

S.p.A.

DIREZIONE REGIONALE PER LA SICILIA

PA 12/09

CORRIDOIO PLURIMODALE TIRRENICO - NORD EUROPA

ITINERARIO AGRIGENTO - CALTANISSETTA - A19

S.S. N° 640 "DI PORTO EMPEDOCLE"

AMMODERNAMENTO E ADEGUAMENTO ALLA CAT. B DEL D.M. 5.11.2001

Dal km 44+000 allo svincolo con l'A19

VARIANTE TECNICA N°4

ai sensi dell'art. 176, comma 5, secondo periodo lettera "a" e lettera "b", del D.Lgs. N. 163/2006 e Art. 11 del CSA-NG

CONTRAENTE GENERALE



DIRETTORE DEI LAVORI

Ing. CARLO DAMIANI

OPERE D'ARTE MAGGIORI  
GALLERIE NATURALI  
GALLERIA NATURALE CALTANISSETTA

By Pass Pedonali

Relazione di calcolo centine by-pass



Codice Unico Progetto (CUP) : F91B09000070001

3578-10

Codice Elaborato:

PA12\_09 - V 1 2 5 GN 2 0 4 GN 0 2 Z R H 4 4 5 B

Scala:  
----

F																			
E																			
D																			
C																			
B	Aprile 2021	AGGIORNAMENTO CARTIGLIO												A.ANTONELLI	A.FINAMORE				
A	Dicembre 2018	EMISSIONE												A.ANTONELLI	P.PAGLINI				
REV.	DATA	DESCRIZIONE										REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO	AUTORIZZATO				

Il Progettista:



Il Consulente Specialista:

Il Geologo:



Il Coordinatore per la sicurezza:



Il Direttore dei Lavori:



Responsabile del procedimento: Ing. LUIGI MUPO



## INDICE

<b>1.INTRODUZIONE</b> .....	<b>1</b>
1.1 Normativa di riferimento.....	1
1.2 Caratteristiche dei materiali .....	1
<b>2.CARATTERISTICHE DELLA STRUTTURA</b> .....	<b>1</b>
<b>3.CARICHI E COMBINAZIONI DI CARICO</b> .....	<b>4</b>
3.1 Pressione sul rivestimento della galleria .....	4
3.2 Carico sulla cornice permanente .....	5
3.3 Combinazioni di carico.....	5
<b>4.METODO DI CALCOLO</b> .....	<b>5</b>
4.1 Modello di calcolo .....	6
<b>5.ANALISI DEI RISULTATI</b> .....	<b>9</b>
<b>6.VERIFICHE DELLA STRUTTURA</b> .....	<b>16</b>
6.1 Verifiche tensionali dei profilati .....	16
6.2 Verifiche di instabilità dei profilati.....	17
6.3 Verifica delle giunzioni del rinforzo metallico.....	20
6.4 Verifica a rifollamento delle piastre di collegamento delle giunzioni .....	22
6.5 Verifica delle bullonature degli elementi strutturali con il rivestimento della galleria .....	23
6.6 Verifica del blocco in c.a. alla base.....	25
6.6.1 Resistenze di calcolo .....	25
6.6.2 Verifiche strutturali .....	25
6.7 Verifica a scorrimento della centinatura a telaio (zanche di collegamento tra le centine e il blocco in c.a. di base) .....	32

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina I di I

## 1. INTRODUZIONE

Il presente documento è redatto nell'ambito dei lavori di adeguamento alla categoria B della S.S. 640 secondo le norme del DM 5.11.2001 dell'itinerario Agrigento-Caltanissetta-A19 dal km 44+000 allo svincolo con la A19, e tratta il dimensionamento delle centinature temporanea e permanente da porre in opera per la realizzazione dei by-pass pedonali della galleria Caltanissetta.

Il telaio temporaneo costituito da centine trasversali circolari e da traverse longitudinali di collegamento è realizzato in carpenteria metallica e ha la funzione di sostenere gli anelli del rivestimento della galleria al momento del taglio propedeutico alla realizzazione del by-pass. La tensione misurata nei conci di rivestimento della galleria tramite martinetti piatti è compresa tra pari a 6MPa e 14MPa, mentre la tensione massima prevista in fase di progetto era pari a 24.4MPa: durante la fase di taglio dell'anello e la rimozione dei conci necessari per l'apertura del by-pass, tale sforzo (imposto pari a 20MPa) si trasferirà al telaio. L'apertura nel rivestimento della galleria sarà sostenuta a lungo termine da una cornice in carpenteria metallica permanente, che dovrà sostenere le medesime tensioni di cui sopra, a seguito della rimozione della struttura di sostegno temporanea. Tale cornice permanente sarà collegata al rivestimento del by-pass e posta in opera a seguito della realizzazione del rivestimento del cunicolo di emergenza.

### 1.1 Normativa di riferimento

Le verifiche statiche e la redazione della presente relazione sono state eseguite nel rispetto della Normativa in vigore e di alcune raccomandazioni, in particolare:

- **DM Infrastrutture del 14 gennaio 2008** - Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni – ed in particolare il capitolo 6 – Progettazione Geotecnica.
- **“Istruzioni per l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni”** n°617 del 2 febbraio 2009.

### 1.2 Caratteristiche dei materiali

I materiali impiegati sono:

CLS PER OPERE STRUTTURALI UNI EN 206-1 (2006) UNI 11104 (2004)

ANELLI PREFABBRICATI

- Classe di resistenza: : C55/67
- Resistenza a compressione caratteristica cubica Rck :  $\geq 67$ MPa

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 1 di 34

VARIANTE TECNICA N.4

- Classe di consistenza : S4-S5

CLS PER BLOCCO DI BASE

- Classe di resistenza: : C28/35  
- Resistenza a compressione caratteristica cubica Rck :  $\geq 35$ MPa  
- Classe di consistenza : S4  
- Rapporto a/c :  $\leq 0.55$   
- Diametro max aggregati : 20mm  
- Copriferro minimo : 30mm

ACCIAIO PER ARMATURA CLS

Barre  $\varnothing \leq 40$ mm

Acciaio FeB44k

- Tensione caratteristica a rottura,  $f_{tk}$  : 540MPa  
- Tensione caratteristica di snervamento,  $f_{yk}$  : 450MPa

ACCIAIO PER CARPENTERIA METALLICA

Acciaio S355

- Tensione caratteristica a rottura,  $f_{tk}$  : 510MPa  
- Tensione caratteristica di snervamento,  $f_{yk}$  : 355MPa

BULLONI

- Viti: Classe 8.8  
- Dadi: Classe 8.0

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 2 di 34

## 2. CARATTERISTICHE DELLA STRUTTURA

La struttura di sostegno temporanea per la realizzazione dei by-pass è costituita da una base in calcestruzzo di classe C28/35, sagomata inferiormente per consentire il passaggio degli impianti, su cui sono collegate 6 centine costituite da 2HEM500 accoppiati connesse alla traversa principale, realizzata in forma scatolare mediante due piatti verticali laterali sagomati secondo la curvatura del rivestimento della galleria (sp. 40mm e 50mm), due piatti verticali costituenti l'anima centrale (sp. 50mm) e due piatti, superiore e inferiore, disposti in direzione radiale alla galleria e che completano la struttura scatolare (sp. 50mm). La struttura è posta in carico tramite 10 martinetti per scaricare completamente il rivestimento in conci prefabbricati della galleria e consentire la stabilità del sistema durante il taglio dei conci per la realizzazione dell'apertura propedeutica alla costruzione del by-pass. Completano il telaio in carpenteria metallica 10 traverse di collegamento realizzate in profilati HEM500. Inoltre sono predisposti rinforzi metallici per le 4 centine centrali in corrispondenza della traversa principale scatolata. La struttura metallica è collegata al rivestimento della galleria tramite una bullonatura sistematica realizzata con bulloni M30.

Gli elementi costituenti il telaio in carpenteria metallica sono realizzati in acciaio S355.

Infine una cornice calandrata permanente sarà posizionata all'interno dell'apertura realizzata nel rivestimento della galleria: tale struttura è costituita da due elementi curvi posizionati inferiormente e superiormente e due elementi verticali che chiudono la sagoma, gli elementi di questa struttura sono disposti secondo la curvatura della galleria. Questa struttura sosterrà gli sforzi trasmessi dal rivestimento della galleria a seguito della rimozione della struttura di sostegno temporanea costituita dalla centinatura a telaio.

