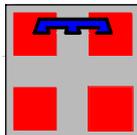




Autostrada Asti-Cuneo



PROVINCIA DI ASTI



REGIONE PIEMONTE



PROVINCIA DI CUNEO

COLLEGAMENTO AUTOSTRADALE ASTI - CUNEO

TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
LOTTO 6 RODDI - DIGA ENEL

PROGETTO ESECUTIVO
OPERE D'ARTE IN SEDE

GALLERIA DI VERDUNO
GALLERIA NATURALE
RELAZIONE DI CALCOLO BY PASS

Aggiornato: 00	Data : Marzo 2015	Descrizione: EMISSIONE	Redatto: Ing. Gatti	Controllato: Ing. Saurio	Approvato: Ing. Ghislandi	Codifica: 2.6 E - r D.2.2.03
Aggiornato:	Data :	Descrizione:	Redatto:	Controllato:	Approvato:	Lotto Prog. Tipo Elaborato
Aggiornato:	Data :	Descrizione:	Redatto:	Controllato:	Approvato:	Data: Marzo 2015
Aggiornato:	Data :	Descrizione:	Redatto:	Controllato:	Approvato:	Scala: -



PROGETTISTA e RESP. INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:
Dott. Ing. Enrico Ghislandi
Albo di Milano
N° A 16993

CONSULENZA SPECIALIZZATA



CONCESSIONARIA:





1.1. INDICE

1.1.	INDICE	1
2.	INTRODUZIONE.....	6
3.	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	8
4.	SOFTWARE UTILIZZATI.....	10
4.1.	FLAC 7.0	10
4.2.	LINCA.....	13
5.	CRITERI DI VERIFICA DEI RIVESTIMENTI	14
5.1.	VERIFICHE AGLI STATI LIMITE ULTIMI.....	14
5.1.1.	<i>Resistenza a sforzo normale e flessione</i>	<i>14</i>
5.1.2.	<i>Resistenza nei confronti delle sollecitazioni taglienti.....</i>	<i>16</i>
5.2.	VERIFICHE AGLI STATI LIMITE DI ESERCIZIO	16
5.2.1.	<i>Verifica di fessurazione</i>	<i>16</i>
5.2.2.	<i>Verifica delle tensioni in esercizio</i>	<i>17</i>
6.	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	19
7.	FASE DI DIAGNOSI - ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO SCAVO (IN ASSENZA DI INTERVENTI).....	20
7.1.	IMPORTANZA DEL FRONTE DI SCAVO	20
7.2.	ANALISI DELLE CATEGORIE DI COMPORTAMENTO	22
7.2.1.	<i>Metodo delle Linee Caratteristiche</i>	<i>23</i>
7.2.2.	<i>Metodo di Tamez.....</i>	<i>26</i>
7.2.3.	<i>Analisi assialsimmetriche.....</i>	<i>31</i>
7.2.4.	<i>Considerazioni conclusive sul comportamento del fronte allo scavo.....</i>	<i>38</i>
8.	FASE DI TERAPIA - FASI ESECUTIVE E METODOLOGIA DI INTERVENTO	40
8.1.	BY-PASS CARRABILE - SEZIONE TIPO B2.....	40
8.1.1.	<i>Fasi esecutive</i>	<i>40</i>
8.1.2.	<i>Interventi previsti</i>	<i>41</i>
8.2.	BY-PASS CARRABILE - SEZIONE TIPO C2.....	41
8.2.1.	<i>Fasi esecutive</i>	<i>41</i>
8.2.2.	<i>Interventi previsti</i>	<i>42</i>
8.3.	BY-PASS PEDONALE - SEZIONE TIPO B0.....	43
8.3.1.	<i>Fasi esecutive di realizzazione della protesi</i>	<i>43</i>

8.3.2.	<i>Interventi previsti</i>	43
8.4.	BY-PASS PEDONALE - SEZIONE TIPO B2.....	44
8.4.1.	<i>Fasi esecutive di realizzazione della protesi</i>	44
8.4.2.	<i>Interventi previsti</i>	45
8.5.	BY-PASS PEDONALE - SEZIONE TIPO C2	45
8.5.1.	<i>Fasi esecutive di realizzazione della protesi</i>	45
8.5.2.	<i>Interventi previsti</i>	46
9.	VERIFICHE STATICHE	48
9.1.	PREMESSA.....	48
9.2.	VERIFICA DI STABILITÀ DEL FRONTE – METODO DI TAMEZ.....	49
9.3.	VERIFICA DI STABILITÀ DEL FRONTE – ANALISI ASSIALSIMMETRICHE	54
9.4.	METODO DELLE LINEE CARATTERISTICHE.....	61
9.5.	ANALISI ALLE DIFFERENZE FINITE - VERIFICHE STATICHE	66
9.5.1.	<i>Analisi numeriche</i>	66
9.5.2.	<i>Geometrie dei modelli</i>	67
9.5.3.	<i>Leggi di comportamento del materiale</i>	67
9.5.4.	<i>Parametri geomeccanici</i>	68
9.5.5.	<i>Stato di sforzo iniziale</i>	69
9.5.6.	<i>Carichi idraulici</i>	69
9.5.7.	<i>Scavo delle gallerie</i>	70
9.5.8.	<i>Prerivestimento e rivestimento definitivo</i>	72
9.5.8.1.	Prerivestimenti - Caratteristiche dei materiali	72
9.5.8.2.	Rivestimenti definitivi - Caratteristiche dei materiali.....	73
9.5.9.	<i>Criteri di verifica delle sezioni di scavo</i>	74
9.5.9.1.	Verifica del rivestimento di prima fase	74
9.5.9.2.	Verifica del rivestimento definitivo	76
9.5.10.	<i>ANALISI 1 – BY- PASS CARRABILE - SEZIONE TIPO B2</i>	78
9.5.10.1.	Fasi di calcolo	78
9.5.10.2.	Esame dei risultati.....	80
9.5.10.3.	Verifiche statiche.....	81
9.5.11.	<i>ANALISI 2 – BY- PASS CARRABILE - SEZIONE TIPO C2</i>	91
9.5.11.1.	Fasi di calcolo	91
9.5.11.2.	Esame dei risultati.....	92
9.5.11.3.	Verifiche statiche.....	93
9.5.12.	<i>ANALISI 3 – BY- PASS CARRABILE - SEZIONE TIPO B0</i>	103
9.5.12.1.	Fasi di calcolo	103
9.5.12.2.	Esame dei risultati.....	104
9.5.12.3.	Verifiche statiche.....	105



9.5.13.	ANALISI 4 – BY- PASS PEDONALE - SEZIONE TIPO C2.....	114
9.5.13.1.	Fasi di calcolo	114
9.5.13.2.	Esame dei risultati.....	115
9.5.13.3.	Verifiche statiche.....	116
10.	VERIFICHE SISMICHE.....	125
10.1.	PREMESSA.....	125
10.1.1.	ANALISI 1 – BY- PASS CARRABILE - SEZIONE TIPO B2	131
10.1.2.	ANALISI 2 – BY- PASS CARRABILE - SEZIONE TIPO C2.....	135
10.1.3.	ANALISI 3 – BY- PASS PEDONALE - SEZIONE TIPO B0.....	139
10.1.4.	ANALISI 4 – BY- PASS PEDONALE - SEZIONE TIPO C2.....	141
11.	ANALISI INNESTI BYPASS CARRABILI E PEDONALI, NICCHIE SOS	143
11.1.	INTRODUZIONE	143
11.2.	GEOMETRIE DELLE ZONE DI INNESTO	144
11.3.	RIEPILOGO STATO TENSIONALE GALLERIA PRINCIPALE.....	150
11.4.	IPOSTESI PRINCIPALI E ASSUNZIONI PER IL CALCOLO.....	151
11.4.1.	Geometria della modellazione	151
11.4.2.	Interazione terreno-struttura	151
11.4.3.	Materiali utilizzati nelle analisi.....	152
11.5.	BYPASS CARRABILI – ANALISI 1	153
11.5.1.	Modello “di taratura”	153
11.5.2.	Modello “di progetto”.....	156
11.6.	BYPASS CARRABILI – ANALISI 2	160
11.6.1.	Modello “di taratura”	160
11.6.2.	Modello “di progetto”.....	163
11.7.	BYPASS PEDONALI – ANALISI 1	167
11.7.1.	Modello “di taratura”	167
11.7.2.	Modello “di progetto”.....	170
11.8.	BYPASS PEDONALI – ANALISI 2.....	174
11.8.1.	Modello “di taratura”	174
11.8.2.	Modello “di progetto”.....	177
11.9.	NOTA SUL PROGETTO DELLE ARMATURE	181
11.10.	PROGETTO ARMATURA INNESTO BYPASS CARRABILE	181
11.10.1.	Tipologia 1.....	182
11.10.1.1.	Calotta: sezione di mezzeria	183
11.10.1.2.	Piedritto: sezione di base	184
11.10.1.3.	Arco rovescio: sezione di mezzeria	185
11.10.1.4.	Armatura a taglio.....	186
11.10.2.	Tipologia 2.....	187

11.10.2.1. Calotta: sezione di mezzeria	188
11.10.2.2. Piedritto: sezione di base	189
11.10.2.3. Arco rovescio: sezione di mezzeria	190
11.10.2.4. Armatura a taglio	191
11.11. PROGETTO ARMATURA INNESTO BYPASS PEDONALE	192
11.12. TIPOLOGIA 1	192
11.12.1.1. Calotta: sezione di mezzeria	192
11.12.1.2. Piedritto: sezione di base	194
11.12.1.3. Arco rovescio: sezione di mezzeria	195
11.12.1.4. Armatura a taglio	196
11.12.2. Tipologia 2	196
11.12.2.1. Calotta: sezione di mezzeria	197
11.12.2.2. Piedritto: sezione di base	198
11.12.2.3. Arco rovescio: sezione di mezzeria	199
11.12.2.4. Armatura a taglio	200
11.13. PROGETTO ARMATURA INNESTO NICCHIA SOS	201
11.13.1. Tipologia 1	201
11.13.1.1. Calotta: sezione di mezzeria	202
11.13.1.2. Piedritto: sezione di base	203
11.13.1.3. Arco rovescio: sezione di mezzeria	204
11.13.1.4. Armatura a taglio	205
11.13.2. Tipologia 2	205
11.13.2.1. Calotta: sezione di mezzeria	206
11.13.2.2. Piedritto: sezione di base	207
11.13.2.3. Arco rovescio: sezione di mezzeria	208
11.13.2.4. Armatura a taglio	209
12. ANALISI NICCHIE SOS	210
12.1. INTRODUZIONE E METODO DI CALCOLO	210
12.2. PARETE DI CHIUSURA: MODELLO DI CALCOLO	215
12.2.1. <i>Situazione 1: modello di calcolo e risultati</i>	216
12.2.2. <i>Situazione 2: modello di calcolo e risultati</i>	218
12.3. PARETE DI CHIUSURA: VERIFICHE SEZIONALI SITUAZIONE 1	220
12.3.1. <i>Lato corto (azioni M11 – V13)</i>	220
12.3.2. <i>Lato lungo (azioni M22 – V23)</i>	221
12.4. PARETE DI CHIUSURA: VERIFICHE SEZIONALI SITUAZIONE 2	223
12.4.1. <i>Lato corto (azioni M11 – V13)</i>	223
12.4.2. <i>Lato lungo (azioni M22 – V23)</i>	224
13. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	226



14. ALLEGATI NUMERICI.....	227
14.1. LINEE CARATTERISTICHE	227
14.1.1. <i>DIAGNOSI</i>	227
14.1.2. <i>TERAPIA</i>	232
14.1.3. <i>ANALISI 1 – BY- PASS CARRABILE - SEZIONE TIPO B2</i>	237
14.1.4. $k_0 = 1 - \sin \phi$	238
14.1.5. $k_0 = 1,2$	244
14.2. ANALISI 2 – BY- PASS CARRABILE - SEZIONE TIPO C2.....	250
14.2.1. $k_0 = 1 - \sin \phi$	251
14.2.2. $k_0 = 1,2$	257
14.3. ANALISI 3 – BY- PASS CARRABILE - SEZIONE TIPO B0	263
14.3.1. $k_0 = 1 - \sin \phi$	264
14.3.2. $k_0 = 1,2$	270
14.4. ANALISI 4 – BY- PASS PEDONALE - SEZIONE TIPO C2.....	276
14.4.1. $k_0 = 1 - \sin \phi$	277
14.4.2. $k_0 = 1,2$	283

2. INTRODUZIONE

Oggetto della presente relazione sono le analisi numeriche e le verifiche statiche condotte per il dimensionamento e la verifica degli interventi previsti per lo scavo dei By-pass pedonali e carrabili della galleria naturale “Verduno”, opera facente parte del Lotto 6, Tronco 2 del collegamento autostradale A6-A21 (Asti-Cuneo).

Le analisi sono state condotte impiegando la parametrizzazione geotecnica messa a punto in sede di P.E. e P.D., descritti nella “Relazione geologica”, “Relazione idrogeologica” e “Relazione geotecnica” di progetto (documenti 2.6E-rD.2.1.02, 03, e 04). In questi documenti è inoltre descritto in dettaglio, a valle degli studi condotti, il modello geologico-geotecnico di riferimento, sia in termini litostratigrafici, sia riguardo alle condizioni piezometriche ed alla parametrizzazione geotecnica. Nella “Relazione geotecnica” sono inoltre individuate le criticità presenti lungo il tracciato ed i conseguenti scenari di rischio, individuando le soluzioni progettuali più adeguate.

Le analisi progettuali della galleria sono state sviluppate con riferimento all’Approccio “ADECO-RS”, secondo le seguenti fasi:

- Fase conoscitiva, nella quale si sono raccolte le informazioni geologiche-geotecniche relative agli ammassi attraversati, con riferimento al quadro geologico-geomeccanico ed idrogeologico desunto dalle campagne di indagine ed in particolare dalle indagini integrative e dagli studi condotti in questa fase di progettazione esecutiva;
- Fase di diagnosi, nella quale si è valutato il comportamento del fronte della galleria in fase di scavo, in assenza di interventi, individuando i fenomeni deformativi e le condizioni di stabilità;

- Fase di terapia, dove sono stati individuati gli interventi necessari a contenere i fenomeni deformativi generatisi in fase di scavo, nonché la successione delle fasi esecutive. In questa fase sono state individuate le modalità di avanzamento per lo scavo della galleria.

Per gli esiti della fase conoscitiva si rimanda, come già detto, alle relazioni geologiche-geotecniche. Nel seguito si riportano le analisi condotte in fase di diagnosi, la descrizione puntuale degli interventi previsti, nonché gli esiti delle verifiche statiche eseguite. Relativamente a queste si sono affrontate:

- le verifiche di stabilità dei fronti di scavo;
- le verifiche dei rivestimenti, mediante analisi con Linee Caratteristiche e metodo alle differenze finite, impiegando rispettivamente LINCA, sviluppato da ROCKSOIL SpA, e il codice di calcolo FLAC 7.0, prodotto dalla Itasca Consulting. Le analisi condotte sono volte alla verifica dell'efficacia degli interventi proposti nel contenimento dei livelli deformativi a fronte di tensioni nei rivestimenti compatibili con i valori ammissibili per i materiali impiegati;

Nell'ultima parte della relazione sono state analizzate anche le zone di innesto con la galleria principale dei bypass carrabili e pedonali e delle nicchie SOS.

3. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Il progetto dell'opera in oggetto è stato condotto nel rispetto della Normativa in vigore e di alcune Raccomandazioni.

I principali riferimenti normativi sono i seguenti:

- Norme Tecniche per le Costruzioni del D.M. 14/01/2008.
- Circolare esplicativa n° 617 del 02/02/2009: "Istruzioni per l'applicazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni".
- Legge n° 1086 del 05/11/1971: Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica.
- D.M. LL.PP. 11/03/1988: Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione.
- Circ. Min. LL.PP 24/09/88 n.30483. Legge 02/02/74, n.64 art.1. D.M. 11/03/1988: Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione. Istruzioni per l'applicazione.
- Raccomandazioni AICAP (Maggio 1993): Ancoraggi nei terreni e nelle rocce.
- EN 1992-1-1: Eurocodice 2. Progettazione delle strutture di calcestruzzo. Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici.



- EN 1997-1: Eurocodice 7. Progettazione geotecnica. Parte 1: Regole generali.
- EN 1998-5: Eurocodice 8. Progettazione delle strutture per la resistenza sismica. Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.

4. SOFTWARE UTILIZZATI

Ai fini dell'esecuzione dei calcoli geotecnici e strutturali, nonché nella redazione della presente relazione, si è fatto uso dei seguenti software:

- FLAC, Versione 7.0. Fast Lagrangian Analysis of Continua, sviluppato da ITASCA Consulting;
- LINCA 2005, Programma di tracciamento delle Linee Caratteristiche, sviluppato da RockSoil Spa;

4.1. FLAC 7.0

Le analisi tenso-deformative presentate nel seguito, sono state condotte impiegando il codice di calcolo FLAC 7.0 (Fast Lagrangian Analysis of Continua), sviluppato da ITASCA Consulting, il quale consente di affrontare problemi di meccanica del continuo, determinando gli stati tensionali e deformativi in un dominio bidimensionale, le cui caratteristiche sono definite da leggi di comportamento, di tipo elastico o plastico, e da imposte condizioni al contorno, implementando il metodo delle differenze finite. Tale metodo si basa sulla discretizzazione delle equazioni differenziali che governano il problema fisico in esame, attraverso la sostituzione delle derivate con quozienti di differenze finite. In questo modo, le equazioni differenziali vengono trasformate in equazioni algebriche, da risolversi in successivi passi di calcolo. L'algoritmo di calcolo segue uno schema lagrangiano denominato "esplicito per integrazione diretta nel tempo" (explicit time marking), il quale è in grado di lavorare agevolmente e molto velocemente per sistemi con grandi deformazioni, con stati di collasso molto avanzati e in condizioni di instabilità (la possibilità di giungere al collasso non è infatti limitata da problemi di stabilità numerica, quale l'invertibilità di matrici). L'adattamento del metodo alle

differenze finite a casi di griglia di forma qualunque segue l'approccio di Wilkins M.L..

La discretizzazione viene operata sovrapponendo alla porzione di continuo considerata un reticolo, in genere di maglie quadrilatera, in corrispondenza dei cui nodi (gridpoints) sono definite le grandezze in gioco. E' allora possibile approssimare la derivata prima di una funzione rispetto a una variabile indipendente, con il rapporto tra la variazione subita dalla funzione stessa nel passare da un nodo ad uno contiguo, e la corrispondente variazione della variabile indipendente.

Con riferimento alla figura seguente, può assumersi ad un certo istante t una delle seguenti equivalenze:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \approx \frac{u_{i+1,j}^t - u_{i,j}^t}{\Delta x},$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \approx \frac{u_{i+1,j}^t - u_{i-1,j}^t}{2\Delta x},$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \approx \frac{u_{i,j}^t - u_{i-1,j}^t}{\Delta x}.$$

In modo analogo si opera per le derivate rispetto ad y , e per le derivate di ordine superiore. La legge costitutiva del materiale viene espressa nella seguente forma:

$$\sigma = E \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \Rightarrow \sigma_{i,j}^t = E \cdot \frac{u_{i+1,j}^t - u_{i,j}^t}{\Delta x}$$

Il codice di calcolo FLAC usa uno schema di soluzione "esplicito condizionatamente stabile", la cui sequenza di calcolo iterativo, illustrata schematicamente nella figura seguente, comprende i seguenti passi:

- per ogni nodo della griglia si valuta la massa m , la risultante delle forze esterne F_e (gravità, carichi esterni ...), la risultante delle forze interne F_i , calcolata per integrazione degli sforzi nelle zone collegate al nodo

stesso, così che è possibile determinare la forza squilibrata agente sul nodo F_u (unbalanced force $F_u = F_e - F_i$);

- per ogni gridpoint si scrive l'equazione di Newton $F_u = m \cdot a$, tramite la quale è possibile determinare l'accelerazione del nodo in esame; integrando due volte l'accelerazione si ottiene la velocità e lo spostamento incrementale di ogni nodo;
- dal campo di spostamenti incrementali, è possibile risalire al campo di deformazioni incrementali e quindi, attraverso il legame costitutivo dei materiali, al campo di variazioni degli sforzi nel reticolo;
- la variazione degli sforzi comporta la modifica, per ogni nodo della griglia, della risultante delle forze interne e conseguentemente la necessità di rideterminare la F_u , dando inizio ad un nuovo passo di calcolo. Il processo iterativo ha termine qualora si ottenga una forza squilibrata che abbia un valore minore di una tolleranza prestabilita.

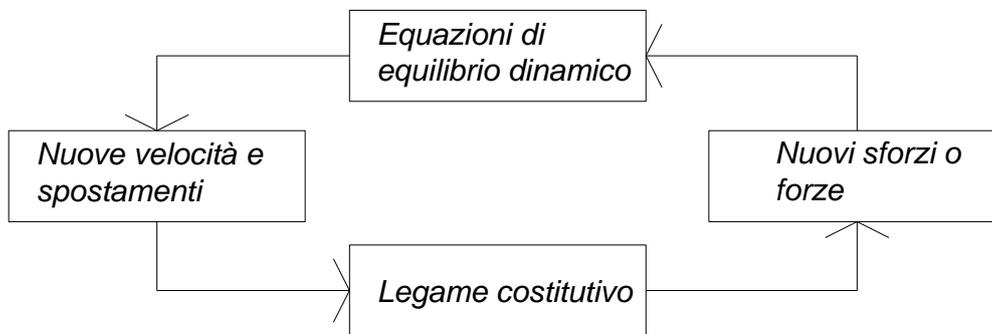


Figura 1 – Fasi di computazione del codice di calcolo FLAC

4.2. LINCA

LINCA è un codice di calcolo che permette il tracciamento delle Linee caratteristiche al fronte e lontano dal fronte. Il metodo seguito è analitico e permette di trovare soluzione in forma chiusa.

Il principio si basa sul legame esistente tra la pressione applicata sul contorno del cavo di una galleria circolare profonda e lo spostamento radiale del contorno stesso. Al diminuire della pressione interna cresce lo spostamento. La relazione tra lo spostamento radiale del cavo e la pressione applicata definisce la curva caratteristica della galleria.

Si potrà dunque calcolare la curva caratteristica della galleria e le curve caratteristiche delle opere strutturali, determinando, all'intersezione, la pressione di equilibrio.

La curva caratteristica del rivestimento è individuata dalla rigidezza k della struttura e dallo spostamento radiale che si è già sviluppato prima dell'installazione del supporto messo in opera ad una determinata distanza dal fronte, distanza rappresentata dal valore u nei grafici esposti in relazione e che considerano l'applicazione di elementi di rivestimento.

Il metodo può essere usato se le seguenti condizioni sono rispettate :

- campo delle pressioni isotropo dell'ammasso roccioso indisturbato;
- ammasso roccioso omogeneo e isotropo;
- profilo della galleria circolare;
- stato di deformazione piano.

5. CRITERI DI VERIFICA DEI RIVESTIMENTI

I criteri di verifica adottati per il calcolo delle armature sono quelli presenti nella normativa italiana D.M.08 al capitolo 4, per le sezioni in cemento armato inflesse e presso inflesse, sia per lo Stato Limite Ultimo che per lo Stato Limite di Esercizio. Nel seguito si passeranno in rassegna tutti i criteri adottati.

5.1. VERIFICHE AGLI STATI LIMITE ULTIMI

5.1.1. Resistenza a sforzo normale e flessione

Per la valutazione della resistenza ultima delle sezioni di elementi monodimensionali si adottano le seguenti ipotesi:

- Conservazione delle sezioni piane;
- Perfetta aderenza tra acciaio e calcestruzzo;
- Resistenza a trazione del calcestruzzo nulla;
- Rottura del calcestruzzo determinata dal raggiungimento della sua capacità deformativa ultima a compressione;
- Rottura dell'armatura tesa determinata dal raggiungimento della sua capacità deformativa ultima.

Si assumeranno come diagrammi tensione-deformazione i diagrammi parabola-rettangolo e elastico perfettamente plastico rispettivamente per calcestruzzo e acciaio.

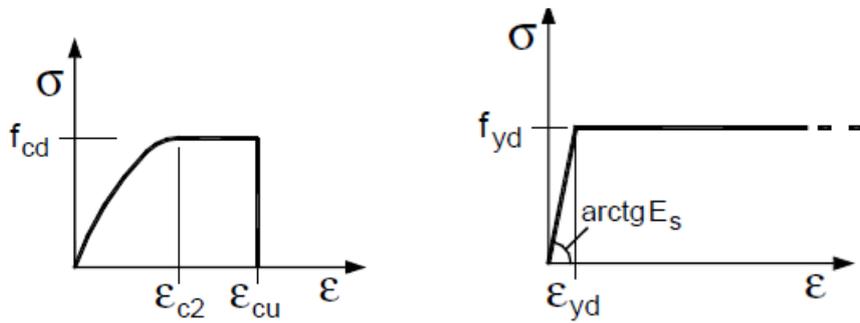


Figura 2 - Diagrammi σ - ε adottati (D.M.2008-Figure 4.1.1 e 4.1.2)

Per la classe di calcestruzzo adoperata i valori di deformazione ε_{c2} ed ε_{cu} valgono rispettivamente 0.2% e 0.35%.

Definite le ipotesi di base e i diagrammi tensione-deformazione dei materiali è possibile illustrare l'analisi della sezione.

Con riferimento alla sezione pressoinflessa in figura, la verifica di resistenza si conduce controllando che:

$$M_{Rd} = M_{Rd}(N_{Ed}) \geq M_{Ed}$$

Dove:

M_{Rd} è il valore di calcolo del momento resistente corrispondente a N_{Ed} ;

N_{Ed} è il valore di calcolo della componente assiale dell'azione;

M_{Ed} è il valore di calcolo della componente flettente dell'azione.

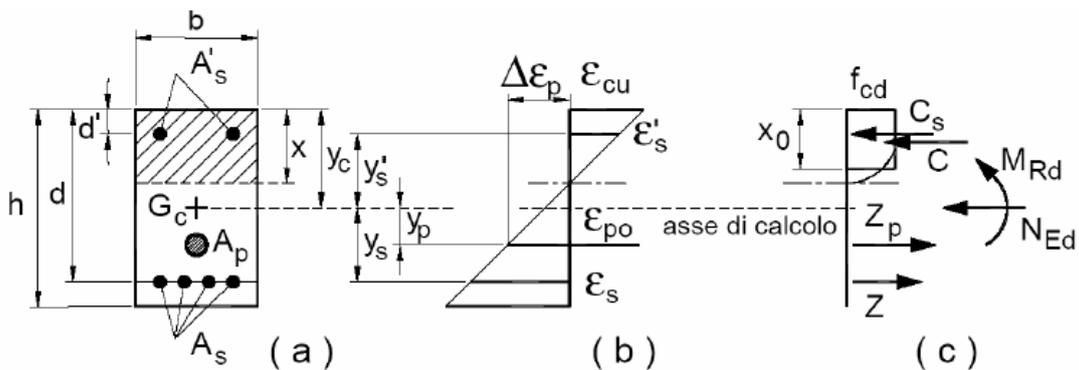


Figura 3 - Sezione pressoinflessa (D.M.2008-Figura 4.1.3)

5.1.2. Resistenza nei confronti delle sollecitazioni taglianti

Gli elementi delle gallerie non sono provvisti di una specifica armatura a taglio, pertanto la resistenza verrà valutata con la formulazione seguente:

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

con:

$$k = 1 + (200/d)^{1/2} < 2$$

$$v_{\min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$$

d altezza utile

$\rho_1 = A_{sl} / (b_w d)$ rapporto geometrico di armatura longitudinale ($\leq 0,02$)

$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c$ tensione media di compressione della sezione ($\leq 0,2 f_{cd}$)

b_w è la larghezza minima della sezione (in mm)

La verifica di resistenza al solito si pone:

$$V_{Rd} \geq V_{Ed}$$

5.2. VERIFICHE AGLI STATI LIMITE DI ESERCIZIO

5.2.1. Verifica di fessurazione

La verifica di fessurazione è stata condotta nei confronti dello stato limite di apertura delle fessure, per il quale, fissata la combinazione di azioni, il valore limite di apertura delle fessure è pari ad uno dei seguenti valori nominali:

$$w_1 = 0,2 \text{ mm}$$

$$w_2 = 0,3 \text{ mm}$$

$$w_3 = 0,4 \text{ mm}$$

La norma prescrive di considerare le combinazioni di carico frequente e quasi permanente mentre il limite sull'ampiezza della fessura dipende dalle condizioni ambientali.



CONDIZIONI AMBIENTALI	CLASSE DI ESPOSIZIONE
Ordinarie	X0, XC1, XC2, XC3, XF1
Aggressive	XC4, XD1, XS1, XA1, XA2, XF2, XF3
Molto aggressive	XD2, XD3, XS2, XS3, XA3, XF4

Tabella 1 – Condizioni ambientali (D.M.2008-Tabella 4.1.III)

Le classi di esposizione nel caso in esame sono la XF3 (classe minima C32/40) e la XA3 (classe minima C35/45) pertanto si hanno condizioni ambientali aggressive.

Per tali condizioni i limiti di ampiezza delle fessure sono riportati nella tabella sotto riportata per il caso di armature poco sensibili alla corrosione. Verranno considerati solo i limiti della combinazione quasi permanente.

Gruppi di esigenze	Condizioni ambientali	Combinazione di azioni	Armatura			
			Sensibile		Poco sensibile	
			Stato limite	w_d	Stato limite	w_d
a	Ordinarie	frequente	ap. fessure	$\leq w_2$	ap. fessure	$\leq w_3$
		quasi permanente	ap. fessure	$\leq w_1$	ap. fessure	$\leq w_2$
b	Aggressive	frequente	ap. fessure	$\leq w_1$	ap. fessure	$\leq w_2$
		quasi permanente	decompressione	-	ap. fessure	$\leq w_1$
c	Molto aggressive	frequente	formazione fessure	-	ap. fessure	$\leq w_1$
		quasi permanente	decompressione	-	ap. fessure	$\leq w_1$

Tabella 2 - Limiti sull'ampiezza di apertura delle fessure (D.M.2008-Tabella 4.1.IV)

5.2.2. Verifica delle tensioni in esercizio

Si considereranno i limiti imposti dalla norma sulle tensioni di compressione nel cls per combinazione di carico quasi permanente:

$$\sigma_c < f_{ck} \times 0.25 \text{ (calcestruzzo non armato)}$$

$$\sigma_c < 0.45 f_{ck} \text{ (calcestruzzo armato)}$$



Per l'acciaio invece vale la limitazione sotto riportata. Tale limite è imposto dalla norma per la combinazione di carico rara:

$$\sigma_s < 0.80f_{yk} \text{ (acciaio di armatura)}$$

Per lo spritz beton si considererà la seguente limitazione sulla tensione di compressione nel cls:

$$\sigma_c < f_{ck} \times 0.60 \text{ (spritz-beton)}$$



6. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

Si veda Elenco elaborati

7. FASE DI DIAGNOSI - ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO SCAVO (IN ASSENZA DI INTERVENTI)

Nel presente capitolo si esamina il comportamento allo scavo del fronte, in funzione delle caratteristiche geomeccaniche degli ammassi e considerate le coperture geostatiche più rappresentative presenti in progetto, in assenza di interventi.

7.1. IMPORTANZA DEL FRONTE DI SCAVO

La valutazione dell'evoluzione dello stato tensionale nel terreno a seguito della realizzazione di una galleria viene condotta attraverso l'analisi dei fenomeni deformativi del mezzo attraversato, che forniscono informazioni sul comportamento della cavità nei riguardi della stabilità a breve e a lungo termine.

Il comportamento del cavo e del fronte è infatti funzione, oltre che delle caratteristiche geometriche della cavità stessa e dei carichi litostatici cui è soggetta, delle caratteristiche di resistenza e di deformabilità del nucleo d'avanzamento, inteso come il prisma di terreno individuato a monte del fronte dallo stesso profilo di scavo per una profondità di circa un diametro. Infatti, se il nucleo non è costituito da materiale sufficientemente rigido e resistente, tale da mantenere in campo elastico il proprio comportamento tenso-deformativo, si sviluppano fenomeni deformativi e plasticizzazioni rilevanti in avanzamento sul fronte, cui conseguono il detensionamento e il decadimento delle caratteristiche geomeccaniche del terreno al contorno del cavo. Se, viceversa, il comportamento del nucleo d'avanzamento si mantiene in campo elastico, esso 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.

Il comportamento del fronte di scavo, al quale è legato quello della cavità, può essere sostanzialmente ricondotto alle seguenti tre categorie:

Categoria A: Galleria a fronte stabile

Se il fronte di scavo è stabile, lo stato tensionale al contorno della cavità in prossimità del fronte si mantiene in campo prevalentemente elastico, ed i fenomeni deformativi osservabili sono di piccola entità e tendono ad esaurirsi rapidamente. In questo caso anche il comportamento del cavo sarà stabile, mantenendosi prevalentemente in campo elastico, e quindi non si rendono necessari interventi preventivi di consolidamento, se non localizzati e in misura molto ridotta. Il rivestimento definitivo costituirà allora il margine di sicurezza per la stabilità a lungo termine.

Categoria B: Galleria a fronte stabile a breve termine

Questa condizione si verifica quando lo stato tensionale indotto dall'apertura della cavità supera la resistenza meccanica del materiale al fronte, che non ha più un comportamento di tipo elastico, ma rientra nell'ambito di un comportamento di tipo elasto-plastico. I fenomeni deformativi connessi con la conseguente redistribuzione delle tensioni risultano più accentuati che nel caso precedente, e producono nell'ammasso al fronte una decompressione che porta al superamento della resistenza caratteristica del materiale. Questa decompressione può essere opportunamente controllata e con adeguati interventi di preconsolidamento del fronte e/o di consolidamento al contorno del cavo. In tal modo si fornisce l'opportuno contenimento all'ammasso, che manterrà un comportamento stabile. Nel caso non si prevedano opportuni interventi, lo stato tenso-deformativo potrà evolvere verso situazioni di instabilità del cavo durante le fasi realizzative. Anche in questo caso, il rivestimento definitivo costituirà il margine di sicurezza per il comportamento a lungo termine.

Categoria C: Galleria a fronte instabile

L'instabilità progressiva del fronte di scavo è attribuibile ad un'accentuarsi dei fenomeni deformativi in campo plastico, che risultano immediati e più rilevanti,

manifestandosi prima ancora che avvenga lo scavo, oltre il fronte stesso. Tali deformazioni producono una decompressione significativa dell'ammasso al fronte, e portano ad un progressivo e rapido decadimento delle caratteristiche geomeccaniche del materiale. Questo tipo di decompressione più accentuata deve essere contenuta prima dell'arrivo del fronte di scavo, e richiede pertanto interventi di preconsolidamento sistematici in avanzamento, che consentano di creare artificialmente l'effetto arco capace di far evolvere la situazione verso configurazioni di equilibrio stabile.

Per la determinazione delle categorie di comportamento, occorre prendere in esame le seguenti caratteristiche:

- le caratteristiche di resistenza e deformabilità dell'ammasso connesse con le varie strutture geologiche che interessano le gallerie;
- i carichi litostatici corrispondenti alle coperture in gioco;
- la forma e le dimensioni della sezione di scavo;
- lo schema di avanzamento.

7.2. ANALISI DELLE CATEGORIE DI COMPORTAMENTO

Nella fase di diagnosi, sulla base degli elementi raccolti nella fase conoscitiva, vengono sviluppate le previsioni sul comportamento deformativo del cavo in assenza di interventi, al fine di giungere all'individuazione di tratte a comportamento omogeneo, suddivise nelle tre categorie di comportamento precedentemente descritte.

Gli strumenti numerici adottati per la determinazione del comportamento dell'ammasso allo scavo sono stati due:

- 1) Metodo delle Linee Caratteristiche;
- 2) Analisi di stabilità al fronte mediante il "Metodo di Tamez".

L'analisi di stabilità al fronte mediante "Metodo di Tamez" risulta utile laddove valori bassi di copertura geostatica sconsiglino l'applicazione del "Metodo delle Linee Caratteristiche"; infatti, venendo a mancare l'ipotesi di base, ovvero che la pressione al contorno del cavo sia di tipo idrostatica, i risultati forniti dal "Metodo delle Linee Caratteristiche" sarebbero poco rappresentativi del reale comportamento dell'ammasso; in questi casi, un'indicazione della stabilità del fronte di scavo a basse coperture può, invece, essere fornita dal Metodo di Tamez che valuta l'equilibrio limite del prisma di terreno potenzialmente instabile in prossimità del fronte; tuttavia questo strumento non fornisce indicazioni sul comportamento deformativo dell'ammasso in prossimità del fronte e quindi non può essere impiegato quale unico strumento per la definizione degli interventi di stabilizzazione da prevedere in avanzamento.

7.2.1. Metodo delle Linee Caratteristiche

Le linee caratteristiche consistono nel simulare lo scavo di una galleria nell'ipotesi di simmetria assiale e di stato di deformazione piana.

Per linee caratteristiche di una cavità si intendono delle curve che legano le pressioni di contenimento, esercitate in senso radiale sul bordo della galleria dalle opere di stabilizzazione e di rivestimento, agli spostamenti radiali al suo contorno (convergenze).

Lo scavo è rappresentato come una graduale riduzione di una pressione fittizia "p" applicata alle pareti della galleria, tramite cui si simula il progressivo deconfinamento del terreno prodotto dall'avvicinarsi del fronte di scavo alla sezione di calcolo e al successivo avanzamento del fronte stesso, cui corrisponde una convergenza radiale "u" crescente in funzione delle caratteristiche dell'ammasso.

Esse possono quindi essere utilizzate, oltre che per valutare il comportamento dell'ammasso allo scavo, anche per determinare lo stato di sollecitazione sui diversi interventi costituenti la galleria, mediante la sovrapposizione degli effetti delle curve caratteristiche della cavità e dei singoli interventi che la

costituiscono. Per ogni galleria è possibile costruire due curve caratteristiche principali:

- la linea caratteristica del fronte, valida presso il fronte di scavo, detta curva caratteristica del fronte, che tiene conto dell'effetto tridimensionale delle tensioni vicino ad esso e che permette di risalire, mediante considerazioni sulla resistenza del nucleo, all'entità della convergenza già subita dalla galleria nella sezione in corrispondenza al fronte di scavo,
- la linea caratteristica del cavo, valida per qualsiasi sezione sufficientemente lontana dal fronte, detta curva caratteristica della cavità, per la quale lo stato di tensione può considerarsi piano. In generale, ove la curva caratteristica non intersechi in un valore finito l'asse delle deformazioni radiali, la galleria risulta instabile senza adeguati interventi di stabilizzazione.

FIGURA 11. PROGRESSIVO DECONFINAMENTO DEL BORDO DI SCAVO PER SIMULARE L'AVANZAMENTO DELLA GALLERIA

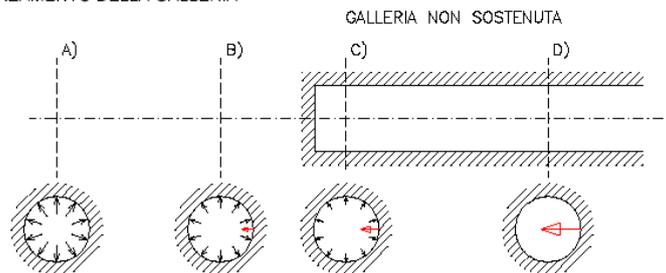


Figura 4 – Modello schematico della cavità – Galleria non sostenuta

Se la galleria è scavata in assenza di sostegni, il valore finale della pressione di confinamento è pari a 0; in caso contrario allo stato finale è presente una pressione di confinamento > 0 che rappresenta la pressione di equilibrio del cavo ottenuta dall'intersezione della curva caratteristica della cavità e dei rivestimenti impiegati come spiegato nel seguito in dettaglio.

Sulla base delle elaborazioni effettuate, è quindi possibile esprimere delle considerazioni sul comportamento dell'ammasso allo scavo, con particolare riguardo alla prevedibile entità dei fenomeni deformativi del fronte e del cavo e



all'estensione dell'eventuale fascia di materiale al contorno della cavità in cui il livello tensionale supera il limite elastico.

Valutando lo spostamento al fronte "u_f" è possibile pertanto individuare a priori il comportamento della galleria, distinguendo tra fronte stabile (A), stabile a breve termine (B) ed instabile (C), secondo la classificazione A.De.Co.Rs già presentata nei paragrafi precedenti.

In generale il Metodo delle Linee Caratteristiche è valido nei casi in cui si ritenga lecito ipotizzare che l'andamento delle sollecitazioni indotte dallo scavo, sotto l'azione delle spinte di montagna, sia di tipo idrostatico; ciò si verifica generalmente per coperture almeno H>3D (D = diametro di scavo della galleria); valori di copertura inferiori conducono a un risultato poco rappresentativo dell'effettivo comportamento dell'ammasso roccioso.

Le Linee Caratteristiche presentate in questo progetto sono quelle proposte da Attemberg-Lombardi.

Si sono costruite le linee caratteristiche relative alle situazioni a diverso comportamento geomeccanico, con riferimento alle **Unità 7** (Argille di Sant'Agata) e all'**Unità 6** (Formazione dei Gessi) e alle dimensioni scavo delle due tipologie di By-pass, carrabili e pedonali. Il loro andamento, calcolato sulla base dei parametri geomeccanici caratteristici dei materiali attraversati, è riportato nelle figure allegate alla presente relazione. Nella seguente tabella sono riassunti i principali risultati forniti dalle elaborazioni numeriche condotte.

Formazione geomeccanica	R [m]	H [m]	H/D [-]	Σ	Parametri geomeccanici di calcolo								Risultati Linee Caratteristiche											
					γ	c _p	c _r	φ _p	φ _r	ν	E _p	E _r	U	U _f	(U-U _f)	U/R ₀	U _f /R ₀	(U-U _f)/R ₀	R _p /R ₀	Fascia di scavo	R _{pl} /R ₀	Fascia di fronte	R _{1/2 nat.}	Cat.
					[kN/m ³]	[kPa]	[kPa]	[°]	[°]	[-]	[MPa]	[MPa]	[cm]	[cm]	[cm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]
Unità 7-Limi argillosi/Marne	2.50	50	10.0	1	21.0	80	80	30	30	0.3	180	180	5.68	2.98	2.70	2.3%	1.2%	1.1%	2.07	2.68	1.56	1.40	13.86	B
		65	13.0	2	21.0	100	100	30	30	0.3	200	200	6.88	3.58	3.30	2.8%	1.4%	1.3%	2.11	2.78	1.58	1.45	17.32	B
	4.50	50	5.6	3	21.0	80	80	30	30	0.3	180	180	10.23	5.48	4.75	2.3%	1.2%	1.1%	2.07	4.82	1.58	2.61	13.86	B
		65	7.2	4	21.0	100	100	30	30	0.3	200	200	12.38	6.61	5.78	2.8%	1.5%	1.3%	2.11	4.98	1.60	2.70	17.32	B
Unità 6-Gessi	4.50	40	4.4	1	20.0	40	40	24	24	0.3	200	200	18.68	7.52	11.16	4.2%	1.7%	2.5%	3.64	11.88	2.35	6.08	6.16	B

Tabella 3 - Risultati Linee Caratteristiche

Dove:

R=raggio di scavo;



D=diámetro di scavo;
H=copertura geostatica;
 γ =peso specifico di volume;
 c_p =coesione di picco;
 c_r =coesione residua;
 ϕ_p =angolo d'attrito di picco;
 ϕ_r =angolo d'attrito residuo;
 E_p =modulo elastico di picco;
 E_r =modulo elastico residuo;
 ν =coefficiente di Poisson;
 U_f =convergenza al fronte;
 R_{pf} =raggio plastico al fronte;
 U =convergenza del cavo;
 R_p =raggio plastico del cavo;
 $R_{1/2}$ =resistenza di mezzo nucleo.

7.2.2. Metodo di Tamez

La valutazione della stabilità del fronte di scavo può essere condotta mediante l'impiego di metodi analitici semplificati all'equilibrio limite. In particolare si fa riferimento alle teorie di Tamez e Cornejo che ipotizzano che esistano dei prismi di terreno in distacco secondo sezioni longitudinali, giungendo a definire un coefficiente di sicurezza FSF nei confronti della stabilità del fronte di scavo. Il metodo dell'equilibrio limite proposto da Tamez tiene conto della riduzione dello stato di confinamento triassiale del nucleo di terreno oltre il fronte per mezzo di un meccanismo di rottura del tipo effetto volta, con il quale il volume di terreno gravante sulla corona della galleria è definito da un paraboloide, approssimato mediante tre solidi prismatici, come illustrato nelle figure seguenti.

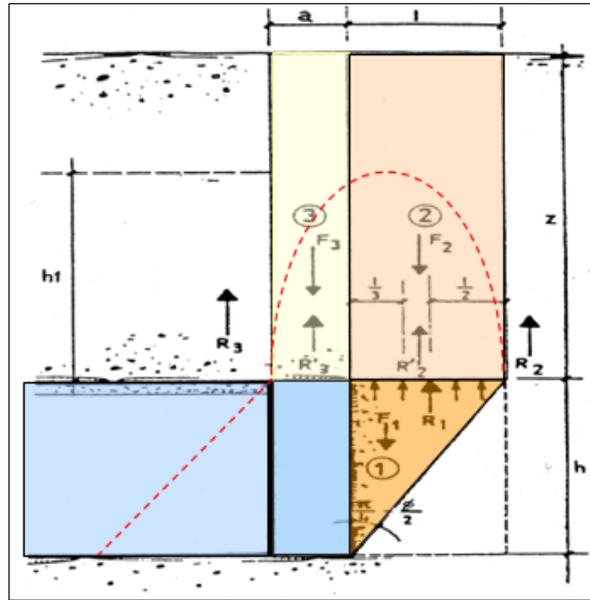


Figura 5 - Schema proposto da Tamez.

In questo modo si determinano le massime tensioni tangenziali che si possono sviluppare sulle facce di ogni prisma senza che avvengano scorrimenti (forze resistenti) e le forze di massa di ogni prisma (forze agenti). Il rapporto tra i momenti delle forze resistenti e delle forze agenti fornisce un coefficiente di sicurezza, denominato FSF (face security factor).

Al valore di FS definito dall'equilibrio limite può essere associato, indicativamente, un tipo di comportamento de formativo del fronte di scavo, secondo quanto descritto nella tabella esposta nel seguito.

FS	Comportamento del fronte di scavo
>2	Comportamento elastico
1.5 - 2	Comportamento elasto - plastico: cedimenti normalmente ammissibili
1.3 - 1.5	Comportamento elasto - plastico: cedimenti importanti
1 - 1.3	Incipiente rottura
<1	Rottura

Tabella 4 – Categorie di comportamento del fronte – FS secondo Tamez



Le analisi di stabilità del fronte sono state condotte, in linea con quanto effettuato nelle analisi tramite linee caratteristiche, relativamente alle situazioni a diverso comportamento geomeccanico, con riferimento alle **Unità 7** (Argille di Sant'Agata) e **Unità 6** (Formazione dei Gessi). Sono state inoltre condotte analisi anche in corrispondenza delle zone di imbocco in cui le gallerie attraversano le **Unità 4 e 5** (Depositi di frana), non esaminate mediante le Linee Caratteristiche date le ridotte coperture.

Le coperture considerate nelle analisi risultano essere pari a 10m per le Unità 4 e 5, pari a 40m per l'Unità 6 e pari a 50m e 65m (quota di massima copertura per i by-pass) per l'Unità 7. In presenza di falda si è fatto riferimento al peso dello scheletro solido del terreno γ' .

Recenti prove di laboratorio effettuati su campioni indisturbati prelevati con perforazioni eseguite nella zona della Cascina dello Spià, hanno mostrato che i materiali sono sovraconsolidati meccanicamente con presenza di fenomeni di cementificazione. Alla luce di questo si è ritenuto opportuno esaminare anche valori di k maggiori di 1 effettuando analisi con due valori di k_0 così da coprire il possibile range di variabilità presente nel contesto in esame:

- $k_0 = 1 - \sin \phi$;
- $k_0 = 1,2$ (condizione di materiale sovra consolidato).

Nel seguito sono riepilogate le analisi svolte ed i risultati ottenuti in termini di fattore di sicurezza ai diversi valori di copertura. Nelle analisi si è considerata una falda residua nella fase transitoria di scavo pari a 10m in chiave calotta.

Analisi 1 ($k_0 = 1 - \sin \phi$)



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo bypass carrabili e pedonali

ANALISI STABILITA' DEL FRONTE - FASE DI DIAGNOSI - Tamez & Cornejo							
Formazione	Copertura (m)	D _{tunnel} (m)	γ (kN/m ³)	φ (°)	c' (kPa)	Falda reasidua in fase di scavo [m]	FSF
Unita 4/5 Gessi	10	5	20	32	5	-	0.17
Unita 6 Gessi	40	9	20	24	40	Falda in chiave calotta [m]	1.44
Unita 7 limi argillosi - marne	50	5	21	30	100	10	1.74
		9					1.58
	65	5					1.67
		9					1.47

Tabella 5 - Risultati Metodo di Tamez

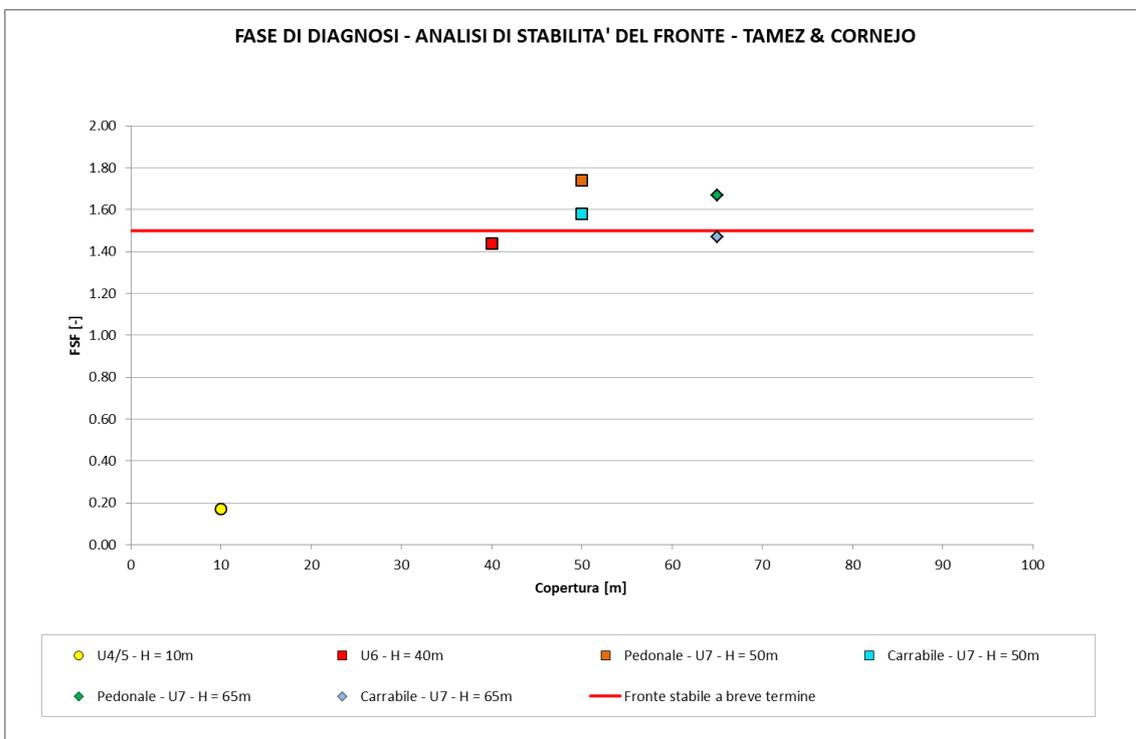


Figura 6 - Risultati Metodo di Tamez

Dai risultati esposti nella tabella di sintesi si osserva come in presenza delle Unità 6 e 7 si hanno fattori di sicurezza nell'intorno di 1,5, mentre in presenza delle Unità 4 e 5, inferiori ad 1.

Analisi 2 ($k_0 = 1,2$)



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo bypass carrabili e pedonali

ANALISI STABILITA' DEL FRONTE - FASE DI DIAGNOSI - Tamez & Cornejo							
Formazione	Copertura (m)	D _{tunnel} (m)	γ (kN/m ³)	φ (°)	c' (kPa)	Falda residua in fase di scavo [m]	FSF
Unita 4/5 Gessi	10	5	20	32	5	-	0.09
Unita 6 Gessi	40	9	20	24	40	Falda in chiave calotta [m]	1.17
Unita 7 limi argillosi - marne	50	5	21	30	100	10	1.54
		9					1.48
	65	5					1.49
		9					1.41

Tabella 6 - Risultati Metodo di Tamez

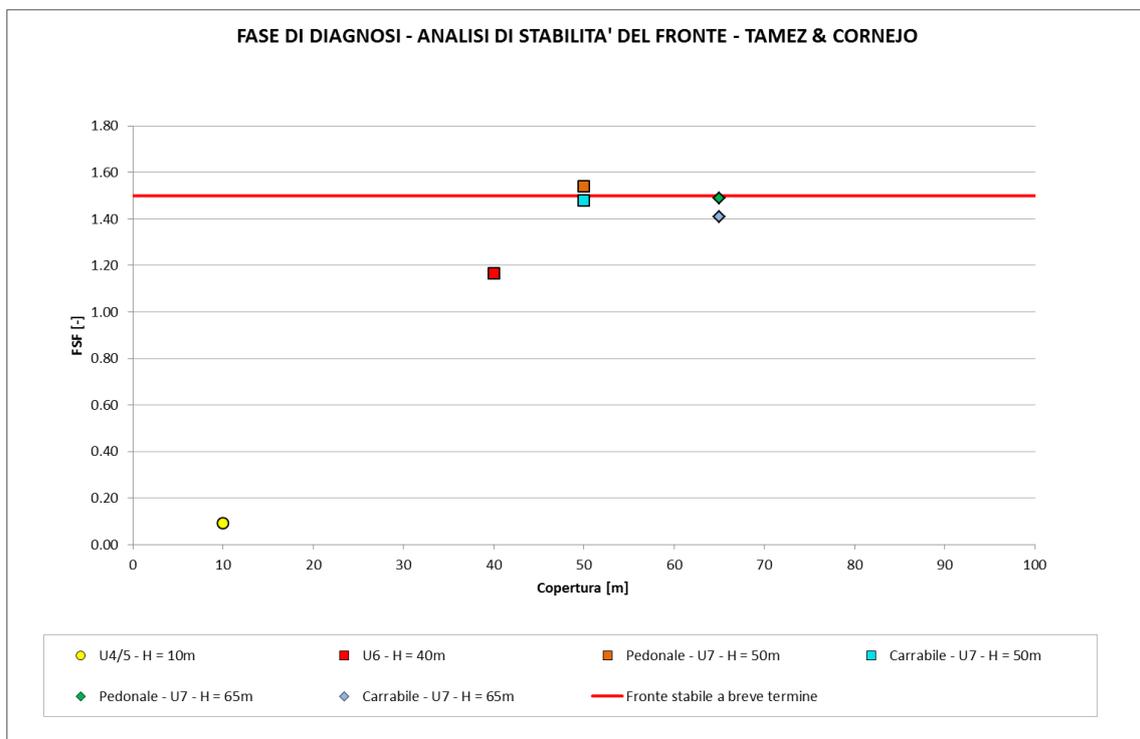


Figura 7 - Risultati Metodo di Tamez

L'assunzione di un rapporto tra sforzi orizzontali e verticali superiore a 1, in virtù del possibile sovra consolidamento degli ammassi, porta ad ottenere fattori di sicurezza leggermente inferiori.

7.2.3. Analisi assialsimmetriche

Al fine di effettuare un'analisi di maggiore dettaglio del comportamento deformativo allo scavo del “nucleo-fronte”, sono state condotte anche analisi mediante modelli assialsimmetrici, così da valutare contemporaneamente due fattori: 1) le condizione di plasticizzazione del nucleo e del contorno dello scavo in corrispondenza del fronte e 2) la risposta deformativa al fronte in termini di estrusione. Le analisi sono state condotte con riferimento ai by-pass carrabili in condizioni di massimo ricoprimento, pari a 40 m in presenza dell'Unità 6 e pari a 65 m in presenza dell'Unità 7. Nella figura seguente viene mostrata la mesh di calcolo adottata nelle analisi.

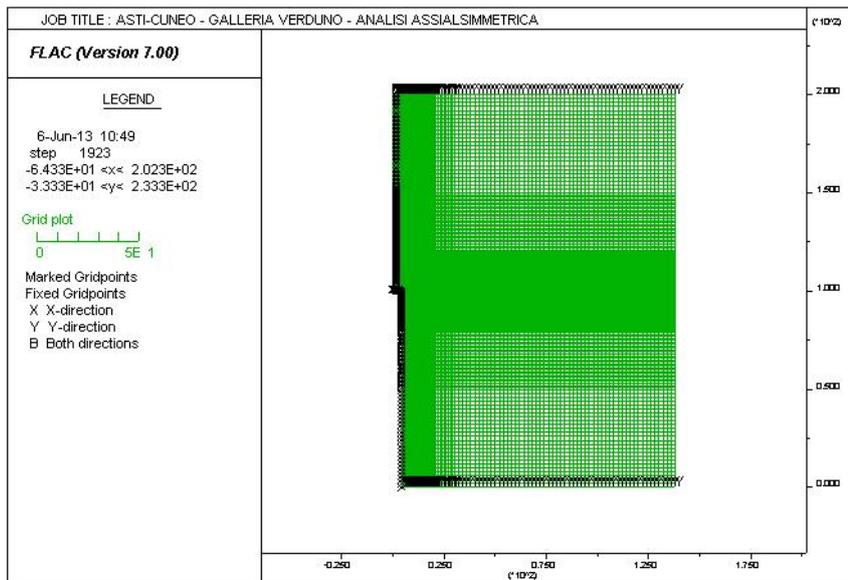


Figura 8 – Mesh di calcolo

Unità 6 – Condizioni di copertura massima H = 40 m

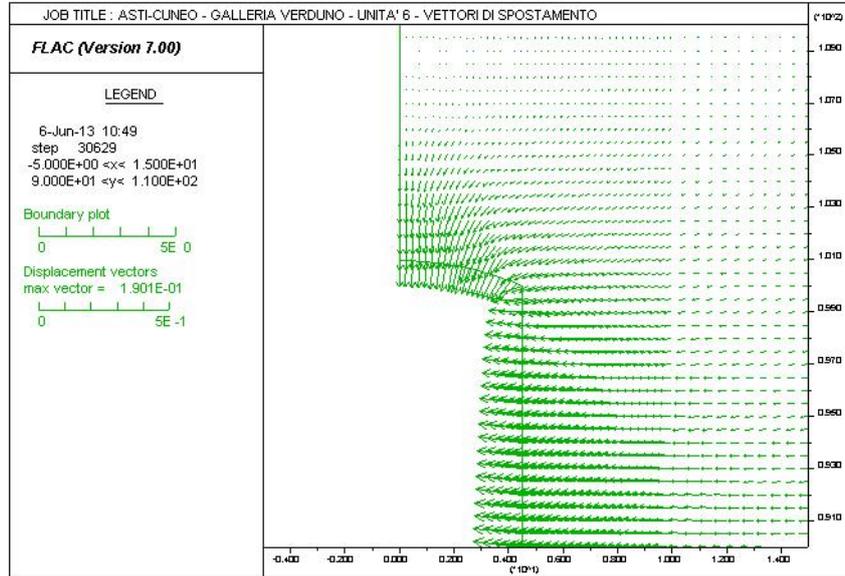


Figura 9 – Unità 6 – Vettori di spostamento

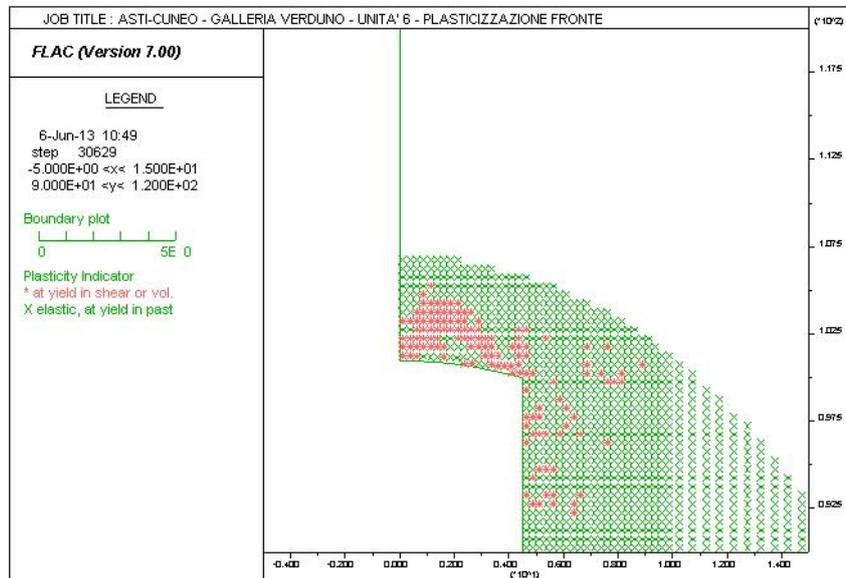


Figura 10 – Unità 6 – Plasticizzazioni

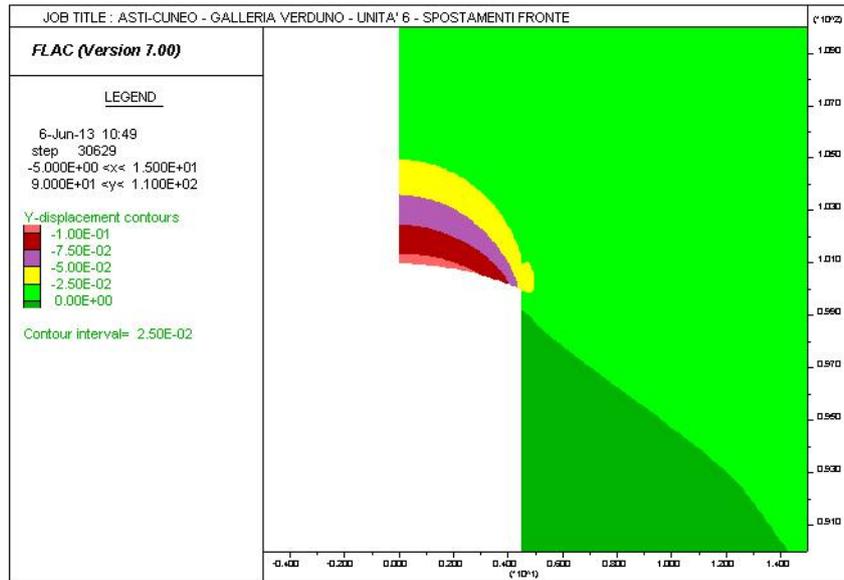


Figura 11 – Unità 6 - Spostamenti

L'analisi mostra risultati in linea con quanto ottenuto dalle formulazioni empiriche di Tamez. Si osserva in particolare la presenza di plasticizzazioni in corrispondenza del nucleo, a meno di punti della mesh in una fascia di 4 m dalla superficie del fronte; i fenomeni deformativi, all'apertura dello scavo, evolvono in campo sostanzialmente elastico-plastico, con deformazioni il cui valore massimo di estrusione riscontrato risulta essere pari a circa 11 cm. Nel seguito si riporta l'andamento del valore di estrusione con la progressiva riduzione della tensione di confinamento agente.

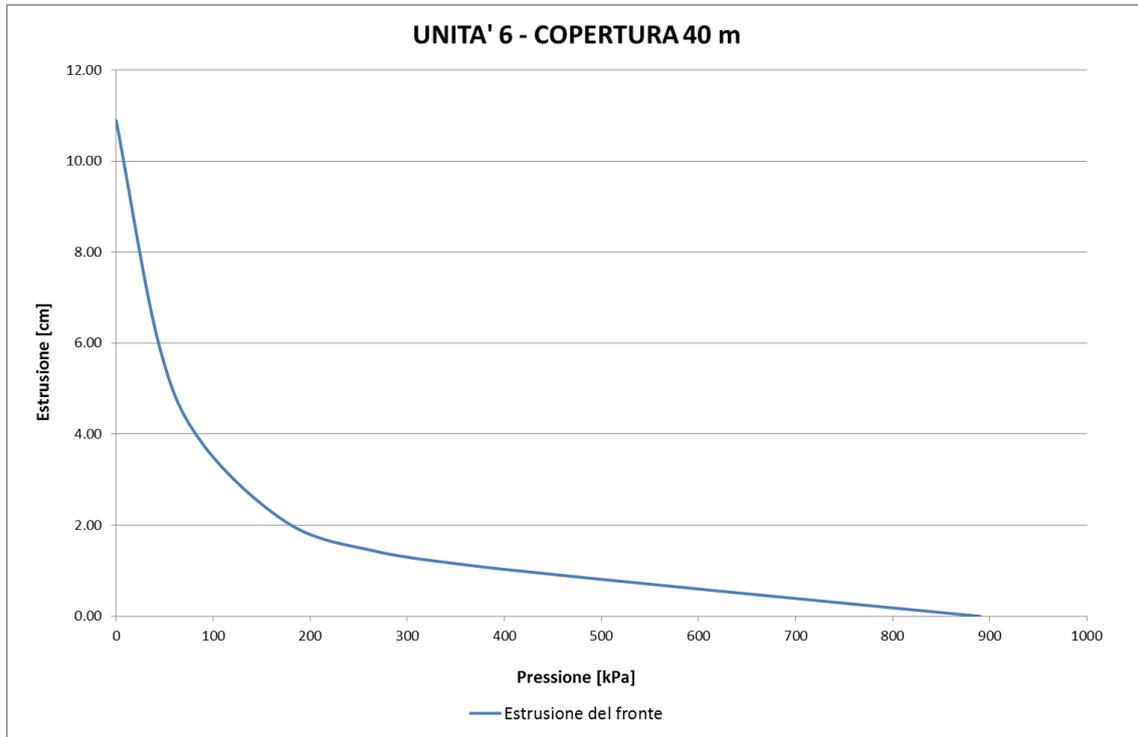


Figura 12 – Unità 6 – Estrusione

Il comportamento deformativo al fronte indica la necessità di prevedere una sezione d'avanzamento con consolidamento al fronte, al fine di garantire condizioni di stabilità del nucleo.

Unità 7 – Condizioni di copertura massima H = 65 m

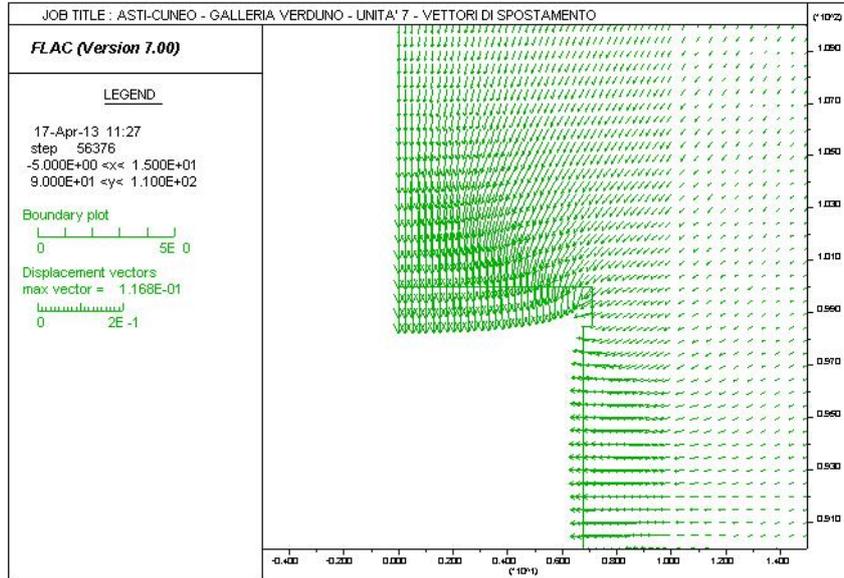


Figura 13 – Unità 7 – Vettori di spostamento

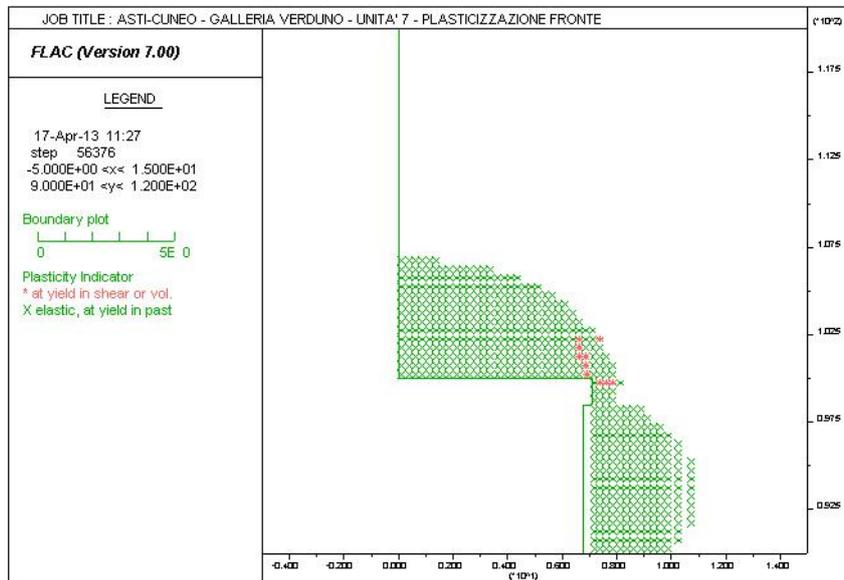


Figura 14 – Unità 7 – Plasticizzazioni

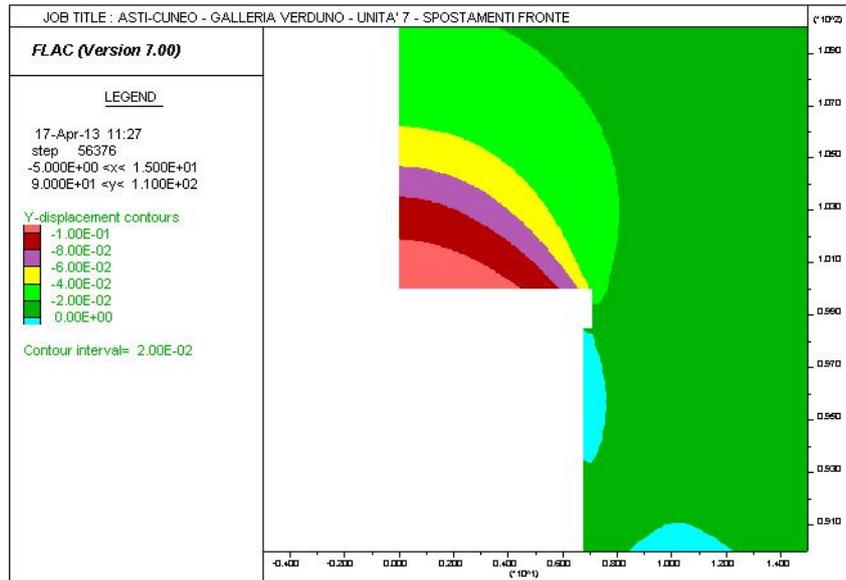


Figura 15 – Unità 7 - Spostamenti

L'analisi mostra risultati in linea con quanto ottenuto dalle formulazioni empiriche di Tamez. Si osserva in particolare la presenza di plasticizzazioni in corrispondenza del nucleo, a meno di punti della mesh in una fascia di 2 m dalla superficie del fronte; i fenomeni deformativi, all'apertura dello scavo, evolvono in campo sostanzialmente elastico-plastico, con deformazioni il cui valore massimo di estrusione riscontrato risulta essere pari a circa 7 cm. Nel seguito si riporta l'andamento del valore di estrusione con la progressiva riduzione della tensione di confinamento agente.

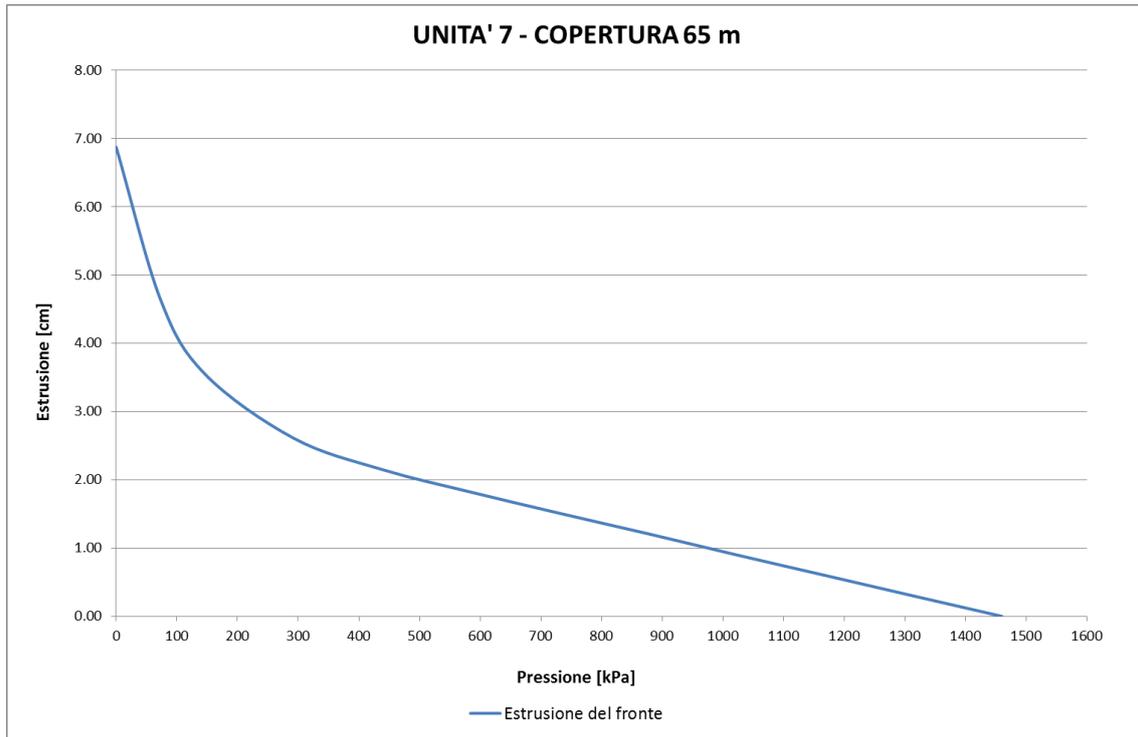


Figura 16 – Unità 7 – Estrusione

Il comportamento deformativo al fronte indica la necessità di prevedere una sezione d'avanzamento con consolidamento al fronte, al fine di garantire condizioni di stabilità del nucleo.

7.2.4. Considerazioni conclusive sul comportamento del fronte allo scavo

Le analisi condotte e sopra descritte hanno avuto come scopo principale quello di cogliere il comportamento del fronte di scavo dei by-pass nei differenti contesti geomeccanici riscontrati durante lo scavo della galleria naturale, in funzione delle coperture e della relativa caratterizzazione geotecnica in condizioni drenate. Con riferimento ai risultati emersi, si riportano alcune considerazioni che hanno motivato le scelte progettuali descritte nei successivi capitoli.

Per il contesto geomeccanico della Formazione gessoso-solfifera, **Unità 6**, si è condotta l'analisi delle Linee caratteristiche per la massima copertura pari a 40 m in corrispondenza del by-pass carrabile alla pk 1+125.90, si è inoltre proceduto con le verifiche di stabilità del fronte secondo le formulazioni di Tamez. Dalla Linea Caratteristica calcolata, il comportamento del fronte di scavo è di tipo B, con convergenze al fronte, in assenza di interventi, pari a 7.5 cm (deformazioni radiali, rapportate al raggio della galleria, pari al 1.7%) e fascia plastica sviluppata al fronte pari a circa 6 m. Le analisi di stabilità del fronte hanno evidenziato la necessità di predisporre interventi di consolidamento del fronte di scavo al fine di raggiungere adeguati fattori di sicurezza. Tale comportamento è stato inoltre confermato da analisi più raffinate condotte tramite un codice di calcolo a differenze finite.

Nel contesto geomeccanico della Formazione delle marne di Sant'Agata, costituita dai limi argillosi, **Unità 7**, le Linee Caratteristiche condotte alle diverse coperture e per le diverse geometrie di scavo (by-pass pedonali e carrabili), evidenziano un comportamento del fronte di scavo di tipo B, "stabile a breve termine". Dai risultati forniti dal Metodo delle Linee Caratteristiche si hanno convergenze al fronte comprese tra 3 cm e 7 cm, con deformazioni radiali al fronte dell'ordine dell'1.2%-1.5%, in presenza di valori di fascia plastica prossimi o superiori al diametro (1.4-2.7 m in funzione delle coperture e delle geometrie di scavo) con curve che evolvono con asintoti verticali importanti portando a



valori di convergenze del cavo significativi. Emerge pertanto la necessità di dover operare un intervento di consolidamento del fronte di scavo al fine di incrementare adeguatamente la resistenza del fronte di scavo e quindi limitare il regime deformativo e il livello di plasticizzazioni a valori accettabili;

Il consolidamento al contorno appare invece opportuno in presenza di fasce significative di sabbie, sabbie-limose sature d'acqua all'interno delle argille; in questo caso occorre garantire la tenuta del profilo di scavo ed evitare rifluimenti di terreno sciolto. Sarà quindi previsto principalmente nel settore di galleria prossima alla zona 4, caratterizzata dai corpi detritici.

In corrispondenza delle **Unità 4 e 5** si ha la presenza dei soli by-pass pedonali le cui analisi di stabilità del fronte di scavo condotte mediante le formulazioni di Tamez hanno evidenziato condizioni di instabilità del nucleo-fronte, richiedendo quindi la messa in opera di interventi di consolidamento, mediante elementi strutturali in vetroresina, al fine di contenere l'evoluzione del comportamento deformativo e guidare il fronte verso condizioni di stabilità.

8. FASE DI TERAPIA - FASI ESECUTIVE E METODOLOGIA DI INTERVENTO

8.1. BY-PASS CARRABILE - SEZIONE TIPO B2

8.1.1. Fasi esecutive

- Esecuzione di drenaggi in avanzamento (in presenza di acqua);
- Esecuzione del consolidamento al fronte secondo la geometria di progetto mediante 55 elementi strutturali in VTR cementati (L=18m e sovrapposizione 9 m);
- Esecuzione dello scavo a piena sezione, per singoli sfondi di profondità massima pari a 1,00m, sagomando il fronte a forma concava;
- Posa in opera di uno strato di spritz-beton fibrorinforzato di regolarizzazione dello scavo (pre-spritz) dello spessore pari a 5 cm;
- Posa delle centine metalliche 2IPN180/1,00m. Collegamento delle centine appena posate alle altre tramite apposite catene;
- Esecuzione dello strato di spritz-beton di progetto (armato con rete elettrosaldata o fibrorinforzato) in due strati eseguiti immediatamente a seguito della posa delle centine metalliche;
- Esecuzione dello strato di spritz-beton di regolarizzazione, senza fibre dello spessore di 5 cm, realizzato entro 4ϕ dal fronte;
- Posa in opera dell'impermeabilizzazione eseguita immediatamente prima del getto del rivestimento definitivo;
- Posa in opera dell'arco rovescio e delle murette ad una distanza massima di 3ϕ dal fronte; tale distanza dovrà essere comunque regolata in corso d'opera in funzione del comportamento deformativo del cavo;
- Posa in opera del rivestimento definitivo ad una distanza massima di 5ϕ dal fronte di scavo; tale distanza potrà essere comunque regolata in corso d'opera in funzione del comportamento deformativo del cavo;

8.1.2. Interventi previsti

La sezione tipo in fase costruttiva è costituita da:

- Consolidamento del fronte mediante 55 elementi strutturali in VTR cementati $L = 18\text{m}$ con sovrapposizione $L = 9\text{m}$;
- spritz-beton fibrorinforzato al contorno $sp = 25\text{ cm}$;
- centine 2IPN180/1.00 m;
- murette e A.R. di spessore minimo 0.60 m , gettato ad una distanza $\leq 3 \Phi$ dal fronte;
- calotta di spessore minimo 0.60 m , gettato ad una distanza $\leq 5 \Phi$ dal fronte;
- n° 2+2 drenaggi in avanzamento, di lunghezza $L = 36.00\text{ m}$ con i primi 12 m da bocca foro ciechi ed i restanti 24 m microfessurati. Eseguiti in caso di presenza d'acqua ogni 1-2 campi di avanzamento $p = 10\%$

8.2. BY-PASS CARRABILE - SEZIONE TIPO C2

8.2.1. Fasi esecutive

- Esecuzione di drenaggi in avanzamento (in presenza di acqua);
- Esecuzione del consolidamento al fronte secondo la geometria di progetto mediante 59 elementi strutturali in VTR cementati ($L=18\text{m}$ e sovrapposizione 9 m);
- Esecuzione del consolidamento al contorno secondo la geometria di progetto mediante 43 elementi strutturali in VTR valvolati (2valv/m) o cementati con miscele espansive al contorno ($L=18\text{m}$ e sovrapposizione 9 m) e 10 (5+5) elementi strutturali in VTR valvolati (2valv/m) o cementati con miscele espansive al piede centina ($L_{\text{media}} = 12\text{m}$);
- Esecuzione dello scavo a piena sezione, per singoli sfondi di profondità massima pari a $1,00\text{m}$, sagomando il fronte a forma concava;
- Posa in opera di uno strato di spritz-beton fibrorinforzato di regolarizzazione dello scavo (pre-spritz) dello spessore pari a 5 cm ;

- Posa delle centine metalliche 2IPN220/1,00m. Collegamento delle centine appena posate alle altre tramite apposite catene;
- Esecuzione dello strato di spritz-beton di progetto (armato con rete elettrosaldata o fibrorinforzato) in due strati eseguiti immediatamente a seguito della posa delle centine metalliche;
- Esecuzione dello strato di spritz-beton di regolarizzazione, senza fibre dello spessore di 5 cm, realizzato entro 4ϕ dal fronte;
- Posa in opera dell'impermeabilizzazione eseguita immediatamente prima del getto del rivestimento definitivo;
- Posa in opera dell'arco rovescio e delle murette ad una distanza massima di 1ϕ dal fronte; tale distanza dovrà essere comunque regolata in corso d'opera in funzione del comportamento deformativo del cavo;
- Posa in opera del rivestimento definitivo ad una distanza massima di 3ϕ dal fronte di scavo; tale distanza potrà essere comunque regolata in corso d'opera in funzione del comportamento deformativo del cavo;

8.2.2. Interventi previsti

La sezione tipo in fase costruttiva è costituita da:

- consolidamento al fronte mediante 59 elementi strutturali in VTR cementati ($L=18m$ e sovrapposizione 9 m);
- consolidamento al contorno mediante 43 elementi strutturali in VTR valvolati (2valv/m) o cementati con miscele espansive al contorno ($L=18m$ e sovrapposizione 9 m) e 10 (5+5) elementi strutturali in VTR valvolati (2valv/m) o cementati con miscele espansive al piede centina ($L_{media} = 12m$)
- spritz-beton fibrorinforzato al contorno $sp = 30$ cm;
- centine 2IPN220/1.00 m;
- murette e A.R. di spessore minimo 0.60 m, gettato ad una distanza $\leq 1\Phi$ dal fronte;
- calotta di spessore minimo 0.60 m, gettato ad una distanza $\leq 3\Phi$ dal

fronte;

- n° 2+2 drenaggi in avanzamento, di lunghezza $L = 27.00$ m con i primi 9 m da bocca foro ciechi ed i restanti 18 m microfessurati. Eseguiti in caso di presenza d'acqua ogni 1-2 campi di avanzamento $p = 10\%$

8.3. BY-PASS PEDONALE - SEZIONE TIPO B0

8.3.1. Fasi esecutive di realizzazione della protesi

- Esecuzione di drenaggi in avanzamento (in presenza di acqua);
- Esecuzione dello scavo a piena sezione, per singoli sfondi di profondità massima pari a 1,50m, sagomando il fonte a forma concava;
- Posa in opera di uno strato di spritz-beton fibrorinforzato di regolarizzazione dello scavo (pre-spritz) dello spessore pari a 5 cm;
- Posa delle centine metalliche HEA140/1,00m. Collegamento delle centine appena posate alle altre tramite apposite catene;
- Esecuzione dello strato di spritz-beton di progetto (armato con rete elettrosaldata o fibrorinforzato) in due strati eseguiti immediatamente a seguito della posa delle centine metalliche;
- Esecuzione dello strato di spritz-beton di regolarizzazione, senza fibre dello spessore di 5 cm, realizzato entro 4ϕ dal fronte;
- Posa in opera dell'impermeabilizzazione eseguita immediatamente prima del getto del rivestimento definitivo;
- Posa in opera dell'arco rovescio e delle murette ad una distanza massima di 3ϕ dal fronte; tale distanza dovrà essere comunque regolata in corso d'opera in funzione del comportamento deformativo del cavo;
- Posa in opera del rivestimento definitivo ad una distanza massima di 5ϕ dal fronte di scavo; tale distanza potrà essere comunque regolata in corso d'opera in funzione del comportamento deformativo del cavo;

8.3.2. Interventi previsti

La sezione tipo in fase costruttiva è costituita da:

- spritz-beton fibrorinforzato al contorno $sp = 20$ cm;
- centine HEA140/1.00 m;
- murette e A.R. di spessore minimo 0.50 m, gettato ad una distanza $\leq 3 \Phi$ dal fronte;
- calotta di spessore minimo 0.50 m, gettato ad una distanza $\leq 5 \Phi$ dal fronte;
- n° 1+1 drenaggi in avanzamento, di lunghezza $L = 27.00$ m con i primi 9 m da bocca foro ciechi ed i restanti 18 m microfessurati.

8.4. BY-PASS PEDONALE - SEZIONE TIPO B2

8.4.1. Fasi esecutive di realizzazione della protesi

- Esecuzione di drenaggi in avanzamento (in presenza di acqua);
- Esecuzione del consolidamento al fronte secondo la geometria di progetto mediante 20 elementi strutturali in VTR cementati ($L=18$ m e sovrapposizione 9 m);
- Esecuzione dello scavo a piena sezione, per singoli sfondi di profondità massima pari a 1,00m, sagomando il fronte a forma concava;
- Posa in opera di uno strato di spritz-beton fibrorinforzato di regolarizzazione dello scavo (pre-spritz) dello spessore pari a 5 cm;
- Posa delle centine metalliche HEA140/1,00m. Collegamento delle centine appena posate alle altre tramite apposite catene;
- Esecuzione dello strato di spritz-beton di progetto (armato con rete elettrosaldata o fibrorinforzato) in due strati eseguiti immediatamente a seguito della posa delle centine metalliche;
- Esecuzione dello strato di spritz-beton di regolarizzazione, senza fibre dello spessore di 5 cm, realizzato entro 4ϕ dal fronte;

- Posa in opera dell'impermeabilizzazione eseguita immediatamente prima del getto del rivestimento definitivo;
- Posa in opera dell'arco rovescio e delle murette ad una distanza massima di 3ϕ dal fronte; tale distanza dovrà essere comunque regolata in corso d'opera in funzione del comportamento deformativo del cavo;
- Posa in opera del rivestimento definitivo ad una distanza massima di 5ϕ dal fronte di scavo; tale distanza potrà essere comunque regolata in corso d'opera in funzione del comportamento deformativo del cavo;

8.4.2. Interventi previsti

La sezione tipo in fase costruttiva è costituita da:

- consolidamento al fronte mediante 20 elementi strutturali in VTR cementati ($L=18\text{m}$ e sovrapposizione 9 m);
- spritz-beton fibrorinforzato al contorno $sp = 20\text{ cm}$;
- centine HEA140/1.00 m;
- murette e A.R. di spessore minimo 0.50 m , gettato ad una distanza $\leq 3 \Phi$ dal fronte;
- calotta di spessore minimo 0.50 m , gettato ad una distanza $\leq 5 \Phi$ dal fronte;
- n° 1+1 drenaggi in avanzamento, di lunghezza $L = 27.00\text{ m}$ con i primi 9 m da bocca foro ciechi ed i restanti 18 m microfessurati.

8.5. BY-PASS PEDONALE - SEZIONE TIPO C2

8.5.1. Fasi esecutive di realizzazione della protesi

- Esecuzione di drenaggi in avanzamento (in presenza di acqua);
- Esecuzione del consolidamento al fronte secondo la geometria di progetto mediante 30 elementi strutturali in VTR cementati ($L=18\text{m}$ e sovrapposizione 9 m);

- Esecuzione dello scavo a piena sezione, per singoli sfondi di profondità massima pari a 1,00m, sagomando il fronte a forma concava;
- Posa in opera di uno strato di spritz-beton fibrorinforzato di regolarizzazione dello scavo (pre-spritz) dello spessore pari a 5 cm;
- Posa delle centine metalliche HEA140/1,00m. Collegamento delle centine appena posate alle altre tramite apposite catene;
- Esecuzione dello strato di spritz-beton di progetto (armato con rete elettrosaldata o fibrorinforzato) in due strati eseguiti immediatamente a seguito della posa delle centine metalliche;
- Esecuzione dello strato di spritz-beton di regolarizzazione, senza fibre dello spessore di 5 cm, realizzato entro 4ϕ dal fronte;
- Posa in opera dell'impermeabilizzazione eseguita immediatamente prima del getto del rivestimento definitivo;
- Posa in opera dell'arco rovescio e delle murette ad una distanza massima di 3ϕ dal fronte; tale distanza dovrà essere comunque regolata in corso d'opera in funzione del comportamento deformativo del cavo;
- Posa in opera del rivestimento definitivo ad una distanza massima di 5ϕ dal fronte di scavo; tale distanza potrà essere comunque regolata in corso d'opera in funzione del comportamento deformativo del cavo;

8.5.2. Interventi previsti

La sezione tipo in fase costruttiva è costituita da:

- consolidamento al fronte mediante 30 elementi strutturali in VTR cementati ($L=18m$ e sovrapposizione $9 m$);
- spritz-beton fibrorinforzato al contorno $sp = 30 cm$;
- centine HEA140/1.00 m;
- murette e A.R. di spessore minimo $0.50 m$, gettato ad una distanza $\leq 3\phi$ dal fronte;
- calotta di spessore minimo $0.50 m$, gettato ad una distanza $\leq 5\phi$ dal fronte;



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo bypass carrabili e pedonali

- n° 1+1 drenaggi in avanzamento, di lunghezza $L = 27.00$ m con i primi 9 m da bocca foro ciechi ed i restanti 18 m microfessurati.

9. VERIFICHE STATICHE

9.1. PREMESSA

Nei seguenti paragrafi sono riportati i risultati delle analisi numeriche che hanno permesso di investigare il regime tenso-deformativo nell'ammasso e nei rivestimenti strutturali previsti in progetto, verificandone la rispondenza al quadro Normativo. Questo è stato raggiunto tramite tre tipologie di analisi:

- Verifica della stabilità del fronte mediante le formulazioni del Metodo di Tamez ed analisi assialsimmetriche (definizione della pressione al fronte);
- Verifica preliminare dei rivestimenti in opera mediante il Metodo delle Linee Caratteristiche;
- Verifica degli interventi di scavo e rivestimento, di prima fase e definitivo, mediante Analisi alle differenze finite impiegando il codice di calcolo FLAC.

Le analisi di stabilità del fronte hanno consentito di cogliere le caratteristiche deformative del fronte in funzione della copertura e del materiale di scavo e quindi di predimensionare, qualora la fase di diagnosi ne avesse evidenziato la necessità, gli interventi di preconsolidamento del fronte. Il Metodo delle Linee Caratteristiche ha permesso di cogliere approssimativamente l'entità delle sollecitazioni e delle convergenze nel pririvestimento e nel rivestimento definitivo, rappresentando una fase di predimensionamento degli interventi di sostegno, così da guidare le scelte circa le sezioni di galleria da sottoporre ad analisi più accurate. Infine, l'analisi alle differenze finite ha permesso di indagare più dettagliatamente - per le condizioni più rappresentative - il regime tensionale e deformativo nelle strutture e nell'ammasso circostante, durante le principali fasi esecutive, consentendo quindi di valutare l'evoluzione del comportamento dell'opera nel breve, medio e lungo termine.

9.2. VERIFICA DI STABILITÀ DEL FRONTE – METODO DI TAMEZ

In questa fase viene valutata l'efficacia dei consolidamenti al fronte di scavo, ove previsti, mediante le formulazioni empiriche proposte da Tamez presentate nei capitoli precedenti. Tali consolidamenti sono stati tenuti in conto mediante il metodo della "coesione equivalente", ovvero valutando la pressione di confinamento sul fronte esercitata dagli elementi in vetroresina. L'incremento di coesione è stato calcolato secondo lo schema riportato nella seguente figura,

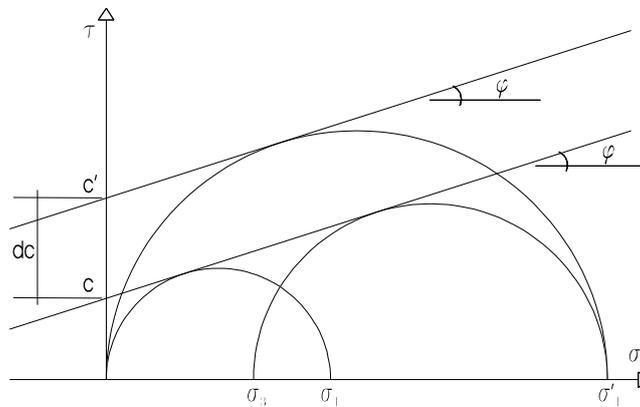


Figura 17 – Contributo dei VTR

con riferimento alla seguente formulazione:

$$dc = \frac{\sigma_3 \cdot K_p}{2 \cdot \sqrt{K_p}}$$

$K_p = \tan^2 (45^\circ + \phi/2)$ coefficiente di spinta passiva.

Si è calcolato il valore di σ_3 (= pressione di confinamento sul fronte) relativo ai due possibili meccanismi di rottura (rottura del VTR e sfilamento dell'elemento), considerando per la valutazione di dc il minore tra i due. Per le verifiche si è considerata la sezione B2 dei by-pass pedonali, in corrispondenza delle Unità 4 e 5, la sezione B2 dei by-pass carrabili in corrispondenza dell'Unità 6 e le sezioni B0 dei by-pass pedonali e B2 dei by-pass carrabili in corrispondenza dell'Unità 7.

Unità 4/5 - Sezione B2 – By-pass Pedonale

Rottura VTR

$$\sigma_3 = N \frac{A_c \cdot \sigma_s}{A_s} = 721 \text{ KPa}$$

con:

- $A_c = 1570 \text{ mm}^2$ area VTR;
 $\sigma_s = 450 \text{ N/mm}^2$ tensione di snervamento VTR;
 $N = 20$ numero di elementi in VTR;
 $A_s = 19.6 \text{ m}^2$ area di scavo;

Rottura per sfilamento

$$\sigma_3 = N \frac{A_{lat} \cdot \tau_{sfil}}{A_s} = 311.5 \text{ KPa}$$

con:

- $A_{lat} = 1.696 \text{ m}^2$ area laterale VTR (su una lunghezza di
sovrapposizione di 9m);
 $\tau_{sfil} = 180 \text{ KPa}$ tensione di aderenza malta/terreno;
 $A_s = 19.6 \text{ m}^2$ area di scavo.

L'incremento di coesione d_c fornito dall'intervento di consolidamento previsto risulta quindi pari a 156 KPa.

