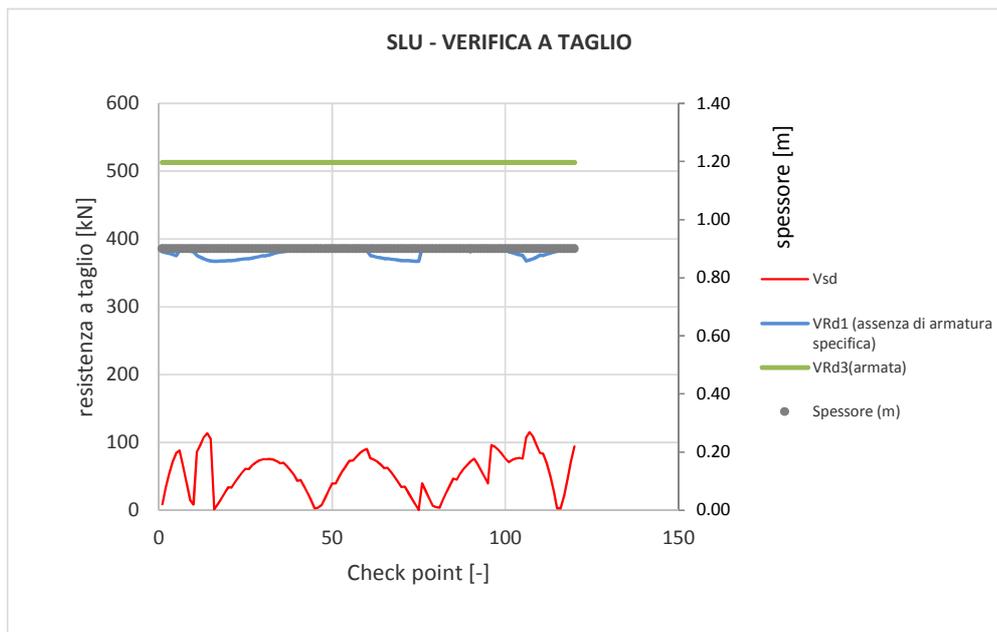


Figura 137 - Verifica SLU taglio calotta – Fase 8

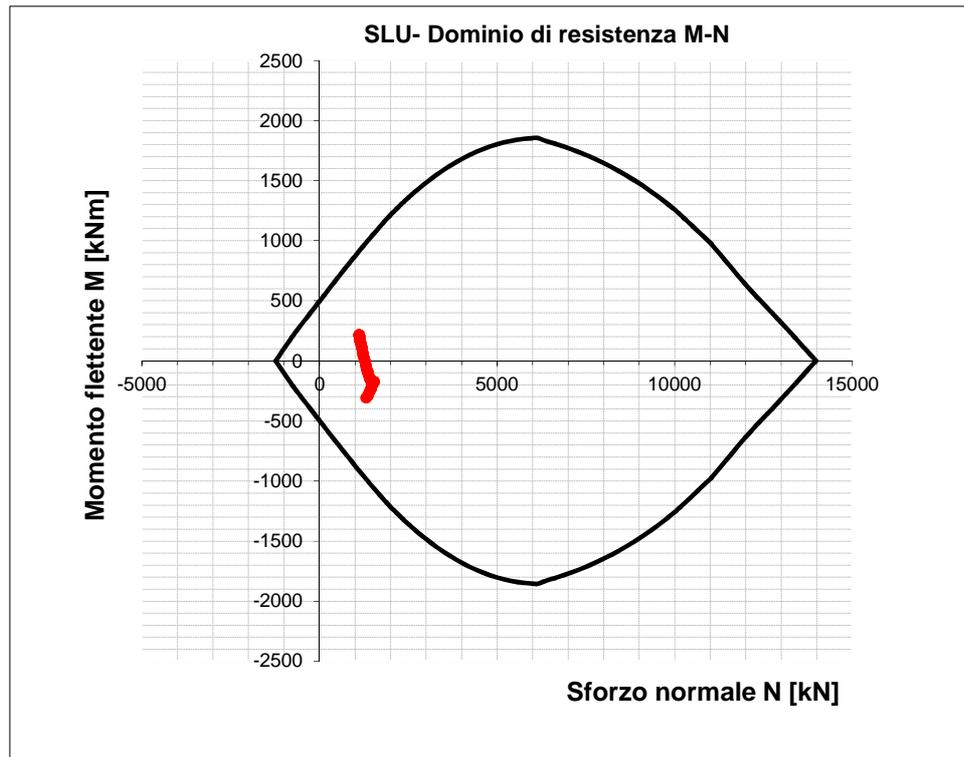


Figura 138 - Dominio resistente SLU calotta (B=1.00 m, H=0.90 m) – Fase 9

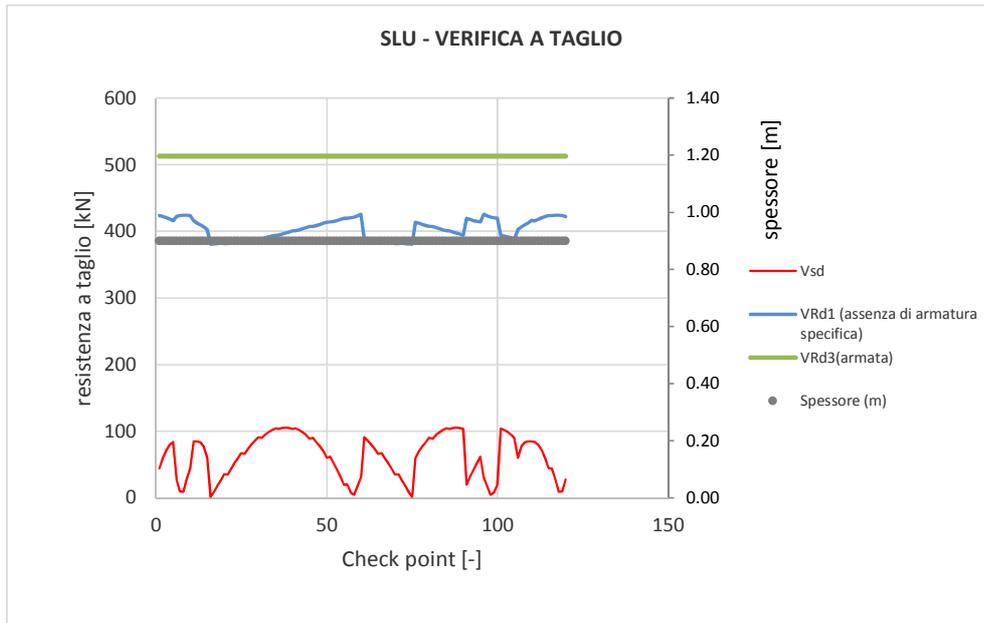


Figura 139 - Verifica SLU taglio calotta – Fase 9

In **arco rovescio** si dispongono 1+1 $\phi 20/20$ con un copriferro netto di 4 cm. L'armatura longitudinale di ripartizione è costituita da barre $\phi 12/30$. L'armatura a taglio prevista consiste in $\phi 12/40\text{cm}/30\text{cm}$.