Nella figure seguenti sono riportate le carpenterie della struttura a telaio e della cornice permanente oggetto delle presenti analisi e le caratteristiche dei profilati metallici costituenti gli elementi strutturali, per maggiori dettagli si rimanda agli elaborati grafici.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 1 di 34

VARIANTE TECNICA N.4

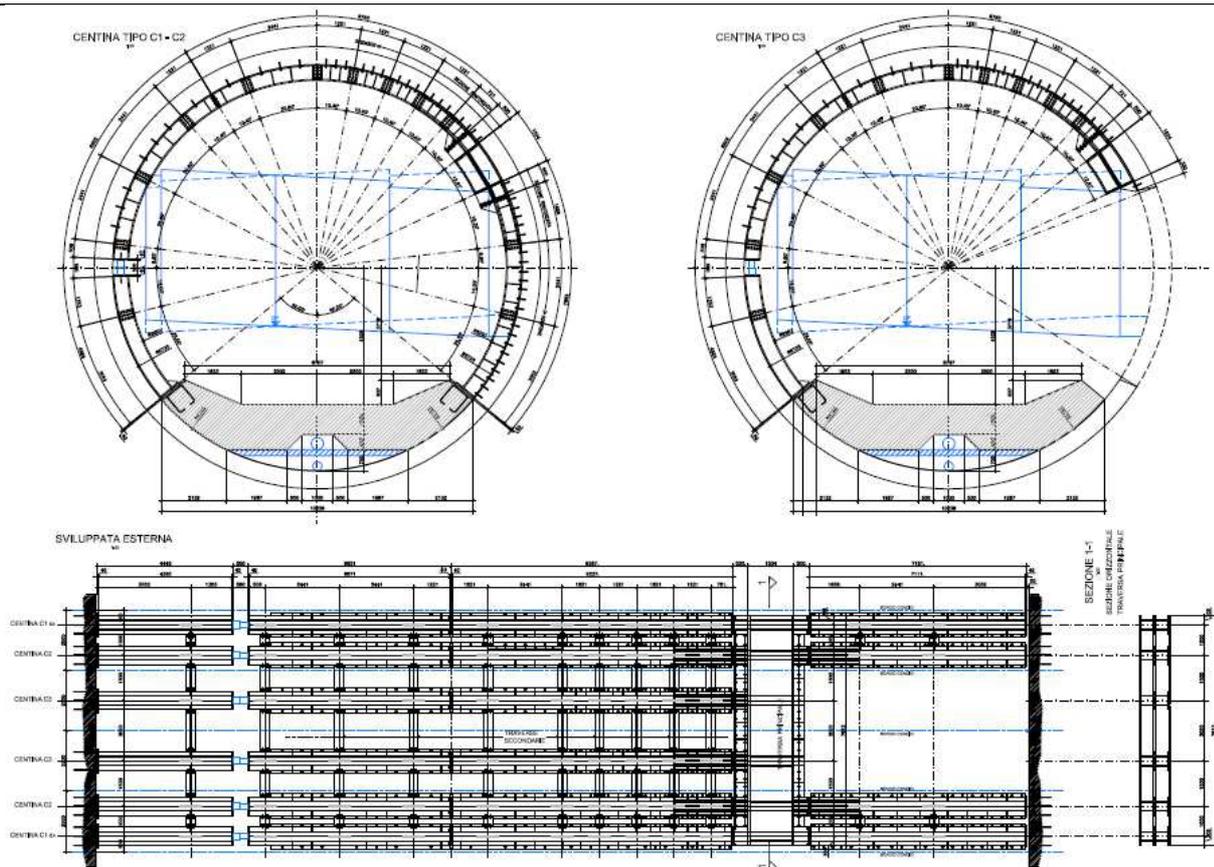


Figura 2.1: carpenteria della struttura di sostegno temporanea a portale.

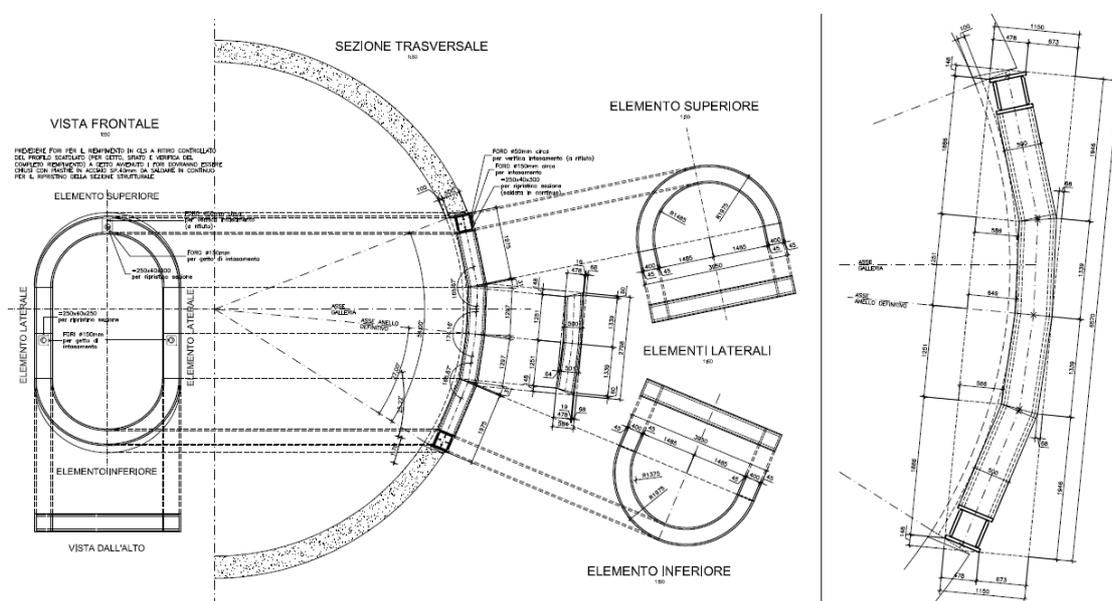
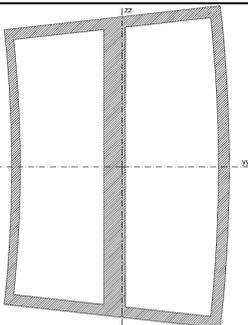
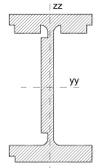
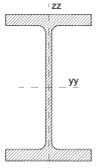
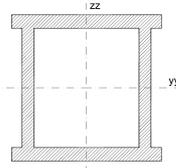


Figura 2.2: carpenteria della cornice di sostegno permanente.

Tabella 2.1: Caratteristiche dei profilati metallici della struttura.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali	Pagina 2 di 34

VARIANTE TECNICA N.4

	Traversa principale	HEM500R	HEM500	Cornice permanente
				
H [cm] - Altezza trave	150.00	54.40	52.40	50.00
B [cm] - Base trave	100.00	30.60	30.60	49.00
$t_w$ [cm] - Spessore anima	19	4.6	2.1	9
$t_f$ [cm] - Spessore flange	5	7	4	4
$h_a$ [cm] - Altezza anima	140	40.4	44.4	35
A [cm <sup>2</sup> ] – Area	3458	546	344	770
$J_x$ [cm <sup>4</sup> ] - Momento d'inerzia xx	7969022	237470	161930	215857
$J_y$ [cm <sup>4</sup> ] - Momento d'inerzia yy	3484854	28148	19150	266204
$W_x$ [cm <sup>3</sup> ] – Modulo di resistenza xx	106254	8622	6181	8634
$W_y$ [cm <sup>3</sup> ] - Modulo di resistenza yy	64178	1809	1252	10865
$i_x$ [cm] - Raggio d'inerzia xx	48.0	20.9	21.7	16.7
$i_y$ [cm] - Raggio d'inerzia yy	31.74	7.18	7.46	18.6
$S_x$ [cm <sup>3</sup> ] - Momento statico metà sezione xx	73427	5353	3544	5932
$S_y$ [cm <sup>3</sup> ] - Momento statico metà sezione yy	54305	1675	965	6606
$J_o$ [cm <sup>4</sup> ] – Momento d'inerzia polare	11453876	265618	181080	482061
$i_o$ [cm] – Raggio d'inerzia polare	57.54	22.05	22.93	25.02
$J_T$ [cm <sup>4</sup> ] – momento torsionale	325135.8	8224.9	1428.2	10489.7
$J_{\omega}$ [cm <sup>6</sup> ] – Momento d'inerzia area settoriale	18317264364	15810513	11215006	140822004
$W_{pl,x}$ [cm <sup>3</sup> ] – Modulo di resistenza plastico	146854	10706	7088	11864

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 3 di 34

### 3. CARICHI E COMBINAZIONI DI CARICO

Nel modello di calcolo sono stati considerati i carichi gravitativi di ciascun elemento strutturale, secondo i pesi specifici del calcestruzzo ( $\gamma=25\text{kN/m}^3$ ) e dell'acciaio ( $\gamma=78.6\text{kN/m}^3$ ).

#### 3.1 Pressione sul rivestimento della galleria

La pressione agente sull'anello di rivestimento della galleria da inserire nel modello della centinatura a telaio è stata valutata a partire dalle tensioni misurate nei conci tramite misure dirette di tipo invasivo, in particolare mediante martinetti piatti.

Tali misurazioni sono state effettuate in modo omogeneo lungo tutto il rivestimento della canna sinistra: l'esperienza su scavi analoghi in presenza di gallerie a doppia canna infatti (GN Caltanissetta), ha dimostrato che il rivestimento definitivo più sollecitato è quello relativo alla prima canna in ordine di realizzazione, dal momento che il terreno al contorno è soggetto sia al disturbo tensionale indotto dallo scavo, sia dall'esecuzione successiva della seconda canna.

Al fine di ottenere la ridondanza di misure necessaria, si è proceduto effettuando le prove dell'anello ispezionato sia sul paramento sinistro sia su quello destro.