Unità 6 e Unità 7 - Sezione B2 – By-pass Carrabile

Il calcolo di σ_3 è stato effettuato considerando oltre al consolidamento del fronte anche la prima fila di VTR della coronella, i quali interessano la parte superiore del fronte.

Rottura VTR

$$\sigma_3 = N \frac{A_c \cdot \sigma_s}{A_s} = 611 \text{ KPa}$$

con:

$A_c = 1570 \text{ mm}^2$	area VTR;
$\sigma_s = 450 \text{ N/mm}^2$	tensione di snervamento VTR;
$N = 55$	numero di elementi in VTR;
$A_s = 63.6 \text{ m}^2$	area di scavo;

Rottura per sfilamento

$$\sigma_3 = N \frac{A_{lat} \cdot \tau_{sfil}}{A_s} = 264 \text{ KPa}$$

con:

$A_{lat} = 1,696 \text{ m}^2$	area laterale VTR (su una lunghezza di sovrapposizione di 9m);
$\tau_{sfil} = 180 \text{ KPa}$	tensione di aderenza malta/terreno;
$A_s = 63.6 \text{ m}^2$	area di scavo.

L'incremento di coesione dc fornito dall'intervento di consolidamento previsto risulta quindi pari a 132 KPa.

Nel seguito sono riepilogate le analisi svolte ed i risultati ottenuti in termini di fattore di sicurezza ai diversi valori di copertura.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo bypass carrabili e pedonali

Analisi 1 – ($k_0 = 1 - \sin \phi$)

ANALISI STABILITA' DEL FRONTE - FASE DI DIAGNOSI - Tamez & Cornejo								
Formazione	Copertura (m)	D _{tunnel} (m)	γ (kN/m ³)	ϕ (°)	c' (kPa)	Falda residua in fase di scavo [m]	Incremento di coesione al fronte [kPa]	FSF
Unita 4/5 Gessi	10	5	20	32	5	-	155	3.42
Unita 6 Gessi	40	9	20	24	40	Falda in chiave calotta [m]	132	1.85
Unita 7 limi argillosi - marne	50	5	21	30	100	10	-	1.74
		9					132	1.71
	65	5					-	1.67
		9					132	1.55

Tabella 7 - Risultati Metodo di Tamez

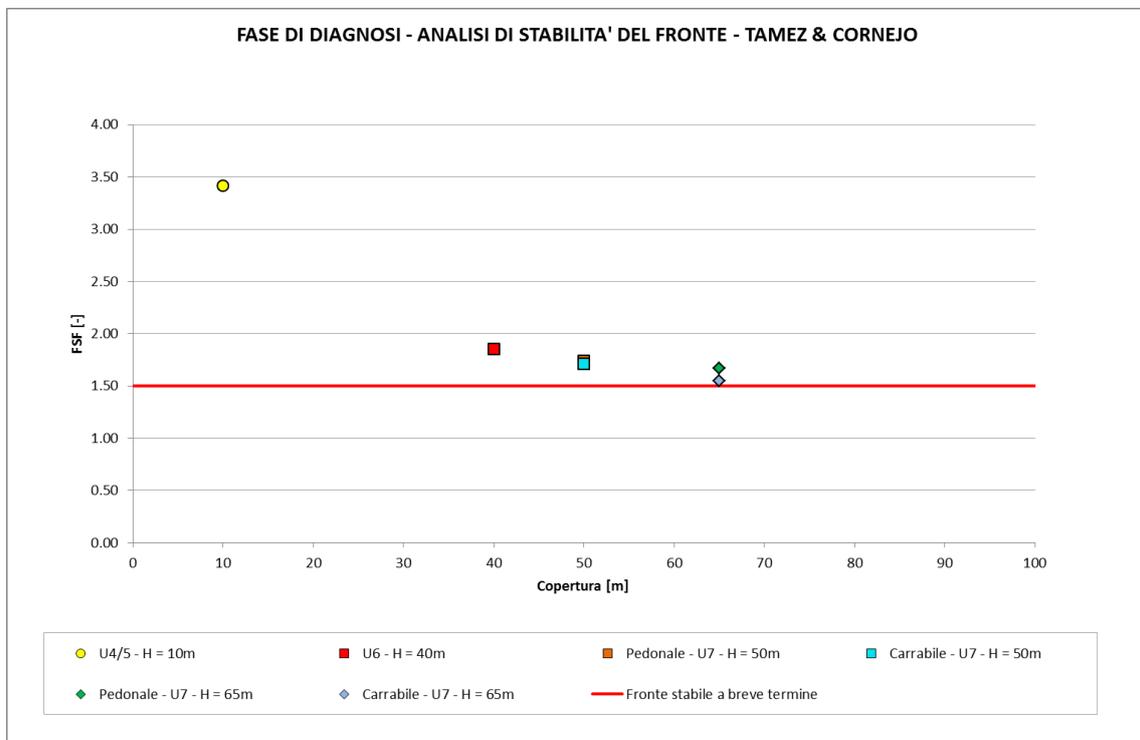


Figura 18 - Risultati Metodo di Tamez

Analisi 2 – ($k_0 = 1,2$)

ANALISI STABILITA' DEL FRONTE - FASE DI DIAGNOSI - Tamez & Cornejo								
Formazione	Copertura (m)	D _{tunnel} (m)	γ (kN/m ³)	φ (°)	c' (kPa)	Falda residua in fase di scavo [m]	Incremento di coesione al fronte [kPa]	FSF
Unita 4/5 Gessi	10	5	20	32	5	-	155	2.56
Unita 6 Gessi	40	9	20	24	40	Falda in chiave calotta [m]	132	1.47
Unita 7 limi argillosi - marne	50	5	21	30	100	10	-	1.54
		9					132	1.61
	65	5					-	1.49
		9					132	1.49

Tabella 8 - Risultati Metodo di Tamez

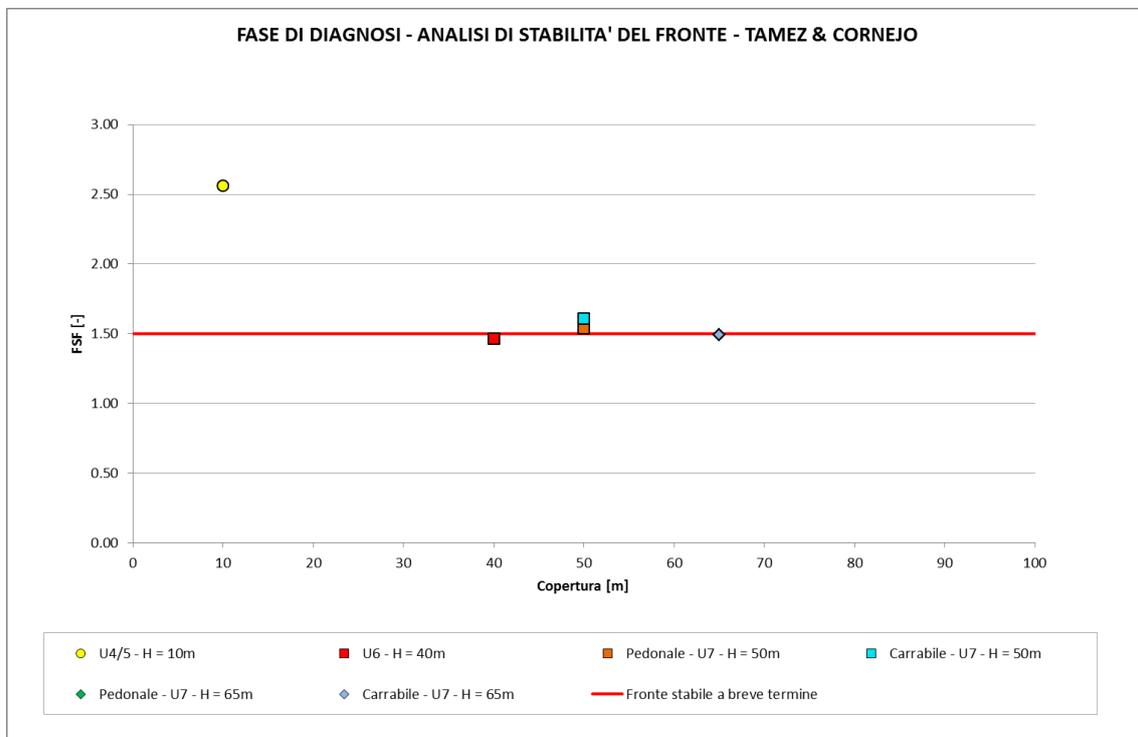


Figura 19 - Risultati Metodo di Tamez

Le analisi condotte hanno evidenziato fattori di sicurezza, a seguito della messa in opera degli interventi di consolidamento, uguali o superiori a 1.5 specie considerando $k_0 = 1 - \sin \phi$. Risulta quindi evidente l'efficacia dei consolidamenti previsti in fase di progettazione.

Analoghe verifiche sono riferibili alla sezione tipo C2.

9.3. VERIFICA DI STABILITÀ DEL FRONTE – ANALISI ASSIALSIMMETRICHE

In analogia con quanto effettuato in fase di diagnosi, è stata condotta un'analisi di maggiore dettaglio del comportamento deformativo allo scavo del “nucleo-fronte”, in presenza di consolidamenti al fronte; sono state pertanto condotte analisi mediante modelli assialsimmetrici, così da valutare contemporaneamente due fattori:

- le condizioni di plasticizzazione del nucleo e del contorno dello scavo in corrispondenza del fronte;
- la risposta deformativa al fronte in termini di estrusione.

Le analisi sono state condotte con riferimento alle condizioni di massimo ricoprimento, pari a 40 m in presenza dell'Unità 6 e pari a 65 m in presenza dell'Unità 7.

I VTR sono stati simulati nel calcolo tramite un pressione al fronte pari alla σ_3 valutata secondo le formulazioni proposte nel capitolo precedente e pari a 264 kPa.

Nella figura seguente viene mostrata la mesh di calcolo adottata nelle analisi; si è considerata libera una porzione di cavo di 1 m, pari allo sfondo in avanzamento per la sezione tipo B2.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo bypass carrabili e pedonali

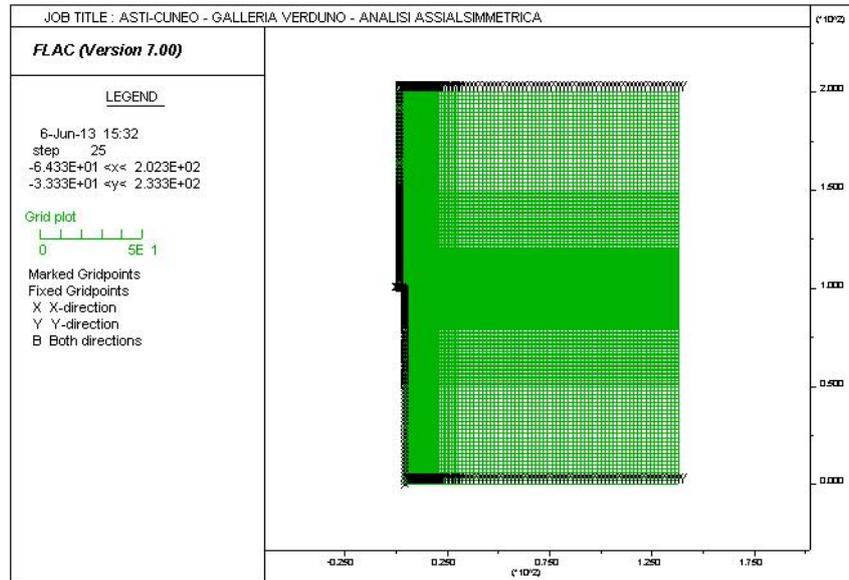


Figura 20 – Mesh di calcolo

Unità 6 – Condizioni di copertura massima H = 40 m

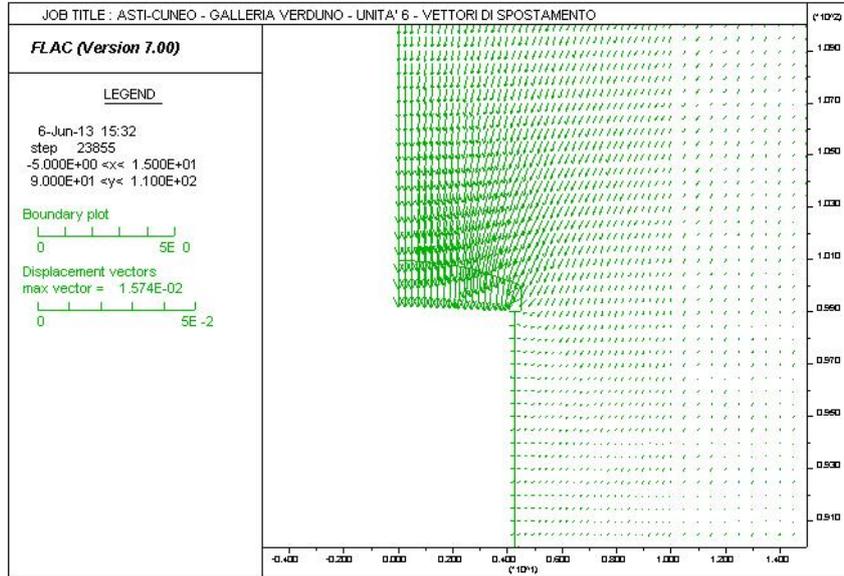


Figura 21 – Unità 6 – Vettori di spostamento

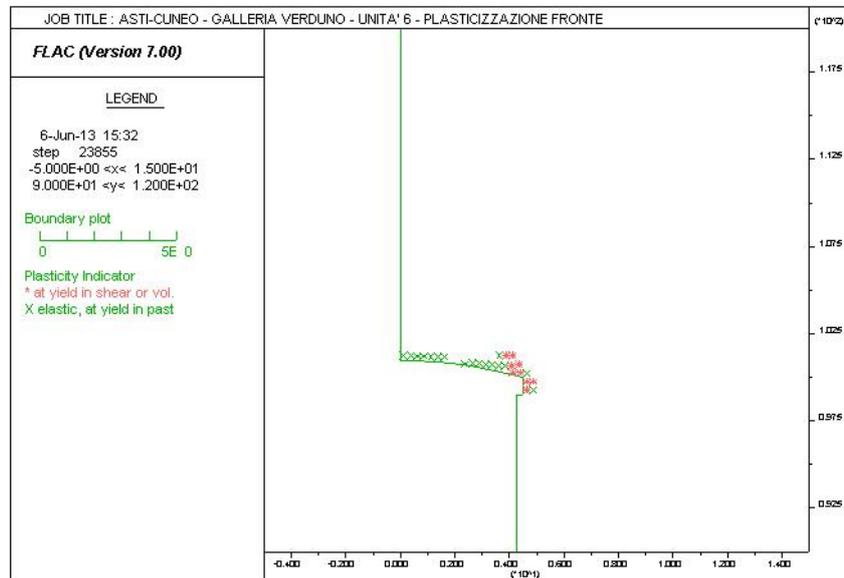


Figura 22 – Unità 6 – Plasticizzazioni

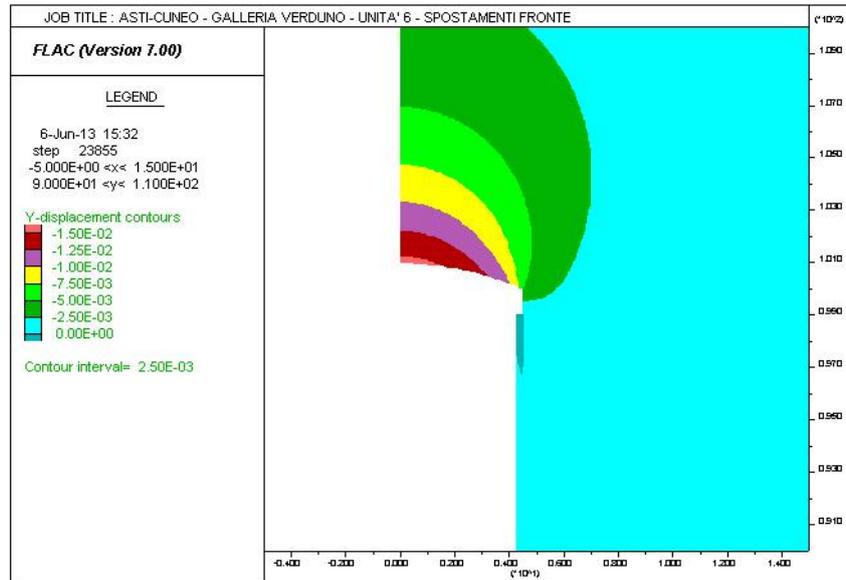


Figura 23 – Unità 6 - Spostamenti

L'analisi mostra risultati in linea con quanto ottenuto dalle formulazioni empiriche di Tamez. Si osserva in particolare l'assenza di plasticizzazioni in corrispondenza del nucleo; i fenomeni deformativi, all'apertura dello scavo, evolvono in campo elastico, con deformazioni ridotte: il valore massimo di estrusione riscontrato risulta essere pari a circa 1.6 cm. Anche a seguito di analisi più raffinate a differenze finite si evidenzia l'efficacia dei consolidamenti previsti in fase di progettazione.

Nel seguito si riporta l'andamento del valore di estrusione con la progressiva riduzione della tensione di confinamento agente.

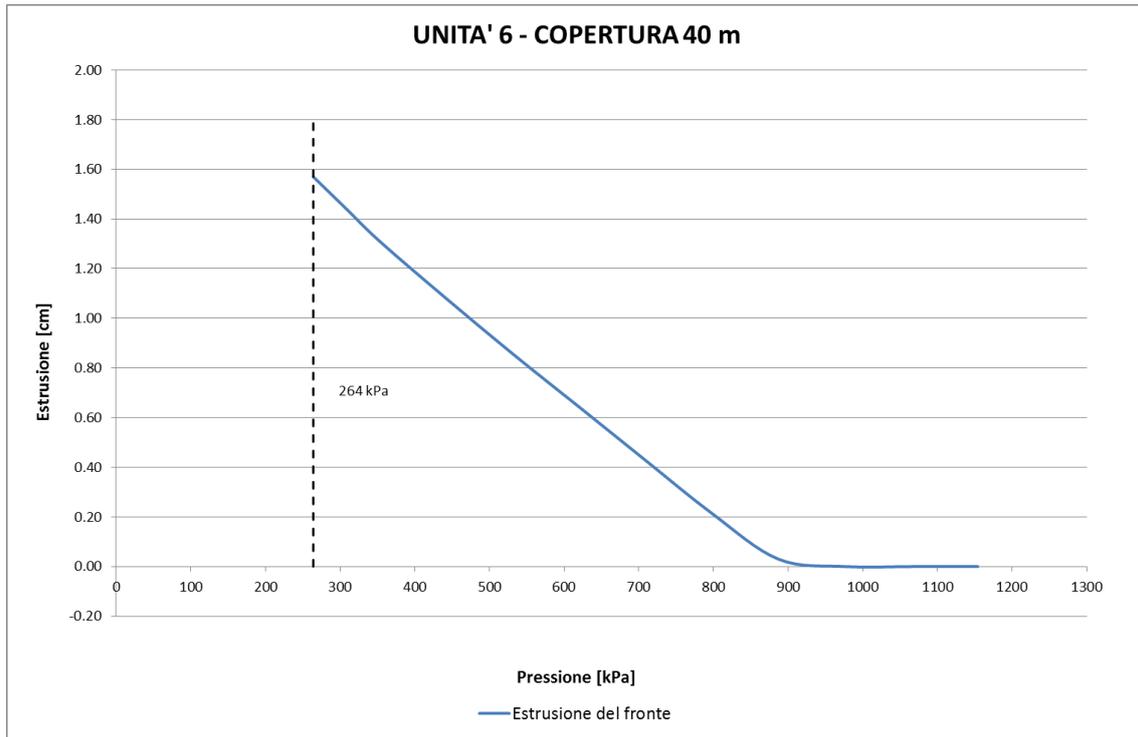


Figura 24 – Unità 6 – Estrusione

Unità 7 – Condizioni di copertura massima H = 65 m

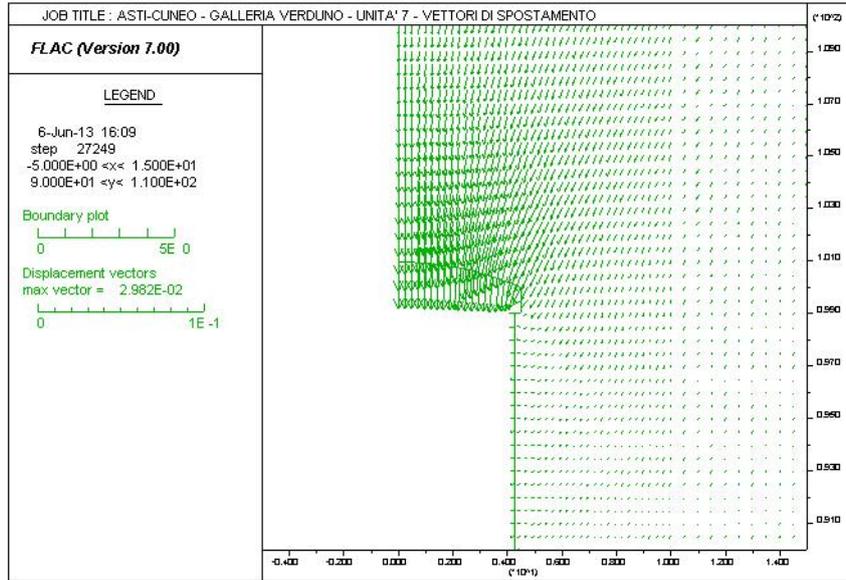


Figura 25 – Unità 6 – Vettori di spostamento

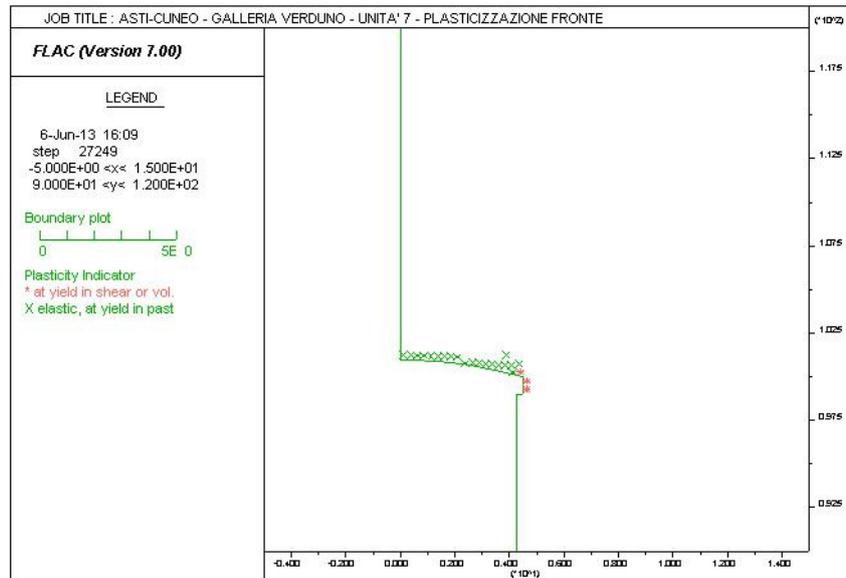


Figura 26 – Unità 6 – Plasticizzazioni

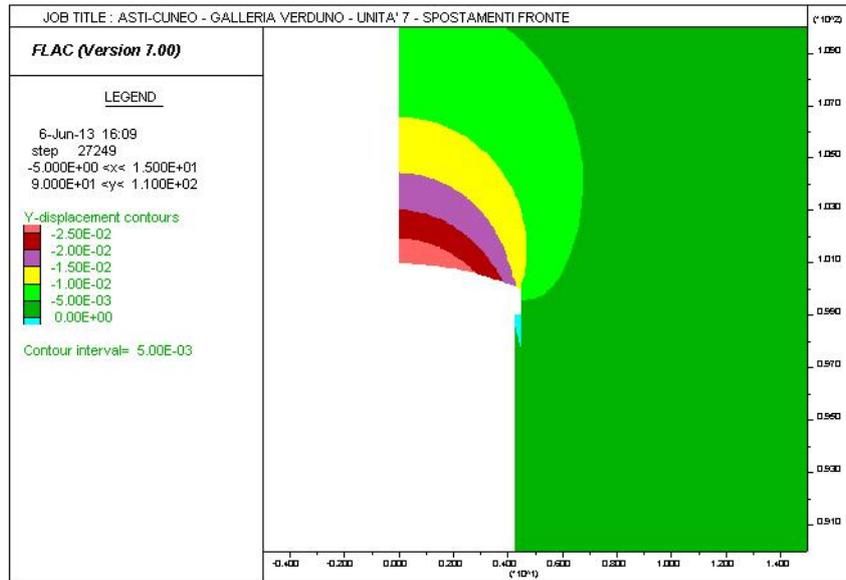


Figura 27 – Unità 6 - Spostamenti

L'analisi mostra risultati in linea con quanto ottenuto dalle formulazioni empiriche di Tamez. Si osserva in particolare l'assenza di plasticizzazioni in corrispondenza del nucleo; i fenomeni deformativi, all'apertura dello scavo, evolvono in campo elastico, con deformazioni ridotte: il valore massimo di estrusione riscontrato risulta essere pari a circa 3 cm. Anche a seguito di analisi più raffinate a differenze finite si evidenzia l'efficacia dei consolidamenti previsti in fase di progettazione.

Nel seguito si riporta l'andamento del valore di estrusione con la progressiva riduzione della tensione di confinamento agente.

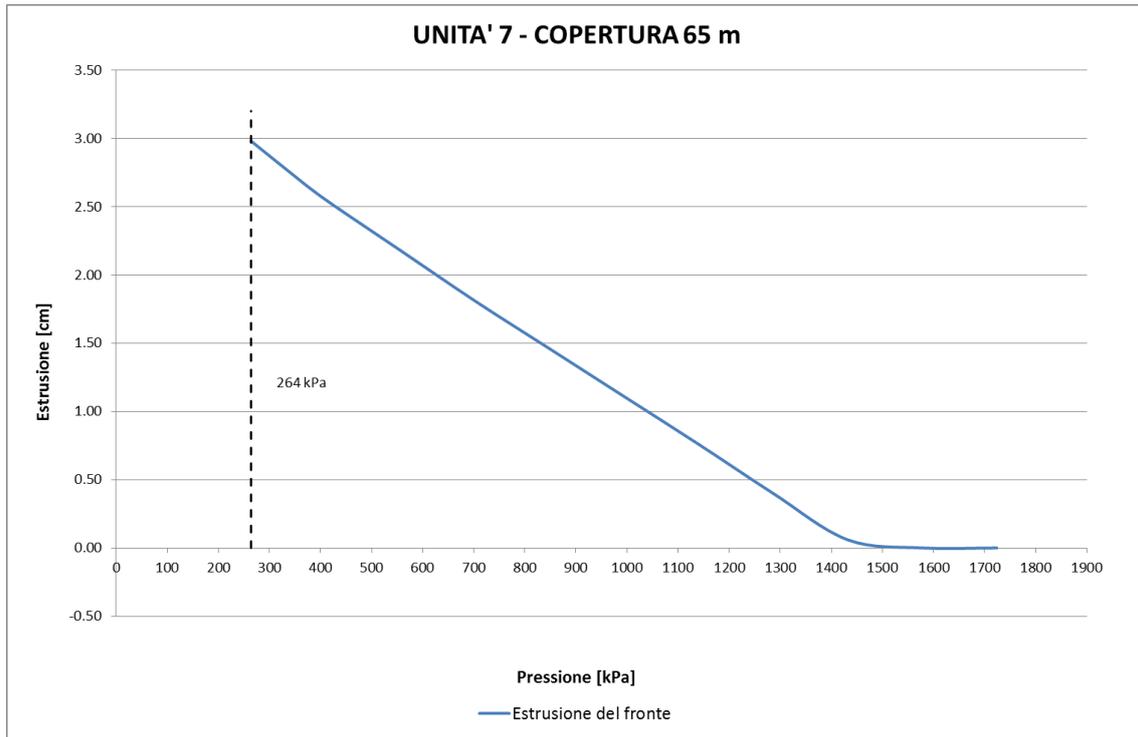


Figura 28 – Unità 6 – Estrusione

9.4. METODO DELLE LINEE CARATTERISTICHE

Conoscendo le caratteristiche geometriche e meccaniche degli interventi di stabilizzazione, è possibile costruire, oltre alle linee caratteristiche del fronte e del cavo, la linea caratteristica dei rivestimenti, ottenendo una pressione di confinamento > 0 che rappresenta la pressione di equilibrio del cavo ottenuta dall'intersezione della curva caratteristica della cavità e dei rivestimenti impiegati.

FIGURA 11. PROGRESSIVO DECONFINAMENTO DEL BORDO DI SCAVO PER SIMULARE L'AVANZAMENTO DELLA GALLERIA

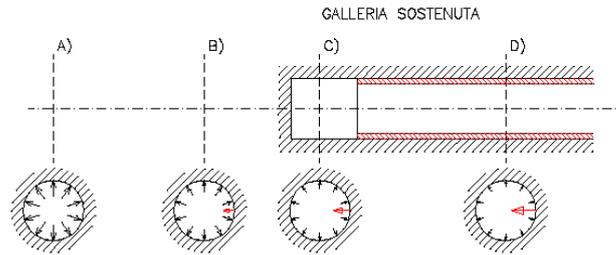


Figura 29 – Modello schematico della cavità – Galleria sostenuta

Quest'ultima curva, a sua volta, dipende dalle proprietà dei materiali impiegati e dalle deformazioni subite dall'ammasso prima della posa in opera dei sostegni provvisori e quindi, in ultima analisi, è legata al comportamento del fronte di scavo e al tipo di interventi previsti in avanzamento. Mediante la sovrapposizione degli effetti delle curve "caratteristiche" della galleria, dei sostegni provvisori e definitivi e del fronte è possibile ridurre il problema tridimensionale in prossimità del fronte di scavo ad un problema bidimensionale; l'intersezione delle varie curve permette di determinare graficamente il comportamento della galleria allo scavo.

FIGURA 12. CURVE CARATTERISTICHE

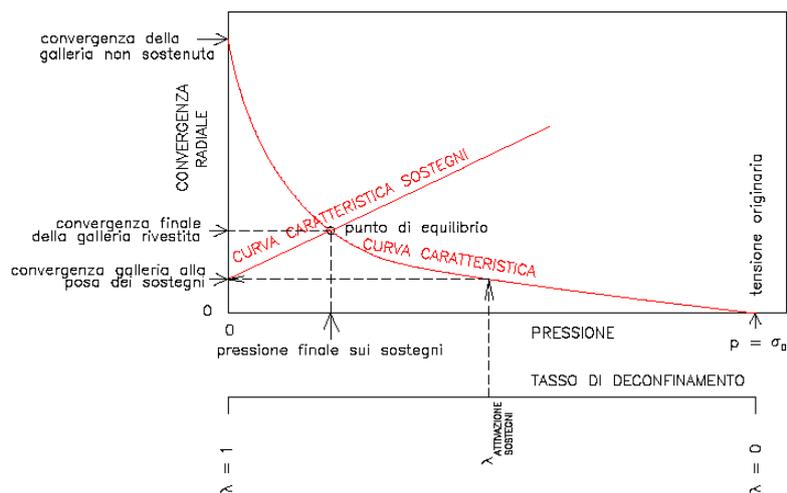


Figura 30 – Linee caratteristiche

La curva caratteristica del rivestimento, o curva di confinamento, è individuata dalla rigidità della struttura K_{wd} e dallo spostamento radiale U_{d0} che si è già generato nell'intorno del cavo prima dell'installazione del supporto, messo in opera a distanza d_0 dal fronte di avanzamento della galleria. Il valore della convergenza alla distanza di posa in opera del rivestimento, u_{d0} , viene determinato simulando l'effetto di deconfinamento dovuto allo scavo e all'allontanamento del fronte per mezzo di una pressione fittizia applicata alla parete della galleria. Tale pressione, inizialmente pari allo stato di sforzo originario, viene ridotta fino ad un valore P^* definito da un tasso di rilascio λ :

$$P^* = (1 - \lambda) \cdot \sigma_0$$

In tutti i casi è necessario valutare lo spostamento al fronte " u_f " per risalire allo spostamento radiale alla distanza d_0 . Noto lo spostamento al fronte e determinato l'andamento della curva di convergenza longitudinale della galleria tramite la funzione che fornisce il tasso di deconfinamento λ , si calcola il valore della convergenza radiale già subita dal cavo, prima della posa in opera del rivestimento; la curva di confinamento risulta a questo punto completamente definita. La condizione di equilibrio, individuata dallo spostamento radiale u_{re} o dalla pressione radiale $P = P_e$, è determinata dall'intersezione della curva caratteristica del terreno e di quella del rivestimento. Tale condizione risulta verificata se la pressione di equilibrio è inferiore alla resistenza massima propria del rivestimento.

La rigidità del rivestimento viene valutata mediante la formula:

$$K_{wd} = \frac{ES}{R^2} C_a$$

Dove:

E = modulo elastico spritz-beton;

S = spessore sezione reagente (omogeneizzando la centina);

R_m = raggio medio prerivestimento;

C_a = coefficiente correttivo di forma.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo bypass carrabili e pedonali

La pressione sul rivestimento P permette di ricavare, mediante la formula di Lamé, la tensione nel calcestruzzo:

$$\sigma_{sb} = \frac{2P \cdot (R_i + S)^2}{S^2 + 2 \cdot R_i \cdot S}$$

dove:

- P = pressione radiale agente;
- R_i = raggio interno;
- S = spessore rivestimento.

Sempre tramite la formulazione di Lamé è possibile ricavare l'incremento di σ dato dalla presenza di falda.

Nella tabella seguente sono riassunti i principali risultati forniti dalle elaborazioni numeriche mediante il Metodo delle Linee Caratteristiche: By-pass pedonali con R = 2.50 m e carrabili con raggio R = 4.50 m); le analisi si riferiscono, anche in questo caso, alle sezioni tipo B0 per il pedonale e B2 per il carrabile. In allegato sono riportati i dati di input e i risultati delle analisi.

Formazione geomeccanica	R	H	H/D	Hw	N°	Parametri geomeccanici di calcolo								Rivestimenti		
						γ	c_p	c_r	ϕ_p	ϕ_r	ν	E_p	E_r	sp.cls	U1/U0	R _{int.cls}
						[KN/m3]	[kPa]	[kPa]	[°]	[°]	[-]	[MPa]	[MPa]	[m]	[-]	[m]
Unità 7-Limi argillosi/Marne	2.50	50	10.0	40.0	1	21.0	80	80	30	30	0.3	180	180	0.50	1.0	1.50
		65	13.0	40.0	2	21.0	100	100	30	30	0.3	200	200	0.50	1.0	1.50
	4.50	50	5.6	40.0	3	21.0	80	80	30	30	0.3	180	180	0.60	1.0	3.65
		65	7.2	40.0	4	21.0	100	100	30	30	0.3	200	200	0.60	1.0	3.65
Unità 6-Gessi	4.50	40	4.4	0.0	1	20.0	40	40	24	24	0.3	200	200	0.60	1.0	3.65



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo bypass carrabili e pedonali

<i>Risultati Linee Caratteristiche</i>														
U	U_f	$(U-U_f)$	U/R_0	U_f/R_0	$(U-U_f)/R_0$	R_p/R_0	Fascia pl cavo	R_{pf}/R_0	Fascia pl fronte	$R_{1/2 nat.}$	σ_{pre}	σ_{cls}	σ_w	σ_{riv}
[cm]	[cm]	[cm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[m]	[-]	[m]	[t/mq]	[t/mq]	[t/mq]	[t/mq]	[t/mq]
1.74	1.56	0.18	0.7%	0.6%	0.1%	1.24	0.60	1.22	0.55	13.86	319.35	126.58	212.50	339.08
2.12	1.88	0.24	0.8%	0.8%	0.1%	1.26	0.65	1.24	0.60	17.32	399.34	158.28	212.50	370.78
1.46	0.31	1.15	0.6%	0.1%	0.5%	1.00	0.00	1.00	0.00	79.68	1113.45	458.35	177.08	635.43
2.15	0.95	1.20	0.9%	0.4%	0.5%	1.00	0.00	1.00	0.00	83.14	1165.30	479.70	177.08	656.78
1.10	0.29	0.81	0.2%	0.1%	0.2%	1.00	0.00	1.00	0.00	58.20	783.56	322.55	33.83	356.38

Tabella 9 - Fase di terapia - risultati delle Linee Caratteristiche

Dove:

- $R_{1/2 nat.}$ = resistenza di mezzo nucleo naturale
- $R_{1/2 cons.}$ = resistenza di mezzo nucleo con consolidamento al fronte
- U_f = convergenza del fronte naturale
- $U_{f cons.}$ = convergenza del fronte con consolidamento al fronte
- Convergenza = convergenza netta dei rivestimenti
- σ_w = incremento di tensione dovuto alla falda (positiva se di compressione)
- σ_{cls} = tensione nel rivestimento definitivo (positiva se di compressione)

Le Linee caratteristiche hanno evidenziato tensioni nei rivestimenti definitivi nel range 3.5-6.5 MPa e per il rivestimento provvisorio nel range 3 – 11.5 MPa compatibili con i materiali adottati in progetto nelle varie fasi di costruzione. Nel seguito saranno presentate verifiche condotte con analisi alle differenze finite che consentono di cogliere meglio il fenomeno tenso-deformativo delle sezioni maggiormente critiche.

9.5. ANALISI ALLE DIFFERENZE FINITE - VERIFICHE STATICHE

9.5.1. Analisi numeriche

Le analisi numeriche, volte a valutare lo stato tenso-deformativo nel rivestimento e nell'ammasso al contorno del cavo, sono state condotte in condizioni di deformazioni piane (plane-strain); queste sono rappresentative delle sezioni tipologiche correnti della galleria naturale analizzata in questa sede. Con l'ausilio del codice di calcolo alle differenze finite FLAC 7.0 sono state condotte analisi numeriche per le condizioni ritenute più significative. Attraverso tali analisi è stato possibile simulare le principali fasi esecutive, fino alla completa realizzazione dell'opera e verificare l'idoneità delle sezioni previste in fase progettuale. Le sezioni di calcolo analizzate fanno riferimento a diverse sezioni tipologiche nelle condizioni litologiche, geomeccaniche e idrogeologiche ritenute più rappresentative per la galleria in oggetto. Si riporta nel seguito la tabella di sintesi delle analisi svolte, ritenute le più rappresentative, nella quale sono indicate le sezioni tipo e il contesto geomeccanico di riferimento (si noti che la sezione tipo B2 del by-pass pedonale può essere assimilata, a meno del consolidamento al fronte, alla sezione tipo B0, in particolare per carpenteria ed armatura).

ANALISI	SEZIONE TIPO	FORMAZIONE GEOLOGICA	H _{calcolo} [m]
1	Carrabile B2	Argilla Marnosa - Unità 7	65
2	Carrabile C2	Argilla Marnosa - Unità 7 Corpi detritici – Unità 7a	55
3	Pedonale B0	Argilla Marnosa - Unità 7	65
4	Pedonale C2	Argilla Marnosa - Unità 7 Corpi detritici – Unità 7a	60

Tabella 10 - Analisi numeriche FLAC

9.5.2. Geometrie dei modelli

Le analisi numeriche sono state condotte considerando dei reticoli di forma rettangolare, aventi dimensioni e grado di infittimento al contorno del cavo tali da garantire una soluzione numerica accurata e rappresentativa della situazione in sito. Le dimensioni della griglia e le distanze dalla galleria ai limiti esterni della griglia stessa, sono tali da evitare eventuali effetti di bordo sull'area di interesse del reticolo. Il contorno dei modelli è stato vincolato lateralmente ed inferiormente mediante opportuni vincoli.

9.5.3. Leggi di comportamento del materiale

Il codice di calcolo consente di adottare un modello di comportamento del terreno elastico-perfettamente plastico. Il criterio di rottura adottato, è quello di Mohr-Coulomb, con legge di flusso a seconda dei contesti associato/non associato e resistenza a trazione $\sigma_t=0$. La funzione di plasticizzazione F definita dal criterio di rottura consente di individuare quelle zone di terreno in cui lo stato tensionale ha superato il limite al di sotto del quale il materiale considerato mantiene un comportamento elastico, e che sono quindi soggette a sollecitazioni tali da comportare deformazioni irreversibili nell'ammasso. Per un generico stato di sforzo, individuato dalle tensioni principali $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, il criterio di rottura di Mohr-Coulomb, è rappresentato dalle seguenti equazioni lineari:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \pm 2 \cdot \left(c' \cdot \cos(\phi') + \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} \cdot \sin(\phi') \right)$$

$$\sigma_2 - \sigma_3 = \pm 2 \cdot \left(c' \cdot \cos(\phi') + \frac{(\sigma_2 + \sigma_3)}{2} \cdot \sin(\phi') \right)$$

$$\sigma_3 - \sigma_1 = \pm 2 \cdot \left(c' \cdot \cos(\phi') + \frac{(\sigma_3 + \sigma_1)}{2} \cdot \sin(\phi') \right)$$

Il criterio di Mohr-Coulomb è rappresentato, nello spazio delle tensioni principali, da una piramide a base esagonale non regolare con la trisettrice nel primo ottante:

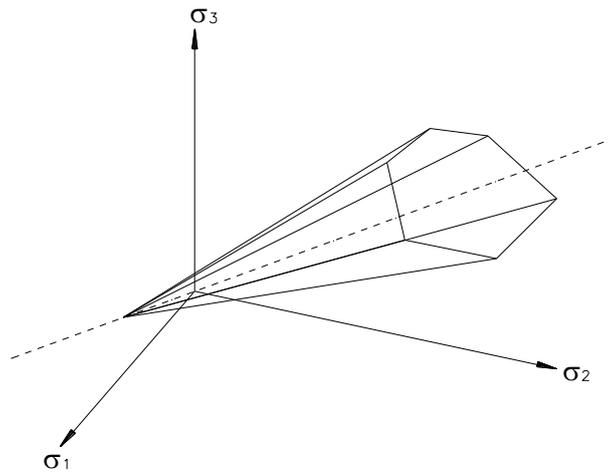


Figura 31 – Dominio di rottura di Mohr-Coulomb

Nel criterio di rottura di Mohr-Coulomb la resistenza al taglio non è influenzata dallo sforzo principale avente intensità intermedia; la resistenza del materiale è variabile in funzione dello stato di sforzo esistente.

9.5.4. Parametri geomeccanici

Nelle analisi numeriche condotte, per ciascuna sezione tipo in esame è stata adottata una situazione geologico-geomeccanica di riferimento.

Gli interventi di consolidamento al contorno del cavo sono simulati nelle elaborazioni numeriche in termini di incremento delle caratteristiche di resistenza e di deformabilità nella fascia di terreno trattato. La scelta dei valori dei parametri di calcolo, adottati nelle elaborazioni numeriche, deriva dalla caratterizzazione geotecnica dei materiali, cui si rimanda per ulteriori approfondimenti. I parametri geotecnici di calcolo dei materiali interessati dallo scavo della galleria, utilizzati nelle analisi, vengono di seguito riassunti.

Formazione	γ [kN/m ³]	ϕ' [°]	c' [kPa]	E [Mpa]	ν [-]
Unità 4/5	20	32	5	20	0,3
Unità 6	20	24	40	200	0,3
Unità 7	21	30	100	200	0,3
Unità 7a	19	35	0	40	0,3

Tabella 11 - Parametri geomeccanici

Per la definizione delle caratteristiche geotecniche della fascia di materiale consolidato al contorno del cavo, per la sezione tipo C2, si è adottato il criterio empirico (basato sulla osservazione di dati sperimentali di gallerie, scavate in contesti geotecnici analoghi e su cui si è operato con simili interventi di preconsolidamento) di amplificare il valore del modulo di deformabilità di 2-3 volte rispetto a quello naturale e si è considerato un valore di coesione pari a 100 kPa.

9.5.5. Stato di sforzo iniziale

Nella prima fase dell'analisi numerica viene ricostruita in termini di sforzi e di deformazioni la situazione iniziale preesistente allo scavo della galleria.

Il carico applicato in direzione verticale corrisponde al carico geostatico alle varie quote del modello.

Il carico applicato in direzione orizzontale è stato determinato in funzione del carico verticale, attraverso il coefficiente di spinta a riposo (K_0) per le analisi in esame pari a:

$$K_0 = \sigma_3 / \sigma_1 = 1 - \text{sen } \phi.$$

Recenti prove di laboratorio effettuati su campioni indisturbati prelevati con perforazioni eseguite nella zona della Cascina dello Spià, hanno mostrato che i materiali possono essere sovraconsolidati meccanicamente, con presenza di fenomeni di cementificazione. Alla luce di questo si è ritenuto opportuno esaminare anche valori di k maggiori di 1 effettuando analisi con valore k_0 pari a 1.2.

9.5.6. Carichi idraulici

La valutazione degli effetti del carico idrostatico sulla galleria è stato introdotta nella fase di lungo termine delle analisi svolte considerando un carico agente sui rivestimenti definitivi. Si è considerato il battente piezometrico massimo previsto a progetto in corrispondenza dei by-pass pedonali non drenanti e un



battente piezometrico pari a 20 metri in chiave calotta in corrispondenza dei bypass carrabili, per i quali è stato previsto in progetto canalette drenanti al piede dello strato di impermeabilizzazione.

9.5.7. Scavo delle gallerie

La simulazione dello scavo avviene mediante il progressivo annullamento delle forze interne al profilo di scavo, fino al loro completo rilassamento; gli step di rilassamento vengono operati in funzione della distanza dal fronte della sezione considerata nell'analisi, mediante l'impiego delle curve di Panet. La scelta della curva di Panet da utilizzare è stata condotta considerando il numero di stabilità N_s .

$$N_s = \frac{\sigma_0}{C_U} = \frac{2 \cdot \sigma_0}{\sigma_{cm}}$$

dove:

σ_0 = tensione geostatica

σ_{cm} = resistenza a compressione monoassiale dell'ammasso roccioso

σ_c = resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta.

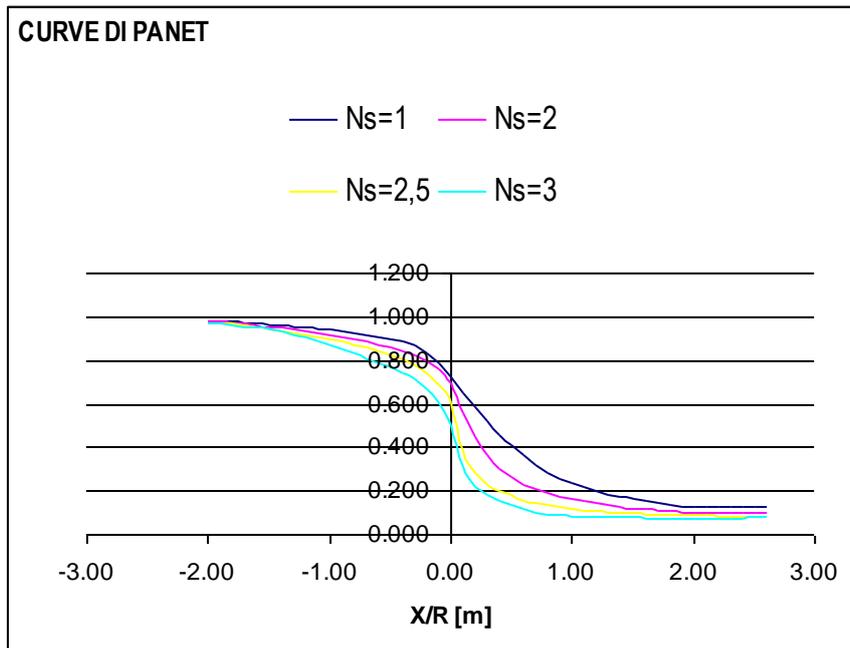


Figura 32 – Curve di Panet

L'adozione della sola curva di Panet non produce tuttavia i dovuti risultati tenso-deformativi, nè per confronto con quanto ottenuto in base alla teoria delle Linee Caratteristiche, nè per confronto con quanto effettivamente rilevato in analoghe gallerie in corso d'opera. Un ruolo fondamentale per una corretta definizione dei rilassamenti da adottare nelle analisi è il valore di rilassamento da impiegare in corrispondenza del fronte di scavo. Al fine di adattare il valore di rilassamento alle caratteristiche geomeccaniche del materiale, dello stato tensionale in sito e del criterio di rottura del materiale si è proceduto ad impiegare al fronte un valore di rilassamento tale da determinare una risposta deformativa, in termini di convergenza al fronte, paragonabile a quella ottenuta dalle analisi precedentemente condotte mediante il Metodo delle Linee Caratteristiche; è questo un procedimento di “taratura” della curva di Panet.

Una volta determinata la riduzione iniziale, in corrispondenza del fronte di scavo, i rilassamenti alle Time successive verranno determinate proporzionalmente all'andamento della curva di Panet in funzione della distanza dal fronte, secondo la seguente formula:

$$R_{\text{forze}} = R_{\text{forze, fronte}} + \beta \cdot (R_{\text{PANET}} - R_{\text{PANET, fronte}})$$

in cui il termine $\beta = (100\% - \text{Rid. } \%) / (100\% - R_{\text{PANET, fronte}}\%)$ tiene conto delle percentuali di riduzione residue, dopo il rilassamento del fronte. Nell'analisi si è adottata la curva per $N_s = 2$.

9.5.8. Prerivestimento e rivestimento definitivo

Il prerivestimento ed il rivestimento definitivo sono stati modellati attraverso una successione di aste rettilinee, elementi tipo “beam”, collegate con continuità tra loro ed ai nodi della mesh. In questo modo si sono determinate le sollecitazioni agenti sul rivestimento stesso in termini di azioni interne.

9.5.8.1. Prerivestimenti - Caratteristiche dei materiali

Nelle analisi la messa in opera del prerivestimento è stata simulata introducendo nel modello zone con caratteristiche strutturali assimilabili a quelle dello spritz-beton e centine, e legge costitutiva elastico lineare.

In tutte le sezioni tipo, il prerivestimento è costituito da spritz-beton $R_{ck} \geq 35$ MPa e da centine S275, aventi le seguenti caratteristiche meccaniche:

spritz-beton $R_{ck} \geq 35$ MPa:

$$E = 32588 \text{ MPa a } 28 \text{ gg};$$

centine S275:

$$E = 210000 \text{ MPa.}$$

Nelle modellazioni numeriche il prerivestimento è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico-lineare e isotropo, il cui modulo di



deformabilità è stato determinato attraverso l'omogeneizzazione delle centine al calcestruzzo.

Nella tabella seguente sono indicate, per le sezioni tipo analizzate, le principali caratteristiche geometriche e meccaniche relative ai rivestimenti di prima fase considerati nelle elaborazioni numeriche.

SEZIONE	CENTINE	SPRITZ BETON Spessore [cm]	SPRITZ BETON Rck [MPa] 28 gg
Carrabile B2	2IPN 180/1.0 m	25 (20+5)	35
Carrabile C2	2IPN 220/1.0 m	30 (25+5)	35
Pedonale B0	HEA 140/1.0 m	20 (15+5)	35
Pedonale C2	HEA 140/1.0 m	20 (15+5)	35

Tabella 12 - Sintesi delle caratteristiche del prerinvestimento

9.5.8.2. Rivestimenti definitivi - Caratteristiche dei materiali

Nelle analisi la messa in opera del rivestimento è stata simulata introducendo nel modello zone con caratteristiche strutturali assimilabili a quelle del calcestruzzo e legge costitutiva elastica-lineare.

Il rivestimento definitivo è costituito da calcestruzzo C32/40; a tale materiale corrispondono le seguenti caratteristiche meccaniche:

$$E = 33346\text{MPa} \quad \text{a 28gg;}$$

$$\nu = 0.20.$$

In particolare per le tratte di attraversamento dei gessi si prevede un rivestimento definitivo costituito da calcestruzzo C35/45; a tale materiale corrispondono le seguenti caratteristiche meccaniche:



$$E = 34077\text{MPa} \quad a \text{ 28gg;}$$

$$\nu = 0.20.$$

Il rivestimento definitivo è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico-lineare.

Per le sezioni tipo analizzate, si riporta una sintesi delle principali caratteristiche geometriche relative ai rivestimenti definitivi considerati nelle elaborazioni numeriche.

SEZIONE	CALOTTA Spessore [cm]	ARCO ROVESCIO Spessore [cm]
Carrabile B2	60	60
Carrabile C2	60	60
Pedonale B0	50	50
Pedonale C2	50	50

Tabella 13 - Caratteristiche geometriche dei rivestimenti definitivi

9.5.9. Criteri di verifica delle sezioni di scavo

9.5.9.1. Verifica del rivestimento di prima fase

Verifiche allo stato limite ultimo

Per la verifica allo stato limite ultimo viene utilizzata la seguente combinazione di azioni:

$$E_d = \gamma_G G_k$$

in quanto le azioni prese in conto (peso proprio struttura, sovrastruttura, forze indotte dalla pressione del terreno o dell'acqua) risultano classificate come permanenti (G).

La verifica allo stato limite ultimo viene condotta attraverso la definizione delle seguenti azioni di progetto:

$$N_d = 1.3 \cdot N$$

$$M_d = 1.3 \cdot M$$

dove N ed M sono le sollecitazioni derivanti dalle analisi numeriche.

La resistenza di calcolo del calcestruzzo è definita attraverso la relazione:

$$f_{cd} = 0.83 \cdot 0.85 \cdot R_{ck} / \gamma_c$$

dove il coefficiente parziale di sicurezza del conglomerato cementizio (γ_c) è pari a 1.5.

Individuate quindi le sezioni tipo analizzate e le sollecitazioni agenti si è proceduto alla verifica a presso flessione mediante i domini di resistenza.

Per ciascuna sezione tipo verrà riportato il diagramma di interazione M-N, il cui contorno individua i limiti della resistenza di calcolo R_d . La verifica risulta soddisfatta quando $R_d \leq E_d$, ovvero quando i punti rappresentativi delle coppie di sollecitazioni sul rivestimento risultano all'interno del diagramma.

Il diagramma relativo al prerivestimento viene costruito considerando una sezione in calcestruzzo armato di spessore pari allo spessore di spritz beton e un armatura pari all'area delle ali delle centine (AFTES "Recommendations for the DESIGN OF SPRAYED CONCRETE FOR UNDERGROUND SUPPORT" – 09/11/2000).

Verifiche allo stato limite di esercizio - Limitazione delle tensioni

Le verifiche di pressoflessione vengono svolte prendendo in considerazione una sezione in calcestruzzo armato di spessore pari allo spessore di spritz

beton e un armatura pari all'area delle ali della centina, nelle sezioni ove questa è presente (AFTES "Recommendations for the DESIGN OF SPRAYED CONCRETE FOR UNDERGROUND SUPPORT" – 09/11/2000)

Per i materiali con cui viene realizzato il prerivestimento, si prescrivono le seguenti caratteristiche meccaniche:

- spritz-beton:
Rck a 28 gg ≥ 35 MPa;
- centine:
acciaio S275;
tensione di snervamento $\sigma_y = 275$ MPa,

Le verifiche statiche, sono state condotte per la sezione mista calcestruzzo-centine; sono quindi ricavate le caratteristiche resistenti omogeneizzando la centina metallica a spritz-beton, A^* e W^* (con coefficiente di omogeneizzazione pari a 15), ed essendo le sezioni interamente compresse, ovvero integralmente reagente, è possibile applicare la sovrapposizione degli effetti, così che la tensione massima agente sui materiali risulta:

$$\sigma_{sb} = N/A^* + M/W^*;$$

$$\sigma_{cent} = 15 \sigma_{sb}.$$

Le verifiche delle tensioni normali sono state condotte in diverse sezioni del prerivestimento, in modo tale da cogliere complessivamente il livello tensionale al quale i materiali sono soggetti.

Le limitazioni tensionali assunte consentono un tasso di utilizzo del materiale massimo fra quelli indicati dalla normativa: tale considerazione è ammessa in quanto si tratta di una struttura provvisoria.

$$\sigma_c \leq f_{ck} \times 0.60;$$

$$\sigma_s \leq f_{yk} \times 0.8.$$

9.5.9.2. Verifica del rivestimento definitivo

Verifiche allo stato limite ultimo

Per la verifica allo stato limite ultimo viene utilizzata la seguente combinazione di azioni:

$$E_d = \gamma_G G_k$$

La verifica allo stato limite ultimo viene condotta attraverso la definizione delle seguenti azioni di progetto:

$$N_d = 1.3 * N$$

$$M_d = 1.3 * M$$

dove N ed M sono le sollecitazioni derivanti dalle analisi numeriche.

Per ciascuna sezione tipo verrà riportato il diagramma di interazione M-N, i cui confini rappresentano i limiti della resistenza di calcolo R_d . La verifica risulta soddisfatta allorché $R_d \leq E_d$, ovvero quando i punti rappresentativi delle coppie di sollecitazioni sul rivestimento risultano all'interno al diagramma.

Si osserva inoltre che date le elevate azioni assiali dovute alla presenza di importanti battenti idraulici, si è considerata, come da normativa, una limitazione del dominio allo stato limite ultimo secondo la seguente formulazione:

$$N_{RD} = 0,8 A_c f_{cd} + A_s f_{yd}$$

Calcestruzzo

Le resistenze di calcolo, da utilizzare nelle verifiche allo stato limite ultimo, si ricavano dividendo le resistenze caratteristiche per opportuni coefficienti:

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{0.85 f_{ck}}{\gamma_c} = 18.8 MPa \Rightarrow \text{per C32/40;}$$

con $\gamma_c = 1.5$.

Acciaio armatura

Le resistenze di calcolo, da utilizzare nelle verifiche allo stato limite ultimo, si ricavano dividendo le resistenze caratteristiche per opportuni coefficienti:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 391.3 \text{ MPa}$$

con: $f_{yk}=450 \text{ MPa}$

$$\gamma_s=1.15.$$

Verifiche allo stato limite di esercizio

La verifica allo stato limite di esercizio viene condotta calcolando le tensioni massime sul rivestimento a partire dai valori nominali ottenuti dalla analisi e confrontando queste con quelle ammissibili definite attraverso le relazioni :

$$\sigma_c \leq f_{ck} \times 0.45 \text{ per calcestruzzo armato;}$$

$$\sigma_s \leq f_{yk} \times 0.8.$$

Le verifiche a presso flessione sono state condotte per la combinazione M_{max} , N_{max} .

9.5.10. ANALISI 1 – BY- PASS CARRABILE - SEZIONE TIPO B2

9.5.10.1. Fasi di calcolo

Il calcolo è stato condotto per fasi successive, secondo lo schema di seguito descritto:

TIME 1 – Geostatico



In questa prima fase di calcolo vengono applicati il peso proprio del terreno e le caratteristiche di resistenza e deformabilità delle formazioni in sito, in modo tale da ricostruire la situazione tensionale preesistente alla costruzione della galleria.

TIME 2 – Taratura e scavo – Relax 70%

In questa time di calcolo viene simulata l'apertura del fronte attraverso un'opportuna riduzione delle forze di scavo.

TIME 3 – Avanzamento pari allo sfondo di 1.00 m – Relax 82%

Viene simulato lo scavo pari allo sfondo di 1.00 m.

TIME 4 – Avanzamento scavo e posa prerivestimento – Relax 95%

Viene simulata la posa del prerivestimento in prossimità del fronte di scavo.

TIME 5 – Getto dell'arco rovescio – Relax 97.5%

Viene simulato il getto dell'arco rovescio.

TIME 6 – Getto del rivestimento di calotta – Relax 100%

Viene simulata la realizzazione del rivestimento di calotta, a completamento del rivestimento definitivo.

TIME 7 – Rimozione del prerivestimento e applicazione carico idraulico

Viene modellata la condizione a lungo termine sul rivestimento definitivo, rimuovendo gli elementi rappresentativi del prerivestimento ed applicando una falda residua per i by-pass carrabili drenanti pari a 20 m in chiave calotta nel lungo termine.

Nella seguente tabella viene riportata la stratigrafia di calcolo.

	Classificazione	Stratigrafia
Strato 1	Unità 4/5	da P.C. a -10 m
Strato 2	Unità 6	da -10 m a -30 m
Strato 3	Unità 7	> -30 m

Tabella 14 – Stratigrafia



9.5.10.2. *Esame dei risultati*

I risultati più significativi ottenuti dalla presente analisi sono riassunti in allegato. Gli output dell'elaborazione FLAC, di tipo grafico, sono riportati anch'essi in allegato; le dimensioni geometriche e gli spostamenti sono espressi in metri, mentre le tensioni in Pa.

Nel corso della simulazione delle fasi esecutive della galleria naturale, i fenomeni di plasticizzazione nel terreno al contorno della cavità non risultano rilevanti.

In termini deformativi la convergenza media si attesta intorno ai 2 cm per $k_0 = 1 - \sin \phi$ e pari a circa 2.5 cm per $k_0 = 1,2$ tenuto conto del valore di preconvergenza al fronte.

Tale stato deformativo induce risentimenti superficiali che raggiungono nel lungo termine valori dell'ordine dei 1.4 cm per $k_0 = 1 - \sin \phi$ e pari a circa 0.9 cm per $k_0 = 1,2$.



9.5.10.3. Verifiche statiche

I risultati delle analisi numeriche in termini di sollecitazioni agenti sul rivestimento definitivo sono allegati alla presente relazione.

Di seguito sono riassunti i risultati delle verifiche tensionali condotte nei rivestimenti per la combinazione M, N.

9.5.10.3.1. Verifica del prerivestimento

Rimandando ai paragrafi precedenti per le caratteristiche dei materiali ed i relativi limiti tensionali, si riportano nel seguito le verifiche svolte allo stato limite ultimo e stato limite di esercizio nelle time di calcolo significative.

I valori delle sollecitazioni ottenute dalle verifiche sezionali sono compatibili con i limiti previsti per i materiali impiegati e i punti rappresentativi delle sollecitazioni sono interni al dominio M-N, quindi le verifiche sono soddisfatte.

$$K_0 = 1 - \sin\phi$$

PRERIVESTIMENTO								
TIME	SEZIONE	A_s	A'_s	M	N	σ_c	σ_s	$\sigma_{c,lim}$
		[cm^2]	[cm^2]	[$KN*m$]	[KN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
4	CALOTTA	17.05	17.05	37.3	812.0	5.3	66.3	17.43
	PIEDRITTO	17.05	17.05	89.0	565.0	11.1	139.2	
5	CALOTTA	17.05	17.05	39.3	986.0	6.2	78.7	
	PIEDRITTO	17.05	17.05	88.3	737.0	11.0	99.2	

Tabella 15 - Verifiche tensionali - Prerivestimento

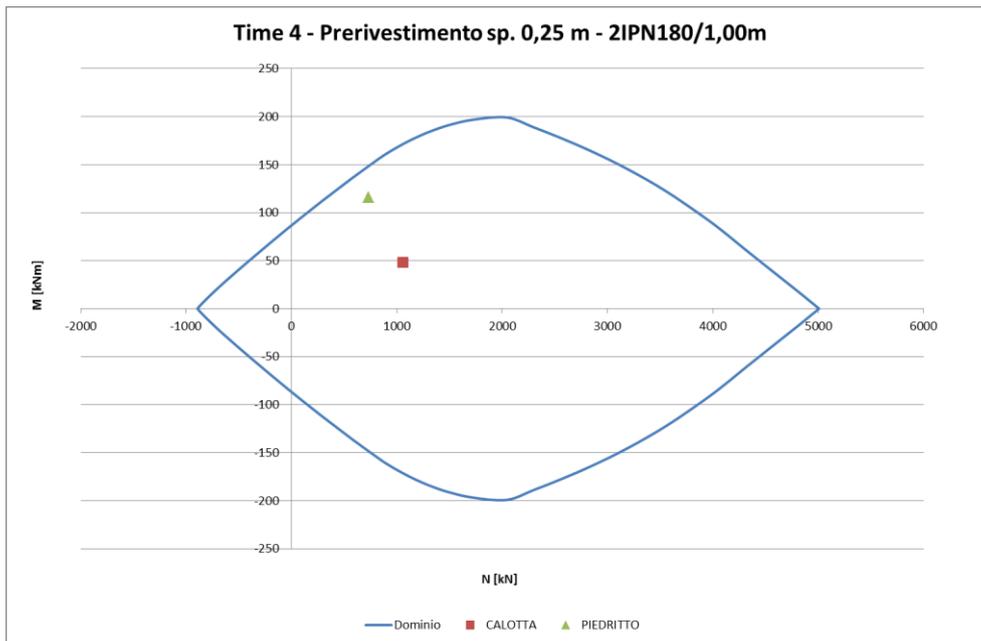


Figura 33 - Dominio M-N – Time 4

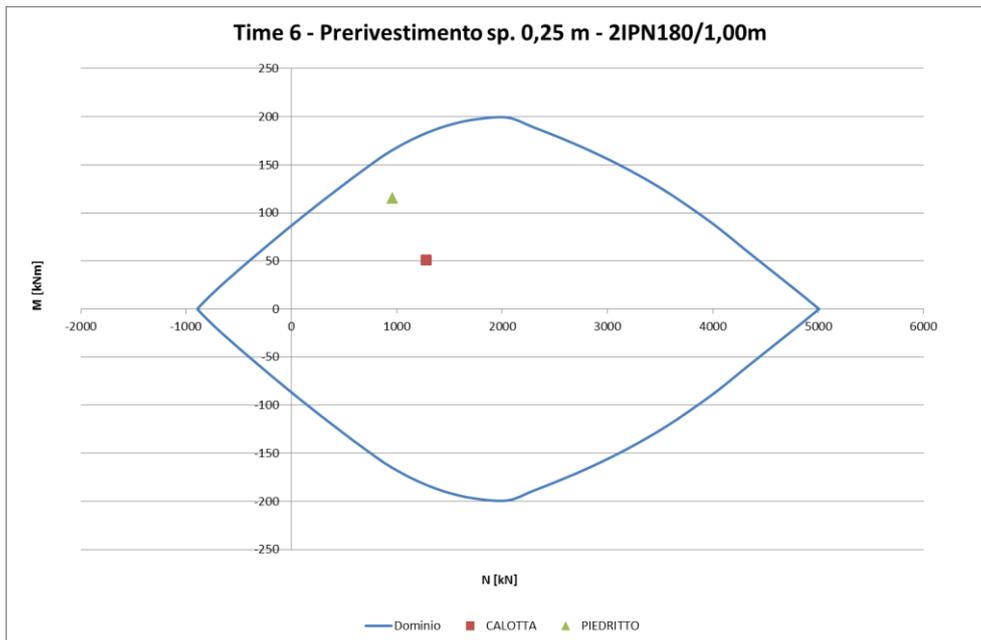


Figura 34 - Dominio M-N – Time 6

$K_0 = 1,2$

PRERIVESTIMENTO								
TIME	SEZIONE	A_s	A'_s	M	N	σ_c	σ_s	$\sigma_{c,lim}$
		[cm^2]	[cm^2]	[$KN*m$]	[KN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
4	CALOTTA	17.05	17.05	53.0	1170.0	7.9	98.2	17.43
	PIEDRITTO	17.05	17.05	94.8	753.0	11.8	114.5	
5	CALOTTA	17.05	17.05	52.2	1400.0	8.6	109.0	
	PIEDRITTO	17.05	17.05	102.2	961.0	12.8	93.7	

Tabella 16 - Verifiche tensionali - Prerivestimento

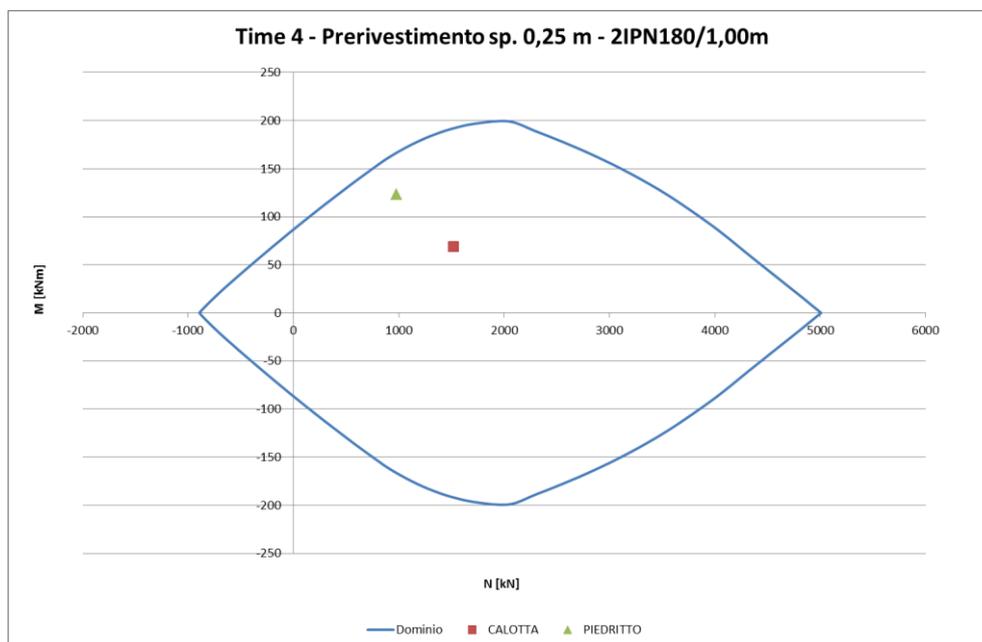


Figura 35 - Dominio M-N – Time 4

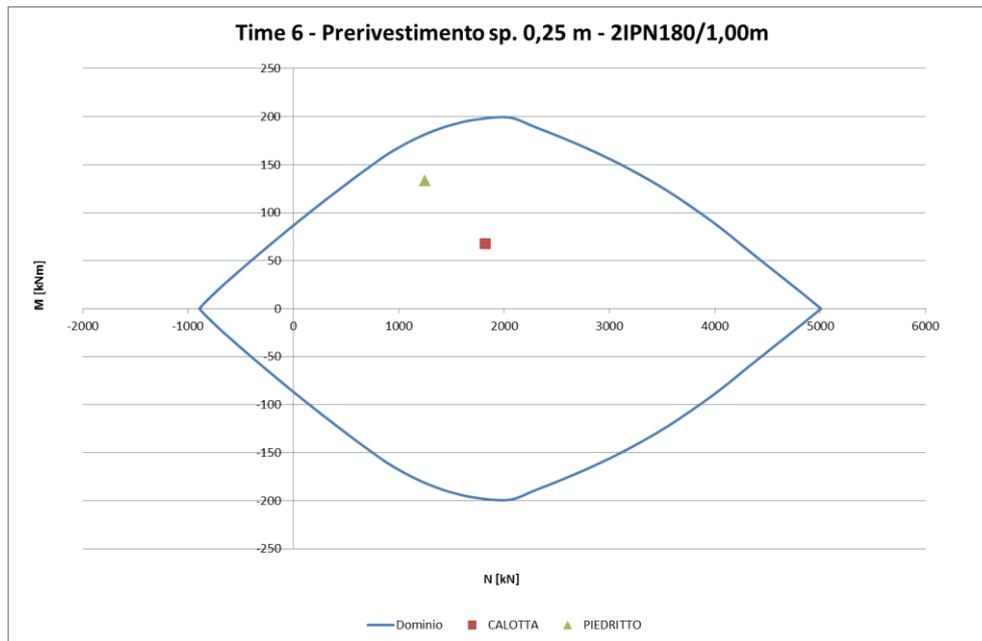


Figura 36 - Dominio M-N – Time 6

9.5.10.3.2. Verifica del rivestimento definitivo

Rimandando ai paragrafi precedenti per le caratteristiche dei materiali ed i relativi limiti tensionali, si riportano nel seguito le verifiche svolte allo stato limite ultimo e stato limite di esercizio nelle time di calcolo significative.

I valori delle sollecitazioni ottenute dalle verifiche sezionali sono compatibili con i limiti previsti per i materiali impiegati e i punti rappresentativi delle sollecitazioni sono interni al dominio M-N, quindi le verifiche sono soddisfatte.

Si sono esclusi dalla verifica, i valori di sollecitazione nei punti angolari in corrispondenza dei nodi arco rovescio-muretta dove, per effetto della modellazione numerica, si determinano eccessive concentrazioni di sforzo.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo bypass carrabili e pedonali

$$K_0 = 1 - \sin\phi$$

RIVESTIMENTO DEFINITIVO									
TIME	SEZIONE	A_s	A'_s	M	N	σ_c	σ_s	$\sigma_{c,lim}$	w
		[cm ²]	[cm ²]	[KN*m]	[KN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm]
6	CALOTTA	15.71	15.71	30.5	135.0	0.77	6.8	14.94	0.008
	PIEDRITTO	15.71	15.71	44.4	143.0	1.16	18.7		0.025
	ARCO ROVESCIO	31.42	31.42	79.3	150.0	1.62	31.1		0.031
7	CALOTTA	15.71	15.71	48.0	1790.0	3.46	49.8		-
	PIEDRITTO	15.71	15.71	125.3	1900.0	4.75	65.8		-
	ARCO ROVESCIO	31.42	31.42	482.9	1400.0	10.01	131.7		0.125

Tabella 17 - Verifiche tensionali - Rivestimento definitivo

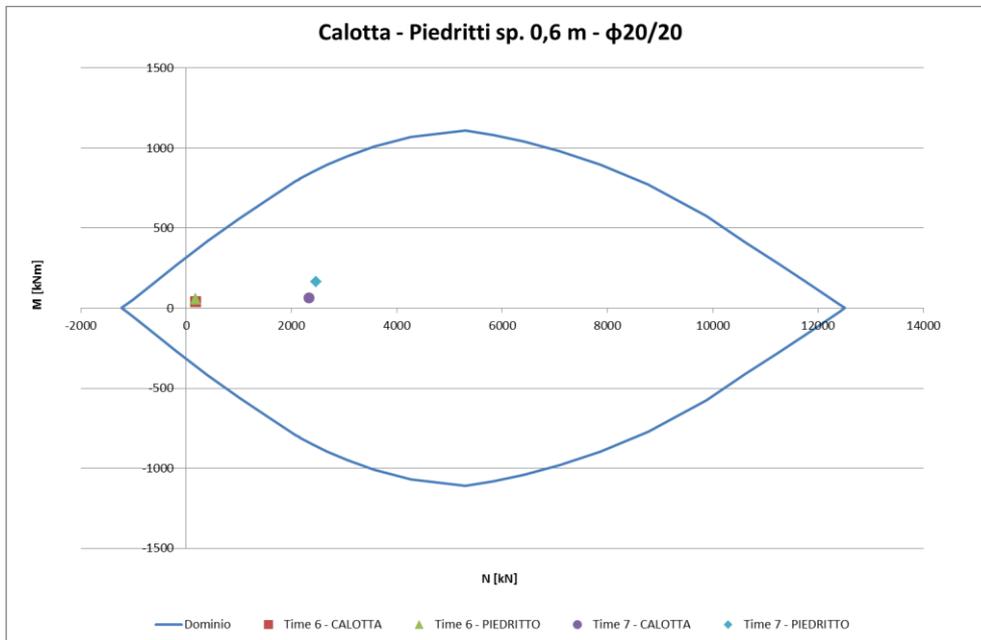


Figura 37 - Dominio M-N – Calotta e piedritti

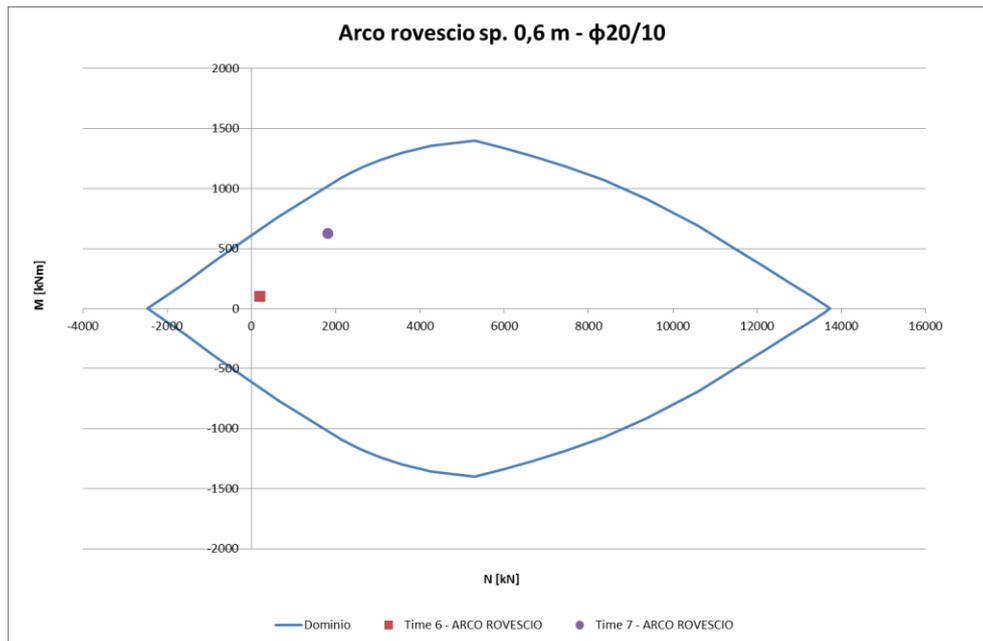


Figura 38 - Dominio M-N – Arco rovescio

Di seguito si riportano delle tabelle in cui vengono confrontati i valori di taglio sollecitante e taglio resistente: quest'ultimo è stato valutato con l'espressione fornita dalla normativa per gli elementi non armati a taglio.

VERIFICA A TAGLIO - TU 2008																							
base [cm]	altezza [cm]	coprif. [cm]	φ [mm]	A_s tesa [mm²]																			
100	60	5	20	1571																			
Rck [MPa]	γ_c	γ_s	N [kN]	E_s [Mpa]	f_{yk} [MPa]																		
40	1.5	1.15	2010.0	210000	450																		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>d [mm]</td> <td>k</td> <td>b_w [mm]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">540</td> <td style="text-align: center;">1.609</td> <td style="text-align: center;">1000</td> </tr> </table>			d [mm]	k	b_w [mm]	540	1.609	1000	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>V_{Sdu} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">15.8</td> </tr> </table>			V_{Sdu} [kN]	15.8										
d [mm]	k	b_w [mm]																					
540	1.609	1000																					
V_{Sdu} [kN]																							
15.8																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>f_{ck} [MPa]</td> <td>v_{min}</td> <td>σ_{cp} [MPa]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">33.2</td> <td style="text-align: center;">0.411</td> <td style="text-align: center;">3.350</td> </tr> </table>			f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]	33.2	0.411	3.350	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Se NON risulta necessario armare</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">limite a Vsd</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">[kN]</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3109.43</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">V_{Sd} < V_{lim}</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Si</td> <td></td> </tr> </table>			Se NON risulta necessario armare		limite a Vsd		[kN]		3109.43		V_{Sd} < V_{lim}		Si	
f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]																					
33.2	0.411	3.350																					
Se NON risulta necessario armare																							
limite a Vsd																							
[kN]																							
3109.43																							
V_{Sd} < V_{lim}																							
Si																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>ρ_i</td> <td>V_{Rd} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0.0029</td> <td style="text-align: center;">493.52</td> </tr> </table>			ρ_i	V_{Rd} [kN]	0.0029	493.52	<p style="text-align: center; color: blue;">NON risulta necessario armare a taglio (Vsd < V_{Rd,c})</p>																
ρ_i	V_{Rd} [kN]																						
0.0029	493.52																						

Tabella 18 – Verifica a taglio – Calotta

VERIFICA A TAGLIO - TU 2008										
base [cm]	altezza [cm]	coprif. [cm]	φ [mm]	A_s tesa [mm²]						
100	60	5	20	1571						
Rck [MPa]	γ c	γ s	N [kN]	E_s [Mpa]	f_{yk} [MPa]					
40	1.5	1.15	1900.0	210000	450					
			V_{Sdu} [kN]							
			312.3							
d [mm]	k	b_w [mm]								
540	1.609	1000								
f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]								
33.2	0.411	3.167								
ρ_l			V_{Rd} [kN]							
0.0029			478.67							
NON risulta necessario armare a taglio (Vsd<VRd,c)										
Se NON risulta necessario armare										
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><td>limite a Vsd</td></tr> <tr><td>[kN]</td></tr> <tr><td>3109.43</td></tr> <tr><td>Vsd<Vlim</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Si</td></tr> </table>						limite a Vsd	[kN]	3109.43	Vsd<Vlim	Si
limite a Vsd										
[kN]										
3109.43										
Vsd<Vlim										
Si										

Tabella 19 – Verifica a taglio – Piedritto

VERIFICA A TAGLIO - TU 2008										
base [cm]	altezza [cm]	coprif. [cm]	φ [mm]	A_s tesa [mm²]						
100	60	5	20	3142						
Rck [MPa]	γ c	γ s	N [kN]	E_s [Mpa]	f_{yk} [MPa]					
40	1.5	1.15	1350.0	210000	450					
			V_{Sdu} [kN]							
			330.2							
d [mm]	k	b_w [mm]								
540	1.609	1000								
f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]								
33.2	0.411	2.250								
ρ_l			V_{Rd} [kN]							
0.0058			461.93							
NON risulta necessario armare a taglio (Vsd<VRd,c)										
Se NON risulta necessario armare										
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><td>limite a Vsd</td></tr> <tr><td>[kN]</td></tr> <tr><td>3109.43</td></tr> <tr><td>Vsd<Vlim</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Si</td></tr> </table>						limite a Vsd	[kN]	3109.43	Vsd<Vlim	Si
limite a Vsd										
[kN]										
3109.43										
Vsd<Vlim										
Si										

Tabella 20 – Verifica a taglio – Arco rovescio

$K_0 = 1,2$

RIVESTIMENTO DEFINITIVO									
TIME	SEZIONE	A_s	A'_s	M	N	σ_c	σ_s	$\sigma_{c,lim}$	w
		[cm^2]	[cm^2]	[KN^*m]	[KN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm]
6	CALOTTA	15.71	15.71	6.1	139.0	0.30	4.3	14.94	-
	PIEDRITTO	15.71	15.71	23.1	158.0	0.60	0.8		-
	ARCO ROVESCIO	31.42	31.42	81.5	403.0	1.75	8.2		0.007
7	CALOTTA	15.71	15.71	65.9	2300.0	4.51	64.8		-
	PIEDRITTO	15.71	15.71	87.0	2170.0	4.61	65.4		-
	ARCO ROVESCIO	31.42	31.42	473.3	1800.0	9.92	87.3		0.078

Tabella 21 - Verifiche tensionali - Rivestimento definitivo

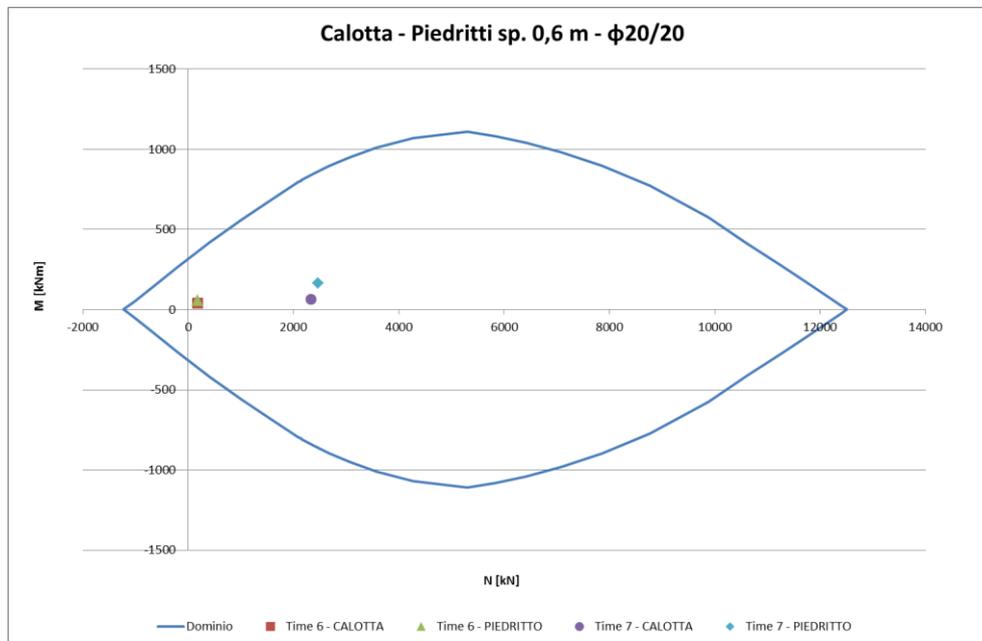


Figura 39 - Dominio M-N – Calotta e piedritti

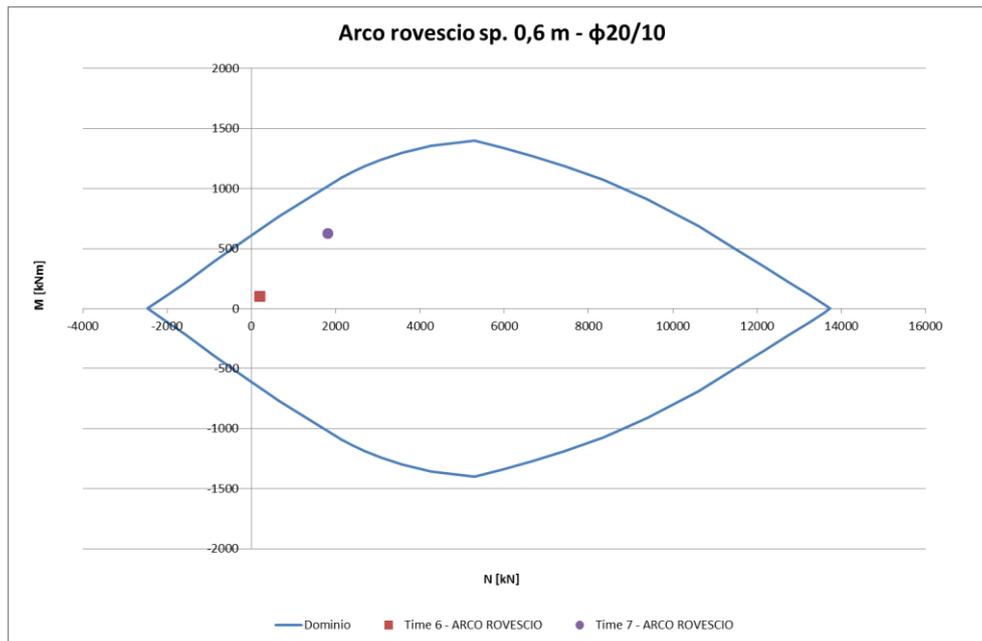


Figura 40 - Dominio M-N – Arco rovescio

Di seguito si riportano delle tabelle in cui vengono confrontati i valori di taglio sollecitante e taglio resistente: quest'ultimo è stato valutato con l'espressione fornita dalla normativa per gli elementi non armati a taglio.

VERIFICA A TAGLIO - TU 2008																							
base [cm]	altezza [cm]	coprif. [cm]	φ [mm]	A_s tesa [mm²]																			
100	60	5	20	1571																			
R_{ck} [MPa]	γ_c	γ_s	N [kN]	E_s [Mpa]	f_{yk} [MPa]																		
40	1.5	1.15	2370.0	210000	450																		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>d [mm]</td> <td>k</td> <td>b_w [mm]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">540</td> <td style="text-align: center;">1.609</td> <td style="text-align: center;">1000</td> </tr> </table>			d [mm]	k	b_w [mm]	540	1.609	1000	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>V_{Sdu} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">21.6</td> </tr> </table>			V_{Sdu} [kN]	21.6										
d [mm]	k	b_w [mm]																					
540	1.609	1000																					
V_{Sdu} [kN]																							
21.6																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>f_{ck} [MPa]</td> <td>v_{min}</td> <td>σ_{cp} [MPa]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">33.2</td> <td style="text-align: center;">0.411</td> <td style="text-align: center;">3.763</td> </tr> </table>			f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]	33.2	0.411	3.763	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Se NON risulta necessario armare</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">limite a V_{sd}</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">[kN]</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3109.43</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">V_{Sd} < V_{lim}</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Si</td> <td></td> </tr> </table>			Se NON risulta necessario armare		limite a V_{sd}		[kN]		3109.43		V_{Sd} < V_{lim}		Si	
f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]																					
33.2	0.411	3.763																					
Se NON risulta necessario armare																							
limite a V_{sd}																							
[kN]																							
3109.43																							
V_{Sd} < V_{lim}																							
Si																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>ρ_i</td> <td>V_{Rd} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0.0029</td> <td style="text-align: center;">526.95</td> </tr> </table>			ρ_i	V_{Rd} [kN]	0.0029	526.95	<p style="text-align: center;">NON risulta necessario armare a taglio (V_{sd} < V_{Rd,c})</p>																
ρ_i	V_{Rd} [kN]																						
0.0029	526.95																						

Tabella 22 – Verifica a taglio – Calotta

VERIFICA A TAGLIO - TU 2008										
base [cm]	altezza [cm]	coprif. [cm]	φ [mm]	A_s tesa [mm²]						
100	60	5	20	1571						
Rck [MPa]	γ c	γ s	N [kN]	E_s [Mpa]	f_{yk} [MPa]					
40	1.5	1.15	2160.0	210000	450					
			V_{Sdu} [kN]							
			353.5							
d [mm]	k	b_w [mm]								
540	1.609	1000								
f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]								
33.2	0.411	3.600								
ρ_l			V_{Rd} [kN]							
0.0029			513.77							
NON risulta necessario armare a taglio (Vsd<VRd,c)										
Se NON risulta necessario armare										
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><td>limite a Vsd</td></tr> <tr><td>[kN]</td></tr> <tr><td>3109.43</td></tr> <tr><td>Vsd<Vlim</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Si</td></tr> </table>						limite a Vsd	[kN]	3109.43	Vsd<Vlim	Si
limite a Vsd										
[kN]										
3109.43										
Vsd<Vlim										
Si										

Tabella 23 – Verifica a taglio – Piedritto

VERIFICA A TAGLIO - TU 2008										
base [cm]	altezza [cm]	coprif. [cm]	φ [mm]	A_s tesa [mm²]						
100	60	5	20	3142						
Rck [MPa]	γ c	γ s	N [kN]	E_s [Mpa]	f_{yk} [MPa]					
40	1.5	1.15	1710.0	210000	450					
			V_{Sdu} [kN]							
			359.1							
d [mm]	k	b_w [mm]								
540	1.609	1000								
f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]								
33.2	0.411	2.850								
ρ_l			V_{Rd} [kN]							
0.0058			510.53							
NON risulta necessario armare a taglio (Vsd<VRd,c)										
Se NON risulta necessario armare										
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><td>limite a Vsd</td></tr> <tr><td>[kN]</td></tr> <tr><td>3109.43</td></tr> <tr><td>Vsd<Vlim</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Si</td></tr> </table>						limite a Vsd	[kN]	3109.43	Vsd<Vlim	Si
limite a Vsd										
[kN]										
3109.43										
Vsd<Vlim										
Si										

Tabella 24 – Verifica a taglio – Arco rovescio

9.5.11. ANALISI 2 – BY- PASS CARRABILE - SEZIONE TIPO C2

9.5.11.1. Fasi di calcolo

Il calcolo è stato condotto per fasi successive, secondo lo schema di seguito descritto:

TIME 1 – Geostatico

In questa prima fase di calcolo vengono applicati il peso proprio del terreno e le caratteristiche di resistenza e deformabilità delle formazioni in sito, in modo tale da ricostruire la situazione tensionale preesistente alla costruzione della galleria.

TIME 2 – Taratura e scavo – Relax 35%

In questa time di calcolo viene simulata l'apertura del fronte attraverso un'opportuna riduzione delle forze di scavo.

TIME 3 – Avanzamento pari allo sfondo di 1.00 m – Relax 60%

Viene simulato lo scavo pari allo sfondo di 1.00 m.

TIME 4 – Avanzamento scavo e posa pririvestimento – Relax 90%

Viene simulata la posa del pririvestimento in prossimità del fronte di scavo.

TIME 5 – Getto dell'arco rovescio – Relax 97%

Viene simulato il getto dell'arco rovescio.

TIME 6 – Getto del rivestimento di calotta – Relax 100%

Viene simulata la realizzazione del rivestimento di calotta, a completamento del rivestimento definitivo.

TIME 7 – Rimozione del pririvestimento e applicazione carico idraulico

Viene modellata la condizione a lungo termine sul rivestimento definitivo, rimuovendo gli elementi rappresentativi del pririvestimento ed applicando una falda residua per i by-pass carrabili drenanti pari a 20 m in chiave calotta nel lungo termine.

Nella seguente tabella viene riportata la stratigrafia di calcolo.



	Classificazione	Stratigrafia
Strato 1	Unità 4/5	da P.C. a -20 m
Strato 2	Unità 6	da -20 m a -40 m
Strato 3	Unità 7a	da -40 m a -53 m
Strato 4	Unità 7	> -53 m

Tabella 25 - Stratigrafia

9.5.11.2. Esame dei risultati

I risultati più significativi ottenuti dalla presente analisi sono riassunti in allegato.

Gli output dell'elaborazione FLAC, di tipo grafico, sono riportati anch'essi in allegato; le dimensioni geometriche e gli spostamenti sono espressi in metri, mentre le tensioni in Pa.

Nel corso della simulazione delle fasi esecutive della galleria naturale, i fenomeni di plasticizzazione nel terreno al contorno della cavità non risultano rilevanti.

In termini deformativi la convergenza media si attesta intorno ai 2.5 cm per $k_0 = 1 - \sin \phi$ e pari a circa 3 cm per $k_0 = 1,2$ tenuto conto del valore di preconvergenza al fronte.

Tale stato deformativo induce risentimenti superficiali che raggiungono nel lungo termine valori dell'ordine dei 1.5 cm per $k_0 = 1 - \sin \phi$ e pari a circa 1.2 cm per $k_0 = 1,2$.



9.5.11.3. Verifiche statiche

I risultati delle analisi numeriche in termini di sollecitazioni agenti sul rivestimento definitivo sono allegati alla presente relazione.

Di seguito sono riassunti i risultati delle verifiche tensionali condotte nei rivestimenti per la combinazione M, N.

9.5.11.3.1. Verifica del pririvestimento

Rimandando ai paragrafi precedenti per le caratteristiche dei materiali ed i relativi limiti tensionali, si riportano nel seguito le verifiche svolte allo stato limite ultimo e stato limite di esercizio nelle time di calcolo significative.