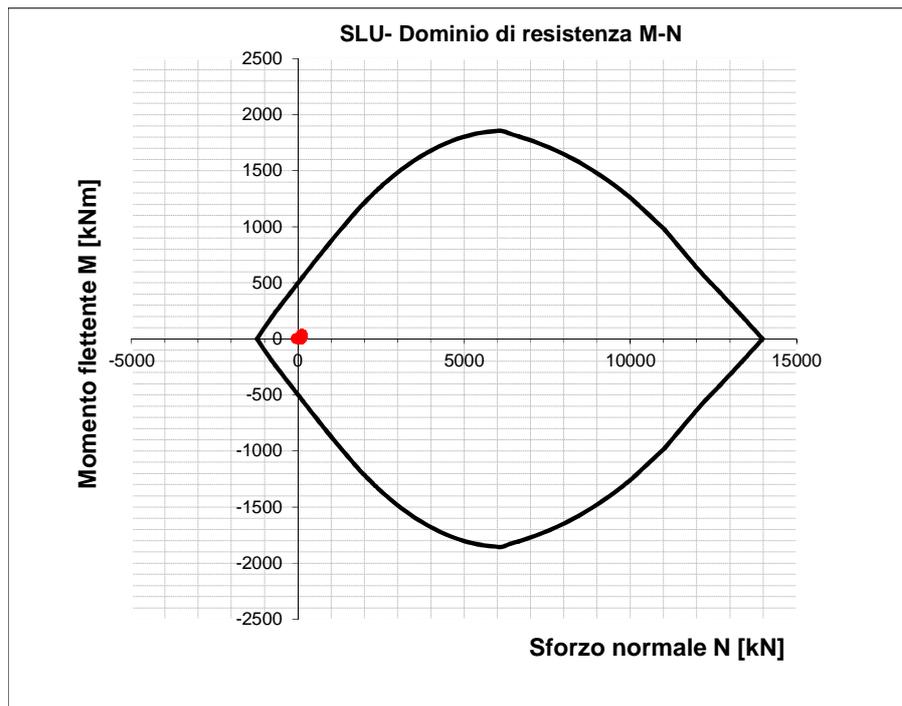


Figura 140 - Dominio resistente SLU arco rovescio (B=1.00 m, H=0.90m) – Fase 6

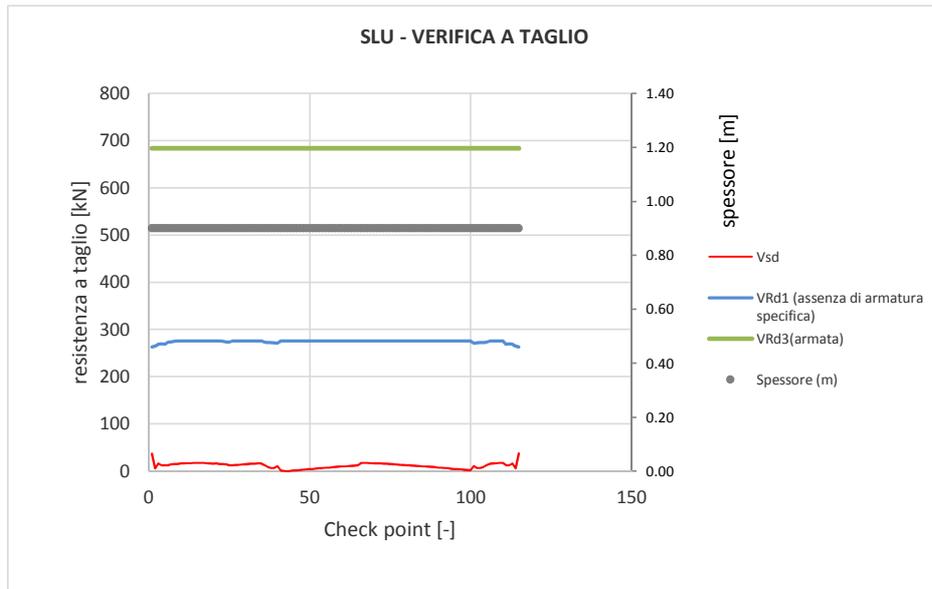


Figura 141 - Verifica SLU taglio arco rovescio – Fase 6

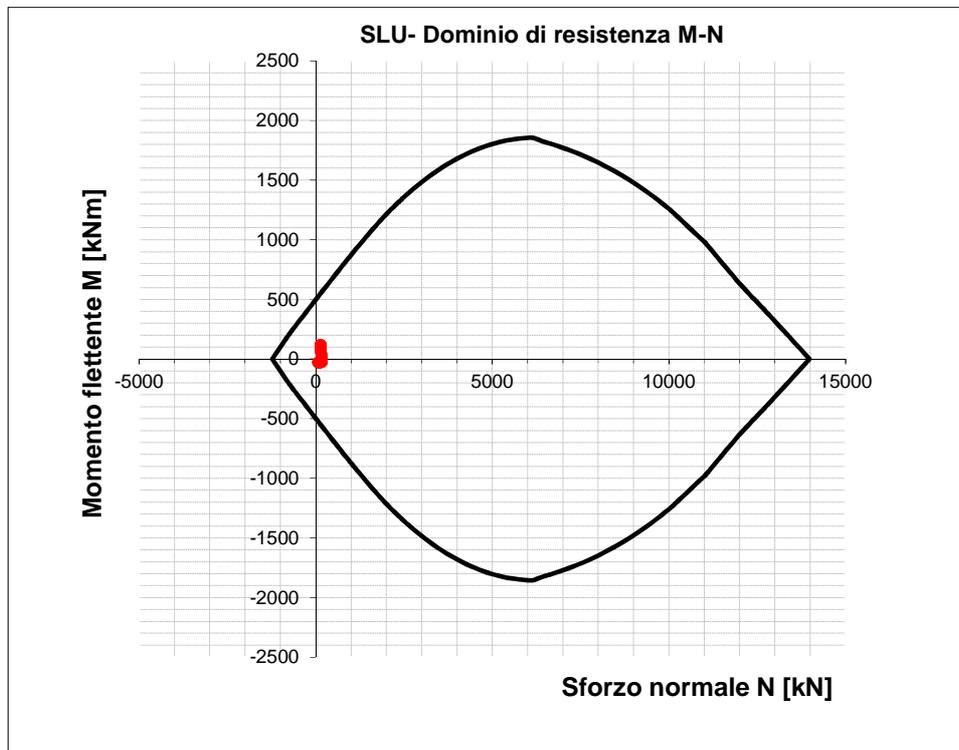


Figura 142 - Dominio resistente SLU arco rovescio (B=1.00 m, H=0.90m) – Fase 7

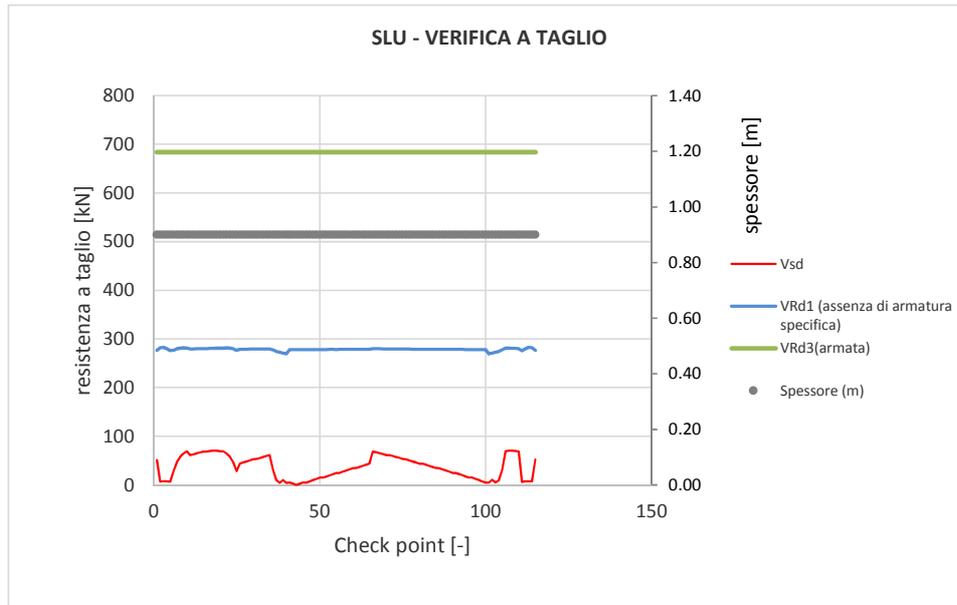


Figura 143 - Verifica SLU taglio arco rovescio – Fase 7

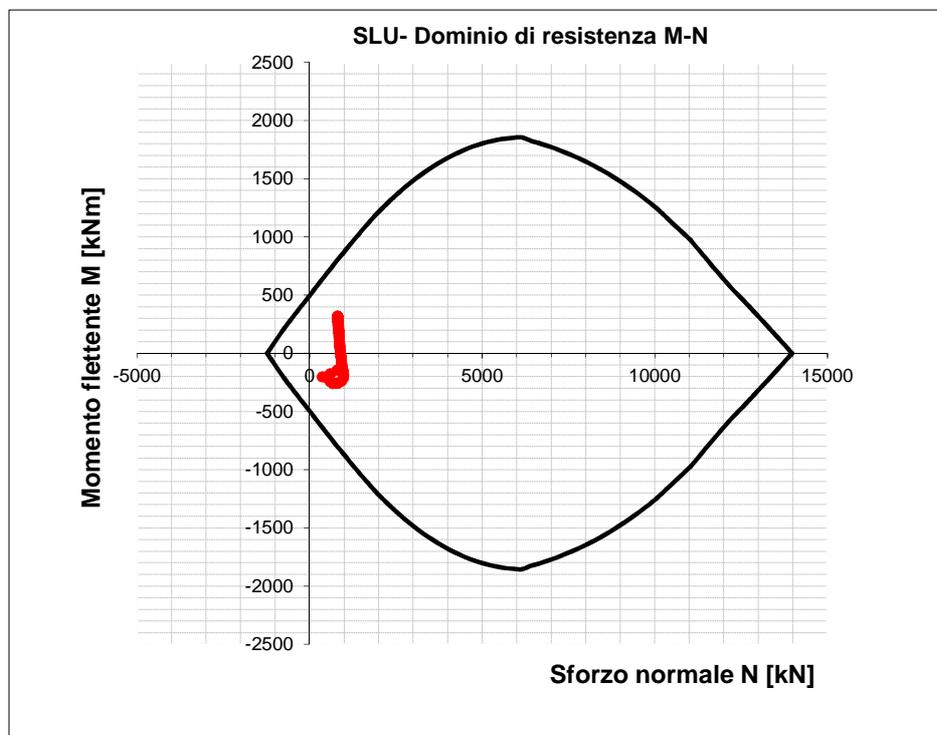