Nella tabella seguente si riportano i risultati delle tensioni misurate nel rivestimento della galleria tramite martinetto piatto.

Tabella 3.1: Tensioni misurate all'interno del rivestimento della galleria naturale – canna sinistra.

Anello [n°]	Pressione di ripristino giunto		Media [MPa]	Tensione concio* [MPa]
	Sx [bar]	Dx [bar]		
242	70	120	9.5	6.08
638	200	200	20	12.8
746	190	240	21.5	13.76
1170	150	150	15	9.6
1355	130	150	14	8.96

\* Le tensioni agenti sul concio sono valutate a partire dalla pressione di ripristino ottenuta dalla prova di martinetto piatto eseguita sul giunto, moltiplicata per il coefficiente di omogeneizzazione  $\mu$ , pari al rapporto tra la superficie del giunto e la superficie del concio ( $\mu \approx 0.64$ ).

Come si evince dalla tabella, sui conci degli anelli indagati si ottengono valori compresi tra 6MPa e 14MPa.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 4 di 34

Per il dimensionamento della struttura di sostegno temporanea costituita da centine e della cornice permanente in acciaio, si è scelto cautelativamente di utilizzare una pressione nel rivestimento della galleria pari a 20 MPa (pari a 1.5 volte il valore di pressione massima registrata), dalla quale tramite la formula di Mariotte si ottiene la pressione del terreno agente sul rivestimento della galleria:

$$P = (\sigma_c \cdot 2s) / D = (20\text{MPa} \times 2 \times 600\text{mm}) / 14050\text{mm} = 1.708\text{MPa}$$

in cui

P è la pressione del terreno agente sul rivestimento della galleria;

$\sigma_c$  è la tensione misurata all'interno dei conci di rivestimento;

s è lo spessore del rivestimento;

D è il diametro della galleria.

### 3.2 Carico sulla cornice permanente

Il carico lineare applicato alla calotta superiore e inferiore della cornice permanente è stato valutato in maniera del tutto analoga a quanto fatto per il modello della centinatura a telaio: la forza di compressione agente per metro di rivestimento della galleria a partire dalla pressione agente misurata nei conci e pari al carico lineare applicato sulla cornice, risulta pari a  $F = 20\text{MPa} \times 600\text{mm} = 12\text{MN/m}$ . Tale forza si scaricherà sulla cornice in acciaio permanente a seguito della rimozione della struttura di sostegno temporanea costituita dalla centinatura a telaio.

### 3.3 Combinazioni di carico

Sono state analizzate due combinazioni di carico, una nelle condizioni di esercizio (SLE, con coefficiente per le azioni  $\gamma_Q = 1.0$ ) e l'altra per la condizione di SLU, con coefficiente per le azioni pari a  $\gamma_Q = 1.1$  per la centinatura a telaio e pari a  $\gamma_Q = 1.3$  per la cornice permanente (il coefficiente parziale per le azioni per il modello della centinatura a telaio è stato considerato pari a 1.1 poiché il dimensionamento della struttura è stato effettuato a partire dai dati di monitoraggio relativi all'effettiva tensione agente nel rivestimento della galleria e la struttura è temporanea).

## 4. METODO DI CALCOLO

Per la valutazione dello stato tenso-deformativo delle strutture si è adottato il metodo degli elementi finiti (FEM), implementato tramite il codice commerciale Straus7 versione 2.4.6

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali	Pagina 5 di 34

della G+D Computing (Sydney) che ha consentito l'esame delle strutture nelle condizioni di esercizio e di SLU, considerando la geometria e i carichi di progetto.

#### 4.1 Modello di calcolo

Sono stati analizzati due modelli di calcolo, uno per la struttura temporanea costituita dalla centinatura a telaio e uno per la struttura permanente che costituisce la cornice di sostegno a lungo termine del rivestimento della galleria.

Il modello di calcolo della centinatura a telaio è costituito da elementi *plate*<sup>(1)</sup>, *brick*<sup>(2)</sup> e *beam*<sup>(3)</sup> che simulano rispettivamente: 1) il rivestimento della galleria, 2) l'elemento di base in calcestruzzo su cui appoggiano le centine e 3) i profilati metallici costituenti il telaio in carpenteria metallica e gli elementi *point contacts* che simulano l'interfaccia tra l'ammasso roccioso in cui è inserita la galleria e il rivestimento della stessa, i bulloni di collegamento M30 tra il telaio e il rivestimento della galleria, e l'interfaccia tra le centine e il blocco in c.a. di base e il rivestimento della galleria. Tutti gli elementi *point contacts*, ad eccezione di quelli che simulano i bulloni, sono in grado di reagire solo a compressione e sono in grado di trasmettere l'attrito statico tra acciaio e calcestruzzo e tra ammasso roccioso e rivestimento della galleria. Per l'ammasso roccioso fratturato che circonda la galleria è stato assunto il modulo elastico  $E = 100\text{MPa}$ , che corrisponde a una rigidezza di confinamento

$k_n=11\text{MPa/m}^3$  (secondo la formulazione di Galerkin  $k_n = \frac{E}{R(1+\nu)}$ ), poi attribuita ai *point*

*contact* che circondano la galleria mediante gli interassi longitudinali e radiali e a cui è stato associato un coefficiente di attrito pari a  $\mu=0.25$ , a partire dall'angolo di attrito del materiale  $\mu = \tan(2/3 \times 22^\circ)$ . Il modulo elastico del calcestruzzo costituente gli anelli di rivestimento della galleria è assunto pari a  $35\text{GPa}$ , quello dell'elemento di contrasto di base è pari a  $31\text{GPa}$ ; il modulo elastico dell'acciaio è stato assunto pari a  $206\text{GPa}$ , il coefficiente di attrito tra calcestruzzo e acciaio è stato posto uguale a  $\mu = 0.7$ .

Il modello di calcolo della cornice permanente è realizzato con elementi *beam* che simulano i profilati costituenti la struttura. I vincoli della carpenteria metallica sono costituiti dal rivestimento definitivo in c.a. del by-pass, simulato con molle reagenti solo a compressione con rigidezza pari a  $7300\text{MPa/m}$ .

Nelle figure seguenti sono mostrati i modelli di calcolo.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali	Pagina 6 di 34

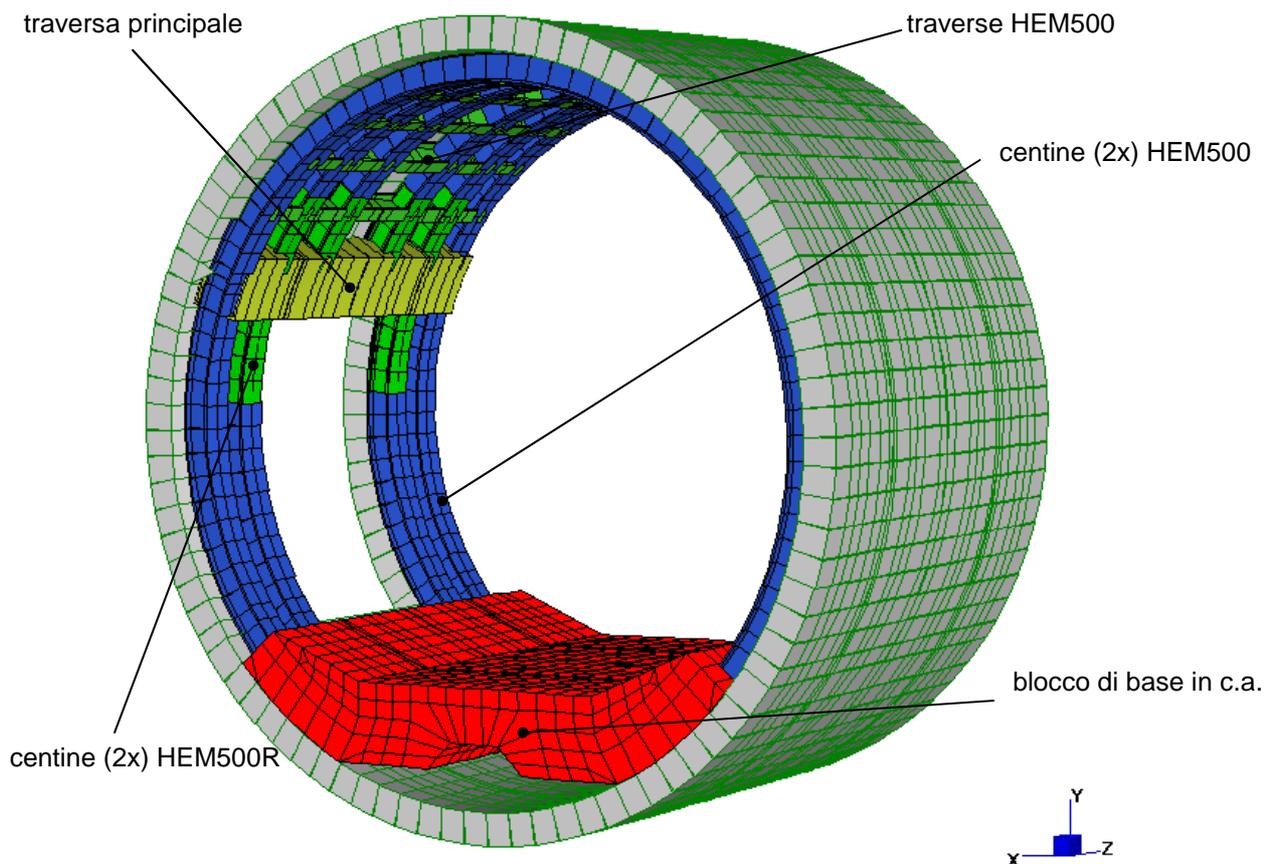


Figura 4.1: modello di calcolo agli elementi finiti per il dimensionamento della centinatura a telaio temporanea implementato con il codice di calcolo Straus7.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 7 di 34