I valori delle sollecitazioni ottenute dalle verifiche sezionali sono compatibili con i limiti previsti per i materiali impiegati e i punti rappresentativi delle sollecitazioni sono interni al dominio M-N, quindi le verifiche sono soddisfatte.

$$K_0 = 1 - \sin\phi$$

PRIRIVESTIMENTO								
TIME	SEZIONE	A _s	A' _s	M	N	σ _c	σ _s	σ _{c,lim}
		[cm ²]	[cm ²]	[KN*m]	[KN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
4	CALOTTA	23.91	23.91	108.8	1260.0	9.4	17.0	17.43
	PIEDRITTO	23.91	23.91	120.9	841.0	10.0	83.4	
5	CALOTTA	23.91	23.91	126.2	1660.0	11.2	4.6	
	PIEDRITTO	23.91	23.91	108.4	1250.0	9.3	17.4	

Tabella 26 - Verifiche tensionali - Pririvestimento

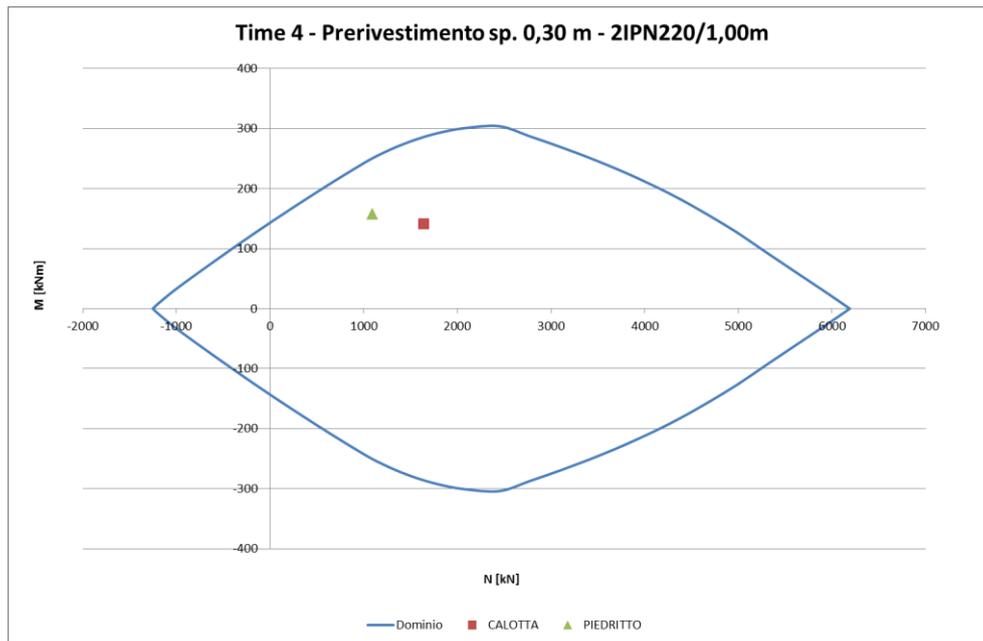


Figura 41 - Dominio M-N – Time 4

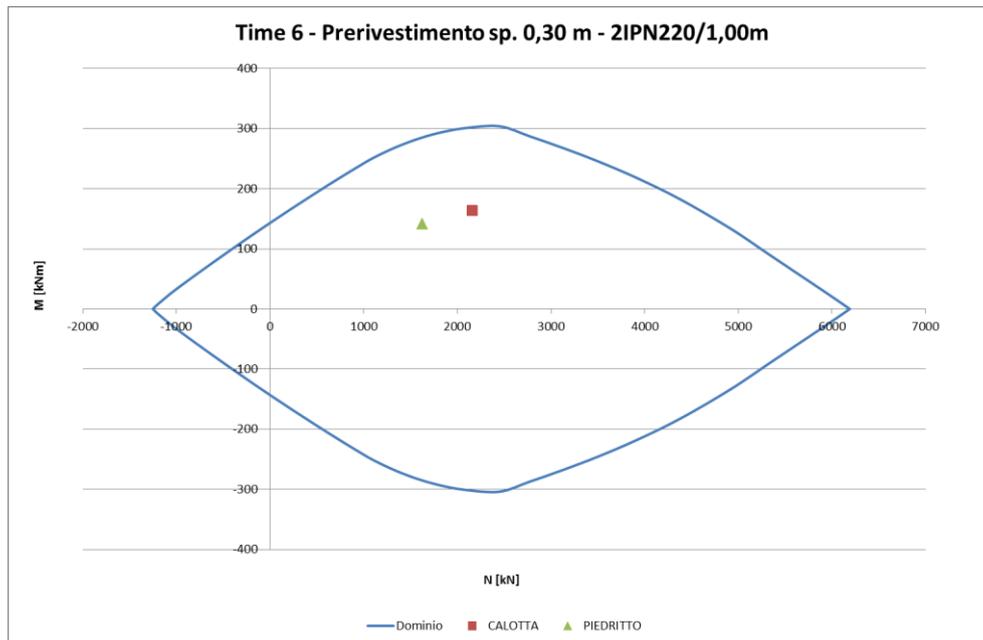


Figura 42 - Dominio M-N – Time 6

$K_0 = 1,2$

PRERIVESTIMENTO								
TIME	SEZIONE	A_s	A'_s	M	N	σ_c	σ_s	$\sigma_{c,lim}$
		[cm^2]	[cm^2]	[$KN*m$]	[KN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
4	CALOTTA	23.91	23.91	100.0	2150.0	10.9	137.0	17.43
	PIEDRITTO	23.91	23.91	81.8	668.0	6.8	42.6	
5	CALOTTA	23.91	23.91	107.7	2640.0	12.6	160.7	
	PIEDRITTO	23.91	23.91	100.4	1210.0	8.7	11.8	

Tabella 27 - Verifiche tensionali - Prerivestimento

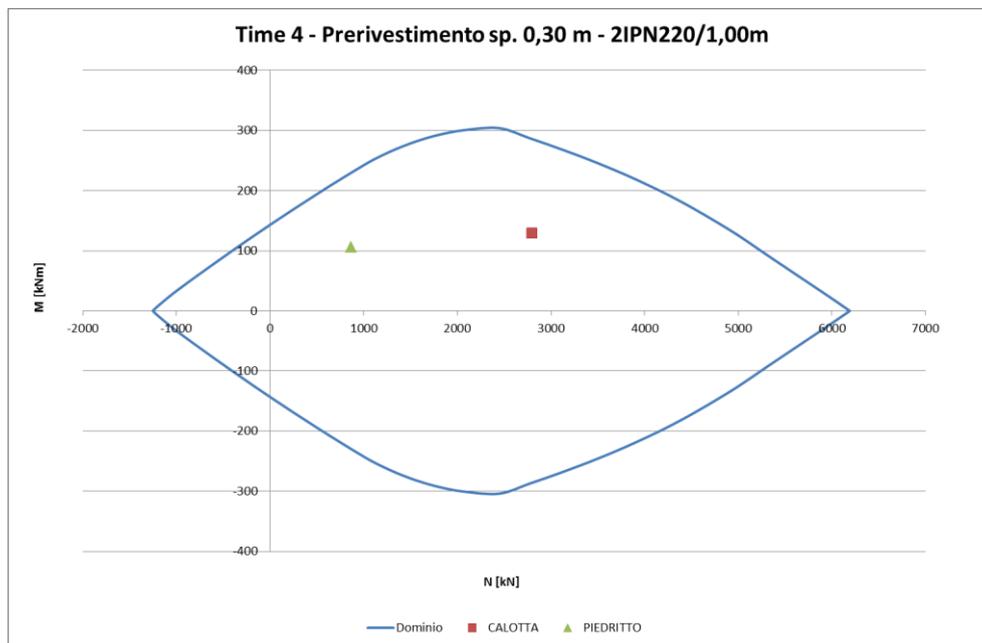


Figura 43 - Dominio M-N – Time 4

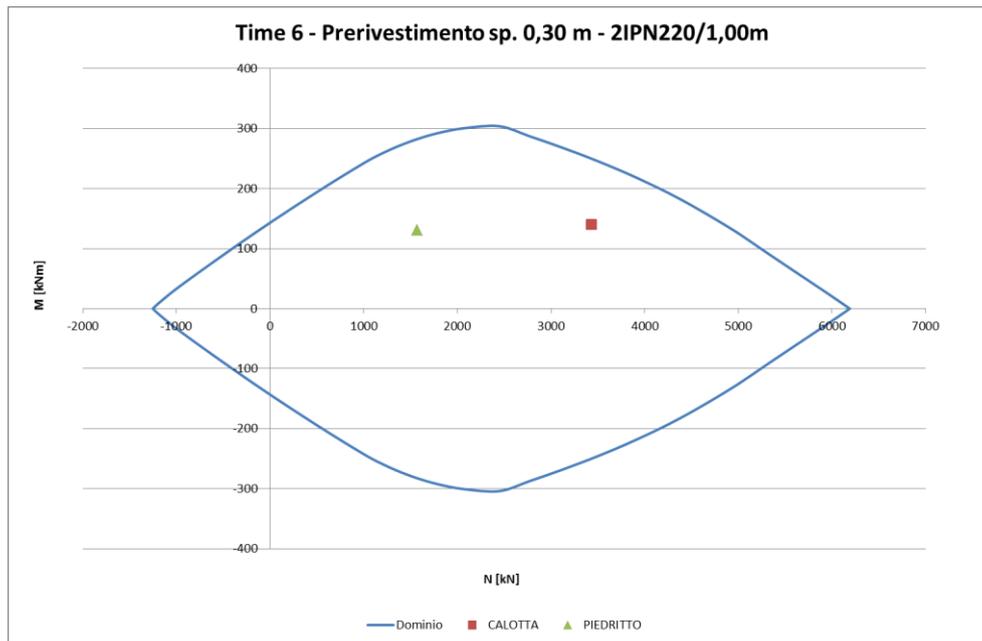


Figura 44 - Dominio M-N – Time 6

9.5.11.3.2. Verifica del rivestimento definitivo

Rimandando ai paragrafi precedenti per le caratteristiche dei materiali ed i relativi limiti tensionali, si riportano nel seguito le verifiche svolte allo stato limite ultimo e stato limite di esercizio nelle time di calcolo significative.

I valori delle sollecitazioni ottenute dalle verifiche sezionali sono compatibili con i limiti previsti per i materiali impiegati e i punti rappresentativi delle sollecitazioni sono interni al dominio M-N, quindi le verifiche sono soddisfatte.

Si sono esclusi dalla verifica, i valori di sollecitazione nei punti angolosi in corrispondenza dei nodi arco rovescio-muretta dove, per effetto della modellazione numerica, si determinano eccessive concentrazioni di sforzo.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo bypass carrabili e pedonali

$K_0 = 1 - \sin\phi$

RIVESTIMENTO DEFINITIVO									
TIME	SEZIONE	A_s	A'_s	M	N	σ_c	σ_s	$\sigma_{c,lim}$	w
		[cm ²]	[cm ²]	[KN*m]	[KN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm]
6	CALOTTA	19.01	19.01	55.9	78.0	1.41	41.0	14.94	0.059
	PIEDRITTO	19.01	19.01	59.8	145.0	1.50	30.6		0.041
	ARCO ROVESCIO	38.01	38.01	171.9	260.0	3.19	63.7		0.063
7	CALOTTA	19.01	19.01	147.0	2400.0	5.73	79.6		-
	PIEDRITTO	19.01	19.01	90.5	2350.0	4.85	68.9		-
	ARCO ROVESCIO	38.01	38.01	550.8	1430.0	10.57	142.7		0.139

Tabella 28 - Verifiche tensionali – Rivestimento definitivo

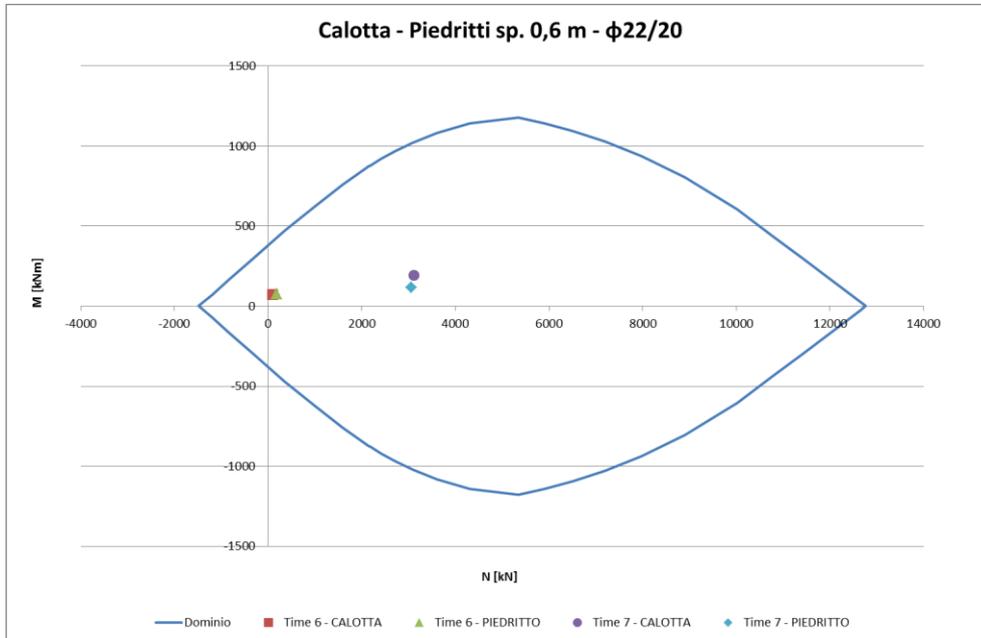


Figura 45 - Dominio M-N – Calotta e piedritti

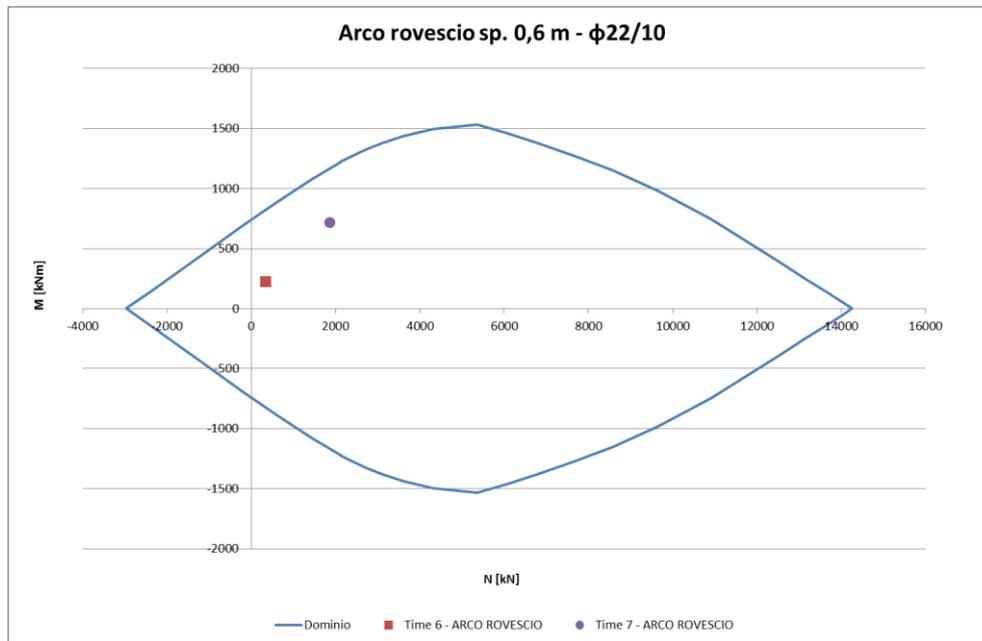


Figura 46 - Dominio M-N – Arco rovescio

Di seguito si riportano delle tabelle in cui vengono confrontati i valori di taglio sollecitante e taglio resistente: quest'ultimo è stato valutato con l'espressione fornita dalla normativa per gli elementi non armati a taglio.

VERIFICA A TAGLIO - TU 2008													
base [cm]	altezza [cm]	coprif. [cm]	φ [mm]	A_s tesa [mm²]									
100	60	5	22	1901									
Rck [MPa]	γ_c	γ_s	N [kN]	E_s [Mpa]	f_{yk} [MPa]								
40	1.5	1.15	2640.0	210000	450								
			<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td style="background-color: #ffffcc;">V_{Sdu} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">74.0</td> </tr> </table>			V_{Sdu} [kN]	74.0						
V_{Sdu} [kN]													
74.0													
			<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td style="background-color: #ffffcc;">V_{Sd} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">74.0</td> </tr> </table>			V_{Sd} [kN]	74.0						
V_{Sd} [kN]													
74.0													
			<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td style="background-color: #ffffcc;">d [mm]</td> <td style="background-color: #ffffcc;">k</td> <td style="background-color: #ffffcc;">b_w [mm]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">539</td> <td style="text-align: center;">1.609</td> <td style="text-align: center;">1000</td> </tr> </table>			d [mm]	k	b_w [mm]	539	1.609	1000		
d [mm]	k	b_w [mm]											
539	1.609	1000											
			<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td style="background-color: #ffffcc;">f_{ck} [MPa]</td> <td style="background-color: #ffffcc;">v_{min}</td> <td style="background-color: #ffffcc;">σ_{cp} [MPa]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">33.2</td> <td style="text-align: center;">0.412</td> <td style="text-align: center;">3.763</td> </tr> </table>			f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]	33.2	0.412	3.763		
f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]											
33.2	0.412	3.763											
			<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td style="background-color: #ffffcc;">ρ_i</td> <td style="background-color: #ffffcc;">V_{Rd} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0.0035</td> <td style="text-align: center;">540.55</td> </tr> </table>			ρ_i	V_{Rd} [kN]	0.0035	540.55				
ρ_i	V_{Rd} [kN]												
0.0035	540.55												
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td colspan="2" style="background-color: #e0ffe0;">Se NON risulta necessario armare</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #ffffcc;">limite a Vsd</td> <td style="background-color: #ffffcc;">[kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3103.67</td> <td style="text-align: center;">3103.67</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #ffffcc;">V_{Sd} < V_{lim}</td> <td style="background-color: #ffffcc;">Si</td> </tr> </table>						Se NON risulta necessario armare		limite a Vsd	[kN]	3103.67	3103.67	V_{Sd} < V_{lim}	Si
Se NON risulta necessario armare													
limite a Vsd	[kN]												
3103.67	3103.67												
V_{Sd} < V_{lim}	Si												
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td colspan="2" style="background-color: #e0ffe0;">NON risulta necessario armare a taglio (Vsd < V_{Rd,c})</td> </tr> </table>						NON risulta necessario armare a taglio (Vsd < V_{Rd,c})							
NON risulta necessario armare a taglio (Vsd < V_{Rd,c})													

Tabella 29 – Verifica a taglio – Calotta

VERIFICA A TAGLIO - TU 2008										
base [cm]	altezza [cm]	coprif. [cm]	φ [mm]	A_s tesa [mm²]						
100	60	5	22	1901						
Rck [MPa]	γ c	γ s	N [kN]	E_s [Mpa]	f_{yk} [MPa]					
40	1.5	1.15	2350.0	210000	450					
			V_{Sdu} [kN]							
			245.3							
d [mm]	k	b_w [mm]								
539	1.609	1000								
f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]								
33.2	0.412	3.763								
ρ_l			V_{Rd} [kN]							
0.0035			540.55							
NON risulta necessario armare a taglio (Vsd<VRd,c)										
Se NON risulta necessario armare										
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td>limite a Vsd</td></tr> <tr><td>[kN]</td></tr> <tr><td>3103.67</td></tr> <tr><td>Vsd<Vlim</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Si</td></tr> </table>						limite a Vsd	[kN]	3103.67	Vsd<Vlim	Si
limite a Vsd										
[kN]										
3103.67										
Vsd<Vlim										
Si										

Tabella 30 – Verifica a taglio – Piedritto

VERIFICA A TAGLIO - TU 2008										
base [cm]	altezza [cm]	coprif. [cm]	φ [mm]	A_s tesa [mm²]						
100	60	5	22	3801						
Rck [MPa]	γ c	γ s	N [kN]	E_s [Mpa]	f_{yk} [MPa]					
40	1.5	1.15	1390.0	210000	450					
			V_{Sdu} [kN]							
			316.9							
d [mm]	k	b_w [mm]								
539	1.609	1000								
f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]								
33.2	0.412	2.317								
ρ_l			V_{Rd} [kN]							
0.0071			485.05							
NON risulta necessario armare a taglio (Vsd<VRd,c)										
Se NON risulta necessario armare										
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td>limite a Vsd</td></tr> <tr><td>[kN]</td></tr> <tr><td>3103.67</td></tr> <tr><td>Vsd<Vlim</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Si</td></tr> </table>						limite a Vsd	[kN]	3103.67	Vsd<Vlim	Si
limite a Vsd										
[kN]										
3103.67										
Vsd<Vlim										
Si										

Tabella 31 – Verifica a taglio – Arco rovescio

$K_0 = 1,2$

RIVESTIMENTO DEFINITIVO									
TIME	SEZIONE	A_s	A'_s	M	N	σ_c	σ_s	$\sigma_{c,lim}$	w
		[cm^2]	[cm^2]	[KN^*m]	[KN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm]
6	CALOTTA	19.01	19.01	12.4	125.0	0.36	5.0	14.94	-
	PIEDRITTO	19.01	19.01	27.2	138.0	0.66	3.6		0.004
	ARCO ROVESCIO	38.01	38.01	152.9	704.0	3.08	16.1		0.013
7	CALOTTA	19.01	19.01	61.2	3280.0	5.86	85.2		-
	PIEDRITTO	19.01	19.01	101.2	2270.0	4.88	68.9		-
	ARCO ROVESCIO	38.01	38.01	525.0	2090.0	10.41	76.1		0.065

Tabella 32 - Verifiche tensionali - Rivestimento definitivo

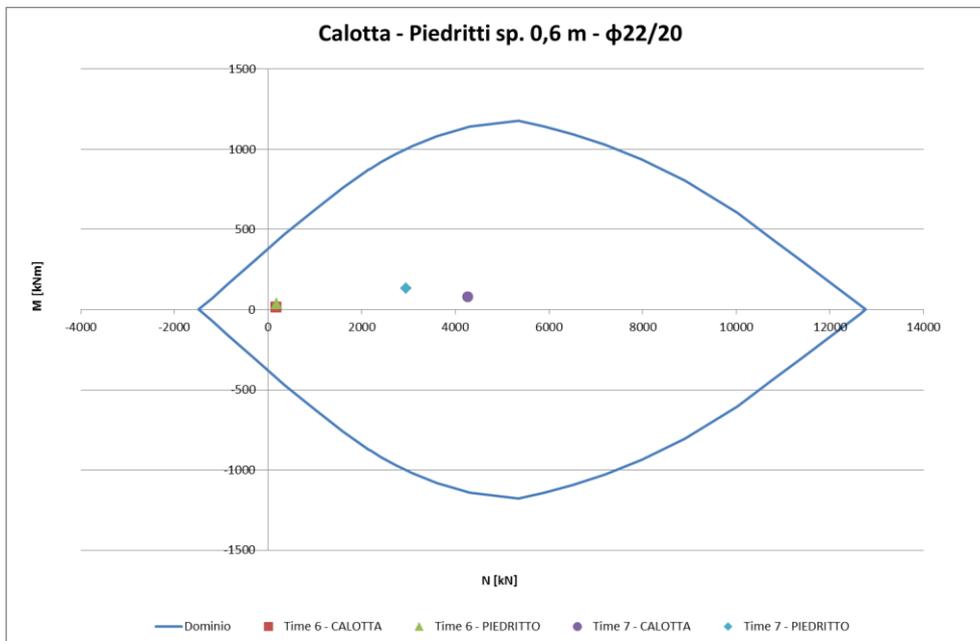


Figura 47 - Dominio M-N – Calotta e piedritti

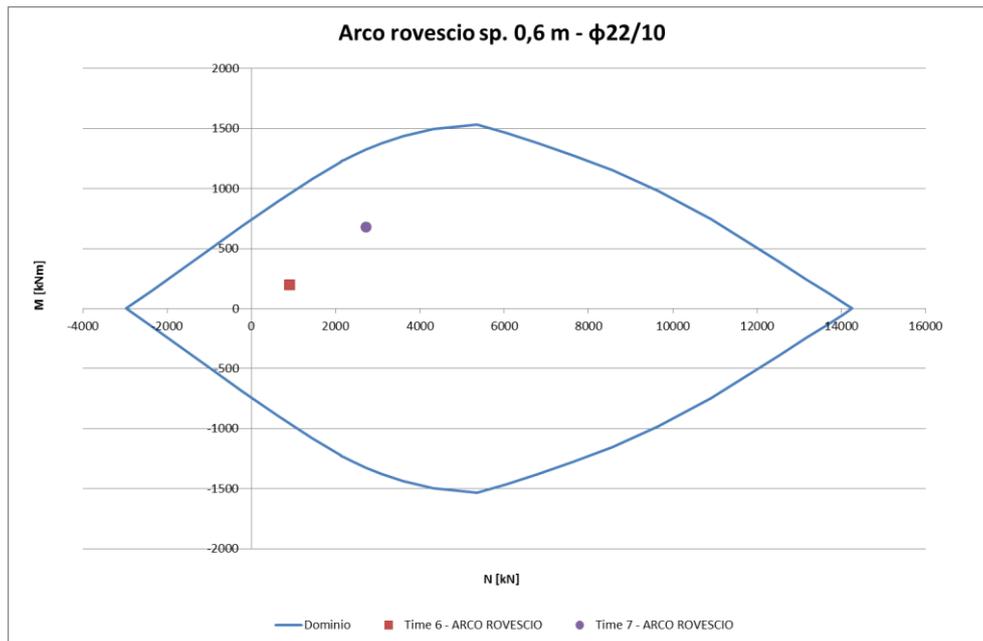


Figura 48 - Dominio M-N – Arco rovescio

Di seguito si riportano delle tabelle in cui vengono confrontati i valori di taglio sollecitante e taglio resistente: quest'ultimo è stato valutato con l'espressione fornita dalla normativa per gli elementi non armati a taglio.

VERIFICA A TAGLIO - TU 2008																			
base [cm]	altezza [cm]	coprif. [cm]	ϕ [mm]	A_s tesa [mm ²]															
100	60	5	22	1901															
Rck [MPa]	γ_c	γ_s	N [kN]	E_s [Mpa]	f_{yk} [MPa]														
40	1.5	1.15	3530.0	210000	450														
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="background-color: #ffffcc;">d [mm]</td> <td style="background-color: #ffffcc;">k</td> <td style="background-color: #ffffcc;">b_w [mm]</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #ffffcc;">539</td> <td style="background-color: #ffffcc;">1.609</td> <td style="background-color: #ffffcc;">1000</td> </tr> </table>			d [mm]	k	b_w [mm]	539	1.609	1000	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="background-color: #ffffcc;">V_{Sdu} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #ffffcc;">30.0</td> </tr> </table>			V_{Sdu} [kN]	30.0						
d [mm]	k	b_w [mm]																	
539	1.609	1000																	
V_{Sdu} [kN]																			
30.0																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="background-color: #ffffcc;">f_{ck} [MPa]</td> <td style="background-color: #ffffcc;">v_{min}</td> <td style="background-color: #ffffcc;">σ_{cp} [MPa]</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #ffffcc;">33.2</td> <td style="background-color: #ffffcc;">0.412</td> <td style="background-color: #ffffcc;">3.763</td> </tr> </table>			f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]	33.2	0.412	3.763	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Se NON risulta necessario armare</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #ffffcc;">limite a V_{sd}</td> <td style="background-color: #ffffcc;">[kN]</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #ffffcc;">3103.67</td> <td style="background-color: #ffffcc;">$V_{Sd} < V_{lim}$</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #ffffcc;">Si</td> <td></td> </tr> </table>			Se NON risulta necessario armare		limite a V_{sd}	[kN]	3103.67	$V_{Sd} < V_{lim}$	Si	
f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]																	
33.2	0.412	3.763																	
Se NON risulta necessario armare																			
limite a V_{sd}	[kN]																		
3103.67	$V_{Sd} < V_{lim}$																		
Si																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="background-color: #ffffcc;">ρ_l</td> <td style="background-color: #ffffcc;">V_{Rd} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #ffffcc;">0.0035</td> <td style="background-color: #ffffcc;">540.55</td> </tr> </table>			ρ_l	V_{Rd} [kN]	0.0035	540.55	<p style="text-align: center;">NON risulta necessario armare a taglio ($V_{sd} < V_{Rd,c}$)</p>												
ρ_l	V_{Rd} [kN]																		
0.0035	540.55																		

Tabella 33 – Verifica a taglio – Calotta

VERIFICA A TAGLIO - TU 2008																
base [cm]	altezza [cm]	coprif. [cm]	ϕ [mm]	A_s tesa [mm²]												
100	60	5	22	1901												
Rck [MPa]	γ_c	γ_s	N [kN]	E_s [Mpa]	f_{yk} [MPa]											
40	1.5	1.15	2270.0	210000	450											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>d [mm]</td> <td>k</td> <td>b_w [mm]</td> </tr> <tr> <td>539</td> <td>1.609</td> <td>1000</td> </tr> </table>			d [mm]	k	b_w [mm]	539	1.609	1000	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>V_{Sdu} [kN]</td> </tr> <tr> <td>353.0</td> </tr> </table>			V_{Sdu} [kN]	353.0			
d [mm]	k	b_w [mm]														
539	1.609	1000														
V_{Sdu} [kN]																
353.0																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>f_{ck} [MPa]</td> <td>v_{min}</td> <td>σ_{cp} [MPa]</td> </tr> <tr> <td>33.2</td> <td>0.412</td> <td>3.763</td> </tr> </table>			f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]	33.2	0.412	3.763	<p>Se NON risulta necessario armare</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>limite a V_{sd}</td> </tr> <tr> <td>[kN]</td> </tr> <tr> <td>3103.67</td> </tr> <tr> <td>$V_{Sd} < V_{lim}$</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Si</td> </tr> </table>			limite a V_{sd}	[kN]	3103.67	$V_{Sd} < V_{lim}$	Si
f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]														
33.2	0.412	3.763														
limite a V_{sd}																
[kN]																
3103.67																
$V_{Sd} < V_{lim}$																
Si																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>ρ_l</td> <td>V_{Rd} [kN]</td> </tr> <tr> <td>0.0035</td> <td>540.55</td> </tr> </table>			ρ_l	V_{Rd} [kN]	0.0035	540.55										
ρ_l	V_{Rd} [kN]															
0.0035	540.55															
<p>NON risulta necessario armare a taglio ($V_{sd} < V_{Rd,c}$)</p>																

Tabella 34 – Verifica a taglio – Piedritto

VERIFICA A TAGLIO - TU 2008																
base [cm]	altezza [cm]	coprif. [cm]	ϕ [mm]	A_s tesa [mm²]												
100	60	5	22	3801												
Rck [MPa]	γ_c	γ_s	N [kN]	E_s [Mpa]	f_{yk} [MPa]											
40	1.5	1.15	1910.0	210000	450											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>d [mm]</td> <td>k</td> <td>b_w [mm]</td> </tr> <tr> <td>539</td> <td>1.609</td> <td>1000</td> </tr> </table>			d [mm]	k	b_w [mm]	539	1.609	1000	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>V_{Sdu} [kN]</td> </tr> <tr> <td>397.2</td> </tr> </table>			V_{Sdu} [kN]	397.2			
d [mm]	k	b_w [mm]														
539	1.609	1000														
V_{Sdu} [kN]																
397.2																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>f_{ck} [MPa]</td> <td>v_{min}</td> <td>σ_{cp} [MPa]</td> </tr> <tr> <td>33.2</td> <td>0.412</td> <td>3.183</td> </tr> </table>			f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]	33.2	0.412	3.183	<p>Se NON risulta necessario armare</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>limite a V_{sd}</td> </tr> <tr> <td>[kN]</td> </tr> <tr> <td>3103.67</td> </tr> <tr> <td>$V_{Sd} < V_{lim}$</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Si</td> </tr> </table>			limite a V_{sd}	[kN]	3103.67	$V_{Sd} < V_{lim}$	Si
f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]														
33.2	0.412	3.183														
limite a V_{sd}																
[kN]																
3103.67																
$V_{Sd} < V_{lim}$																
Si																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>ρ_l</td> <td>V_{Rd} [kN]</td> </tr> <tr> <td>0.0071</td> <td>555.12</td> </tr> </table>			ρ_l	V_{Rd} [kN]	0.0071	555.12										
ρ_l	V_{Rd} [kN]															
0.0071	555.12															
<p>NON risulta necessario armare a taglio ($V_{sd} < V_{Rd,c}$)</p>																

Tabella 35 – Verifica a taglio – Arco rovescio

9.5.12. ANALISI 3 – BY- PASS CARRABILE - SEZIONE TIPO B0

9.5.12.1. *Fasi di calcolo*

Il calcolo è stato condotto per fasi successive, secondo lo schema di seguito descritto:

TIME 1 – Geostatico

In questa prima fase di calcolo vengono applicati il peso proprio del terreno e le caratteristiche di resistenza e deformabilità delle formazioni in sito, in modo tale da ricostruire la situazione tensionale preesistente alla costruzione della galleria.

TIME 2 – Taratura e scavo – Relax 65%

In questa time di calcolo viene simulata l'apertura del fronte attraverso un'opportuna riduzione delle forze di scavo.

TIME 3 – Avanzamento pari allo sfondo di 1.50 m – Relax 88.5%

Viene simulato lo scavo pari allo sfondo di 1.50 m.

TIME 4 – Avanzamento scavo e posa prerivestimento – Relax 95%

Viene simulata la posa del prerivestimento in prossimità del fronte di scavo.

TIME 5 – Getto dell'arco rovescio – Relax 97.5%

Viene simulato il getto dell'arco rovescio.

TIME 6 – Getto del rivestimento di calotta – Relax 100%

Viene simulata la realizzazione del rivestimento di calotta, a completamento del rivestimento definitivo.

TIME 7 – Rimozione del prerivestimento e applicazione carico idraulico

Viene modellata la condizione a lungo termine sul rivestimento definitivo, rimuovendo gli elementi rappresentativi del prerivestimento ed applicando la falda massima pari a 40m essendo i by-pass pedonali non drenanti nel lungo termine.



Nella seguente tabella viene riportata la stratigrafia di calcolo.

	Classificazione	Stratigrafia
Strato 1	Unità 4/5	da P.C. a -15 m
Strato 2	Unità 6	da -15 m a -45 m
Strato 3	Unità 7	> -45 m

Tabella 36 - Stratigrafia

9.5.12.2. Esame dei risultati

I risultati più significativi ottenuti dalla presente analisi sono riassunti in allegato.

Gli output dell'elaborazione FLAC, di tipo grafico, sono riportati anch'essi in allegato; le dimensioni geometriche e gli spostamenti sono espressi in metri, mentre le tensioni in Pa.

Nel corso della simulazione delle fasi esecutive della galleria naturale, i fenomeni di plasticizzazione nel terreno al contorno della cavità non risultano rilevanti.

In termini deformativi la convergenza media si attesta intorno ai 2 cm per $k_0 = 1 - \sin \phi$ e pari a circa 2.5 cm per $k_0 = 1,2$ tenuto conto del valore di preconvergenza al fronte.

Tale stato deformativo induce risentimenti superficiali che raggiungono nel lungo termine valori dell'ordine dei 0.5 cm per $k_0 = 1 - \sin \phi$ e pari a circa 0.3 cm per $k_0 = 1,2$.

9.5.12.3. Verifiche statiche

I risultati delle analisi numeriche in termini di sollecitazioni agenti sul rivestimento definitivo sono allegati alla presente relazione.

Di seguito sono riassunti i risultati delle verifiche tensionali condotte nei rivestimenti per la combinazione M, N.

9.5.12.3.1. Verifica del prerivestimento

Rimandando ai paragrafi precedenti per le caratteristiche dei materiali ed i relativi limiti tensionali, si riportano nel seguito le verifiche svolte allo stato limite ultimo e stato limite di esercizio nelle time di calcolo significative.

I valori delle sollecitazioni ottenute dalle verifiche sezionali sono compatibili con i limiti previsti per i materiali impiegati e i punti rappresentativi delle sollecitazioni sono interni al dominio M-N, quindi le verifiche sono soddisfatte.

$$K_0 = 1 - \sin\phi$$

PRERIVESTIMENTO								
TIME	SEZIONE	A _s	A' _s	M	N	σ _c	σ _s	σ _{c,lim}
		[cm ²]	[cm ²]	[KN*m]	[KN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
4	CALOTTA	11.90	11.90	21.9	256.0	4.5	35.4	17.43
	PIEDRITTO	11.90	11.90	27.6	162.0	5.7	96.5	
5	CALOTTA	11.90	11.90	23.7	337.0	4.9	24.0	
	PIEDRITTO	11.90	11.90	31.1	263.0	6.4	80.5	

Tabella 37 - Verifiche tensionali - Prerivestimento

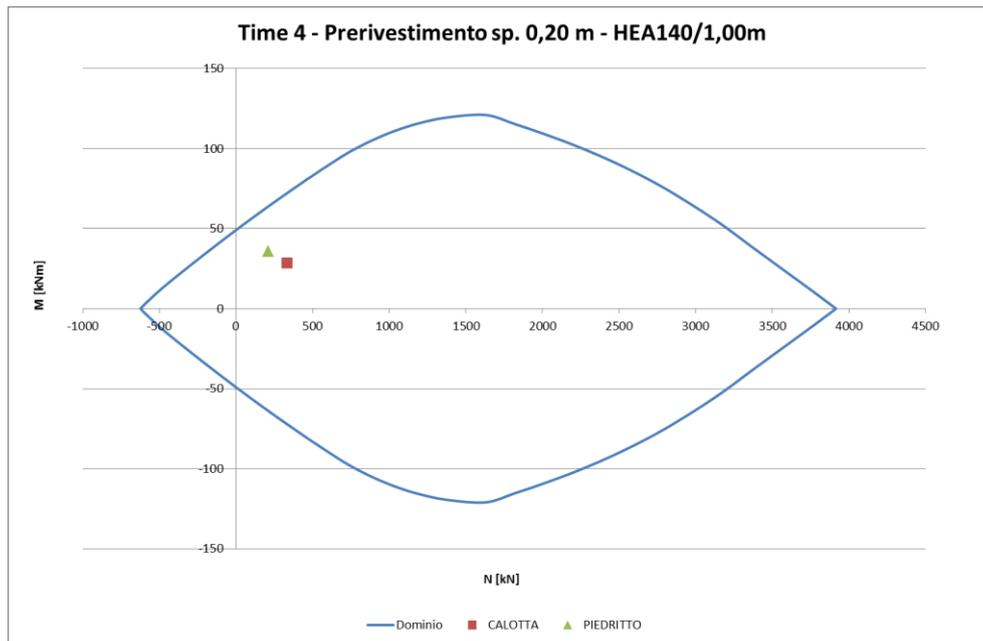


Figura 49 - Dominio M-N – Time 4

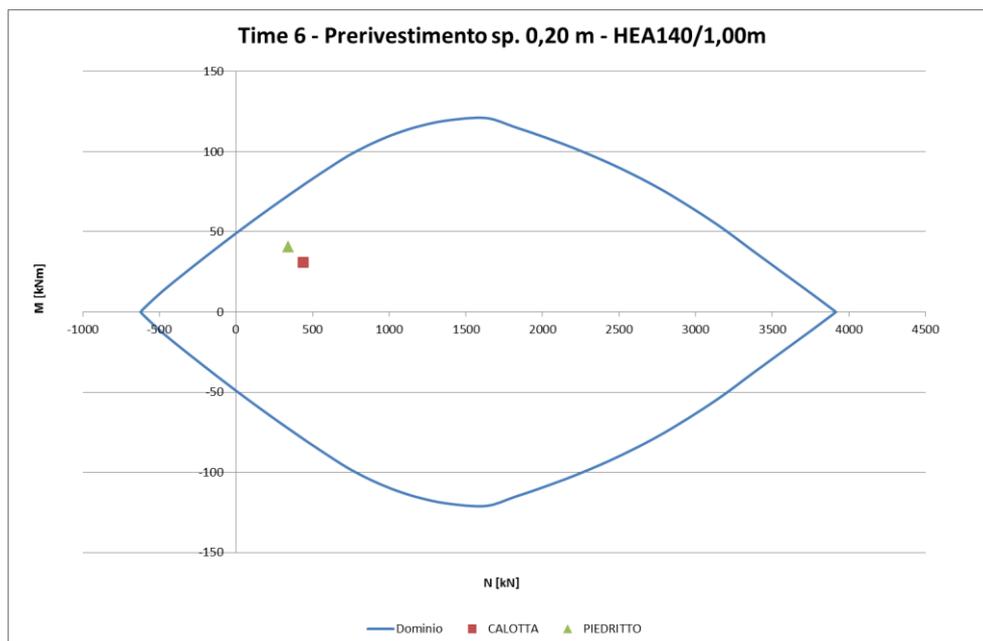


Figura 50 - Dominio M-N – Time 6

$K_0 = 1,2$

PRERIVESTIMENTO								
TIME	SEZIONE	A_s	A'_s	M	N	σ_c	σ_s	$\sigma_{c,lim}$
		[cm^2]	[cm^2]	[$KN*m$]	[KN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
4	CALOTTA	11.90	11.90	31.5	367.0	6.5	51.3	17.43
	PIEDRITTO	11.90	11.90	37.2	262.0	7.7	114.3	
5	CALOTTA	11.90	11.90	33.7	485.0	6.9	32.9	
	PIEDRITTO	11.90	11.90	48.9	370.0	10.1	141.3	

Tabella 38 - Verifiche tensionali - Prerivestimento

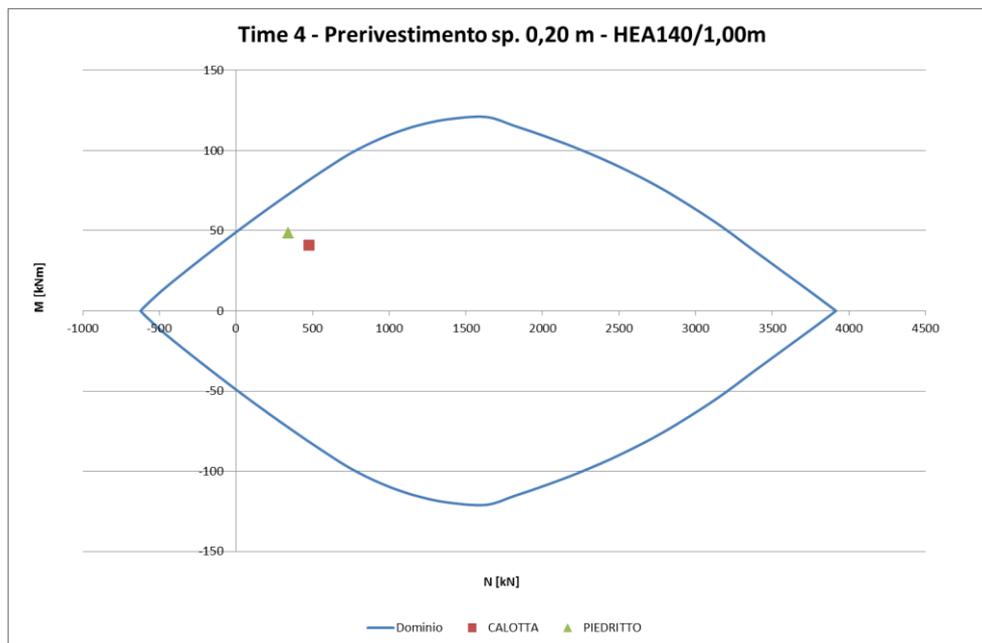


Figura 51 - Dominio M-N – Time 4

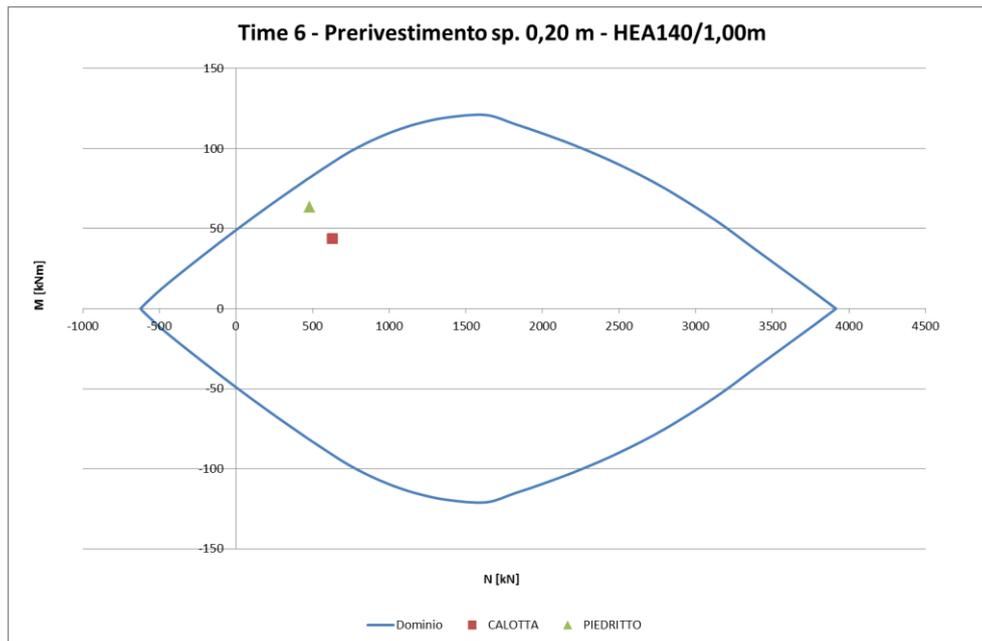


Figura 52 - Dominio M-N – Time 6

9.5.12.3.2. Verifica del rivestimento definitivo

Rimandando ai paragrafi precedenti per le caratteristiche dei materiali ed i relativi limiti tensionali, si riportano nel seguito le verifiche svolte allo stato limite ultimo e stato limite di esercizio nelle time di calcolo significative.

I valori delle sollecitazioni ottenute dalle verifiche sezionali sono compatibili con i limiti previsti per i materiali impiegati e i punti rappresentativi delle sollecitazioni sono interni al dominio M-N, quindi le verifiche sono soddisfatte.

Si sono esclusi dalla verifica, i valori di sollecitazione nei punti angolosi in corrispondenza dei nodi arco rovescio-muretta dove, per effetto della modellazione numerica, si determinano eccessive concentrazioni di sforzo.

$$K_0 = 1 - \sin\phi$$

RIVESTIMENTO DEFINITIVO									
TIME	SEZIONE	A_s	A'_s	M	N	σ_c	σ_s	$\sigma_{c,lim}$	w
		[cm ²]	[cm ²]	[KN*m]	[KN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm]
6	CALOTTA	12.72	12.72	12.2	30.7	0.50	12.7	14.94	0.004
	PIEDRITTO	12.72	12.72	16.5	64.8	0.64	10.2		0.003
	ARCO ROVESCIO	12.72	12.72	31.3	90.3	1.27	28.8		0.009
7	CALOTTA	12.72	12.72	200.2	1290.0	7.34	35.6		0.012
	PIEDRITTO	12.72	12.72	273.7	1250.0	10.43	128.4		0.042
	ARCO ROVESCIO	12.72	12.72	106.5	1210.0	4.50	59.6		-

Tabella 39 - Verifiche tensionali – Rivestimento definitivo

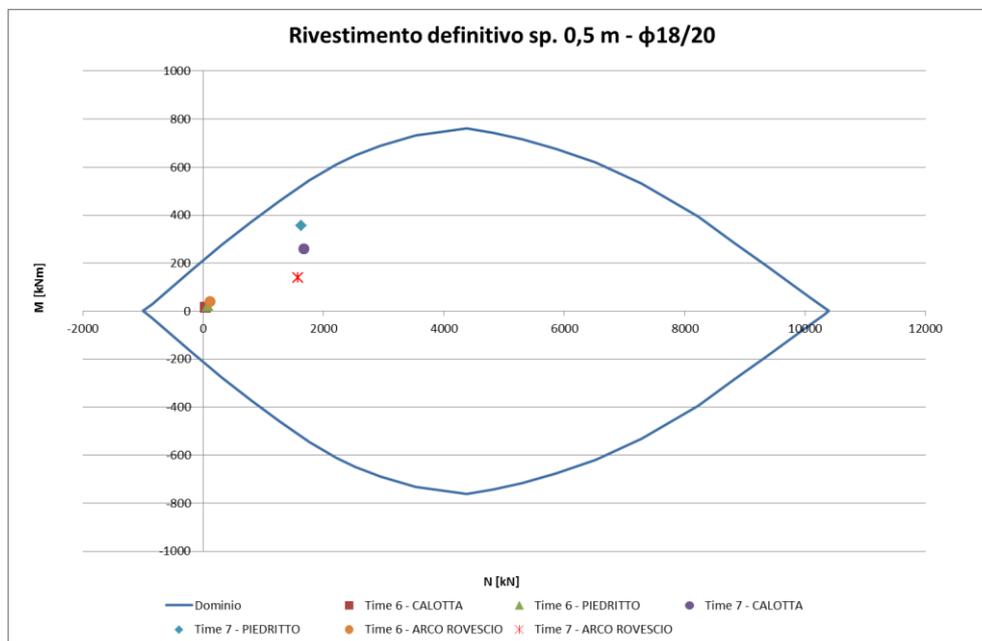


Figura 53 - Dominio M-N – Rivestimento definitivo

Di seguito si riportano delle tabelle in cui vengono confrontati i valori di taglio sollecitante e taglio resistente: quest'ultimo è stato valutato con l'espressione fornita dalla normativa per gli elementi non armati a taglio.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo bypass carrabili e pedonali

VERIFICA A TAGLIO - TU 2008													
base [cm]	altezza [cm]	coprif. [cm]	ϕ [mm]	A_s tesa [mm ²]									
100	50	5	18	1272									
Rck [MPa]	γ_c	γ_s	N [kN]	E_s [Mpa]	f_{yk} [MPa]								
40	1.5	1.15	1290.0	210000	450								
			<table border="1"> <tr> <td>V_{Sdu} [kN]</td> </tr> <tr> <td>321.4</td> </tr> </table>			V_{Sdu} [kN]	321.4						
V_{Sdu} [kN]													
321.4													
d [mm]	k	b_w [mm]											
441	1.673	1000											
f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]											
33.2	0.437	2.580											
ρ_l	V_{Rd} [kN]												
0.0029	363.19												
NON risulta necessario armare a taglio ($V_{sd} < V_{Rd,c}$)													
<table border="1"> <tr> <td align="center" colspan="2">Se NON risulta necessario armare</td> </tr> <tr> <td>limite a V_{sd}</td> <td>[kN]</td> </tr> <tr> <td></td> <td>2539.37</td> </tr> <tr> <td>$V_{sd} < V_{lim}$</td> <td>Si</td> </tr> </table>						Se NON risulta necessario armare		limite a V_{sd}	[kN]		2539.37	$V_{sd} < V_{lim}$	Si
Se NON risulta necessario armare													
limite a V_{sd}	[kN]												
	2539.37												
$V_{sd} < V_{lim}$	Si												

Tabella 40 – Verifica a taglio – Calotta

VERIFICA A TAGLIO - TU 2008							
base [cm]	altezza [cm]	coprif. [cm]	ϕ [mm]	A_s tesa [mm ²]			
100	50	5	18	1272			
Rck [MPa]	γ_c	γ_s	N [kN]	E_s [Mpa]	f_{yk} [MPa]		
40	1.5	1.15	1240.0	210000	450		
			<table border="1"> <tr> <td>V_{Sdu} [kN]</td> </tr> <tr> <td>576.3</td> </tr> </table>			V_{Sdu} [kN]	576.3
V_{Sdu} [kN]							
576.3							
d [mm]	k	b_w [mm]					
441	1.673	1000					
f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]					
33.2	0.437	2.480					
ρ_l	V_{Rd} [kN]						
0.0029	356.58						
Risulta necessario armare a taglio ($V_{sd} > V_{Rd,c}$)							
Se risulta necessario armare							
ϕ [mm]	n° bracci	passo [cm]	$A > A_{min}$? OK				
16	5	30					
A_{sw} [mm ²]	1005.309649						
s [mm]	300						
d [mm]	441						
f_{ywd} [MPa]	391.30		V_{Rsd} [kN]	limite a V_{sd}			
θ [°]	35		743.27	[kN]			
α [°]	90			2539.37			
cot θ	1.428148007		V_{Rcd} [kN]	$V_{sd} < V_{lim}$			
m omogen.	5.83		1950.73	Si			
σ_{cp} [MPa]	2.48						
α_{cw}	1.112048193		V_{Rd} [kN]	$V_{sd} < V_{Rd}$			
v_1	0.52032		743.27	Si			

Tabella 41 – Verifica a taglio – Piedritto



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo bypass carrabili e pedonali

VERIFICA A TAGLIO - TU 2008												
base [cm]	altezza [cm]	coprif. [cm]	ϕ [mm]	A_s tesa [mm ²]								
100	50	5	18	1272								
Rck [MPa]	γ_c	γ_s	N [kN]	E_s [Mpa]	f_{yk} [MPa]							
40	1.5	1.15	1220.0	210000	450							
			<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">V_{Sdu} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">103.5</td> </tr> </table>			V _{Sdu} [kN]	103.5					
V _{Sdu} [kN]												
103.5												
			<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">Se NON risulta necessario armare</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">limite a Vsd</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">[kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2539.37</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Vsd < Vlim</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Si</td> </tr> </table> </td> </tr> </table>			Se NON risulta necessario armare	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">limite a Vsd</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">[kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2539.37</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Vsd < Vlim</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Si</td> </tr> </table>	limite a Vsd	[kN]	2539.37	Vsd < Vlim	Si
Se NON risulta necessario armare												
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">limite a Vsd</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">[kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2539.37</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Vsd < Vlim</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Si</td> </tr> </table>	limite a Vsd	[kN]	2539.37	Vsd < Vlim	Si							
limite a Vsd												
[kN]												
2539.37												
Vsd < Vlim												
Si												
			<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">NON risulta necessario armare a taglio (Vsd < VRd,c)</td> </tr> </table>			NON risulta necessario armare a taglio (Vsd < VRd,c)						
NON risulta necessario armare a taglio (Vsd < VRd,c)												
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">d [mm]</td> <td style="text-align: center;">k</td> <td style="text-align: center;">b_w [mm]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">441</td> <td style="text-align: center;">1.673</td> <td style="text-align: center;">1000</td> </tr> </table>		d [mm]	k	b _w [mm]	441	1.673	1000					
d [mm]	k	b _w [mm]										
441	1.673	1000										
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">f_{ck} [MPa]</td> <td style="text-align: center;">v_{min}</td> <td style="text-align: center;">σ_{cp} [MPa]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">33.2</td> <td style="text-align: center;">0.437</td> <td style="text-align: center;">2.440</td> </tr> </table>		f _{ck} [MPa]	v _{min}	σ_{cp} [MPa]	33.2	0.437	2.440					
f _{ck} [MPa]	v _{min}	σ_{cp} [MPa]										
33.2	0.437	2.440										
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">ρ_l</td> <td style="text-align: center;">V_{Rd} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0.0029</td> <td style="text-align: center;">353.93</td> </tr> </table>		ρ_l	V _{Rd} [kN]	0.0029	353.93							
ρ_l	V _{Rd} [kN]											
0.0029	353.93											

Tabella 42 – Verifica a taglio – Arco rovescio

$K_0 = 1,2$

RIVESTIMENTO DEFINITIVO									
TIME	SEZIONE	A _s	A' _s	M	N	σ_c	σ_s	$\sigma_{c,lim}$	w
		[cm ²]	[cm ²]	[kN*m]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm]
6	CALOTTA	12.72	12.72	17.9	63.7	0.70	12.9	14.94	0.004
	PIEDRITTO	12.72	12.72	22.5	68.0	0.90	19.7		0.006
	ARCO ROVESCIO	12.72	12.72	25.3	216.0	0.96	0.7		-
7	CALOTTA	12.72	12.72	233.7	1410.0	8.58	52.4	14.94	0.017
	PIEDRITTO	12.72	12.72	314.0	1370.0	12.05	161.5		0.058
	ARCO ROVESCIO	12.72	12.72	131.3	1310.0	5.24	68.6		-

Tabella 43 - Verifiche tensionali - Rivestimento definitivo

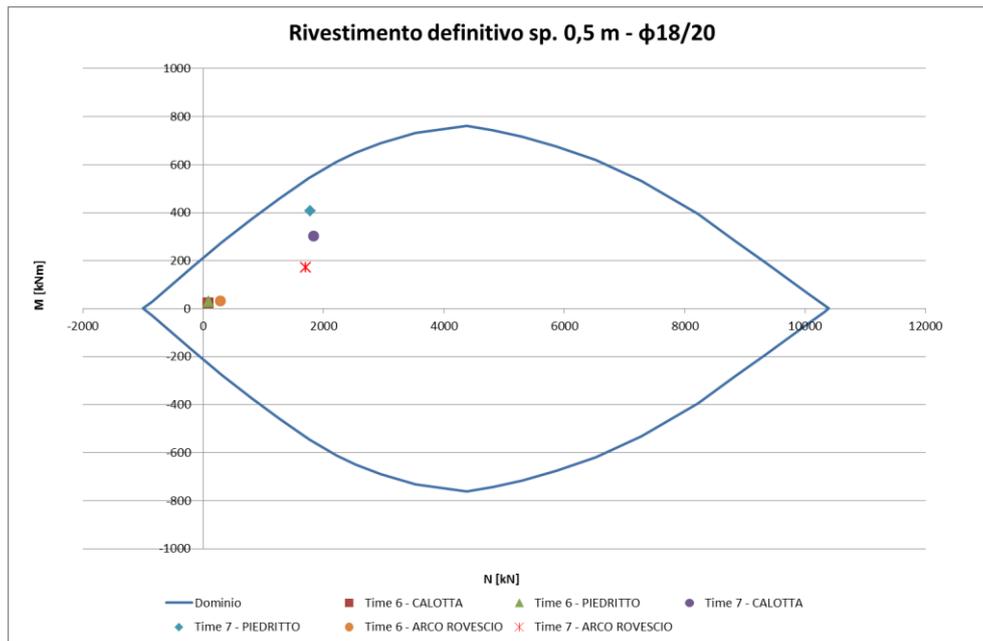


Figura 54 - Dominio M-N – Rivestimento definitivo

Di seguito si riportano delle tabelle in cui vengono confrontati i valori di taglio sollecitante e taglio resistente: quest'ultimo è stato valutato con l'espressione fornita dalla normativa per gli elementi non armati a taglio.

VERIFICA A TAGLIO - TU 2008																
base [cm]	altezza [cm]	coprif. [cm]	φ [mm]	A _s tesa [mm ²]												
100	50	5	18	1272												
Rck [MPa]	γ c	γ s	N [kN]	E _s [Mpa]	f _{yk} [MPa]											
40	1.5	1.15	1410.0	210000	450											
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td>d [mm]</td> <td>k</td> <td>b_w [mm]</td> </tr> <tr> <td>441</td> <td>1.673</td> <td>1000</td> </tr> </table>			d [mm]	k	b _w [mm]	441	1.673	1000	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td>V_{Sdu} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">356.9</td> </tr> </table>			V _{Sdu} [kN]	356.9			
d [mm]	k	b _w [mm]														
441	1.673	1000														
V _{Sdu} [kN]																
356.9																
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td>f_{ck} [MPa]</td> <td>v_{min}</td> <td>σ_{cp} [MPa]</td> </tr> <tr> <td>33.2</td> <td>0.437</td> <td>2.820</td> </tr> </table>			f _{ck} [MPa]	v _{min}	σ _{cp} [MPa]	33.2	0.437	2.820	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">Se NON risulta necessario armare</p> <table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>limite a Vsd</td> </tr> <tr> <td>[kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2539.37</td> </tr> <tr> <td>V_{Sd} < V_{lim}</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Si</td> </tr> </table> </div>			limite a Vsd	[kN]	2539.37	V _{Sd} < V _{lim}	Si
f _{ck} [MPa]	v _{min}	σ _{cp} [MPa]														
33.2	0.437	2.820														
limite a Vsd																
[kN]																
2539.37																
V _{Sd} < V _{lim}																
Si																
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td>ρ_l</td> <td>V_{Rd} [kN]</td> </tr> <tr> <td>0.0029</td> <td style="text-align: center;">379.07</td> </tr> </table>			ρ _l	V _{Rd} [kN]	0.0029	379.07										
ρ _l	V _{Rd} [kN]															
0.0029	379.07															
NON risulta necessario armare a taglio (V _{Sd} < V _{Rd,c})																

Tabella 44 – Verifica a taglio – Calotta

VERIFICA A TAGLIO - TU 2008																	
base [cm]	altezza [cm]	coprif. [cm]	ϕ [mm]	A_s tesa [mm ²]													
100	50	5	18	1272													
Rck [MPa]	γ_c	γ_s	N [kN]	E_s [Mpa]	f_{yk} [MPa]												
40	1.5	1.15	1360.0	210000	450												
			<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><td>V_{Sdu} [kN]</td></tr> <tr><td style="background-color: #ffff00;">637.8</td></tr> </table>			V_{Sdu} [kN]	637.8										
V_{Sdu} [kN]																	
637.8																	
d [mm]	k	b_w [mm]															
441	1.673	1000															
f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]	<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">Se NON risulta necessario armare</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">limite a Vsd</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">[kN]</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">2539.37</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">VSd<Vlim</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">Si</td></tr> </table>			Se NON risulta necessario armare		limite a Vsd		[kN]		2539.37		VSd<Vlim		Si	
Se NON risulta necessario armare																	
limite a Vsd																	
[kN]																	
2539.37																	
VSd<Vlim																	
Si																	
33.2	0.437	2.720															
ρ_l			<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><td>V_{Rd} [kN]</td></tr> <tr><td style="background-color: #ffff00;">372.45</td></tr> </table>			V_{Rd} [kN]	372.45										
V_{Rd} [kN]																	
372.45																	
0.0029																	
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">Risulta necessario armare a taglio (Vsd>VRd,c)</td></tr> </table>						Risulta necessario armare a taglio (Vsd>VRd,c)											
Risulta necessario armare a taglio (Vsd>VRd,c)																	
Se risulta necessario armare																	
ϕ [mm]	n° bracci	passo [cm]	<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><td>A>Amin?</td></tr> <tr><td style="background-color: #ffff00;">OK</td></tr> </table>			A>Amin?	OK										
A>Amin?																	
OK																	
16	5	30															
A_{sw} [mm ²]	1005.309649																
s [mm]	300																
d [mm]	441																
f_{ywd} [MPa]	391.30		<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><td>V_{Rsd} [kN]</td></tr> <tr><td style="background-color: #ffff00;">743.27</td></tr> </table>			V_{Rsd} [kN]	743.27										
V_{Rsd} [kN]																	
743.27																	
θ [°]	35		<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">limite a Vsd</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">[kN]</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">2539.37</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">VSd<Vlim</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">Si</td></tr> </table>			limite a Vsd		[kN]		2539.37		VSd<Vlim		Si			
limite a Vsd																	
[kN]																	
2539.37																	
VSd<Vlim																	
Si																	
α [°]	90																
cot θ	1.428148007		<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><td>V_{Rcd} [kN]</td></tr> <tr><td style="background-color: #ffff00;">1969.75</td></tr> </table>			V_{Rcd} [kN]	1969.75										
V_{Rcd} [kN]																	
1969.75																	
m omogen.	5.83																
σ_{cp} [MPa]	2.72																
α_{cw}	1.122891566		<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><td>V_{Rd} [kN]</td></tr> <tr><td style="background-color: #ffff00;">743.27</td></tr> </table>			V_{Rd} [kN]	743.27										
V_{Rd} [kN]																	
743.27																	
v_1	0.52032		<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><td>$V_{Sd}<V_{Rd}$</td></tr> <tr><td style="background-color: #ffff00;">Si</td></tr> </table>			$V_{Sd}<V_{Rd}$	Si										
$V_{Sd}<V_{Rd}$																	
Si																	

Tabella 45 – Verifica a taglio – Piedritto

VERIFICA A TAGLIO - TU 2008																	
base [cm]	altezza [cm]	coprif. [cm]	ϕ [mm]	A_s tesa [mm ²]													
100	50	5	18	1272													
Rck [MPa]	γ_c	γ_s	N [kN]	E_s [Mpa]	f_{yk} [MPa]												
40	1.5	1.15	1310.0	210000	450												
			<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><td>V_{Sdu} [kN]</td></tr> <tr><td style="background-color: #ffff00;">73.5</td></tr> </table>			V_{Sdu} [kN]	73.5										
V_{Sdu} [kN]																	
73.5																	
d [mm]	k	b_w [mm]															
441	1.673	1000															
f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]	<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">Se NON risulta necessario armare</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">limite a Vsd</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">[kN]</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">2539.37</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">VSd<Vlim</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">Si</td></tr> </table>			Se NON risulta necessario armare		limite a Vsd		[kN]		2539.37		VSd<Vlim		Si	
Se NON risulta necessario armare																	
limite a Vsd																	
[kN]																	
2539.37																	
VSd<Vlim																	
Si																	
33.2	0.437	2.620															
ρ_l			<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><td>V_{Rd} [kN]</td></tr> <tr><td style="background-color: #ffff00;">365.84</td></tr> </table>			V_{Rd} [kN]	365.84										
V_{Rd} [kN]																	
365.84																	
0.0029																	
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">NON risulta necessario armare a taglio (Vsd<VRd,c)</td></tr> </table>						NON risulta necessario armare a taglio (Vsd<VRd,c)											
NON risulta necessario armare a taglio (Vsd<VRd,c)																	

Tabella 46 – Verifica a taglio – Arco rovescio

9.5.13. ANALISI 4 – BY- PASS PEDONALE - SEZIONE TIPO C2

9.5.13.1. *Fasi di calcolo*

Il calcolo è stato condotto per fasi successive, secondo lo schema di seguito descritto:

TIME 1 – Geostatico

In questa prima fase di calcolo vengono applicati il peso proprio del terreno e le caratteristiche di resistenza e deformabilità delle formazioni in sito, in modo tale da ricostruire la situazione tensionale preesistente alla costruzione della galleria.

TIME 2 – Taratura e scavo – Relax 50%

In questa time di calcolo viene simulata l'apertura del fronte attraverso un'opportuna riduzione delle forze di scavo.

TIME 3 – Avanzamento pari allo sfondo di 1.00 m – Relax 78%

Viene simulato lo scavo pari allo sfondo di 1.00 m.

TIME 4 – Avanzamento scavo e posa prerivestimento – Relax 93%

Viene simulata la posa del prerivestimento in prossimità del fronte di scavo.

TIME 5 – Getto dell'arco rovescio – Relax 96.5%

Viene simulato il getto dell'arco rovescio.

TIME 6 – Getto del rivestimento di calotta – Relax 100%

Viene simulata la realizzazione del rivestimento di calotta, a completamento del rivestimento definitivo.

TIME 7 – Rimozione del prerivestimento e applicazione carico idraulico

Viene modellata la condizione a lungo termine sul rivestimento definitivo, rimuovendo gli elementi rappresentativi del prerivestimento ed applicando la falda massima pari a 40m essendo i by-pass pedonali non drenanti nel lungo termine.



Nella seguente tabella viene riportata la stratigrafia di calcolo.

	Classificazione	Stratigrafia
Strato 1	Unità 4/5	da P.C. a -20 m
Strato 2	Unità 6	da -20 m a -40 m
Strato 3	Unità 7a	da -40 m a -53 m
Strato 4	Unità 7	> -53 m

Tabella 47 - Stratigrafia

9.5.13.2. Esame dei risultati

I risultati più significativi ottenuti dalla presente analisi sono riassunti in allegato.

Gli output dell'elaborazione FLAC, di tipo grafico, sono riportati anch'essi in allegato; le dimensioni geometriche e gli spostamenti sono espressi in metri, mentre le tensioni in Pa.

Nel corso della simulazione delle fasi esecutive della galleria naturale, i fenomeni di plasticizzazione nel terreno al contorno della cavità non risultano rilevanti.

In termini deformativi la convergenza media si attesta intorno ai 2 cm per $k_0 = 1 - \sin \phi$ e pari a circa 2.5 cm per $k_0 = 1,2$ tenuto conto del valore di preconvergenza al fronte.

Tale stato deformativo induce risentimenti superficiali che raggiungono nel lungo termine valori dell'ordine dei 0.5 cm per $k_0 = 1 - \sin \phi$ e pari a circa 0.3 cm per $k_0 = 1,2$.

9.5.13.3. Verifiche statiche

I risultati delle analisi numeriche in termini di sollecitazioni agenti sul rivestimento definitivo sono allegati alla presente relazione.

Di seguito sono riassunti i risultati delle verifiche tensionali condotte nei rivestimenti per la combinazione M, N.

9.5.13.3.1. Verifica del pririvestimento

Rimandando ai paragrafi precedenti per le caratteristiche dei materiali ed i relativi limiti tensionali, si riportano nel seguito le verifiche svolte allo stato limite ultimo e stato limite di esercizio nelle time di calcolo significative.

I valori delle sollecitazioni ottenute dalle verifiche sezionali sono compatibili con i limiti previsti per i materiali impiegati e i punti rappresentativi delle sollecitazioni sono interni al dominio M-N, quindi le verifiche sono soddisfatte.

$$K_0 = 1 - \sin\phi$$

PRERIVESTIMENTO								
TIME	SEZIONE	A _s	A' _s	M	N	σ _c	σ _s	σ _{c,lim}
		[cm ²]	[cm ²]	[KN*m]	[KN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
4	CALOTTA	11.90	11.90	51.7	511.0	10.6	110.3	17.43
	PIEDRITTO	11.90	11.90	48.7	351.0	10.0	146.8	
5	CALOTTA	11.90	11.90	55.6	620.0	11.4	196.8	
	PIEDRITTO	11.90	11.90	53.5	468.0	11.0	133.3	

Tabella 48 - Verifiche tensionali - Pririvestimento

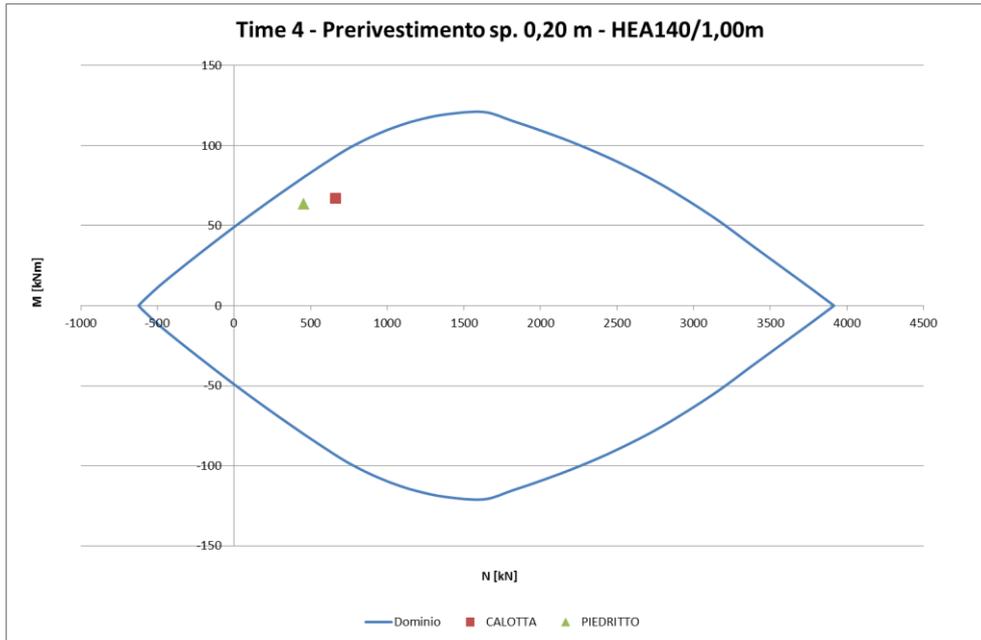


Figura 55 - Dominio M-N – Time 4

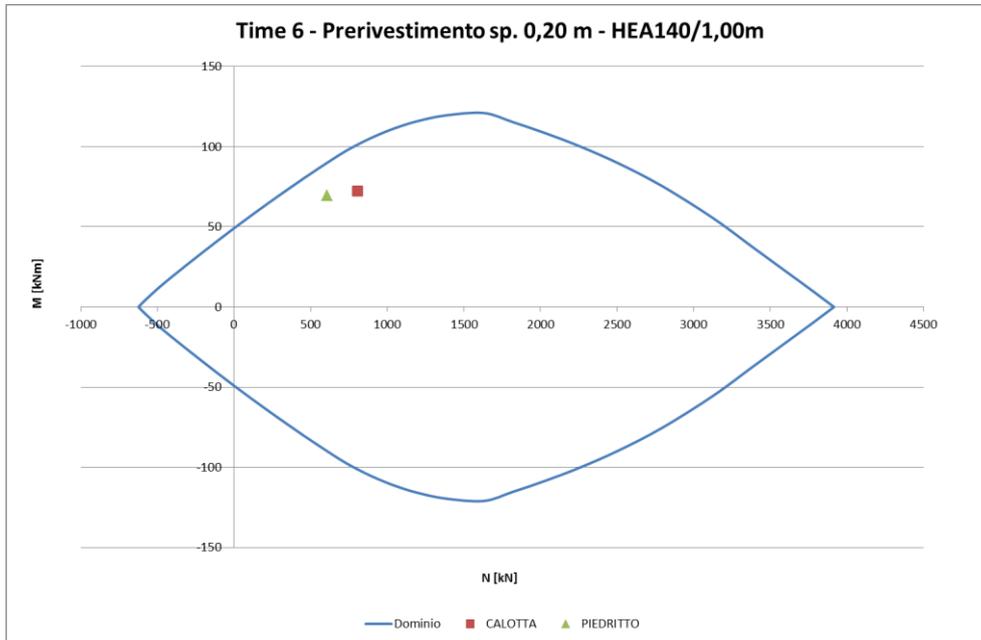


Figura 56 - Dominio M-N – Time 6

$K_0 = 1,2$

PRERIVESTIMENTO								
TIME	SEZIONE	A_s	A'_s	M	N	σ_c	σ_s	$\sigma_{c,lim}$
		[cm^2]	[cm^2]	[$KN*m$]	[KN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
4	CALOTTA	11.90	11.90	39.3	617.0	8.1	28.4	17.43
	PIEDRITTO	11.90	11.90	47.1	408.0	9.7	118.7	
5	CALOTTA	11.90	11.90	42.1	764.0	8.8	14.1	
	PIEDRITTO	11.90	11.90	62.6	546.0	12.9	156.5	

Tabella 49 - Verifiche tensionali - Prerivestimento

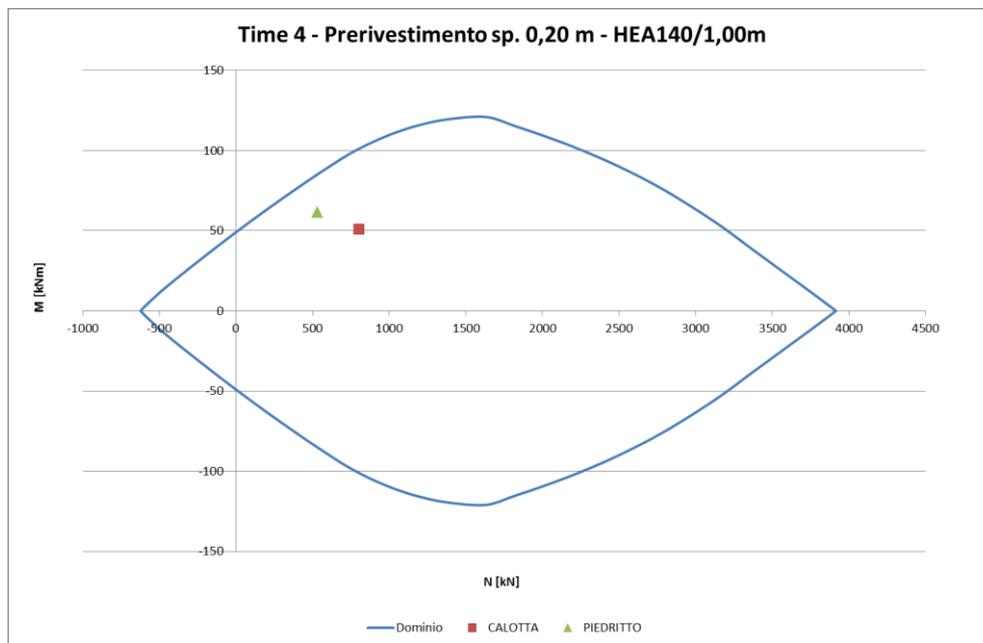


Figura 57 - Dominio M-N – Time 4

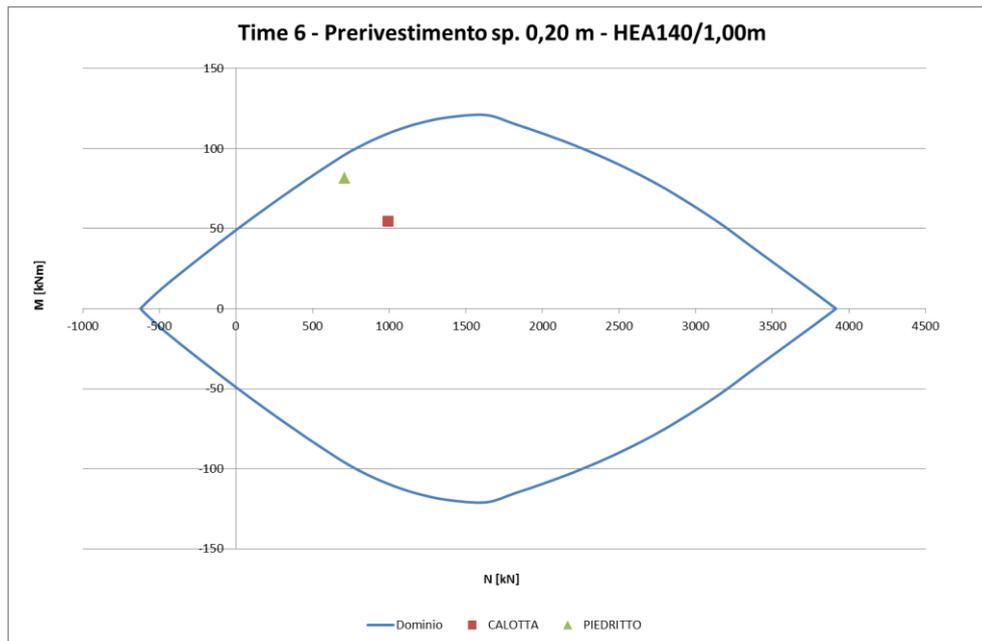


Figura 58 - Dominio M-N – Time 6

9.5.13.3.2. Verifica del rivestimento definitivo

Rimandando ai paragrafi precedenti per le caratteristiche dei materiali ed i relativi limiti tensionali, si riportano nel seguito le verifiche svolte allo stato limite ultimo e stato limite di esercizio nelle time di calcolo significative.

I valori delle sollecitazioni ottenute dalle verifiche sezionali sono compatibili con i limiti previsti per i materiali impiegati e i punti rappresentativi delle sollecitazioni sono interni al dominio M-N, quindi le verifiche sono soddisfatte.

Si sono esclusi dalla verifica, i valori di sollecitazione nei punti angolosi in corrispondenza dei nodi arco rovescio-muretta dove, per effetto della modellazione numerica, si determinano eccessive concentrazioni di sforzo.

$$K_0 = 1 - \sin\phi$$

RIVESTIMENTO DEFINITIVO									
TIME	SEZIONE	A_s	A'_s	M	N	σ_c	σ_s	$\sigma_{c,lim}$	w
		[cm ²]	[cm ²]	[KN*m]	[KN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm]
6	CALOTTA	15.71	15.71	15.7	41.5	0.59	13.0	14.94	0.004
	PIEDRITTO	15.71	15.71	20.1	81.9	0.73	10.0		0.003
	ARCO ROVESCIO	15.71	15.71	40.9	118.0	1.52	31.3		0.010
7	CALOTTA	15.71	15.71	202.1	1540.0	7.26	14.4		0.004
	PIEDRITTO	15.71	15.71	289.5	1480.0	10.30	91.1		0.029
	ARCO ROVESCIO	15.71	15.71	110.3	1250.0	4.55	60.4		-

Tabella 50 - Verifiche tensionali - Rivestimento definitivo

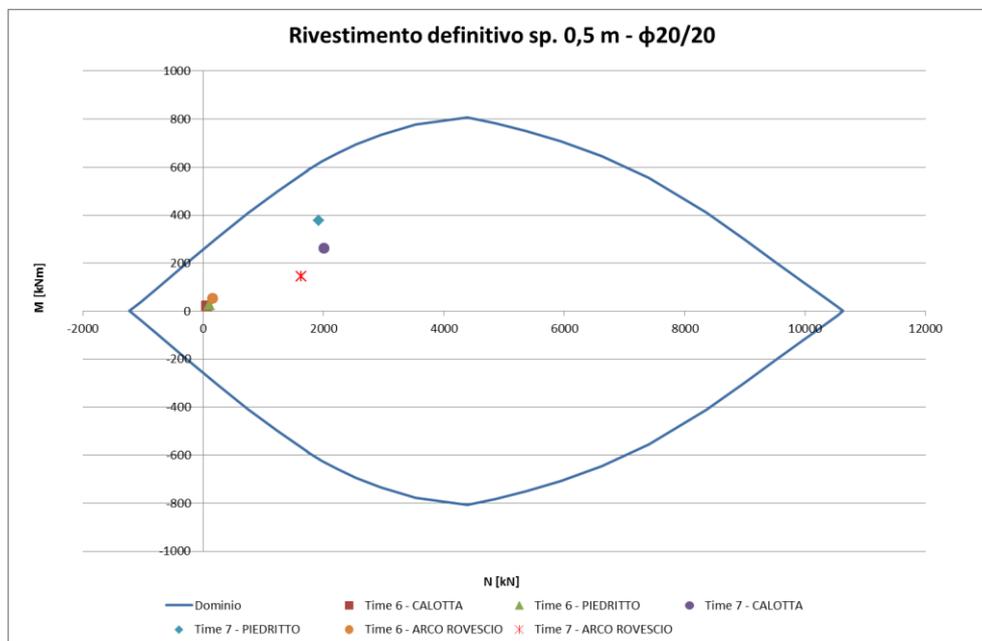


Figura 59 - Dominio M-N – Rivestimento definitivo

Di seguito si riportano delle tabelle in cui vengono confrontati i valori di taglio sollecitante e taglio resistente: quest'ultimo è stato valutato con l'espressione fornita dalla normativa per gli elementi non armati a taglio.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo bypass carrabili e pedonali

VERIFICA A TAGLIO - TU 2008																	
base [cm]	altezza [cm]	coprif. [cm]	ϕ [mm]	A_s tesa [mm ²]													
100	50	5	20	1571													
Rck [MPa]	γ_c	γ_s	N [kN]	E_s [Mpa]	f_{yk} [MPa]												
40	1.5	1.15	1540.0	210000	450												
			<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>V_{Sdu} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">371.0</td> </tr> </table>			V_{Sdu} [kN]	371.0										
V_{Sdu} [kN]																	
371.0																	
d [mm]	k	b_w [mm]															
440	1.674	1000															
f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]															
33.2	0.437	3.080															
ρ_l			<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>V_{Rd} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">404.84</td> </tr> </table>			V_{Rd} [kN]	404.84										
V_{Rd} [kN]																	
404.84																	
0.0036																	
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Se NON risulta necessario armare</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">limite a Vsd</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">[kN]</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">2533.61</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Vsd < Vlim</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Si</td> </tr> </table>						Se NON risulta necessario armare		limite a Vsd		[kN]		2533.61		Vsd < Vlim		Si	
Se NON risulta necessario armare																	
limite a Vsd																	
[kN]																	
2533.61																	
Vsd < Vlim																	
Si																	
NON risulta necessario armare a taglio (Vsd < VRd,c)																	

Tabella 51 – Verifica a taglio – Calotta

VERIFICA A TAGLIO - TU 2008																																																																																																									
base [cm]	altezza [cm]	coprif. [cm]	ϕ [mm]	A_s tesa [mm ²]																																																																																																					
100	50	5	20	1571																																																																																																					
Rck [MPa]	γ_c	γ_s	N [kN]	E_s [Mpa]	f_{yk} [MPa]																																																																																																				
40	1.5	1.15	1450.0	210000	450																																																																																																				
			<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>V_{Sdu} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">627.9</td> </tr> </table>			V_{Sdu} [kN]	627.9																																																																																																		
V_{Sdu} [kN]																																																																																																									
627.9																																																																																																									
d [mm]	k	b_w [mm]																																																																																																							
440	1.674	1000																																																																																																							
f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]																																																																																																							
33.2	0.437	2.900																																																																																																							
ρ_l			<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>V_{Rd} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">392.96</td> </tr> </table>			V_{Rd} [kN]	392.96																																																																																																		
V_{Rd} [kN]																																																																																																									
392.96																																																																																																									
0.0036																																																																																																									
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Se NON risulta necessario armare</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">limite a Vsd</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">[kN]</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">2533.61</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Vsd < Vlim</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Si</td> </tr> </table>						Se NON risulta necessario armare		limite a Vsd		[kN]		2533.61		Vsd < Vlim		Si																																																																																									
Se NON risulta necessario armare																																																																																																									
limite a Vsd																																																																																																									
[kN]																																																																																																									
2533.61																																																																																																									
Vsd < Vlim																																																																																																									
Si																																																																																																									
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Se risulta necessario armare</td> </tr> <tr> <td>ϕ [mm]</td> <td>n° bracci</td> <td>passo [cm]</td> <td colspan="3" style="text-align: center;"> <table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>A > Amin?</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">OK</td> </tr> </table> </td> </tr> <tr> <td>16</td> <td>5</td> <td>30</td> <td colspan="3"></td> </tr> <tr> <td>A_{sw} [mm²]</td> <td>1005.309649</td> <td></td> <td colspan="3"></td> </tr> <tr> <td>s [mm]</td> <td>300</td> <td></td> <td colspan="3"></td> </tr> <tr> <td>d [mm]</td> <td>440</td> <td></td> <td colspan="3"></td> </tr> <tr> <td>f_{ywd} [MPa]</td> <td>391.30</td> <td></td> <td colspan="3" style="text-align: center;"> <table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>V_{Rsd} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">741.59</td> </tr> </table> </td> </tr> <tr> <td>θ [°]</td> <td>35</td> <td></td> <td colspan="3" rowspan="2" style="text-align: center;"> <table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">limite a Vsd</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">[kN]</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">2533.61</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Vsd < Vlim</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Si</td> </tr> </table> </td> </tr> <tr> <td>α [°]</td> <td>90</td> <td></td> <td colspan="3"></td> </tr> <tr> <td>cot θ</td> <td>1.428148007</td> <td></td> <td colspan="3" style="text-align: center;"> <table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>V_{Rcd} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1979.51</td> </tr> </table> </td> </tr> <tr> <td>m omogen.</td> <td>5.83</td> <td></td> <td colspan="3"></td> </tr> <tr> <td>σ_{cp} [MPa]</td> <td>2.9</td> <td></td> <td colspan="3"></td> </tr> <tr> <td>α_{cw}</td> <td>1.131024096</td> <td></td> <td colspan="3" style="text-align: center;"> <table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>V_{Rd} [kN]</td> <td>$V_{sd} < V_{Rd}$</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">741.59</td> <td style="text-align: center;">Si</td> </tr> </table> </td> </tr> <tr> <td>v_1</td> <td>0.52032</td> <td></td> <td colspan="3"></td> </tr> </table>						Se risulta necessario armare		ϕ [mm]	n° bracci	passo [cm]	<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>A > Amin?</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">OK</td> </tr> </table>			A > Amin?	OK	16	5	30				A_{sw} [mm ²]	1005.309649					s [mm]	300					d [mm]	440					f_{ywd} [MPa]	391.30		<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>V_{Rsd} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">741.59</td> </tr> </table>			V_{Rsd} [kN]	741.59	θ [°]	35		<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">limite a Vsd</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">[kN]</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">2533.61</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Vsd < Vlim</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Si</td> </tr> </table>			limite a Vsd		[kN]		2533.61		Vsd < Vlim		Si		α [°]	90					cot θ	1.428148007		<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>V_{Rcd} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1979.51</td> </tr> </table>			V_{Rcd} [kN]	1979.51	m omogen.	5.83					σ_{cp} [MPa]	2.9					α_{cw}	1.131024096		<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>V_{Rd} [kN]</td> <td>$V_{sd} < V_{Rd}$</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">741.59</td> <td style="text-align: center;">Si</td> </tr> </table>			V_{Rd} [kN]	$V_{sd} < V_{Rd}$	741.59	Si	v_1	0.52032				
Se risulta necessario armare																																																																																																									
ϕ [mm]	n° bracci	passo [cm]	<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>A > Amin?</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">OK</td> </tr> </table>			A > Amin?	OK																																																																																																		
A > Amin?																																																																																																									
OK																																																																																																									
16	5	30																																																																																																							
A_{sw} [mm ²]	1005.309649																																																																																																								
s [mm]	300																																																																																																								
d [mm]	440																																																																																																								
f_{ywd} [MPa]	391.30		<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>V_{Rsd} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">741.59</td> </tr> </table>			V_{Rsd} [kN]	741.59																																																																																																		
V_{Rsd} [kN]																																																																																																									
741.59																																																																																																									
θ [°]	35		<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">limite a Vsd</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">[kN]</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">2533.61</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Vsd < Vlim</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Si</td> </tr> </table>			limite a Vsd		[kN]		2533.61		Vsd < Vlim		Si																																																																																											
limite a Vsd																																																																																																									
[kN]																																																																																																									
2533.61																																																																																																									
Vsd < Vlim																																																																																																									
Si																																																																																																									
α [°]	90																																																																																																								
cot θ	1.428148007		<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>V_{Rcd} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1979.51</td> </tr> </table>			V_{Rcd} [kN]	1979.51																																																																																																		
V_{Rcd} [kN]																																																																																																									
1979.51																																																																																																									
m omogen.	5.83																																																																																																								
σ_{cp} [MPa]	2.9																																																																																																								
α_{cw}	1.131024096		<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>V_{Rd} [kN]</td> <td>$V_{sd} < V_{Rd}$</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">741.59</td> <td style="text-align: center;">Si</td> </tr> </table>			V_{Rd} [kN]	$V_{sd} < V_{Rd}$	741.59	Si																																																																																																
V_{Rd} [kN]	$V_{sd} < V_{Rd}$																																																																																																								
741.59	Si																																																																																																								
v_1	0.52032																																																																																																								

Tabella 52 – Verifica a taglio – Piedritto



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo bypass carrabili e pedonali

VERIFICA A TAGLIO - TU 2008													
base [cm]	altezza [cm]	coprif. [cm]	ϕ [mm]	A_s tesa [mm ²]									
100	50	5	20	1571									
Rck [MPa]	γ_c	γ_s	N [kN]	E_s [Mpa]	f_{yk} [MPa]								
40	1.5	1.15	1250.0	210000	450								
			<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">V_{Sdu} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">113.3</td> </tr> </table>			V _{Sdu} [kN]	113.3						
V _{Sdu} [kN]													
113.3													
			<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">d [mm]</td> <td style="text-align: center;">k</td> <td style="text-align: center;">b_w [mm]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">440</td> <td style="text-align: center;">1.674</td> <td style="text-align: center;">1000</td> </tr> </table>			d [mm]	k	b _w [mm]	440	1.674	1000		
d [mm]	k	b _w [mm]											
440	1.674	1000											
			<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">f_{ck} [MPa]</td> <td style="text-align: center;">v_{min}</td> <td style="text-align: center;">σ_{cp} [MPa]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">33.2</td> <td style="text-align: center;">0.437</td> <td style="text-align: center;">2.500</td> </tr> </table>			f _{ck} [MPa]	v _{min}	σ_{cp} [MPa]	33.2	0.437	2.500		
f _{ck} [MPa]	v _{min}	σ_{cp} [MPa]											
33.2	0.437	2.500											
			<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">p_i</td> <td style="text-align: center;">V_{Rd} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0.0036</td> <td style="text-align: center;">366.56</td> </tr> </table>			p _i	V _{Rd} [kN]	0.0036	366.56				
p _i	V _{Rd} [kN]												
0.0036	366.56												
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Se NON risulta necessario armare</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">limite a Vsd</td> <td style="text-align: center;">[kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2533.61</td> <td style="text-align: center;">Vsd < Vlim</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Si</td> <td></td> </tr> </table>						Se NON risulta necessario armare		limite a Vsd	[kN]	2533.61	Vsd < Vlim	Si	
Se NON risulta necessario armare													
limite a Vsd	[kN]												
2533.61	Vsd < Vlim												
Si													
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">NON risulta necessario armare a taglio (Vsd < VRd,c)</td> </tr> </table>						NON risulta necessario armare a taglio (Vsd < VRd,c)							
NON risulta necessario armare a taglio (Vsd < VRd,c)													

Tabella 53 – Verifica a taglio – Arco rovescio

$K_0 = 1,2$

RIVESTIMENTO DEFINITIVO									
TIME	SEZIONE	A _s	A' _s	M	N	σ_c	σ_s	$\sigma_{c,lim}$	w
		[cm ²]	[cm ²]	[kN*m]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm]
6	CALOTTA	15.71	15.71	23.7	77.9	0.88	15.8	14.94	0.005
	PIEDRITTO	15.71	15.71	29.5	79.2	1.10	24.0		0.008
	ARCO ROVESCIO	15.71	15.71	32.6	272.0	1.19	1.0		-
7	CALOTTA	15.71	15.71	239.8	1620.0	8.48	31.5	14.94	0.010
	PIEDRITTO	15.71	15.71	328.5	1570.0	11.75	120.4		0.039
	ARCO ROVESCIO	15.71	15.71	140.5	1360.0	5.40	70.8		-

Tabella 54 - Verifiche tensionali - Rivestimento definitivo

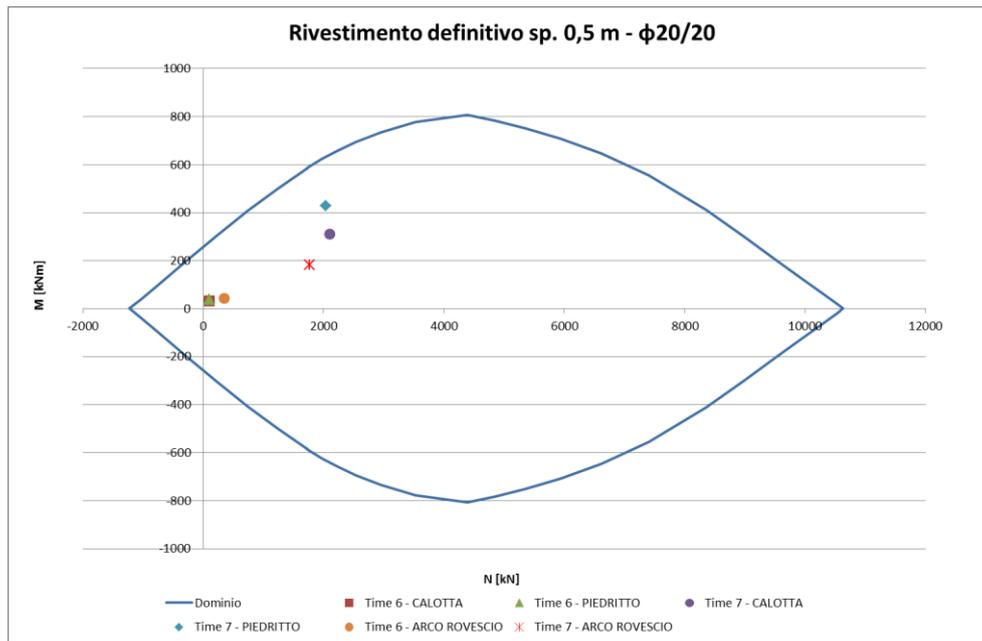


Figura 60 - Dominio M-N – Rivestimento definitivo

Di seguito si riportano delle tabelle in cui vengono confrontati i valori di taglio sollecitante e taglio resistente: quest'ultimo è stato valutato con l'espressione fornita dalla normativa per gli elementi non armati a taglio.