Figura 144 - Dominio resistente SLU arco rovescio (B=1.00 m, H=0.90m) – Fase 8

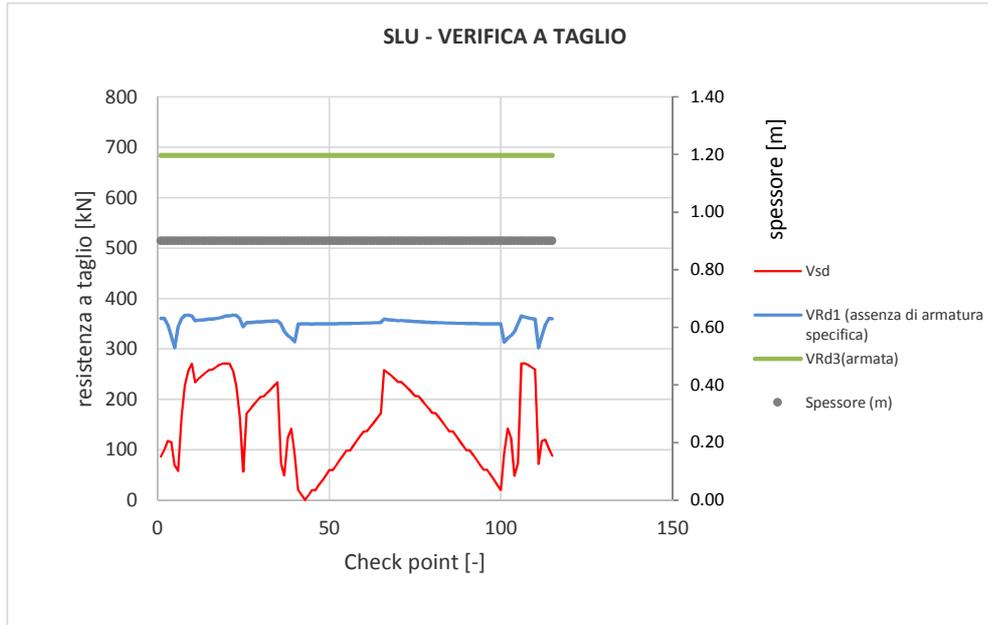


Figura 145 - Verifica SLU taglio arco rovescio – Fase 8

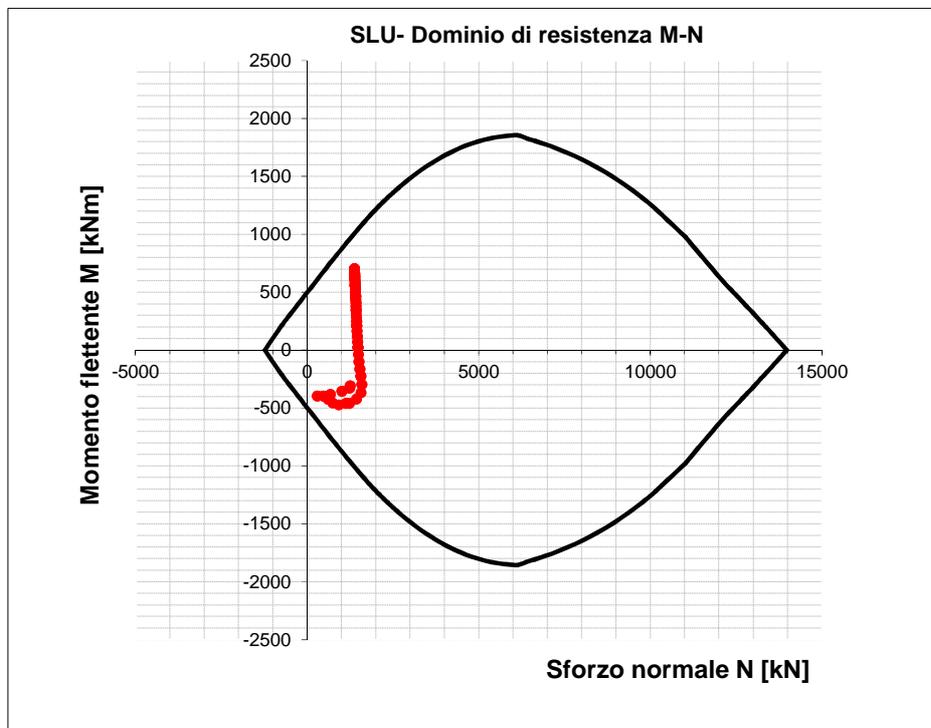


Figura 146 - Dominio resistente SLU arco rovescio (B=1.00 m, H=0.90m) – Fase 9

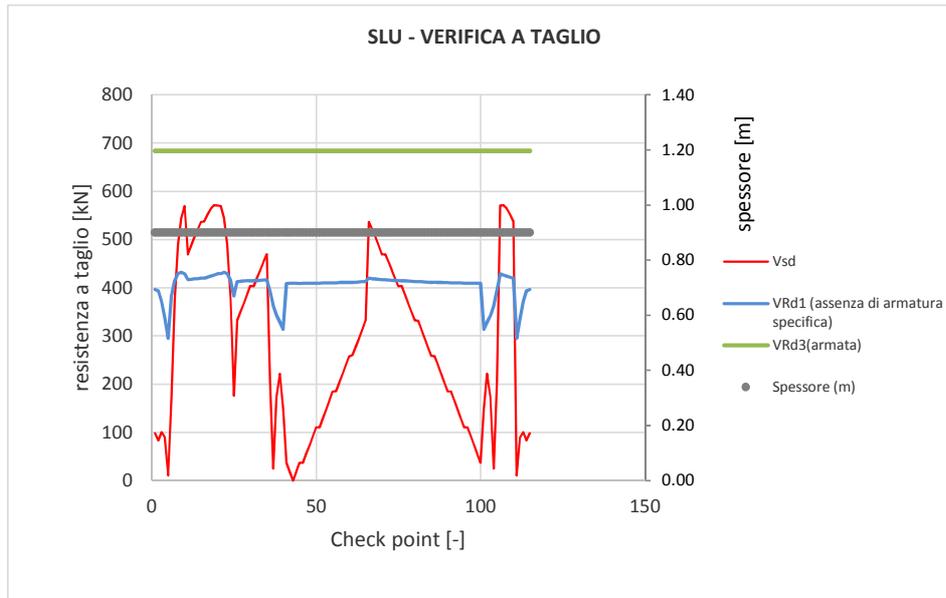


Figura 147 - Verifica SLU taglio arco rovescio – Fase 9

9.8.7 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.