VARIANTE TECNICA N.4

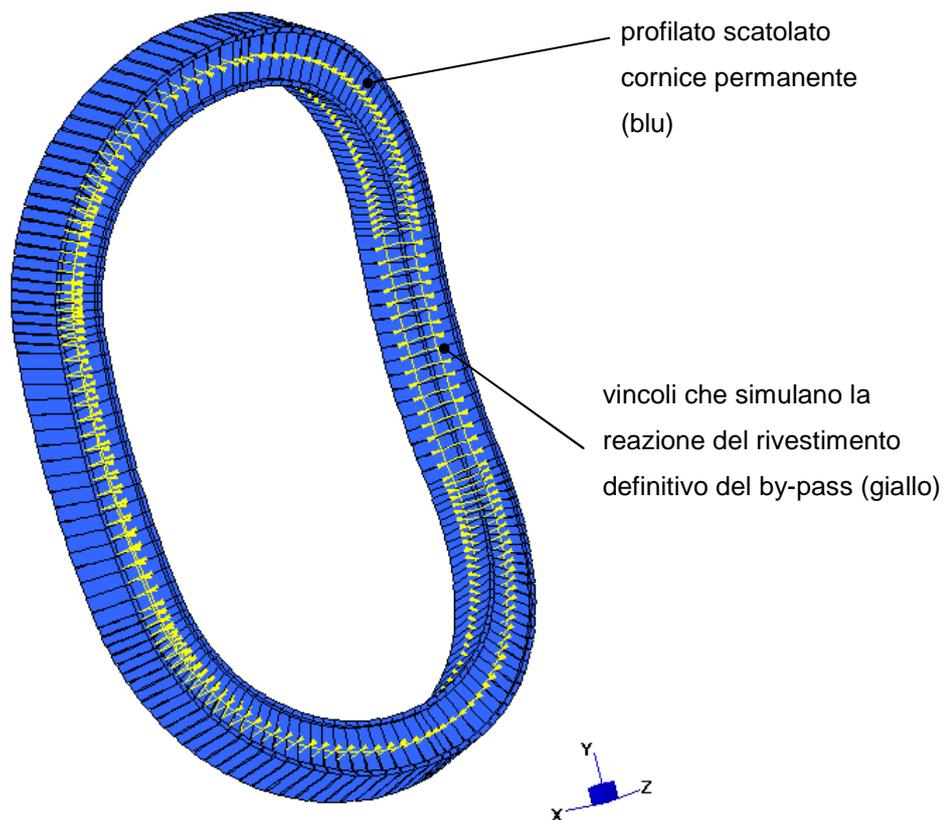


Figura 0.1: modelli di calcolo agli elementi finiti per il dimensionamento della cornice permanente, implementato con il codice di calcolo Straus7.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 8 di 34

## 5. ANALISI DEI RISULTATI

Nella figure seguenti si riportano gli spostamenti in condizione di SLE per la centinatura a telaio e per il blocco di contrasto in c.a. di base e di seguito quelli della cornice permanente (la condizione deformata è amplificata per apprezzarne l'andamento).

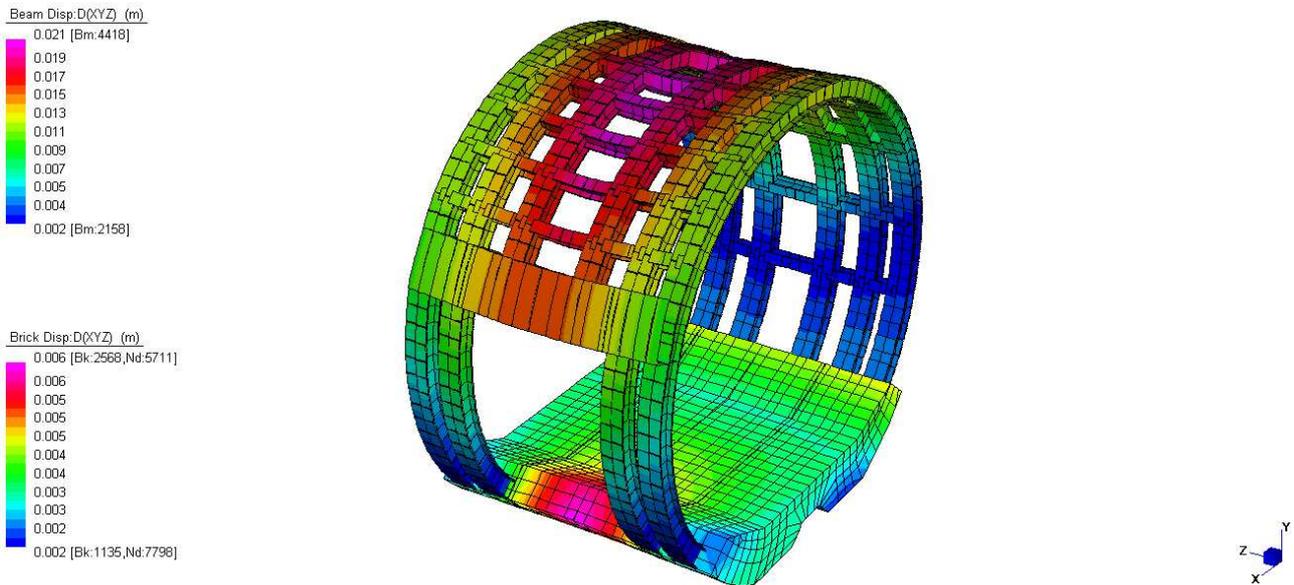


Figura 5.1: spostamenti totali (xyz) della centinatura a telaio e del blocco di contrasto in c.a. di base – SLE.

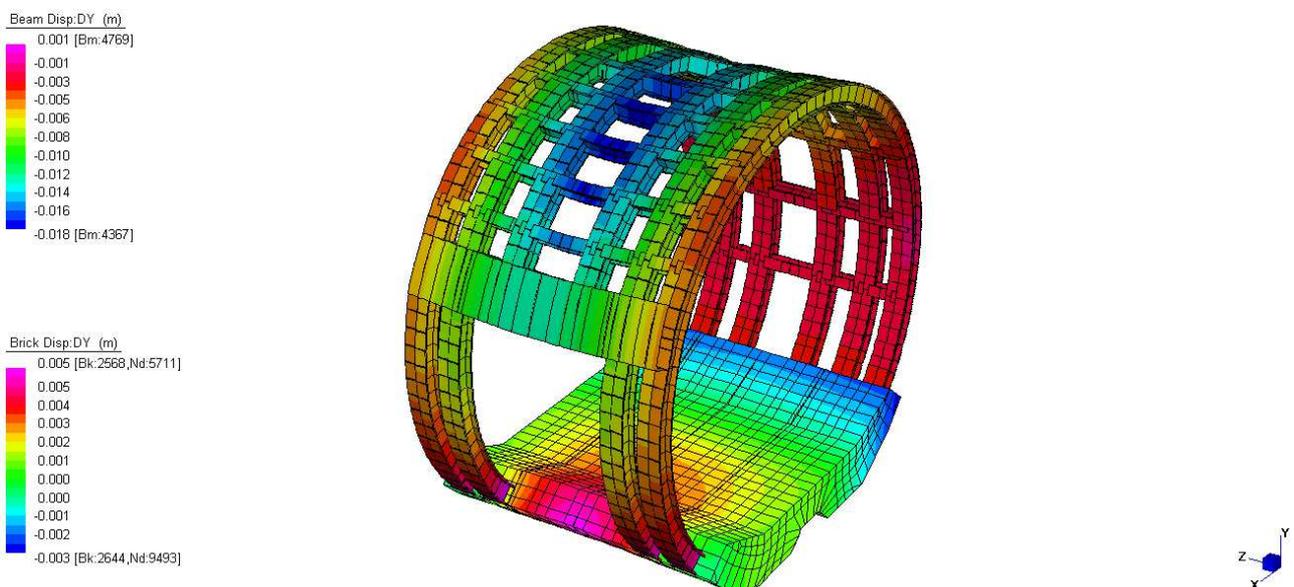


Figura 5.2: spostamenti verticali (y) della centinatura a telaio e del blocco di contrasto in c.a. di base – SLE.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali	Pagina 9 di 34