VERIFICA A TAGLIO - TU 2008																
base [cm]	altezza [cm]	coprif. [cm]	ϕ [mm]	A_s tesa [mm ²]												
100	50	5	20	1571												
Rck [MPa]	γ_c	γ_s	N [kN]	E_s [Mpa]	f_{yk} [MPa]											
40	1.5	1.15	1620.0	210000	450											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">d [mm]</td> <td style="text-align: center;">k</td> <td style="text-align: center;">b_w [mm]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">440</td> <td style="text-align: center;">1.674</td> <td style="text-align: center;">1000</td> </tr> </table>			d [mm]	k	b_w [mm]	440	1.674	1000	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">V_{Sdu} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">383.4</td> </tr> </table>			V_{Sdu} [kN]	383.4			
d [mm]	k	b_w [mm]														
440	1.674	1000														
V_{Sdu} [kN]																
383.4																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">f_{ck} [MPa]</td> <td style="text-align: center;">v_{min}</td> <td style="text-align: center;">σ_{cp} [MPa]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">33.2</td> <td style="text-align: center;">0.437</td> <td style="text-align: center;">3.240</td> </tr> </table>			f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]	33.2	0.437	3.240	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center; margin: 0;">Se NON risulta necessario armare</p> <table border="1" style="margin: 5px auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">limite a V_{sd}</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">[kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2533.61</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">$V_{sd} < V_{lim}$</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; color: red;">Si</td> </tr> </table> </div>			limite a V_{sd}	[kN]	2533.61	$V_{sd} < V_{lim}$	Si
f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]														
33.2	0.437	3.240														
limite a V_{sd}																
[kN]																
2533.61																
$V_{sd} < V_{lim}$																
Si																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">ρ_l</td> <td style="text-align: center;">V_{Rd} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0.0036</td> <td style="text-align: center; color: red;">415.40</td> </tr> </table>			ρ_l	V_{Rd} [kN]	0.0036	415.40										
ρ_l	V_{Rd} [kN]															
0.0036	415.40															
NON risulta necessario armare a taglio ($V_{sd} < V_{Rd,c}$)																

Tabella 55 – Verifica a taglio – Calotta

VERIFICA A TAGLIO - TU 2008																	
base [cm]	altezza [cm]	coprif. [cm]	ϕ [mm]	A_s tesa [mm ²]													
100	50	5	20	1571													
Rck [MPa]	γ_c	γ_s	N [kN]	E_s [Mpa]	f_{yk} [MPa]												
40	1.5	1.15	1510.0	210000	450												
			<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>V_{Sdu} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">672.5</td> </tr> </table>			V_{Sdu} [kN]	672.5										
V_{Sdu} [kN]																	
672.5																	
d [mm]	k	b_w [mm]															
440	1.674	1000															
f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]	<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Se NON risulta necessario armare</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">limite a Vsd</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">[kN]</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">2533.61</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">VSd<Vlim</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Si</td> </tr> </table>			Se NON risulta necessario armare		limite a Vsd		[kN]		2533.61		VSd<Vlim		Si	
Se NON risulta necessario armare																	
limite a Vsd																	
[kN]																	
2533.61																	
VSd<Vlim																	
Si																	
33.2	0.437	3.020															
ρ_l			<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>V_{Rd} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">400.88</td> </tr> </table>			V_{Rd} [kN]	400.88										
V_{Rd} [kN]																	
400.88																	
0.0036																	
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Risulta necessario armare a taglio (Vsd>VRd,c)</td> </tr> </table>						Risulta necessario armare a taglio (Vsd>VRd,c)											
Risulta necessario armare a taglio (Vsd>VRd,c)																	
Se risulta necessario armare																	
ϕ [mm]	n° bracci	passo [cm]	<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>A>Amin?</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">OK</td> </tr> </table>			A>Amin?	OK										
A>Amin?																	
OK																	
16	5	30															
A_{sw} [mm ²]	1005.309649																
s [mm]	300																
d [mm]	440																
f_{ywd} [MPa]	391.30		<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>V_{Rsd} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">741.59</td> </tr> </table>			V_{Rsd} [kN]	741.59										
V_{Rsd} [kN]																	
741.59																	
θ [°]	35		<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">limite a Vsd</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">[kN]</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">2533.61</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">VSd<Vlim</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Si</td> </tr> </table>			limite a Vsd		[kN]		2533.61		VSd<Vlim		Si			
limite a Vsd																	
[kN]																	
2533.61																	
VSd<Vlim																	
Si																	
α [°]	90																
cot θ	1.428148007		<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>V_{Rcd} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1989.00</td> </tr> </table>			V_{Rcd} [kN]	1989.00										
V_{Rcd} [kN]																	
1989.00																	
m omogen.	5.83																
σ_{cp} [MPa]	3.02																
α_{cw}	1.136445783		<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>V_{Rd} [kN]</td> <td>$V_{Sd}<V_{Rd}$</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">741.59</td> <td style="text-align: center;">Si</td> </tr> </table>			V_{Rd} [kN]	$V_{Sd}<V_{Rd}$	741.59	Si								
V_{Rd} [kN]	$V_{Sd}<V_{Rd}$																
741.59	Si																
v_1	0.52032																

Tabella 56 – Verifica a taglio – Piedritto

VERIFICA A TAGLIO - TU 2008																	
base [cm]	altezza [cm]	coprif. [cm]	ϕ [mm]	A_s tesa [mm ²]													
100	50	5	20	1571													
Rck [MPa]	γ_c	γ_s	N [kN]	E_s [Mpa]	f_{yk} [MPa]												
40	1.5	1.15	1360.0	210000	450												
			<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>V_{Sdu} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">69.6</td> </tr> </table>			V_{Sdu} [kN]	69.6										
V_{Sdu} [kN]																	
69.6																	
d [mm]	k	b_w [mm]															
440	1.674	1000															
f_{ck} [MPa]	v_{min}	σ_{cp} [MPa]	<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Se NON risulta necessario armare</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">limite a Vsd</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">[kN]</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">2533.61</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">VSd<Vlim</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Si</td> </tr> </table>			Se NON risulta necessario armare		limite a Vsd		[kN]		2533.61		VSd<Vlim		Si	
Se NON risulta necessario armare																	
limite a Vsd																	
[kN]																	
2533.61																	
VSd<Vlim																	
Si																	
33.2	0.437	2.720															
ρ_l			<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>V_{Rd} [kN]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">381.08</td> </tr> </table>			V_{Rd} [kN]	381.08										
V_{Rd} [kN]																	
381.08																	
0.0036																	
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">NON risulta necessario armare a taglio (Vsd<VRd,c)</td> </tr> </table>						NON risulta necessario armare a taglio (Vsd<VRd,c)											
NON risulta necessario armare a taglio (Vsd<VRd,c)																	

Tabella 57 – Verifica a taglio – Arco rovescio

10. VERIFICHE SISMICHE

10.1. PREMESSA

Generalmente la progettazione di strutture interrato sottoposte ad azioni sismiche è caratterizzata da deformazioni imposte ai manufatti dal terreno circostante, sempre legate all'interazione tra i due elementi. Diversamente le strutture di elevazione vengono dimensionate sulla base di forze di inerzia causate dalle accelerazioni al suolo. Molti studi hanno documentato gli stati di danno su strutture interrato e le seguenti considerazioni possono essere fatte relativamente al loro comportamento sismico:

- Le strutture interrato presentano generalmente minori danni rispetto alle strutture di superficie.
- I danni si riducono all'aumentare delle coperture. I tunnel più profondi sembrano essere più sicuri e presentare minor livello di vulnerabilità rispetto ai tunnel superficiali.
- Le strutture interrato realizzate nei terreni risultano più vulnerabili rispetto alle stesse in roccia.
- La presenza di rivestimenti aumenta notevolmente il livello di sicurezza.
- I tunnel sono più stabili se sottoposti a carichi di tipo simmetrico.
- I danni possono essere legati a picchi di accelerazione e velocità relativi alla magnitudo e alla distanza dall'epicentro del sisma.
- La durata della sollecitazione sismica è molto importante poiché può causare effetti di fatica e, di conseguenza, grandi deformazioni.

Gli effetti delle sollecitazioni sismiche sulle strutture interrato possono essere raggruppati in due categorie:

- oscillazioni del terreno (ground shaking);



- crisi del terreno per liquefazione, instabilità, etc.

I fattori più importanti che influenzano la prima categoria sono:

- la forma, le dimensioni e la profondità della struttura;
- le caratteristiche geomeccaniche del terreno o della roccia circostante;
- le proprietà meccaniche della struttura;
- il grado di sismicità.

L'approccio progettuale di strutture interrato è molto particolare. Per molti casi l'inerzia delle formazioni geologiche presenti è molto più grande di quella delle strutture. Misurazioni effettuate da Okamoto et al. (1973) sul comportamento di un tunnel durante molti eventi sismici mostrano che gli effetti sono decisamente più legati alla risposta del terreno piuttosto che alle caratteristiche inerziali delle strutture. Tre tipi di comportamento (Owen and Scholl, 1981) possono essere considerati per definire la risposta delle strutture interrato in condizioni sismiche:

- compressione ed estensione assiale;
- flessione longitudinale;
- ovalizzazione.

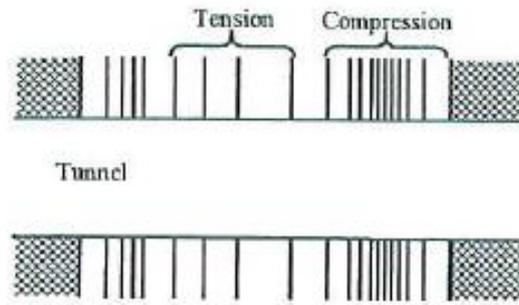


Figura 61 – Compressione-estensione

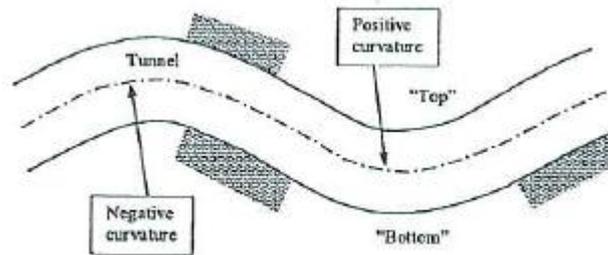


Figura 62 – Flessione longitudinale

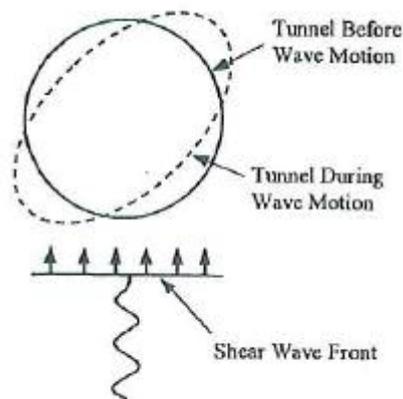


Figura 63 – Ovalizzazione

Le deformazioni assiali nei tunnel sono generate dalle componenti delle onde sismiche che producono movimento nella direzione parallela all'asse della struttura e causano alternanza di tensioni e compressioni.

Le deformazioni flessionali sono causate dalle componenti delle onde sismiche che producono movimento nella direzione ortogonale all'asse della struttura.

Le deformazioni di ovalizzazione si sviluppano quando le onde di taglio si propagano in direzione circa normale all'asse della struttura, inducendo una distorsione della sezione trasversale e modificandone la forma. In termini di progettazione questa situazione può essere simulata applicando sulla sezione trasversale del rivestimento un regime di deformazioni (2D plane-strain conditions).

La progettazione sismica di strutture interrato richiede una previsione delle caratteristiche del sisma e della risposta delle strutture alla sollecitazione.

Sulla base delle caratteristiche della struttura in esame, si ritiene che il caso relativo all'ovalizzazione rappresenti la situazione più gravosa.

Si propone nel seguito un'analisi sismica condotta secondo il metodo proposto da Wang (1993), che, sulla base delle caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione di galleria, della geologia/geotecnica e della sismicità, permette di dedurre "incrementi di natura sismica" alle sollecitazioni statiche.

In letteratura si trovano equazioni risolventi che fanno riferimento a due condizioni limite di interazione fra terreno e galleria: quella cosiddetta di "full-slip", in cui, in assenza di attrito tra il mezzo e la struttura, si assume che possa avvenire scorrimento relativo tra i due elementi, e quella di "no-slip", ovvero di perfetta aderenza tra galleria e terreno.

Si considera pertanto la risposta del rivestimento dipendente dalla rigidità che esso ha rispetto al terreno. Tale rigidità è quantificata attraverso i cosiddetti coefficienti di "compressibilità" e di "flessibilità". Anche se nella letteratura tecnica non esiste un'unica definizione di questi coefficienti, essi riguardano rispettivamente la rigidità "estensionale" e "flessionale" del rivestimento rispetto al terreno e rappresentano la "resistenza" che essa offre

all'ovalizzazione della sezione. Secondo le soluzioni proposte da Hoeg (1968) e Peck et al. (1972), si definiscono:

- il coefficiente di “compressibilità”:

$$C = \frac{E_g R(1-\nu_s^2)}{E_s A_s(1-\nu_g^2)}$$

- il coefficiente di “flessibilità”:

$$F = \frac{E_g R^3(1-\nu_s^2)}{E_s I_s(1-\nu_g^2)}$$

dove:

R è il raggio della galleria; A_s e I_s indicano l'area e il momento di inerzia per unità di lunghezza della struttura che rappresenta il rivestimento; E_g , E_s , ν_g e ν_s sono i moduli di Young e di Poisson del terreno e del rivestimento rispettivamente.

Nel presente calcolo si sono considerate le azioni più gravose derivanti dalle formulazioni della condizione “no slip”.

$$N_{\vartheta,\max} = \pm \frac{1}{6} K_{w1} \frac{E_g}{(1+\nu_g)} R \gamma_{\max}$$

$$M_{\vartheta,\max} = \pm \frac{1}{6} K_{w1} \frac{E_g}{(1+\nu_g)} R^2 \gamma_{\max}$$

$$K_{w1} = \frac{12(1-\nu)}{2F + 5 - 6\nu_g}$$

Figura 64 – Sollecitazioni “full slip” – Wang (1993)

essendo F il coefficiente di flessibilità ed avendo definito con K_{W1} il coefficiente di risposta del rivestimento.

$$N_{g,max} = \pm K_{w2} \frac{E_g}{2(1+\nu_g)} R \gamma_{max}$$

$$M_{g,max} = \pm \frac{1}{6} K_{w1} \frac{E_g}{(1+\nu_g)} R^2 \gamma_{max}$$

$$K_{w2} = 1 + \frac{F[(1+\nu_g) - (1-2\nu_g)C] - 0.5(1-2\nu_g^2 + 2)}{F[(3-2\nu_g) - (1-2\nu_g)C] + C[2.5 - 8\nu_g + 6\nu_g^2] + 6 + 8\nu_g}$$

Figura 65 - Sollecitazioni “no slip” – Wang (1993)

essendo C il coefficiente di compressibilità ed avendo definito con K_{W2} il coefficiente di risposta del rivestimento allo sforzo normale.

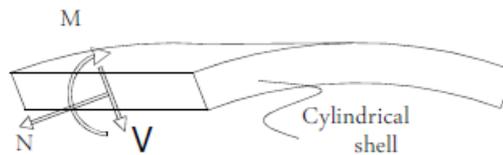


Figura 66 – Convenzione di segno

La galleria interessa un versante collinare sito nel territorio dei comuni di Verduno e La Morra a cui corrisponde un'accelerazione orizzontale massima, allo “stato limite di vita” SLV, su suolo rigido (PGA) pari a 0,071g.

La verifica in condizioni sismiche è stata condotta allo stato limite ultimo attraverso la definizione delle seguenti azioni di progetto:

$$N_d = 1.0 \cdot N$$

$$M_d = 1.0 \cdot M$$

dove N ed M sono le sollecitazioni totali (statiche + incremento sismico).

Nel seguito vengono presentate le verifiche in condizioni sismiche per le sezione tipo analizzate considerando la fase di calcolo di lungo termine.



Le analisi sono state condotte in presenza della formazione geologica delle argille marnose, Unità 7, viene così considerata come categoria di sottosuolo la classe C ed un valore di velocità di propagazione delle onde di taglio pari a $V_{s,30}=300$ m/s.

Per il calcolo delle sollecitazioni sismiche si assume dunque un'accelerazione amplificata del fattore di amplificazione stratigrafica 1,5 e del fattore di amplificazione topografica 1 e quindi pari a 0,1065g.

Si è valutata, per l'evento sismico, una magnitudo momento pari a 7.5 da cui, nota l'accelerazione di progetto (0.1065g) è stato possibile stimare una PGV (peak ground velocity) pari a 0.104 m/s ipotizzando una distanza epicentrale tra 0 e 20 km ed un coefficiente riduttivo pari a 0,7 come proposto da Power (1996) per coperture superiori ai 30 m.

10.1.1. ANALISI 1 – BY- PASS CARRABILE - SEZIONE TIPO B2

Nella tabella seguente vengono riportati i valori delle azioni interne calcolati mediante l'analisi FLAC nelle sezioni più rappresentative nella condizione di lungo termine; al momento flettente e all'azione assiale vengono rispettivamente sommati e sottratti i valori massimi di azione sismica derivanti dal calcolo. Le verifiche risultano anche in questo caso soddisfatte.

$$K_0 = 1 - \sin\phi$$

RIVESTIMENTO DEFINITIVO									
TIME	SEZIONE	A_s	A'_s	M	N	ΔM_{sisma}	ΔN_{sisma}	M_d	N_d
		[cm^2]	[cm^2]	[$KN*m$]	[KN]	[$KN*m$]	[KN]	[$KN*m$]	[KN]
7	CALOTTA	15.71	15.71	48.0	1790.0	174	281	222.0	1509.0
	PIEDRITTO	15.71	15.71	125.3	1900.0			299.3	1619.0
	ARCO ROVESCIO	31.42	31.42	482.9	1400.0			656.9	1119.0

Tabella 58 - Verifiche tensionali – Analisi sismica

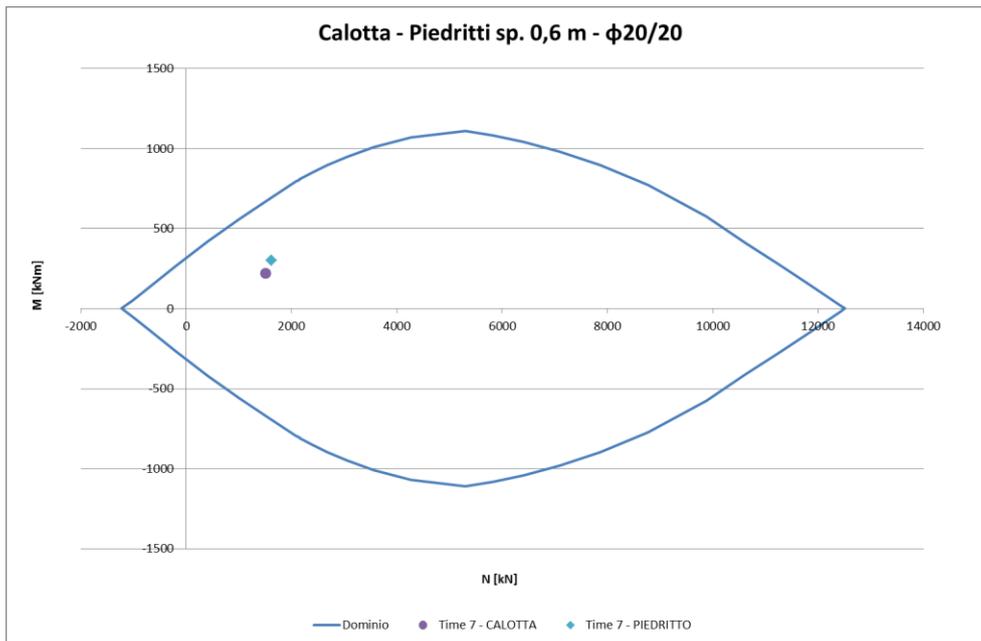


Figura 67 - Dominio M-N – Calotta e piedritti

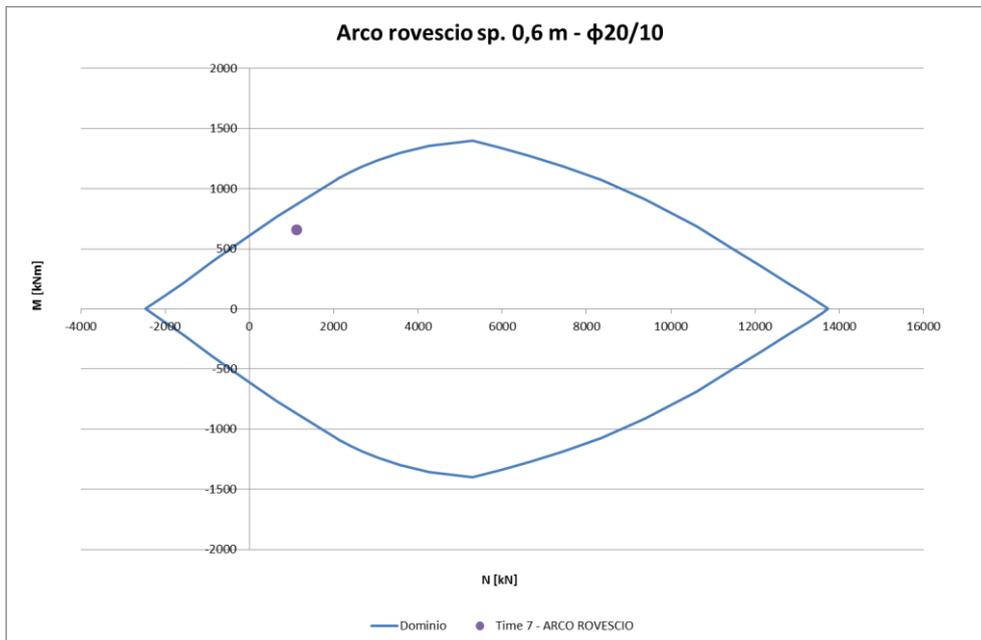


Figura 68 - Dominio M-N – Arco rovescio



$K_0 = 1.2$

RIVESTIMENTO DEFINITIVO									
TIME	SEZIONE	A_s	A'_s	M	N	ΔM_{sisma}	ΔN_{sisma}	M_d	N_d
		[cm^2]	[cm^2]	[KN^*m]	[KN]	[KN^*m]	[KN]	[KN^*m]	[KN]
7	CALOTTA	15.71	15.71	65.9	2300.0	174	281	239.9	2019.0
	PIEDRITTO	15.71	15.71	87.0	2170.0			261.0	1889.0
	ARCO ROVESCIO	38.01	38.01	473.3	1800.0			647.3	1519.0

Tabella 59 - Verifiche tensionali - Analisi sismica

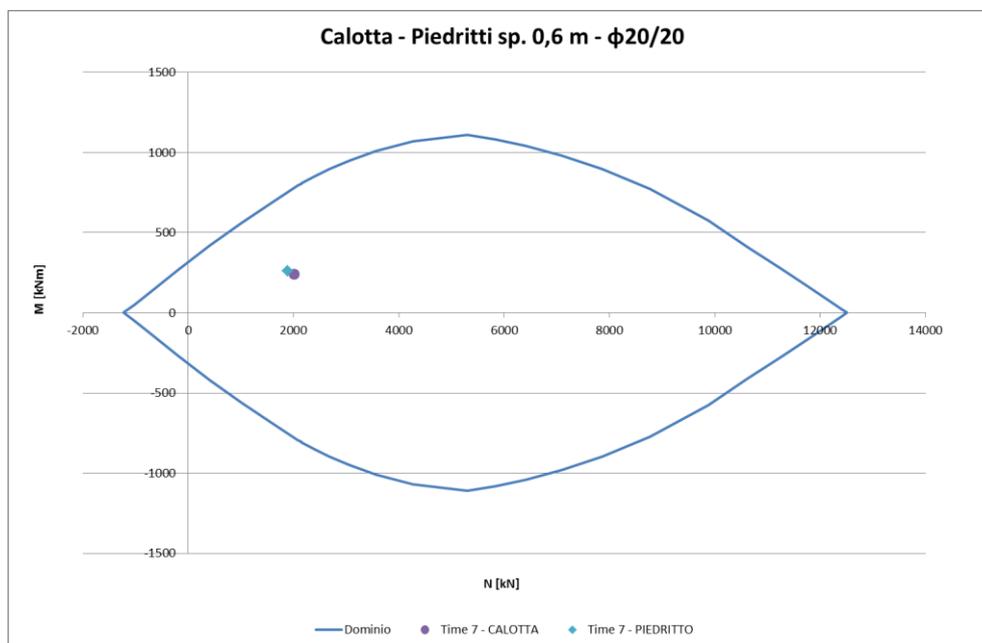


Figura 69 - Dominio M-N – Calotta e piedritti

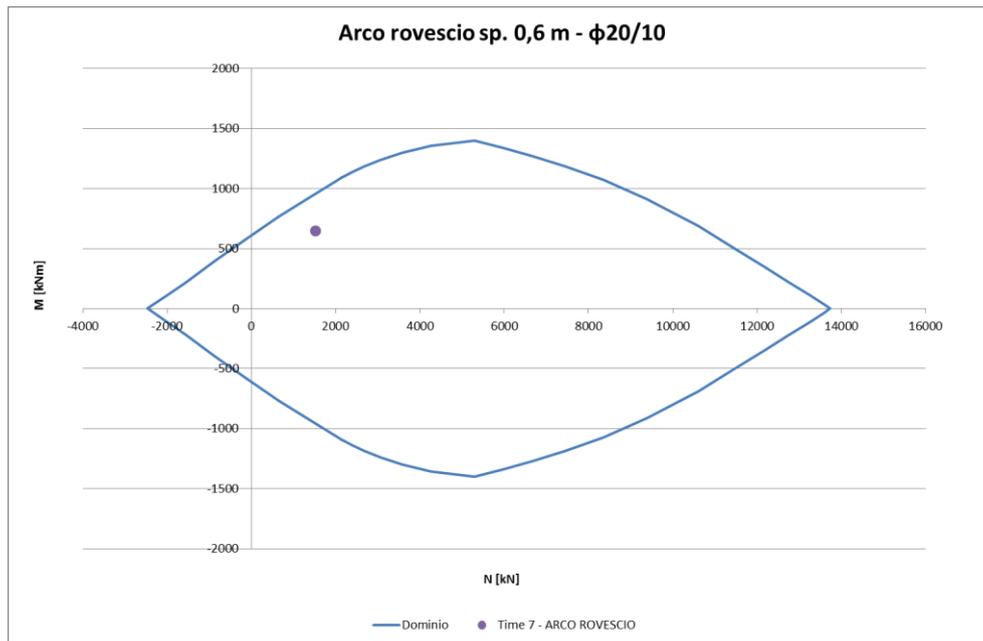


Figura 70 - Dominio M-N – Arco rovescio

10.1.2. ANALISI 2 – BY- PASS CARRABILE - SEZIONE TIPO C2

Nella tabella seguente vengono riportati i valori delle azioni interne calcolati mediante l'analisi FLAC nelle sezioni più rappresentative nella condizione di lungo termine; al momento flettente e all'azione assiale vengono rispettivamente sommati e sottratti i valori massimi di azione sismica derivanti dal calcolo. Le verifiche risultano anche in questo caso soddisfatte.

$$K_0 = 1 - \sin\phi$$

RIVESTIMENTO DEFINITIVO									
TIME	SEZIONE	A _s	A' _s	M	N	ΔM _{sisma}	ΔN _{sisma}	M _d	N _d
		[cm ²]	[cm ²]	[KN*m]	[KN]	[KN*m]	[KN]	[KN*m]	[KN]
7	CALOTTA	19.01	19.01	147.0	2400.0	174	281	321.0	2119.0
	PIEDRITTO	19.01	19.01	90.5	2350.0			264.5	2069.0
	ARCO ROVESCIO	38.01	38.01	550.8	1430.0			724.8	1149.0

Tabella 60 - Verifiche tensionali – Analisi sismica

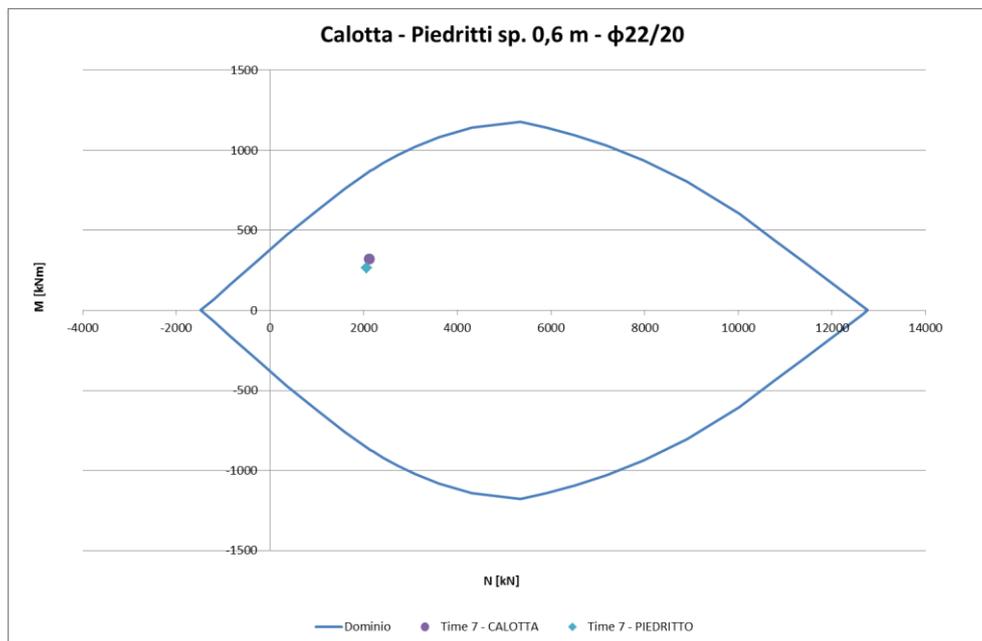


Figura 71 - Dominio M-N – Calotta e piedritti

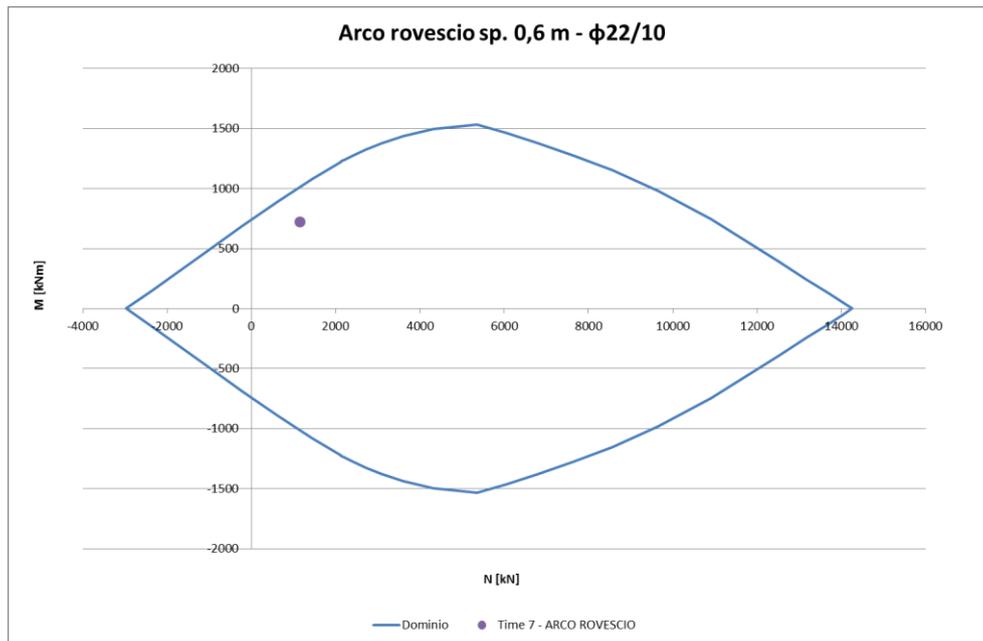


Figura 72 - Dominio M-N – Arco rovescio



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo bypass carrabili e pedonali

$K_0 = 1.2$

RIVESTIMENTO DEFINITIVO									
TIME	SEZIONE	A _s	A' _s	M	N	ΔM _d	ΔN _d	M _d	N _d
		[cm ²]	[cm ²]	[KN*m]	[KN]	[KN*m]	[KN]	[KN*m]	[KN]
7	CALOTTA	19.01	19.01	61.2	3280.0	174	281	235.2	2999.0
	PIEDRITTO	19.01	19.01	101.2	2270.0			275.2	1989.0
	ARCO ROVESCIO	38.01	38.01	525.0	2090.0			699.0	1809.0

Tabella 61 - Verifiche tensionali - Analisi sismica

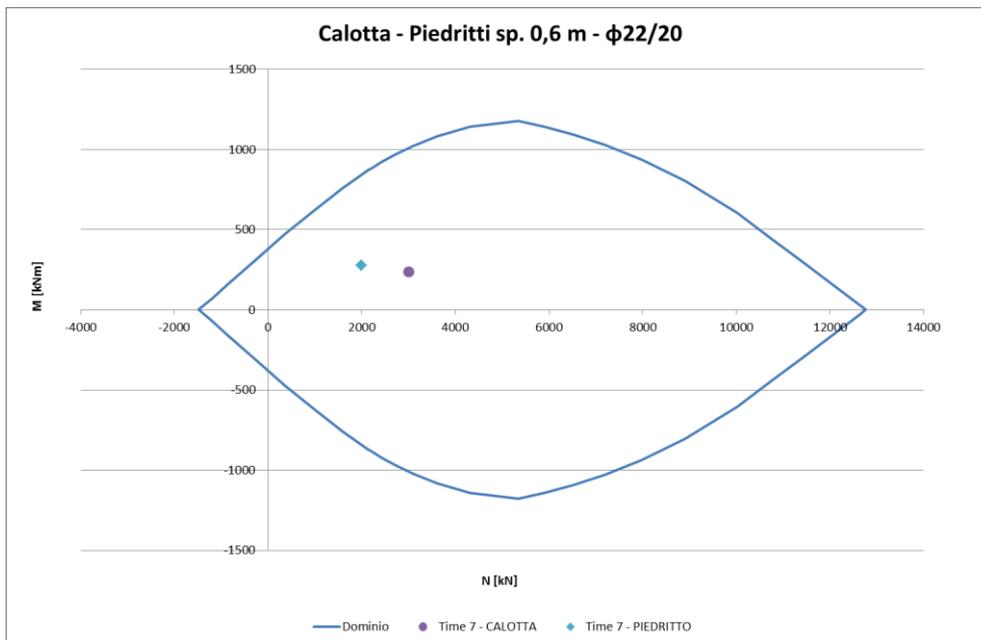


Figura 73 - Dominio M-N – Calotta e piedritti

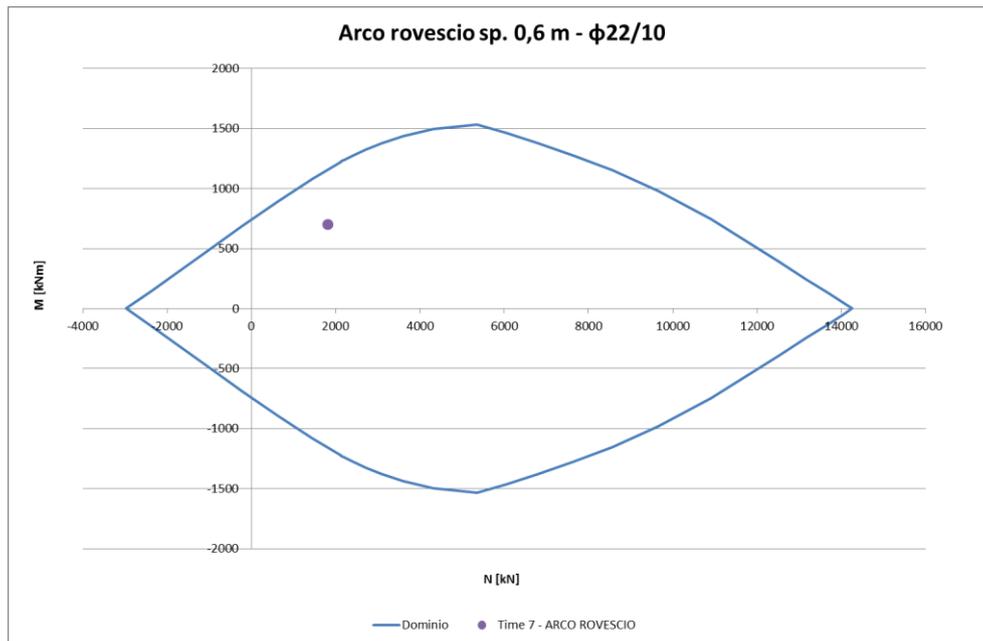


Figura 74 - Dominio M-N – Arco rovescio

10.1.3. ANALISI 3 – BY- PASS PEDONALE - SEZIONE TIPO B0

Nella tabella seguente vengono riportati i valori delle azioni interne calcolati mediante l'analisi FLAC nelle sezioni più rappresentative nella condizione di lungo termine; al momento flettente e all'azione assiale vengono rispettivamente sommati e sottratti i valori massimi di azione sismica derivanti dal calcolo. Le verifiche risultano anche in questo caso soddisfatte.

$$K_0 = 1 - \sin\phi$$

RIVESTIMENTO DEFINITIVO									
TIME	SEZIONE	A _s	A' _s	M	N	M _d	N _d	M _d	N _d
		[cm ²]	[cm ²]	[KN*m]	[KN]	[KN*m]	[KN]	[KN*m]	[KN]
7	CALOTTA	12.72	12.72	200.2	1290.0	128	147	328.2	1143.0
	PIEDRITTO	12.72	12.72	273.7	1250.0			401.7	1103.0
	ARCO ROVESCIO	12.72	12.72	106.5	1210.0			234.5	1063.0

Tabella 62 - Verifiche tensionali – Analisi sismica

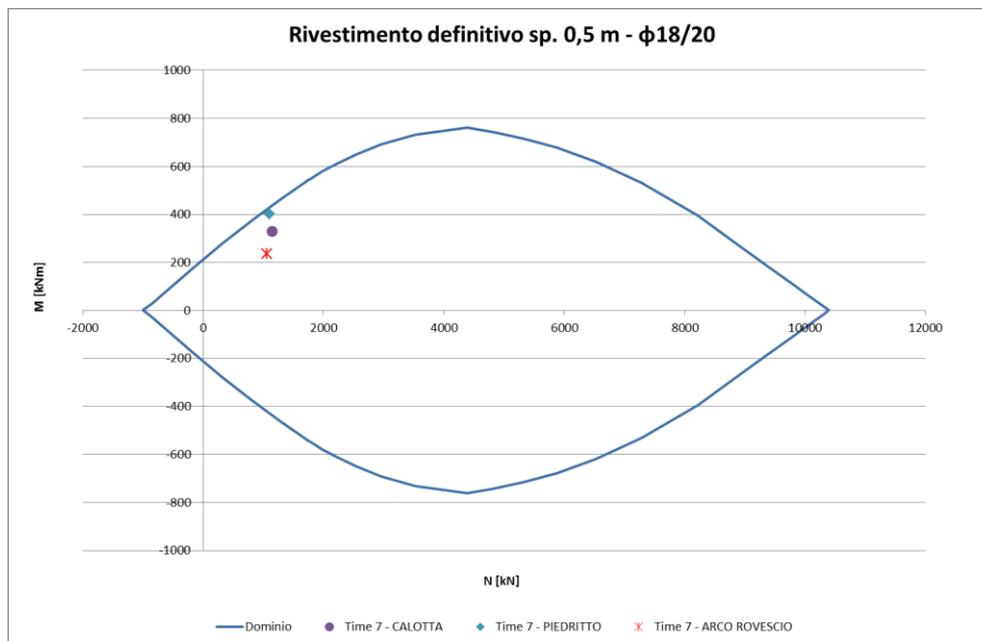


Figura 75 - Dominio M-N

$$K_0 = 1.2$$

RIVESTIMENTO DEFINITIVO									
TIME	SEZIONE	A _s	A' _s	M	N	ΔM _{sisma}	ΔN _{sisma}	M _d	N _d
		[cm ²]	[cm ²]	[KN*m]	[KN]	[KN*m]	[KN]	[KN*m]	[KN]
7	CALOTTA	12.72	12.72	233.7	1410.0	128	147	361.7	1263.0
	PIEDRITTO	12.72	12.72	314.0	1380.0			442.0	1233.0
	ARCO ROVESCIO	12.72	12.72	131.3	1310.0			259.3	1163.0

Tabella 63 - Verifiche tensionali - Analisi sismica

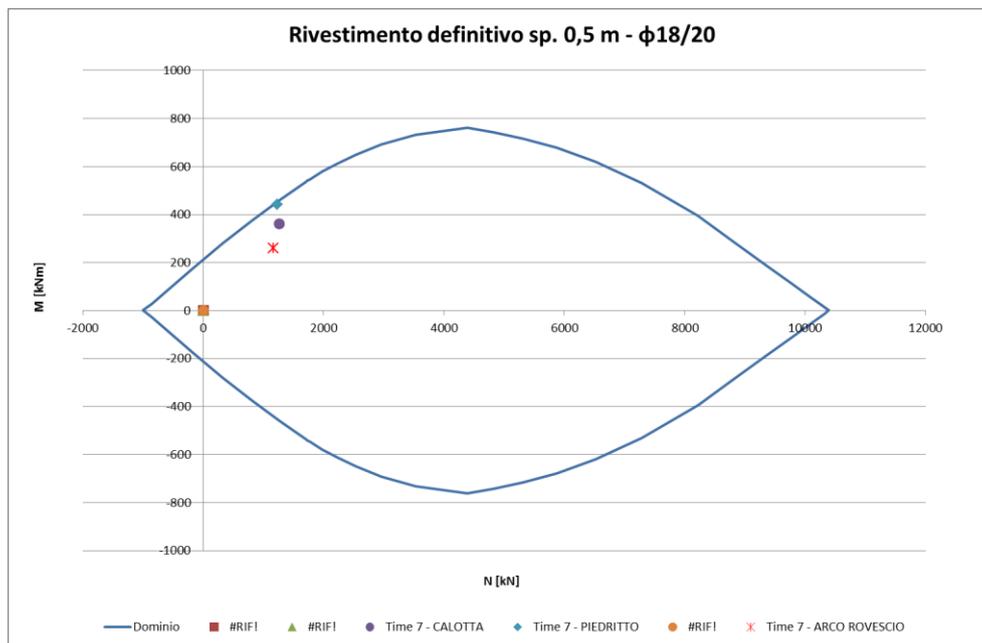


Figura 76 - Dominio M-N

10.1.4. ANALISI 4 – BY- PASS PEDONALE - SEZIONE TIPO C2

Nella tabella seguente vengono riportati i valori delle azioni interne calcolati mediante l'analisi FLAC nelle sezioni più rappresentative nella condizione di lungo termine; al momento flettente e all'azione assiale vengono rispettivamente sommati e sottratti i valori massimi di azione sismica derivanti dal calcolo. Le verifiche risultano anche in questo caso soddisfatte.

$$K_0 = 1 - \sin\phi$$

RIVESTIMENTO DEFINITIVO									
TIME	SEZIONE	A_c	A'_s	M	N	ΔM_{sisma}	ΔN_{sisma}	M_d	N_d
		[cm^2]	[cm^2]	[KN^*m]	[KN]	[KN^*m]	[KN]	[KN^*m]	[KN]
7	CALOTTA	15.71	15.71	202.1	1540.0	128	147	330.1	1393.0
	PIEDRITTO	15.71	15.71	289.5	1480.0			417.5	1480.0
	ARCO ROVESCIO	15.71	15.71	110.3	1250.0			238.3	1250.0

Tabella 64 - Verifiche tensionali – Analisi sismica

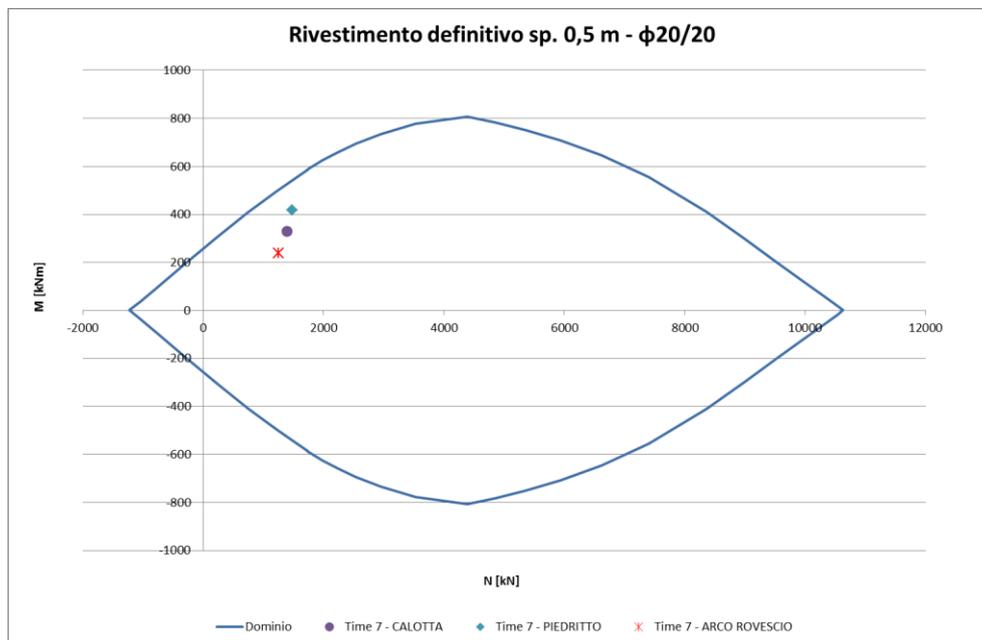


Figura 77 - Dominio M-N



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo bypass carrabili e pedonali

$K_0 = 1.2$

RIVESTIMENTO DEFINITIVO									
TIME	SEZIONE	A_s	A'_s	M	N	M_d	N_d	M_d	N_d
		[cm^2]	[cm^2]	[KN^*m]	[KN]	[KN^*m]	[KN]	[KN^*m]	[KN]
7	CALOTTA	15.71	15.71	239.8	1620.0	128	147	367.8	1473.0
	PIEDRITTO	15.71	15.71	328.5	1570.0			456.5	1570.0
	ARCO ROVESCIO	15.71	15.71	140.5	1360.0			268.5	1360.0

Tabella 65 - Verifiche tensionali - Analisi sismica

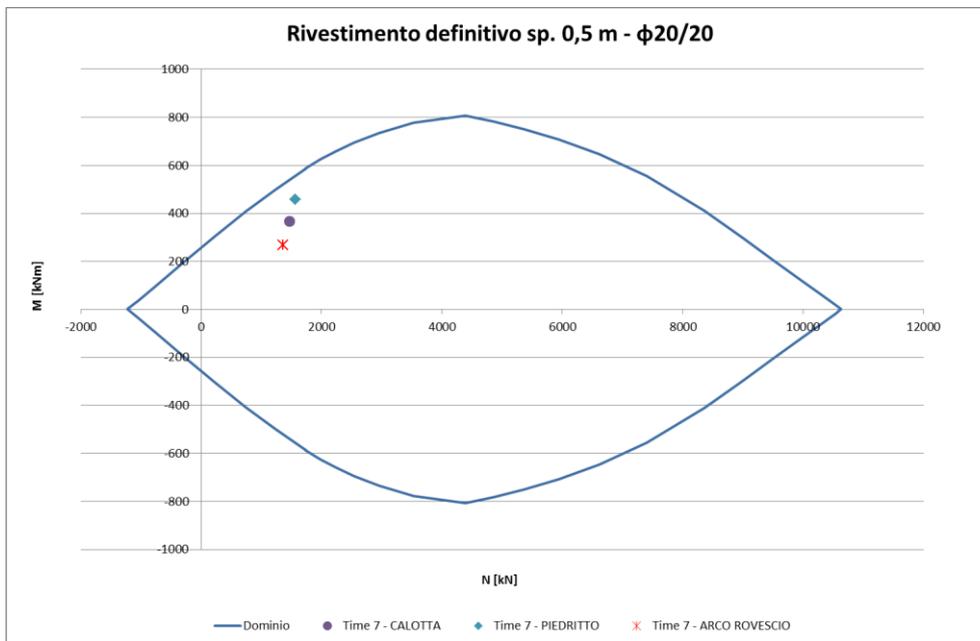


Figura 78 - Dominio M-N



11. ANALISI INNESTI BYPASS CARRABILI E PEDONALI, NICCHIE SOS

11.1. INTRODUZIONE

Le zone di innesto dei bypass carrabili e pedonali e delle nicchie SOS presentano concentrazioni tensionali notevoli legate alla trasmissione delle azioni circonferenziali, presenti nel rivestimento definitivo in conci prefabbricati, alle strutture di calcestruzzo gettato in opera.

La galleria principale scavata con TBM è soggetta a stati tensionali diversi, dovuti a ricoprimenti di terreno variabili da poche decine di metri a circa 90 m ed a battenti idraulici fino a 40 m di altezza.

Le zone di innesto prevedono elementi di irrigidimento gettati in opera che devono far fronte a tale stato tensionale localizzato. La geometria delle zone di innesto è stata studiata con modelli di calcolo tridimensionali in SAP2000, basandosi sulle analisi *plane strain* eseguite per lo studio della galleria principale. La procedura di progetto e verifica prevede la realizzazione di un modello di calcolo “di taratura”. Con questa modellazione è stata ricercata una pressione radiale alla galleria principale che determinasse, in SAP2000, un’azione circonferenziale di compressione uguale a quanto trovato con l’analisi *plane strain* della galleria scavata con TBM. In seguito, tramite un secondo modello di calcolo “di progetto”, sempre mediante SAP2000, introducendo la geometria dell’innesto, si è simulata l’apertura del fronte dei by-pass ed è stato possibile ricavare lo stato tensionale di tali zone. Sono quindi state condotte le verifiche sezionali in c.a..

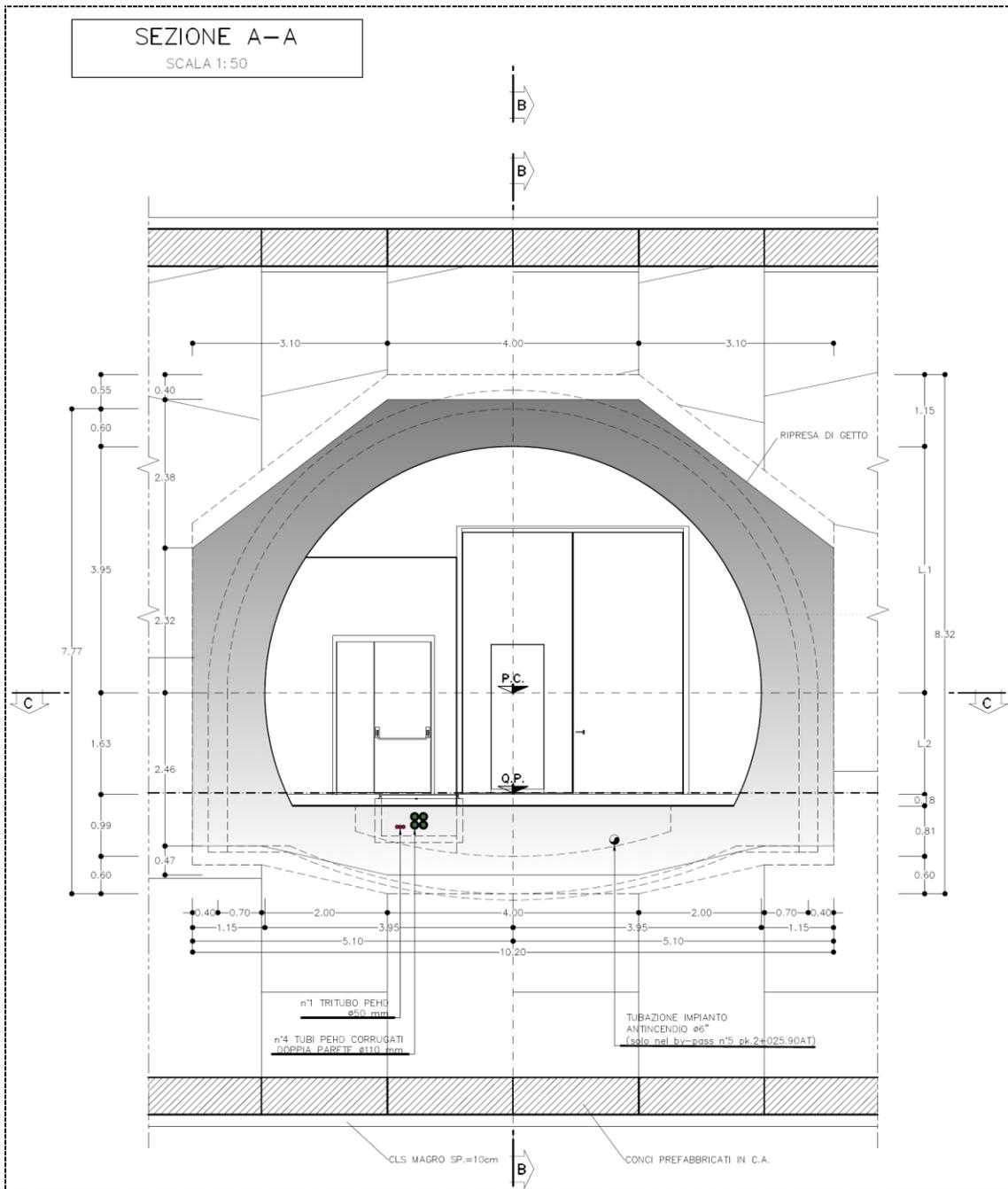


Figura 80: Innesto bypass carrabile – Sezione A-A

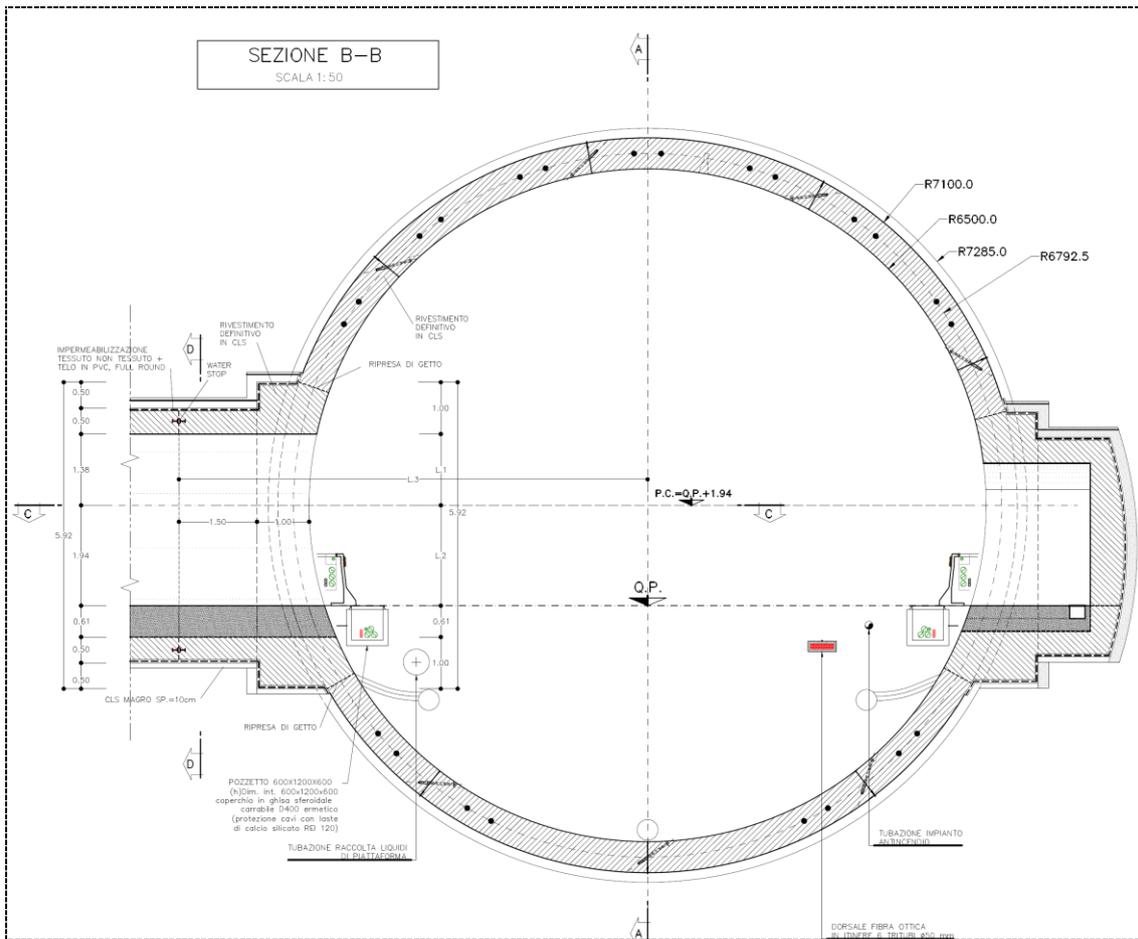


Figura 81: Innesco bypass pedonale – Sezione B-B

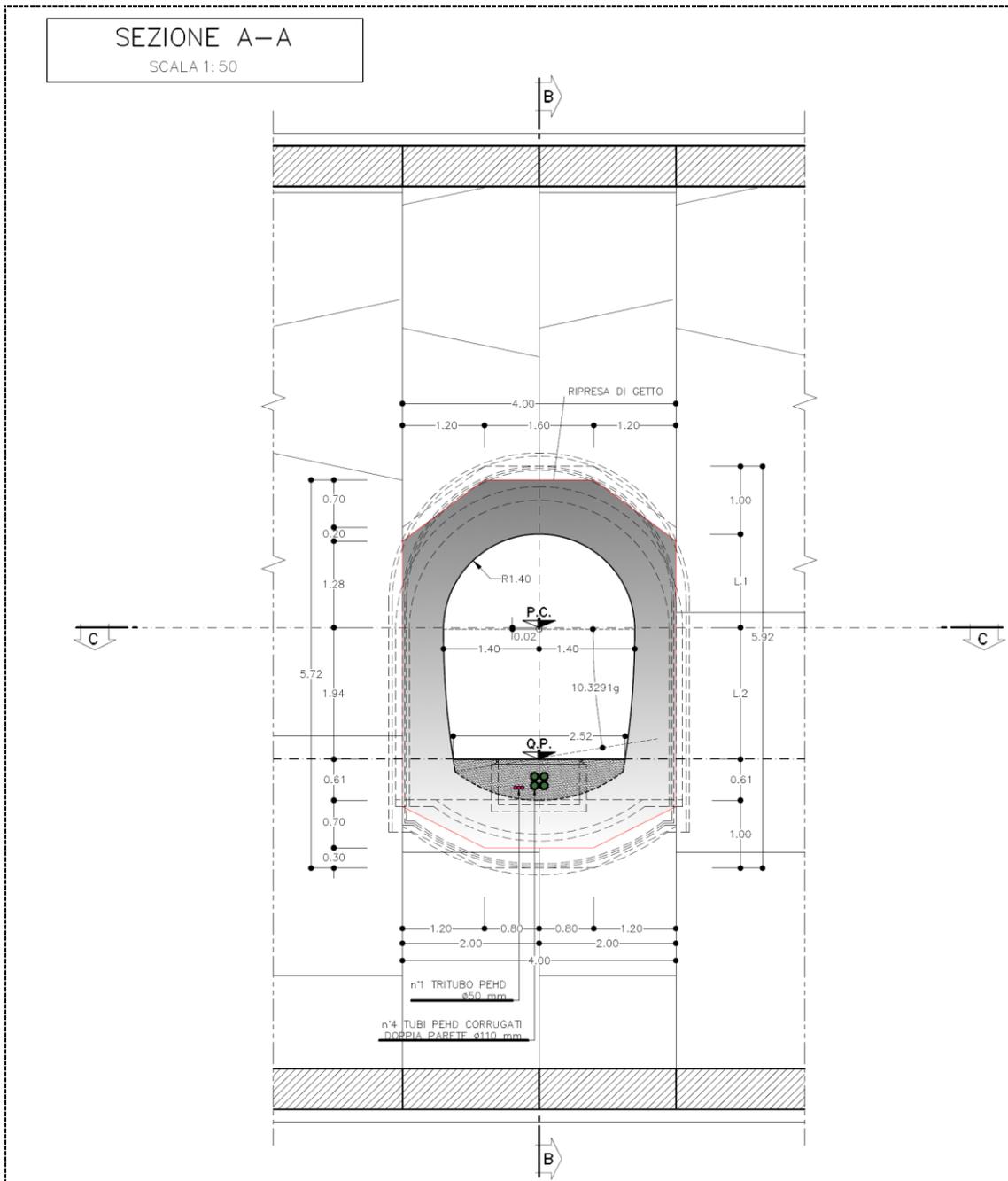


Figura 82: Innesto bypass pedonale – Sezione A-A

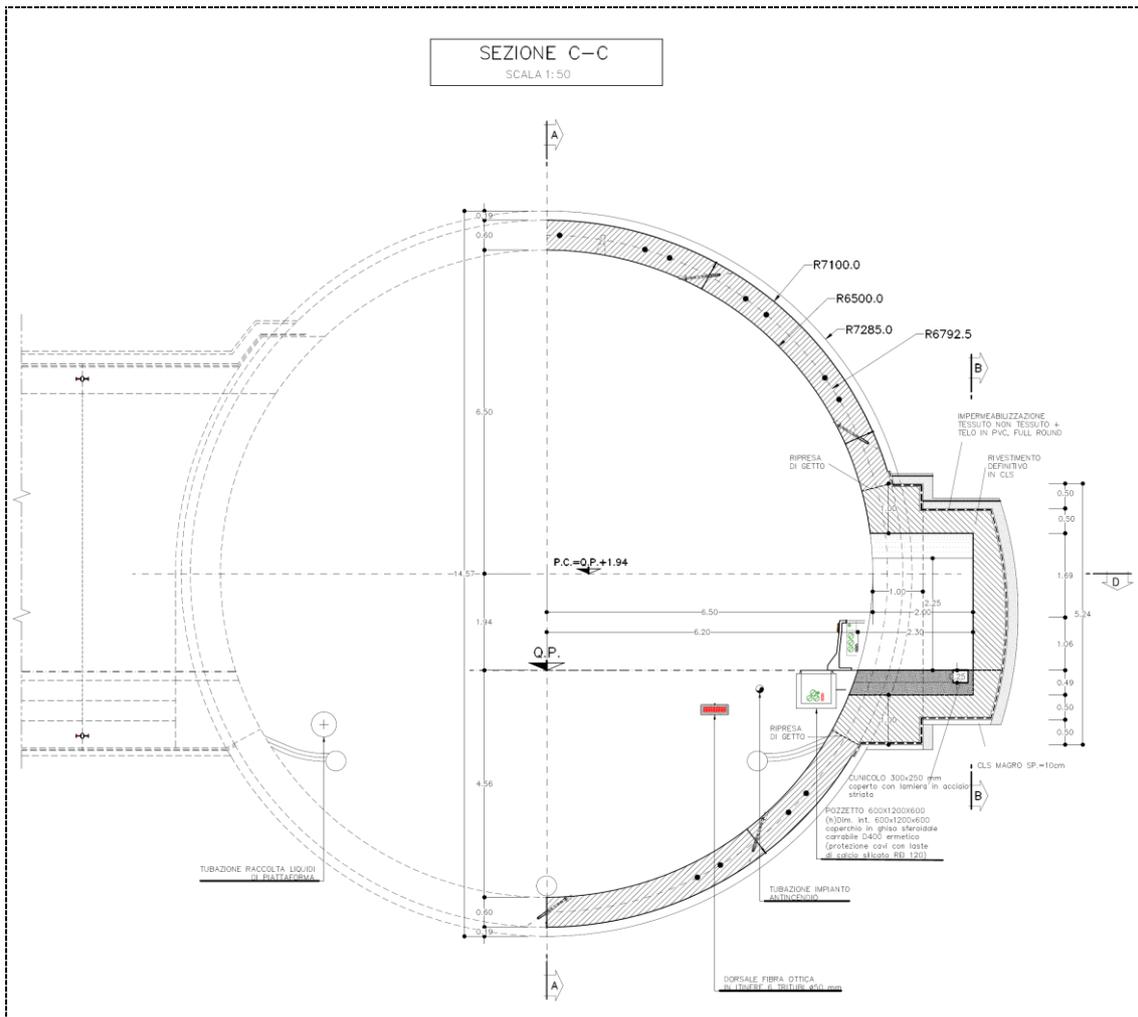


Figura 83: Nicchia SOS – Sezione C-C

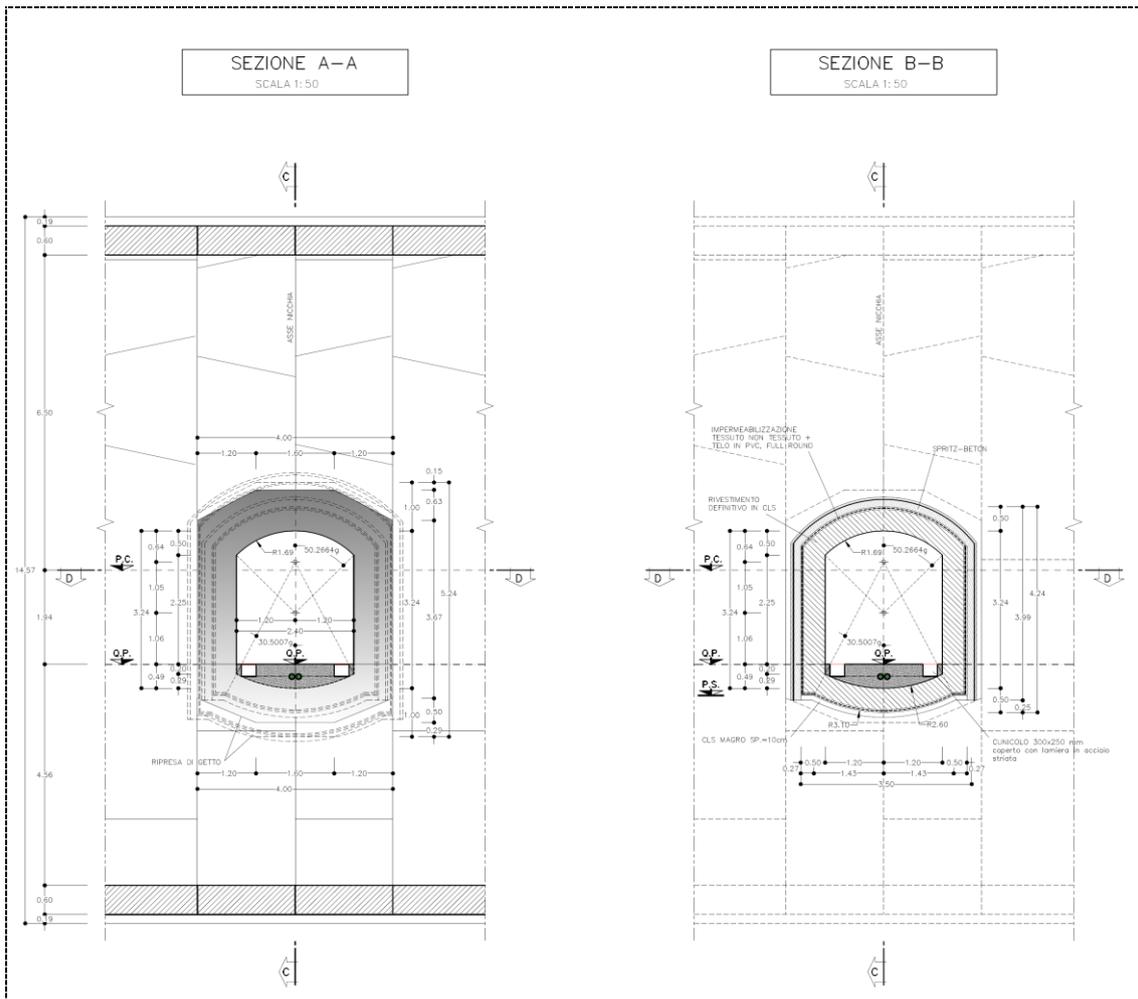


Figura 84: Nicchia SOS – Sezioni A-A, B-B

11.3. RIEPILOGO STATO TENSIONALE GALLERIA PRINCIPALE

Le analisi *plane strain* eseguite in precedenza per la galleria scavata mediante TBM hanno permesso di determinare lo stato tensionale nel rivestimento definitivo, in conci prefabbricati, della galleria principale per le diverse situazioni progettuali in termini di carico litostatico e idraulico. Ai fini del progetto delle zone di innesto, si riporta una tabella che riassume le azioni circolari ricavate dalle analisi *plane strain* della galleria principale in funzione delle varie zone lungo il tracciato.

Analisi di riferimento	Pk (canna di monte) By-pass CARRABILI	Pk (canna di monte) By-pass PEDONALI	N _{falda} [kN/m]
H = 40 m	1+125.9	0+825.9	2370
		3+525.9	
H = 70 m	2+925.9	1+425.9	7190
		2+325.9	
		2+625.9	
		3+225.9	
H = 90 m	2+025.9	1+175.9	7176

Figura 85: Azioni circolari analisi *plane strain* galleria principale

Come visibile nella tabella, i conci prefabbricati che costituiscono il rivestimento definitivo della galleria principale sono soggetti ad una azione circolare di circa 2400 kN alle progressive (canna di monte) 1+125.9, 0+825.9 e 3+525.9. Per le progressive 2+925.9, 1+425.9, 2+325.9, 2+625.9, 3+225.9, 2+025.9 e 1+175.9 l'azione circolare è pari a circa 7200 kN. Tali azioni tengono conto anche delle pressioni idrostatiche connesse alla falda presente.

Per i bypass carrabili lo stato tensionale può essere diminuito in quanto per essi si è prevista l'adozione di canalette drenanti al piede dell'impermeabilizzazione, così da abbattere una parte delle pressioni connesse al carico idraulico. Con tali ipotesi, le analisi numeriche sul continuo *plane strain* hanno riportato un'azione circolare di 6100 kN per tale situazione.

In accordo a quanto riportato quindi, sono state analizzate due situazioni differenti per i bypass carrabili e pedonali.



- Bypass carrabili:
- 1) Azione circonferenziale di 2400 kN
 - 2) Azione circonferenziale di 6100 kN
- Bypass pedonali:
- 1) Azione circonferenziale di 2400 kN
 - 2) Azione circonferenziale di 7200 kN

11.4. IPOTESI PRINCIPALI E ASSUNZIONI PER IL CALCOLO

11.4.1. Geometria della modellazione

I modelli di calcolo “di taratura” e “di progetto” considerano un tratto di galleria principale di lunghezza 50 m per escludere in modo opportuno eventuali effetti di bordo.

Le aperture, dovute al bypass carrabile o pedonale e alle nicchie SOS, sono state eseguite in asse all’ordinata $y = 25$ m.

Come da progetto, in corrispondenza di ciascun bypass carrabile o pedonale è prevista una nicchia SOS alla stessa progressiva. La modellazione 3D proposta è stata utilizzata anche per studiare la zona di innesto delle nicchie SOS.

11.4.2. Interazione terreno-struttura

La galleria principale attraversa prevalentemente la formazione litologica definita come “Unità 7” Marne di S. Agata Fossili e subordinatamente tratte nell’Unità 6 dei “Gessi”.

L’interazione fra il terreno e la struttura è stata tenuta in considerazione tramite l’introduzione di elementi di trave reagenti a sola compressione. La costante elastica di reazione del terreno circostante è stata determinata con riferimento alla formulazione di Galerkin per un cavo circolare.

$$k = E / [R \cdot (1 + \nu)]$$

Dove:

E: modulo elastico del terreno

R: raggio dell’apertura circolare

ν : modulo di Poisson del terreno



Si è considerato un valore del modulo elastico pari a 120 MPa, con modulo di Poisson pari a 0.30. L'apertura circolare ha raggio pari a circa 7.1 m.

La costante elastica di reazione è quindi pari a:

$$k = E / [R \cdot (1 + \nu)] = 120 \text{ N/mm}^2 / [7100 \text{ mm} \cdot (1 + 0.30)] = 0.013 \text{ N/mm} \\ = 13000 \text{ kN/mc}$$

11.4.3. Materiali utilizzati nelle analisi

In accordo alle specifiche del progetto, i conci prefabbricati che costituiscono il rivestimento definitivo della galleria principale hanno spessore 60 cm e sono realizzati con calcestruzzo di classe C40/50 ($E_c = 35547 \text{ MPa}$, $\nu = 0.20$, $\gamma = 25 \text{ kN/mc}$).

Gli elementi di irrigidimento posizionati in corrispondenza delle aperture dei bypass carrabili e pedonali e delle nicchie SOS sono realizzati in calcestruzzo di classe C32/40 ($E_c = 33643 \text{ MPa}$, $\nu = 0.20$, $\gamma = 25 \text{ kN/mc}$).

I modelli di calcolo comprendono anche il materiale fittizio denominato "MOLLE" utilizzato per definire le bielle reagenti a sola compressione. Tale materiale ha peso specifico nullo e modulo elastico pari a 130000 kN/mq.

11.5. BYPASS CARRABILI – ANALISI 1

11.5.1. Modello “di taratura”

Il modello “di taratura” è stato elaborato per ottenere uno stato di compressione circonferenziale nel rivestimento definitivo pari a 2400 kN/m. Tale stato tensionale è stato ottenuto applicando una pressione radiale pari a 320 kN/mq, oltre al peso proprio delle strutture valutato direttamente dal programma.

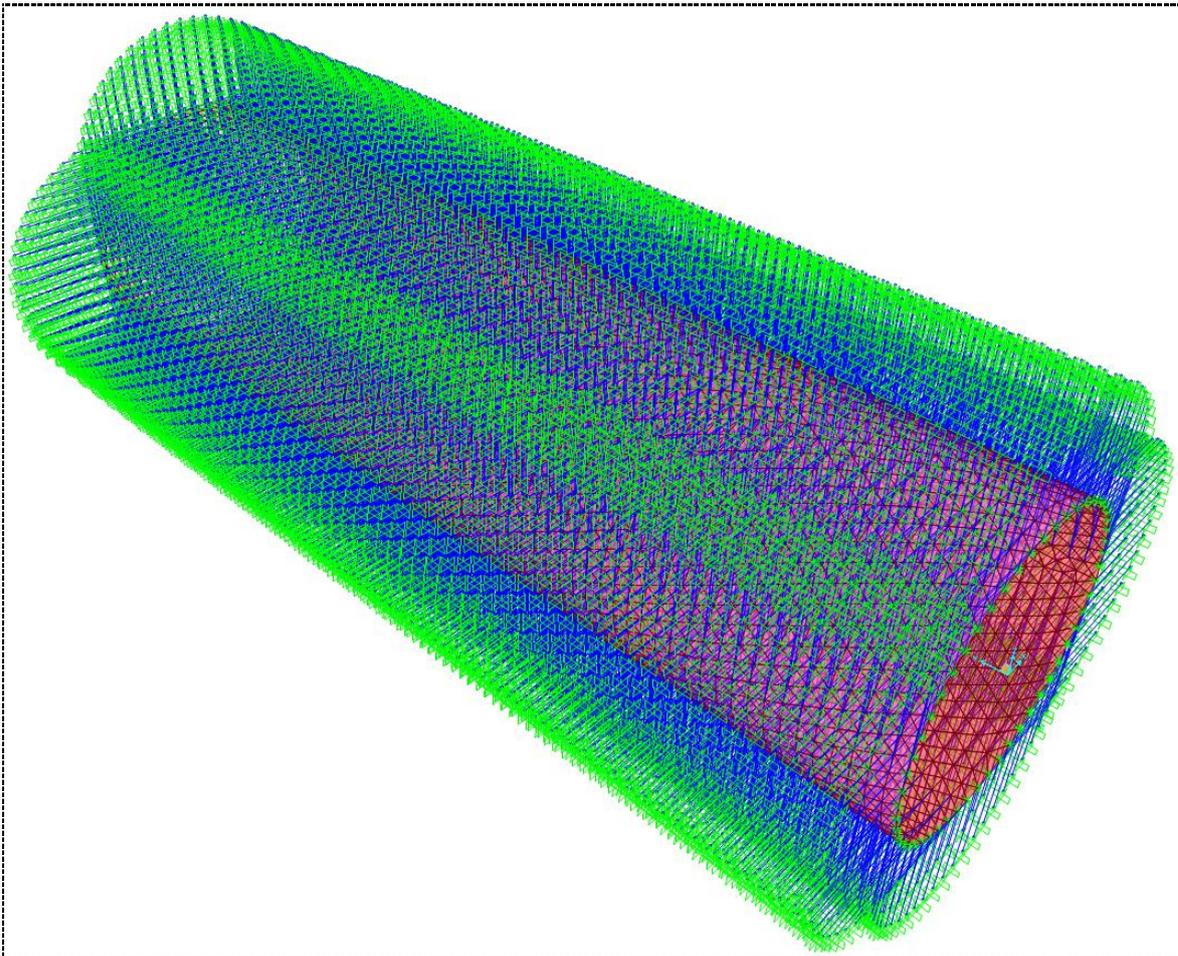


Figura 86: Modello di calcolo “di taratura” – Vista 3D con bielle di interazione

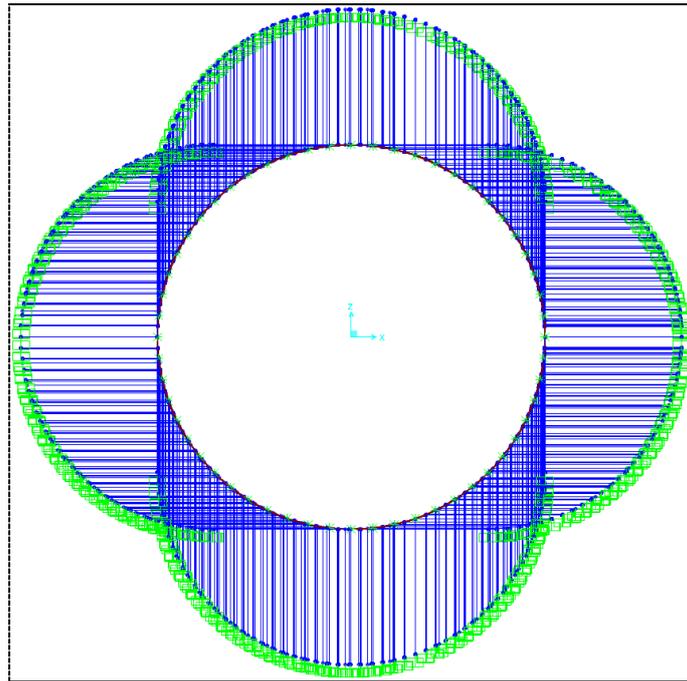


Figura 87: Modello di calcolo “di taratura” – Vista piano XZ con bielle di interazione

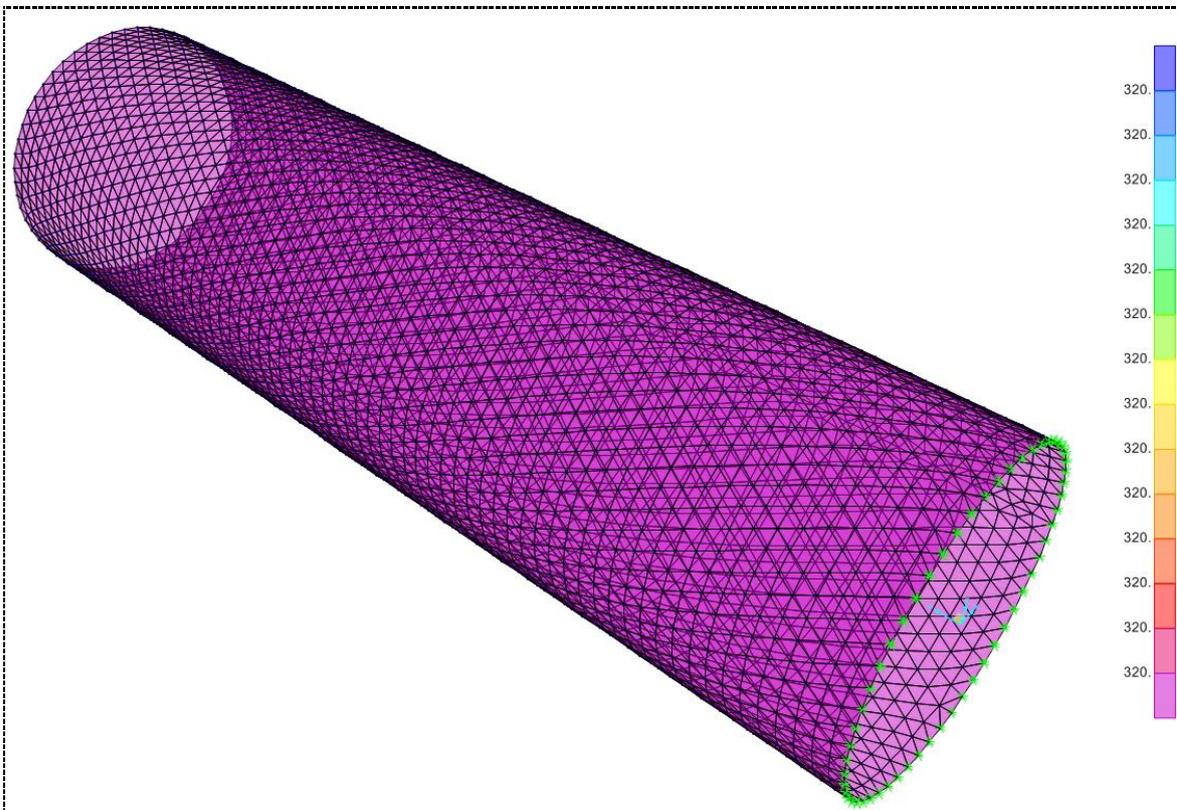


Figura 88: Modello di calcolo “di taratura” – Carico radiale

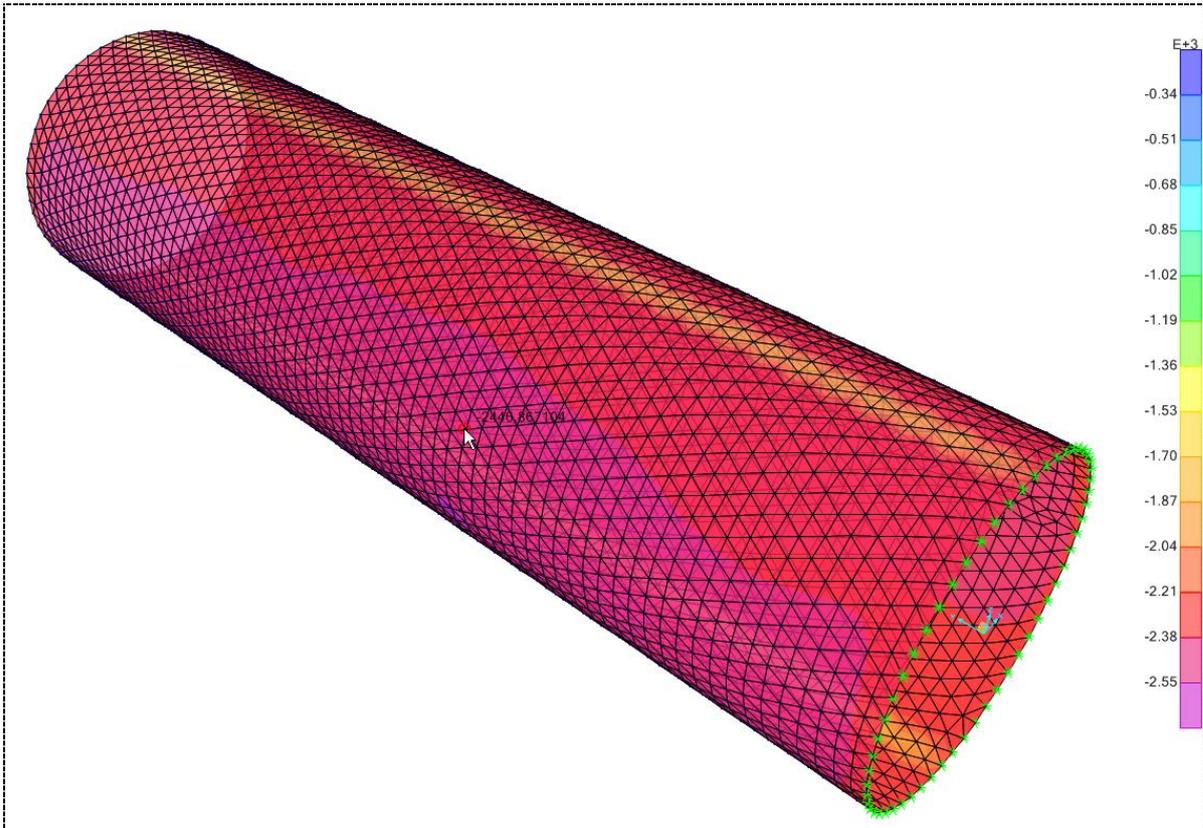


Figura 89: Modello di calcolo “di taratura” – Azione circonferenziale

Come visibile dall'immagine, l'azione circonferenziale si attesta intorno ai 2400 kN/m di compressione.

11.5.2. Modello “di progetto”

Il modello “di progetto” riporta gli elementi di rinforzo previsti per far fronte allo stato tensionale localizzato nelle zone di innesto. A tale geometria è stato applicato il carico radiale di 320 kN/mq ricavato in precedenza con il modello di taratura, oltre al peso proprio delle strutture valutato direttamente dal programma.

Si riporta lo stato tensionale in corrispondenza delle zone dell’innesto per il bypass carrabile e per la associata nicchia SOS.

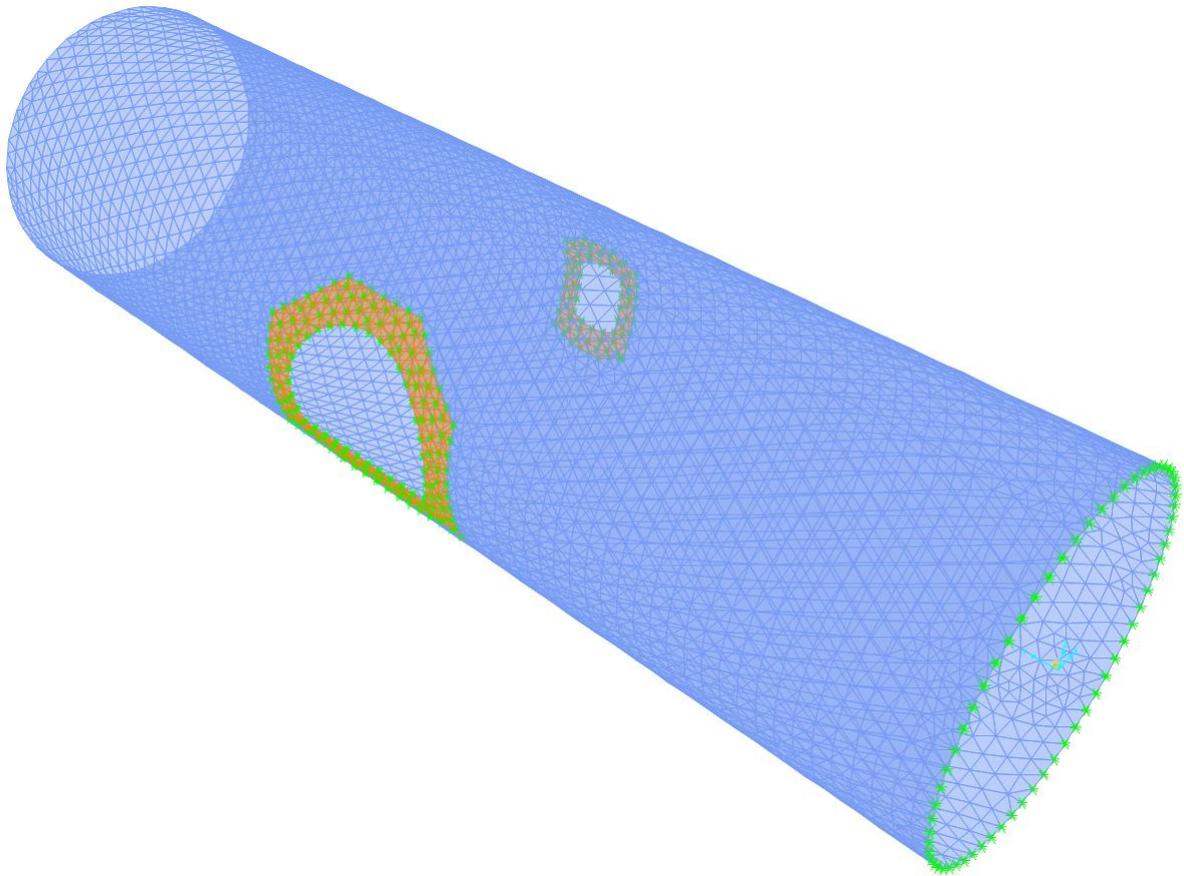


Figura 90: Modello di calcolo con innesto bypass carrabile e nicchia SOS

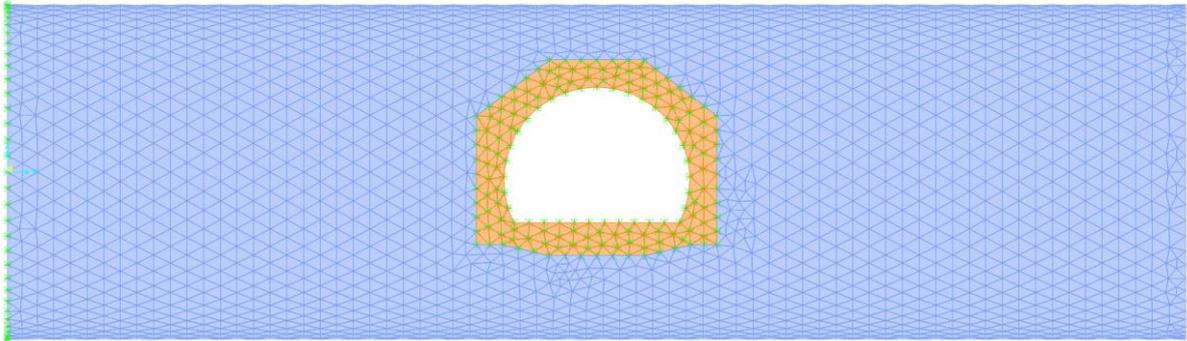


Figura 91: Modello di calcolo– Vista 1 piano YZ

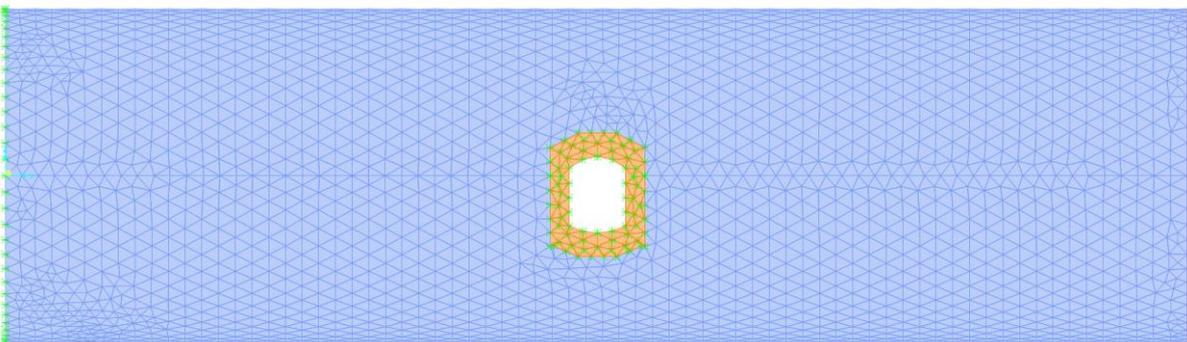


Figura 92: Modello di calcolo– Vista 2 piano YZ

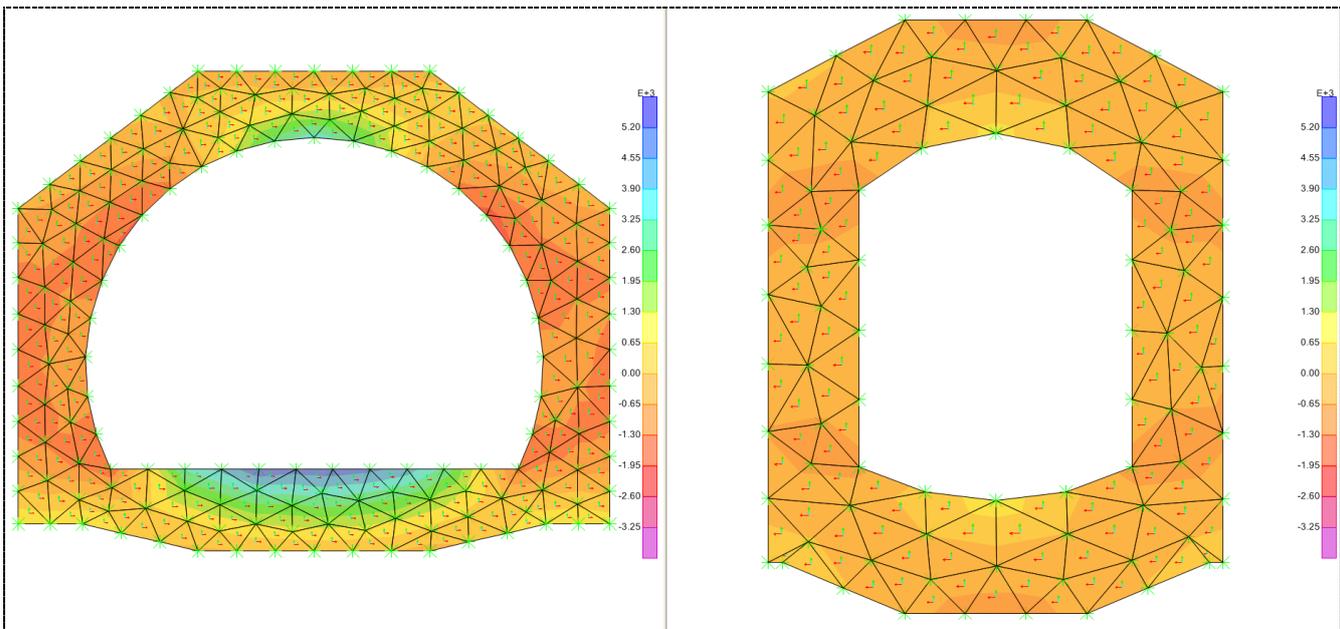


Figura 93: Innesto bypass carrabile e nicchia SOS – Azione F11 [kN/m]

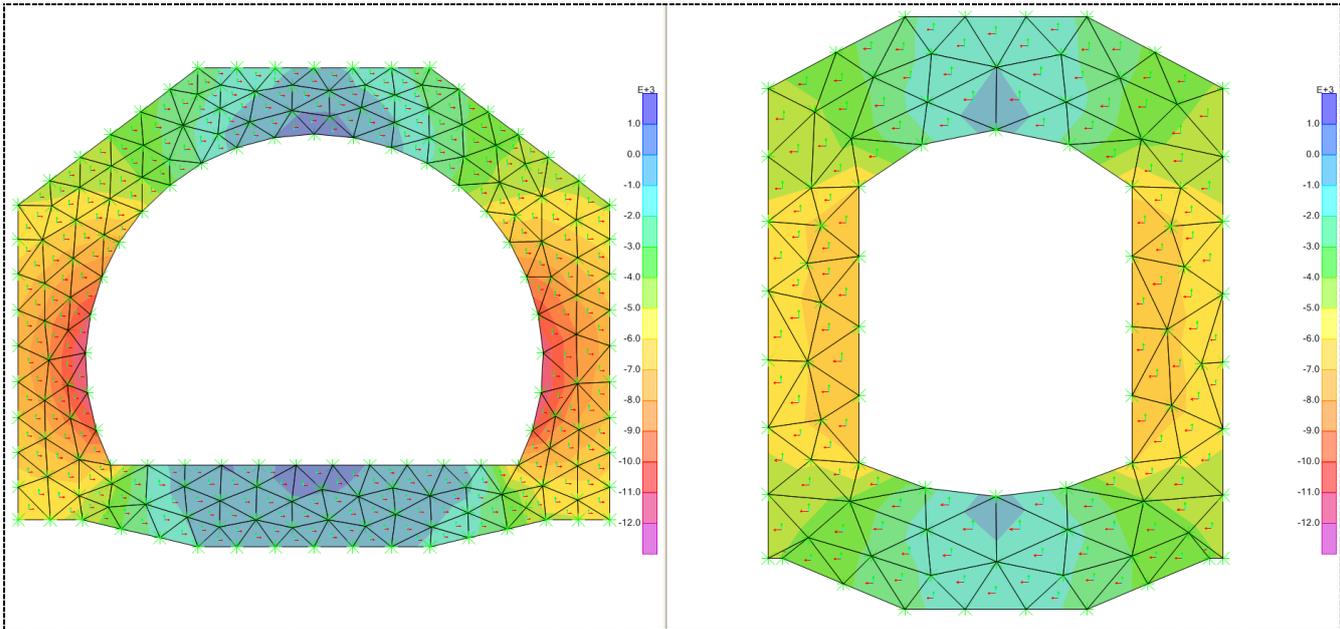


Figura 94: Innesto bypass carrabile e nicchia SOS – Azione F22 [kN/m]

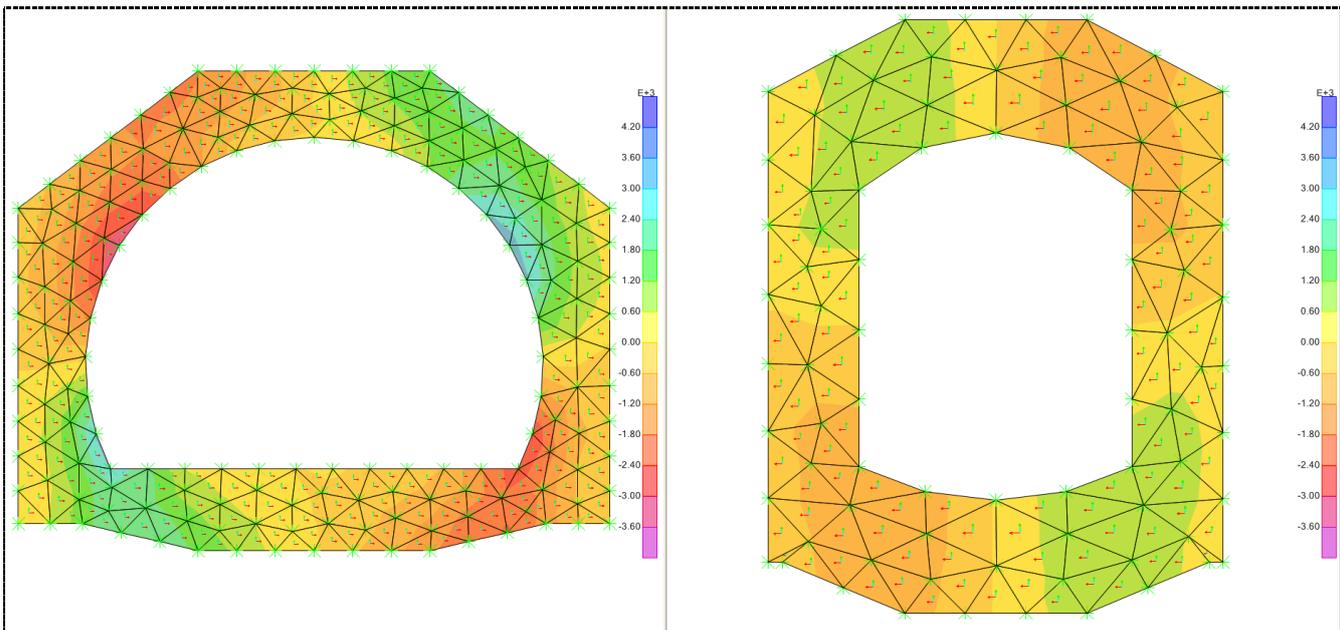


Figura 95: Innesto bypass carrabile e nicchia SOS – Azione F12 [kN/m]

L'azione F12 è utile per la determinazione dell'azione interna di taglio.