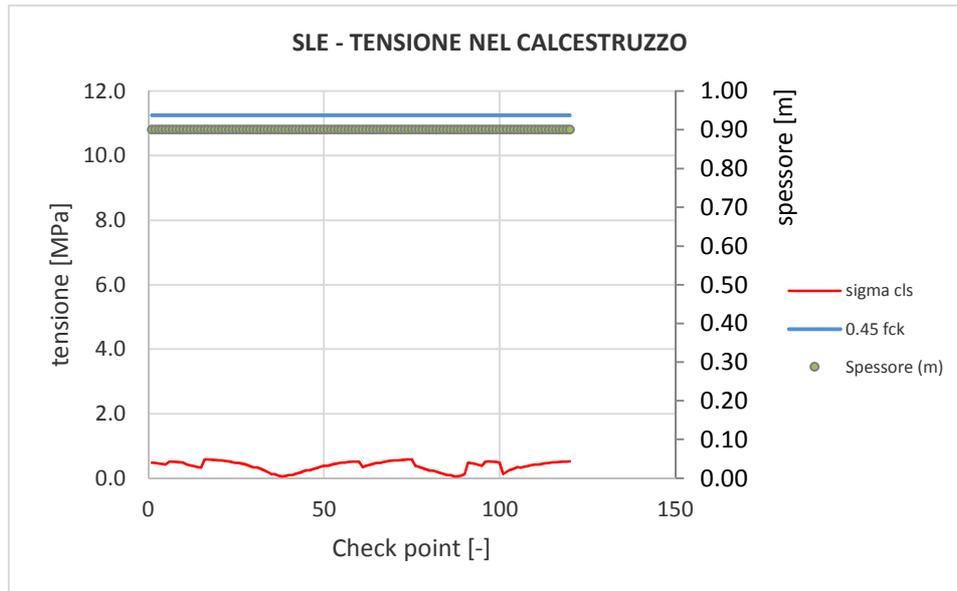


Figura 148 - Verifiche SLE tensione cls calotta – Fase 7

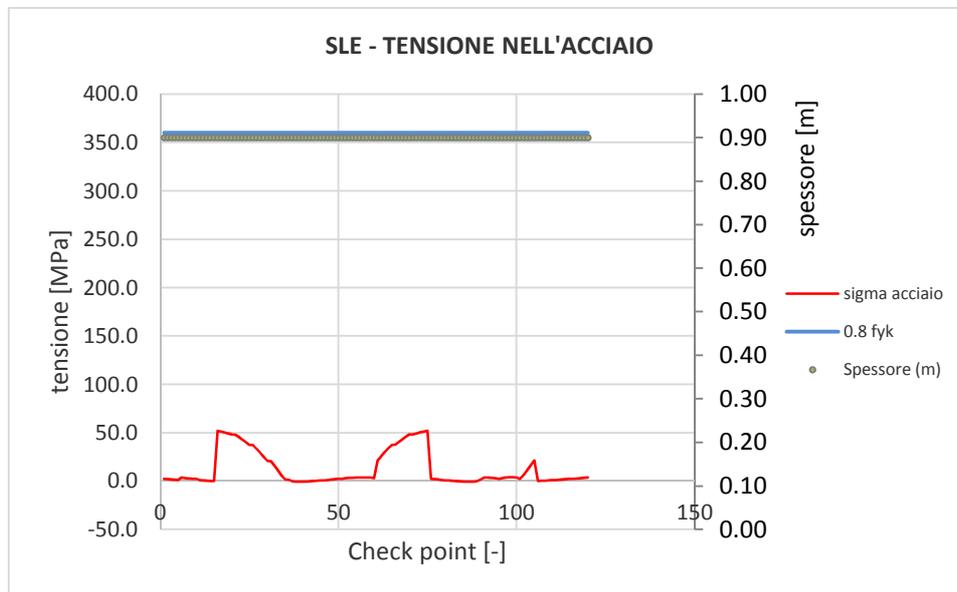


Figura 149 - Verifiche SLE tensione acciaio calotta – Fase 7

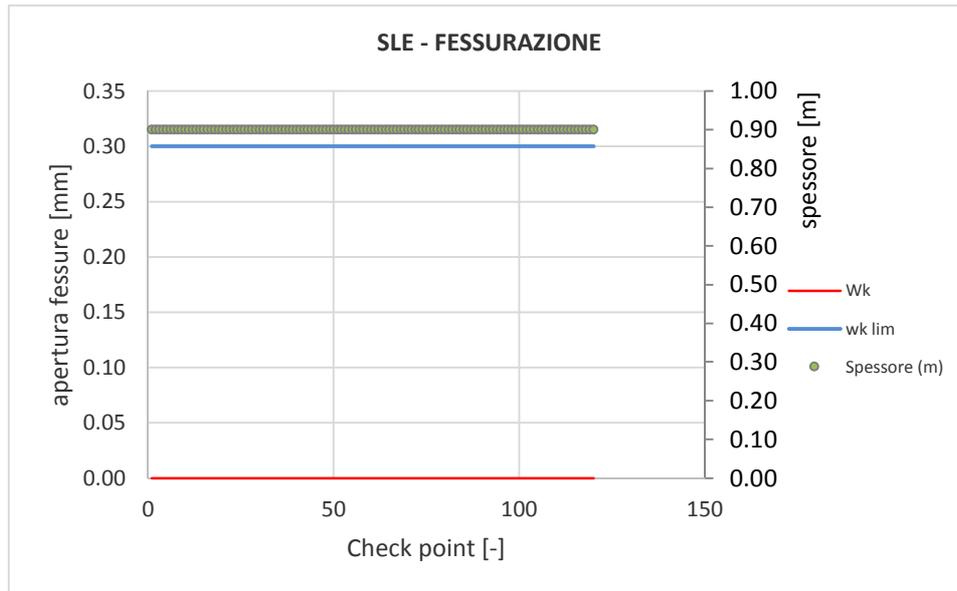


Figura 150 - Verifiche SLE fessurazione calotta – Fase 7

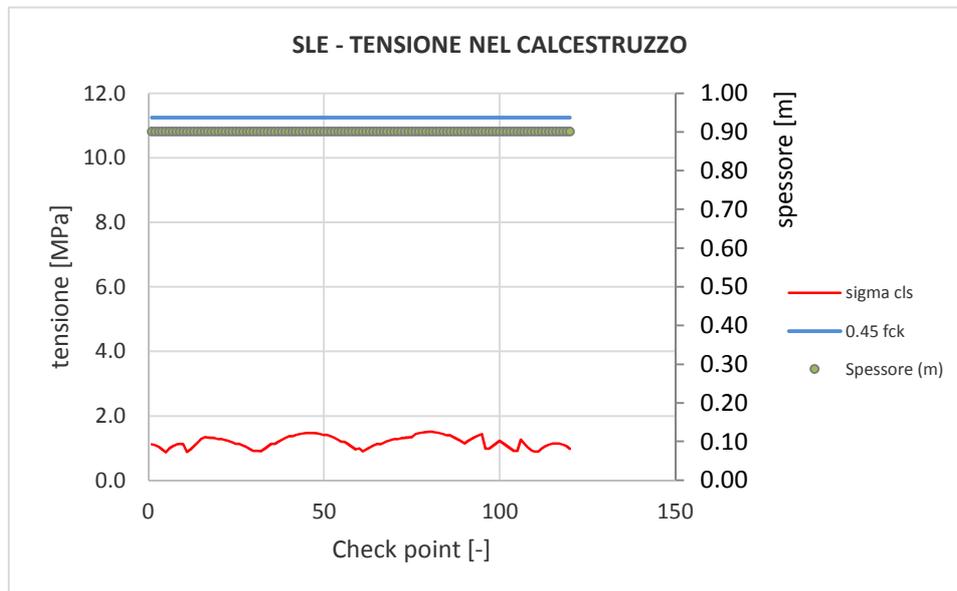


Figura 151 - Verifiche SLE tensione cls calotta – Fase 8

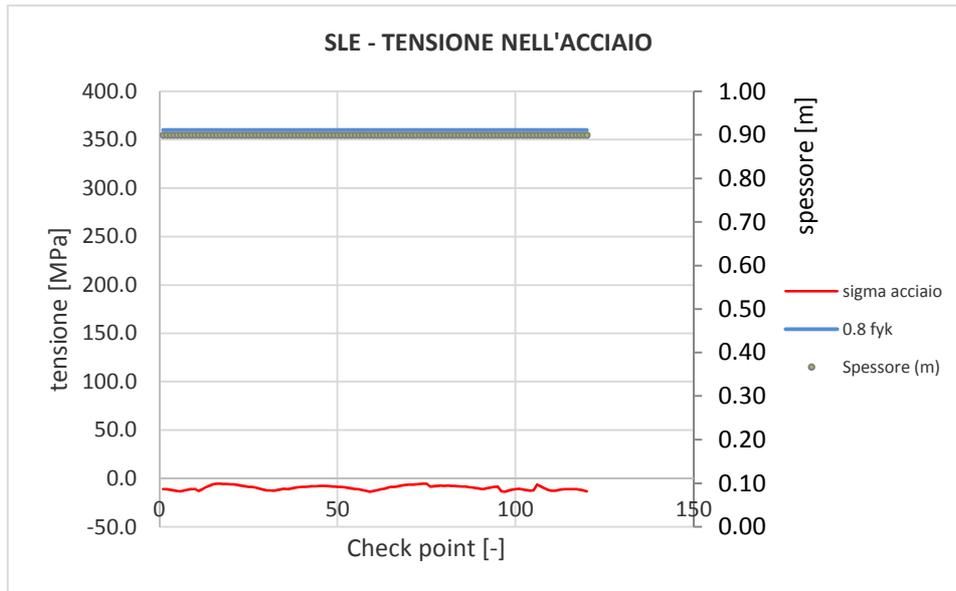


Figura 152 - Verifiche SLE tensione acciaio calotta – Fase 8

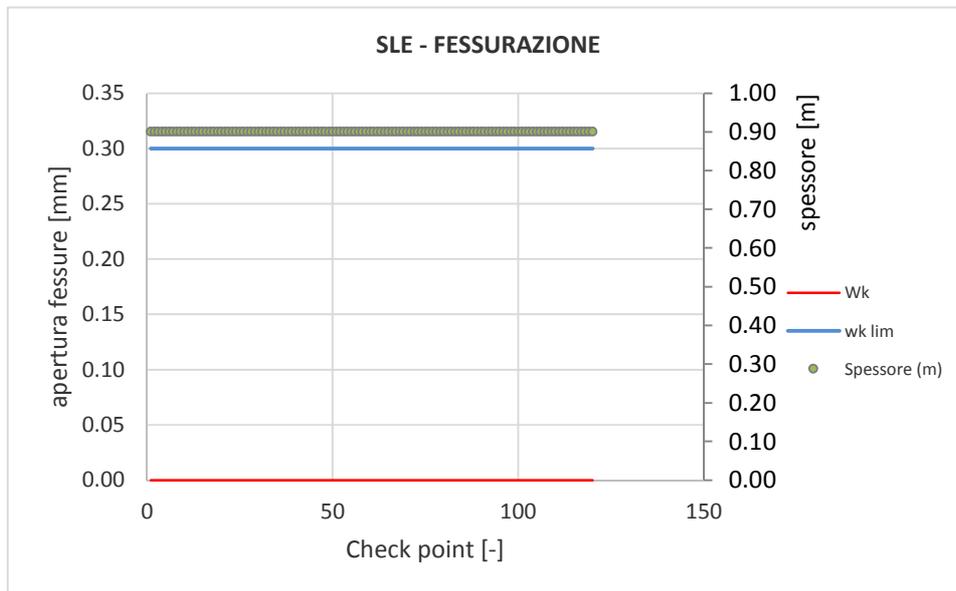


Figura 153 - Verifiche SLE fessurazione calotta – Fase 8

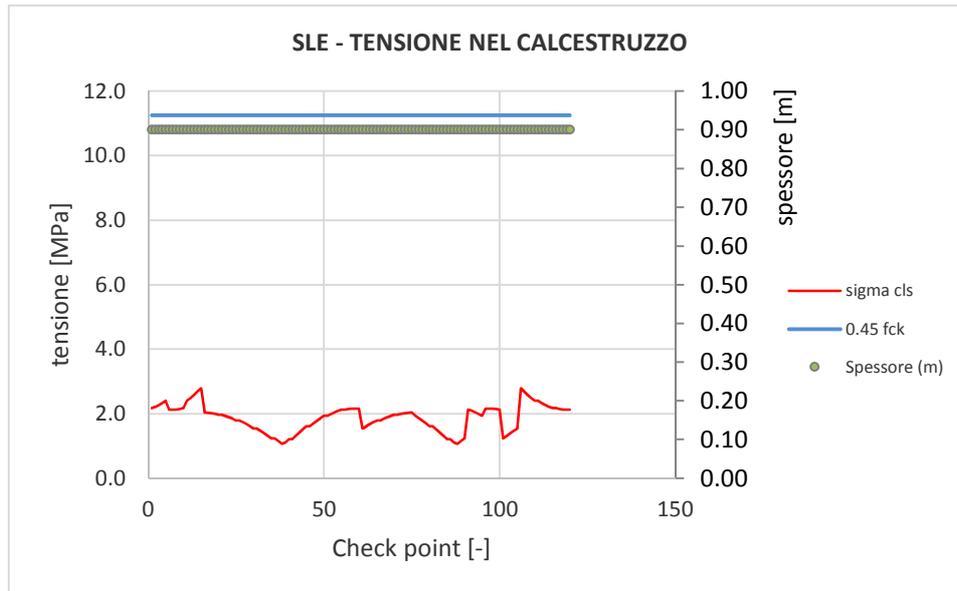


Figura 154 - Verifiche SLE tensione cls calotta – Fase 9