VARIANTE TECNICA N.4

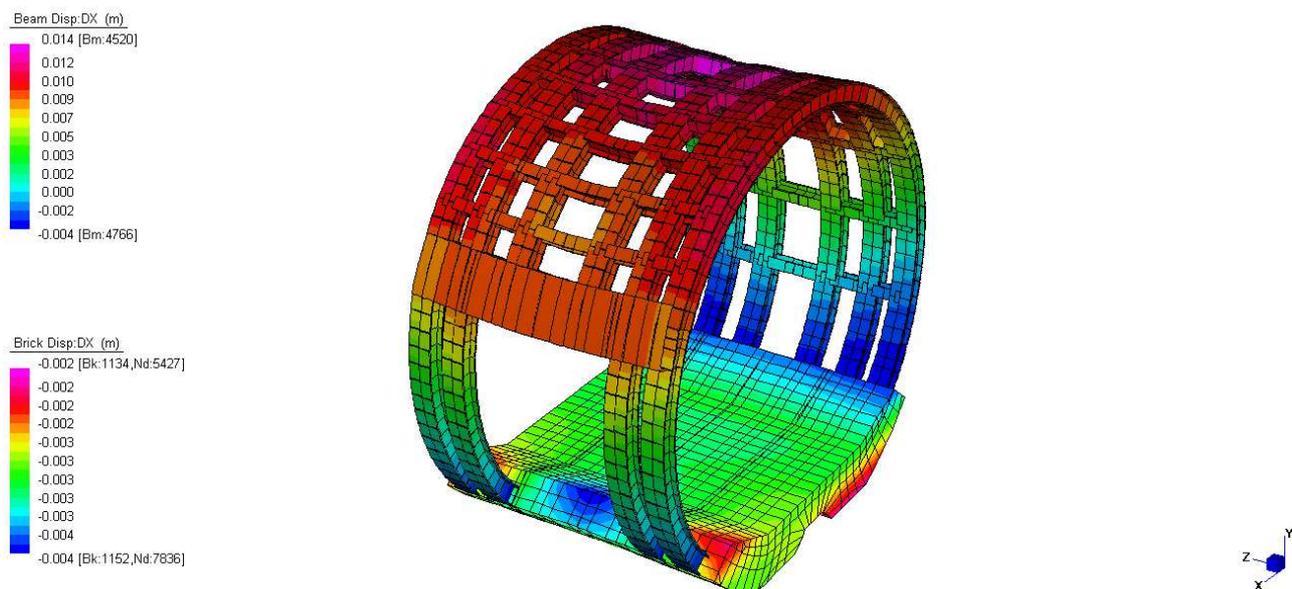


Figura 5.3: spostamenti laterali (x) della centinatura a telaio e del blocco di contrasto in c.a. di base – SLE.

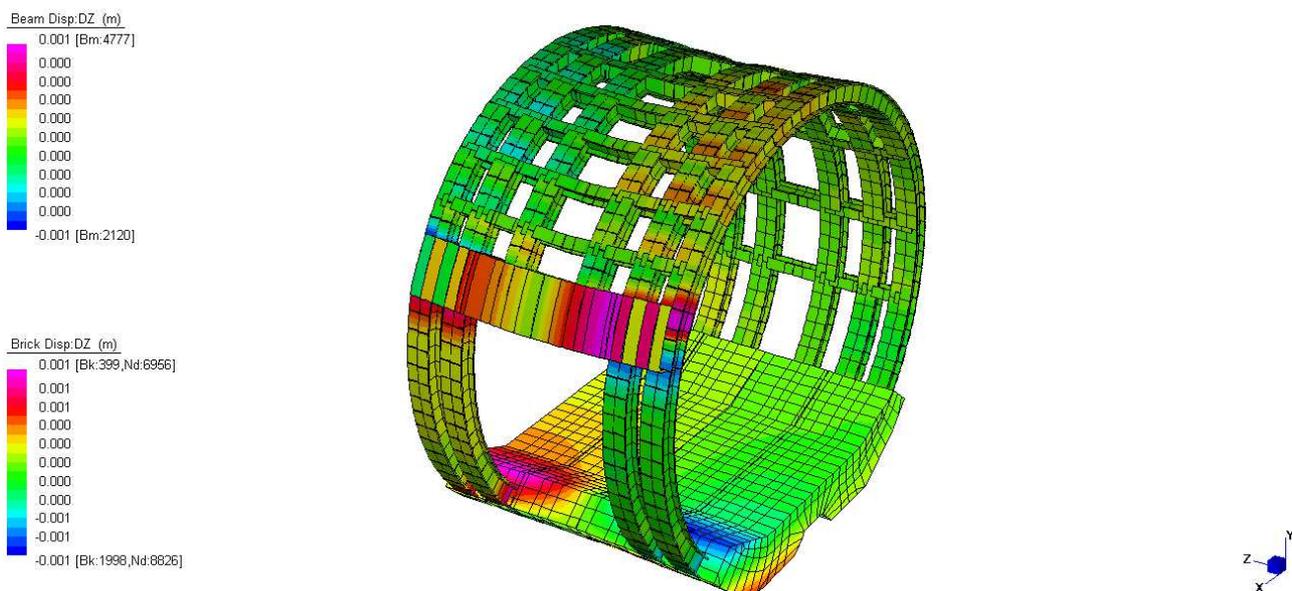


Figura 5.4: spostamenti longitudinali (z) della centinatura a telaio e del blocco di contrasto in c.a. di base – SLE.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali	Pagina 10 di 34

VARIANTE TECNICA N.4

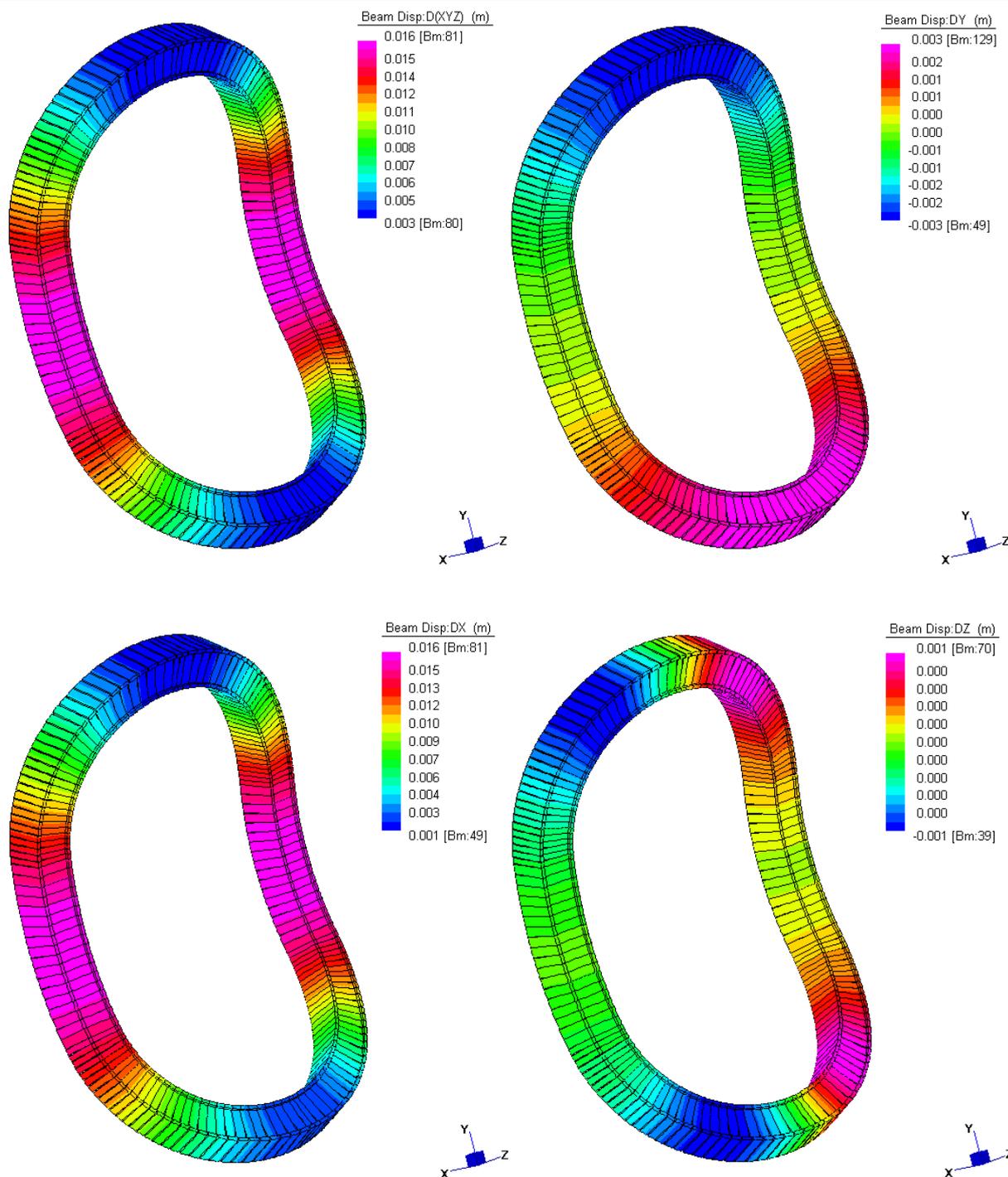


Figura 5.5: spostamenti totali (xyz), verticali (y), laterali (x) e radiali (z) della cornice permanente – SLE.