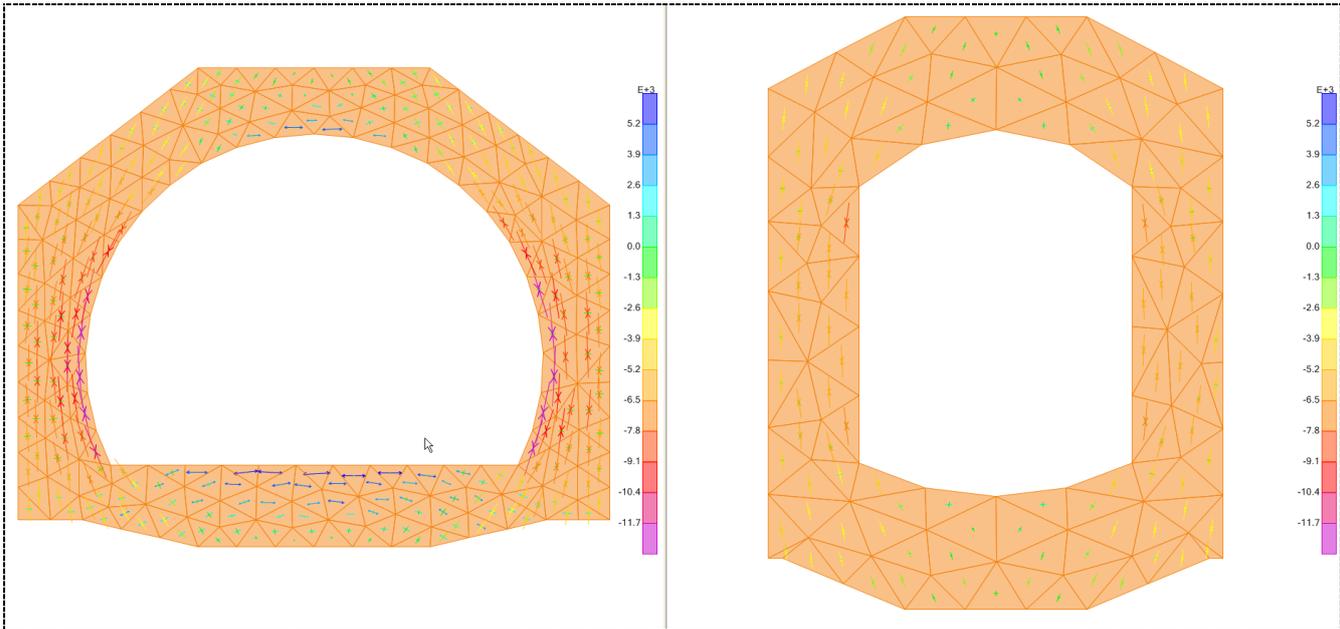


Figura 96: Innesto bypass carrabile e nicchia SOS – Vettori sforzi principali

11.6. BYPASS CARRABILI – ANALISI 2

11.6.1. Modello “di taratura”

Il modello “di taratura” è stato elaborato per ottenere uno stato di compressione circonferenziale nel rivestimento definitivo pari a 6100 kN/m. Tale stato tensionale è stato ottenuto applicando una pressione radiale pari a 850 kN/mq, oltre al peso proprio delle strutture valutato direttamente dal programma.

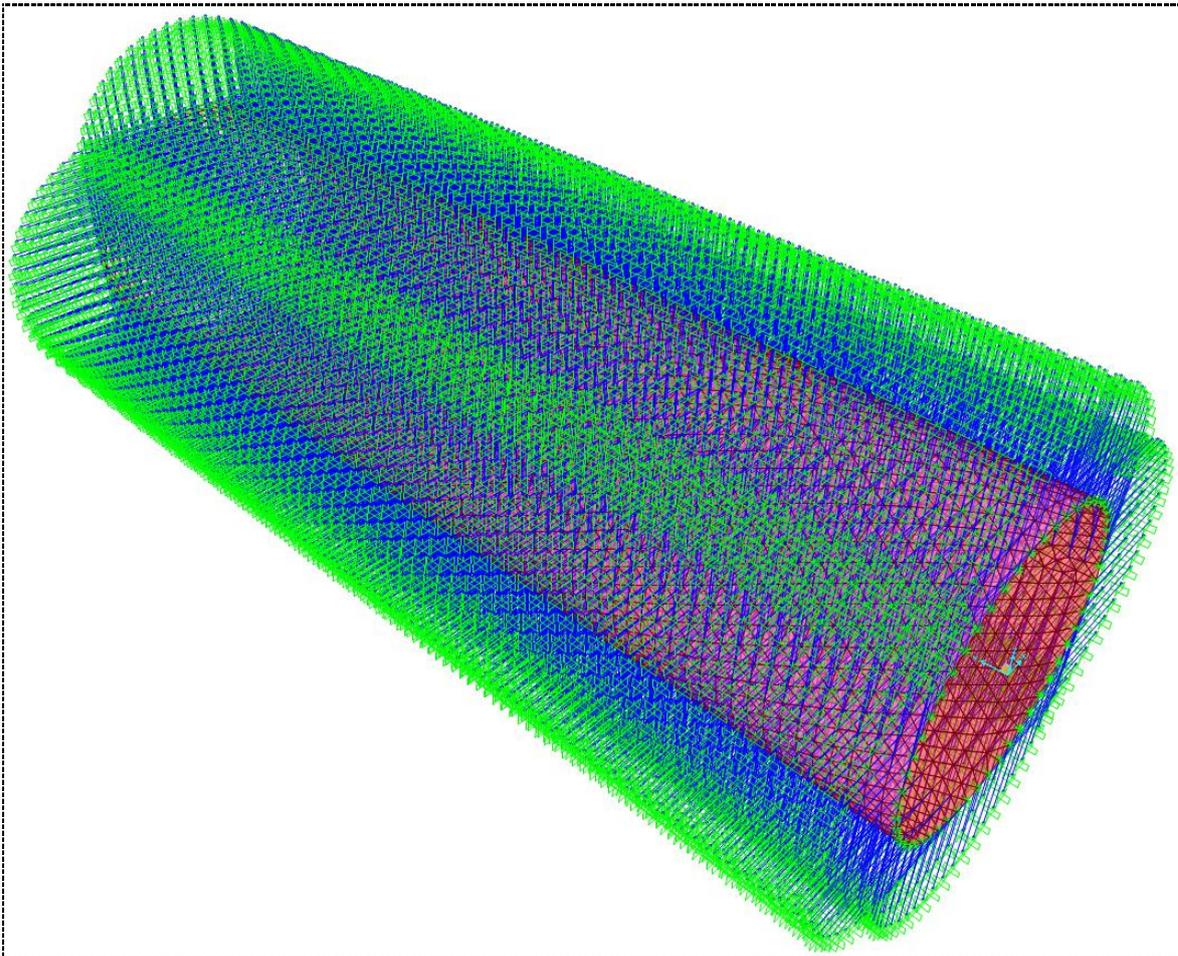


Figura 97: Modello di calcolo “di taratura” – Vista 3D con bielle di interazione

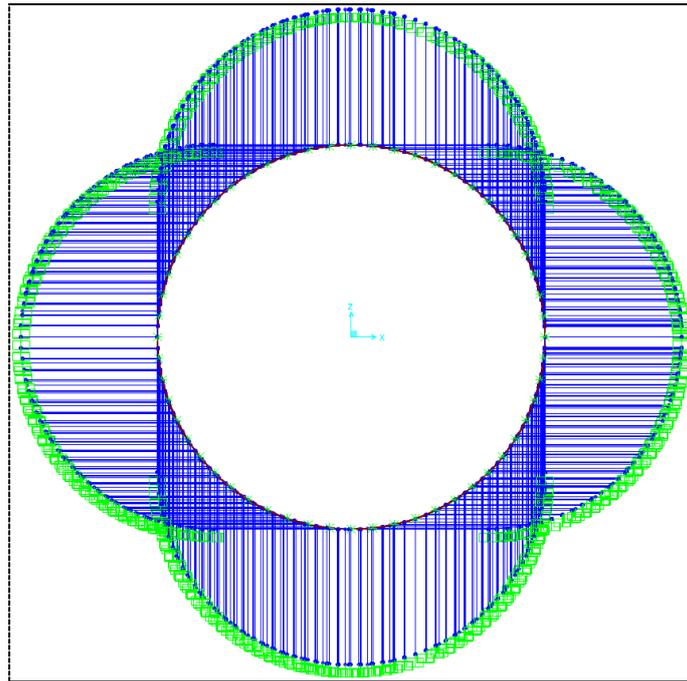


Figura 98: Modello di calcolo “di taratura” – Vista piano XZ con bielle di interazione

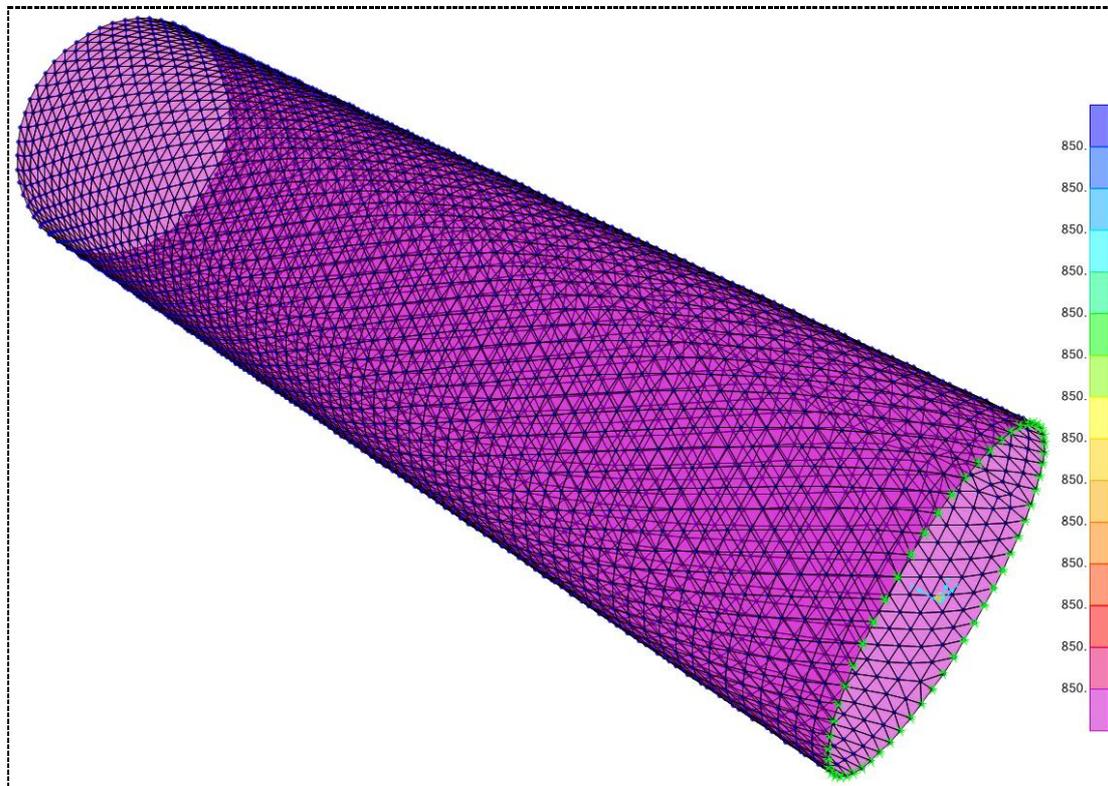


Figura 99: Modello di calcolo “di taratura” – Carico radiale

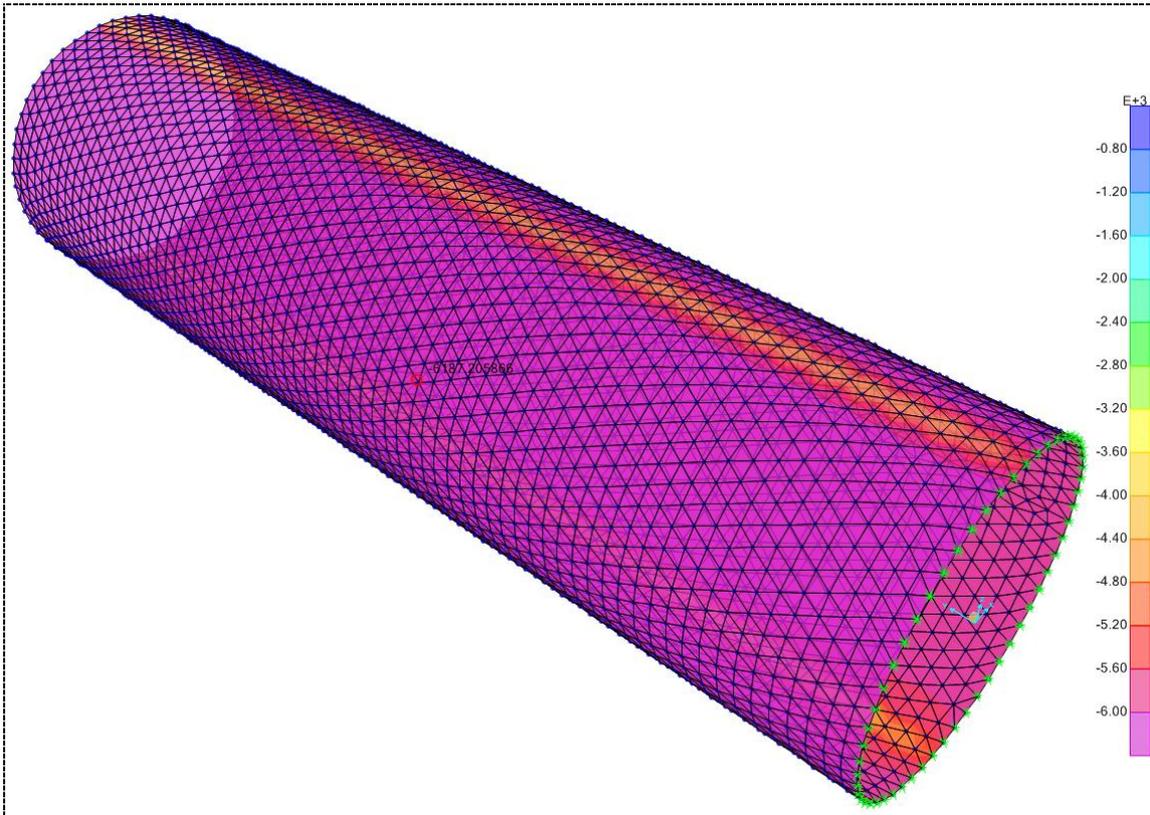


Figura 100: Modello di calcolo “di taratura” – Azione circonferenziale

Come visibile dall'immagine, l'azione circonferenziale si attesta intorno ai 6100 kN/m di compressione.

11.6.2. Modello “di progetto”

Il modello “di progetto” riporta gli elementi di rinforzo previsti per far fronte allo stato tensionale localizzato nelle zone di innesto. A tale geometria è stato applicato il carico radiale di 850 kN/mq ricavato in precedenza con il modello di taratura, oltre al peso proprio delle strutture valutato direttamente dal programma.

Si riporta lo stato tensionale in corrispondenza delle zone dell’innesto per il bypass carrabile e per la associata nicchia SOS.

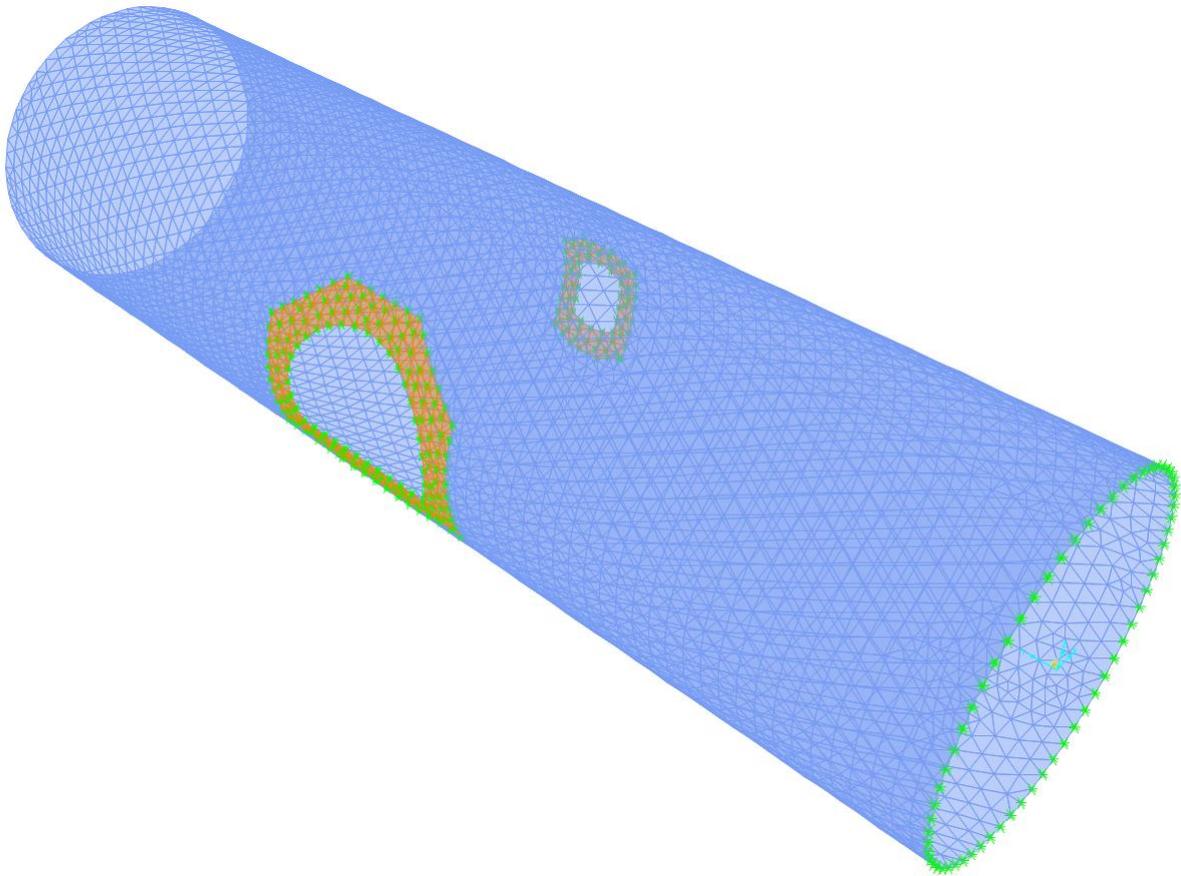


Figura 101: Modello di calcolo con innesto bypass carrabile e nicchia SOS

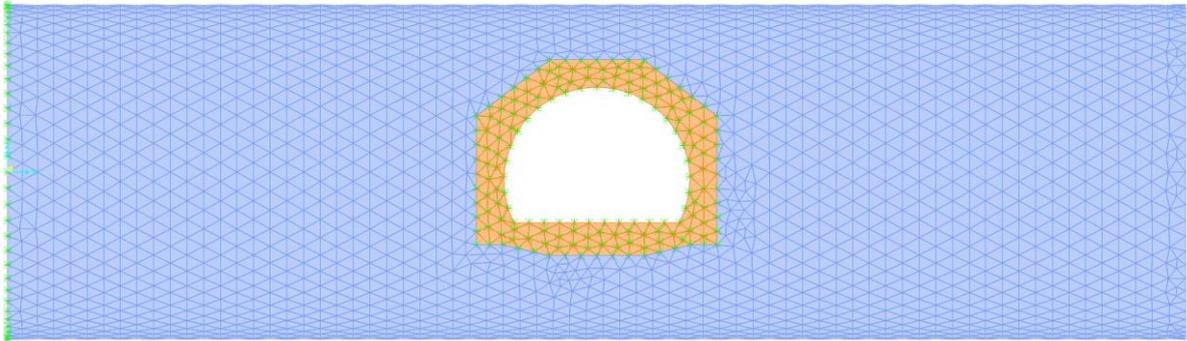


Figura 102: Modello di calcolo– Vista 1 piano YZ

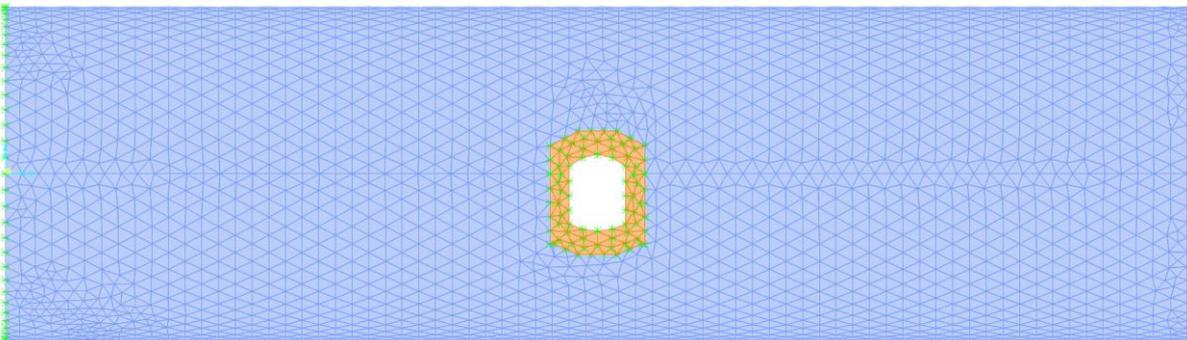


Figura 103: Modello di calcolo– Vista 2 piano YZ

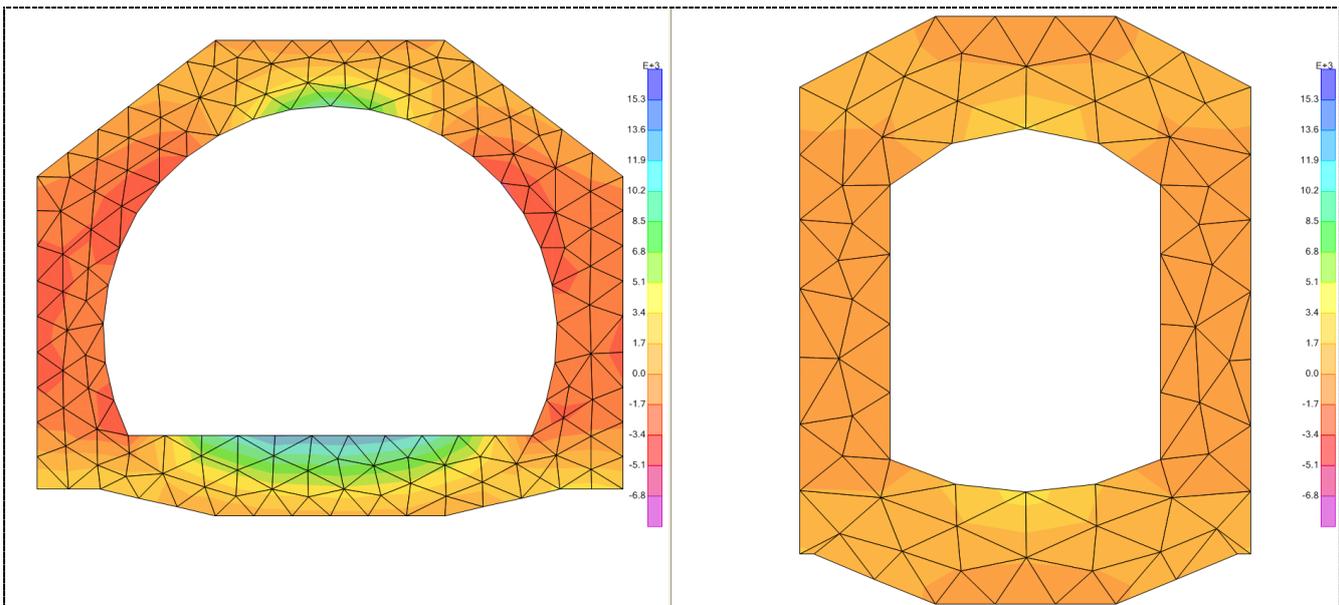


Figura 104: Innesto bypass carrabile e nicchia SOS – Azione F11 [kN/m]

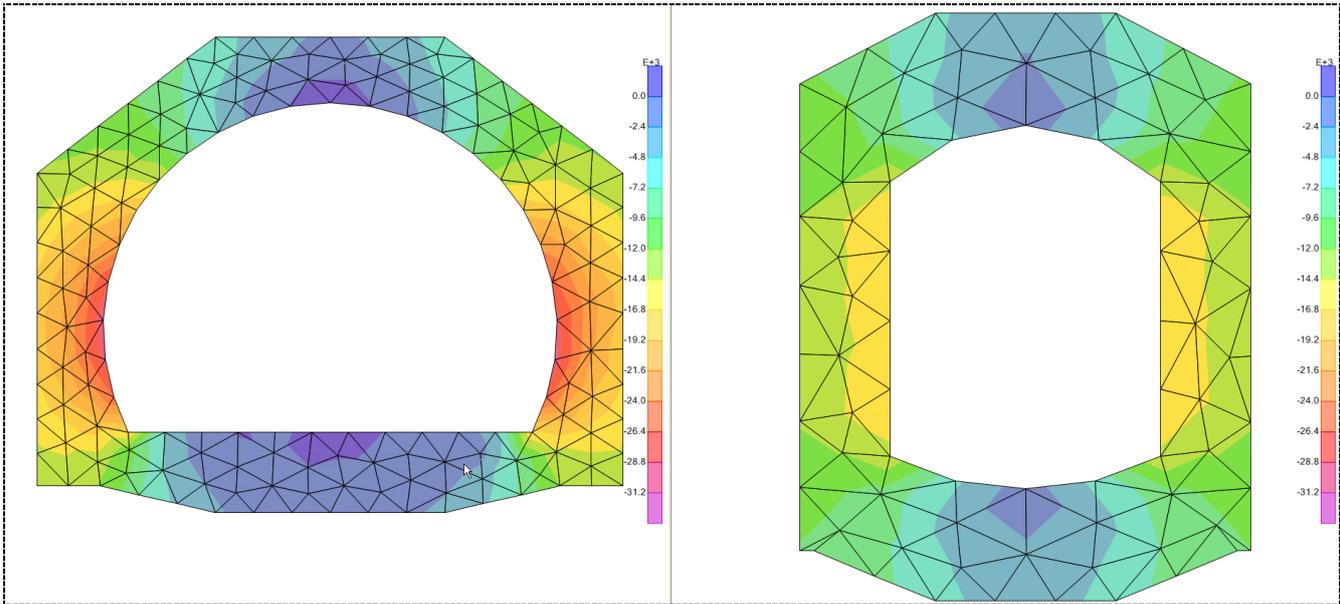


Figura 105: Innesto bypass carrabile e nicchia SOS – Azione F22 [kN/m]

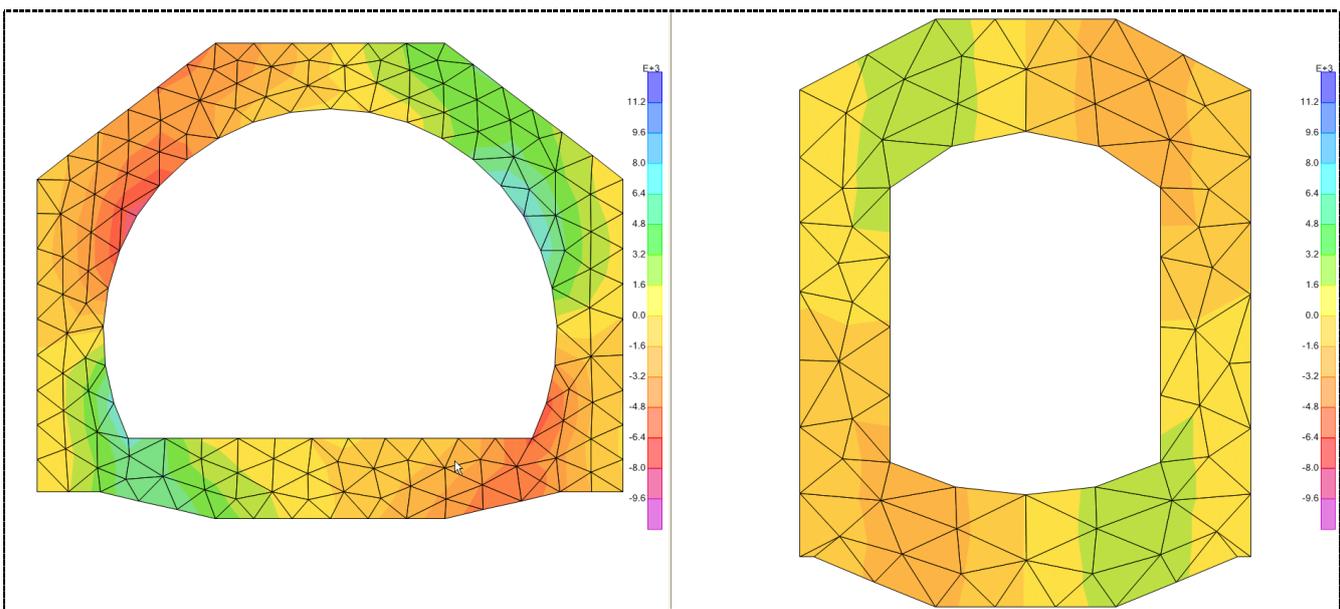


Figura 106: Innesto bypass carrabile e nicchia SOS – Azione F12 [kN/m]

L'azione F12 è utile per la determinazione dell'azione interna di taglio.

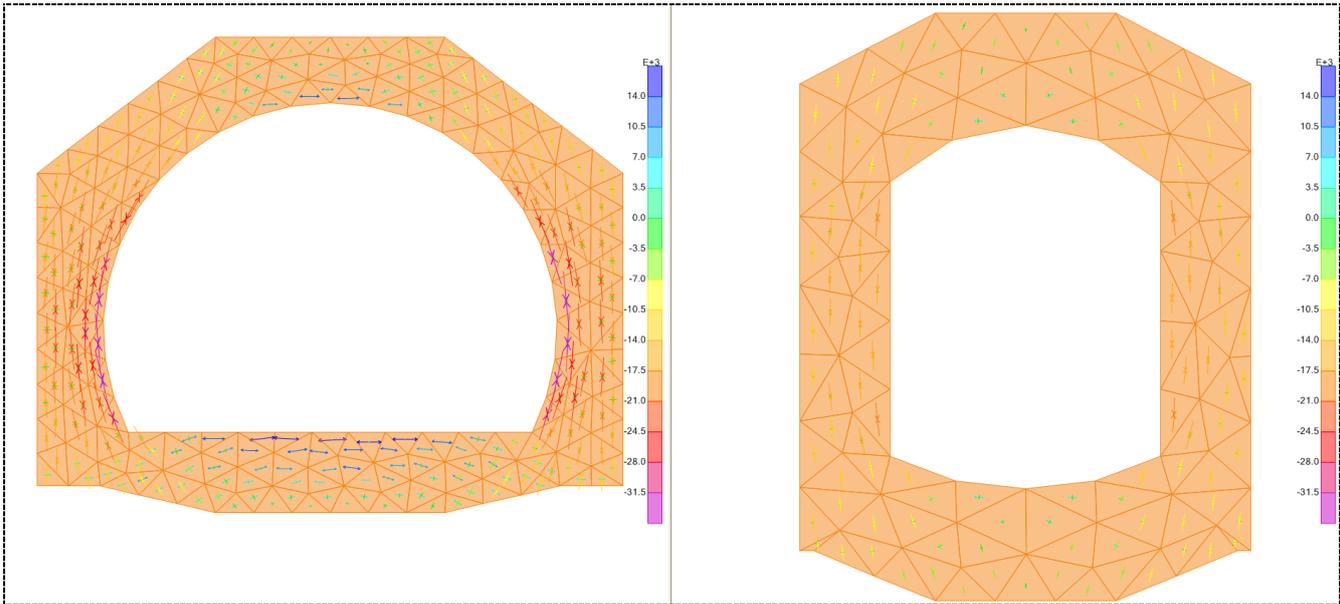


Figura 107: Innesto bypass carrabile e nicchia SOS – Vettori sforzi principali

11.7. BYPASS PEDONALI – ANALISI 1

11.7.1. Modello “di taratura”

Il modello “di taratura” è stato elaborato per ottenere uno stato di compressione circonferenziale nel rivestimento definitivo pari a 2400 kN/m. Tale stato tensionale è stato ottenuto applicando una pressione radiale pari a 320 kN/mq, oltre al peso proprio delle strutture valutato direttamente dal programma.

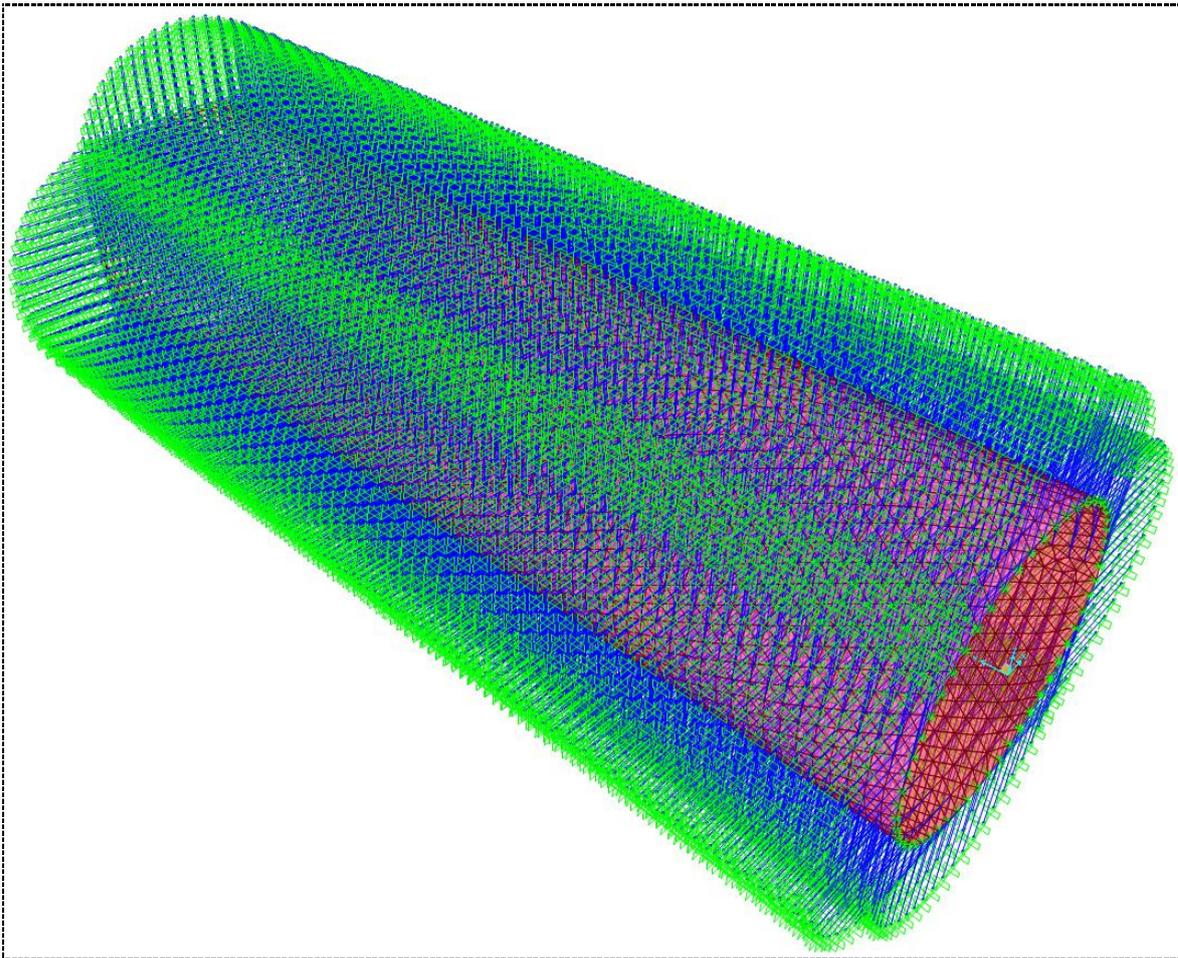


Figura 108: Modello di calcolo “di taratura” – Vista 3D con bielle di interazione

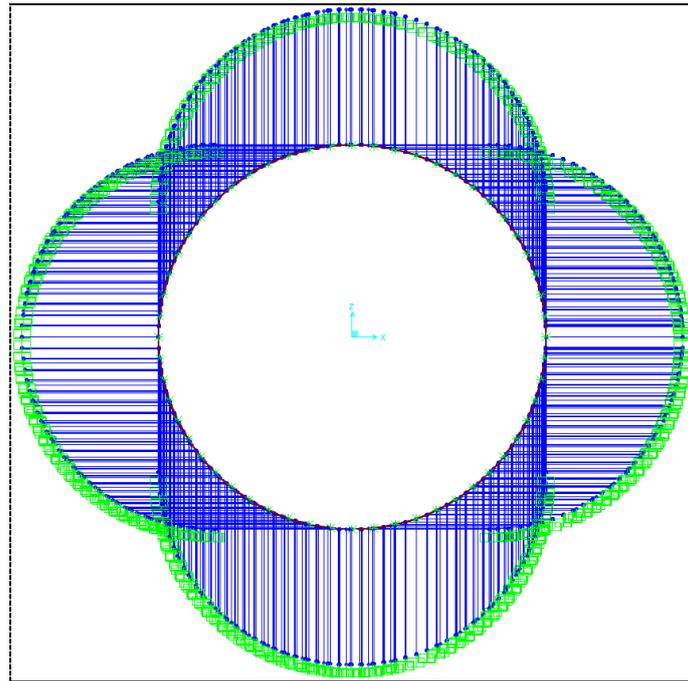


Figura 109: Modello di calcolo “di taratura” – Vista piano XZ con bielle di interazione

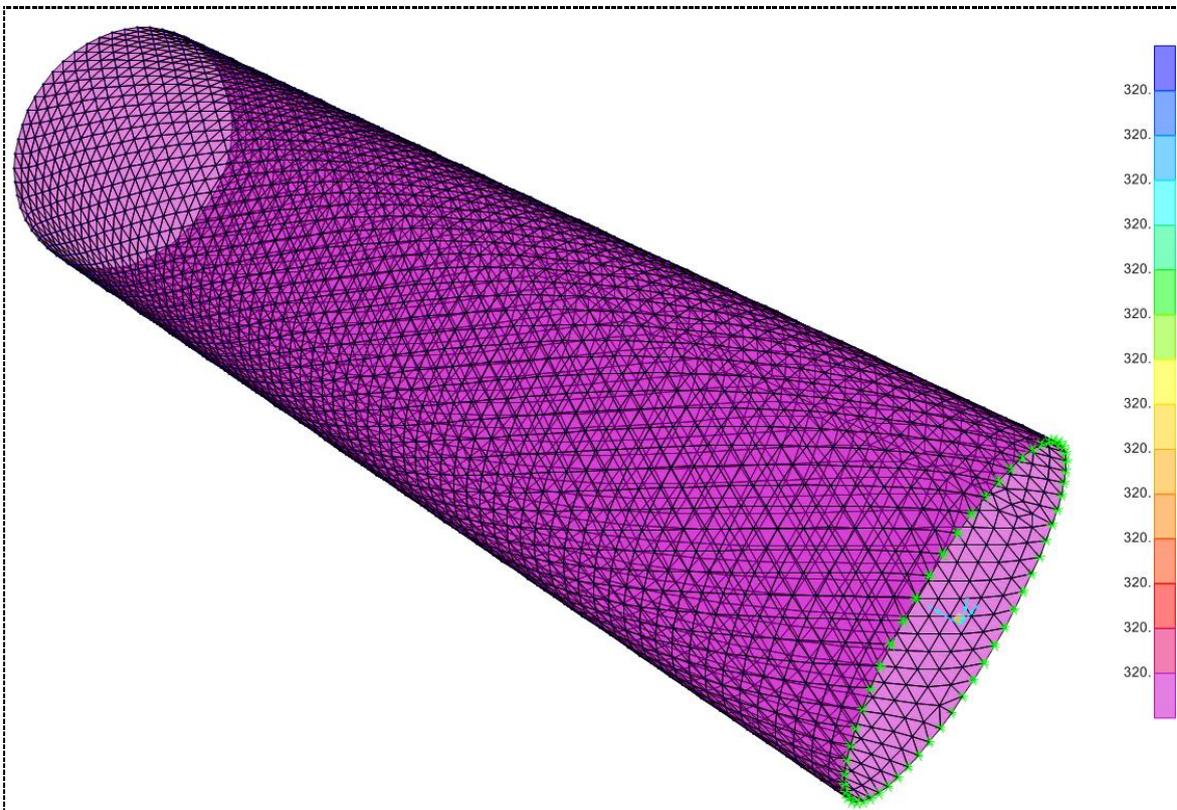


Figura 110: Modello di calcolo “di taratura” – Carico radiale

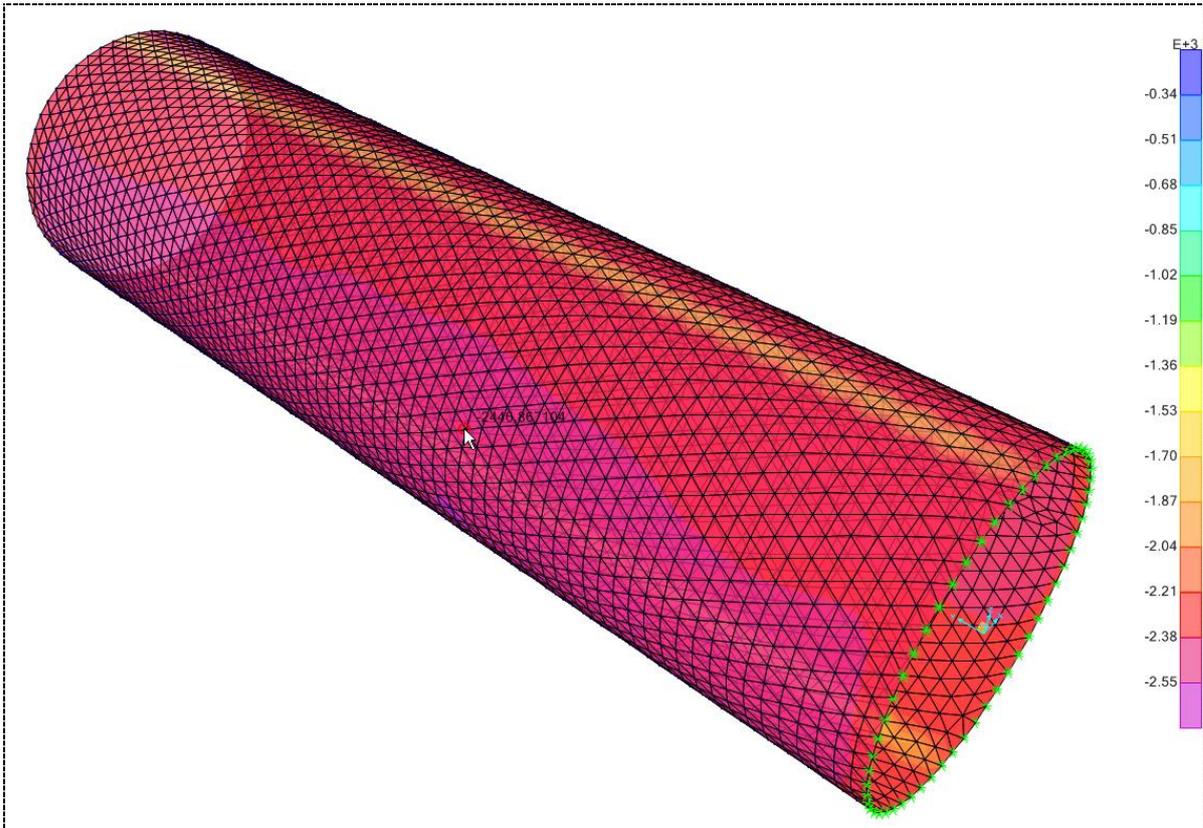


Figura 111: Modello di calcolo “di taratura” – Azione circonferenziale

Come visibile dall'immagine, l'azione circonferenziale si attesta intorno ai 2400 kN/m di compressione.

11.7.2. Modello “di progetto”

Il modello “di progetto” riporta gli elementi di rinforzo previsti per far fronte allo stato tensionale localizzato nelle zone di innesto. A tale geometria è stato applicato il carico radiale di 320 kN/mq ricavato in precedenza con il modello di taratura, oltre al peso proprio delle strutture valutato direttamente dal programma.

Si riporta lo stato tensionale in corrispondenza delle zone dell’innesto per il bypass pedonale e per la associata nicchia SOS.

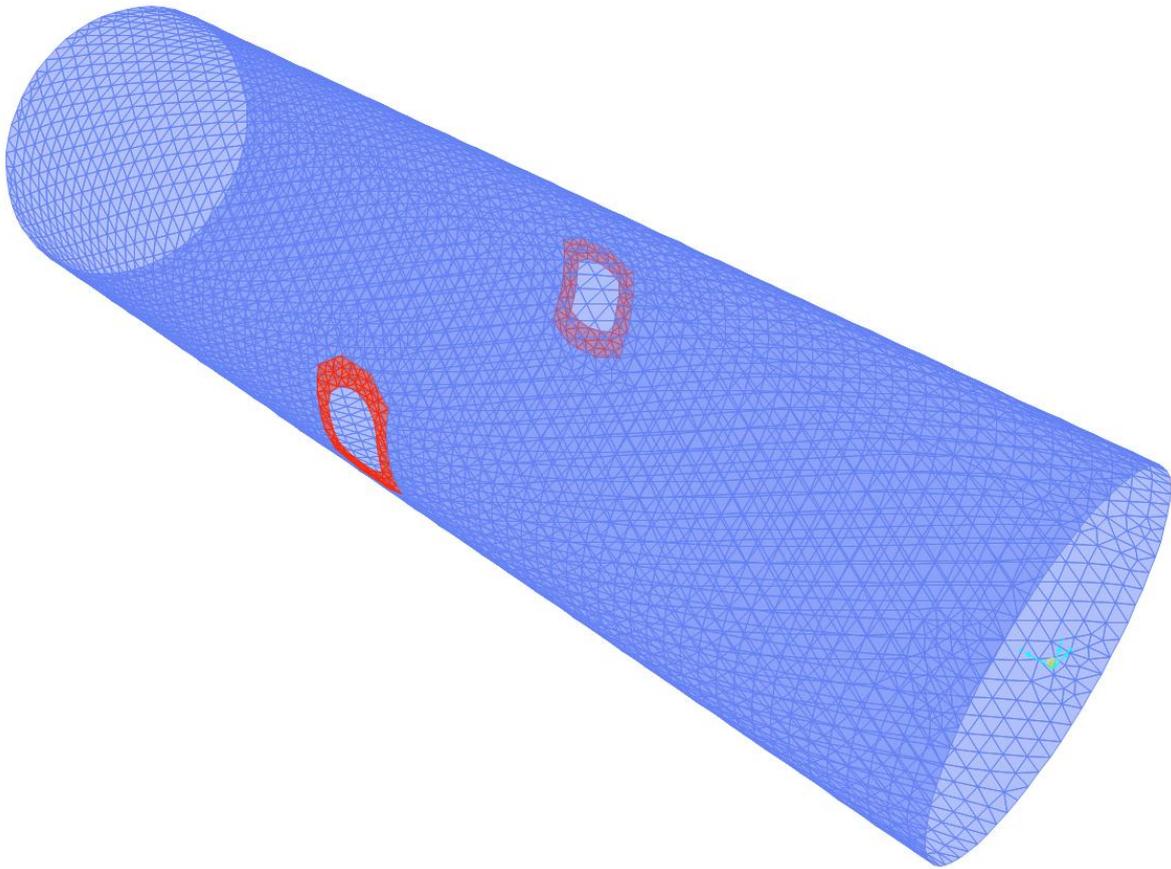


Figura 112: Modello di calcolo con innesto bypass pedonale e nicchia SOS

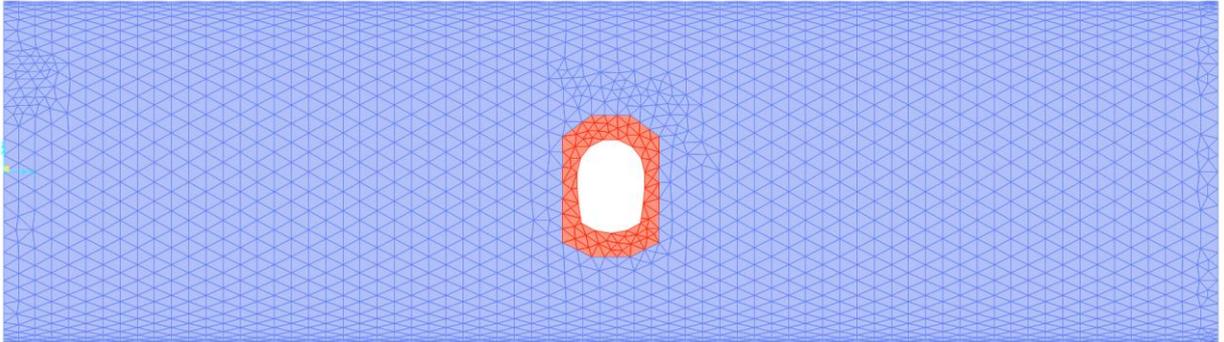


Figura 113: Modello di calcolo– Vista 1 piano YZ

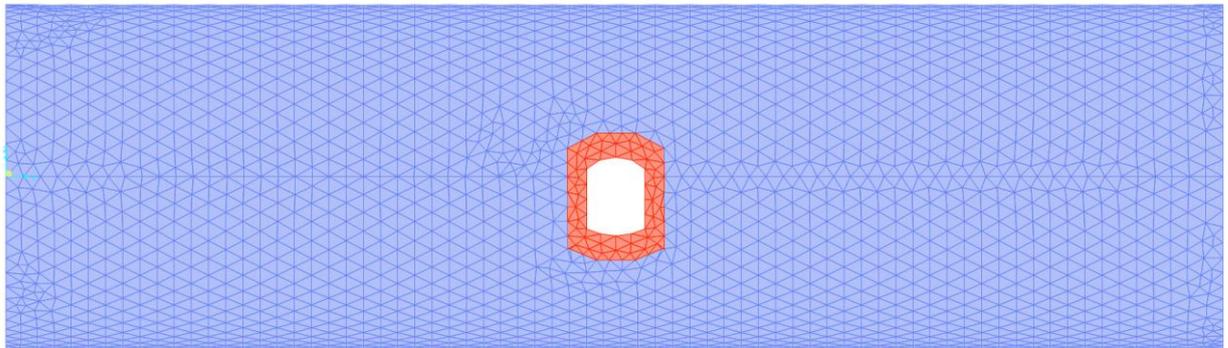


Figura 114: Modello di calcolo– Vista 2 piano YZ

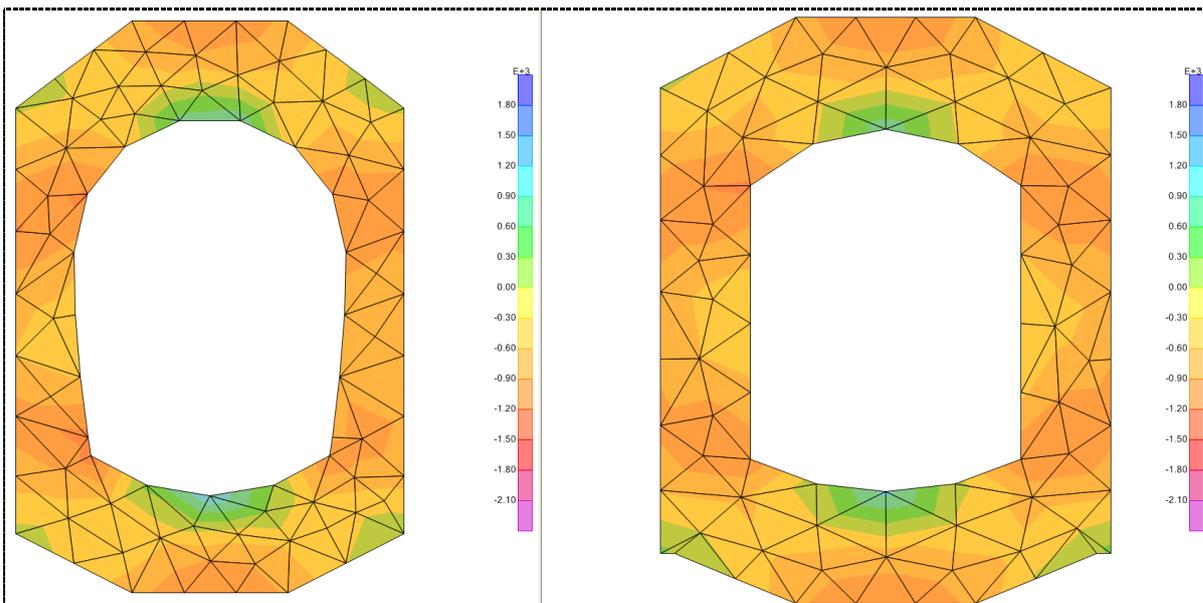


Figura 115: Innesto bypass pedonale e nicchia SOS – Azione F11 [kN/m]

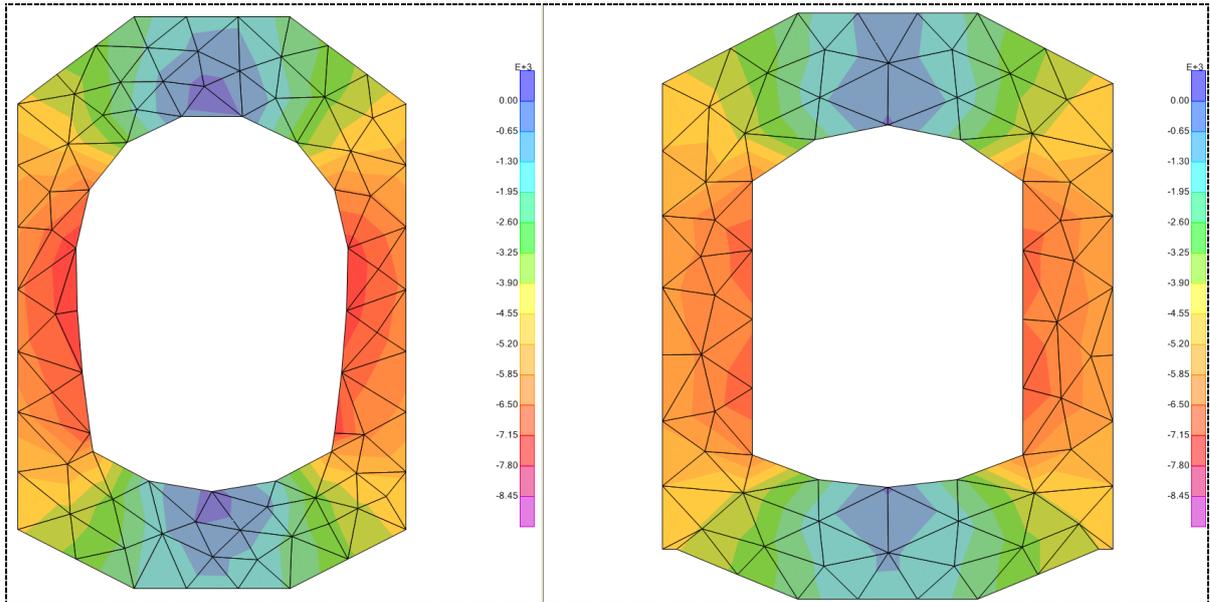


Figura 116: Innesto bypass pedonale e nicchia SOS – Azione F22 [kN/m]

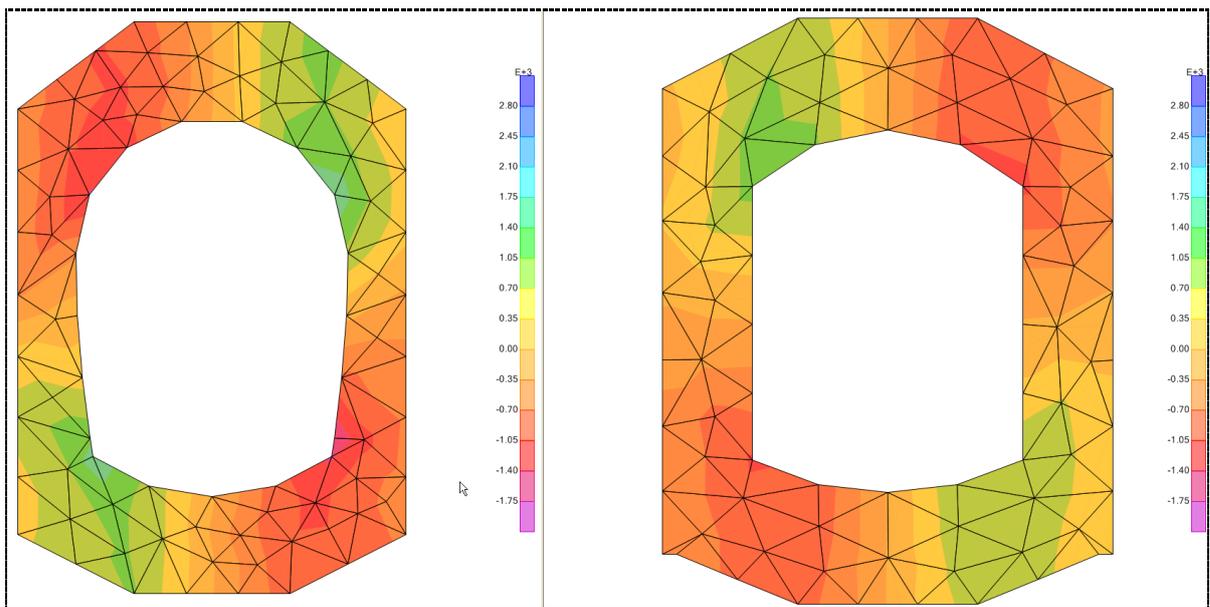


Figura 117: Innesto bypass pedonale e nicchia SOS – Azione F12 [kN/m]

L'azione F12 è utile per la determinazione dell'azione interna di taglio.

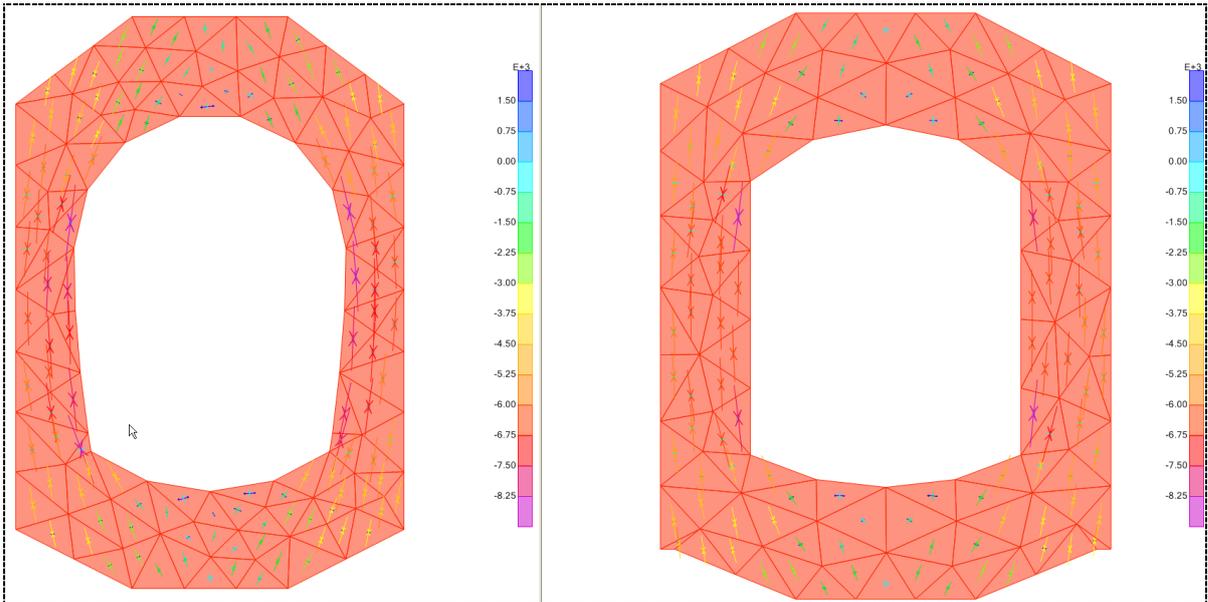


Figura 118: Innesto bypass pedonale e nicchia SOS – Vettori sforzi principali

11.8. BYPASS PEDONALI – ANALISI 2

11.8.1. Modello “di taratura”

Il modello “di taratura” è stato elaborato per ottenere uno stato di compressione circonferenziale nel rivestimento definitivo pari a 7200 kN/m. Tale stato tensionale è stato ottenuto applicando una pressione radiale pari a 1000 kN/mq, oltre al peso proprio delle strutture valutato direttamente dal programma.

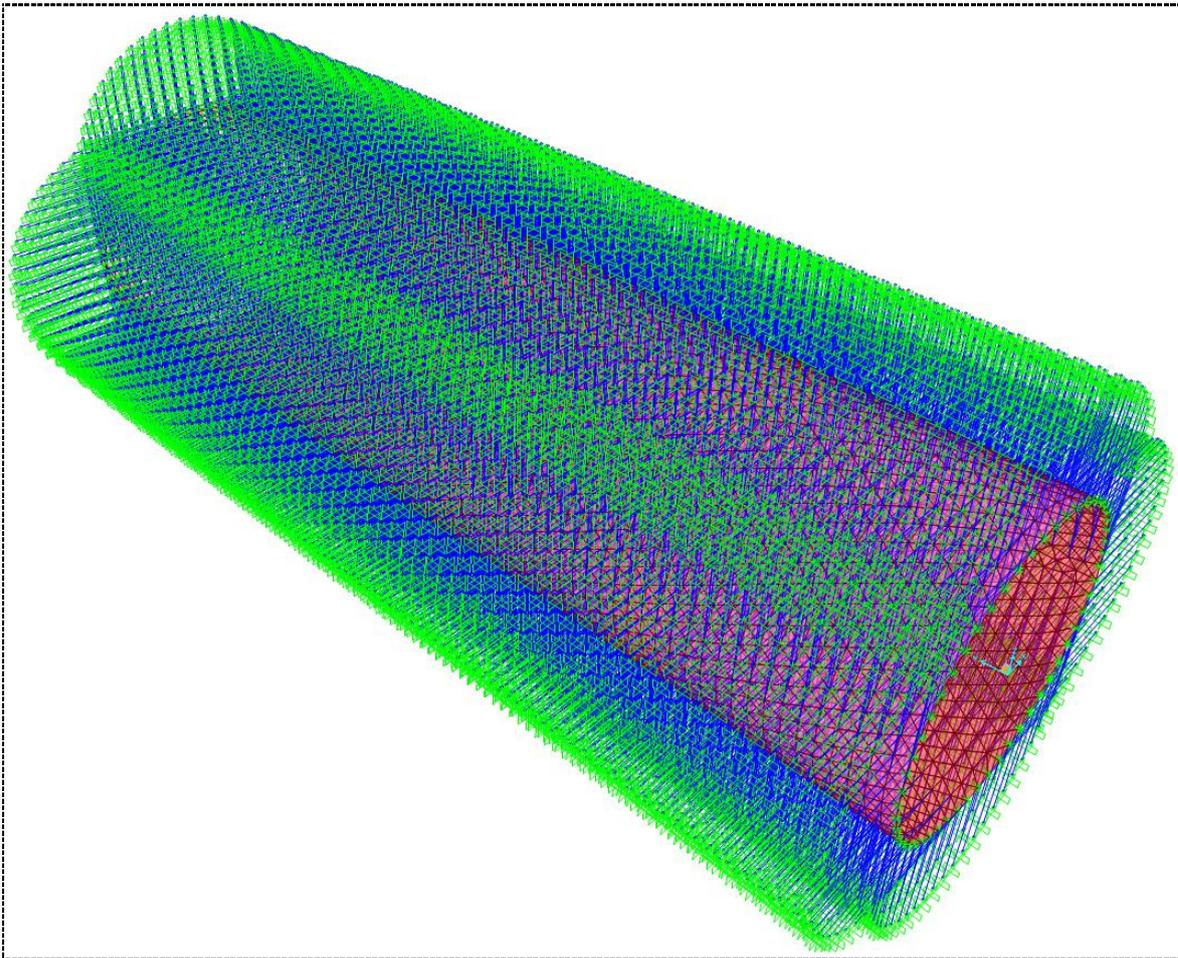


Figura 119: Modello di calcolo “di taratura” – Vista 3D con bielle di interazione

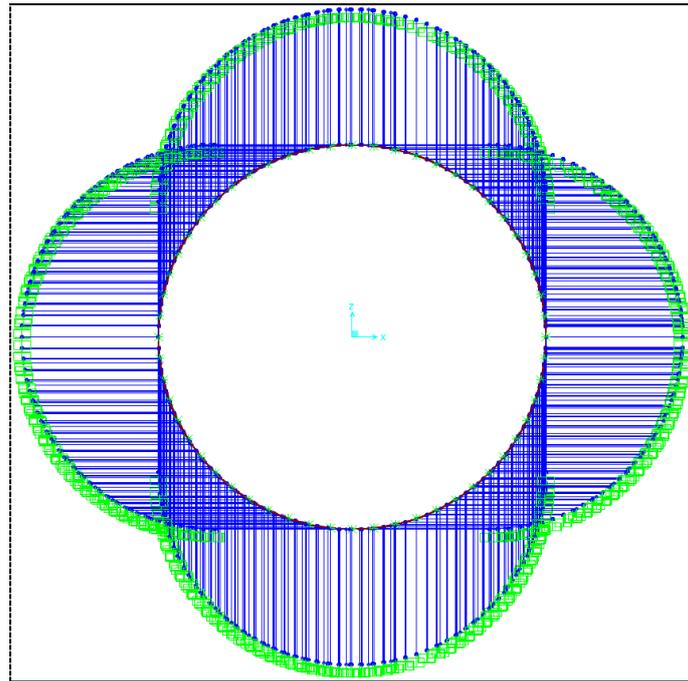


Figura 120: Modello di calcolo “di taratura” – Vista piano XZ con bielle di interazione

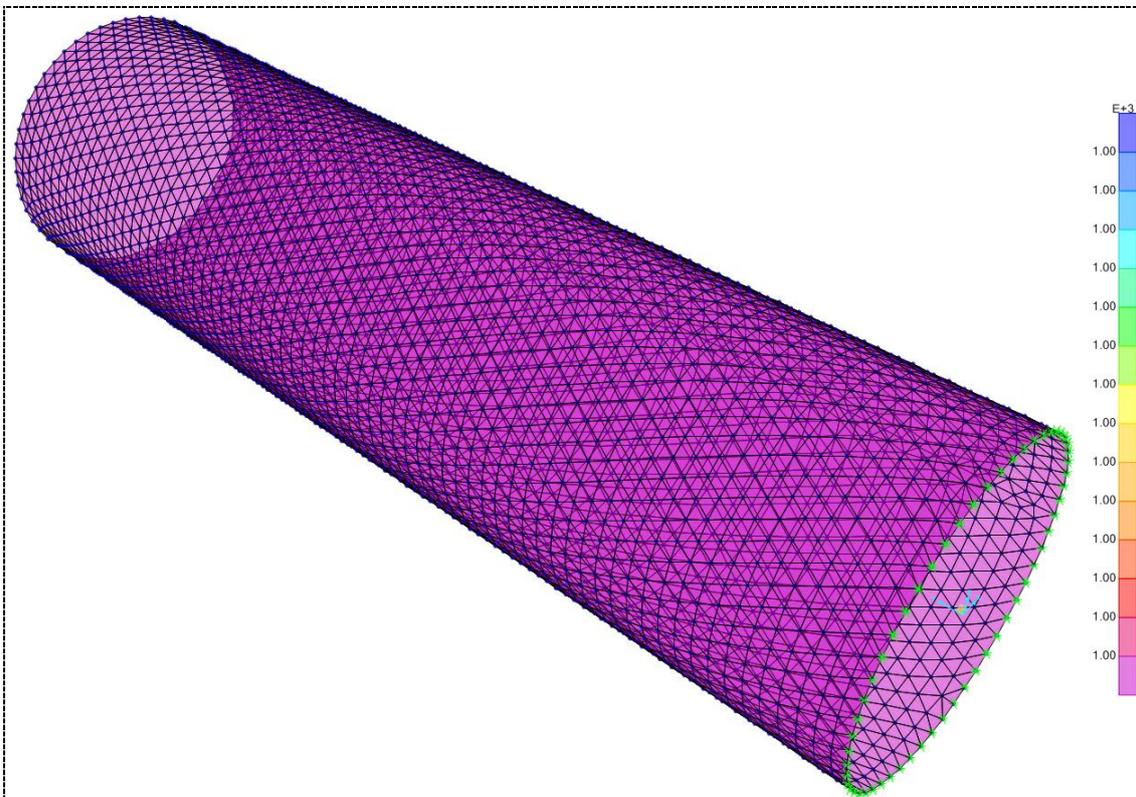


Figura 121: Modello di calcolo “di taratura” – Carico radiale

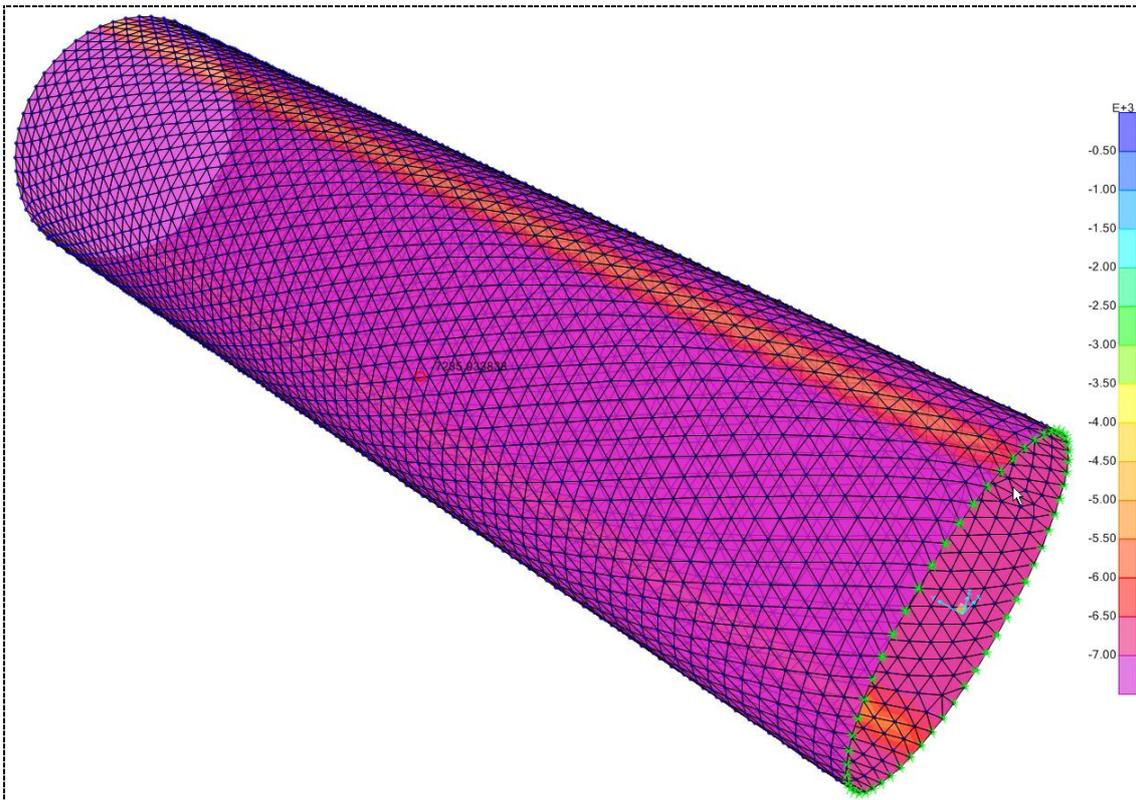


Figura 122: Modello di calcolo “di taratura” – Azione circonferenziale

Come visibile dall'immagine, l'azione circonferenziale si attesta intorno ai 7200 kN/m di compressione.

11.8.2. Modello “di progetto”

Il modello “di progetto” riporta gli elementi di rinforzo previsti per far fronte allo stato tensionale localizzato nelle zone di innesto. A tale geometria è stato applicato il carico radiale di 1000 kN/mq ricavato in precedenza con il modello di taratura, oltre al peso proprio delle strutture valutato direttamente dal programma.

Si riporta lo stato tensionale in corrispondenza delle zone dell’innesto per il bypass pedonale e per la associata nicchia SOS.

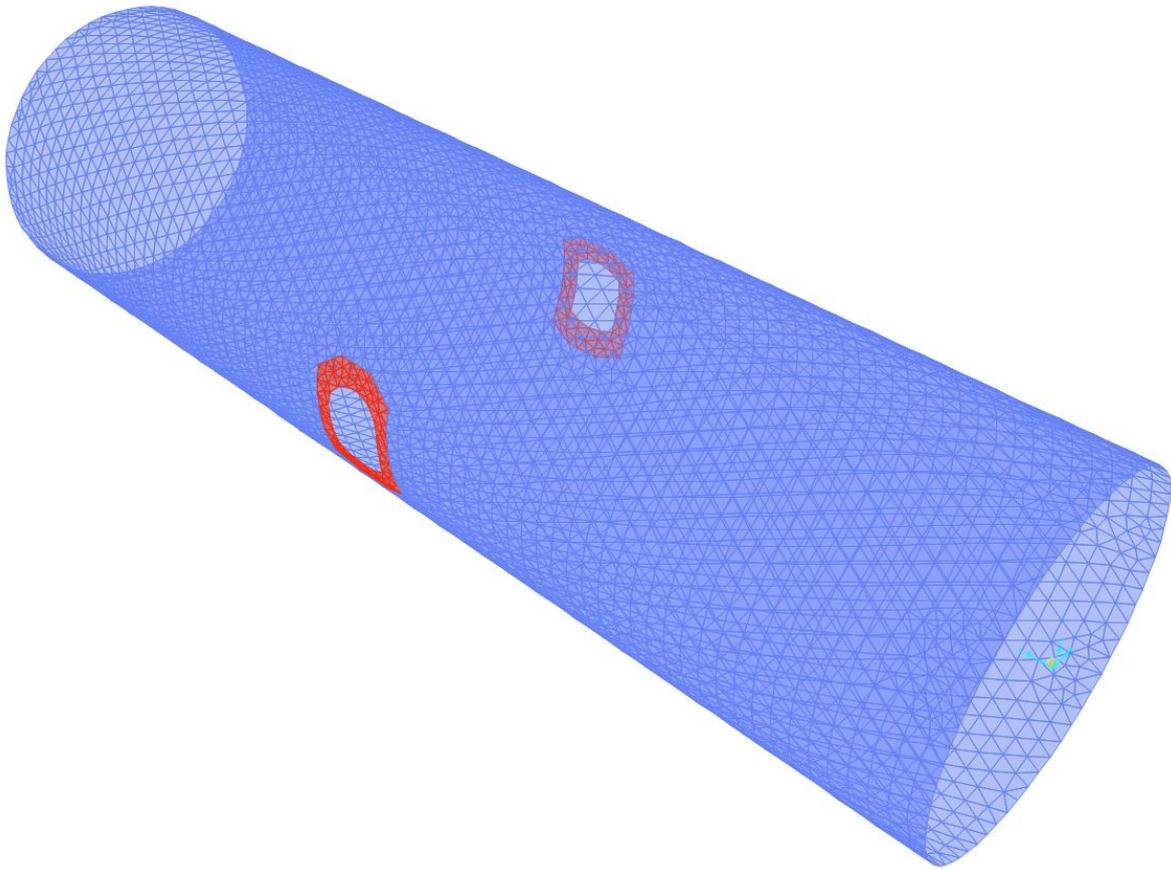


Figura 123: Modello di calcolo con innesto bypass pedonale e nicchia SOS

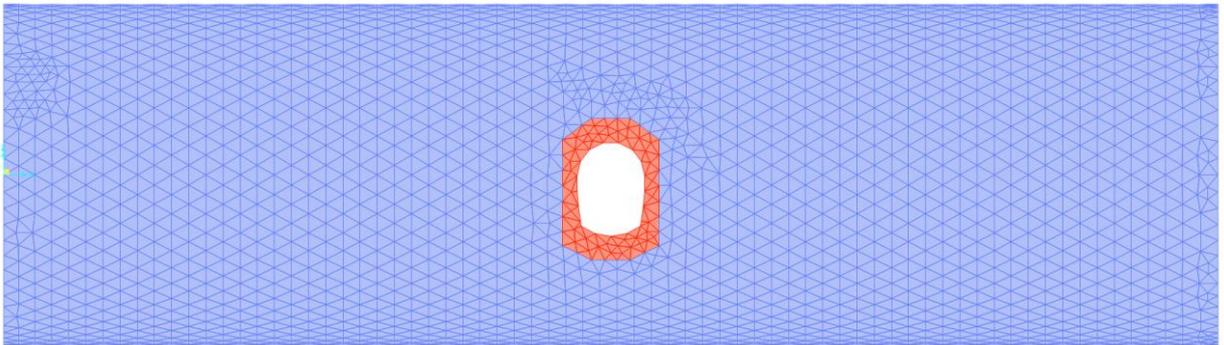


Figura 124: Modello di calcolo– Vista 1 piano YZ

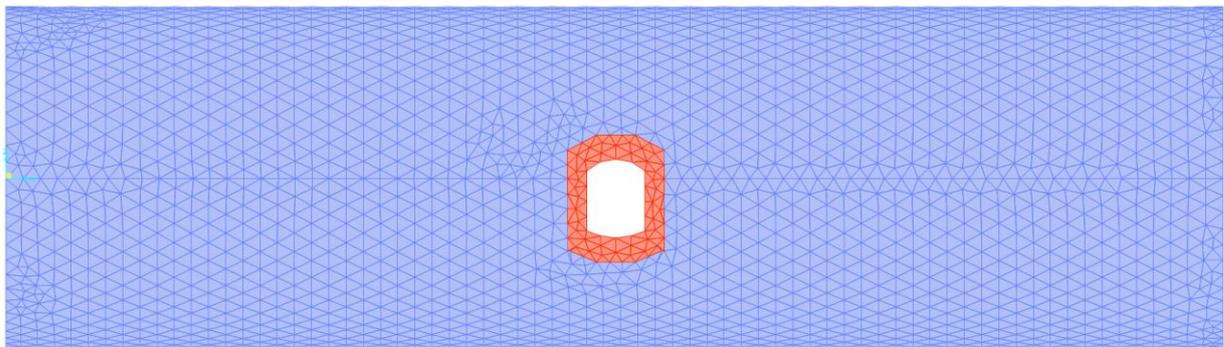


Figura 125: Modello di calcolo– Vista 2 piano YZ

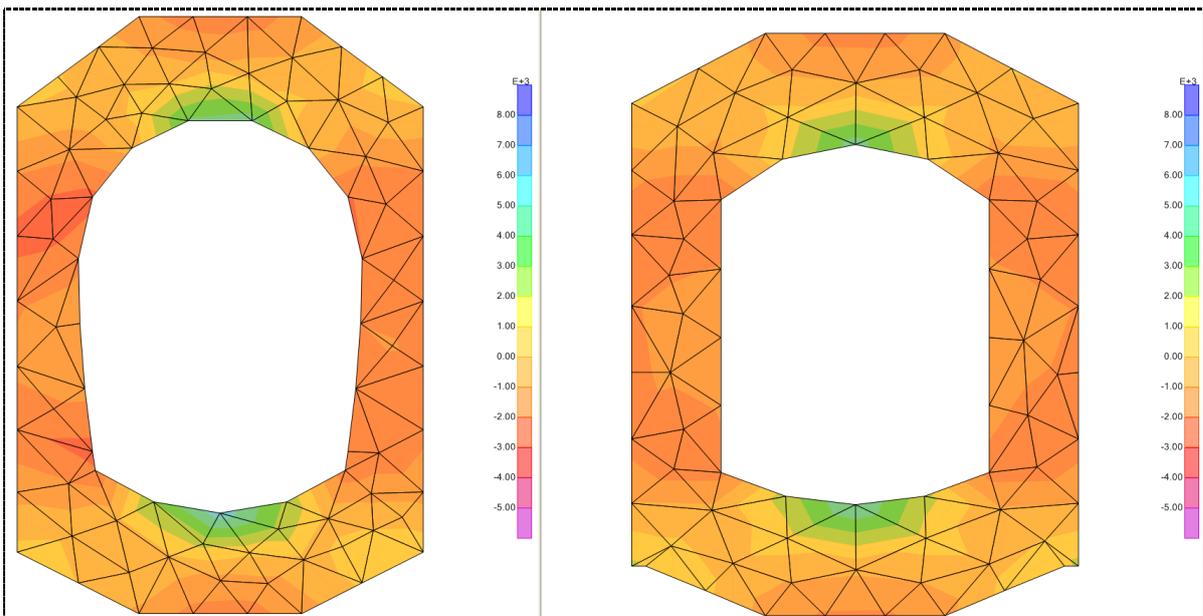


Figura 126: Innesto bypass pedonale e nicchia SOS – Azione F11 [kN/m]

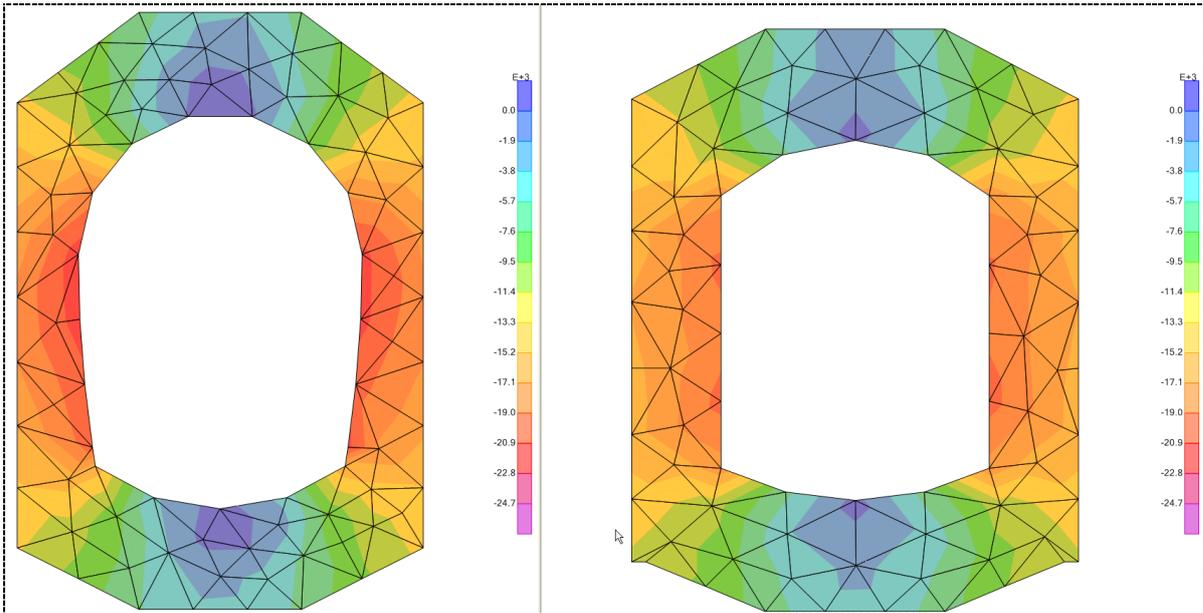


Figura 127: Innesto bypass pedonale e nicchia SOS – Azione F22 [kN/m]

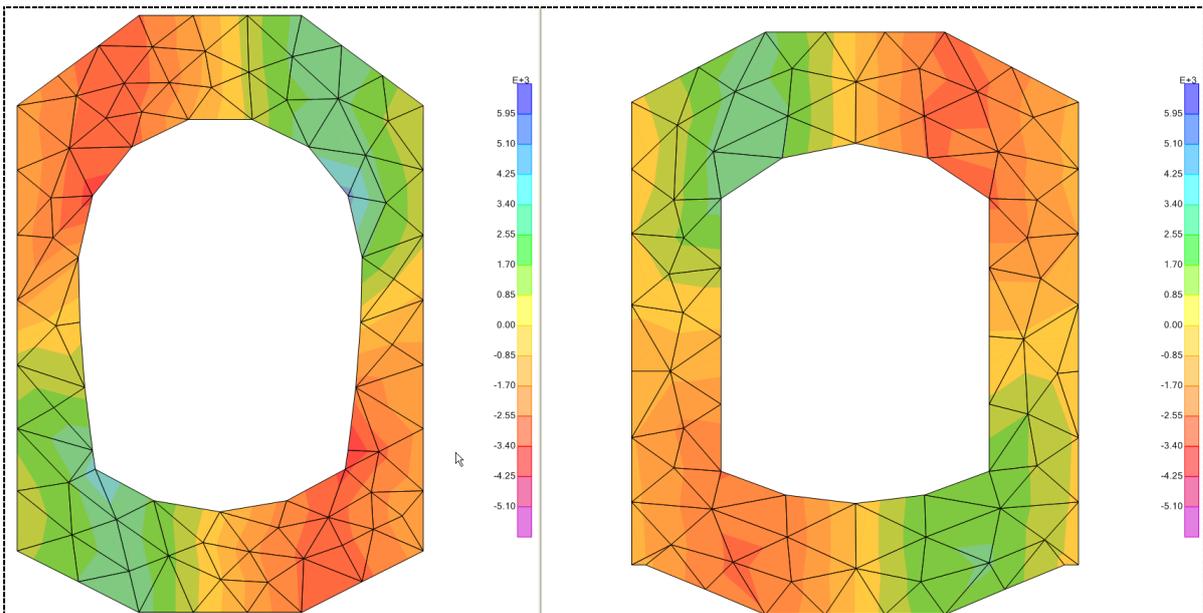


Figura 128: Innesto bypass pedonale e nicchia SOS – Azione F12 [kN/m]

L'azione F12 è utile per la determinazione dell'azione interna di taglio.

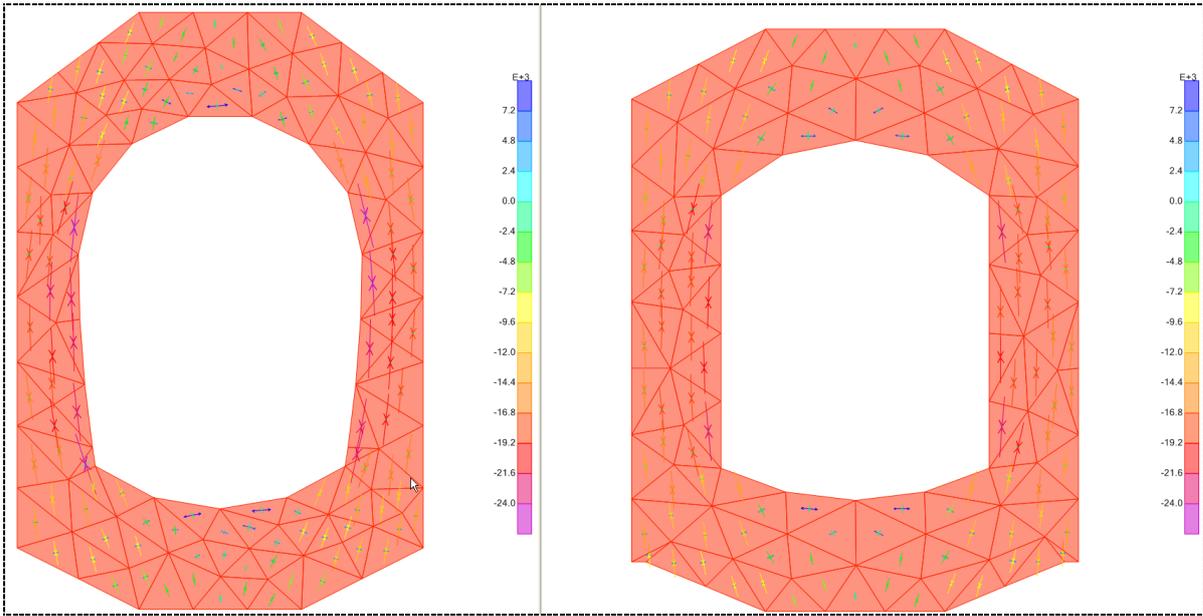


Figura 129: Innesto bypass pedonale e nicchia SOS – Vettori sforzi principali

11.9. NOTA SUL PROGETTO DELLE ARMATURE

Il progetto delle armature è stato eseguito prendendo come riferimento, per le verifiche allo Stato Limite di Esercizio, i limiti tensionali e di apertura delle fessure della combinazione Rara e Frequente (NTC 2008). Tala assunzione è ritenuta valida in quanto la condizione di carico analizzata è propria di una situazione con massime spinte sia litostatiche che idrauliche.

Combinazione Rara

Tensione limite calcestruzzo C32/40: $\sigma_c = 19.92 \text{ MPa}$

Tensione limite acciaio B450C: $\sigma_s = 360 \text{ MPa}$

Combinazione Frequente

Apertura limite delle fessure: $w = 0.40 \text{ mm}$

Sono state inoltre eseguite le verifiche a pressoflessione ed a taglio secondo lo Stato Limite Ultimo.

11.10. PROGETTO ARMATURA INNESTO BYPASS CARRABILE

In accordo alle analisi numeriche eseguite, che hanno permesso di stimare lo stato tensionale presente nelle zone di innesto dei bypass carrabili, si riporta nel seguito il dimensionamento delle armature disposte negli elementi di rinforzo gettati in opera.

Sono stati previste due tipologie di armatura:

Tipologia 1 (N = 2400 kN)

Bypass carrabile alla pk (canna di monte):

1+125.90

Tipologia 2 (N = 6100 kN)

Bypass carrabili alle pk (canna di monte):

2+025.90, 2+925.90



11.10.1. Tipologia 1

Si riporta un riepilogo delle azioni interne per le sezioni principali degli elementi strutturali: i valori sono stati ricavati integrando lo stato tensionale dell'analisi. I risultati di riferiscono alla combinazione Rara. Le verifiche allo Stato Limite Ultimo considerano un moltiplicatore pari a 1.30.

Nota: azione assiale $N > 0$: compressione

azione assiale $N < 0$: trazione

Innesto bypass carrabile			
Calotta: sezione di mezzeria:	N =	-1410	kN
	M =	340	kNm
Piedritto: sezione di base:	N =	13824	kN
	M =	662	kNm
Arco rovescio: sezione di mezzeria:	N =	-4284	kN
	M =	921	kNm

11.10.1.1. Calotta: sezione di mezzeria

La sezione di mezzeria in calotta ha dimensioni 100 x 100 cm. Essa è stata armata con 10 $\phi 26$ all'intradosso e con 5 $\phi 26$ all'estradosso.