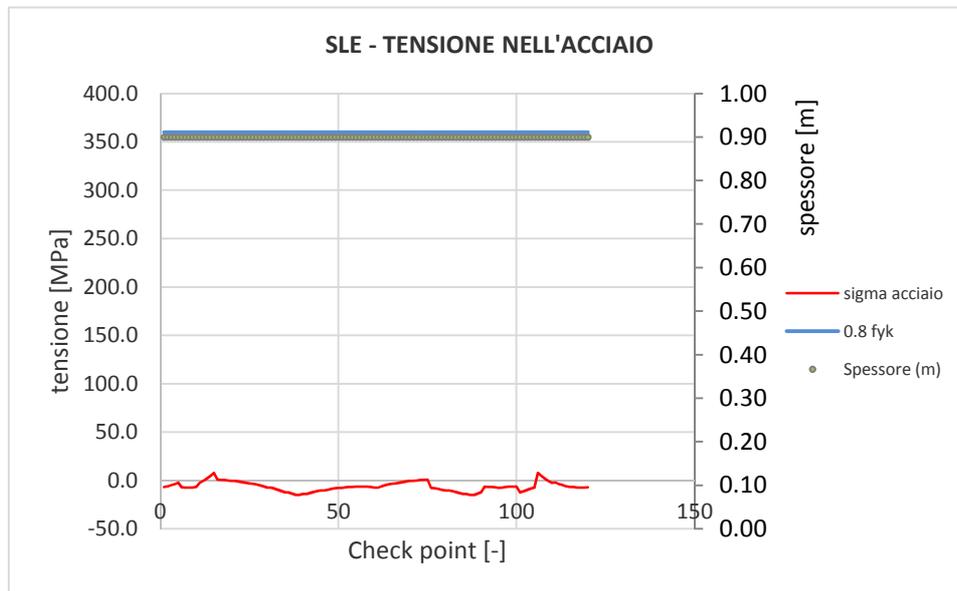


Figura 155 - Verifiche SLE tensione acciaio calotta – Fase 9

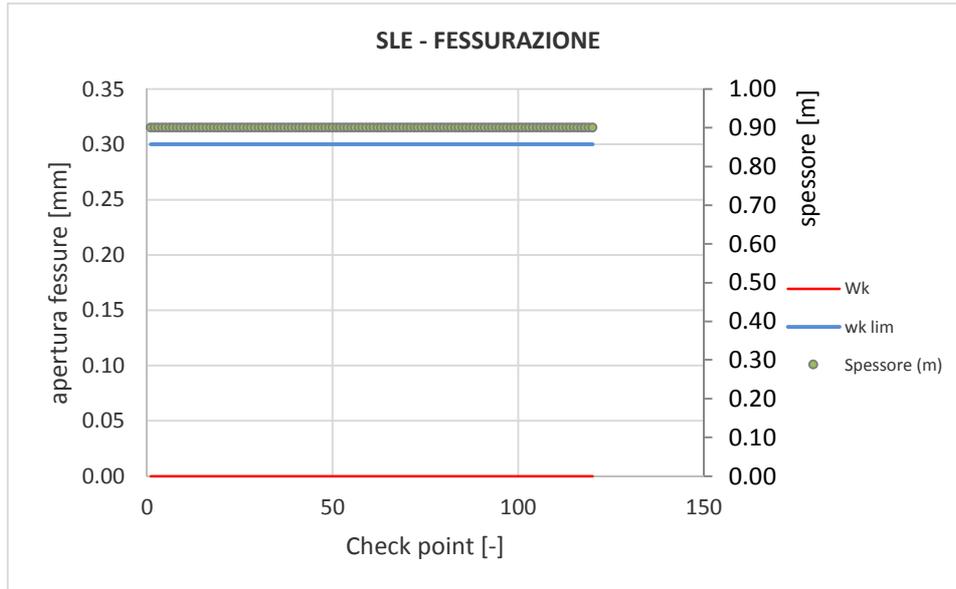


Figura 156 - Verifiche SLE fessurazione calotta – Fase 9

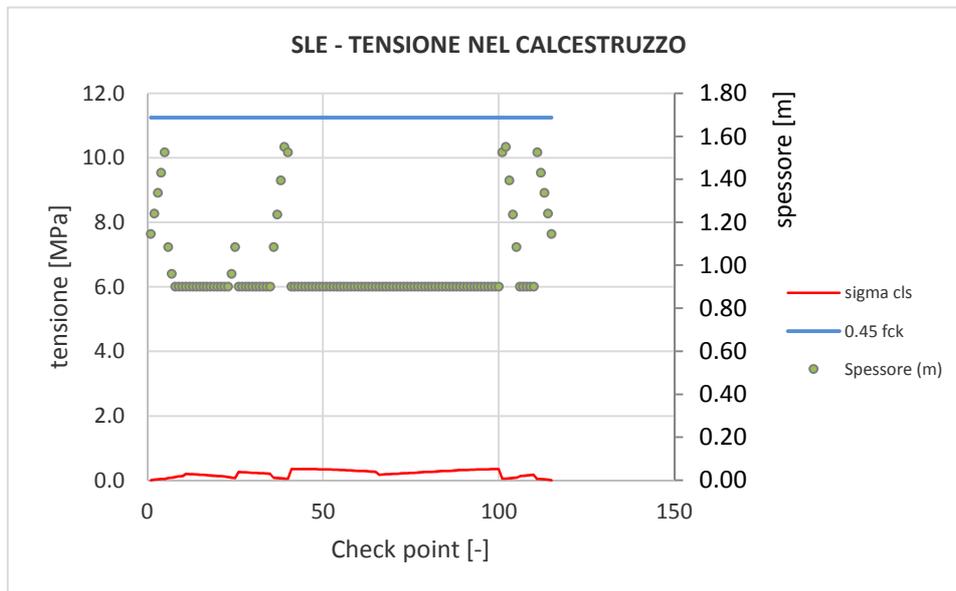


Figura 157 - Verifiche SLE tensione cls arco rovescio – Fase 6

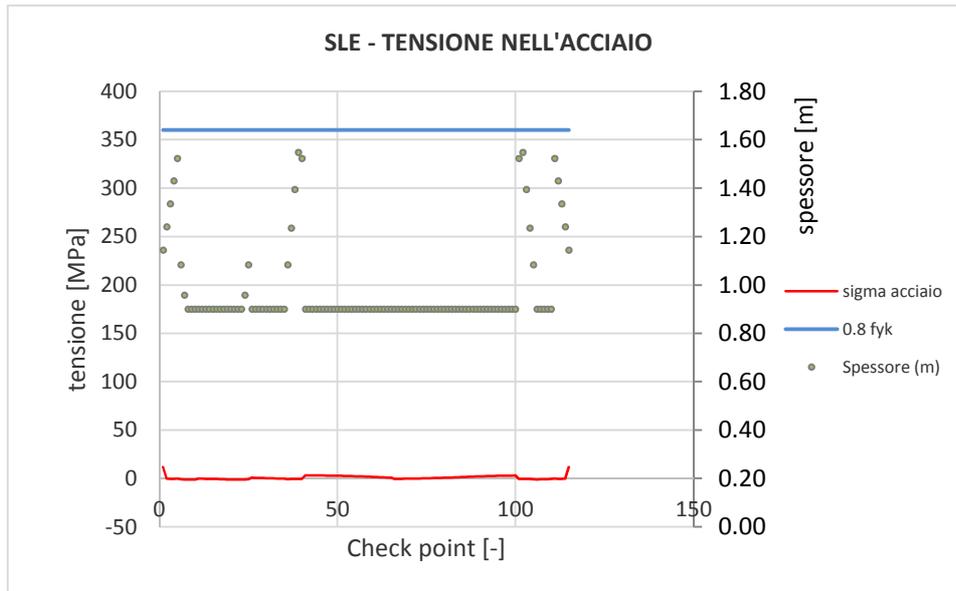


Figura 158 - Verifiche SLE tensione acciaio arco rovescio – Fase 6

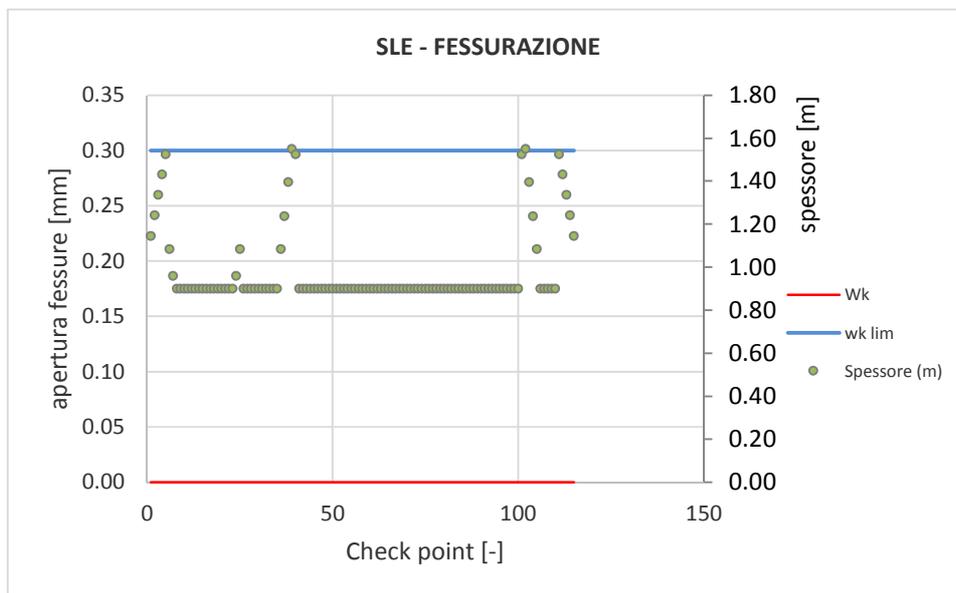


Figura 159 - Verifiche SLE fessurazione arco rovescio – Fase 6

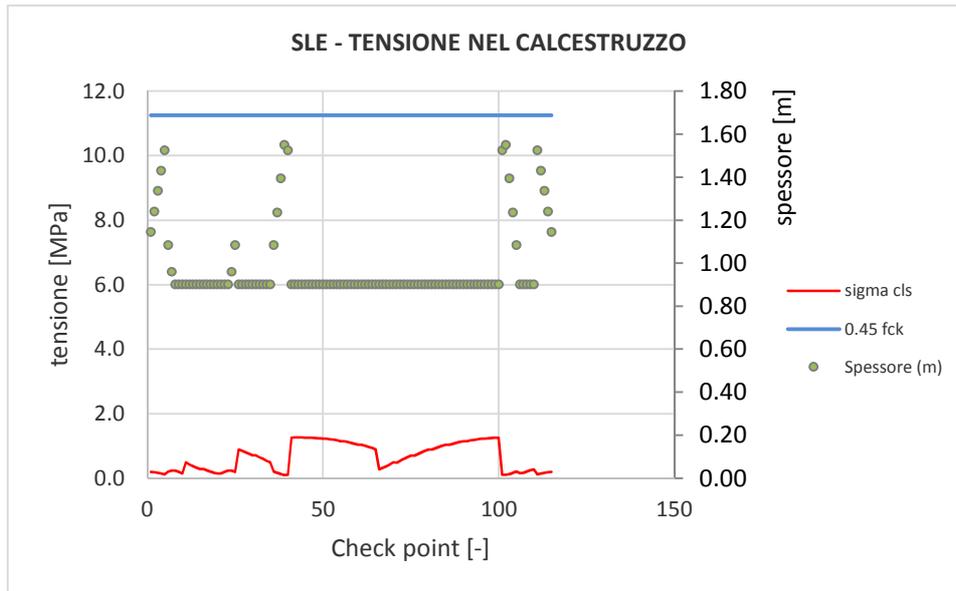


Figura 160 - Verifiche SLE tensione cls arco rovescio – Fase 7

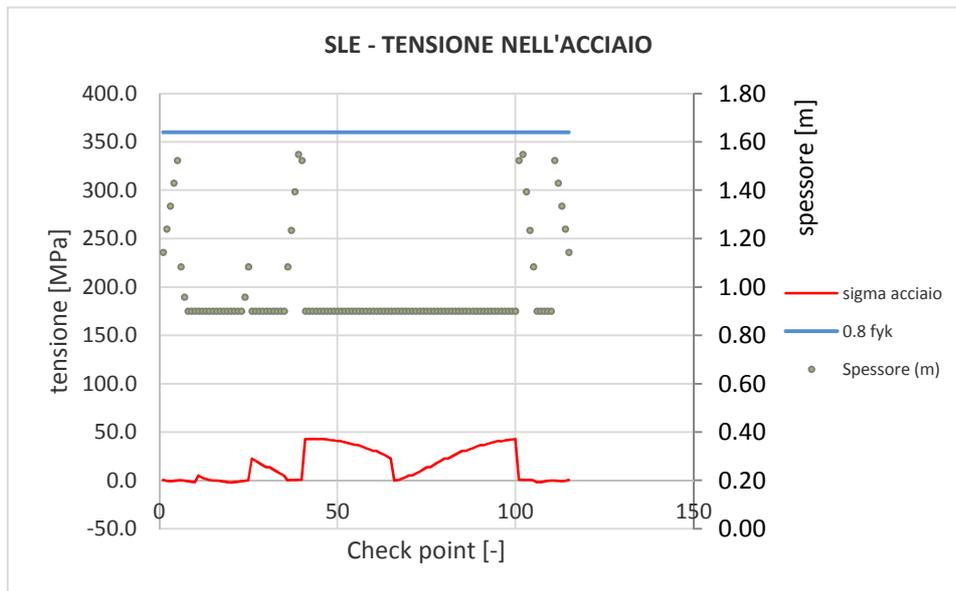


Figura 161 - Verifiche SLE tensione acciaio arco rovescio – Fase 7