Gli spostamenti massimi subiti dalla struttura a telaio sono pari a 2.1cm e si verificano in corrispondenza delle traverse di collegamento costituite da profilati HEM500 (spostamento relativo rispetto alle centine pari a 2mm), lo spostamento massimo delle centine è pari a

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 11 di 34

2cm, verso il basso. Tali spostamenti sono entrambi inferiori limite allo spostamento ortogonale all'asse dell'elemento imposto dalla normativa vigente (NTC2008), pari a  $\delta = L/250$  (NTC2008 Tab.4.2.X) che, nel caso in esame, corrisponde a 7mm per le traverse e 5.2cm per le centine.

Nella figure seguenti si riportano gli andamenti delle tensioni normali totali e dei tagli nelle due direzioni principali (asse forte e debole dei profilati metallici) in condizione di SLU per la centinatura a telaio e per la cornice permanente.

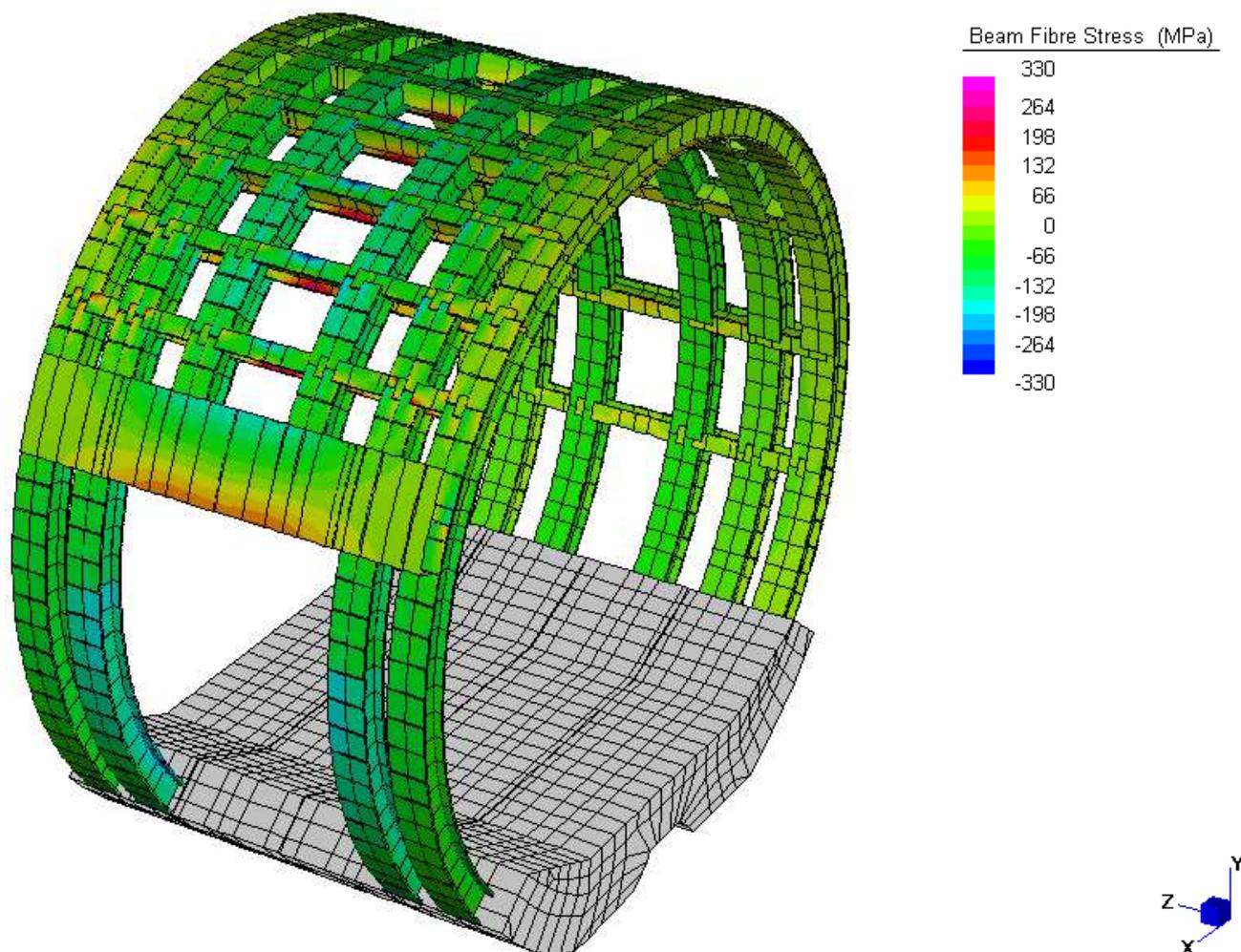


Figura 5.6: andamento delle tensioni normali totali della centinatura a telaio – SLU.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 12 di 34

VARIANTE TECNICA N.4

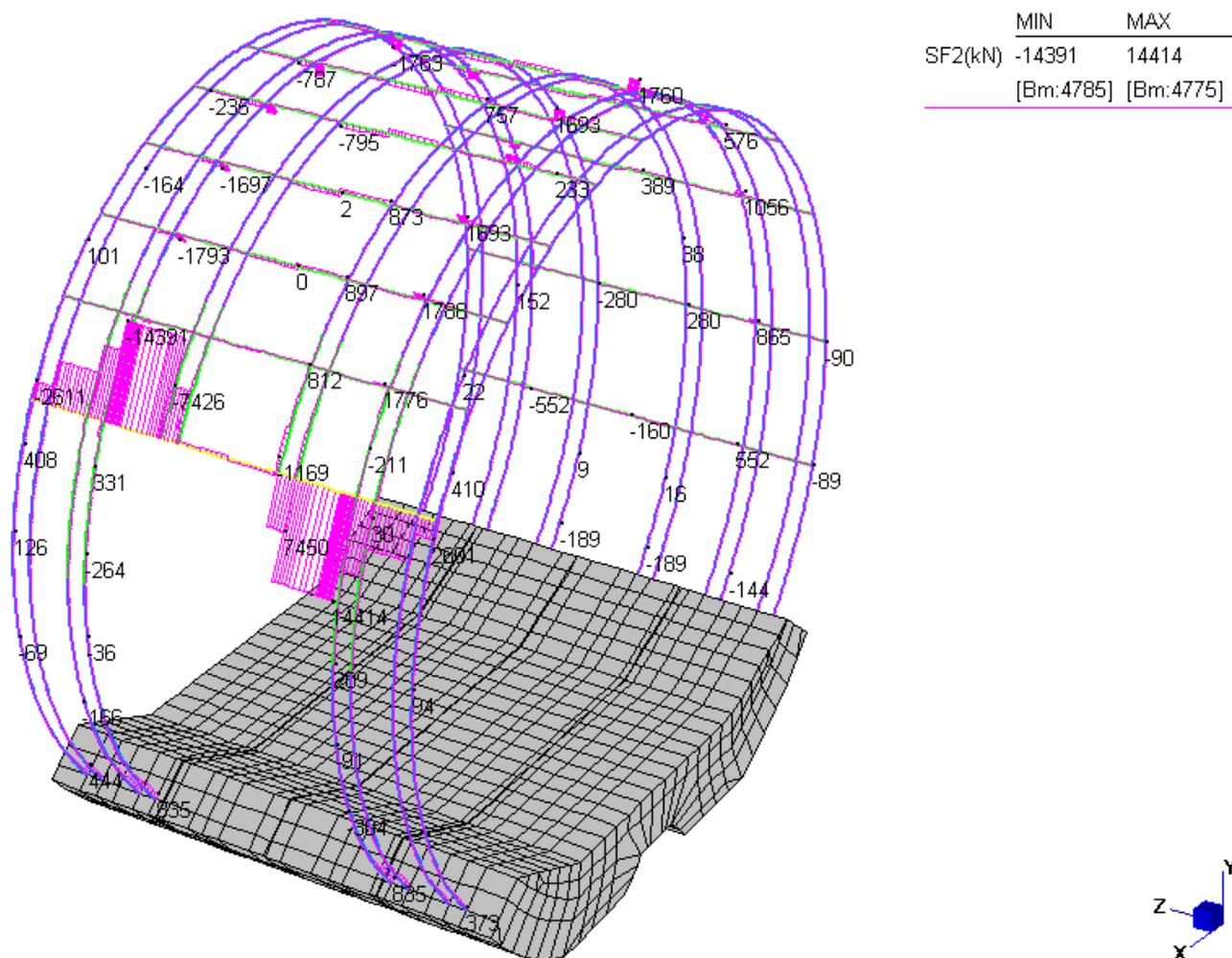


Figura 5.7: andamento dei tagli in direzione dell'asse forte nei profilati della centinatura a telaio – SLU.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 13 di 34