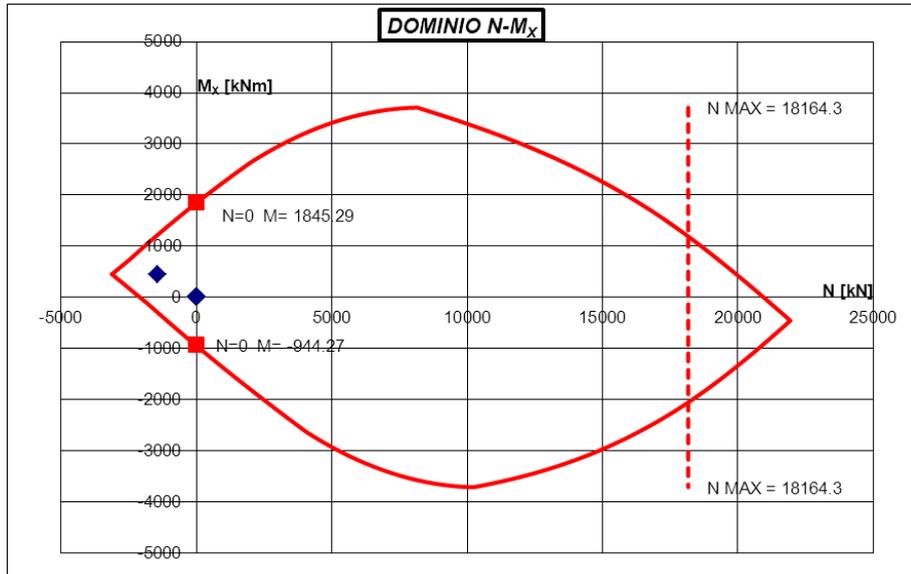


Figura 130: Dominio di resistenza allo Stato Limite Ultimo

		Verifica tensioni in esercizio						Verifica fessurazione				
[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[kNm]		[mm]	[mm]
N	M _x	σ_c max	σ_c min	σ_s max	σ_s min	σ_s' max	σ_s' min	k 3	M form fess	Mf > M ?	wk' limite	wk'
-1410.0	340.0	0.00	0.00	206.1	206.1	119.0	119.0	0.125	402.23	SI	0.400	OK

Le verifiche allo Stato Limite Ultimo e di Esercizio sono soddisfatte.

11.10.1.2. Piedritto: sezione di base

La sezione di base del piedritto ha dimensioni 120 x 120 cm. Essa è stata armata con 6 $\varnothing 26$ all'intradosso e con 6 $\varnothing 26$ all'estradosso.

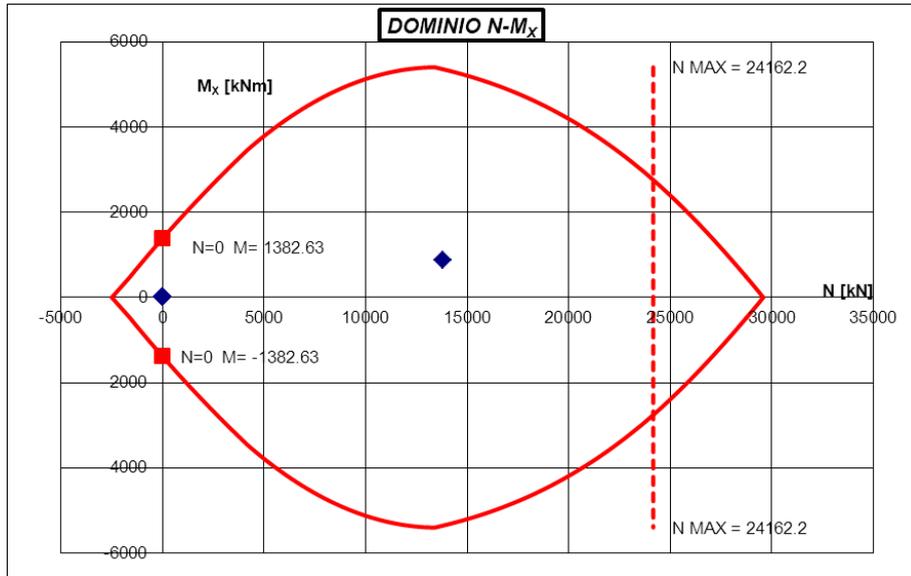


Figura 131: Dominio di resistenza allo Stato Limite Ultimo

		Verifica tensioni in esercizio						Verifica fessurazione				
[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[kNm]		[mm]	[mm]
N	M _x	σ_c max	σ_c min	σ_s max	σ_s min	σ_s' max	σ_s' min	k 3	M form fess	Mf > M ?	wk' limite	wk'
13824.0	662.4	10.99	7.02	-108.4	-108.4	-161.7	-161.7	0.125	4041.41	SI	0.400	OK

Le verifiche allo Stato Limite Ultimo e di Esercizio sono soddisfatte.

11.10.1.3. Arco rovescio: sezione di mezzeria

La sezione di mezzeria dell'arco rovescio ha dimensioni 120 x 140 cm. Essa è stata armata con 12 $\phi 26$ + 6 $\phi 20$ all'intradosso e con 12 $\phi 26$ all'estradosso.

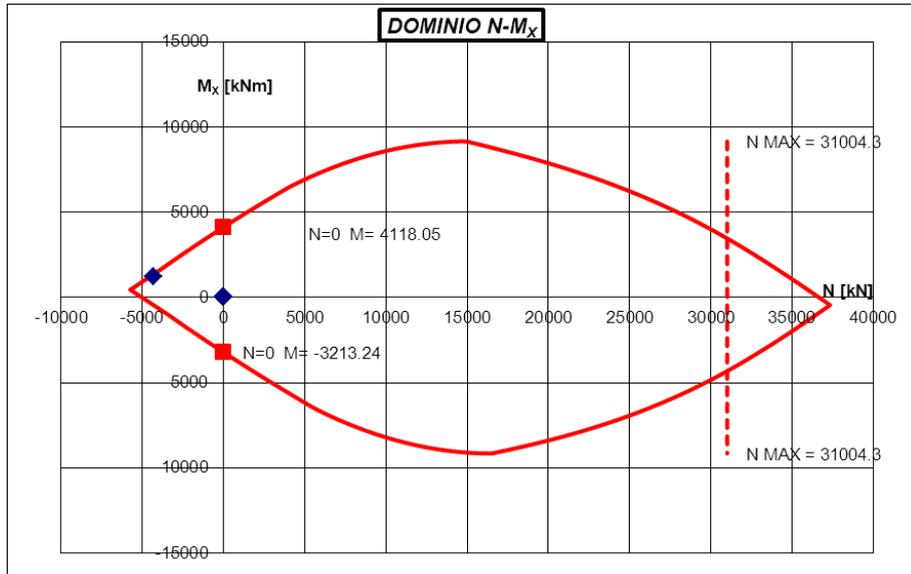


Figura 132: Dominio di resistenza allo Stato Limite Ultimo

		Verifica tensioni in esercizio						Verifica fessurazione				
[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[kNm]		[mm]	[mm]
N	M _x	σ_c max	σ_c min	σ_s max	σ_s min	σ_s' max	σ_s' min	k 3	M form fess	Mf > M ?	wk' limite	wk'
-4284.0	921.2	0.00	0.00	349.3	346.6	220.5	220.5	0.250	442.89	NO	0.400	0.375

Le verifiche allo Stato Limite Ultimo e di Esercizio sono soddisfatte.



11.10.1.4. Armatura a taglio

La sezione maggiormente sollecitata a taglio è situata alla base del piedritto. L'azione di taglio in tale sezione è pari a circa 1800 kN per la combinazione Rara. La verifica allo Stato Limite Ultimo considera un'azione di taglio pari a $1800 \text{ kN} \times 1.30 = 2340 \text{ kN}$.

Sono state previste 1+1 staffe $\varphi 16 / 20$.

La sezione di calcestruzzo 120×120 alla base del piedritto, considerando un angolo di inclinazione della biella di calcestruzzo di 30° (nel traliccio di Morsch), armata con 1+1 staffe $\varphi 16 / 20$, fornisce una resistenza a taglio V_{Rd} pari a 2443 kN. La verifica a taglio è quindi soddisfatta.



11.10.2. Tipologia 2

Si riporta un riepilogo delle azioni interne per le sezioni principali degli elementi strutturali: i valori sono stati ricavati integrando lo stato tensionale dell'analisi. I risultati di riferiscono alla combinazione Rara. Le verifiche allo Stato Limite Ultimo considerano un moltiplicatore pari a 1.30.

Nota: azione assiale $N > 0$: compressione

azione assiale $N < 0$: trazione

Innesto bypass carrabile			
Calotta: sezione di mezzeria:	N =	-4500	kN
	M =	1000	kNm
Piedritto: sezione di base:	N =	28080	kN
	M =	1296	kNm
Arco rovescio: sezione di mezzeria:	N =	-11340	kN
	M =	2254	kNm

11.10.2.1. Calotta: sezione di mezzeria

La sezione di mezzeria in calotta ha dimensioni 100 x 100 cm. Essa è stata armata con 10 + 5 \varnothing 30 all'intradosso e con 10 \varnothing 26 all'estradosso.

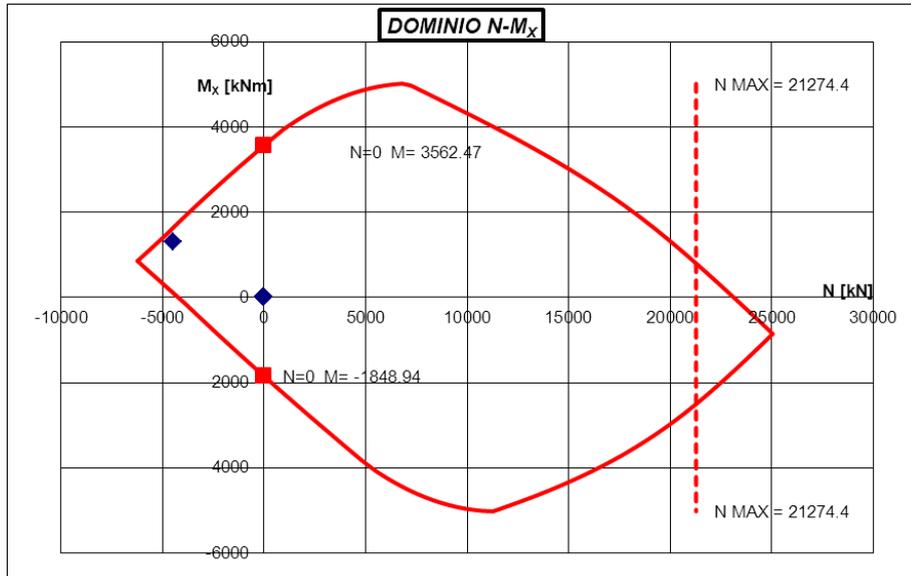


Figura 133: Dominio di resistenza allo Stato Limite Ultimo

		Verifica tensioni in esercizio						Verifica fessurazione				
[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[kNm]		[mm]	[mm]
N	M _x	σ_c max	σ_c min	σ_s max	σ_s min	σ_s' max	σ_s' min	k 3	M form fess	Mf > M ?	wk' limite	wk'
-4500.0	1000.0	0.00	0.00	326.0	321.6	199.5	199.5	0.250	-142.28	NO	0.400	0.209

Le verifiche allo Stato Limite Ultimo e di Esercizio sono soddisfatte.

11.10.2.2. Piedritto: sezione di base

La sezione di base del piedritto ha dimensioni 120 x 120 cm. Essa è stata armata con 8 + 8 \varnothing 30 all'intradosso e con 12 + 12 \varnothing 30 all'estradosso.

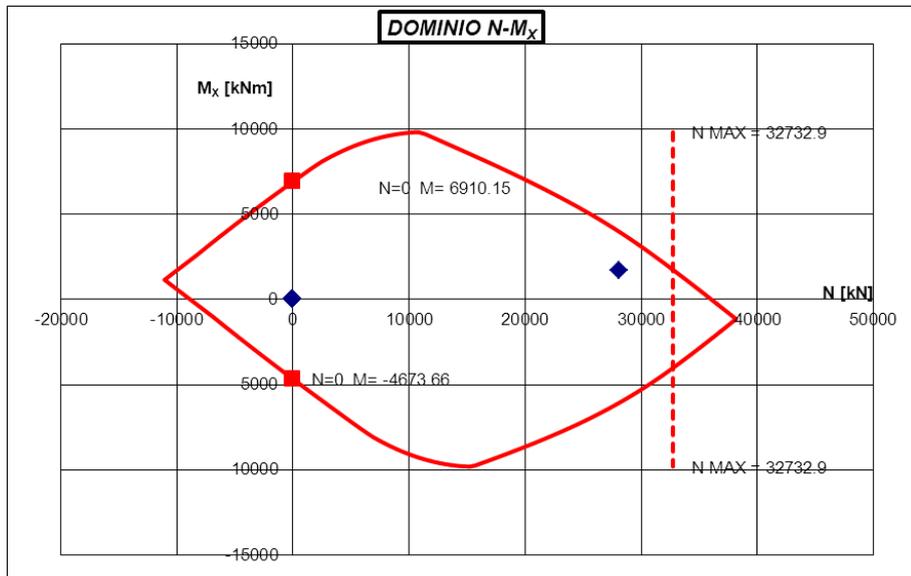


Figura 134: Dominio di resistenza allo Stato Limite Ultimo

		Verifica tensioni in esercizio						Verifica fessurazione				
[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[kNm]		[mm]	[mm]
N	M _x	σ_c max	σ_c min	σ_s max	σ_s min	σ_s' max	σ_s' min	k 3	M form fess	Mf > M ?	wk' limite	wk'
28080.0	1296.0	19.33	11.12	-173.5	-176.6	-280.2	-283.3	0.125	9030.14	SI	0.400	OK

Le verifiche allo Stato Limite Ultimo e di Esercizio sono soddisfatte.

11.10.2.3. Arco rovescio: sezione di mezzeria

La sezione di mezzeria dell'arco rovescio ha dimensioni 120 x 140 cm. Essa è stata armata con 15 + 15 ϕ 30 all'intradosso e con 8 + 8 ϕ 30 all'estradosso.

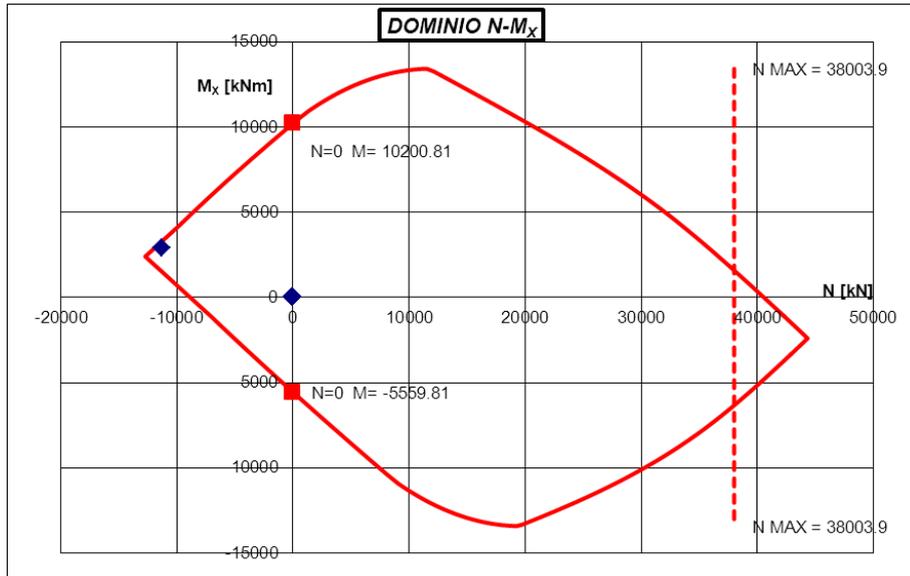


Figura 135: Dominio di resistenza allo Stato Limite Ultimo

		Verifica tensioni in esercizio						Verifica fessurazione				
[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[kNm]		[mm]	[mm]
N	M _x	σ_c max	σ_c min	σ_s max	σ_s min	σ_s' max	σ_s' min	k 3	M form fess	Mf > M ?	wk' limite	wk'
-11340.0	2254.0	0.00	0.00	353.2	352.9	340.8	340.5	0.250	-1484.78	NO	0.400	0.186

Le verifiche allo Stato Limite Ultimo e di Esercizio sono soddisfatte.



11.10.2.4. Armatura a taglio

La sezione maggiormente sollecitata a taglio è situata alla base del piedritto. L'azione di taglio in tale sezione è pari a circa 3600 kN per la combinazione Rara. La verifica allo Stato Limite Ultimo considera un'azione di taglio pari a $3600 \text{ kN} \times 1.30 = 4680 \text{ kN}$.

Sono state previste 1+1 staffe $\varnothing 20 / 10$ nelle zone soggette a maggiori concentrazioni di taglio.

La sezione di calcestruzzo 120×120 alla base del piedritto, considerando un angolo di inclinazione della biella di calcestruzzo di 35° (nel traliccio di Morsch), armata con 1+1 staffe $\varnothing 20 / 10$, fornisce una resistenza a taglio V_{Rd} pari a 4753 kN. La verifica a taglio è quindi soddisfatta.

11.11. PROGETTO ARMATURA INNESTO BYPASS PEDONALE

In accordo alle analisi numeriche eseguite, che hanno permesso di stimare lo stato tensionale presente nelle zone di innesto dei bypass pedonali, si riporta nel seguito il dimensionamento delle armature disposte negli elementi di rinforzo gettati in opera.

Sono stati previste due tipologie di armatura:

Tipologia 1 (N = 2400 kN)

Bypass pedonali alle pk (canna di monte):

0+825.90, 3+525.90

Tipologia 2 (N = 7200 kN)

Bypass pedonali alle pk (canna di monte):

1+425.90, 1+725.90, 2.325.90, 2+625.90, 3+225.90

11.12. TIPOLOGIA 1

Si riporta un riepilogo delle azioni interne per le sezioni principali degli elementi strutturali: i valori sono stati ricavati integrando lo stato tensionale dell'analisi. I risultati di riferiscono alla combinazione Rara. Le verifiche allo Stato Limite Ultimo considerano un moltiplicatore pari a 1.30.

Nota: azione assiale $N > 0$: compressione

azione assiale $N < 0$: trazione

Innesto bypass pedonale			
Calotta: sezione di mezzeria:	N =	0	kN
	M =	133	kNm
Piedritto: sezione di base:	N =	5560	kN
	M =	69	kNm
Arco rovescio: sezione di mezzeria:	N =	-125	kN
	M =	163	kNm

11.12.1.1. Calotta: sezione di mezzeria

La sezione di mezzeria in calotta ha dimensioni 100 x 100 cm. Essa è stata armata con 5 \varnothing 26 all'intradosso e con 5 \varnothing 20 all'estradosso.

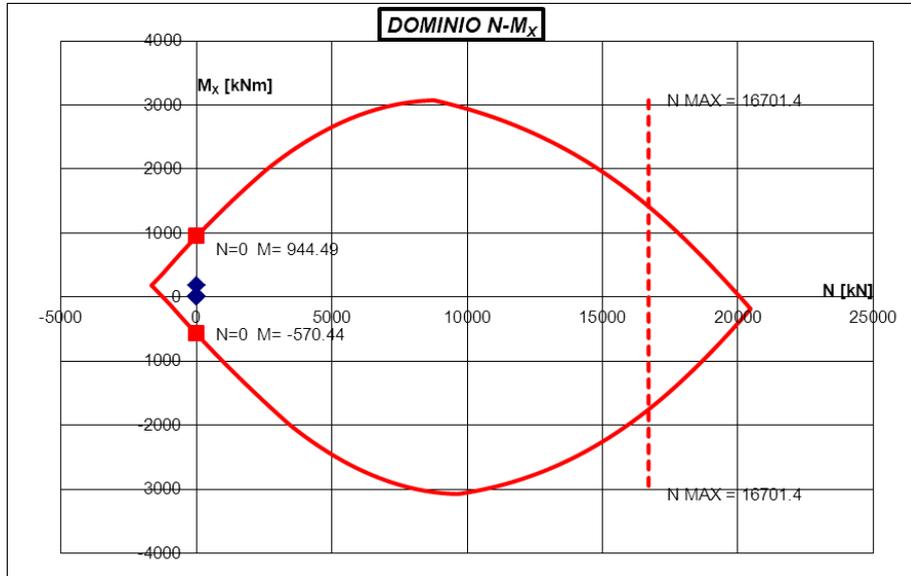


Figura 136: Dominio di resistenza allo Stato Limite Ultimo

		Verifica tensioni in esercizio						Verifica fessurazione				
[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[kNm]		[mm]	[mm]
N	M _x	σ_c max	σ_c min	σ_s max	σ_s min	σ_s' max	σ_s' min	k 3	M form fess	Mf > M ?	wk' limite	wk'
0.0	133.3	1.20	-	58.1	58.1	-13.2	-13.2	0.125	599.74	SI	0.400	OK

Le verifiche allo Stato Limite Ultimo e di Esercizio sono soddisfatte.

11.12.1.2. Piedritto: sezione di base

La sezione di base del piedritto ha dimensioni 100 x 80 cm. Essa è stata armata con 5 $\varnothing 26$ all'intradosso e con 5 $\varnothing 26$ all'estradosso.

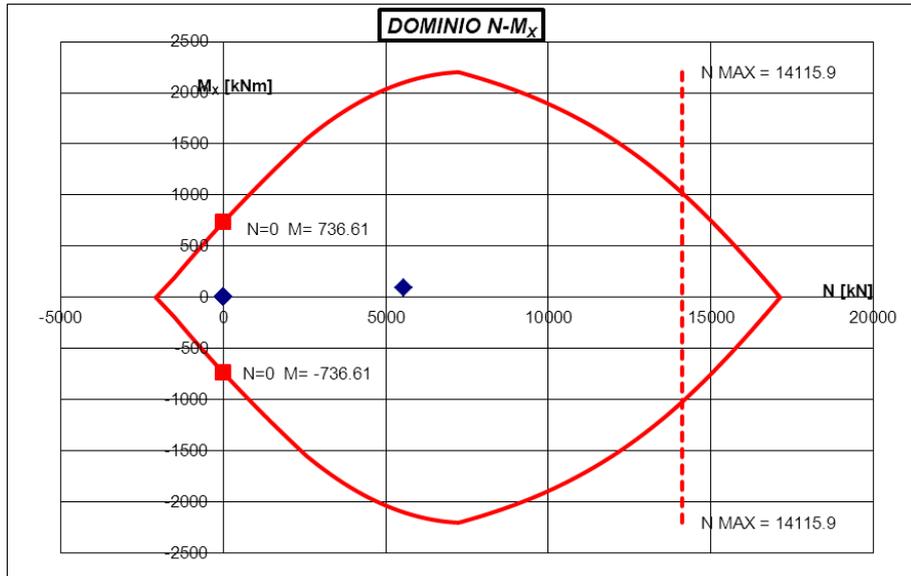


Figura 137: Dominio di resistenza allo Stato Limite Ultimo

		Verifica tensioni in esercizio						Verifica fessurazione				
[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[kNm]		[mm]	[mm]
N	M_x	σ_c max	σ_c min	σ_s max	σ_s min	σ_s' max	σ_s' min	k 3	M form fess	Mf > M ?	wk' limite	wk'
5560.0	69.3	6.86	5.78	-88.0	-88.0	-101.6	-101.6	0.125	1217.90	SI	0.400	OK

Le verifiche allo Stato Limite Ultimo e di Esercizio sono soddisfatte.

11.12.1.3. Arco rovescio: sezione di mezzeria

La sezione di mezzeria dell'arco rovescio ha dimensioni 100 x 100 cm. Essa è stata armata con 5 $\phi 26$ all'intradosso e con 5 $\phi 20$ all'estradosso.

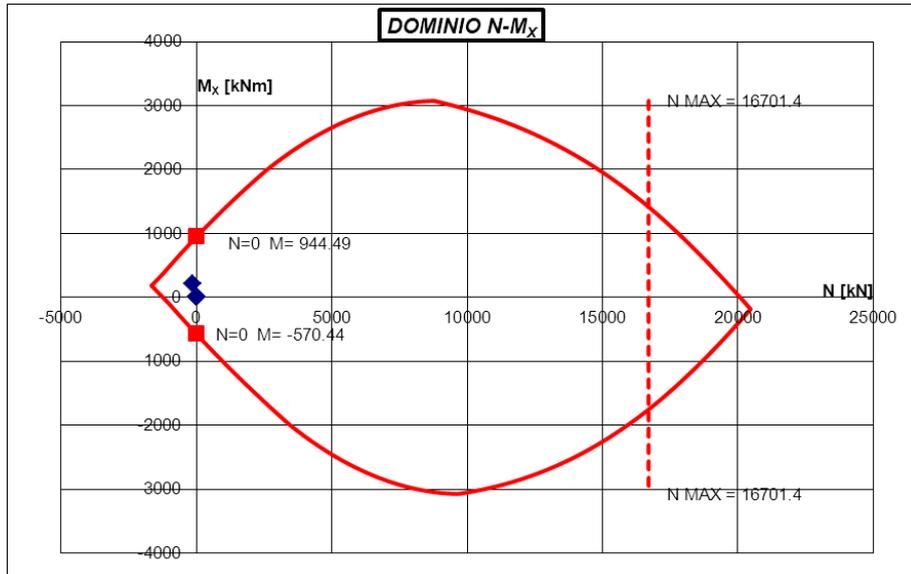


Figura 138: Dominio di resistenza allo Stato Limite Ultimo

		Verifica tensioni in esercizio						Verifica fessurazione				
[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[kNm]		[mm]	[mm]
N	M _x	σ_c max	σ_c min	σ_s max	σ_s min	σ_s' max	σ_s' min	k 3	M form fess	Mf > M ?	wk' limite	wk'
-125.0	162.5	1.28	-	93.1	93.1	-12.1	-12.1	0.125	577.00	SI	0.400	OK

Le verifiche allo Stato Limite Ultimo e di Esercizio sono soddisfatte.

11.12.1.4. Armatura a taglio

La sezione maggiormente sollecitata a taglio è situata alla base del piedritto. L'azione di taglio in tale sezione è pari a circa 800 kN per la combinazione Rara. La verifica allo Stato Limite Ultimo considera un'azione di taglio pari a $800 \text{ kN} \times 1.30 = 1040 \text{ kN}$.

Sono state previste 1+1 staffe $\phi 16 / 20$.

La sezione di calcestruzzo 100×100 alla base del piedritto, considerando un angolo di inclinazione della biella di calcestruzzo di 45° (nel traliccio di Morsch), armata con 1+1 staffe $\phi 16 / 20$, fornisce una resistenza a taglio V_{Rd} pari a 1343 kN. La verifica a taglio è quindi soddisfatta.

11.12.2. Tipologia 2

Si riporta un riepilogo delle azioni interne per le sezioni principali degli elementi strutturali: i valori sono stati ricavati integrando lo stato tensionale dell'analisi. I risultati di riferiscono alla combinazione Rara. Le verifiche allo Stato Limite Ultimo considerano un moltiplicatore pari a 1.30.

Nota: azione assiale $N > 0$: compressione

azione assiale $N < 0$: trazione

Innesto bypass pedonale			
Calotta: sezione di mezzeria:	N =	-1400	kN
	M =	483	kNm
Piedritto: sezione di base:	N =	15720	kN
	M =	229	kNm
Arco rovescio: sezione di mezzeria:	N =	-2100	kN
	M =	567	kNm

11.12.2.1. Calotta: sezione di mezzeria

La sezione di mezzeria in calotta ha dimensioni 100 x 100 cm. Essa è stata armata con 10 $\phi 26$ all'intradosso e con 5 $\phi 26$ all'estradosso.

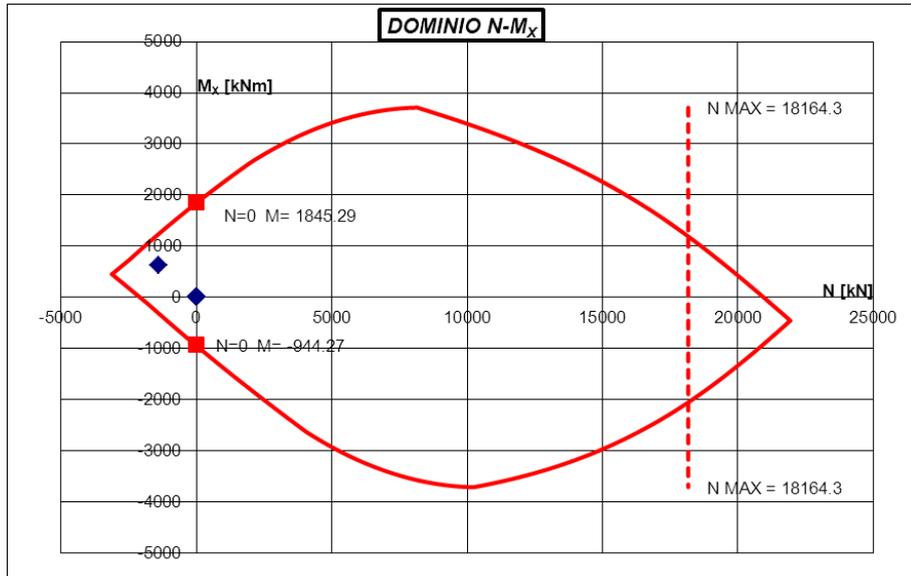


Figura 139: Dominio di resistenza allo Stato Limite Ultimo

		Verifica tensioni in esercizio						Verifica fessurazione				
[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[kNm]		[mm]	[mm]
N	M _x	σ_c max	σ_c min	σ_s max	σ_s min	σ_s' max	σ_s' min	k 3	M form fess	Mf > M ?	wk' limite	wk'
-1400.0	483.3	0.00	0.00	236.0	236.0	55.4	55.4	0.125	404.18	NO	0.400	0.196

Le verifiche allo Stato Limite Ultimo e di Esercizio sono soddisfatte.

11.12.2.2. Piedritto: sezione di base

La sezione di base del piedritto ha dimensioni 100 x 80 cm. Essa è stata armata con 10 $\varnothing 26$ all'intradosso e con 10 $\varnothing 26$ all'estradosso.

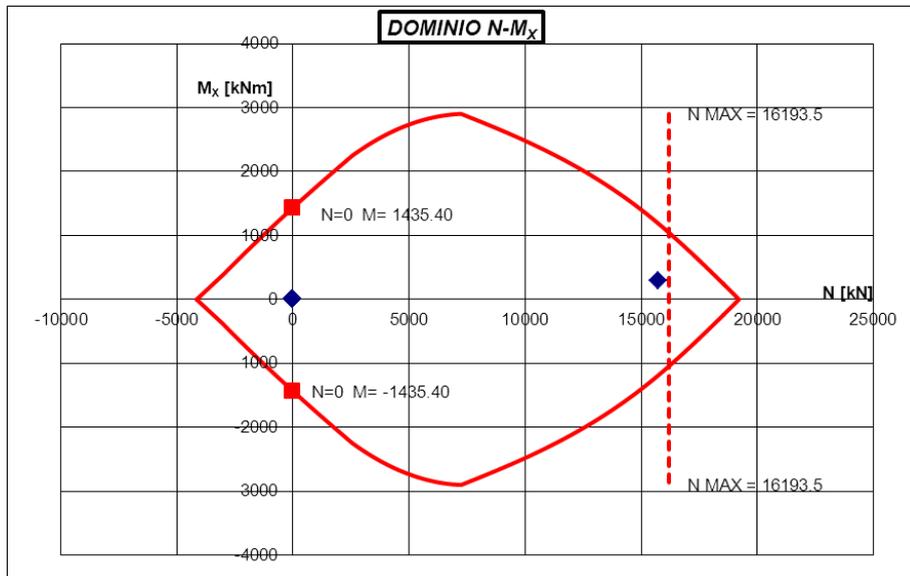


Figura 140: Dominio di resistenza allo Stato Limite Ultimo

		Verifica tensioni in esercizio						Verifica fessurazione				
[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[kNm]		[mm]	[mm]
N	M_x	σ_c max	σ_c min	σ_s max	σ_s min	σ_s' max	σ_s' min	k 3	M form fess	Mf > M ?	wk' limite	wk'
15720.0	229.3	17.90	14.88	-226.7	-226.7	-264.9	-264.9	0.125	2959.91	SI	0.400	OK

Le verifiche allo Stato Limite Ultimo e di Esercizio sono soddisfatte.

11.12.2.3. Arco rovescio: sezione di mezzeria

La sezione di mezzeria dell'arco rovescio ha dimensioni 100 x 100 cm. Essa è stata armata con 10 $\phi 26$ all'intradosso e con 5 $\phi 26$ all'estradosso.

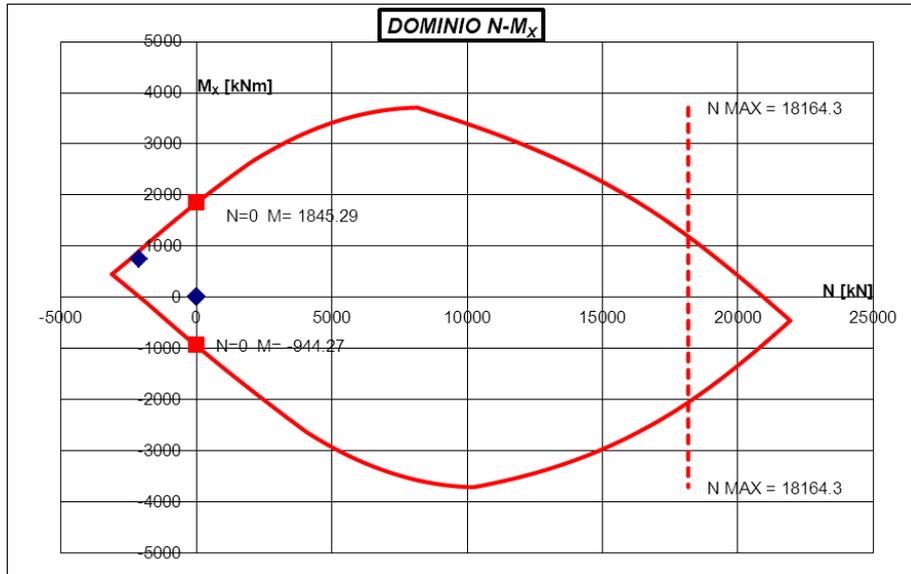


Figura 141: Dominio di resistenza allo Stato Limite Ultimo

		Verifica tensioni in esercizio						Verifica fessurazione				
[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[kNm]		[mm]	[mm]
N	M _x	σ_c max	σ_c min	σ_s max	σ_s min	σ_s' max	σ_s' min	k 3	M form fess	Mf > M ?	wk' limite	wk'
-2100.0	566.7	0.00	0.00	319.9	319.9	151.3	151.3	0.250	267.52	NO	0.400	0.383

Le verifiche allo Stato Limite Ultimo e di Esercizio sono soddisfatte.



11.12.2.4. Armatura a taglio

La sezione maggiormente sollecitata a taglio è situata alla base del piedritto. L'azione di taglio in tale sezione è pari a circa 2000 kN per la combinazione Rara. La verifica allo Stato Limite Ultimo considera un'azione di taglio pari a $2000 \text{ kN} \times 1.30 = 2600 \text{ kN}$.

Sono state previste 1+1 staffe $\varphi 16 / 10$ nelle zone soggette a maggiori concentrazioni di taglio.

La sezione di calcestruzzo 100×100 alla base del piedritto, considerando un angolo di inclinazione della biella di calcestruzzo di 35° (nel traliccio di Morsch), armata con 1+1 staffe $\varphi 16 / 10$, fornisce una resistenza a taglio V_{Rd} pari a 2641 kN. La verifica a taglio è quindi soddisfatta.

11.13. PROGETTO ARMATURA INNESTO NICCHIA SOS

In accordo alle analisi numeriche eseguite, che hanno permesso di stimare lo stato tensionale presente nelle zone di innesto delle nicchie SOS, si riporta nel seguito il dimensionamento delle armature disposte negli elementi di rinforzo gettati in opera.

Sono stati previste due tipologie di armatura:

Tipologia 1 (N = 2400 kN)

Nicchie SOS alle pk (canna di monte):

0+675.90, 0+825.90, 0+975.90, 1+125.90, 3+525.90, 3+643.13

Tipologia 2 (N = 6100 kN / 7200 kN)

Nicchie SOS alle pk (canna di monte):

1+275.90, 1+425.90, 1+575.90, 1+725.90, 1+875.90, 2+025.90,
2+175.90, 2+325.90, 2+475.90, 2+625.90, 2+775.90, 2+925.90,
3+075.90, 3+225.90, 3+375.90

11.13.1. Tipologia 1

Si riporta un riepilogo delle azioni interne per le sezioni principali degli elementi strutturali: i valori sono stati ricavati integrando lo stato tensionale dell'analisi. I risultati di riferiscono alla combinazione Rara. Le verifiche allo Stato Limite Ultimo considerano un moltiplicatore pari a 1.30.

Nota: azione assiale $N > 0$: compressione

azione assiale $N < 0$: trazione

Innesto nicchia SOS (da analisi bypass carrabile N=2400 kN)

Calotta: sezione di mezzeria:	N =	-25	kN
	M =	143	kNm
Piedritto: sezione di base:	N =	4760	kN
	M =	48	kNm
Arco rovescio: sezione di mezzeria:	N =	-150	kN
	M =	150	kNm

Innesto nicchia SOS (da analisi bypass pedonale N=2400 kN)

Calotta: sezione di mezzeria:	N =	0	kN
	M =	142	kNm
Piedritto: sezione di base:	N =	4840	kN
	M =	48	kNm
Arco rovescio: sezione di mezzeria:	N =	-85	kN
	M =	153	kNm

11.13.1.1. Calotta: sezione di mezzeria

La sezione di mezzeria in calotta ha dimensioni 100 x 100 cm. Essa è stata armata con 5 \varnothing 26 all'intradosso e con 5 \varnothing 20 all'estradosso.

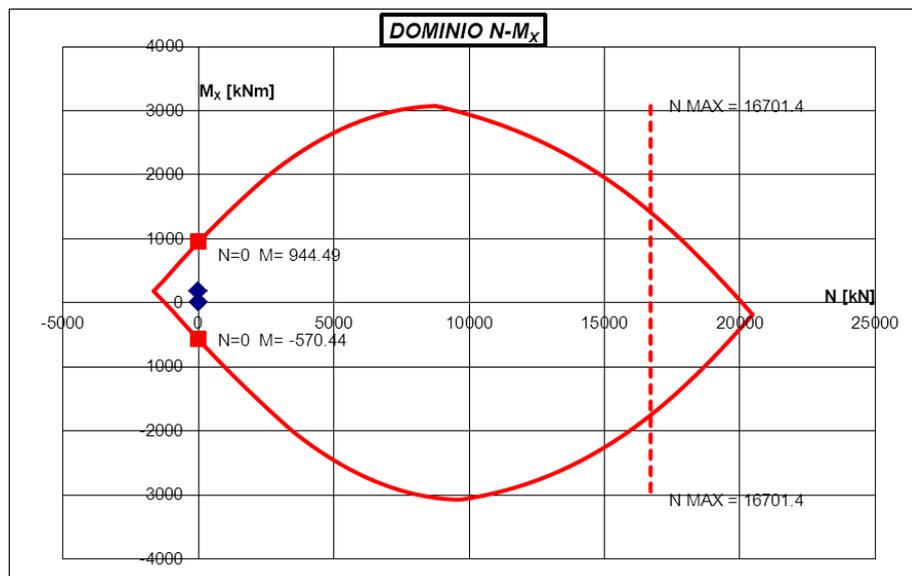


Figura 142: Dominio di resistenza allo Stato Limite Ultimo



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo bypass carrabili e pedonali

Verifica tensioni in esercizio								Verifica fessurazione				
[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[kNm]	Mf > M ?	[mm]	[mm]
N	M _X	σ _c max	σ _c min	σ _s max	σ _s min	σ _s ' max	σ _s ' min	k 3	M form fess		wk' limite	wk'
-25.0	143.0	1.26	-	66.7	66.7	-13.4	-13.4	0.125	595.19	SI	0.400	OK
0.0	142.0	1.28	-	61.8	61.8	-14.0	-14.0	0.125	599.74	SI	0.400	OK

Le verifiche allo Stato Limite Ultimo e di Esercizio sono soddisfatte.

11.13.1.2. Piedritto: sezione di base

La sezione di base del piedritto ha dimensioni 100 x 80 cm. Essa è stata armata con 5 φ26 all'intradosso e con 5 φ26 all'estradosso.

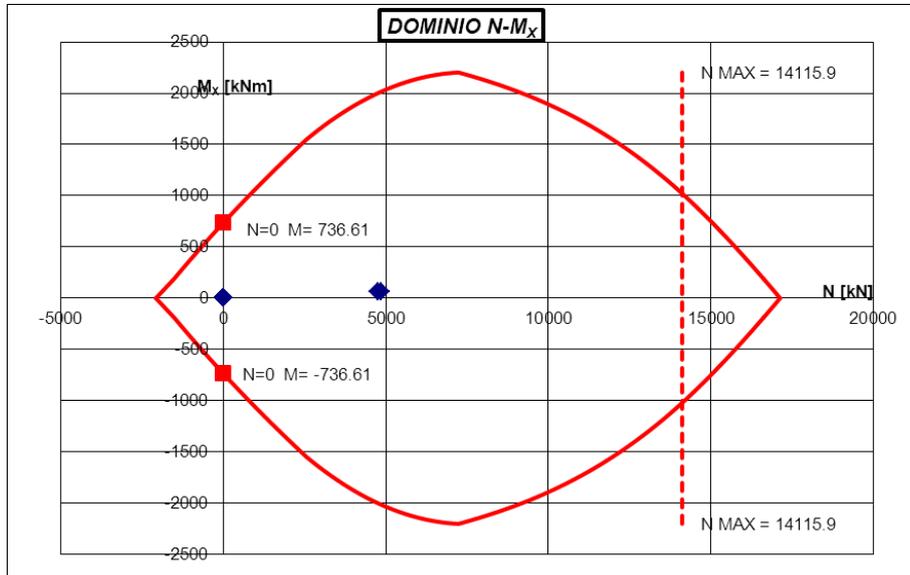


Figura 143: Dominio di resistenza allo Stato Limite Ultimo

Verifica tensioni in esercizio								Verifica fessurazione				
[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[kNm]	Mf > M ?	[mm]	[mm]
N	M _X	σ _c max	σ _c min	σ _s max	σ _s min	σ _s ' max	σ _s ' min	k 3	M form fess		wk' limite	wk'
4760.0	48.0	5.78	5.04	-76.5	-76.5	-85.9	-85.9	0.125	1100.32	SI	0.400	OK
4840.0	48.0	5.87	5.13	-77.8	-77.8	-87.2	-87.2	0.125	1112.08	SI	0.400	OK

Le verifiche allo Stato Limite Ultimo e di Esercizio sono soddisfatte.

11.13.1.3. Arco rovescio: sezione di mezzeria

La sezione di mezzeria dell'arco rovescio ha dimensioni 100 x 100 cm. Essa è stata armata con 5 $\phi 26$ all'intradosso e con 5 $\phi 20$ all'estradosso.

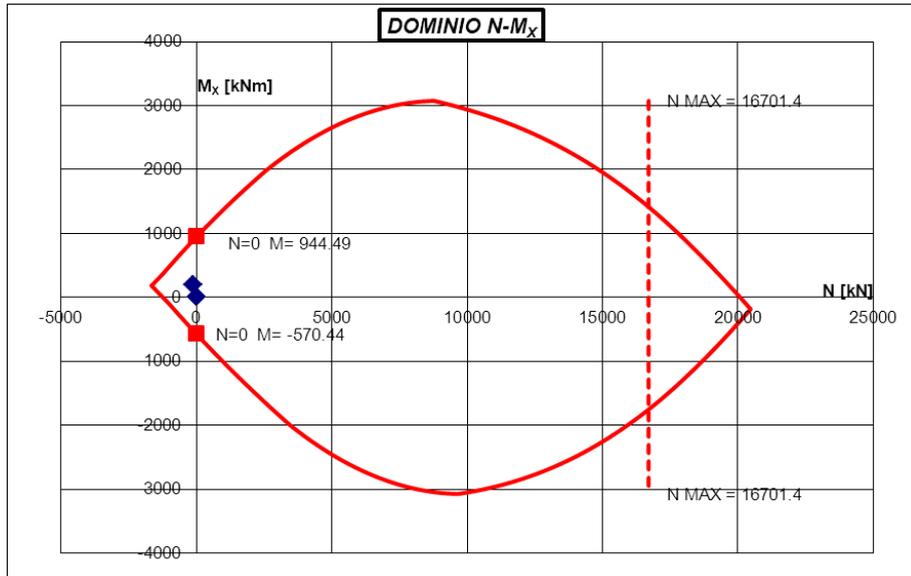


Figura 144: Dominio di resistenza allo Stato Limite Ultimo

		Verifica tensioni in esercizio						Verifica fessurazione				
[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[kNm]		[mm]	[mm]
N	M _x	σ_c max	σ_c min	σ_s max	σ_s min	σ_s' max	σ_s' min	k 3	M form fess	Mf > M ?	wk' limite	wk'
-150.0	150.0	1.11	-	92.4	92.4	-9.7	-9.7	0.125	572.45	SI	0.400	OK
-85.0	153.0	1.27	-	81.7	81.7	-12.6	-12.6	0.125	584.28	SI	0.400	OK

Le verifiche allo Stato Limite Ultimo e di Esercizio sono soddisfatte.

11.13.1.4. Armatura a taglio

La sezione maggiormente sollecitata a taglio è situata alla base del piedritto. L'azione di taglio in tale sezione è pari a circa 800 kN per la combinazione Rara. La verifica allo Stato Limite Ultimo considera un'azione di taglio pari a $800 \text{ kN} \times 1.30 = 1040 \text{ kN}$.

Sono state previste 1+1 staffe $\phi 16 / 20$.

La sezione di calcestruzzo 100×100 alla base del piedritto, considerando un angolo di inclinazione della biella di calcestruzzo di 45° (nel traliccio di Morsch), armata con 1+1 staffe $\phi 16 / 20$, fornisce una resistenza a taglio V_{Rd} pari a 1343 kN. La verifica a taglio è quindi soddisfatta.

11.13.2. Tipologia 2

Si riporta un riepilogo delle azioni interne per le sezioni principali degli elementi strutturali: i valori sono stati ricavati integrando lo stato tensionale dell'analisi. I risultati di riferimento sono alla combinazione Rara. Le verifiche allo Stato Limite Ultimo considerano un moltiplicatore pari a 1.30.

Nota: azione assiale $N > 0$: compressione

azione assiale $N < 0$: trazione

Innesto nicchia SOS (da analisi bypass carrabile $N=6100 \text{ kN}$)			
Calotta: sezione di mezzzeria:	N =	-1250	kN
	M =	425	kNm
Piedritto: sezione di base:	N =	11200	kN
	M =	160	kNm
Arco rovescio: sezione di mezzzeria:	N =	-1700	kN
	M =	425	kNm

Innesto nicchia SOS (da analisi bypass pedonale N=7200 kN)			
Calotta: sezione di mezzeria:	N =	-1500	kN
	M =	483	kNm
Piedritto: sezione di base:	N =	13280	kN
	M =	171	kNm
Arco rovescio: sezione di mezzeria:	N =	-1900	kN
	M =	517	kNm

11.13.2.1. Calotta: sezione di mezzeria

La sezione di mezzeria in calotta ha dimensioni 100 x 100 cm. Essa è stata armata con 10 ϕ 26 all'intradosso e con 5 ϕ 26 all'estradosso.

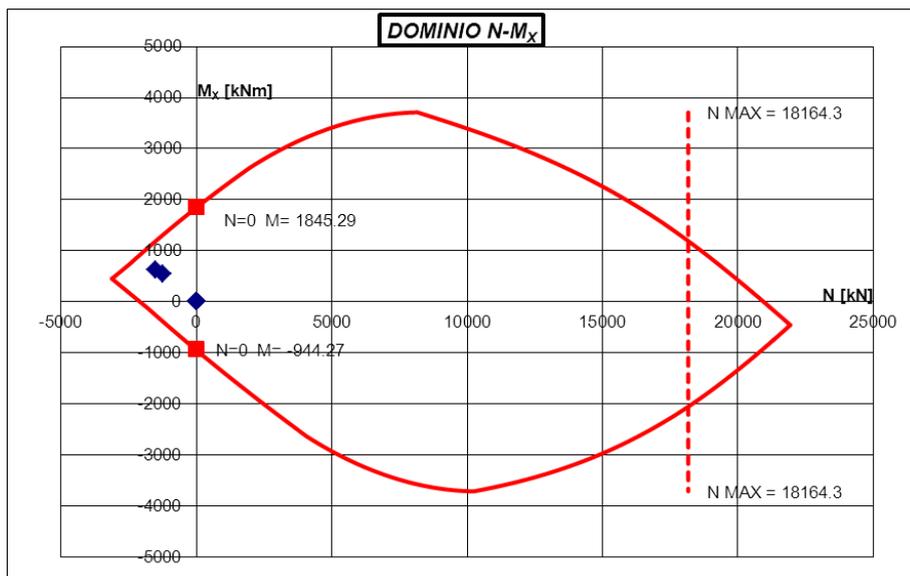


Figura 145: Dominio di resistenza allo Stato Limite Ultimo

		Verifica tensioni in esercizio						Verifica fessurazione				
[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[kNm]		[mm]	[mm]
N	M _x	σ_c max	σ_c min	σ_s max	σ_s min	σ_s' max	σ_s' min	k 3	M form fess	Mf > M ?	wk' limite	wk'
-1250.0	425.0	0.00	0.00	209.3	209.3	52.3	52.3	0.125	433.46	SI	0.400	OK
-1500.0	483.0	0.00	0.00	245.3	245.3	74.3	74.3	0.125	384.66	NO	0.400	0.208

Le verifiche allo Stato Limite Ultimo e di Esercizio sono soddisfatte.

11.13.2.2. Piedritto: sezione di base

La sezione di base del piedritto ha dimensioni 100 x 80 cm. Essa è stata armata con 10 $\phi 26$ all'intradosso e con 10 $\phi 26$ all'estradosso.

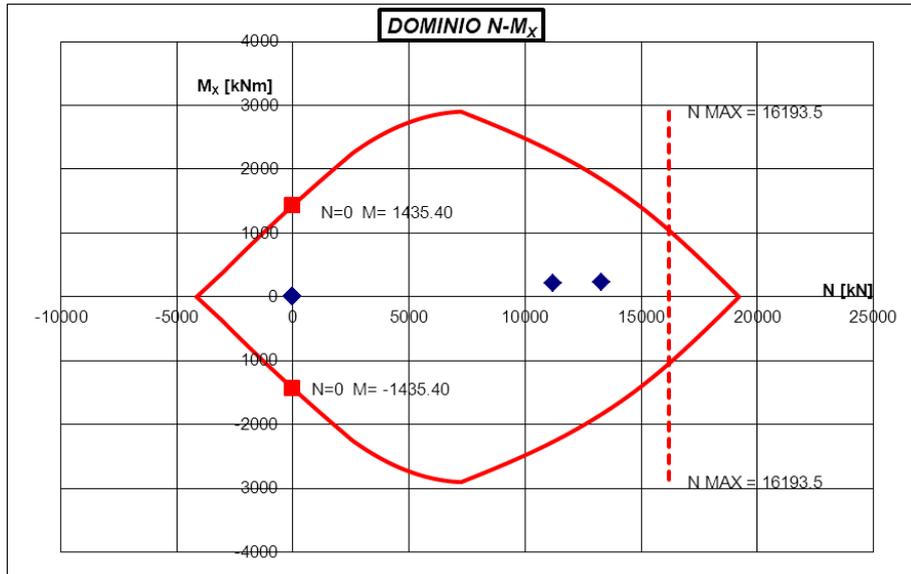


Figura 146: Dominio di resistenza allo Stato Limite Ultimo

		Verifica tensioni in esercizio						Verifica fessurazione				
[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[kNm]		[mm]	[mm]
N	M _x	σ_c max	σ_c min	σ_s max	σ_s min	σ_s' max	σ_s' min	k 3	M form fess	Mf > M ?	wk' limite	wk'
11200.0	160.0	12.73	10.62	-161.8	-161.8	-188.4	-188.4	0.125	2244.23	SI	0.400	OK
13280.0	171.0	14.97	12.72	-193.4	-193.4	-221.9	-221.9	0.125	2573.57	SI	0.400	OK

Le verifiche allo Stato Limite Ultimo e di Esercizio sono soddisfatte.

11.13.2.3. Arco rovescio: sezione di mezzeria

La sezione di mezzeria dell'arco rovescio ha dimensioni 100 x 100 cm. Essa è stata armata con 10 $\phi 26$ all'intradosso e con 5 $\phi 26$ all'estradosso.

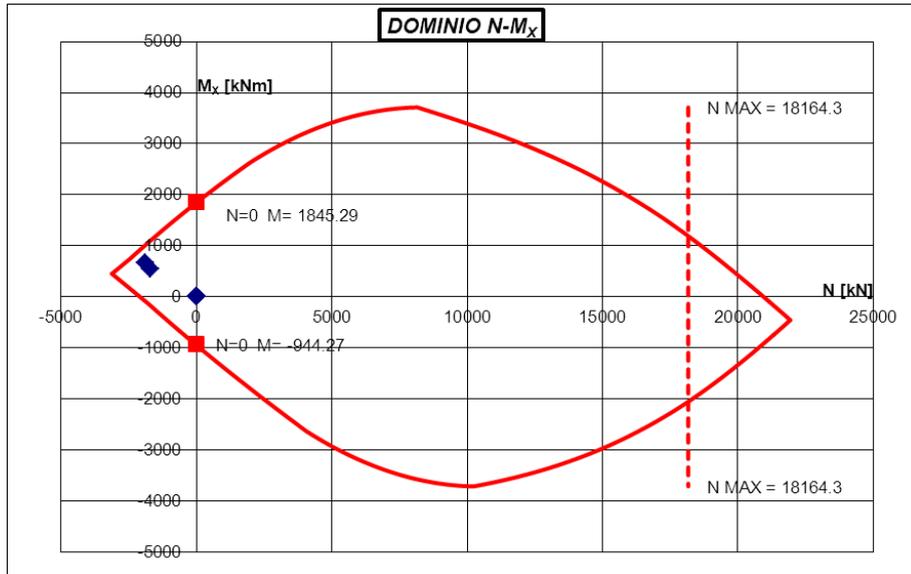


Figura 147: Dominio di resistenza allo Stato Limite Ultimo

		Verifica tensioni in esercizio						Verifica fessurazione					
[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[kNm]		[mm]	[mm]	
N	M _x	σ_c max	σ_c min	σ_s max	σ_s min	σ_s' max	σ_s' min	k 3	M form fess	Mf > M ?	wk' limite	wk'	
-1700.0	425.0	0.00	0.00	251.7	251.7	137.0	137.0	0.125	345.61	NO	0.400	0.207	
-1900.0	517.0	0.00	0.00	290.3	290.3	135.0	135.0	0.250	306.57	NO	0.400	0.363	

Le verifiche allo Stato Limite Ultimo e di Esercizio sono soddisfatte.



11.13.2.4. Armatura a taglio

La sezione maggiormente sollecitata a taglio è situata alla base del piedritto. L'azione di taglio in tale sezione è pari a circa 2000 kN per la combinazione Rara. La verifica allo Stato Limite Ultimo considera un'azione di taglio pari a $2000 \text{ kN} \times 1.30 = 2600 \text{ kN}$.

Sono state previste 1+1 staffe $\phi 16 / 10$ nelle zone soggette a maggiori concentrazioni di taglio.

La sezione di calcestruzzo 100×100 alla base del piedritto, considerando un angolo di inclinazione della biella di calcestruzzo di 35° (nel traliccio di Morsch), armata con 1+1 staffe $\phi 16 / 10$, fornisce una resistenza a taglio V_{Rd} pari a 2641 kN. La verifica a taglio è quindi soddisfatta.

12. ANALISI NICCHIE SOS

12.1. INTRODUZIONE E METODO DI CALCOLO

Il dimensionamento delle armature della parete di chiusura, della calotta, dei piedritti e della fondazione che costituiscono le nicchie SOS, è stato eseguito utilizzando uno schema di calcolo di piastra semplicemente appoggiata. L'analisi numerica ha riguardato nello specifico la parete di chiusura della nicchia: tale struttura è infatti la più critica per il carico agente e per le luci di calcolo.

L'azione del terreno sulle pareti della nicchia è stata valutata seguendo quanto spiegato nella teoria di Terzaghi¹ secondo la quale “il carico sul volto della galleria si manifesta come semplice peso di una massa parabolica o ellittica di distacco, ed ai lati come semplici spinte attive e passive: le prime come azioni dirette del terreno sul rivestimento, le seconde come resistenza dello stesso alle deformazioni impresse.” Adattando tali assunzioni per il problema in questione, è stato possibile determinare le azioni sulle pareti della nicchia seguendo lo schema riportato nel seguito (Figura 148). Tale trattazione teorica è considerata valida ed ammissibile per il problema in esame: questa formulazione è tipica per il caso di strutture interrato a grandi profondità dove l'effettivo incremento del carico agente sulle strutture si discosta dal valore litostatico diminuendo progressivamente con l'aumentare della profondità.

Le azioni sulle pareti della nicchia sono quindi pari a:

- Calotta di copertura della nicchia: p_v [kN/mq]
- Pareti laterali di chiusura: p_h [kN/mq]

Significato dei simboli in Figura 148:

- H_0 : copertura massima in corrispondenza delle nicchie [m]
- b : larghezza dello scavo [m]
- h : altezza dello scavo [m]

I restanti valori sono calcolati con le formule della teoria di Terzaghi.

¹ Karl V. Terzaghi, - “Theoretical Soil Mechanics” - 1943

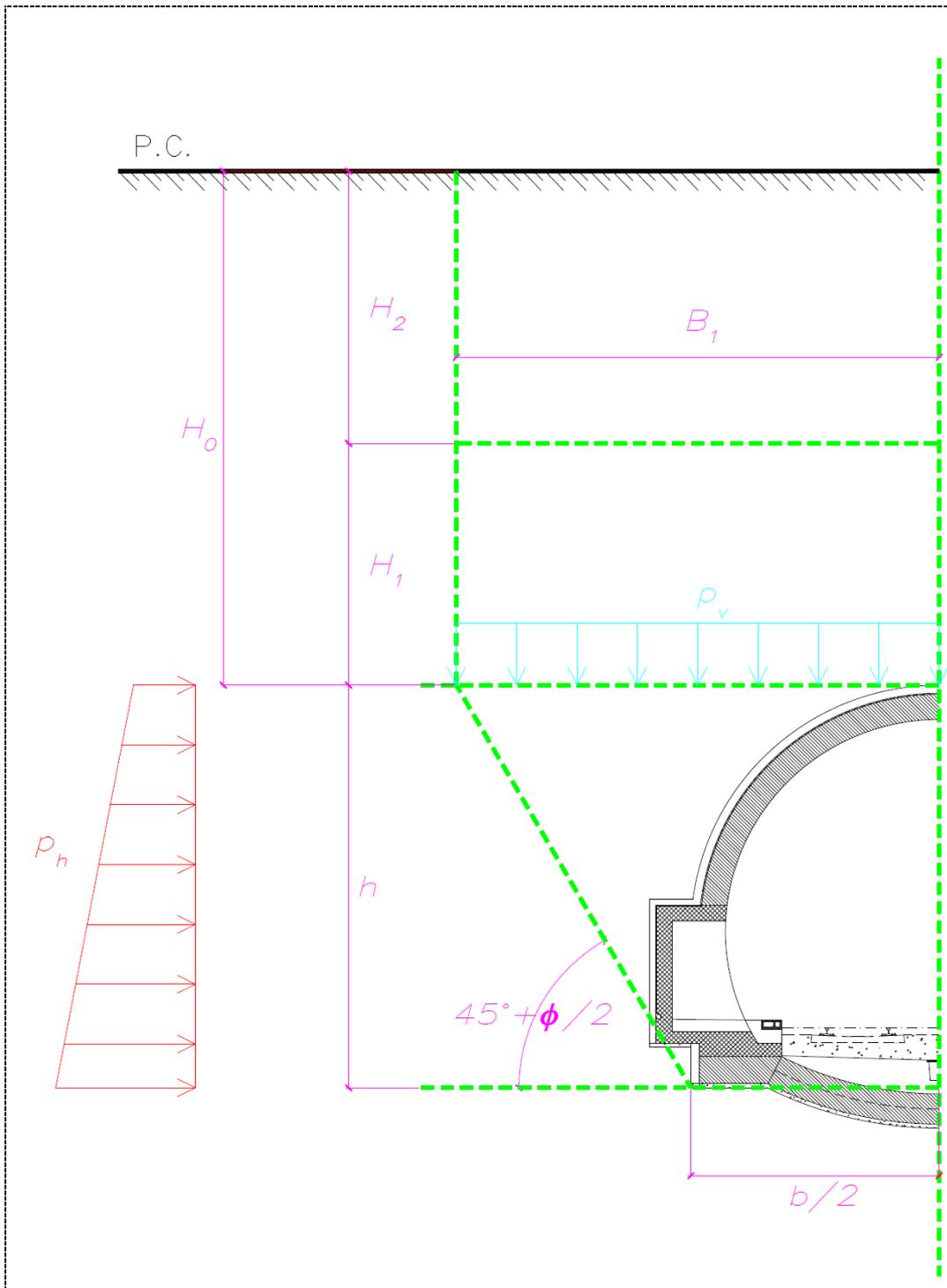


Figura 148: Schema calcolo azioni su cavità sotterranea secondo Terzaghi



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo bypass carrabili e pedonali

La trattazione teorica riportata è propria di un terreno omogeneo senza presenza di acqua. Ai fini del calcolo e sulla base dell'ubicazione delle nicchie SOS, il terreno è stato considerato omogeneo con le seguenti caratteristiche ("Unità 7"):

γ	=	20 kN/mc	peso specifico del terreno
φ	=	25°	angolo di attrito
c'	=	0 kPa	coesione efficace del terreno

Per considerare la presenza dell'acqua è stato, in primo luogo, aggiunto il carico idrostatico a p_h e p_v . In secondo luogo è stata modificata la stessa calcolazione alla Terzaghi considerando un peso specifico del terreno equivalente che tenesse in considerazione la presenza dell'acquifero principale nel versante, con il peso specifico efficace del terreno $\gamma' = 10$ kN/mc.

H_{falda} :	carico idraulico in m al di sopra della nicchia SOS
H_{ricopr} :	copertura di terreno
h^* :	altezza di terreno senza acqua
γ^*	$= (\gamma \cdot h^* + \gamma' \cdot H_{falda}) / H_{ricopr}$ peso specifico equivalente del terreno



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco Il Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo bypass carrabili e pedonali

Pk	675.90	825.90	975.90	1125.90	1275.90	1425.90	1575.90	1725.90	1875.90	2025.90	m	progressiva della nicchia (canna di monte)
H _{flda}	0.00	0.00	0.00	6.30	18.40	27.40	37.20	43.40	44.80	44.80	m	carico idraulico in termini di [m] di acqua sopra la nicchia SOS (valutata rispetto all'asse galleria)
H _{ricopr}	7.20	18.40	26.60	46.60	57.00	61.60	73.60	71.20	94.00	94.00	m	copertura (valutata rispetto all'asse galleria)
h*	7.20	18.40	26.60	40.30	38.60	34.20	36.40	27.80	49.20	49.20	m	altezza di terreno senza acqua
γ	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	kN/mc	peso specifico del terreno
γ'	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	kN/mc	peso specifico efficace del terreno
Valutazione pressioni verticali ed orizzontali su una cavità sotterranea												
Terzaghi (1946)												
b	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	m	base della cavità sotterranea
h	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	m	altezza della cavità sotterranea
H ₀	7.2	18.4	26.6	46.6	57.0	61.6	73.6	71.2	94.0	94.0	m	copertura
K	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-	coefficiente sperimentale considerato pari a 1
γ*	20.0	20.0	20.0	18.6	16.8	15.6	14.9	13.9	15.2	15.2	kN/mc	peso specifico equivalente del terreno
φ	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	°	angolo di attrito del terreno
φ	0.436	0.436	0.436	0.436	0.436	0.436	0.436	0.436	0.436	0.436	rad	angolo di attrito del terreno
c	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	kN/mq	coesione efficace del terreno
λ _a	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	-	coefficiente di spinta attiva
λ _p	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46	-	coefficiente di spinta passiva
B ₁	16.49	16.49	16.49	16.49	16.49	16.49	16.49	16.49	16.49	16.49	m	
H ₁	-	-	-	-	-	-	-	-	82.44	82.44	m	
H ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	11.56	11.56	m	
p _v	130.28	286.90	373.89	482.86	474.73	453.58	462.53	426.00	503.42	503.42	kN/mq	pressione verticale sulla cavità sotterranea
p _{h_min}	52.88	116.44	151.75	195.97	192.67	184.09	187.72	172.90	204.32	204.32	kN/mq	pressione orizzontale sulla cavità sotterranea (valore minimo)
p _{h_max}	200.00	263.57	298.87	343.09	339.80	331.21	334.84	320.02	351.44	351.44	kN/mq	pressione orizzontale sulla cavità sotterranea (valore massimo)
p _{h_media}	126.44	190.00	225.31	269.53	266.23	257.65	261.28	246.46	277.88	277.88	kN/mq	pressione orizzontale sulla cavità sotterranea (valore medio)
Contributo spinta acqua												
p _{H2O}	0.00	0.00	0.00	63.00	184.00	274.00	372.00	434.00	448.00	448.00	kN/mq	pressione dovuta all'acqua
p _{tot_v}	130.28	286.90	373.89	545.86	658.73	727.58	834.53	860.00	951.42	951.42	kN/mq	pressione media totale verticale
p _{tot_H}	126.44	190.00	225.31	332.53	450.23	531.65	633.28	680.46	725.88	725.88	kN/mq	pressione media totale orizzontale

Figura 149: Calcolo azioni sugli elementi delle nicchie SOS (1/2)



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco Il Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo bypass carrabili e pedonali

Pk	2175.90	2325.90	2475.90	2625.90	2775.90	2925.90	3075.90	3225.90	3375.90	3525.90	3643.13	m	progressiva della nicchia (canna di monte)
H _{idra}	48.20	50.00	51.20	52.60	54.20	52.00	50.80	46.60	40.20	18.20	0.00	m	carico idraulico in termini di [m] di acqua sopra la nicchia SOS (valutata rispetto all'asse galleria)
H _{ricopr}	75.40	67.40	77.60	68.60	57.60	60.00	74.00	57.80	43.00	28.00	19.00	m	copertura (valutata rispetto all'asse galleria)
h*	27.20	17.40	26.40	16.00	3.40	8.00	23.20	11.20	2.80	9.80	19.00	m	altezza di terreno senza acqua
γ	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	kN/mc	peso specifico del terreno
γ'	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	kN/mc	peso specifico efficace del terreno
Valutazione pressioni verticali ed orizzontali su una cavità sotterranea Terzaghi (1946)													
b	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	m	base della cavità sotterranea
h	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	m	altezza della cavità sotterranea
H ₀	75.4	67.4	77.6	68.6	57.6	60.0	74.0	57.8	43.0	28.0	19.0	m	copertura
K	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-	coefficiente sperimentale considerato pari a 1
γ*	13.6	12.6	13.4	12.3	10.6	11.3	13.1	11.9	10.7	13.5	20.0	kN/mc	peso specifico equivalente del terreno
φ	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	°	angolo di attrito del terreno
φ'	0.436	0.436	0.436	0.436	0.436	0.436	0.436	0.436	0.436	0.436	0.436	rad	angolo di attrito del terreno
c	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	kN/mq	coesione efficace del terreno
λ _a	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	-	coefficiente di spinta attiva
λ _p	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46	-	coefficiente di spinta passiva
B ₁	16.49	16.49	16.49	16.49	16.49	16.49	16.49	16.49	16.49	16.49	16.49	m	
H ₁	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	m	
H ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	m	
p _v	424.09	378.73	421.08	373.39	301.01	327.29	407.15	339.78	264.99	261.11	293.97	kN/mq	pressione verticale sulla cavità sotterranea
p _{h_min}	172.12	153.71	170.90	151.54	122.17	132.83	165.25	137.90	107.55	105.97	119.31	kN/mq	pressione orizzontale sulla cavità sotterranea (valore minimo)
p _{h_max}	319.25	300.84	318.02	298.67	269.29	279.96	312.37	285.03	254.67	253.10	266.44	kN/mq	pressione orizzontale sulla cavità sotterranea (valore massimo)
p _{h_media}	245.68	227.27	244.46	225.11	195.73	206.40	238.81	211.46	181.11	179.53	192.87	kN/mq	pressione orizzontale sulla cavità sotterranea (valore medio)
Contributo spinta acqua													
p _{H2O}	482.00	500.00	512.00	526.00	542.00	520.00	508.00	466.00	402.00	182.00	0.00	kN/mq	pressione dovuta all'acqua
p _{tot_v}	906.09	878.73	933.08	899.39	843.01	847.29	915.15	805.78	666.99	443.11	293.97	kN/mq	pressione media totale verticale
p _{tot_H}	727.68	727.27	756.46	751.11	737.73	726.40	746.81	677.46	583.11	361.53	192.87	kN/mq	pressione media totale orizzontale

Figura 150: Calcolo azioni sugli elementi delle nicchie SOS (2/2)

12.2. PARETE DI CHIUSURA: MODELLO DI CALCOLO

Per il calcolo delle azioni interne nella parete di chiusura e nelle pareti laterali è stato utilizzato un modello di calcolo con elementi di piastra di spessore 50 cm. La piastra ha dimensioni 2.90 x 3.80 m ed è realizzata con calcestruzzo C32/40 ($E_c = 33643$ MPa).

Al fine di tarare al meglio i quantitativi di armatura sono state analizzate due condizioni di carico, sulla scorta dei carichi orizzontali e verticali determinati in precedenza.

Situazione 1: $p_h = 590$ kN/mq

$p_v = 600$ kN/mq

Situazione 2: $p_h = 760$ kN/mq

$p_v = 800$ kN/mq

La Situazione 1 è caratteristica delle nicchie SOS alle pk (canna di monte):

0+675.90, 0+825.90, 0+975.90, 1+125.90, 3+525.90, 3+643.13.

La Situazione 2 è caratteristica delle nicchie SOS alle pk (canna di monte):

1+275.90, 1+425.90, 1+575.90, 1+725.90, 1+875.90, 2+025.90, 2+175.90, 2+325.90,
2+475.90, 2+625.90, 2+775.90, 2+925.90, 3+075.90, 3+225.90, 3+375.90

12.2.1. Situazione 1: modello di calcolo e risultati

Si riportano nel seguito una serie di immagini rappresentative della modellazione eseguita per la parete di chiusura, per la Situazione 1.

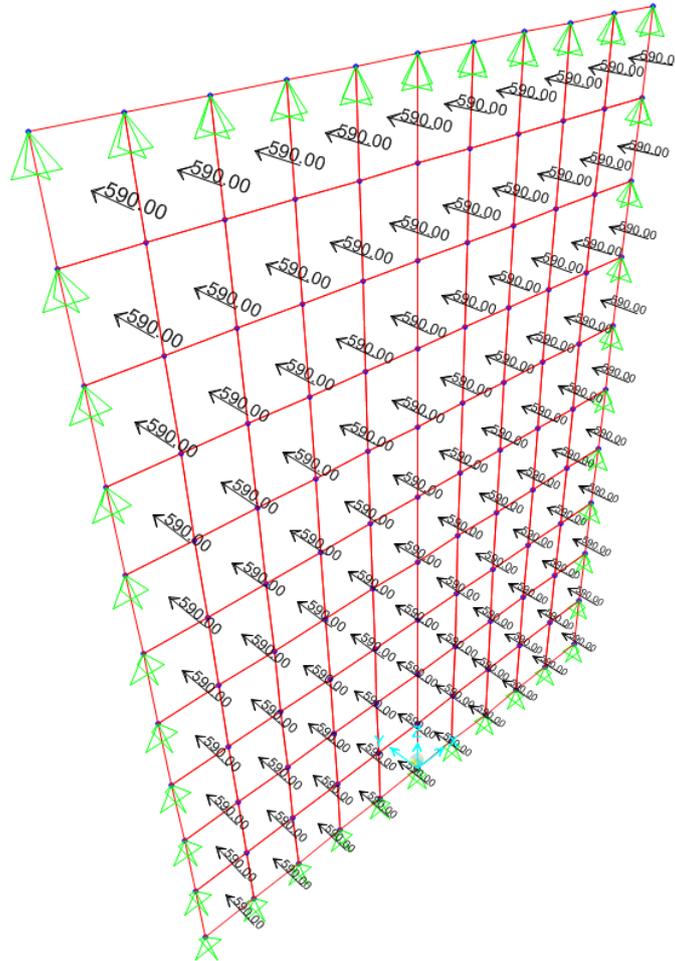


Figura 151: Situazione 1 – Modello di calcolo e carico agente

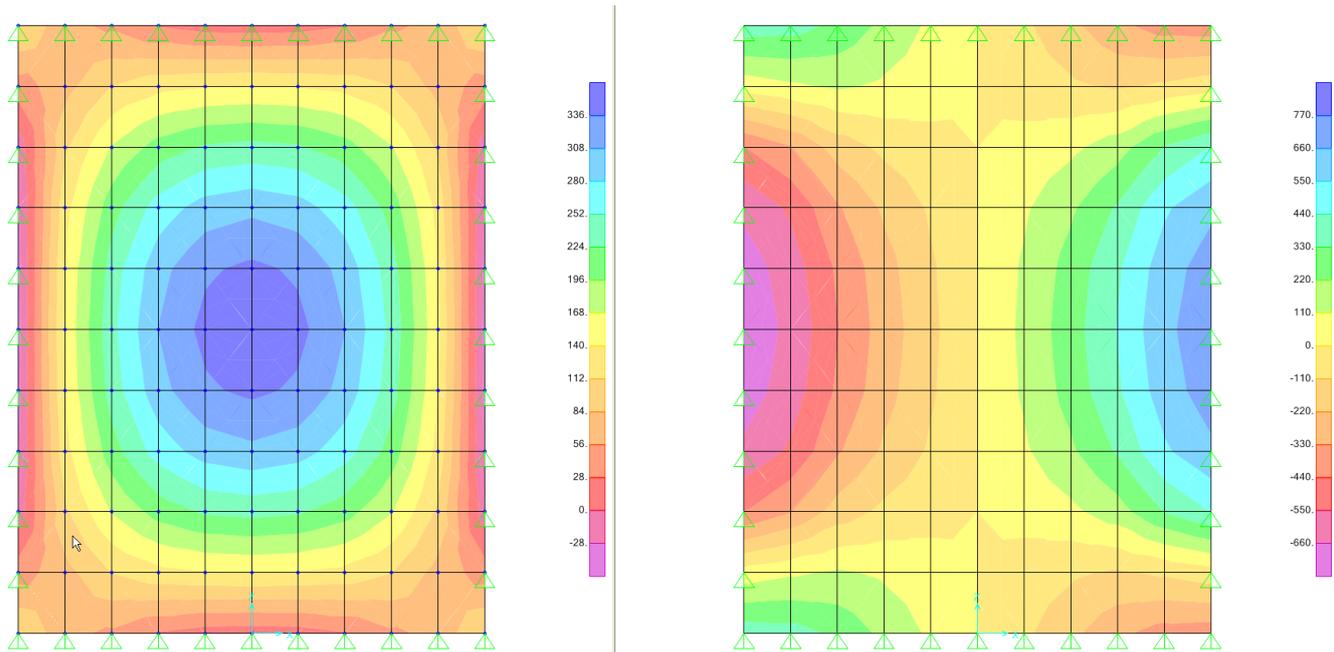


Figura 152: Situazione 1 – Momento M11 [kNm/m] e taglio V13 [kN/m]

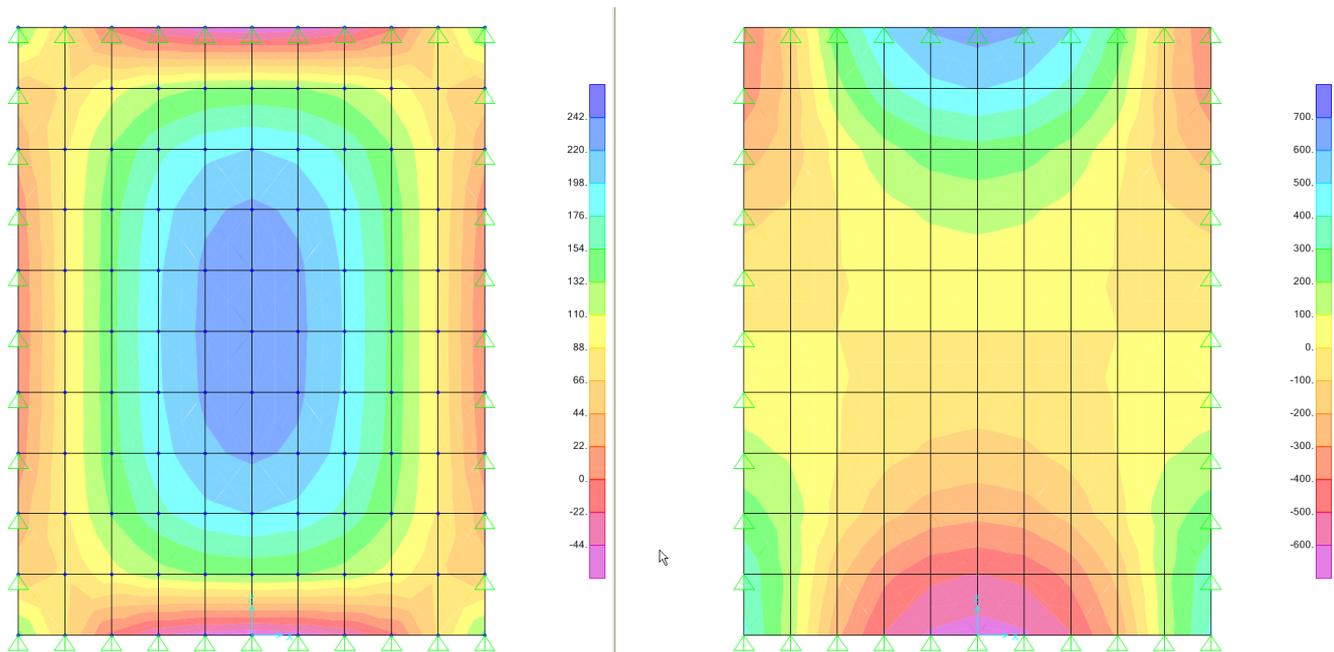


Figura 153: Situazione 1 – Momento M22 [kNm/m] e taglio V23 [kN/m]

12.2.2. Situazione 2: modello di calcolo e risultati

Si riportano nel seguito una serie di immagini rappresentative della modellazione eseguita per la parete di chiusura, per la Situazione 2.

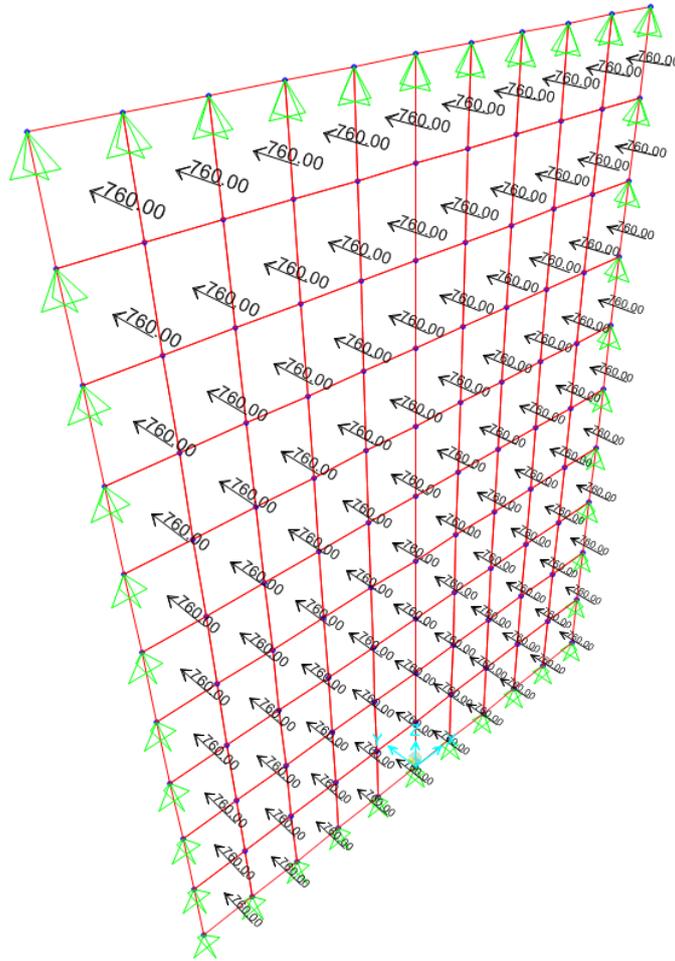


Figura 154: Situazione 2 – Modello di calcolo e carico agente

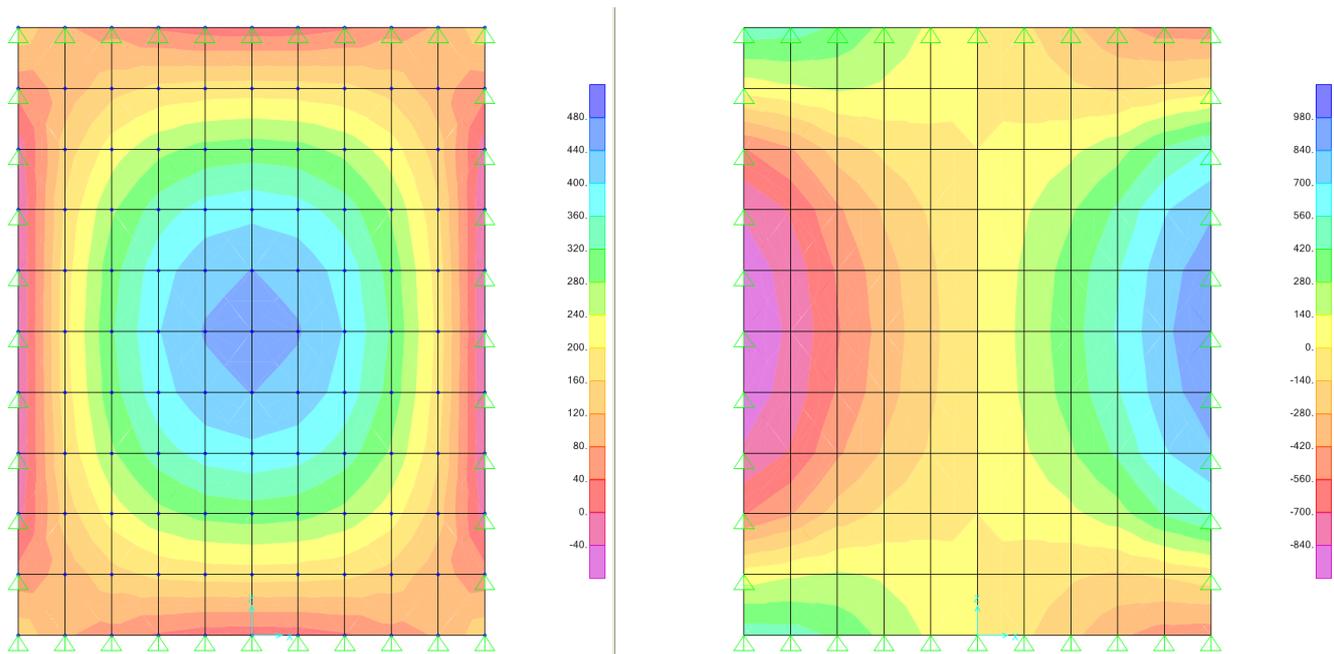


Figura 155: Situazione 2 – Momento M11 [kNm/m] e taglio V13 [kN/m]

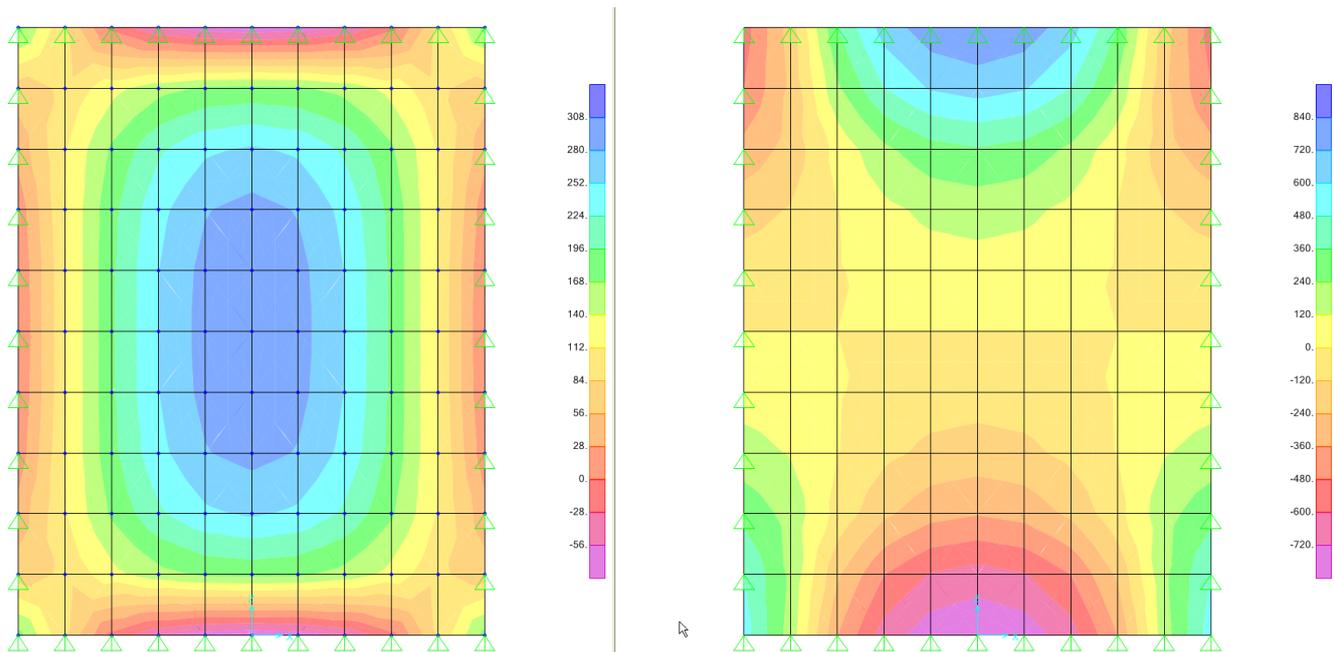


Figura 156: Situazione 2 – Momento M22 [kNm/m] e taglio V23 [kN/m]

12.3. PARETE DI CHIUSURA: VERIFICHE SEZIONALI SITUAZIONE 1

12.3.1. Lato corto (azioni M11 – V13)

La verifica sezionale per l'armatura disposta sul lato corto della parete di chiusura è stata eseguita per una sezione tipica con dimensioni 100 x 70 cm. La sezione di mezzeria della parete è la più sollecitata e ha spessore pari a 70 cm.

Sono state previste barre $\varnothing 24 / 20$ all'intradosso ed all'estradosso. L'armatura a taglio è costituita da spilli $\varnothing 16 / 20 \times 20$.

Le azioni di progetto, per le verifiche allo Stato Limite di Esercizio, tratte dal modello di calcolo, sono quindi:

$$N = p_v \cdot sp. = 600 \text{ kN/mq} \cdot 0.50 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} = 300 \text{ kN}$$

$$M = 356 \text{ kNm}$$

$$V = 734 \text{ kN}$$

Le azioni di progetto, per le verifiche allo Stato Limite Ultimo, sono state moltiplicate per il coefficiente 1.30:

$$N = 300 \text{ kN}$$

$$M = 356 \text{ kNm} \cdot 1.30 = 462.8 \text{ kNm}$$

$$V = 734 \text{ kN} \cdot 1.30 = 954.2 \text{ kN}$$

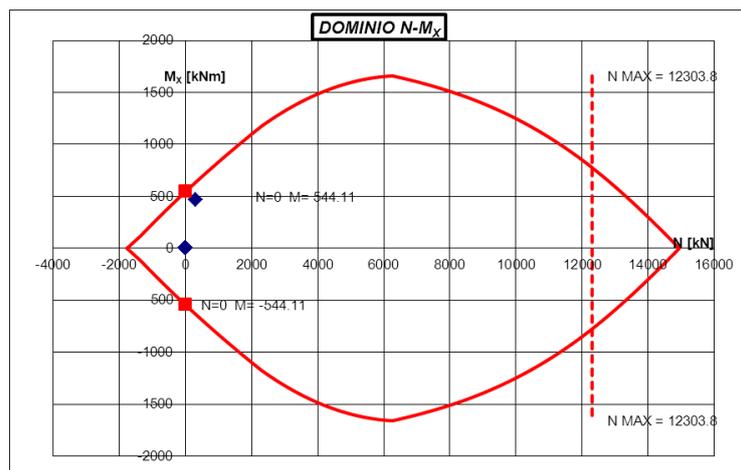


Figura 157: Dominio di resistenza allo Stato Limite Ultimo



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass

		Verifica tensioni in esercizio						Verifica fessurazione				
[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[kNm]	Mf > M ?	[mm]	[mm]
N	M _x	σ _c max	σ _c min	σ _s max	σ _s min	σ _s ' max	σ _s ' min	k 3	M form fess		wk' limite	wk'
300.0	356.0	6.30	-	209.0	209.0	-65.0	-65.0	0.125	341.21	NO	0.300	0.213

Le verifiche allo Stato Limite Ultimo e di Esercizio sono soddisfatte.

La sezione di calcestruzzo 100 x 70, considerando un angolo di inclinazione della biella di calcestruzzo di 35° (nel traliccio di Morsch), armata con spilli φ16 / 20 x 20, fornisce una resistenza a taglio V_{Rd} pari a 1469 kN. La verifica a taglio è quindi soddisfatta.

12.3.2. Lato lungo (azioni M22 – V23)

La verifica sezionale per l'armatura disposta sul lato lungo della parete di chiusura è stata eseguita per una sezione tipica con dimensioni 100 x 70 cm. La sezione di mezzera della parete è la più sollecitata e ha spessore pari a 70 cm.

Sono state previste barre φ20 / 20 all'intradosso ed all'estradosso. L'armatura a taglio è costituita da spilli φ16 / 20x20.

Le azioni di progetto, per le verifiche allo Stato Limite di Esercizio, tratte dal modello di calcolo, sono quindi:

$$N = p_v \cdot sp. = 600 \text{ kN/mq} \cdot 0.50 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} = 300 \text{ kN}$$

$$M = 241 \text{ kNm}$$

$$V = 648 \text{ kN}$$

Le azioni di progetto, per le verifiche allo Stato Limite Ultimo, sono state moltiplicate per il coefficiente 1.30:

$$N = 300 \text{ kN}$$

$$M = 241 \text{ kNm} \cdot 1.30 = 313.3 \text{ kNm}$$

$$V = 648 \text{ kN} \cdot 1.30 = 842.4 \text{ kN}$$

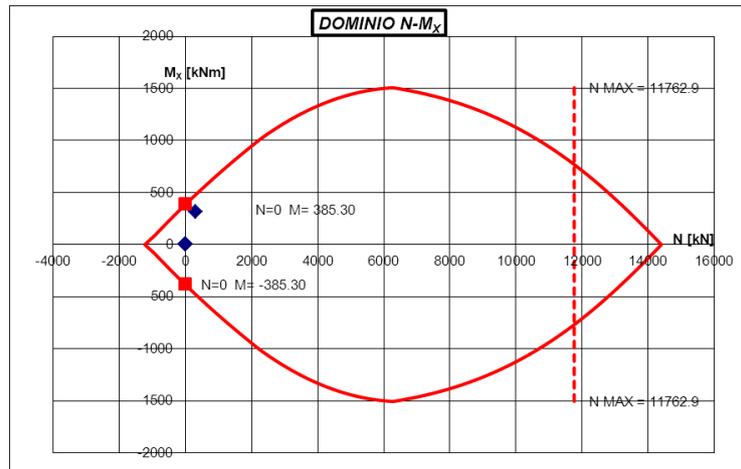


Figura 158: Dominio di resistenza allo Stato Limite Ultimo

		Verifica tensioni in esercizio						Verifica fessurazione				
[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[kNm]	Mf > M ?	wk' limite	[mm]
N	M _X	σ _c max	σ _c min	σ _s max	σ _s min	σ _s ' max	σ _s ' min	k 3	M form fess	SI	0,300	OK
300.0	241.0	5.01	-	171.7	171.7	-52.0	-52.0	0.125	325.61	SI	0,300	OK

Le verifiche allo Stato Limite Ultimo e di Esercizio sono soddisfatte.

La sezione di calcestruzzo 100 x 70, considerando un angolo di inclinazione della biella di calcestruzzo di 35° (nel traliccio di Morsch), armata con spilli φ16 / 20 x 20, fornisce una resistenza a taglio V_{Rd} pari a 1469 kN. La verifica a taglio è quindi soddisfatta.

12.4. PARETE DI CHIUSURA: VERIFICHE SEZIONALI SITUAZIONE 2

12.4.1. Lato corto (azioni M11 – V13)

La verifica sezionale per l'armatura disposta sul lato corto della parete di chiusura è stata eseguita per una sezione tipica con dimensioni 100 x 70 cm. La sezione di mezzeria della parete è la più sollecitata e ha spessore pari a 70 cm.

Sono state previste barre $\varnothing 20 / 10$ all'intradosso ed all'estradosso. L'armatura a taglio è costituita da spilli $\varnothing 16 / 20 \times 20$.

Le azioni di progetto, per le verifiche allo Stato Limite di Esercizio, tratte dal modello di calcolo, sono quindi:

$$N = p_v \cdot sp. = 800 \text{ kN/mq} \cdot 0.50 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} = 400 \text{ kN}$$

$$M = 460 \text{ kNm}$$

$$V = 946 \text{ kN}$$

Le azioni di progetto, per le verifiche allo Stato Limite Ultimo, sono state moltiplicate per il coefficiente 1.30:

$$N = 400 \text{ kN}$$

$$M = 460 \text{ kNm} \cdot 1.30 = 598.0 \text{ kNm}$$

$$V = 946 \text{ kN} \cdot 1.30 = 1229.8 \text{ kN}$$

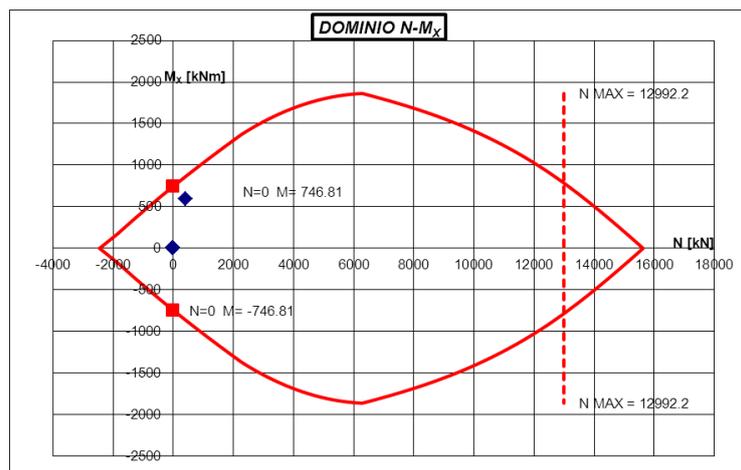


Figura 159: Dominio di resistenza allo Stato Limite Ultimo



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass

		Verifica tensioni in esercizio						Verifica fessurazione				
[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[kNm]	Mf > M ?	[mm]	[mm]
N	M _x	σ _c max	σ _c min	σ _s max	σ _s min	σ _s ' max	σ _s ' min	k ₃	M form fess		wk' limite	wk'
400.0	460.0	6.94	-	194.9	194.9	-76.1	-76.1	0.125	375.90	NO	0.300	0.193

Le verifiche allo Stato Limite Ultimo e di Esercizio sono soddisfatte.