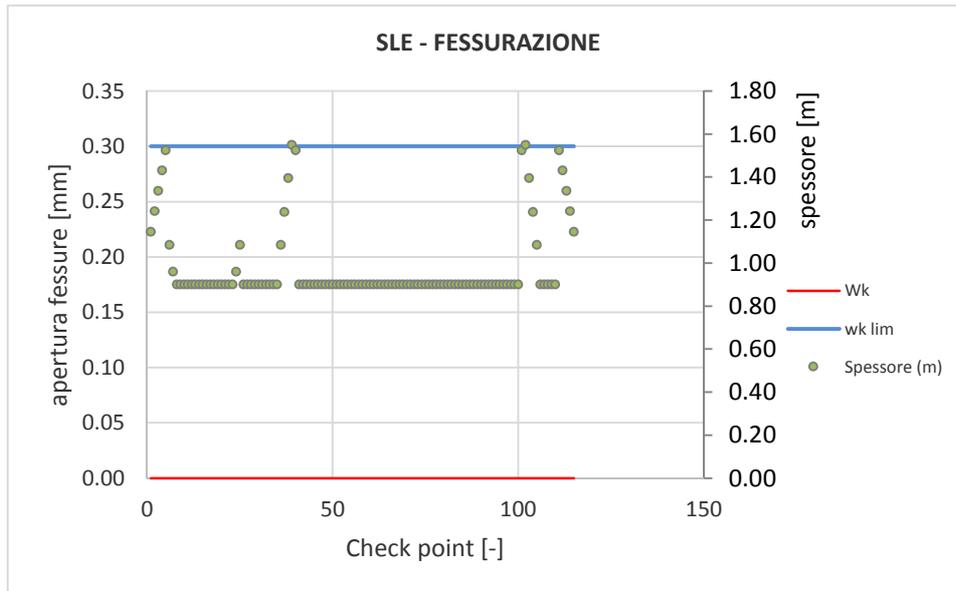


Figura 162 - Verifiche SLE fessurazione arco rovescio – Fase 7

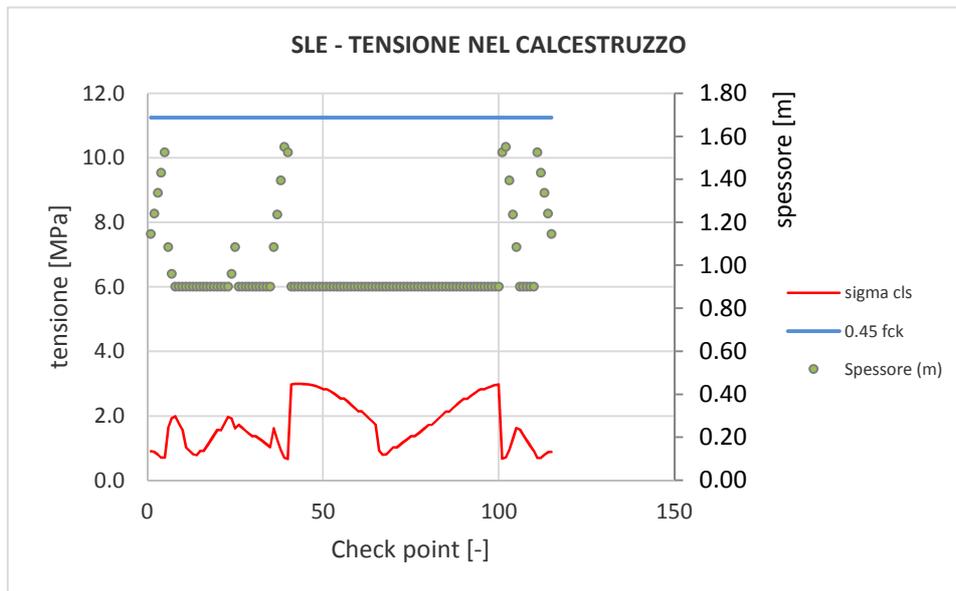


Figura 163 - Verifiche SLE tensione cls arco rovescio – Fase 8

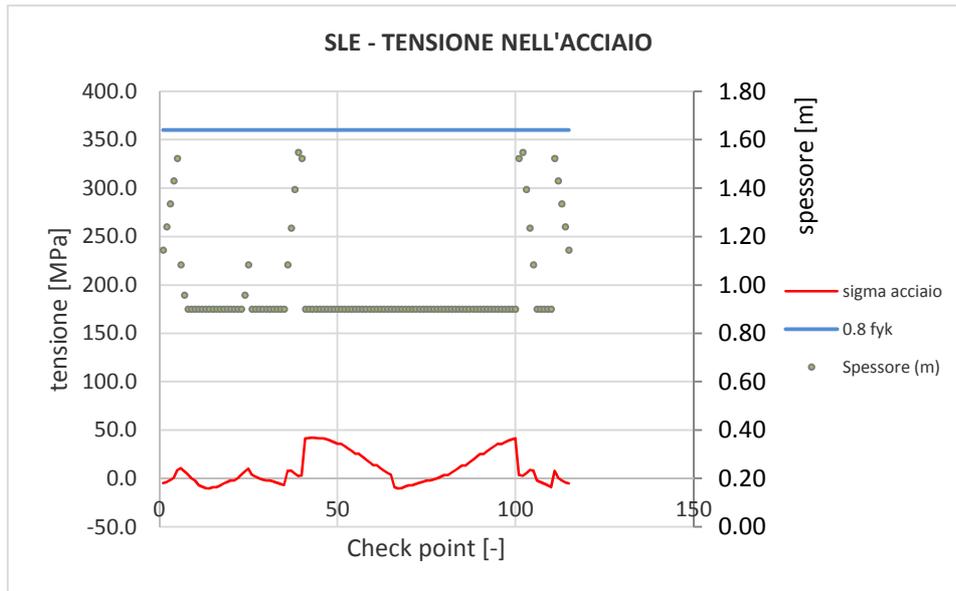


Figura 164 - Verifiche SLE tensione acciaio arco rovescio – Fase 8

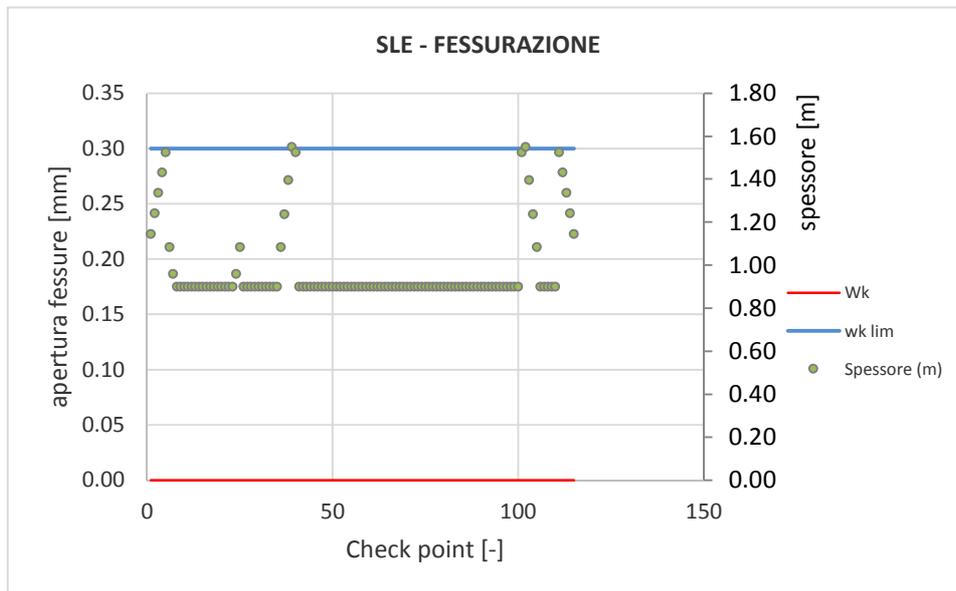


Figura 165 - Verifiche SLE fessurazione arco rovescio – Fase 8

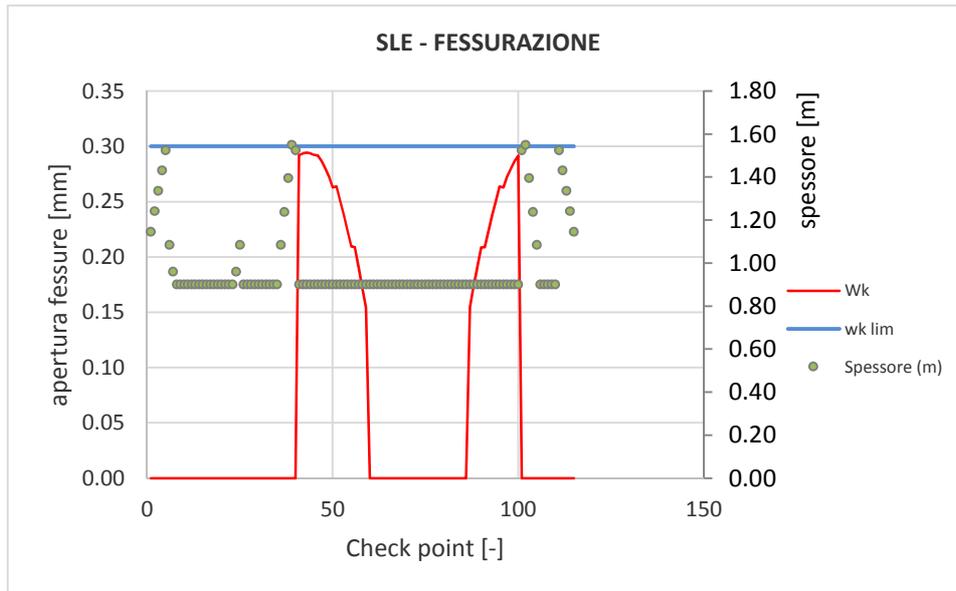


Figura 166 - Verifiche SLE tensione cls arco rovescio – Fase 9

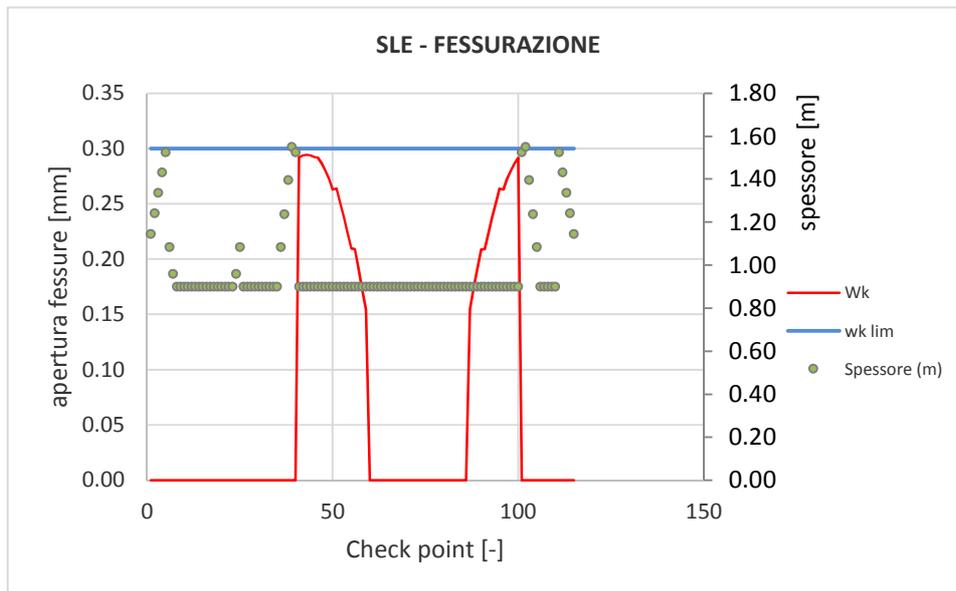


Figura 167 - Verifiche SLE tensione acciaio arco rovescio – Fase 9

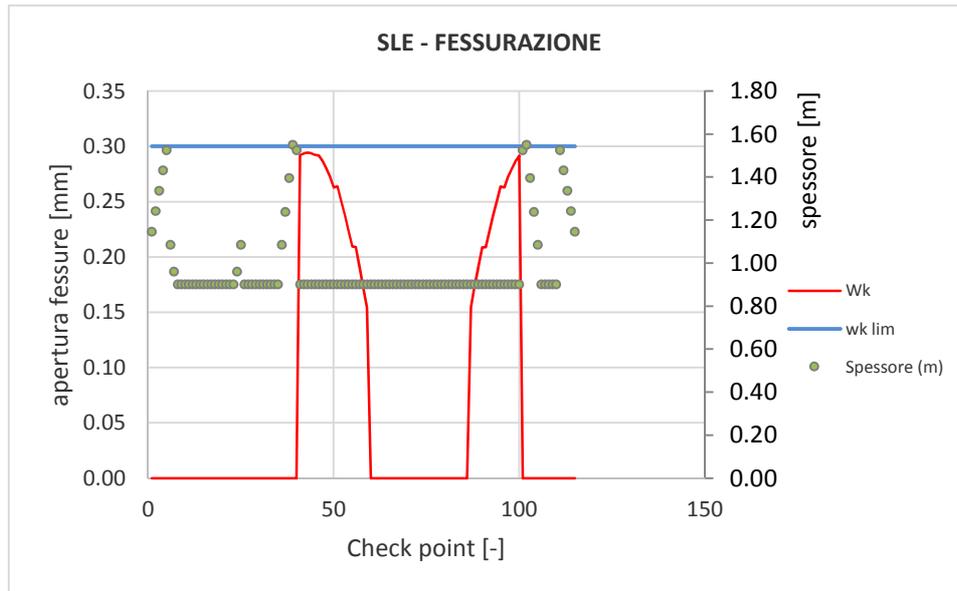


Figura 168 - Verifiche SLE fessurazione arco rovescio – Fase 9

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

9.9 Azioni di mitigazione dei potenziali rischi che incidono sulla realizzazione della galleria

Di seguito si illustrano le possibili azioni di mitigazione o riduzione dei rischi per limitarne eventuali ripercussioni durante la fase realizzativa delle gallerie. 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. [18]-Rif. [24]).

Instabilità del fronte e del cavo

In condizioni di bassa copertura, l'avanzamento avverrà con l'esecuzione di interventi di preconsolidamento al fronte e al contorno in grado di controllare lo sviluppo dei fenomeni deformativi indotti dallo scavo e prevenire lo sviluppo di eventuali meccanismi di collasso.

Comportamento rigonfiante

Per tener conto di eventuali potenziali fenomeni di rigonfiamento, sono state condotte analisi di interazione con la simulazione di una pressione di rigonfiamento. Per tali analisi, a titolo cautelativo, è stato considerato un valore della pressione di rigonfiamento pari a 300 KPa. Le verifiche condotte non mostrano incrementi significativi delle sollecitazioni sul rivestimento definitivo, né per le uscite/accessi di emergenza di tipo pedonale né per quelle di tipo carrabile. Non è stato pertanto necessario prevedere appositi incrementi di armatura.

Presenza di trovanti/blocchi

Nello scavo in tradizionale la presenza blocchi non comporta particolare criticità in relazione alla flessibilità della tecnica di avanzamento che può essere rapidamente adattata alle puntuali variazioni delle condizioni del fronte.

Interferenza pozzi e sorgenti

Al fine di limitare il rischio correlato all'interferenza con pozzi e sorgenti, per la sola uscita pedonale F7 la sezione tipo di scavo e consolidamento prevede l'esecuzione dell'impermeabilizzazione full-round a tergo del rivestimento definitivo di calotta e arco rovescio.

Fenomeni di subsidenza/interferenza con opere preesistenti

Le analisi condotte (Rif. [50]) hanno evidenziato che gli edifici analizzati ricadono in categoria di danno a cui corrispondono effetti trascurabili.

| | | | | | | |
|---|---------------------------------|-------|----------|------------|------|------------|
|  | ITINERARIO NAPOLI – BARI | | | | | |
| | RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA | | | | | |
| I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA | | | | | | |
| USCITE/ACCESSI DI EMERGENZA E FINESTRE COSTRUTTIVE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| Relazione geotecnica e di calcolo | IF0G | 01 | D 07 RB | GN0000 001 | A | 195 di 199 |

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 che consenta di:

- confermare le sezioni tipo previste per le tratte omogenee, come da profilo geotecnico, secondo i criteri di applicazione definiti in progetto;
- definire le variazioni degli interventi da effettuarsi nell'ambito delle variabilità previste in progetto sulla base di quanto riscontrato in fase di scavo;
- definire il passaggio tra una sezione tipo ed un'altra presente nel progetto all'interno delle tratte omogenee.

Se necessario, il piano di monitoraggio dovrà prevedere anche il controllo degli effetti prodotti dallo scavo in superficie.

Il piano di monitoraggio deve prevedere:

- il rilievo analitico e speditivo del fronte di scavo;
- il controllo della convergenza del cavo, mediante installazione di stazioni di convergenza con 5 mire. Il numero delle sezioni di misura è specificato in Tabella 67 per le diverse sezioni tipo. Le sezioni devono essere ubicate in prossimità del fronte scavo, la lettura di zero deve essere eseguita prima della ripresa dell'avanzamento per lo scavo del campo successivo, e le letture successive dovranno essere eseguite con frequenza almeno giornaliera fino alla completa stabilizzazione delle misure.
- il controllo dell'estrusione del fronte, mediante installazione di estrusometri con lunghezza e frequenza di misura indicate in Tabella 67;
- il monitoraggio dello sforzo assiale nelle centine del rivestimento di prima fase mediante celle di carico, come definito negli elaborati di progetto pertinenti;
- il monitoraggio delle deformazioni del rivestimento definitivo mediante barrette estensimetriche, come definito negli elaborati di progetto pertinenti;
- 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 degli 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.

I dati di monitoraggio dovranno essere inseriti in una piattaforma Web-GIS, 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.

Le grandezze individuate come rappresentative dovranno essere rilevate e controllate con un sistema di misura che abbia un grado di precisione compatibile con i valori attesi per le grandezze sopra dette.

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 e dei consolidamenti in modo da poter effettuare le necessarie misure di zero.

| | Sezione tipo | Misure di convergenza | Rilievi del fronte | Estrusometro |
|---------------------------------------|--------------|-----------------------|--------------------|---|
| | | Frequenza sezioni | Frequenza (*) | Frequenza |
| Uscite/accessi di emergenza pedonali | A2 | 1 ogni 20m | - | - |
| | B1 | 1 ogni campo | - | - |
| | B2 | 1 ogni campo | - | - |
| | C1 | 1 ogni campo | - | - |
| | C2 | 1 ogni campo | - | - |
| | C2p | 1 ogni mezzo campo | - | - |
| Uscite/accessi di emergenza carrabili | B1 | 1 ogni campo | 1 ogni campo | L=35m ogni 2 campi con 2 letture per ogni campo |
| | B2 | 1 ogni campo | 1 ogni campo | L=35m ogni 2 campi con 2 letture per ogni campo |
| | C1 | 1 ogni campo | 1 ogni campo | L=35m ogni 2 campi e 2 letture per ogni campo |
| | C2 | 1 ogni campo | 1 ogni campo | L=35m ogni 2 campi e 2 letture per ogni campo |
| (*) sempre al cambio di litologia | | | | |

Tabella 67 - Piano di monitoraggio

10.2 Criteri generali per l'applicazione delle sezioni tipo

Sono di seguito illustrati i criteri che dovranno essere adottati in corso d'opera per l'applicazione delle sezioni tipo e la gestione delle variabilità, nell'ambito delle previsioni del progetto, che sono sintetizzate nei valori attesi delle grandezze caratteristiche. I valori attesi dei fenomeni deformativi al fronte, al cavo e al piano campagna (ove pertinente) sono individuati in funzione dei risultati delle analisi numeriche, di esperienze in contesti analoghi e di dati di letteratura (

| | Sezione tipo | Formazione | VALORI ATTESI | |
|---|--------------|------------------------|---|-----------------------------------|
| | | | Convergenza radiale ^(*) (mm) | Estrusione cumulativa totale (mm) |
| Uscite/accessi di emergenza pedonali | A2 | FYR2 | <10 | - |
| | B1 | BNA3, BNA1b, BNA2 | 20 | 25 |
| | B2 | BNA2, BNA3, BNA1b, FYR | 20 | 20 |
| | C1 | BNA3, BNA1b | 25 | - |
| | C2 | BNA2, FYR | 30 | 40 |
| | C2p | FYR2 | 30 | 60 |
| Uscite/accessi di emergenza carrabili | B1 | BNA3, BNA1b, BNA2 | 25 | 35 |
| | B2 | BNA2, BNA3, BNA1b, FYR | 30 | 25 |
| | C1 | BNA3, BNA1b | 40 | - |
| | C2 | BNA2 | 40 | 40 |
| (*) convergenza radiale depurata della preconvergenza | | | | |

Tabella 68).

In corso d'opera, i rilievi del fronte e i dati di monitoraggio della risposta deformativa del fronte e del cavo, correlati alle fasi di avanzamento, sono confrontati con le previsioni progettuali (i valori attesi) per consentire la verifica e la messa a punto del progetto con i criteri di seguito descritti:

1. Le condizioni geologiche e geotecniche rilevabili al fronte corrispondono con quanto previsto in progetto e la risposta deformativa rientra nel campo dei valori attesi: la previsione progettuale è confermata, si procede con la sezione tipo media prevista per la tratta.
2. La risposta deformativa non rientra nel campo di accettabilità definito in progetto: la sezione tipo prevista per la tratta è ottimizzata secondo le definite variabilità, che consistono in: aumento/diminuzione ($\pm 20\%$) degli interventi di preconsolidamento, diminuzione/aumento dell'interasse delle centine ($\pm 20\%$ del passo medio), diminuzione/aumento delle distanze di getto del rivestimento definitivo dal fronte di scavo.
3. Le condizioni geologiche e geotecniche osservate sono sensibilmente differenti da quelle ipotizzate e la risposta deformativa non rientra nel campo di accettabilità definito in progetto: si passa ad una diversa sezione tipo, tra quelle definite in progetto come "sezioni eventuali" per quella tratta.

| | Sezione tipo | Formazione | VALORI ATTESI | |
|---|--------------|------------------------|---|-----------------------------------|
| | | | Convergenza radiale ^(*) (mm) | Estrusione cumulativa totale (mm) |
| Uscite/accessi di emergenza pedonali | A2 | FYR2 | <10 | - |
| | B1 | BNA3, BNA1b, BNA2 | 20 | 25 |
| | B2 | BNA2, BNA3, BNA1b, FYR | 20 | 20 |
| | C1 | BNA3, BNA1b | 25 | - |
| | C2 | BNA2, FYR | 30 | 40 |
| | C2p | FYR2 | 30 | 60 |
| Uscite/accessi di emergenza carrabili | B1 | BNA3, BNA1b, BNA2 | 25 | 35 |
| | B2 | BNA2, BNA3, BNA1b, FYR | 30 | 25 |
| | C1 | BNA3, BNA1b | 40 | - |
| | C2 | BNA2 | 40 | 40 |
| (*) convergenza radiale depurata della preconvergenza | | | | |

Tabella 68– Previsioni progettuali

11 CONCLUSIONI

Nella presente relazione sono state affrontate le problematiche progettuali connesse con la realizzazione delle uscite/accessi di emergenza di tipo pedonale e carrabile, incluse 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. [26]), 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 un comportamento di categoria B (stabile a breve termine).

3. Fase di terapia (cap. 9): si prevede di realizzare lo scavo con metodo tradizionale. 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, verificarne la rispondenza con le previsioni progettuali e mettere a punto le sezioni tipo individuate nell'ambito delle variabilità previste.