La sezione di calcestruzzo 100 x 70, considerando un angolo di inclinazione della biella di calcestruzzo di 35° (nel traliccio di Morsch), armata con spilli φ16 / 20 x 20, fornisce una resistenza a taglio V_{Rd} pari a 1469 kN. La verifica a taglio è quindi soddisfatta.

12.4.2. Lato lungo (azioni M22 – V23)

La verifica sezionale per l'armatura disposta sul lato lungo della parete di chiusura è stata eseguita per una sezione tipica con dimensioni 100 x 70 cm. La sezione di mezzera della parete è la più sollecitata e ha spessore pari a 70 cm.

Sono state previste barre φ20 / 20 all'intradosso ed all'estradosso. L'armatura a taglio è costituita da spilli φ16 / 20x20.

Le azioni di progetto, per le verifiche allo Stato Limite di Esercizio, tratte dal modello di calcolo, sono quindi:

$$N = p_v \cdot sp. = 800 \text{ kN/mq} \cdot 0.50 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} = 400 \text{ kN}$$

$$M = 311 \text{ kNm}$$

$$V = 835 \text{ kN}$$

Le azioni di progetto, per le verifiche allo Stato Limite Ultimo, sono state moltiplicate per il coefficiente 1.30:

$$N = 400 \text{ kN}$$

$$M = 311 \text{ kNm} \cdot 1.30 = 404.3 \text{ kNm}$$

$$V = 835 \text{ kN} \cdot 1.30 = 1085.5 \text{ kN}$$

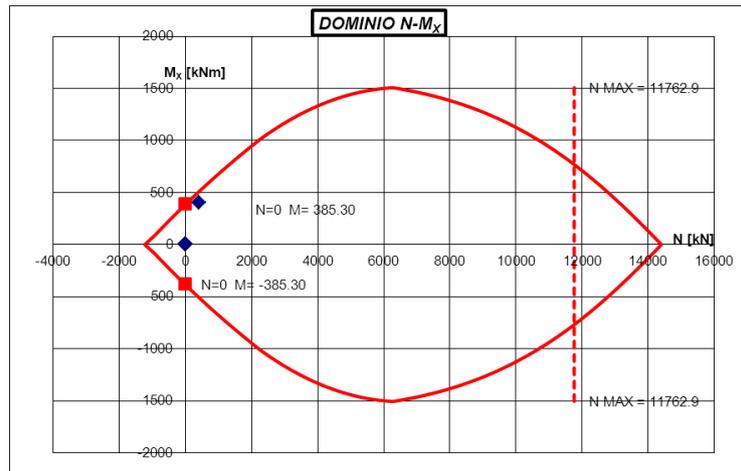


Figura 160: Dominio di resistenza allo Stato Limite Ultimo

		Verifica tensioni in esercizio						Verifica fessurazione				
[kN]	[kNm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[kNm]	Mf > M ?	wk' limite	[mm]
N	M _X	σ _c max	σ _c min	σ _s max	σ _s min	σ _s ' max	σ _s ' min	k 3	M form fess	SI		OK
400.0	311.0	6.46	-	218.0	218.0	-67.4	-67.4	0.125	338.05	SI	0.300	OK

Le verifiche allo Stato Limite Ultimo e di Esercizio sono soddisfatte.

La sezione di calcestruzzo 100 x 70, considerando un angolo di inclinazione della biella di calcestruzzo di 35° (nel traliccio di Morsch), armata con spilli $\phi 16 / 20 \times 20$, fornisce una resistenza a taglio V_{Rd} pari a 1469 kN. La verifica a taglio è quindi soddisfatta.

13. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Oggetto della presente relazione tecnica e di calcolo sono state le verifiche statiche svolte per il dimensionamento e la verifica degli interventi previsti per la realizzazione dei by-pass della galleria naturale Verduno, sia in termini di interventi di consolidamento e confinamento del fronte di scavo, sia in termini di rivestimenti di prima fase e definitivi.

Le analisi numeriche hanno indagato le condizioni di stabilità del fronte e le tipologie di consolidamento previste, nonché la verifica dei rivestimenti definitivi e degli innesti con la galleria principale rivestita con conci prefabbricati.

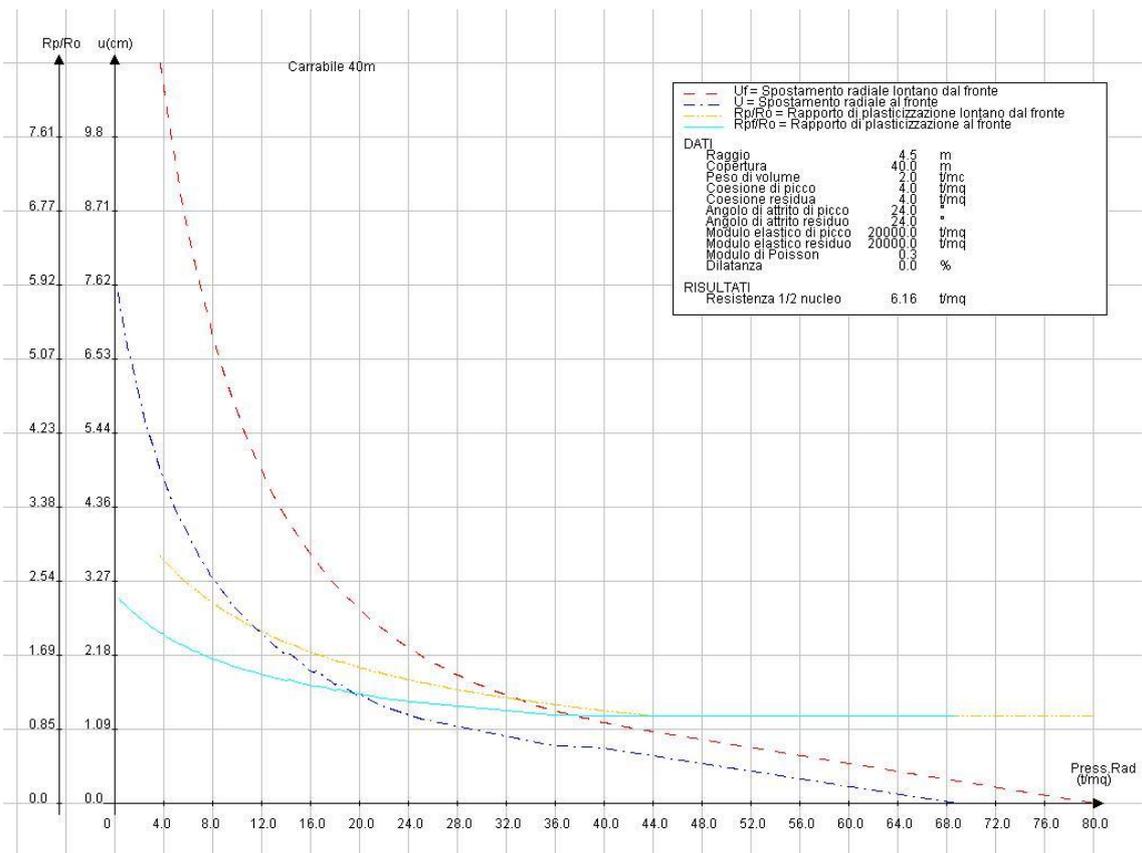
Sono state svolte, attraverso il codice di calcolo alle differenze finite FLAC 7.0, analisi in corrispondenza di diverse sezioni ritenute rappresentative. Per ogni caso le verifiche condotte hanno verificato l'adeguatezza delle soluzioni progettuali adottate.

Le zone di innesto dei bypass carrabili e pedonali e delle nicchie SOS con la galleria principale sono state studiate con l'ausilio di modelli di calcolo 3D specifici per ciascuna zona di imbocco.

14. ALLEGATI NUMERICI

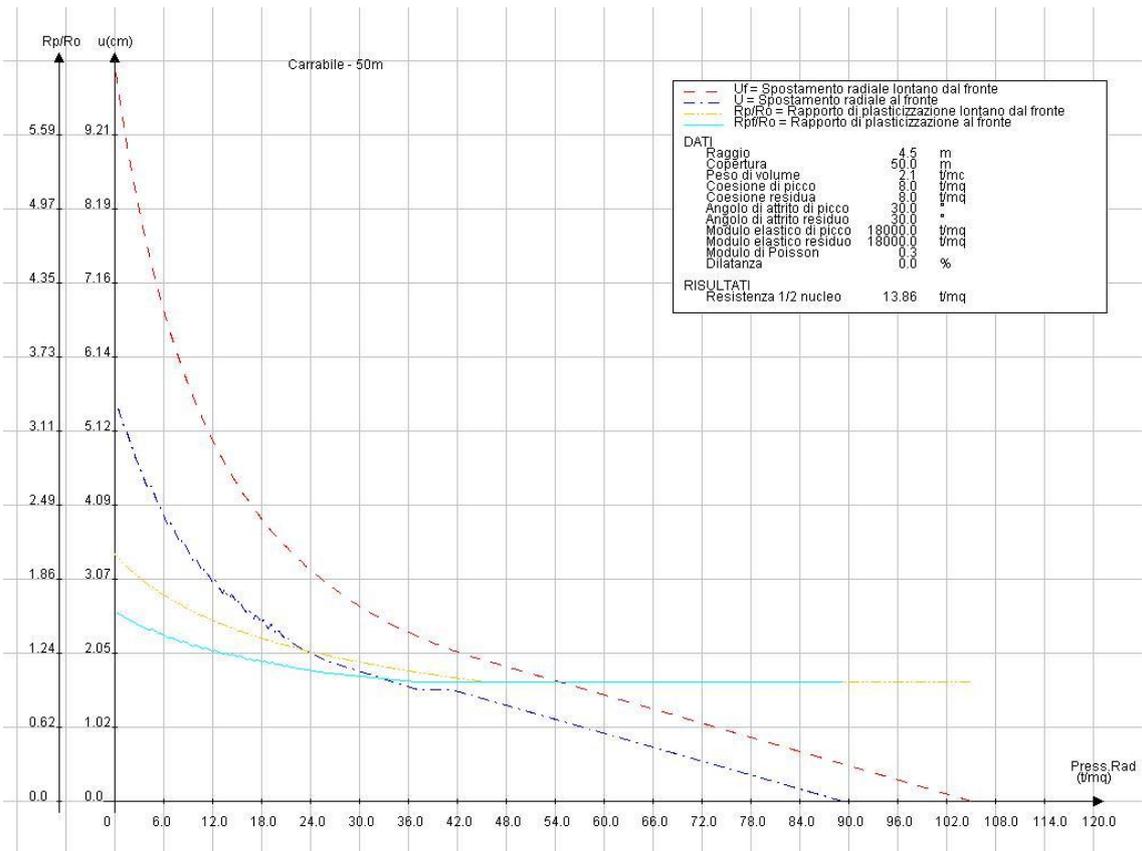
14.1. LINEE CARATTERISTICHE

14.1.1. DIAGNOSI



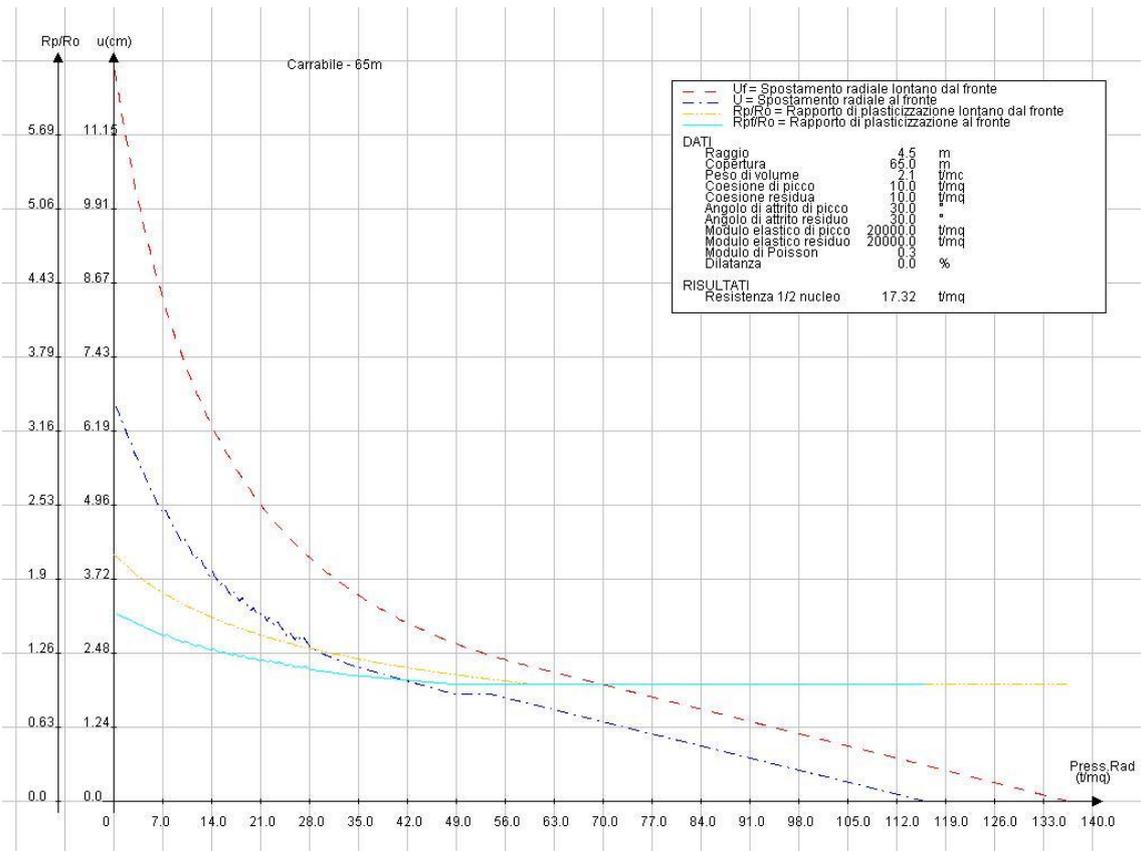


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



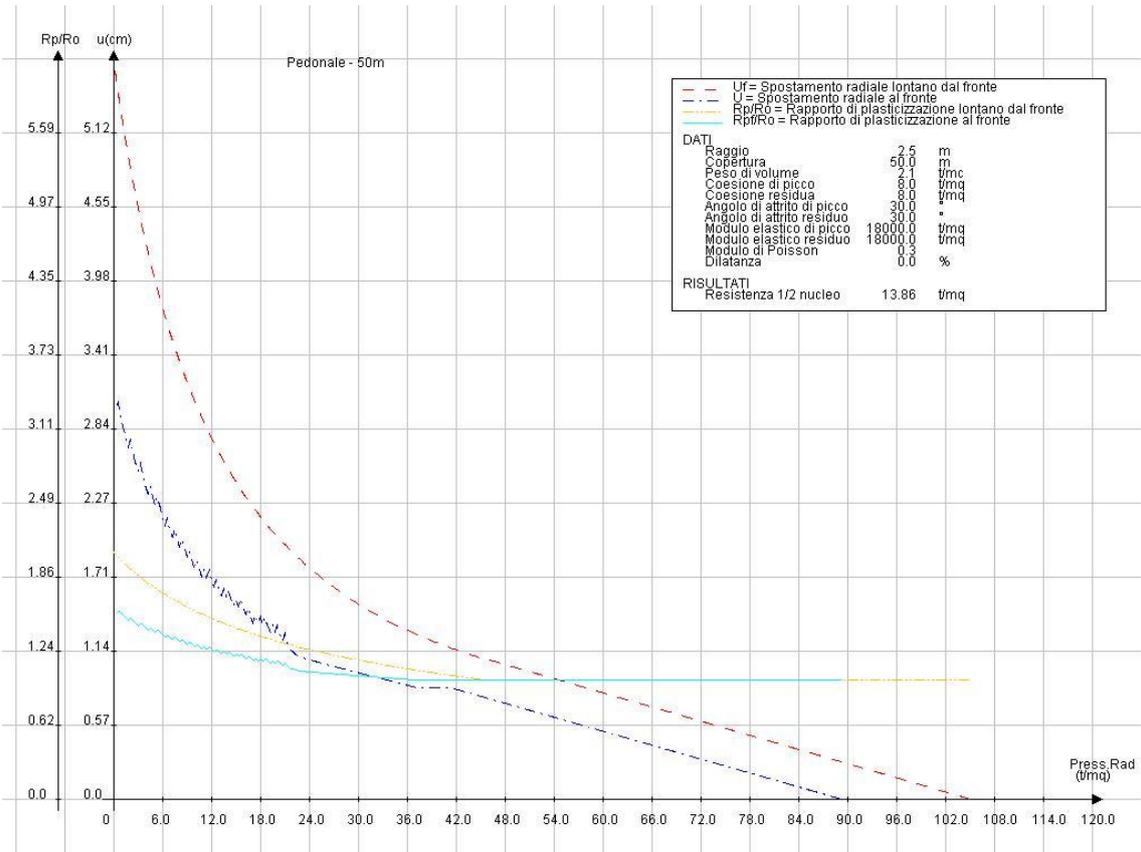


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



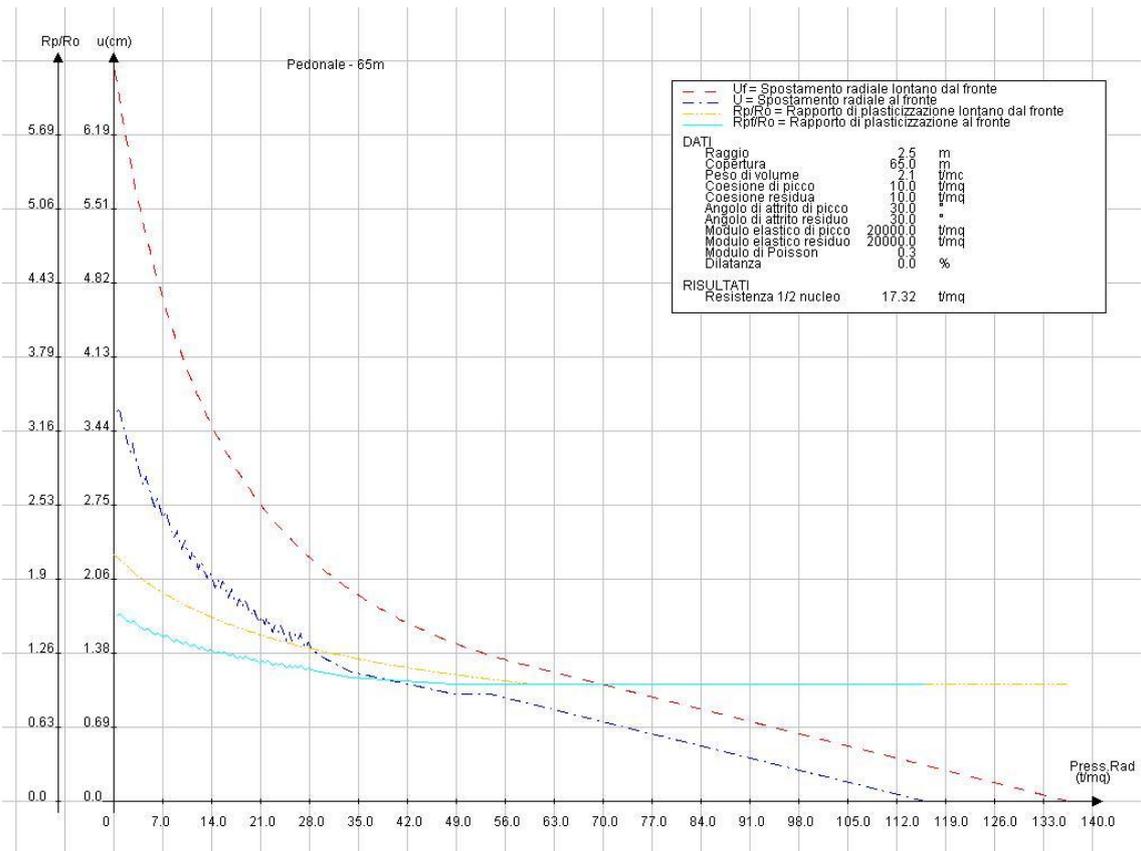


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass





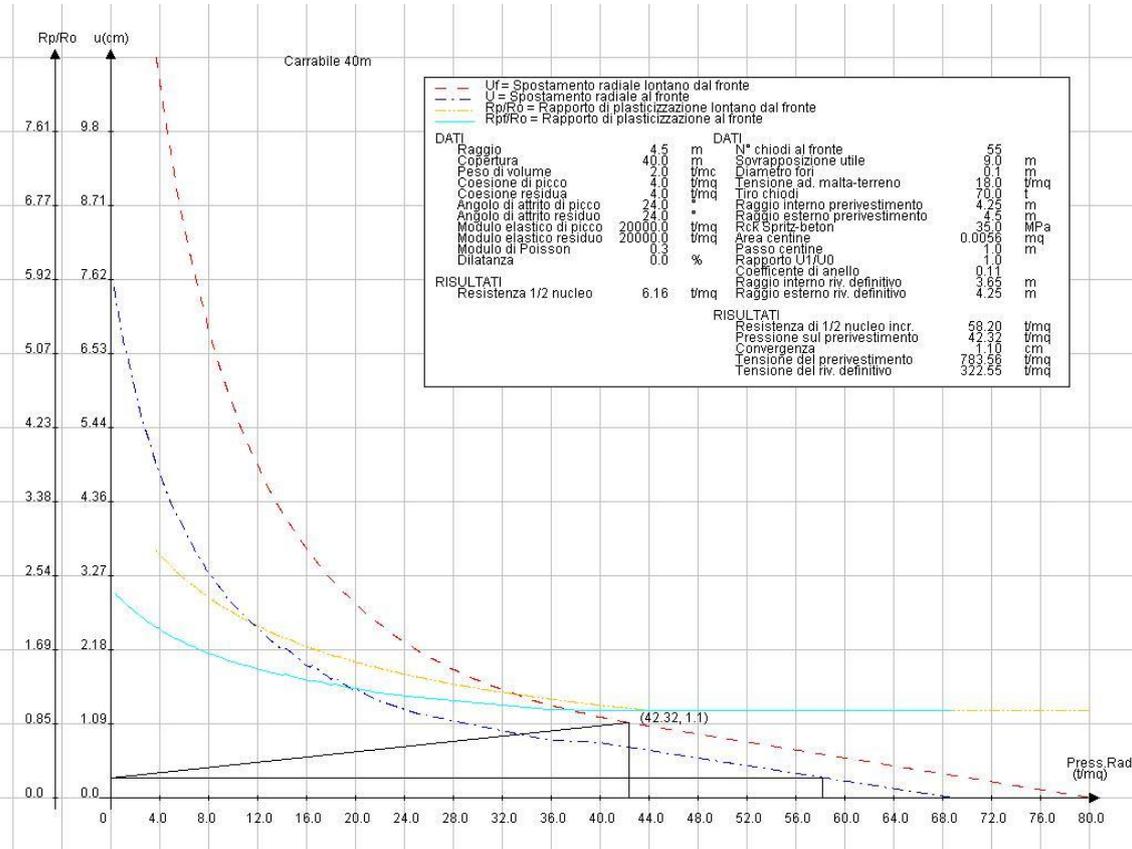
Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass





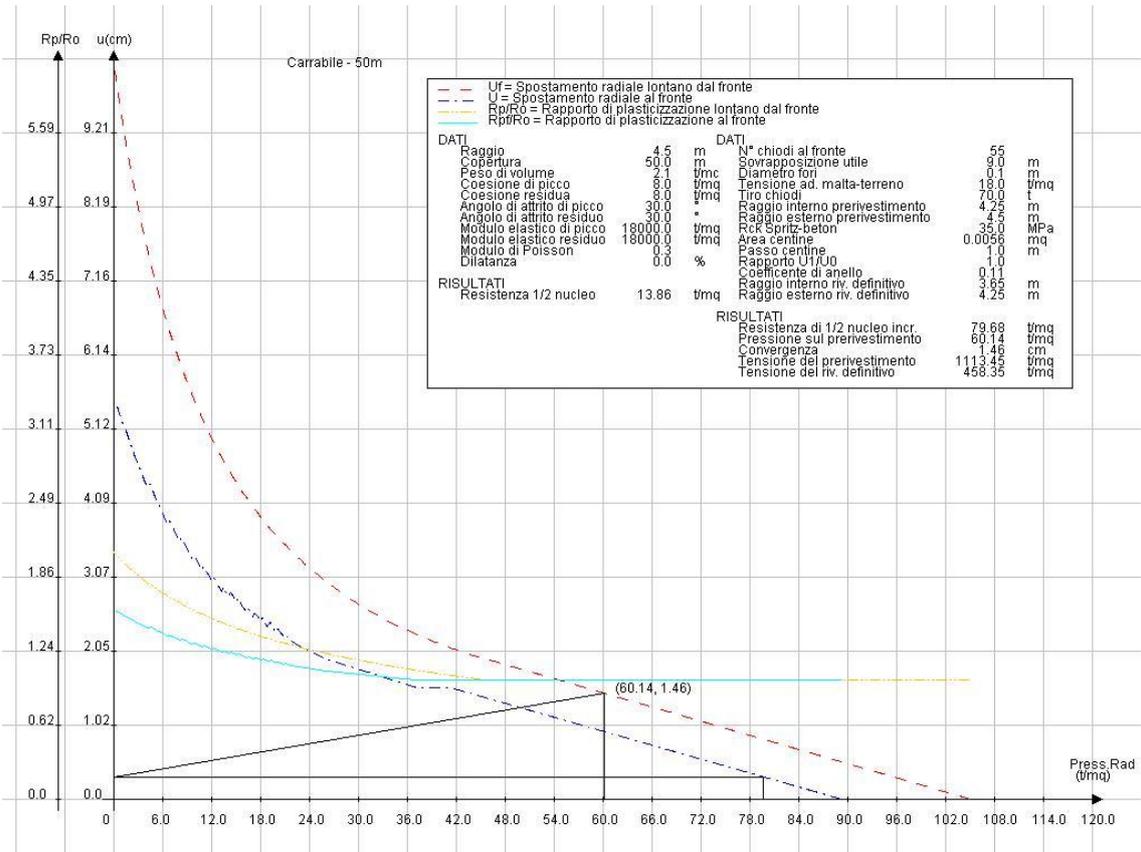
Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass

14.1.2. TERAPIA



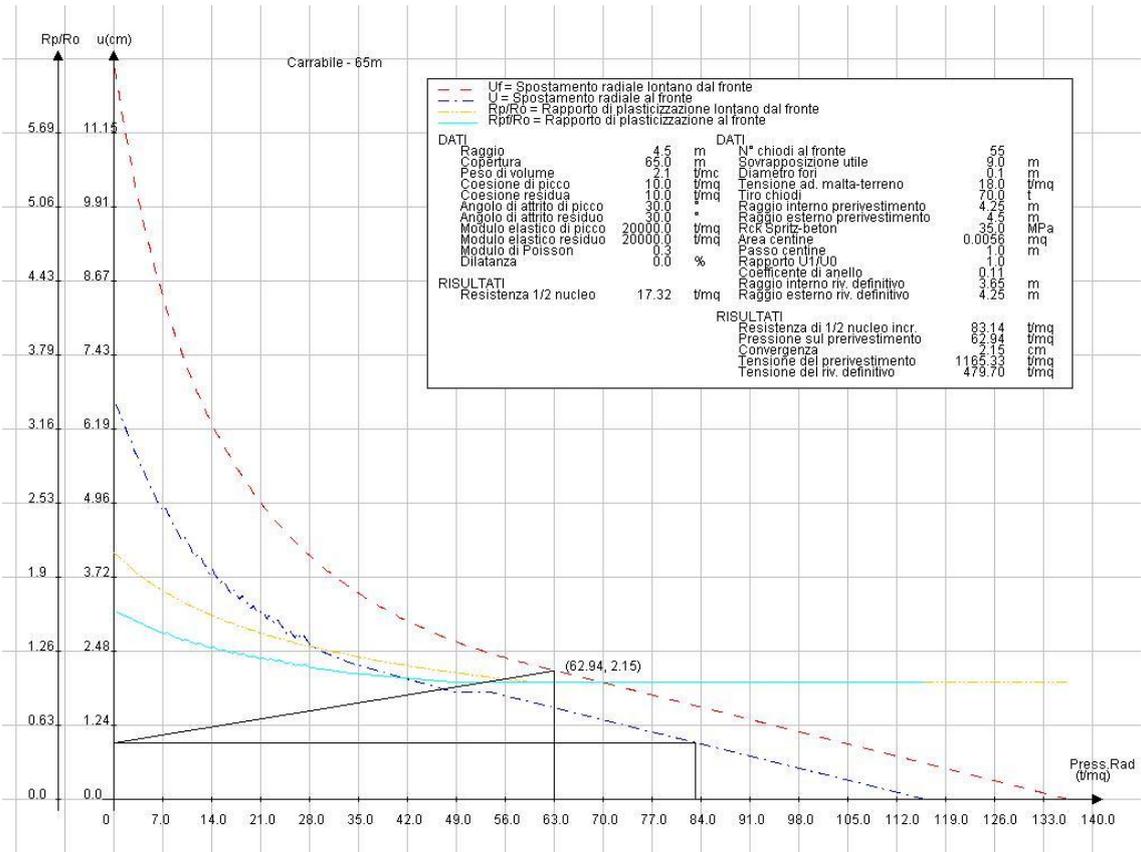


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



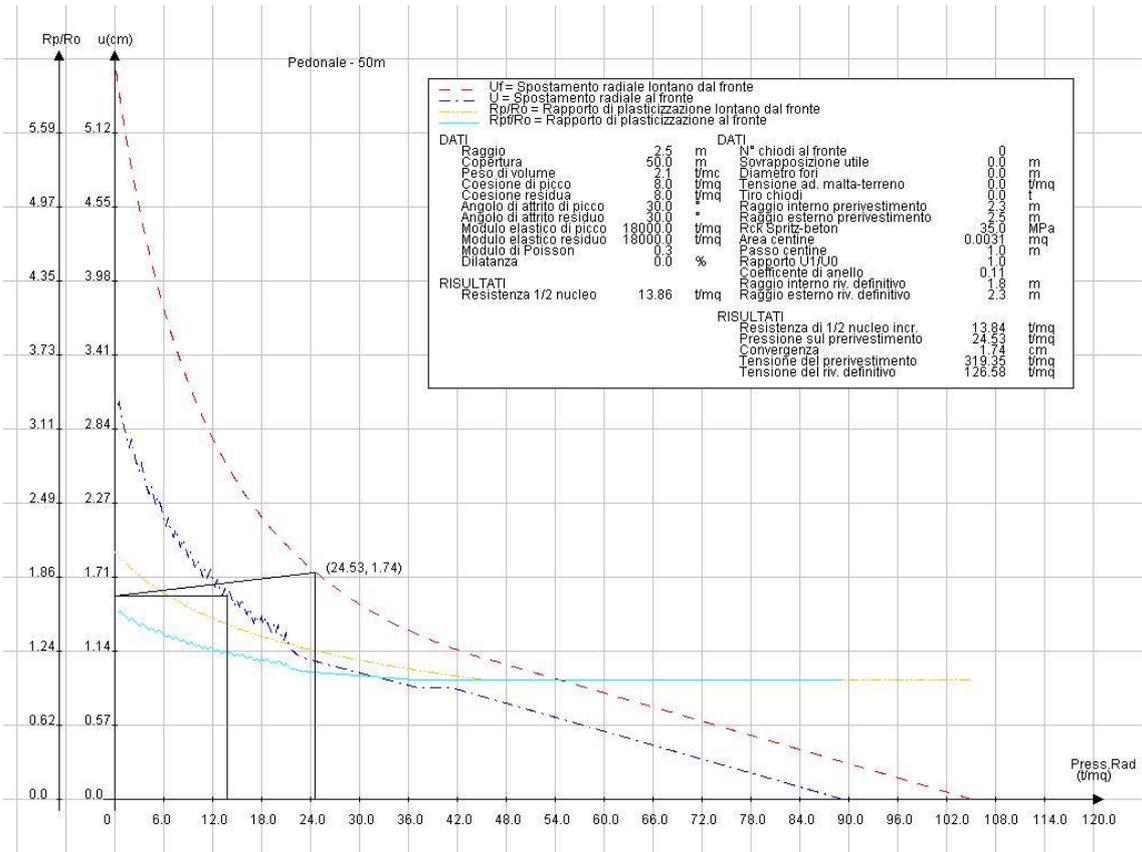


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



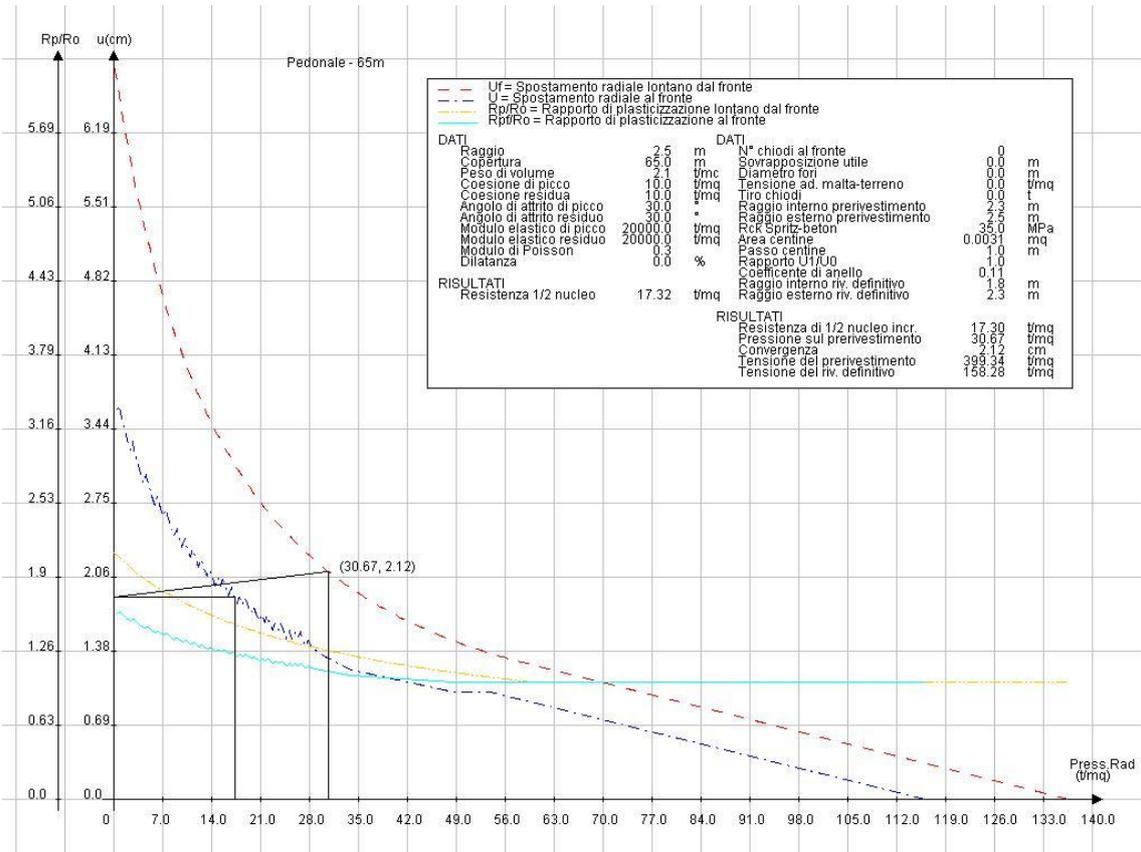


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



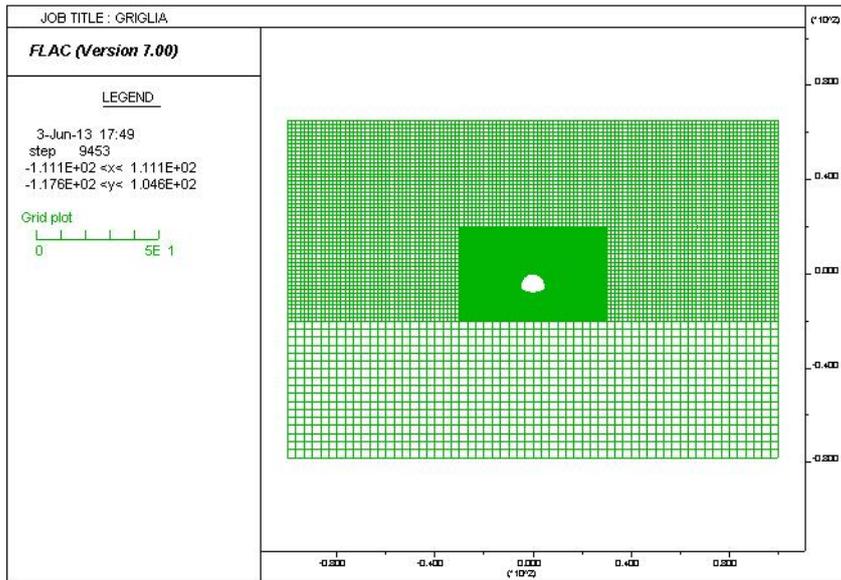


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass





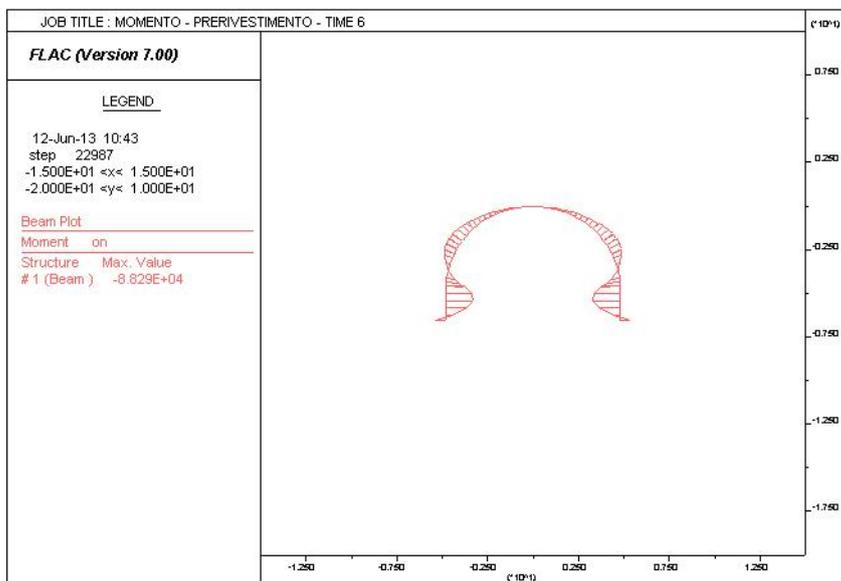
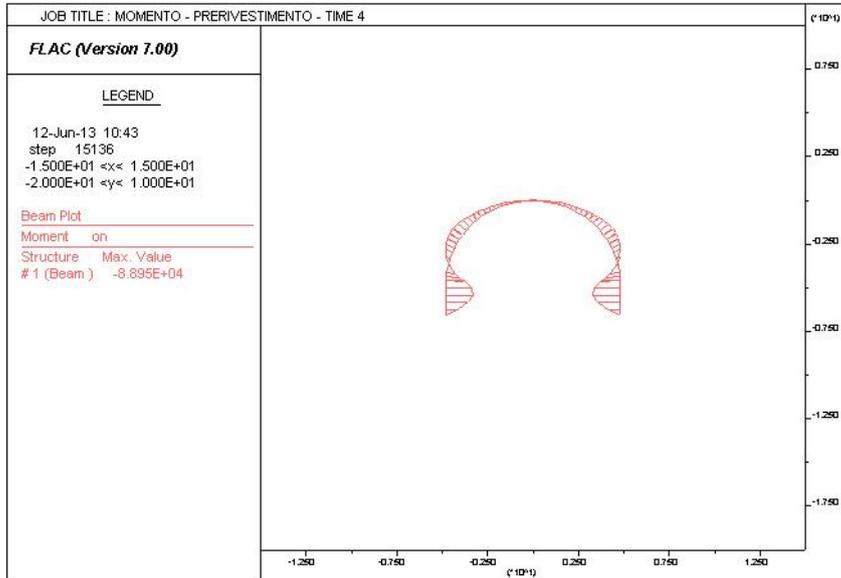
14.1.3. ANALISI 1 – BY- PASS CARRABILE - SEZIONE TIPO B2





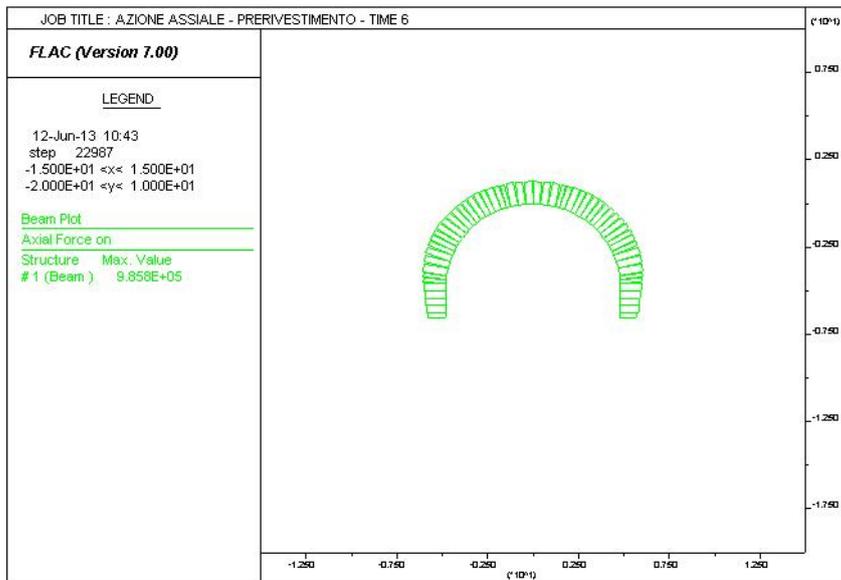
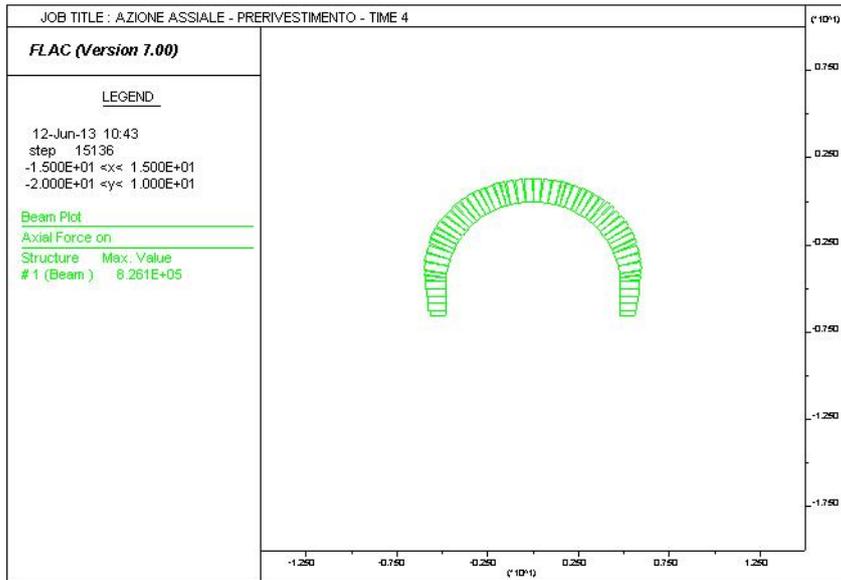
Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass

14.1.4. $k_0 = 1 - \sin \phi$



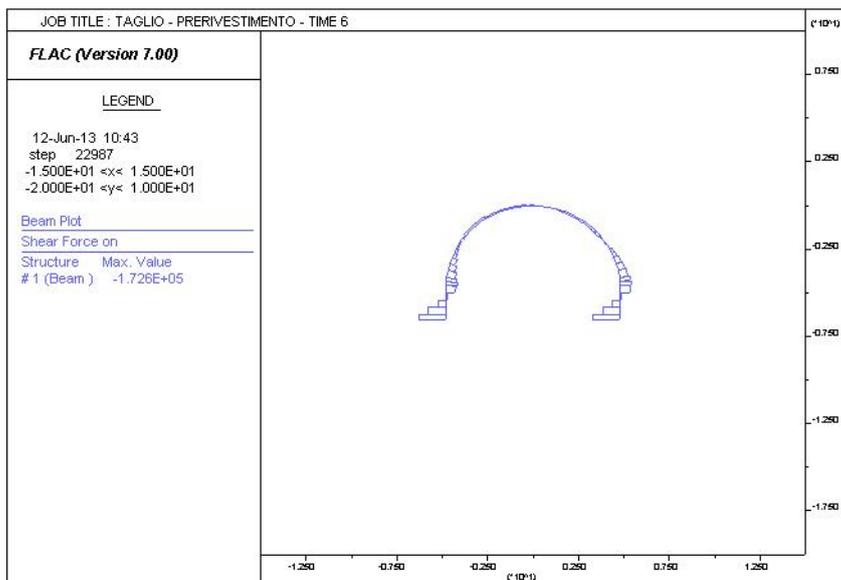
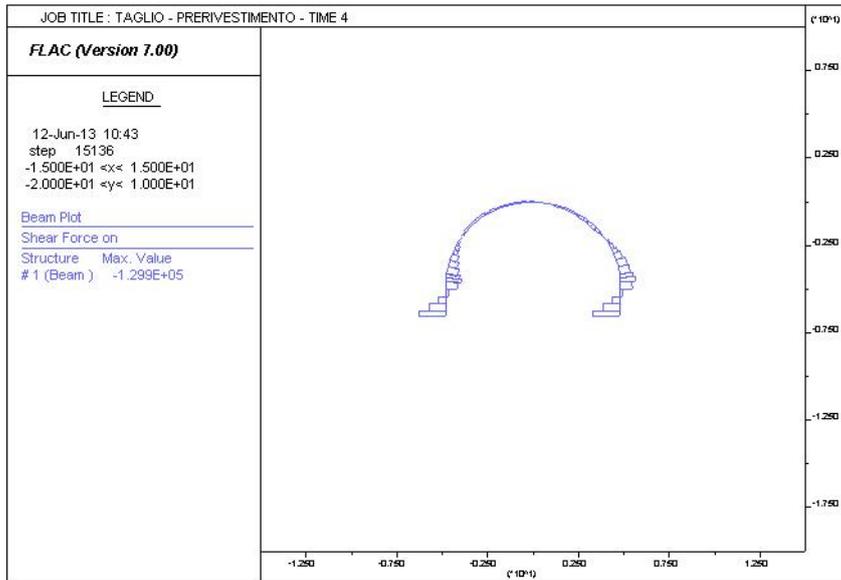


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



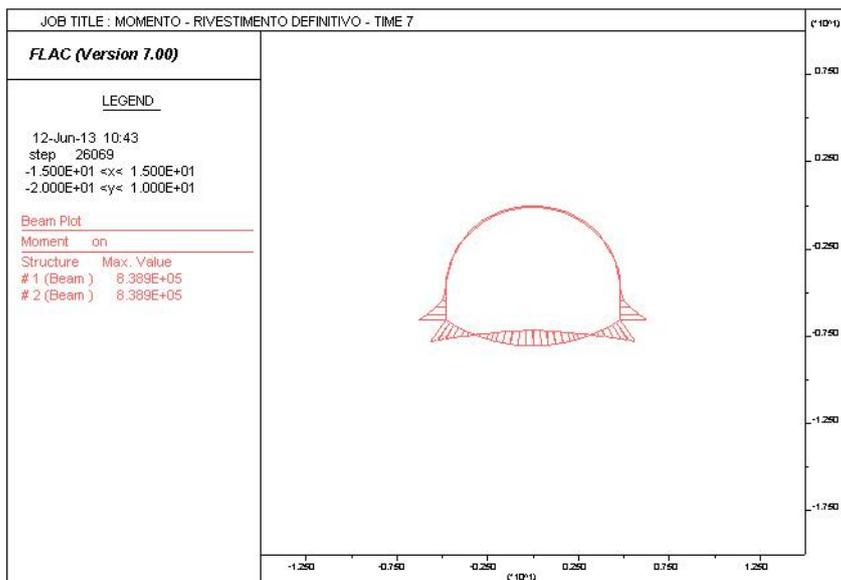
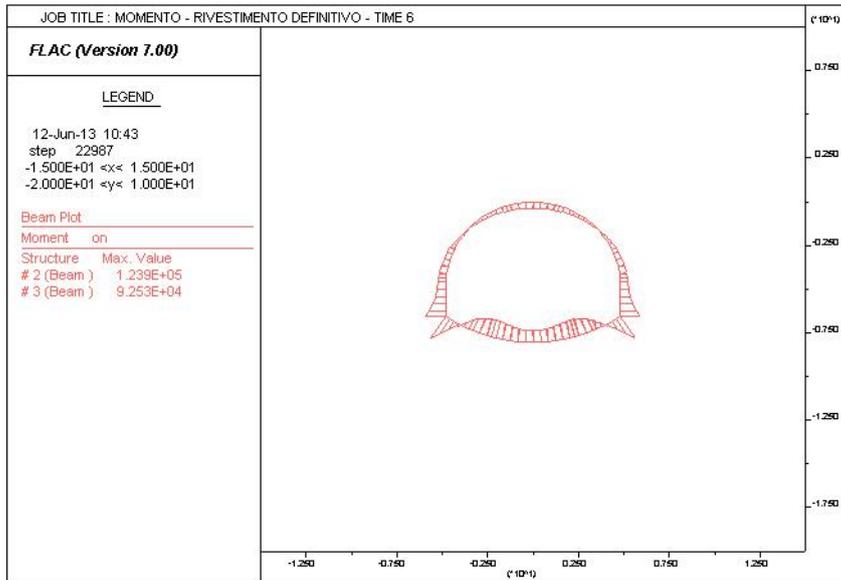


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



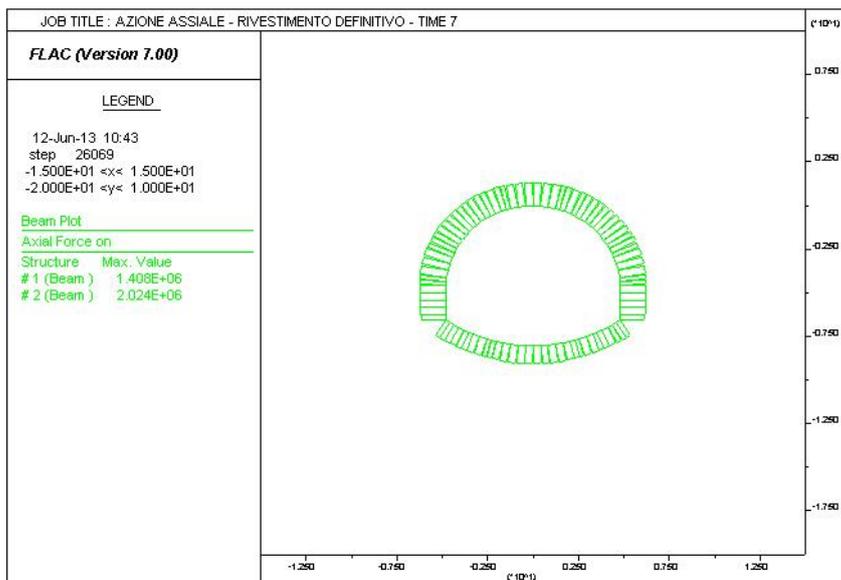
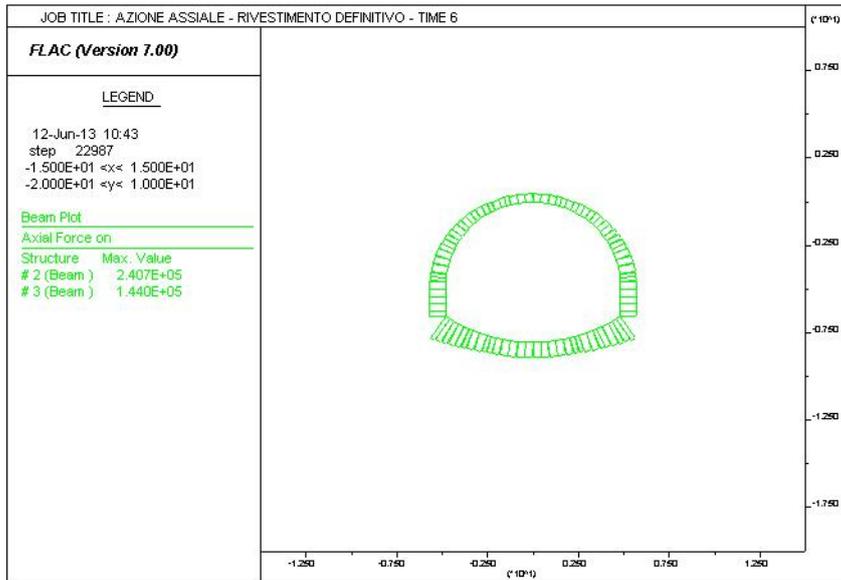


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



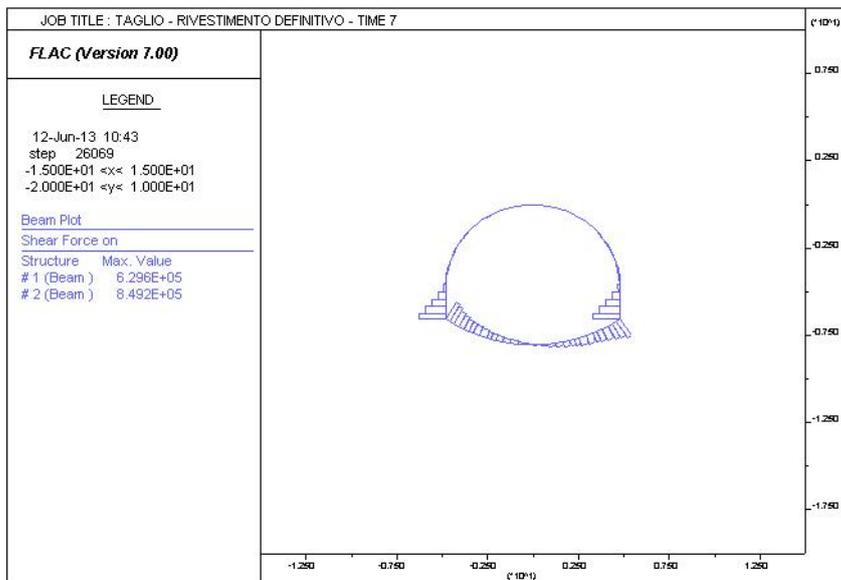
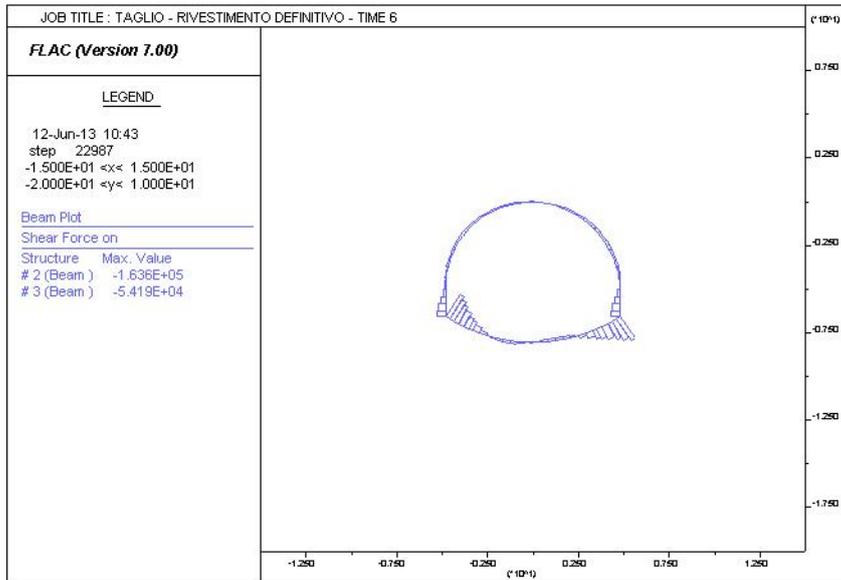


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass





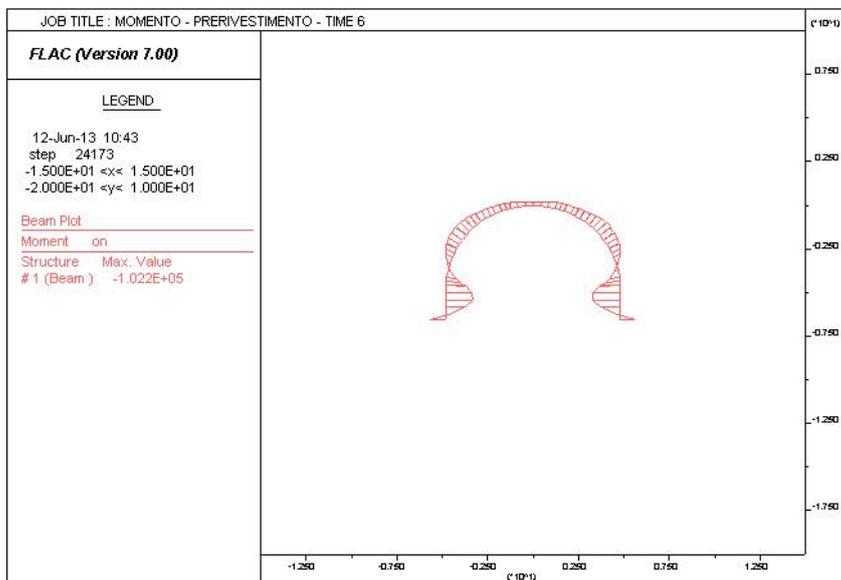
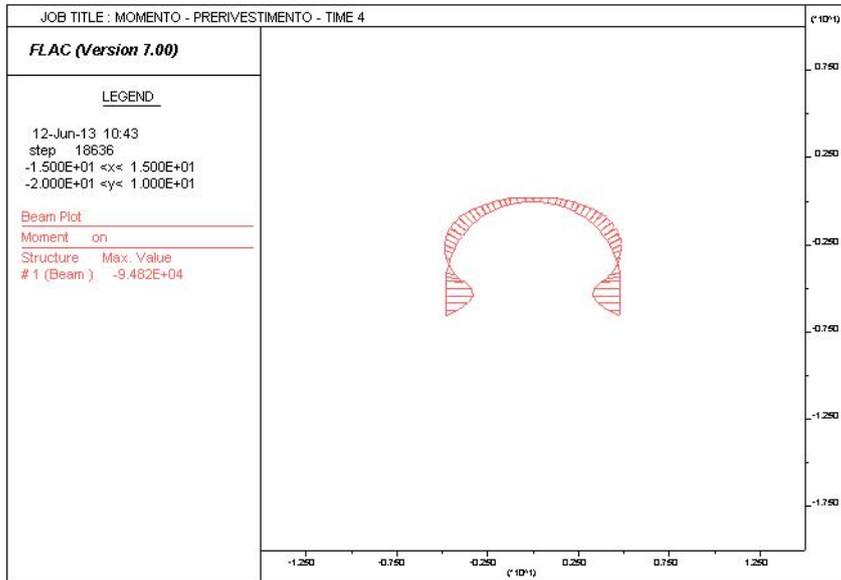
Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass





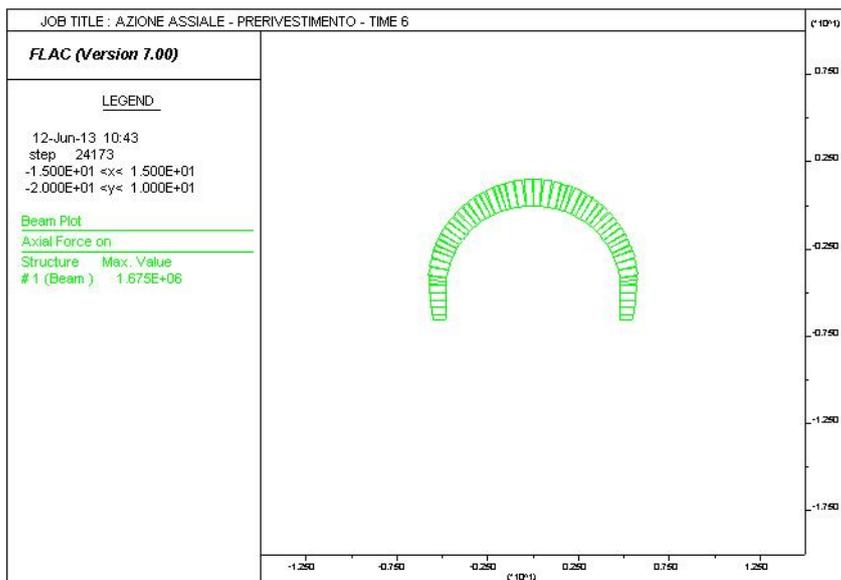
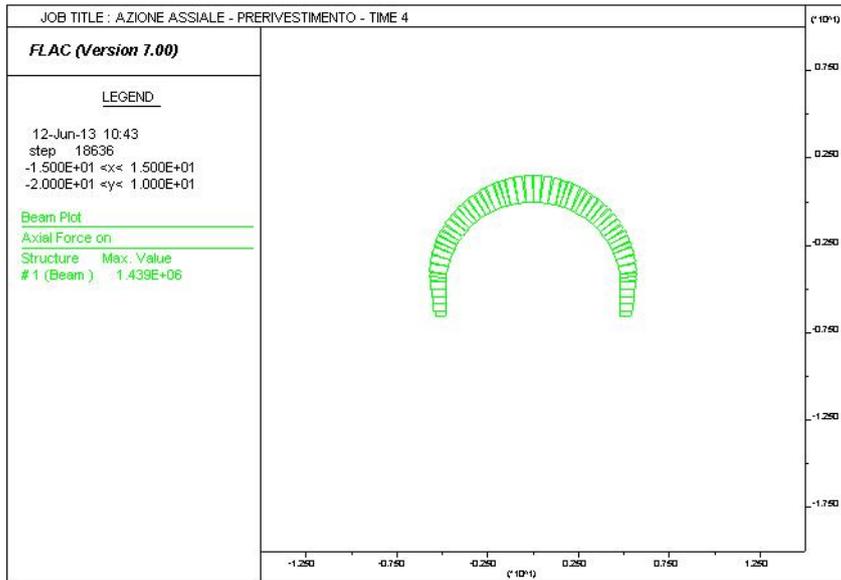
Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass

14.1.5. $k_0 = 1,2$



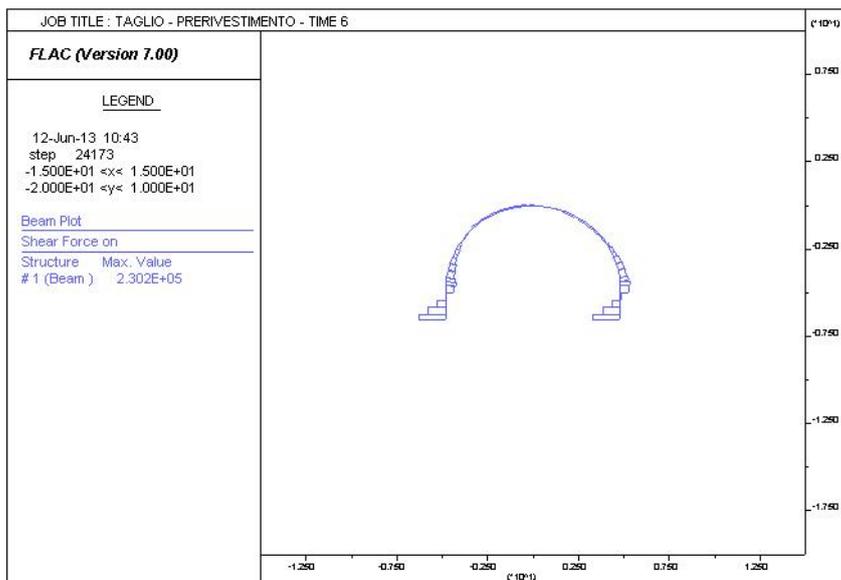
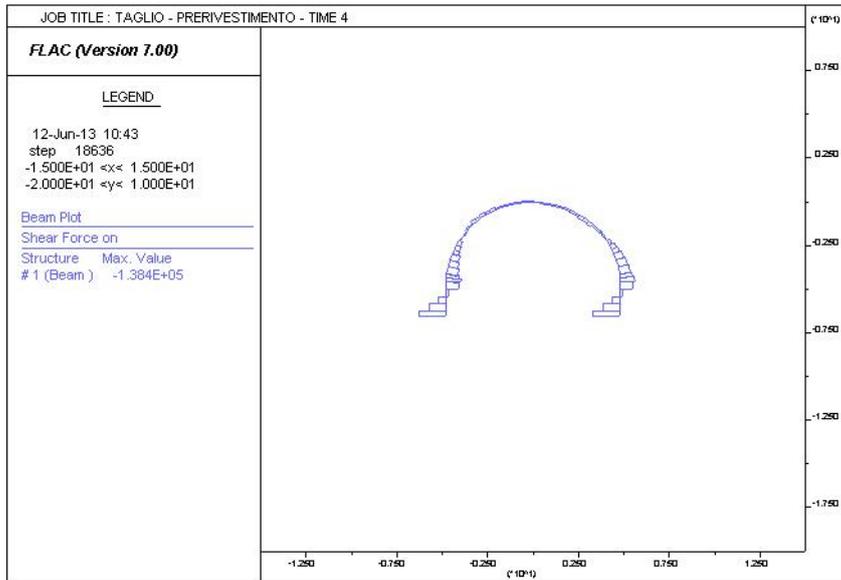


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



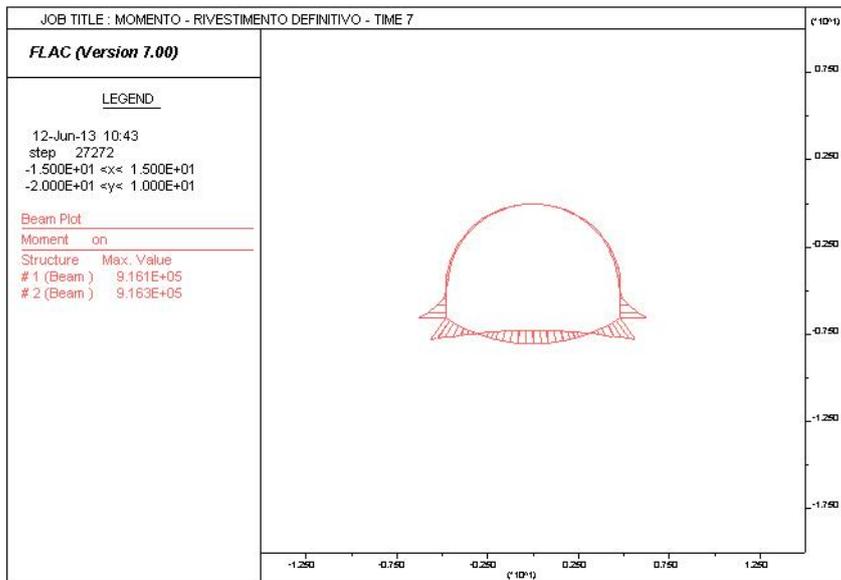
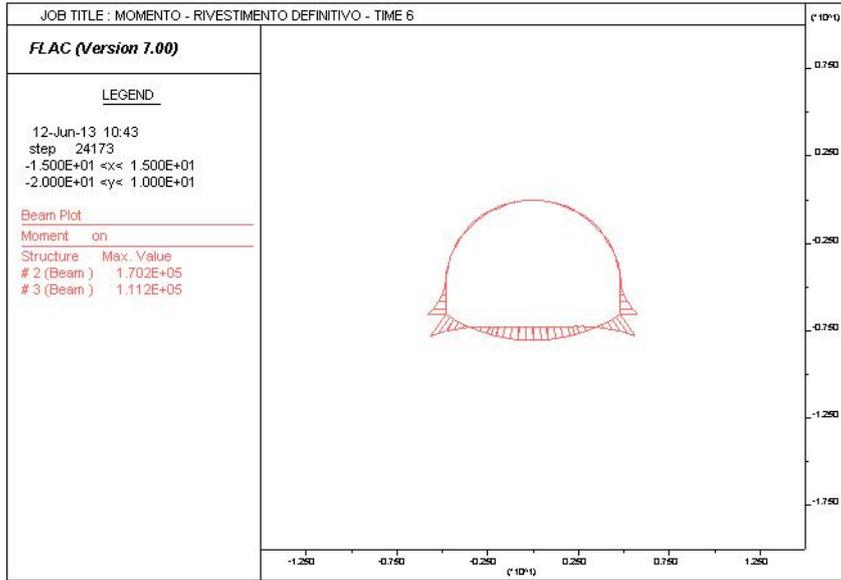


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



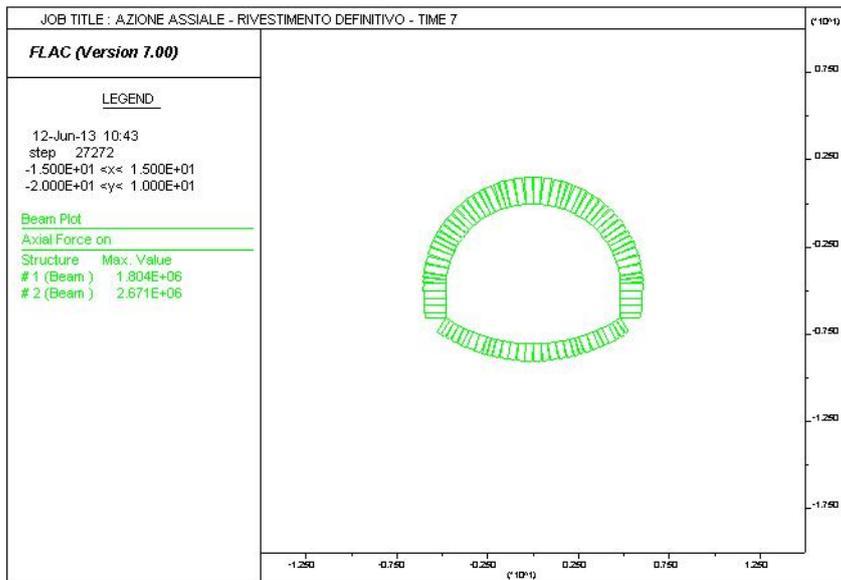
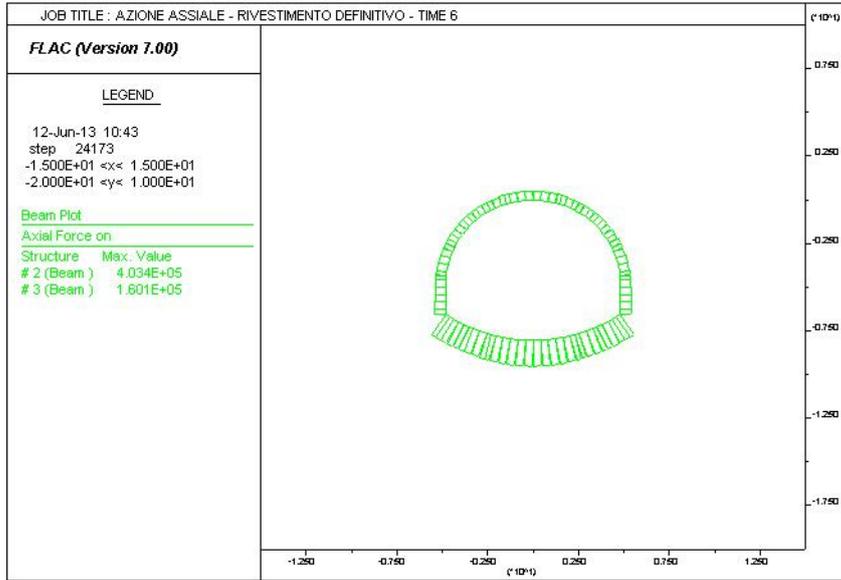


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



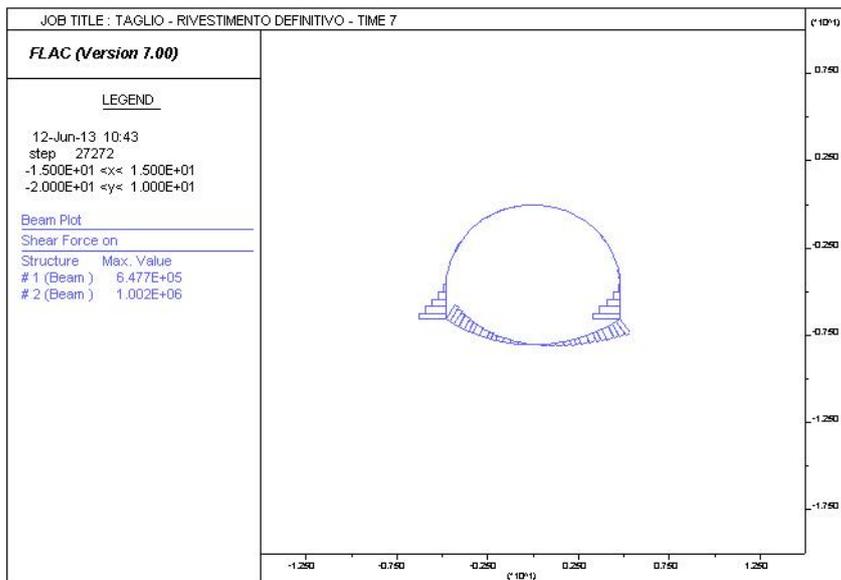
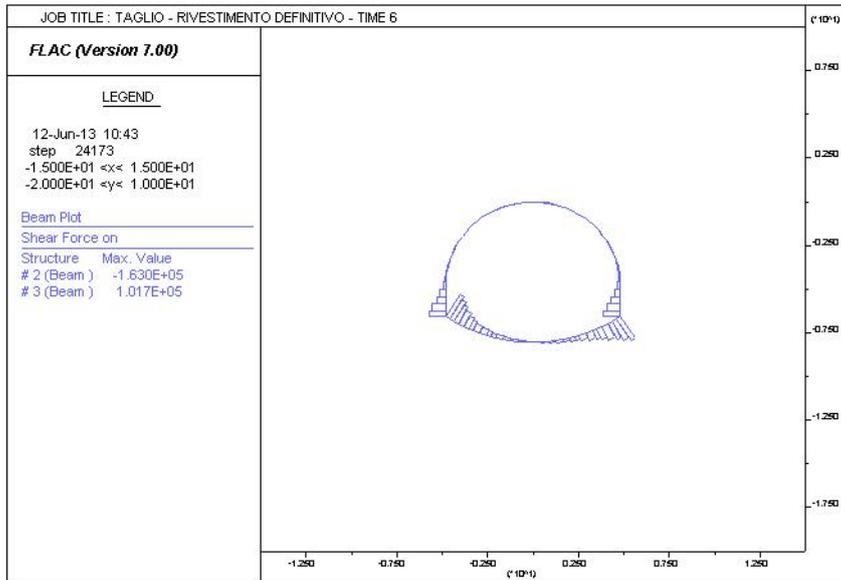


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



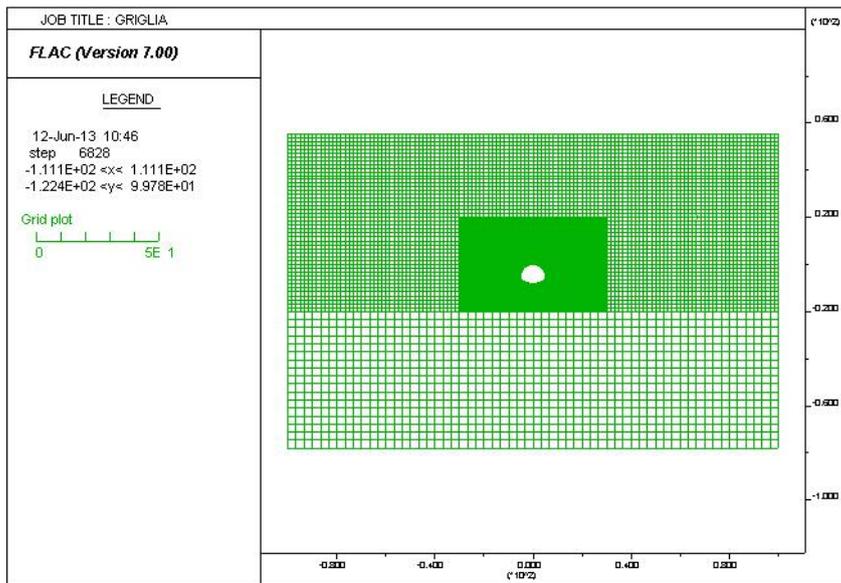


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass





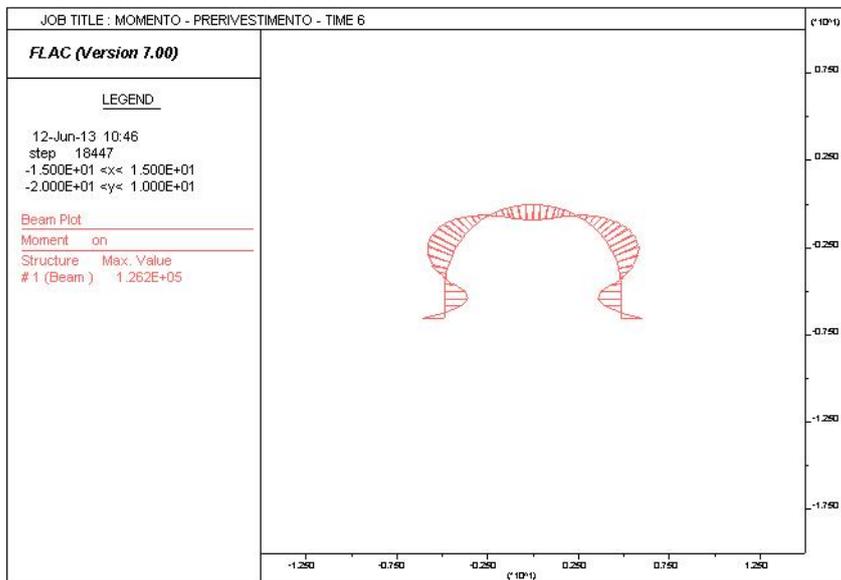
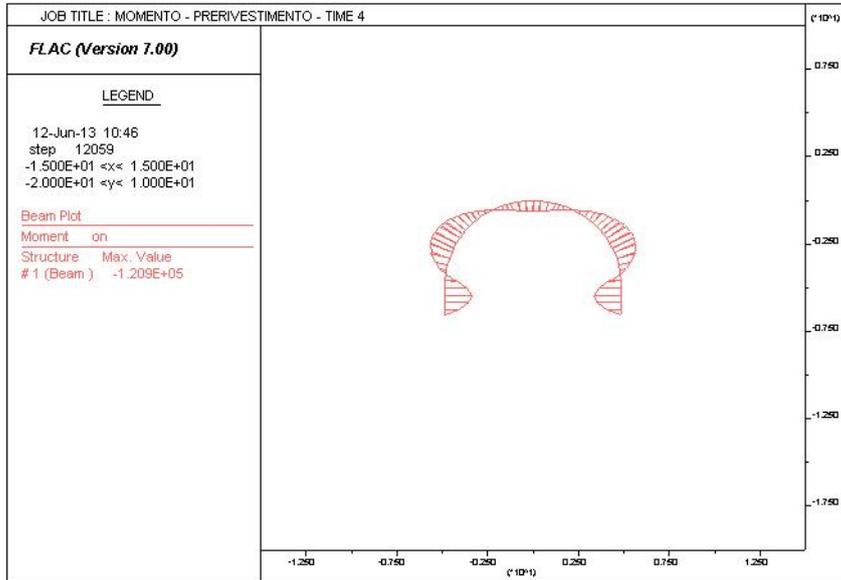
14.2. ANALISI 2 – BY- PASS CARRABILE - SEZIONE TIPO C2





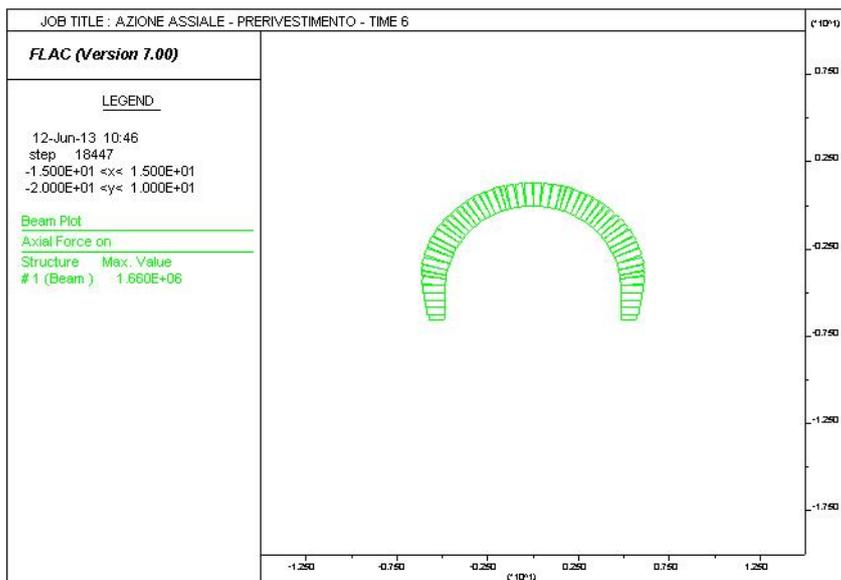
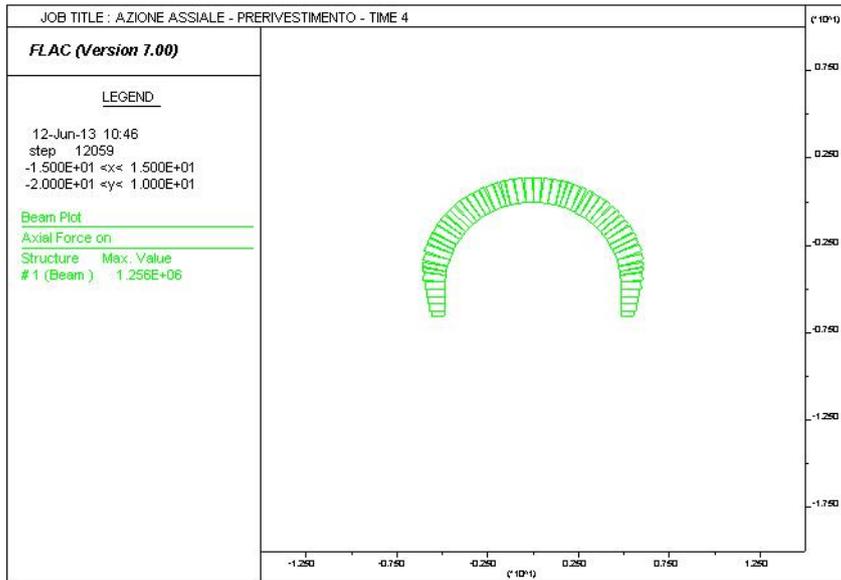
Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass

14.2.1. $k_0 = 1 - \sin \phi$



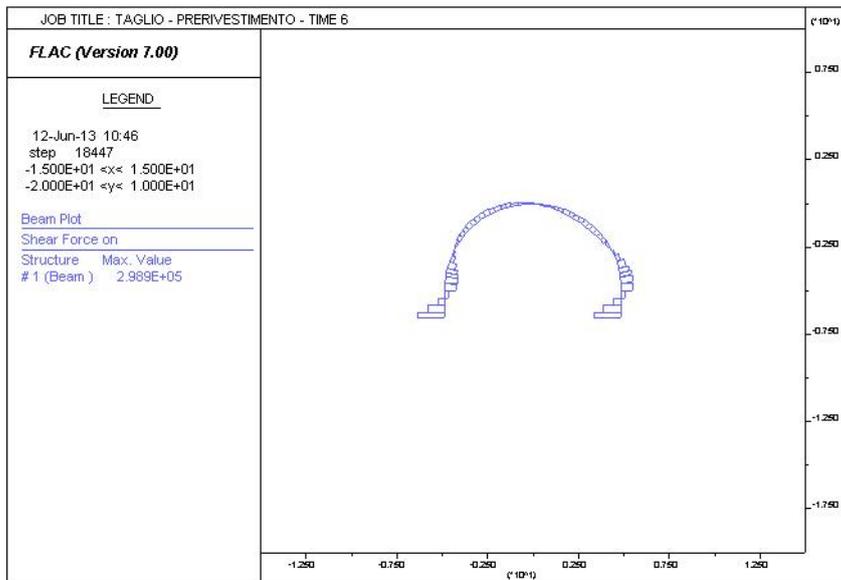
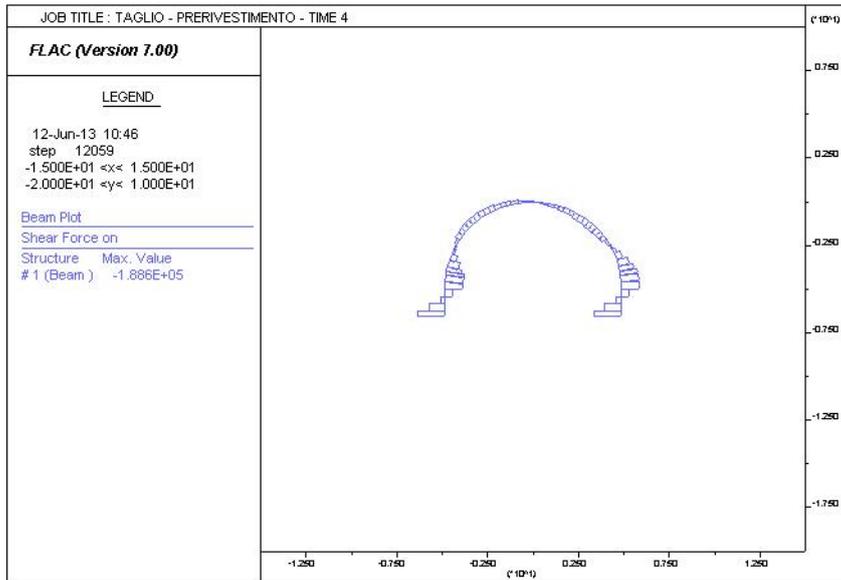


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



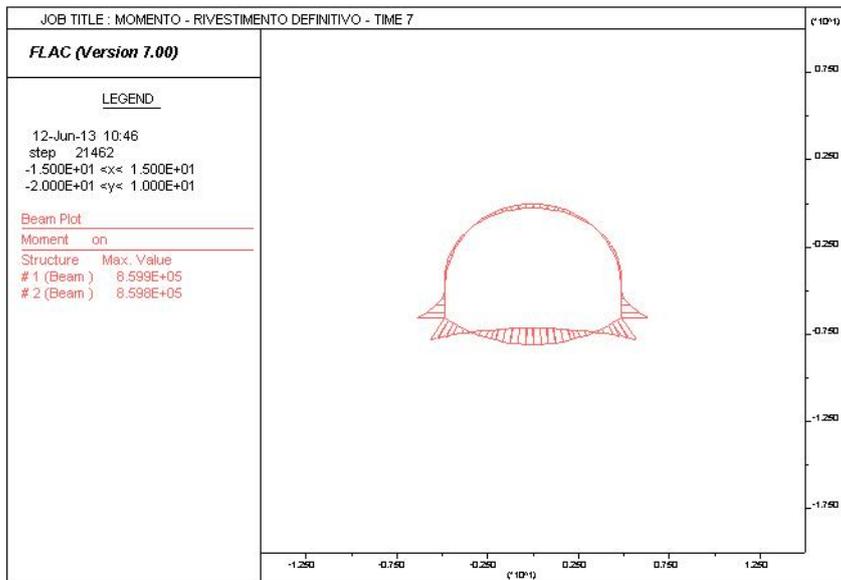
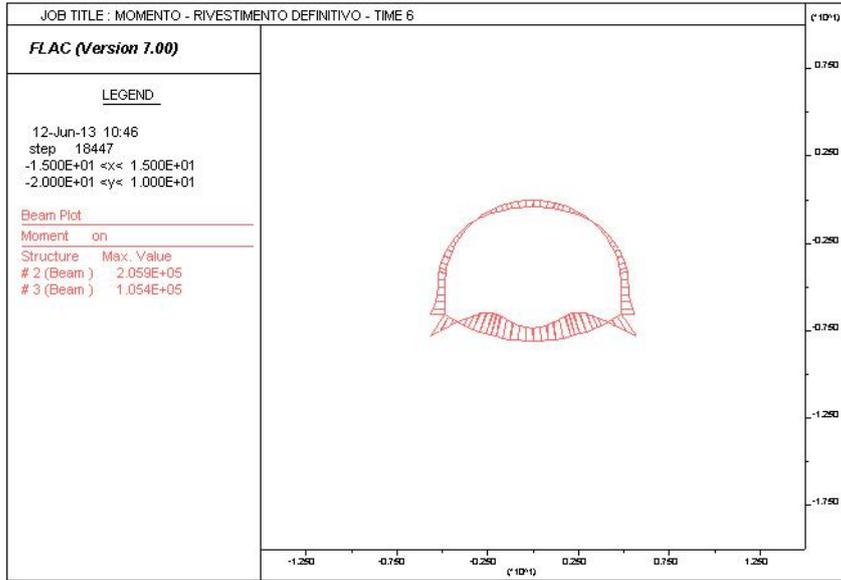


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



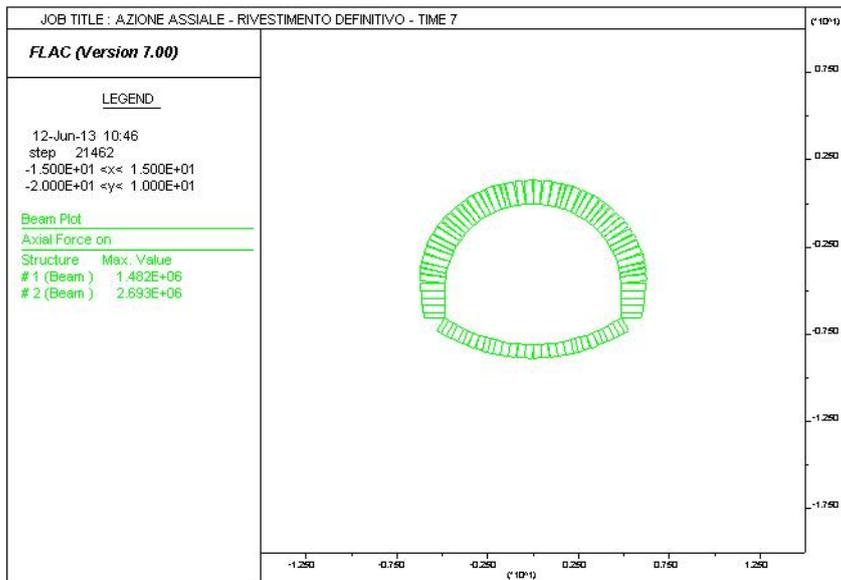
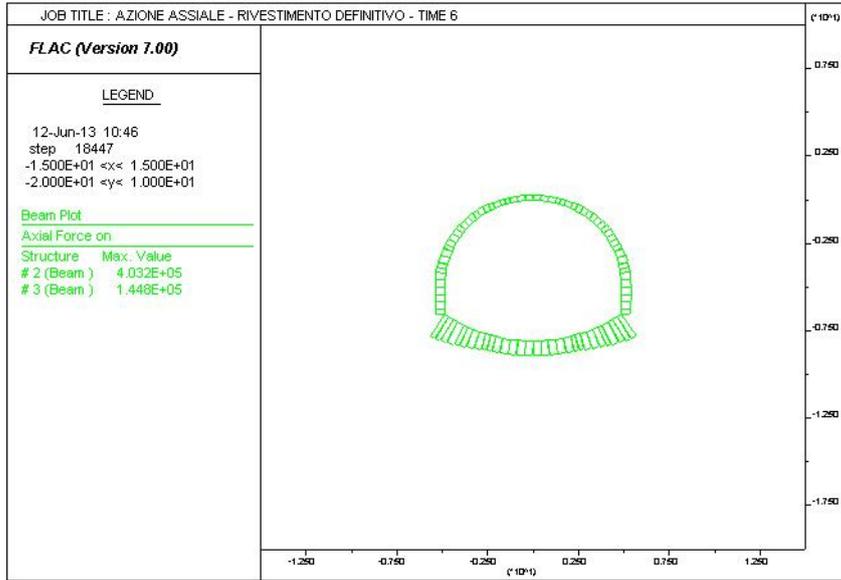


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



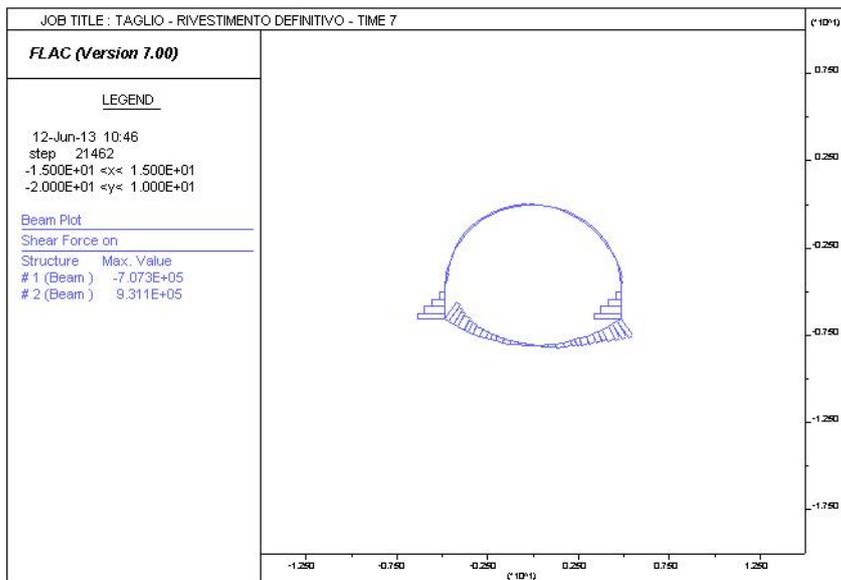
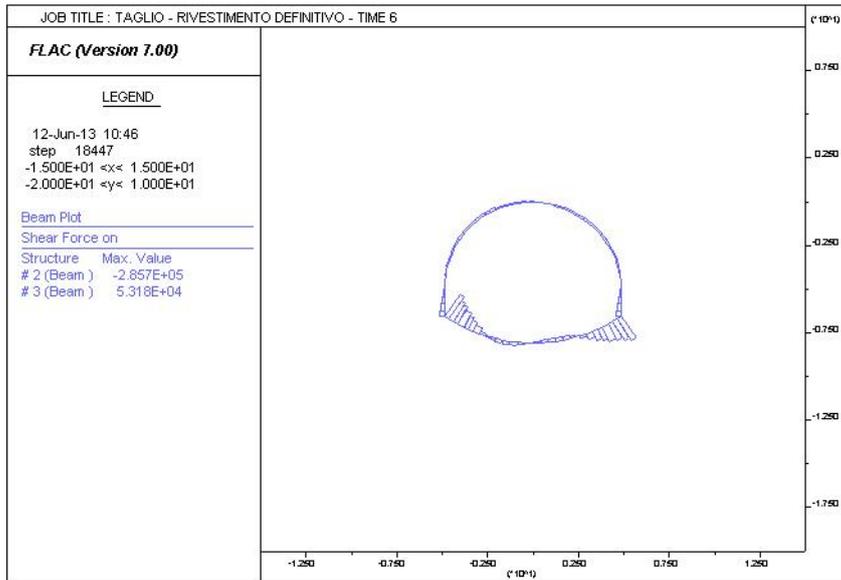


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass





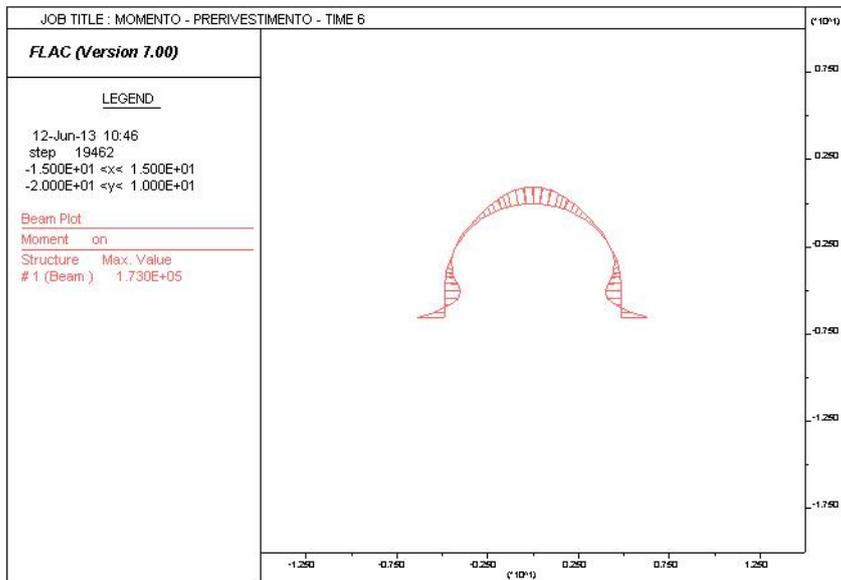
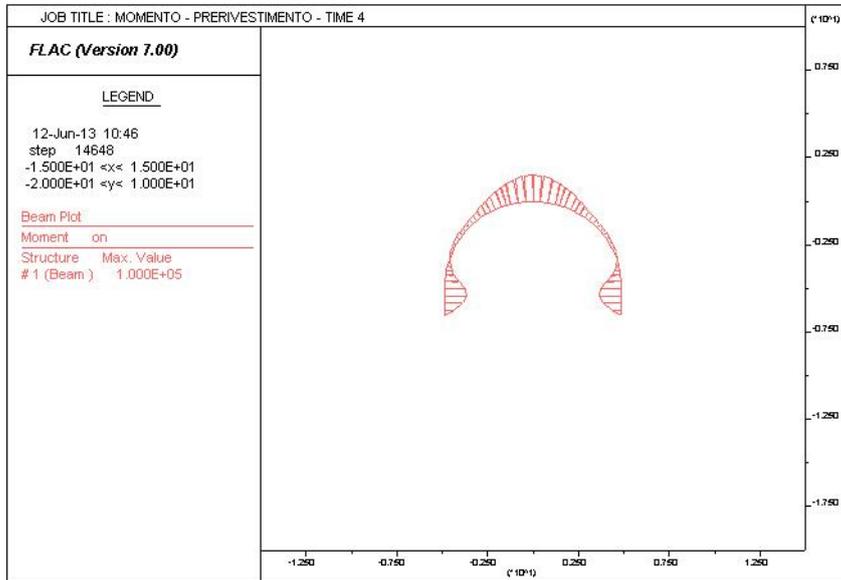
Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass





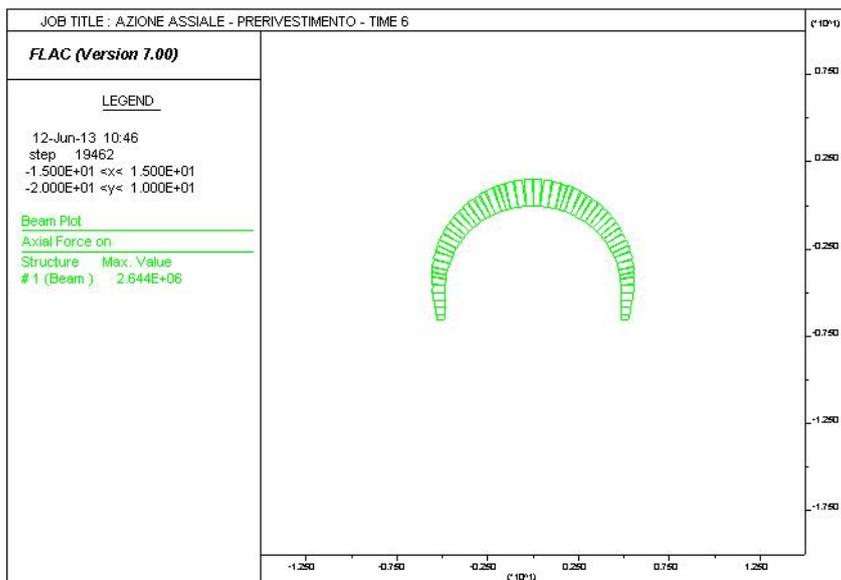
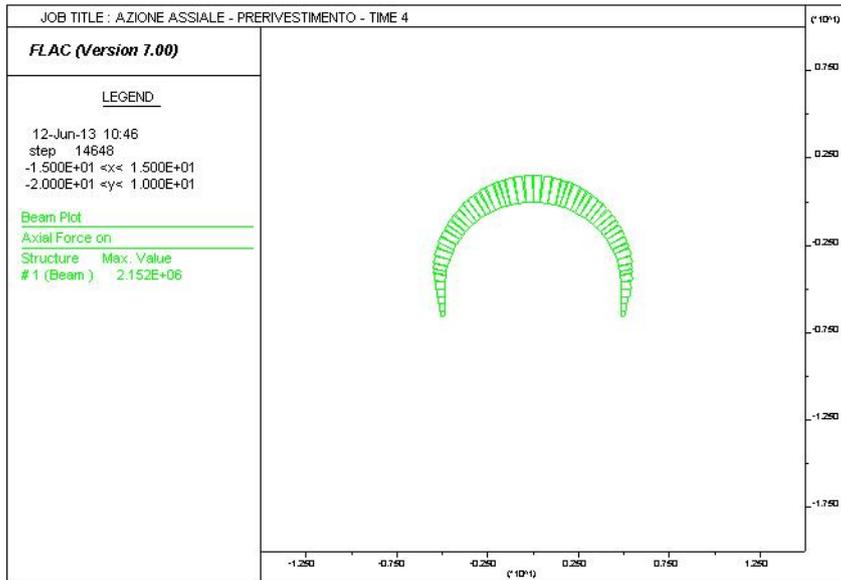
Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass

14.2.2. $k_0 = 1,2$



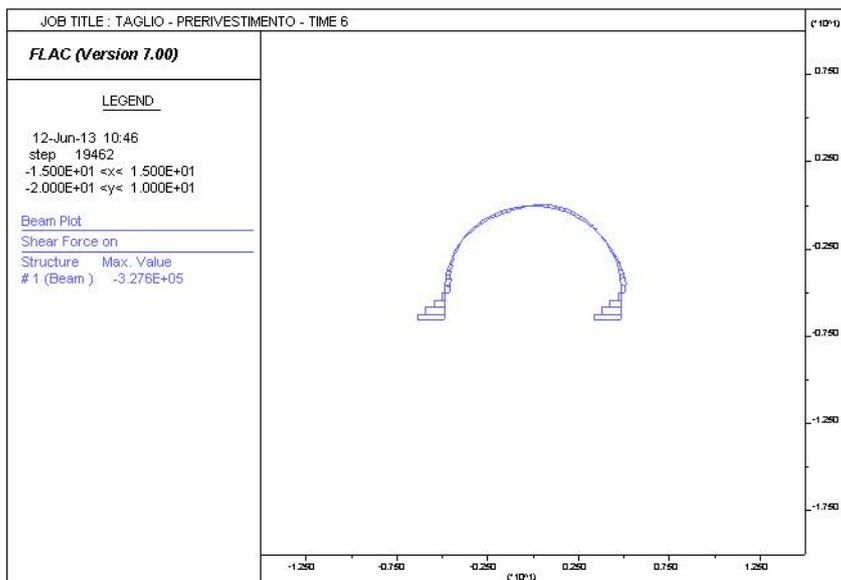
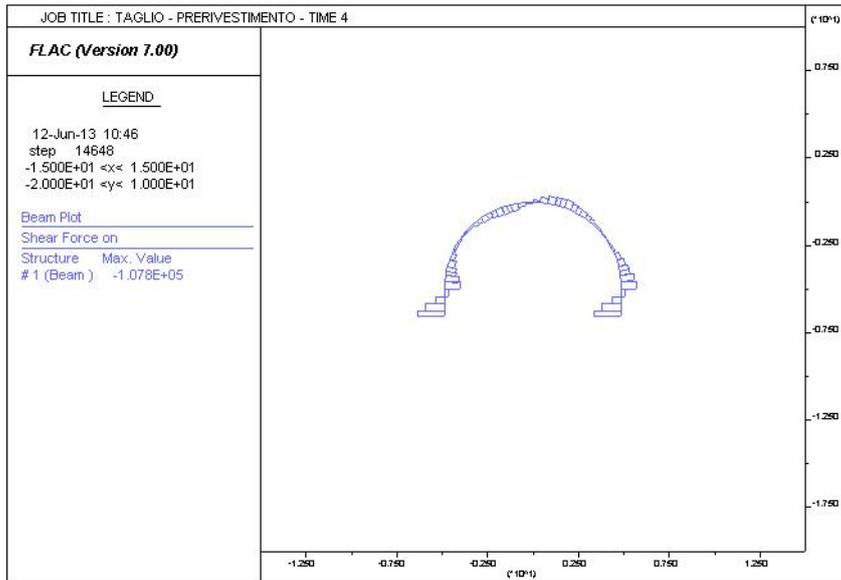


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



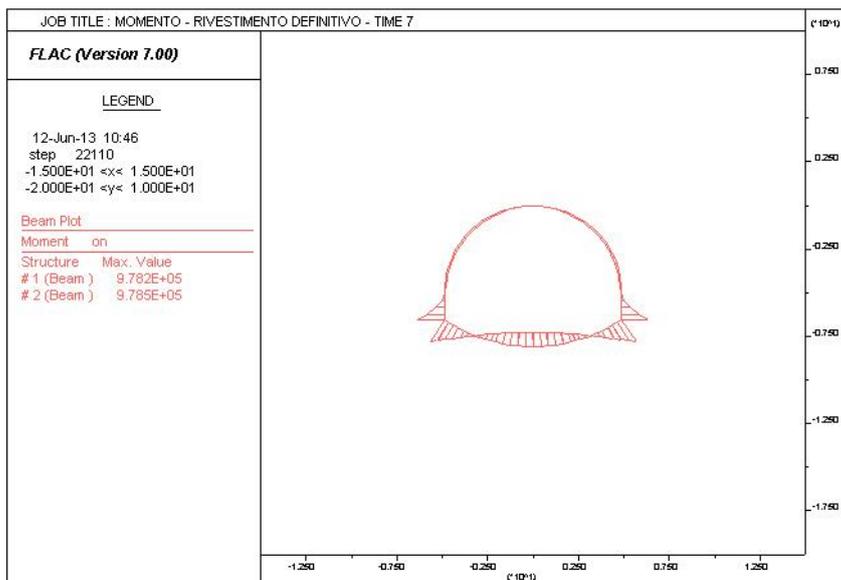
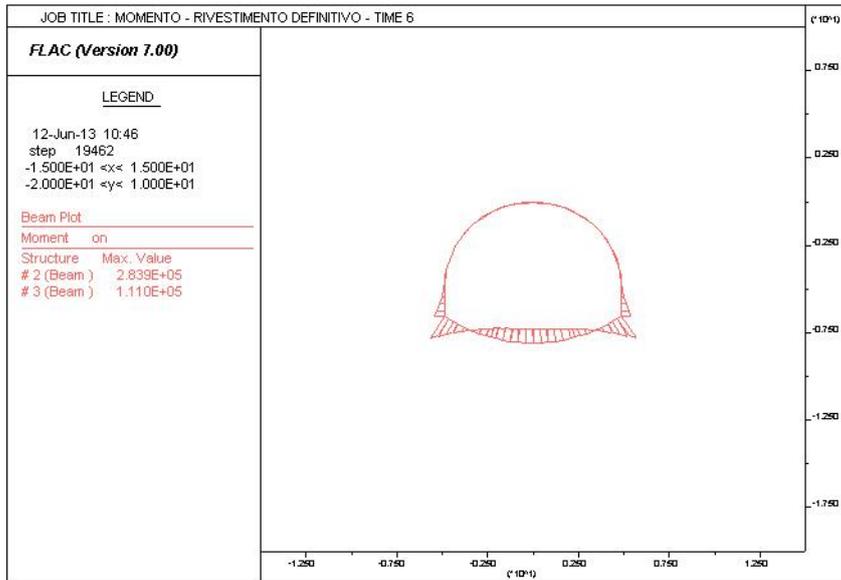


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



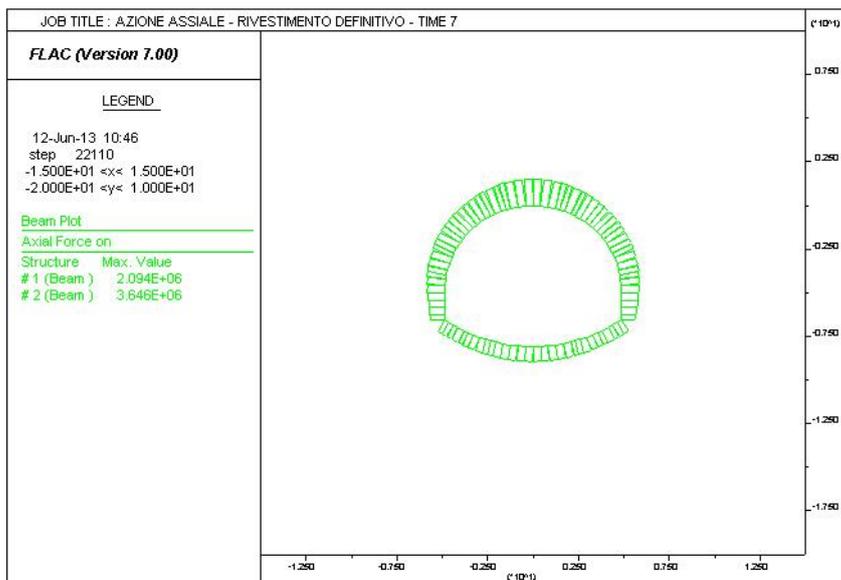
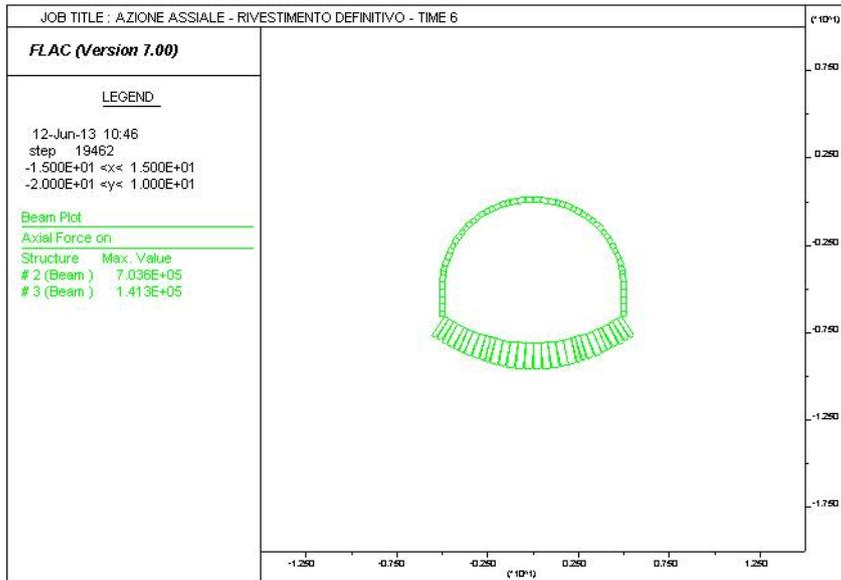


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



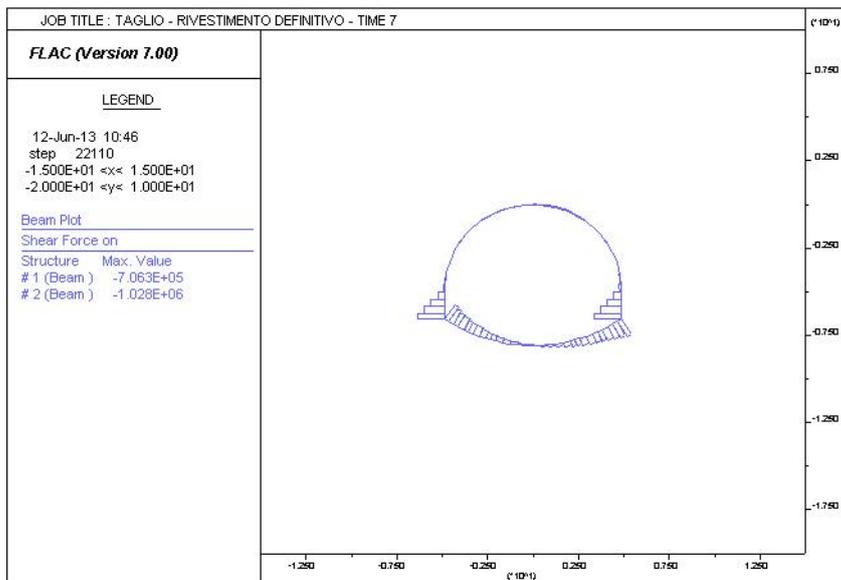
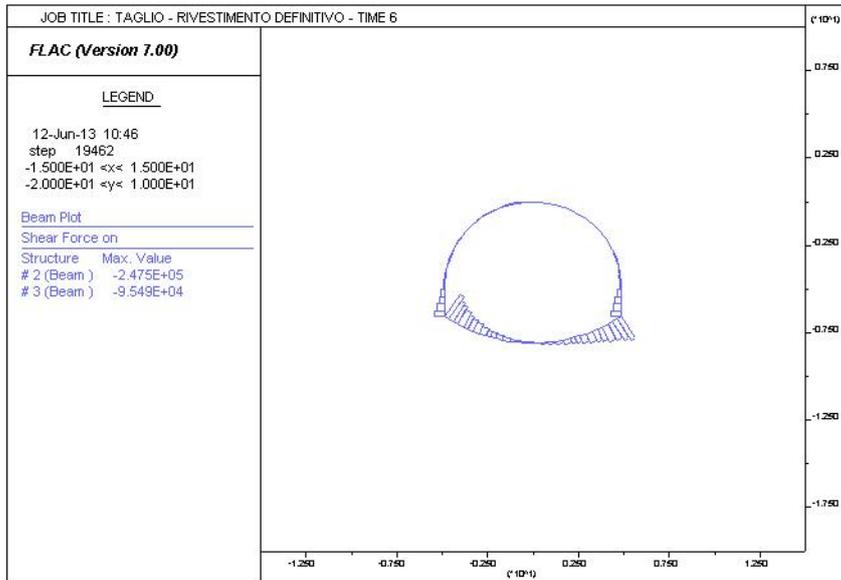


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



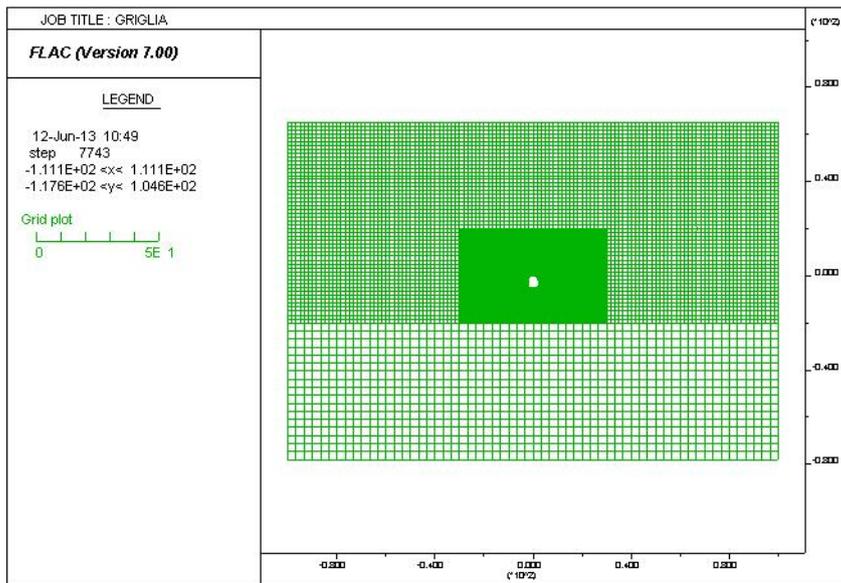


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass





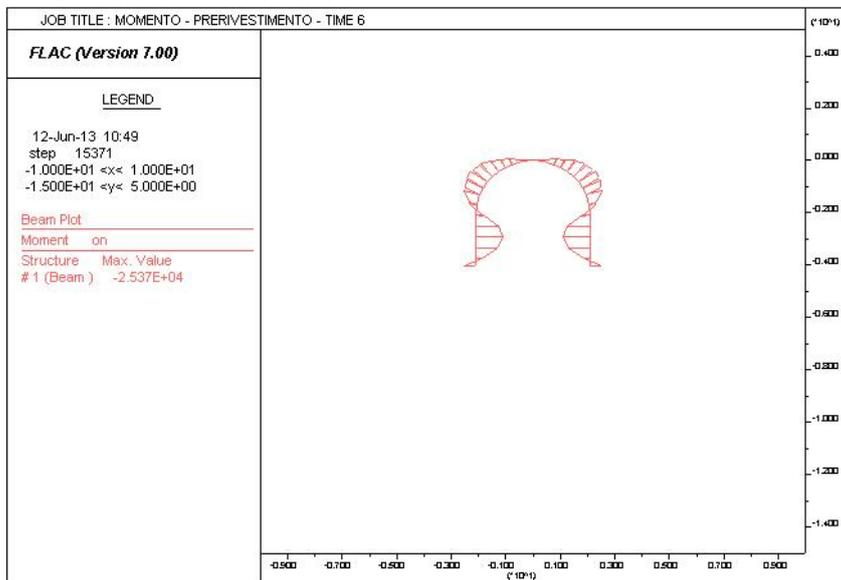
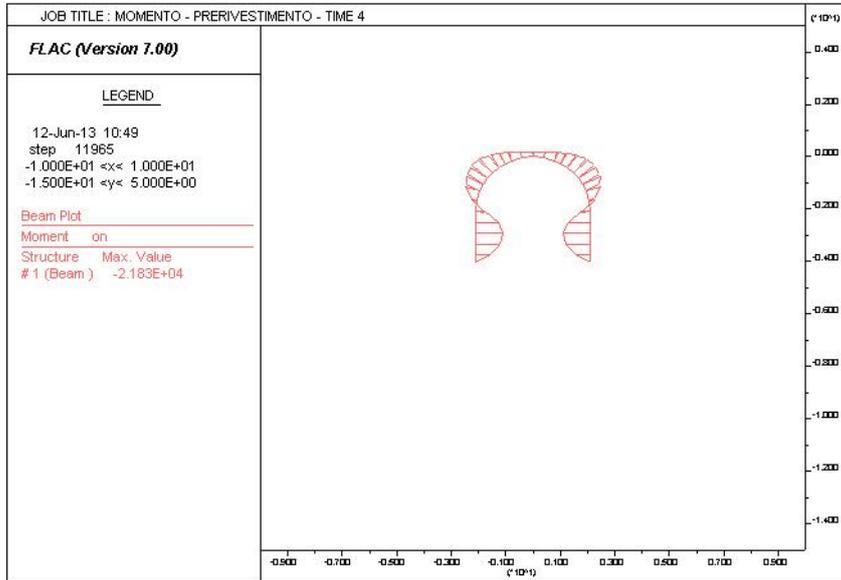
14.3. ANALISI 3 – BY- PASS CARRABILE - SEZIONE TIPO B0





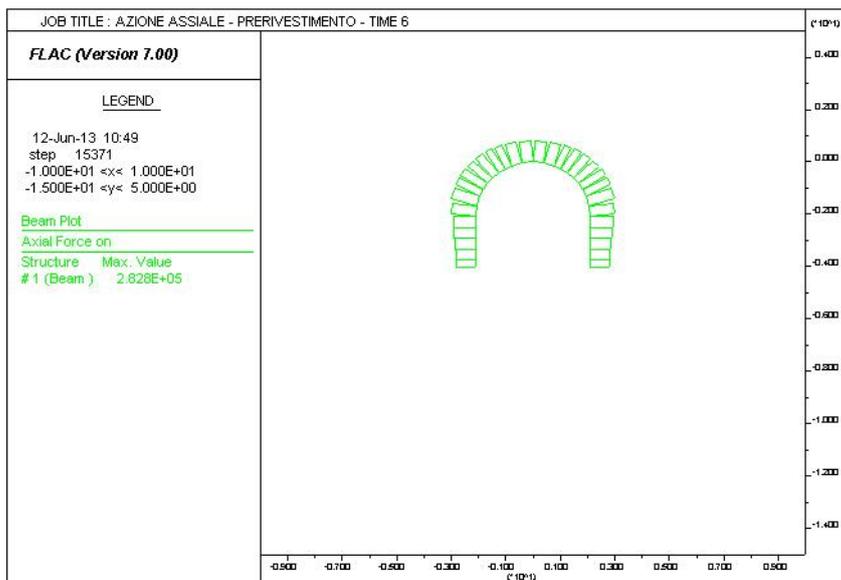
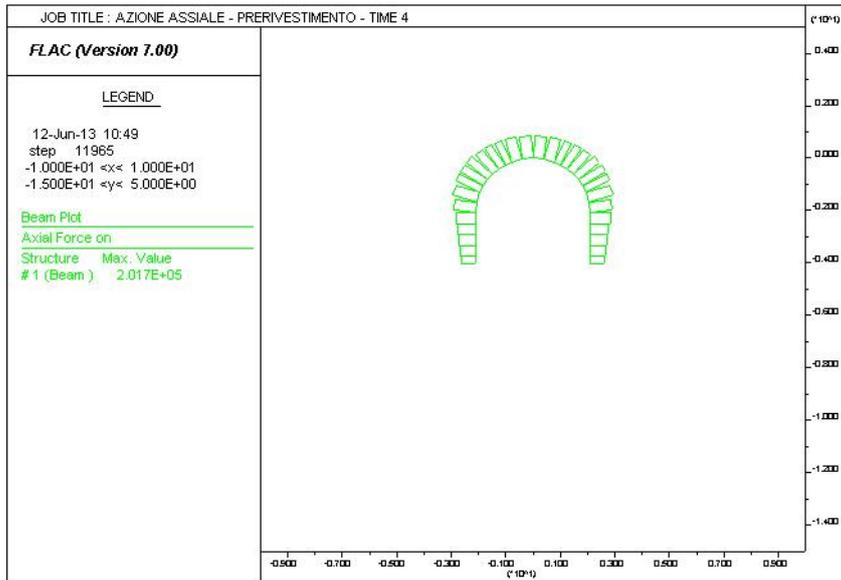
Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass

14.3.1. $k_0 = 1 - \sin \phi$



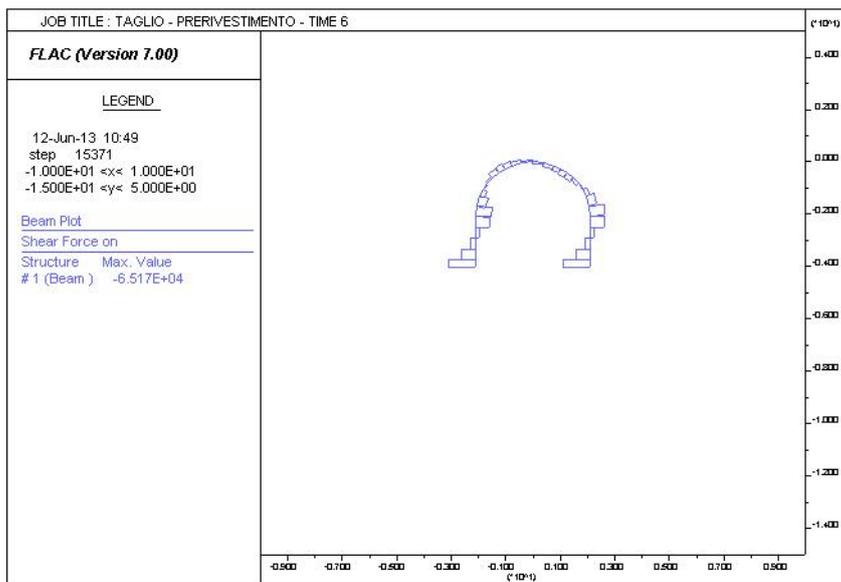
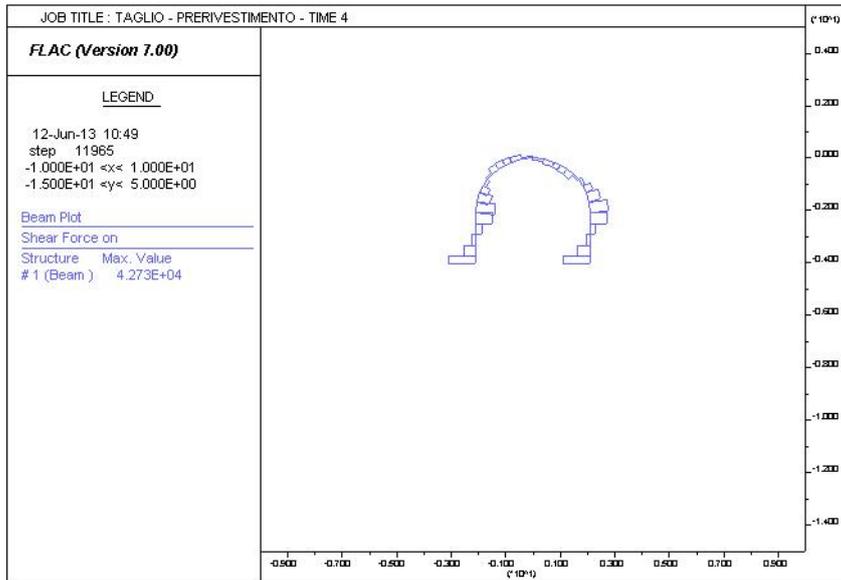


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



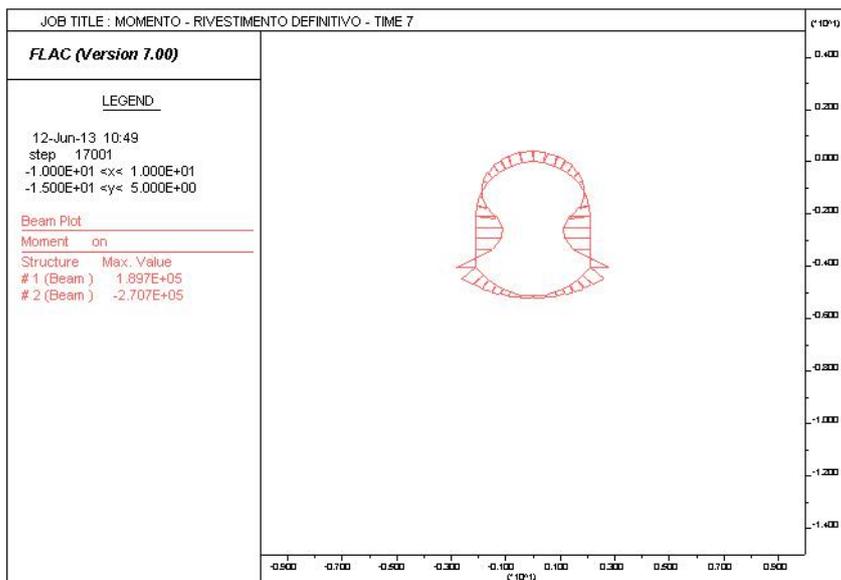
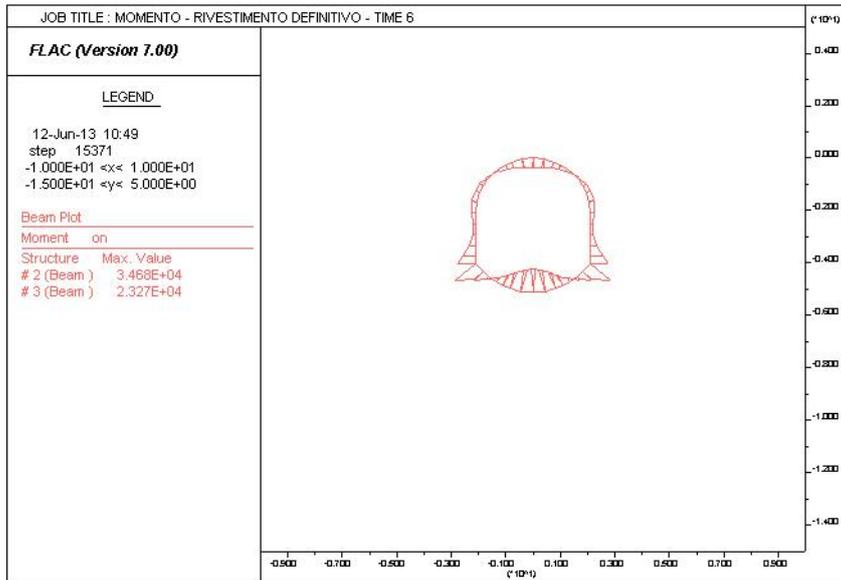


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



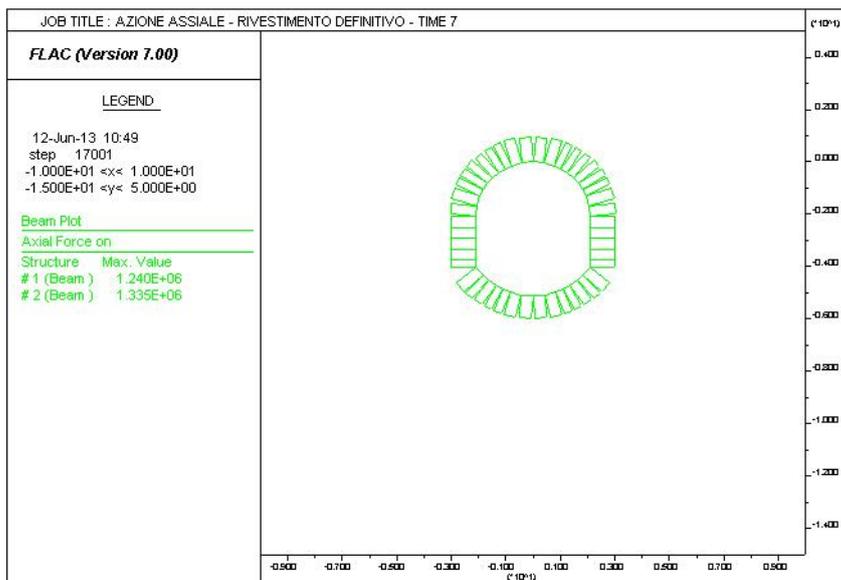
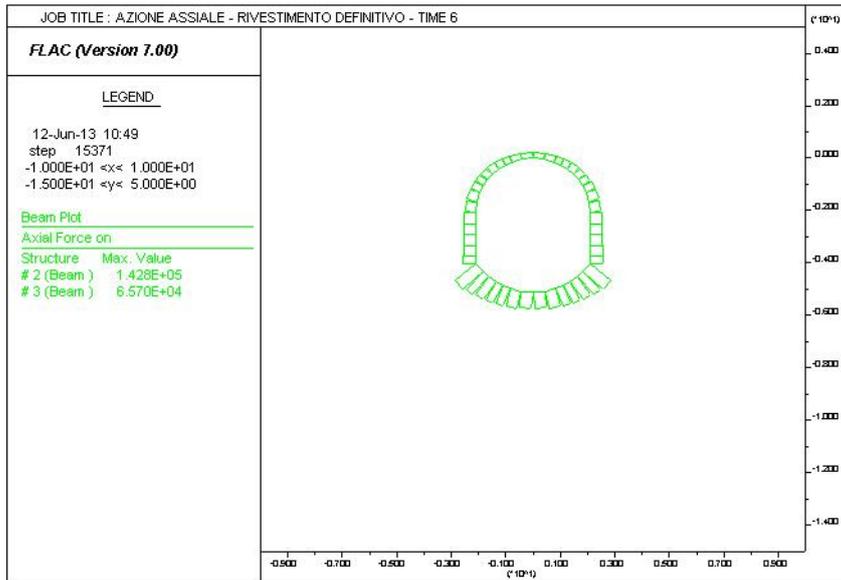


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



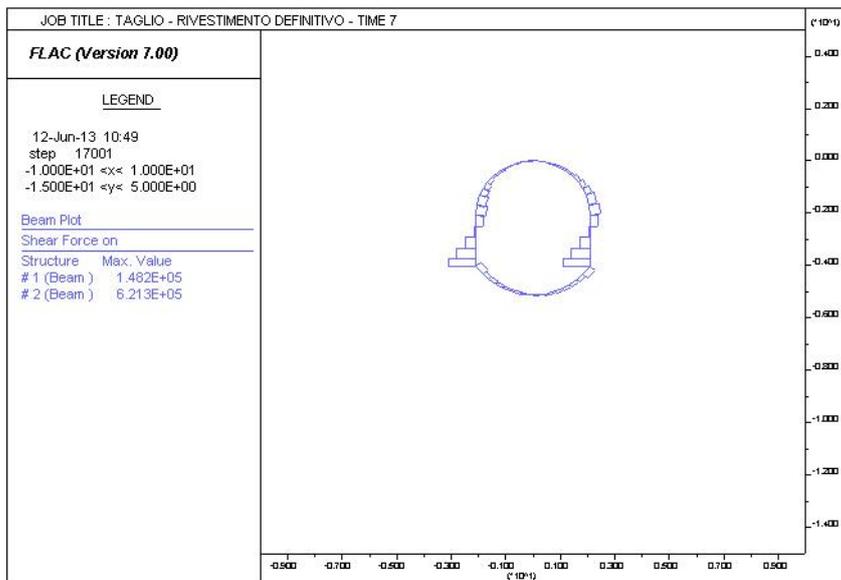
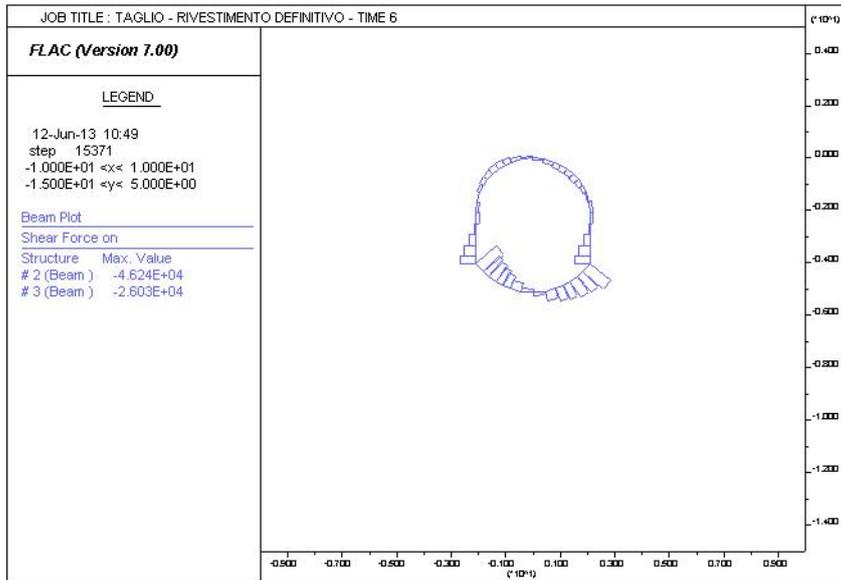


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass





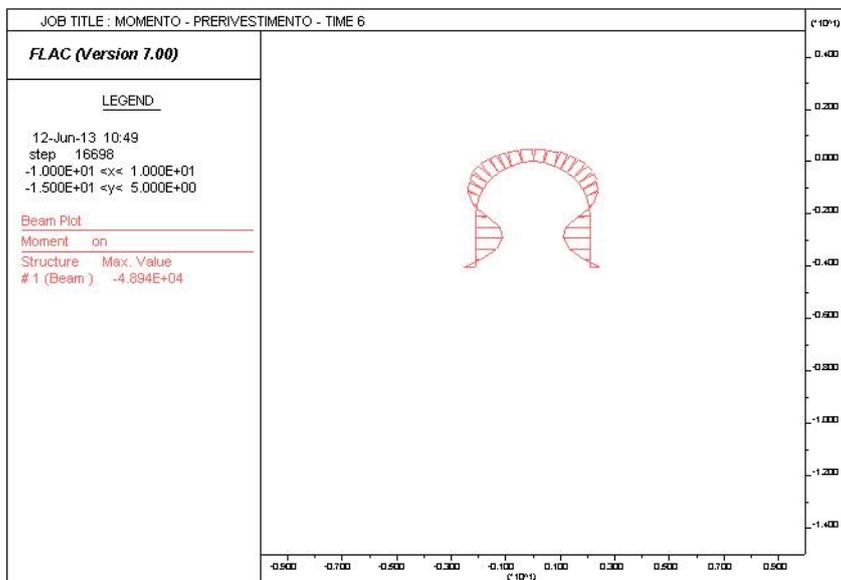
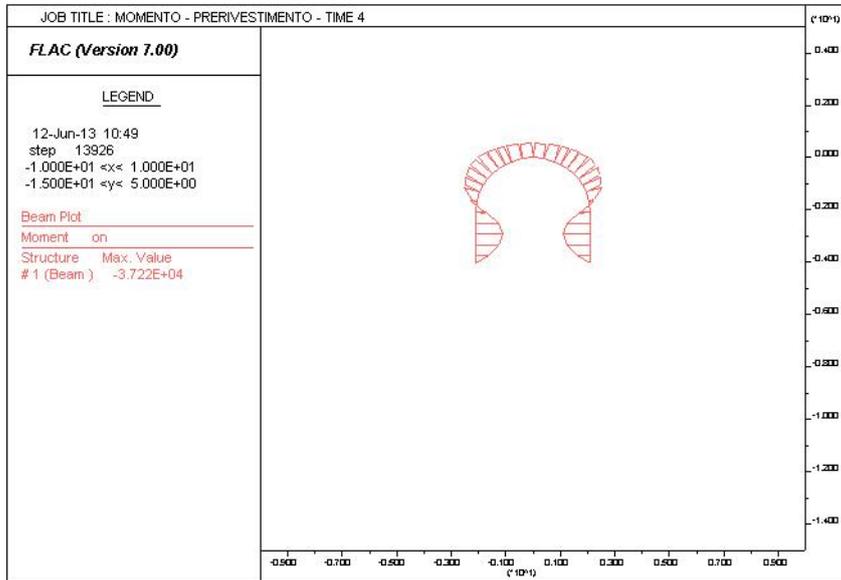
Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass





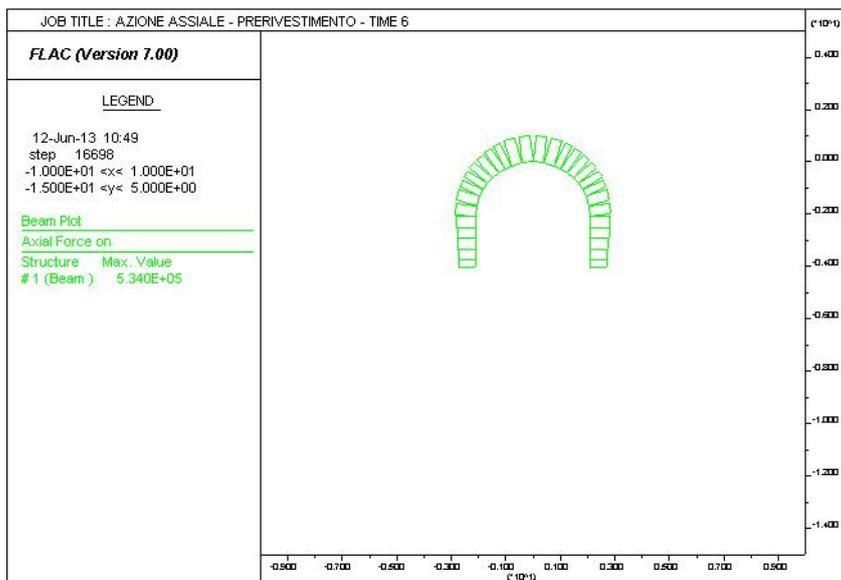
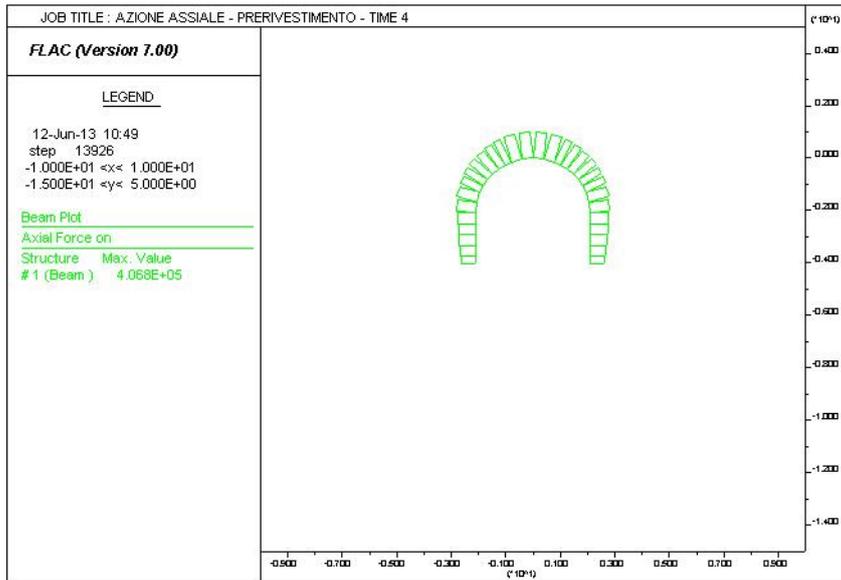
Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass

14.3.2. $k_0 = 1,2$



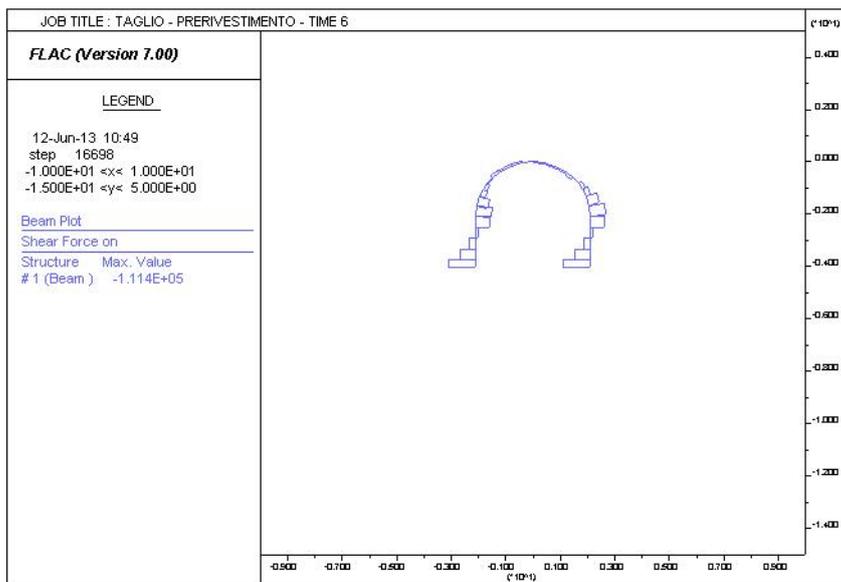
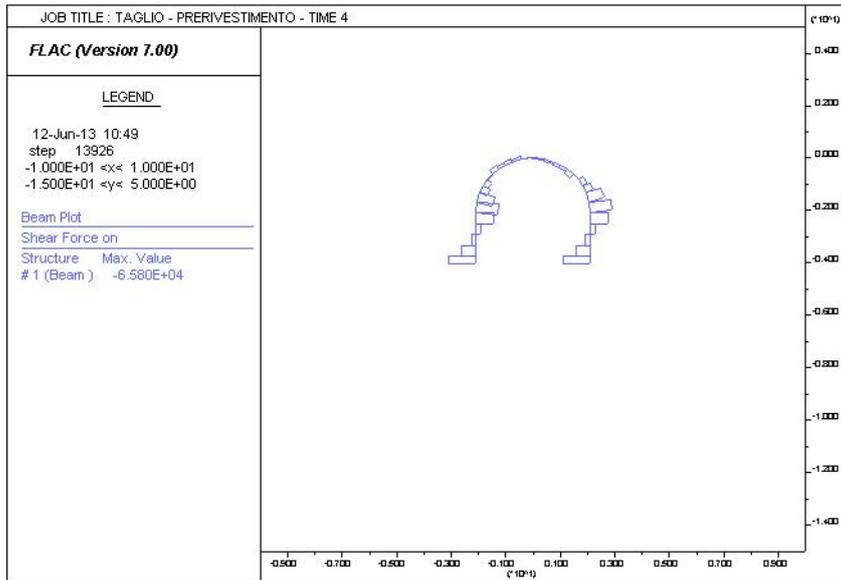


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



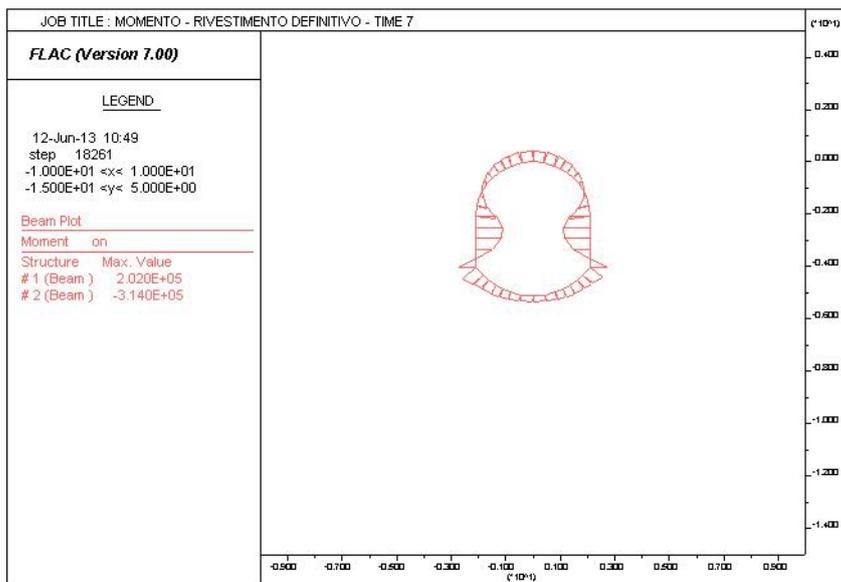
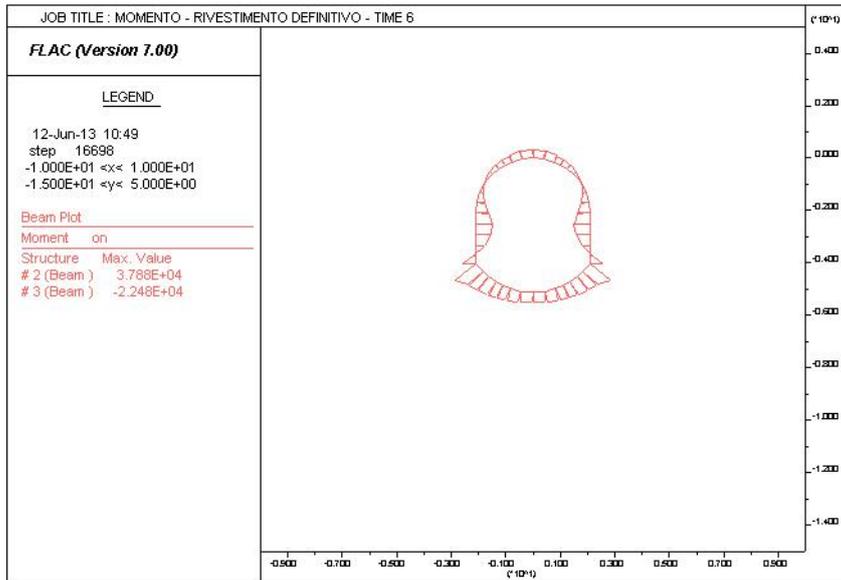


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



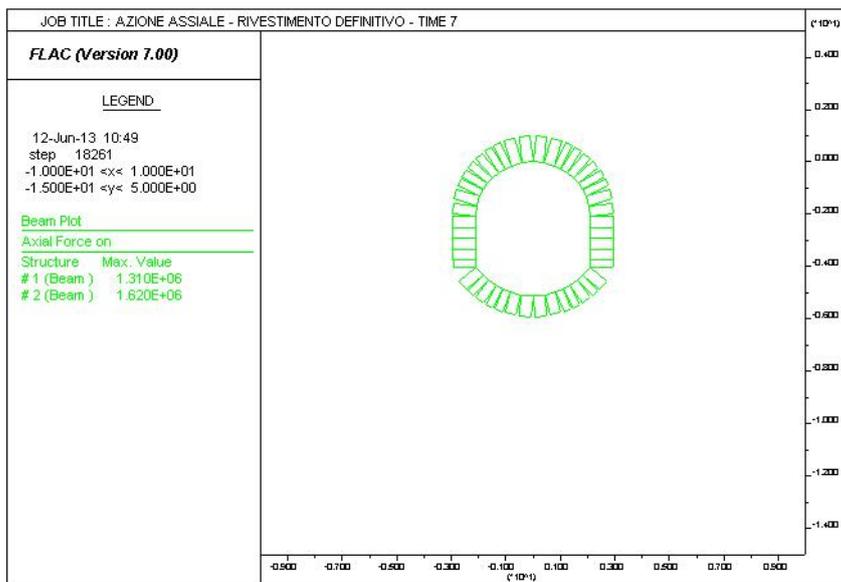
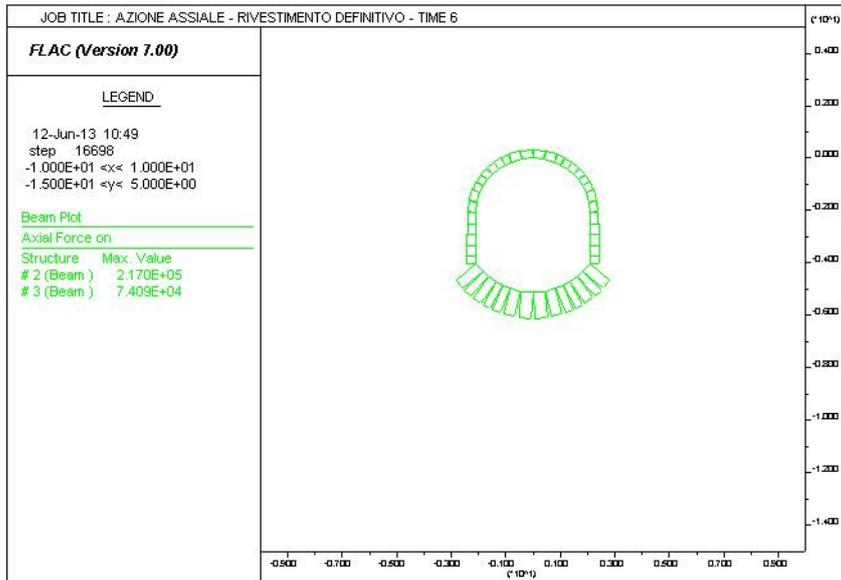


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



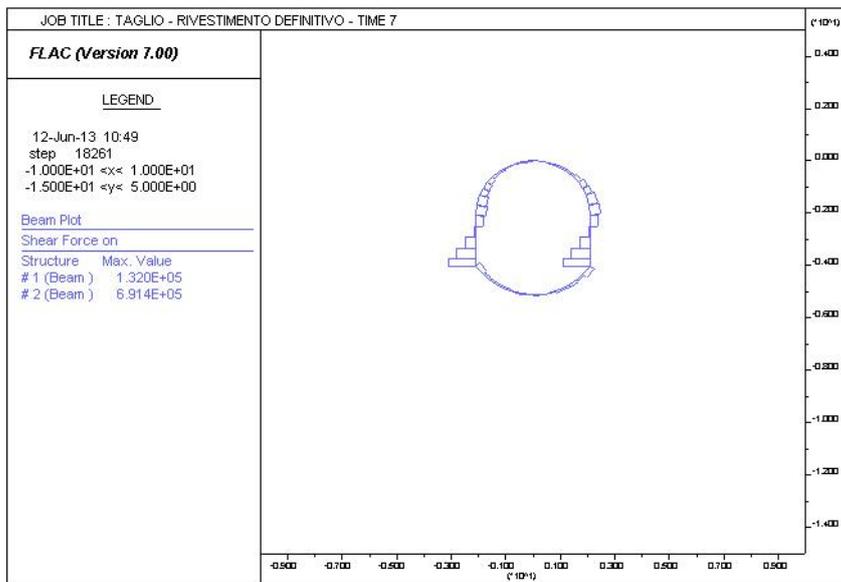
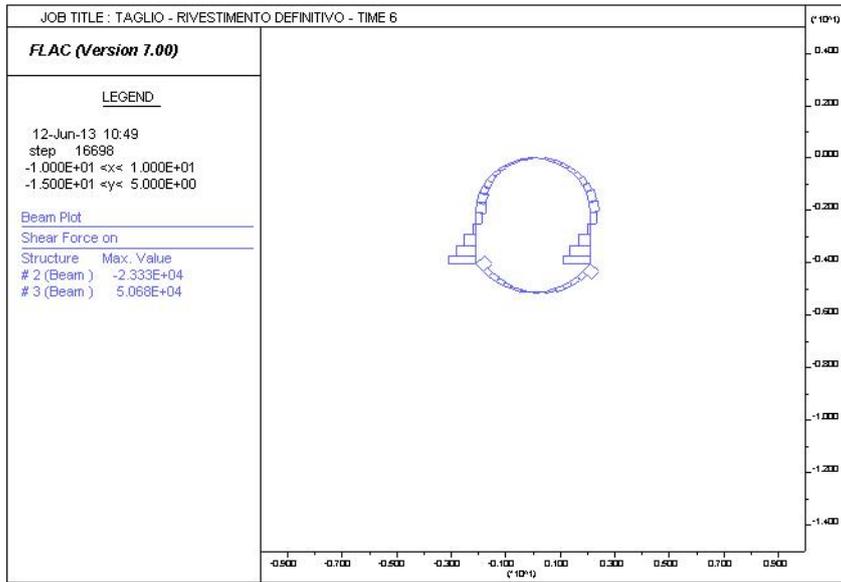


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



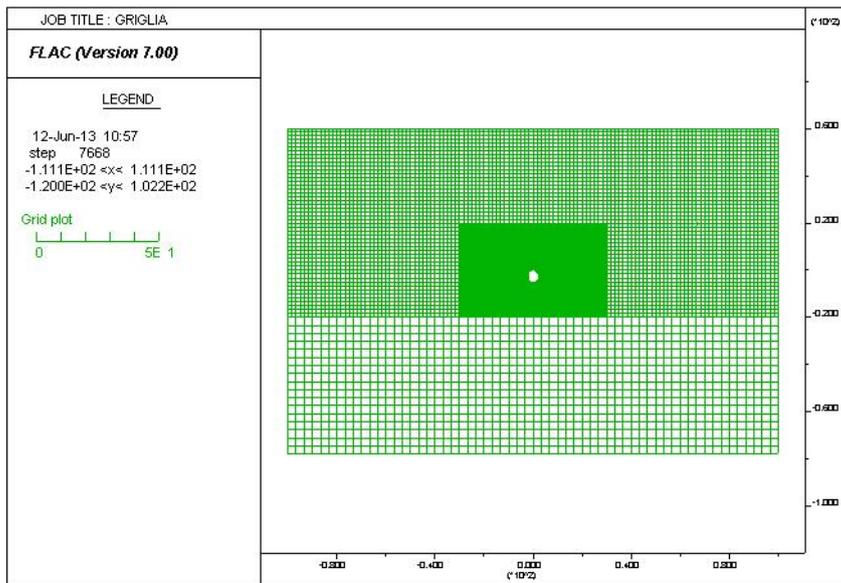


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



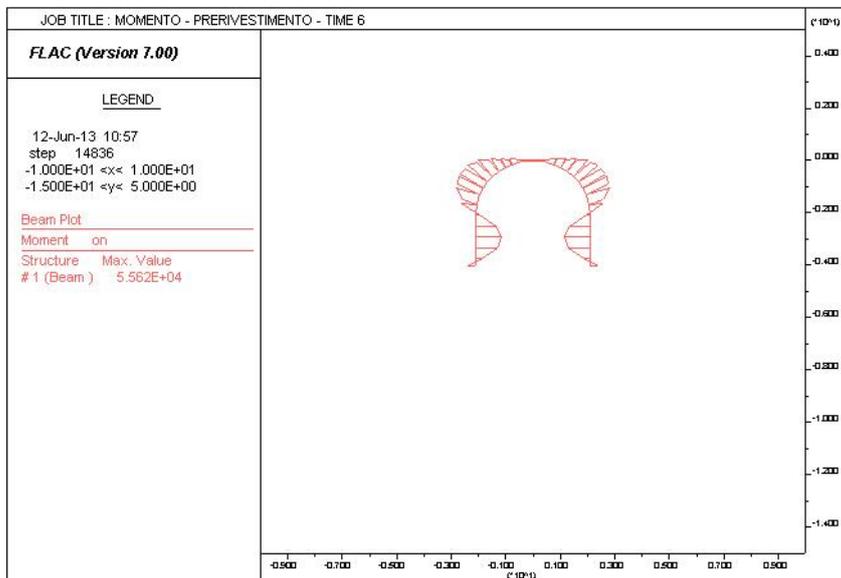
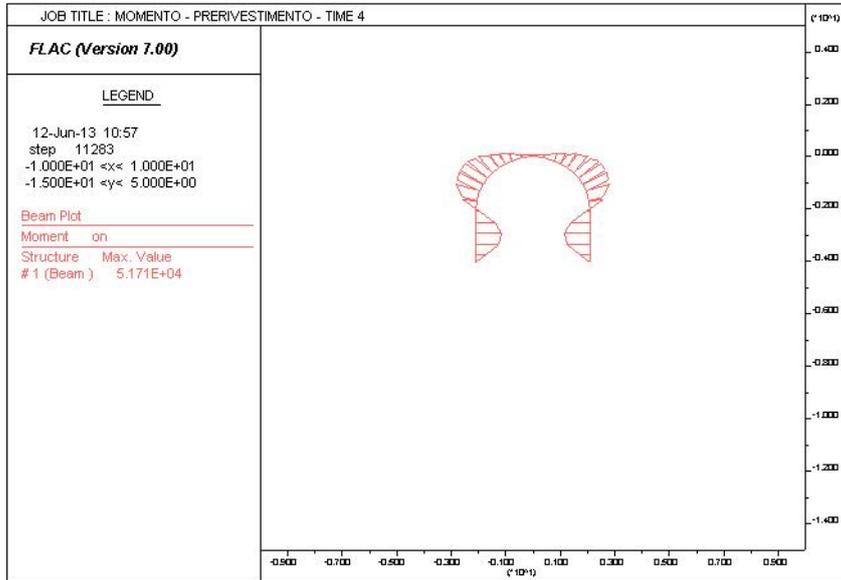


14.4. ANALISI 4 – BY- PASS PEDONALE - SEZIONE TIPO C2



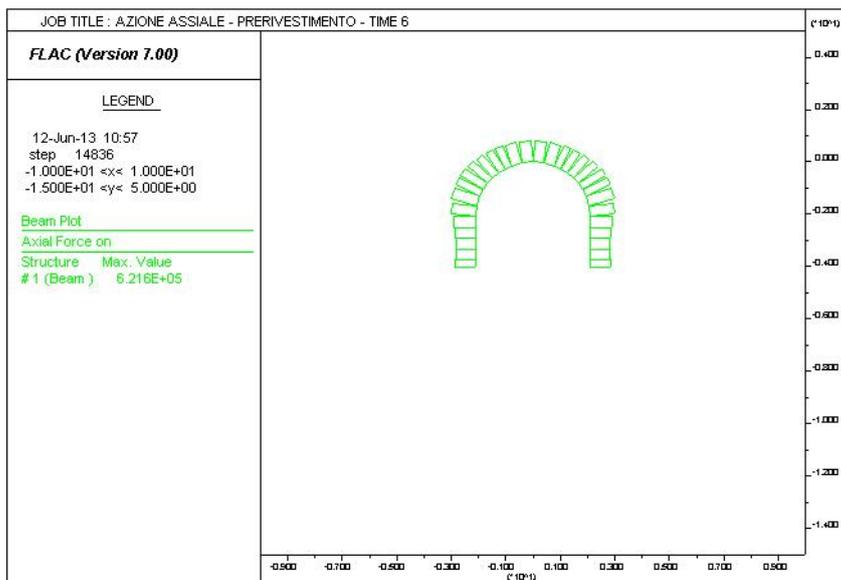
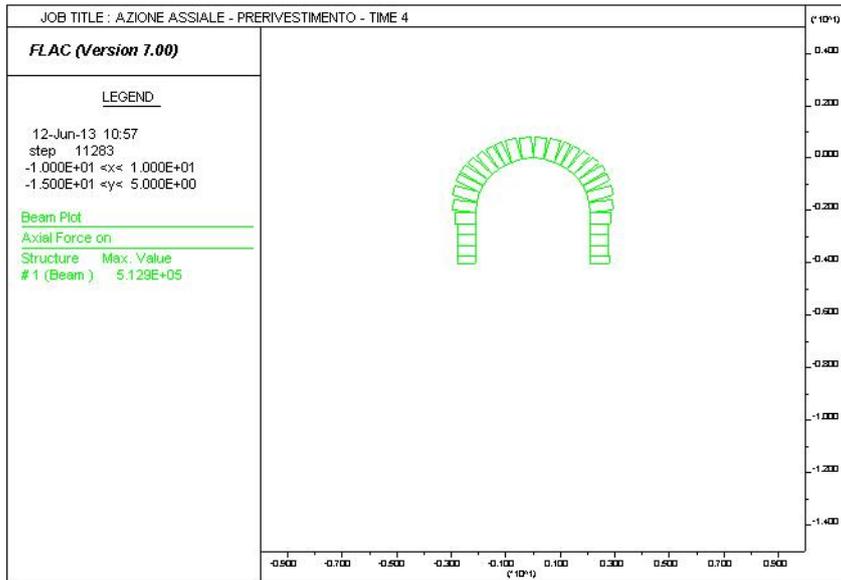


14.4.1. $k_0 = 1 - \sin \phi$



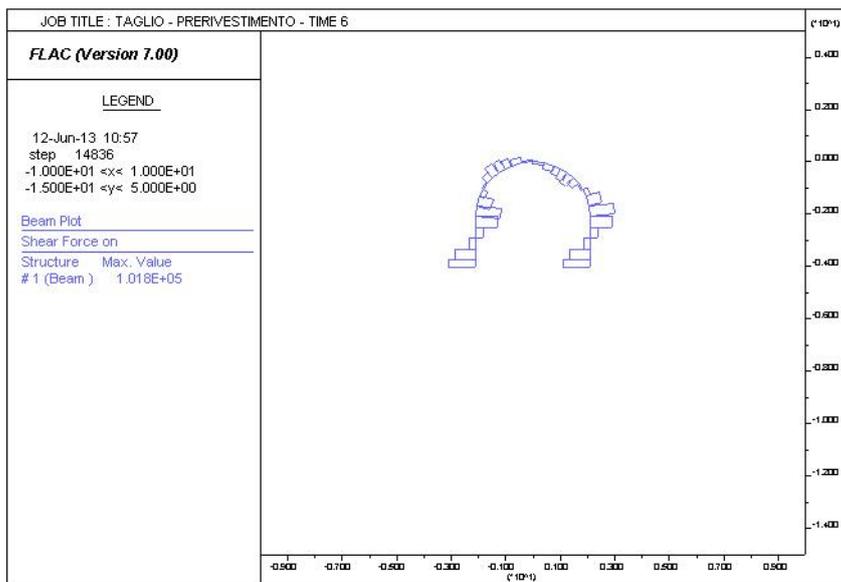
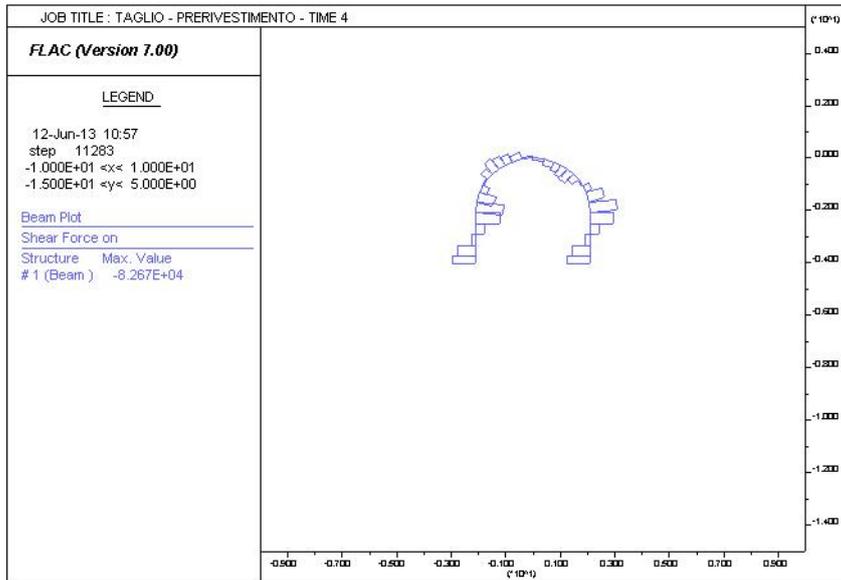


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



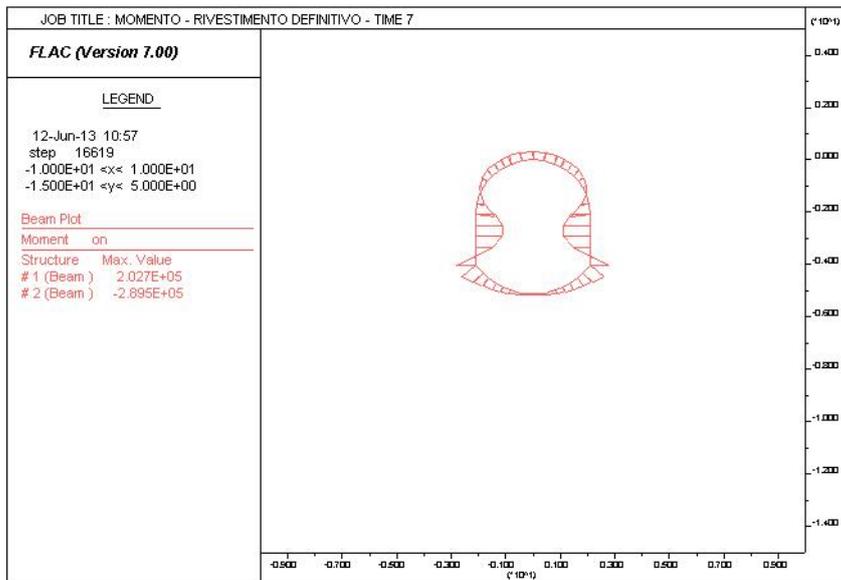
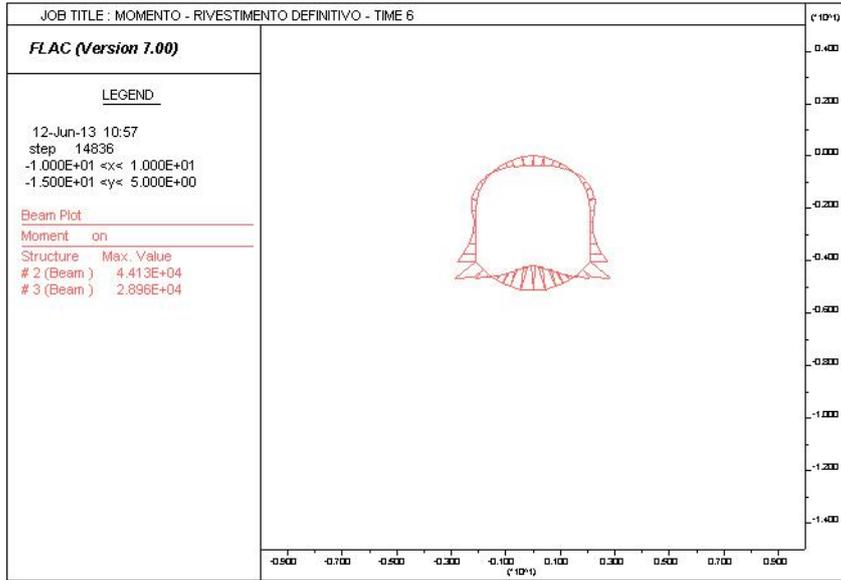


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



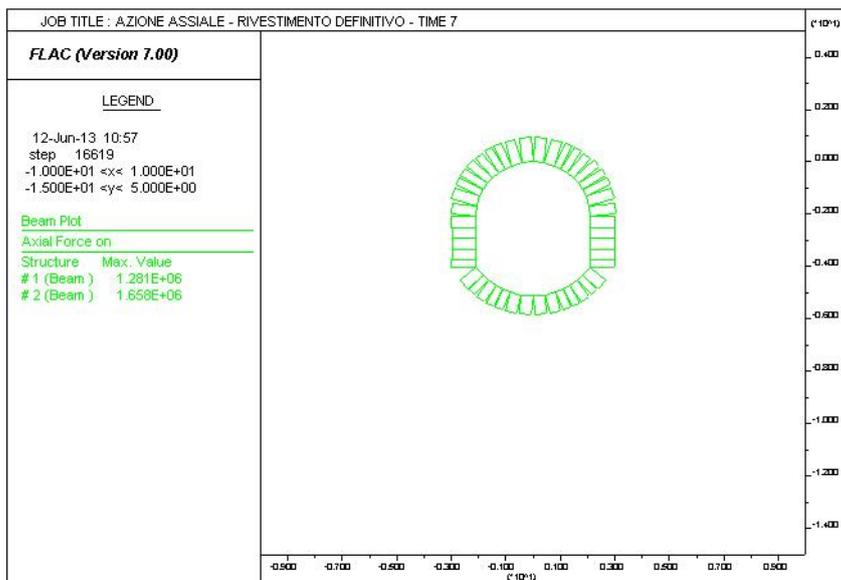
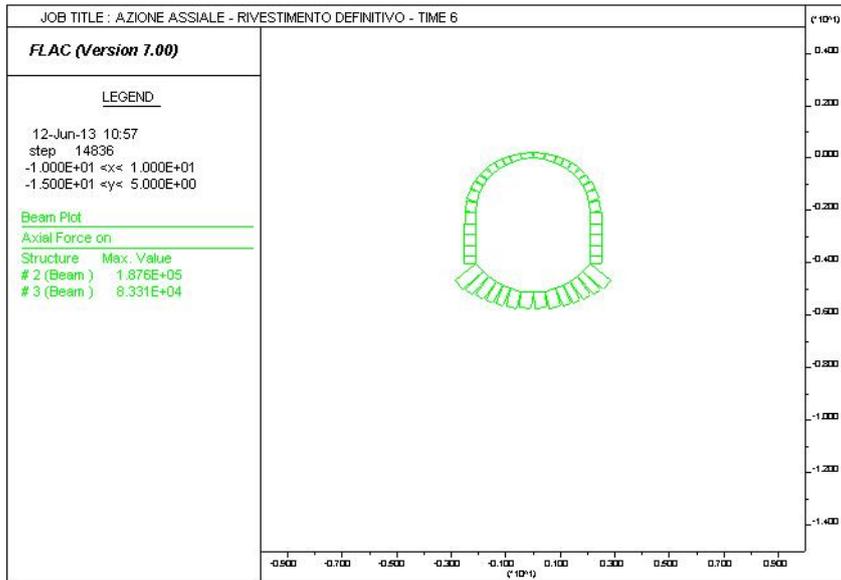


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



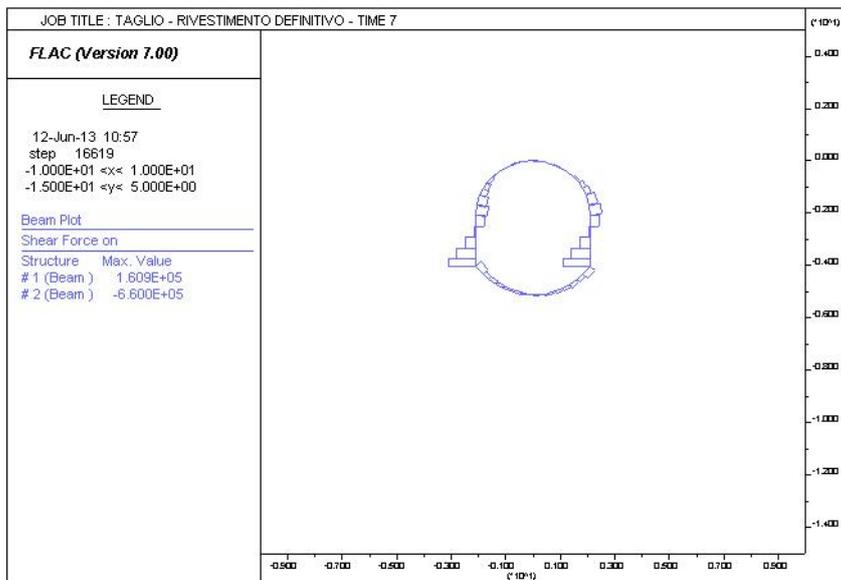
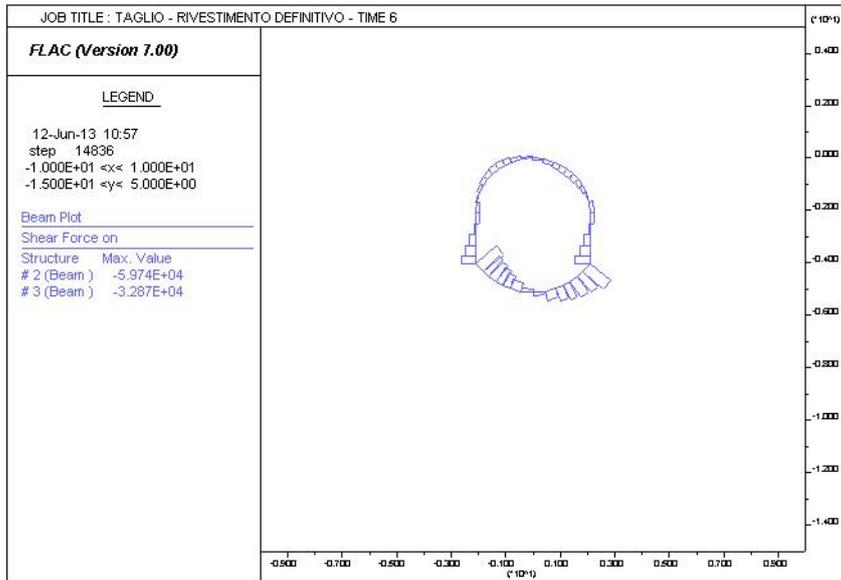


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass





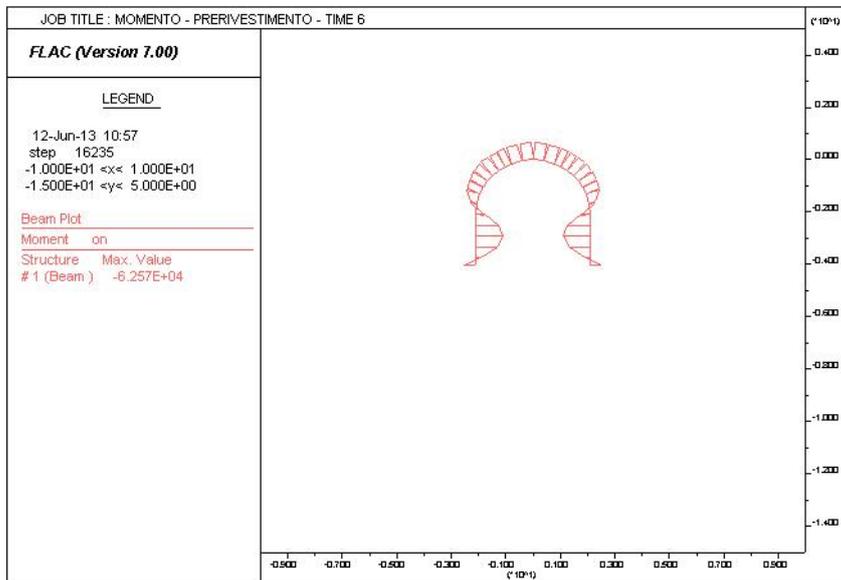
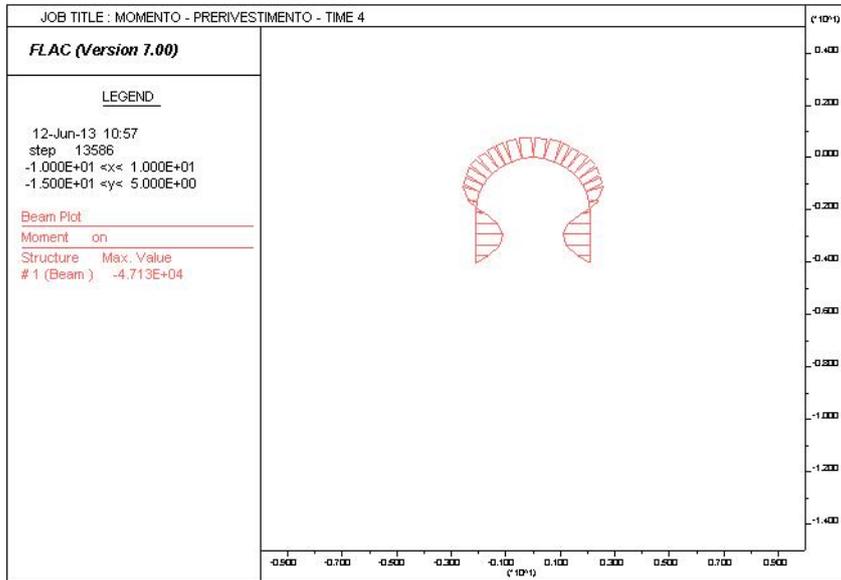
Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass





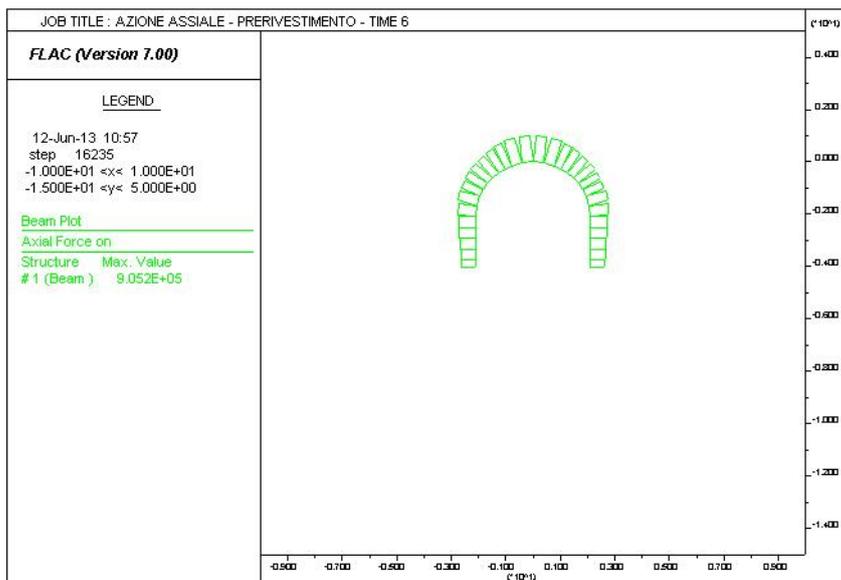
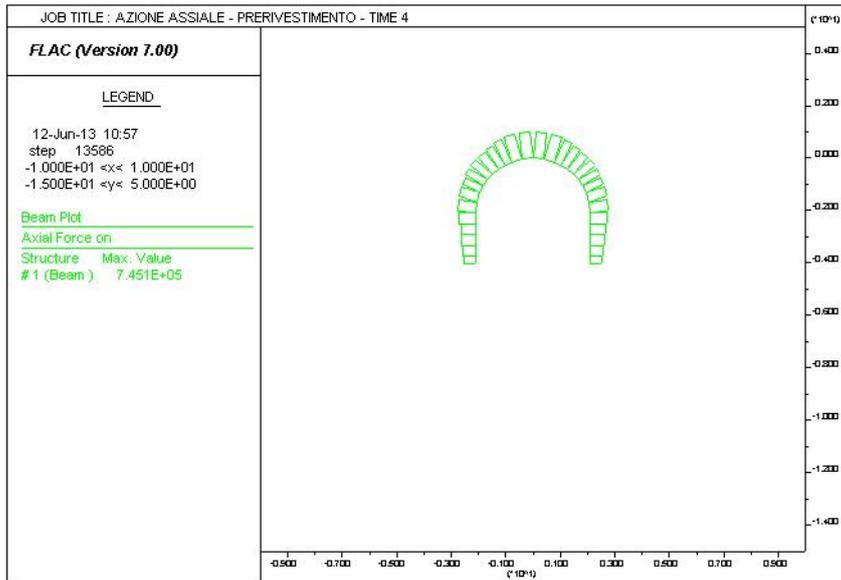
Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass

14.4.2. $k_0 = 1,2$



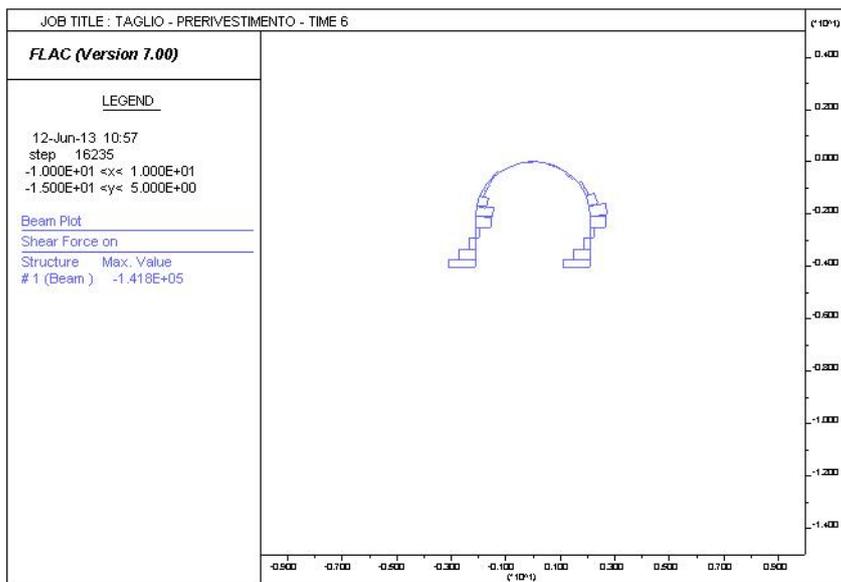
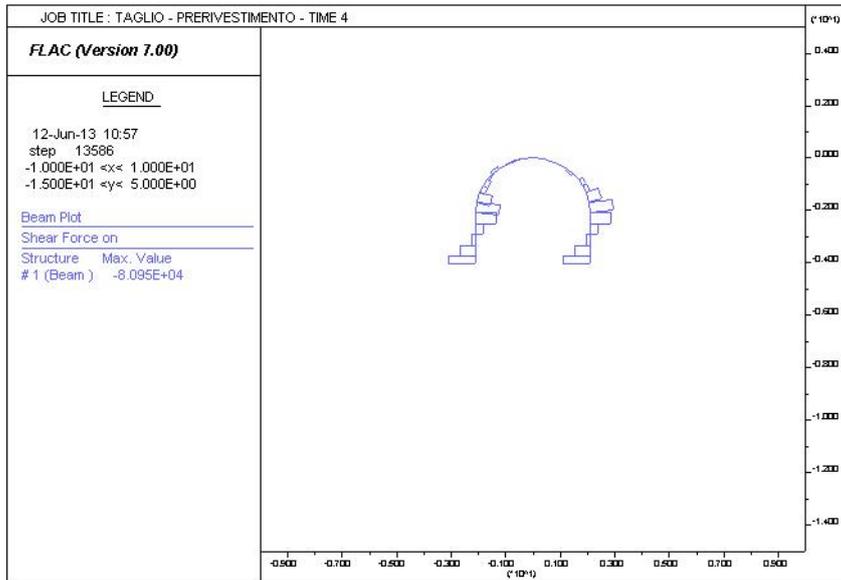


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



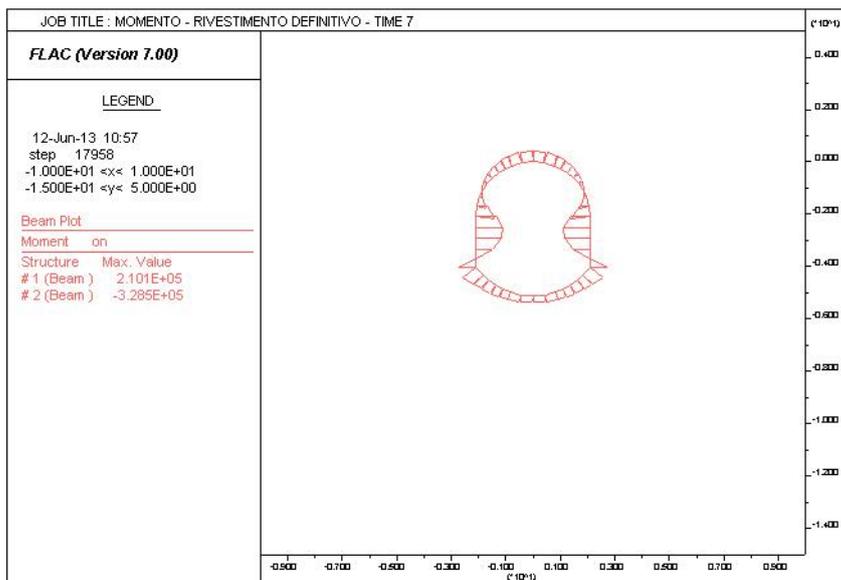
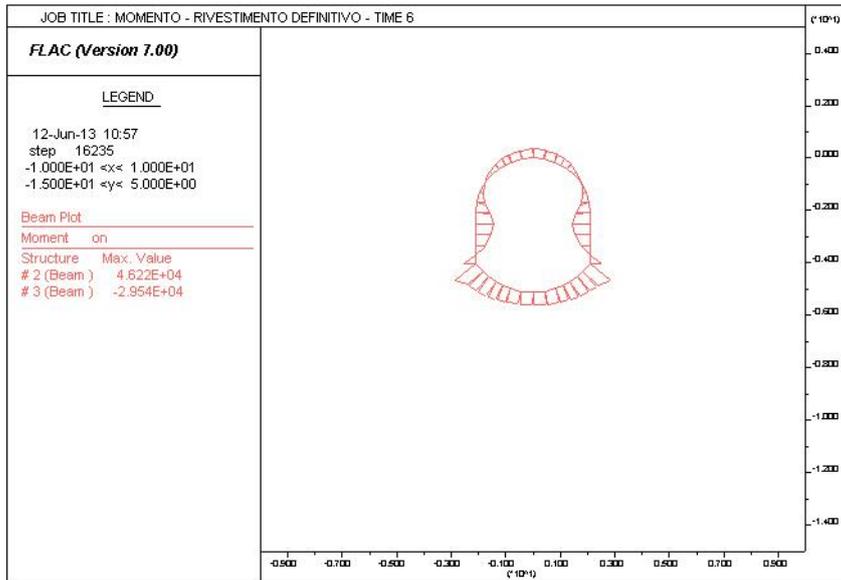


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass



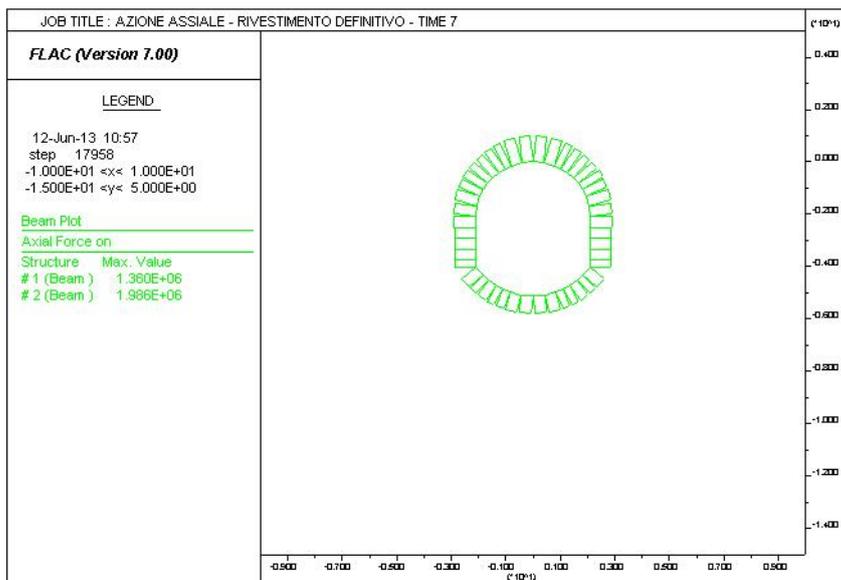
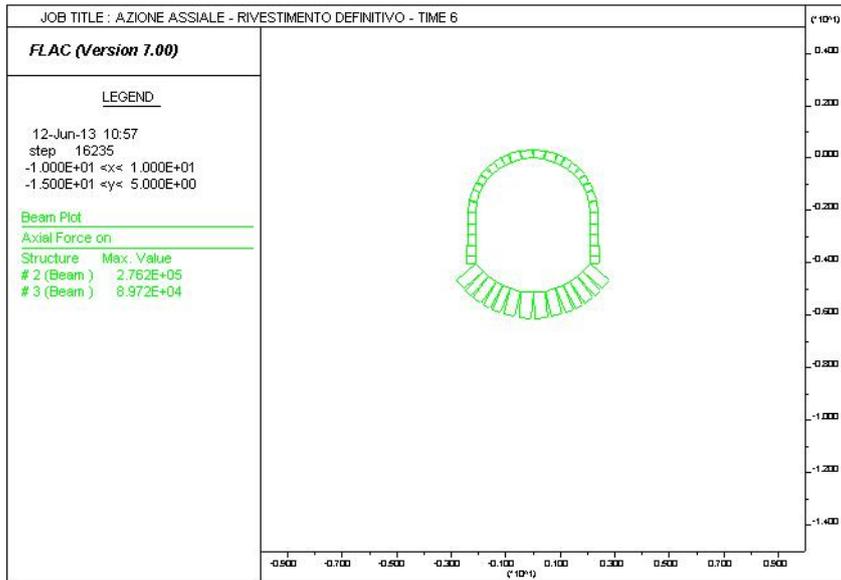


Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass





Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass





Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione di calcolo by-pass