VARIANTE TECNICA N.4

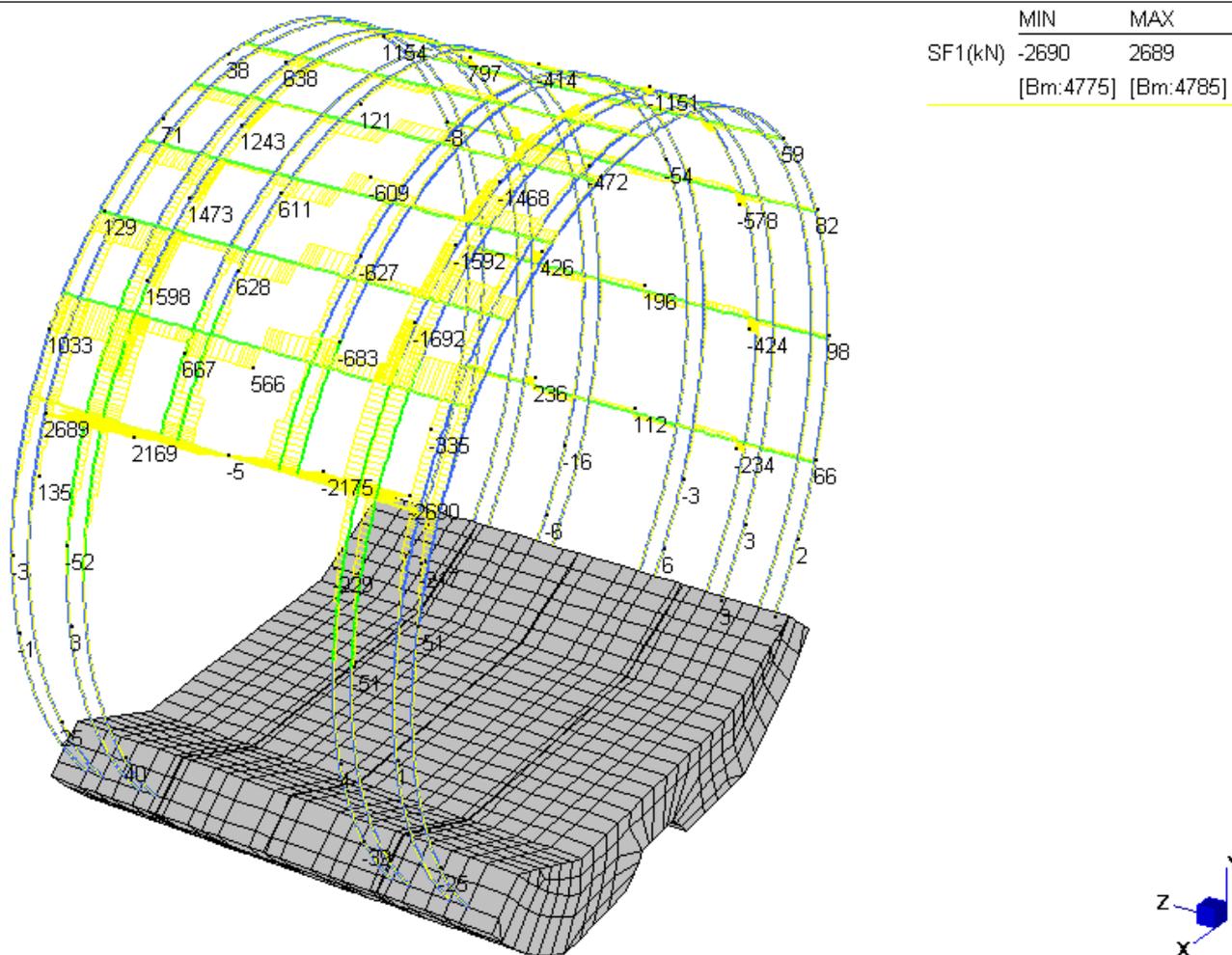


Figura 5.8: andamento dei tagli in direzione dell'asse debole nei profilati della centinatura a telaio – SLU.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 14 di 34

VARIANTE TECNICA N.4

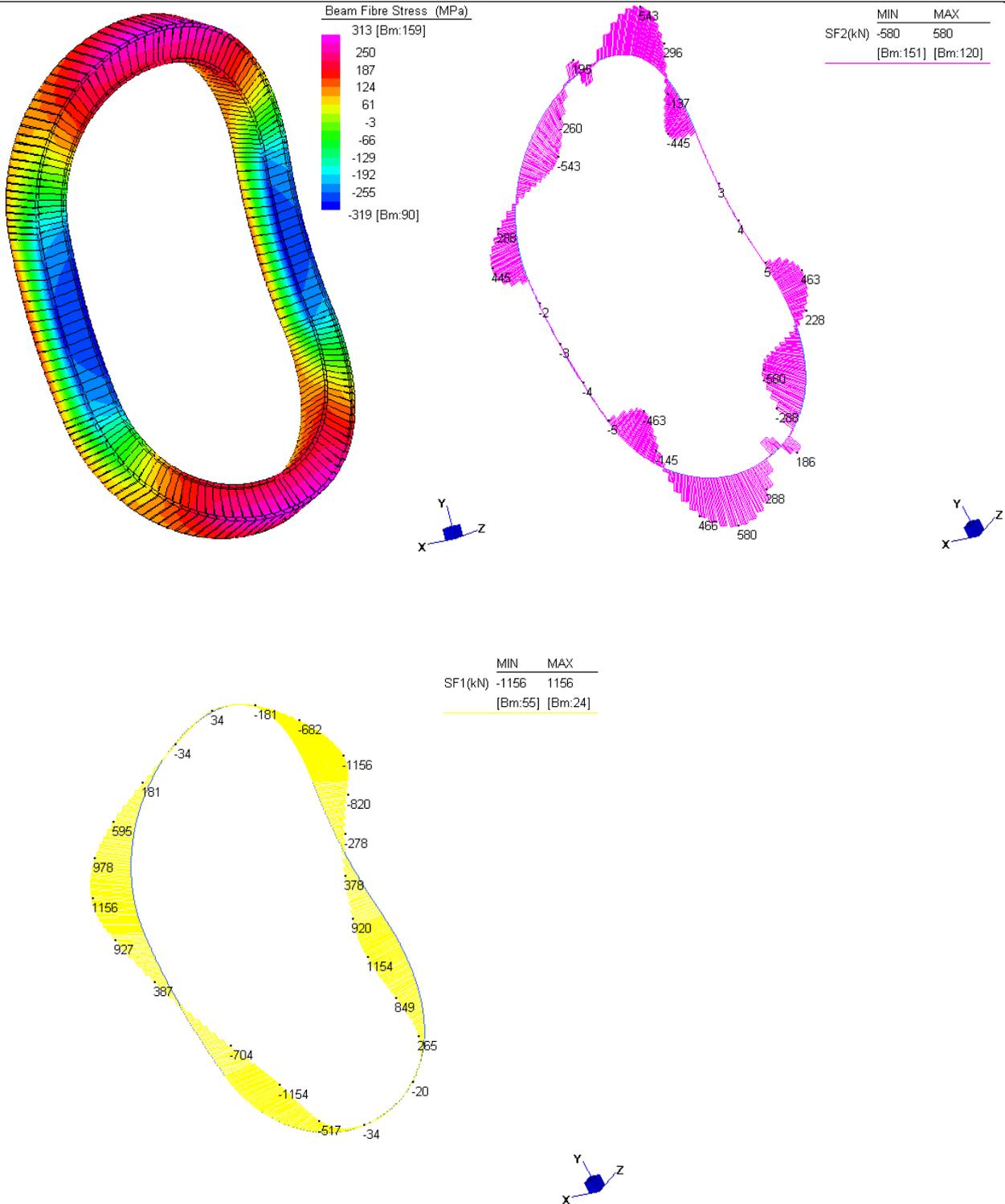


Figura 5.9: andamento delle tensioni normali totali e dei tagli, in direzione circonferenziale (magenta) e radiale (giallo) alla galleria, della cornice permanente – SLU.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 15 di 34

## 6. VERIFICHE DELLA STRUTTURA

### 6.1 Verifiche tensionali dei profilati

Le tensioni di presso-flessione e tenso-flessione nelle sezioni delle strutture di contrasto sono calcolate come segue:

$$\sigma_{Ed} = N/A \pm M_y/W_x \pm M_x/W_y.$$

La tensione tangenziale  $\tau_{Ed}$  in asse ai profilati segue le seguenti formulazioni (a seconda della direzione di taglio maggiormente sollecitante l'elemento):

$$\tau_{Ed} = \tau_y = (T_y \times S_x^*) / (t \times J_x); \quad \tau_{Ed} = \tau_x = (T_x \times S_y^*) / (t \times J_y)$$

Da cui si ottiene una tensione ideale (criterio di Von Mises) per la sezione esaminata pari a:

$$\sigma_{id} = (\sigma_{Ed}^2 + 3 \times \tau_{Ed}^2)^{0.5}$$

Dove:

- N : sforzo normale;
- $M_y$  : sollecitazione flettente asse forte;
- $M_x$  : sollecitazione flettente asse debole;
- $T_y$  : sollecitazione di taglio asse forte;
- $T_x$  : sollecitazione di taglio asse debole;
- A : area della trave/sezione;
- $W_{x/y}$  : moduli di resistenza della trave/sezione nelle direzioni forte e debole;
- $S_{x/y}^*$  : momento statico di metà sezione della trave per le due direzioni;
- $J_{x/y}$  : momenti d'inerzia relativi ai due assi della trave;
- t : spessore dell'anima della trave;
- $\sigma_{Ed}$  : tensione normale di calcolo;
- $\tau_{Ed}$  : tensione tangenziale di calcolo (cautelativamente per le verifiche è stata usata la risultante dei tagli agenti contemporaneamente);

La verifica delle travi/sezioni è soddisfatta se sussiste la relazione seguente:

$$\sigma_{id} \leq f_{yd} = f_{yk} / \gamma_M$$

dove  $\gamma_M$  è il coefficiente di sicurezza per la resistenza delle membrature, pari a

$$\gamma_M = 1.05.$$

Tabella 6.1: verifiche tensionali per le sollecitazioni più sfavorevoli allo SLU per ciascuna tipologia di profilato.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 16 di 34

VARIANTE TECNICA N.4

Tipologia profilato	Posizione	$\sigma_{Ed}$ [MPa]	$\tau_{Ed}$ [MPa]	$\sigma_{id}$ [MPa]	$f_{yd}$ [MPa]	Verifica
Traversa principale	mezzeria	323.17	29.89	327.29	338.1	$\sigma_{id} < f_{yd}$
Traversa principale	taglio max	266.56	98.65	316.62	338.1	$\sigma_{id} < f_{yd}$
HEM500R	collegamento traversa colonne	329.98	16.44	331.20	338.1	$\sigma_{id} < f_{yd}$
HEM500	traverse secondarie	299.35	68.92	322.27	338.1	$\sigma_{id} < f_{yd}$
HEM500	centine sotto traversa principale	301.38	87.03	336.97	338.1	$\sigma_{id} < f_{yd}$
Cornice permanente	piedritti	276.09	38.46	284.01	338.1	$\sigma_{id} < f_{yd}$
Cornice permanente	calotta	315.05	22.27	317.40	338.1	$\sigma_{id} < f_{yd}$

Dalle verifiche sopra riportate si evince il soddisfacimento delle verifiche a presso-flessione e tenso-flessione degli elementi metallici.

## 6.2 Verifiche di instabilità dei profilati

Le verifiche di instabilità a pressoflessione dei profilati costituenti la struttura di sostegno sono state condotte secondo quanto riportato nell'Eurocodice EN 1993-1-1 (EC3) e in accordo con il D.M. 14.01.2008 e successiva Circolare Applicativa.

In particolare si controlla che risulti:

- per le membrature aventi sezioni trasversali di classe 1 e 2 soggette all'azione combinata della flessione e della compressione assiale (suscettibili di possibile instabilità flesso-torsionale)

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_z \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \cdot A} + \frac{k_{LT} M_{y,Sd}}{\chi_{LT} W_{pl,y} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_z M_{z,Sd}}{W_{pl,z} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} \leq 1;$$

- per le membrature aventi sezioni trasversali di classe 3 soggette all'azione combinata della flessione e della compressione assiale (suscettibili di possibile instabilità flesso-torsionale)

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_z \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \cdot A} + \frac{k_{LT} M_{y,Sd}}{\chi_{LT} W_{el,y} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_z M_{z,Sd}}{W_{el,z} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} \leq 1;$$

- per le membrature aventi sezioni trasversali di classe 4 soggette all'azione combinata della flessione e della compressione assiale (suscettibili di possibile instabilità flesso-torsionale)

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 17 di 34

VARIANTE TECNICA N.4

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_z \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \cdot A_{eff}} + \frac{k_{LT} (M_{y.Sd} + N_{sd} e_{Ny})}{\chi_{LT} W_{eff.y} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_z (M_{z.Sd} + N_{Sd} e_{Nz})}{W_{eff.z} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} \leq 1;$$

Dove:

$N_{Sd}$  è il valore di progetto dello sforzo normale di compressione;

$M_{y.Sd}$  è il valore di progetto del momento flettente dell'asse forte y-y

$M_{z.Sd}$  è il valore di progetto del momento flettente dell'asse debole z-z

$\chi$  è il coefficiente di riduzione per la modalità di instabilità pertinente, pari a

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1$$

con

$$\phi = 0.5 \left[ 1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2 \right] \quad e$$

$\alpha$  è un coefficiente di imperfezione ricavato dal prospetto 5.5.1 di seguito riportato

Tabella 6.2: prospetto 5.5.1 dell'Eurocodice 3 – coefficienti di imperfezione  $\alpha$ .

Curva di instabilità	a	b	c	d
coefficiente di imperfezione $\alpha$	0.21	0.34	0.49	0.76

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{\beta_A A f_y}{N_{cr}}} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \sqrt{\beta_A}$$

con

$N_{cr}$  è la forza elastica critica per la modalità di instabilità pertinente;

$\beta_A = 1$  per le sezioni trasversali di classe 1, 2 o 3;

$\beta_A = A_{eff}/A$  per le sezioni trasversali di classe 4 (per le aree efficaci  $A_{eff}$  si vedano i prospetti 5.4.8.3 dell'Eurocodice);

$\lambda$  è la snellezza per la modalità di instabilità pertinente;

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 76.4 \varepsilon$$

$\varepsilon$  è il coefficiente di deformazione dipendente dal tipo di acciaio

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0.81 \quad \text{per l'acciaio S355}$$

$\chi_z$  è il coefficiente di riduzione per la modalità di instabilità pertinente per l'asse z-z (asse debole);

$\chi_{LT}$  è il coefficiente di riduzione per l'instabilità flessione-torsionale

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1 \quad e \quad \phi_{LT} = 0.5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

$\alpha_{LT} = 0.21$  per le sezioni laminate

$\alpha_{LT} = 0.49$  per le sezioni saldate

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 18 di 34

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{\beta_w W_{pl,y} f_y}{M_{cr}}} = \frac{\lambda_{LT}}{\lambda_1} \sqrt{\beta_w}$$

$M_{cr}$  è il momento critico elastico per instabilità flessio-torsionale (si veda appendice F dell'Eurocodice 3)

$W_{pl,y}$  è il modulo di resistenza plastico della sezione nella direzione dell'asse forte y-y

$W_{pl,z}$  è il modulo di resistenza plastico della sezione nella direzione dell'asse debole z-z

$A$  è l'area della sezione trasversale

$f_y$  è la tensione caratteristica di snervamento pari a 355N/mm<sup>2</sup>

$\gamma_{M1}$  è il coefficiente parziale sulle resistenze pari a 1.05

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} N_{Sd}}{\chi_z A f_y} \leq 1$$

$$\mu_{LT} = 0.15 \bar{\lambda}_z \beta_{M,LT} - 0.15 \leq 0.90 \quad e$$

$\beta_{M,LT}$  è un coefficiente di momento equivalente uniforme per l'instabilità flessio-torsionale (in funzione dell'andamento del diagramma del momento flettente attorno all'asse forte fra i punti controventati in direzione y-y – si veda la Figura 5.5.3 dell'Eurocodice 3)

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z N_{Sd}}{\chi_z A f_y} \leq 1.5$$

$W_{eff}$  è il modulo di resistenza efficace della sezione;

$e_N$  è lo spostamento dell'asse neutro.

Per maggiori dettagli relativi si rimanda alla suddetta normativa.

A favore di sicurezza, come lunghezza di calcolo delle aste è stata considerata la sviluppata delle colonne a partire dalle giunzioni della traversa, senza tener conto delle bullonature lungo tutta la lunghezza, che riducono considerevolmente le lunghezze di inflessione, eliminando quindi quasi completamente la possibilità di instabilità.

Nella tabella seguente si riassumono le verifiche d'instabilità dei profilati (SLU); in particolare nell'ultima colonna a destra si riporta, per ciascun caso analizzato, la relazione di verifica.

Tabella 6.3: verifiche di instabilità dei profilati

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 19 di 34

VARIANTE TECNICA N.4

Tipologia profilato	Posizione	Lunghezza di calcolo [m]	Classe [-]	Carico[kN]	Verifica
Traversa principale		in trazione			
HEM500R	collegamento traversa colonne	2.35	1	9107	0.695<1
HEM500	centine sotto traversa principale	5.24	3	8516	0.933<1
Cornice permanente	pedritti	2.59	1	6063	0.755

Il termine a sinistra della relazione sopra riportata risulta sempre inferiore a 1 pertanto le presenti verifiche si ritengono soddisfatte.

### 6.3 Verifica delle giunzioni del rinforzo metallico

Le unioni bullonate tra spezzoni di profilati devono garantire la trasmissione degli sforzi tra un elemento e l'altro. I bulloni delle giunzioni saranno sollecitati a taglio e a trazione pertanto saranno condotte le verifiche descritte nel seguito (D.M. del 14-01-2008).

I bulloni impiegati sono degli M24 di classe 8.8, ne deriva che la resistenza a trazione risulta pari a:

$$F_{t,Rd} = 0.9 f_{tb} A_s / \gamma_{M2},$$

la resistenza a taglio è data da:

$$F_{v,Rd} = 0.6 f_{tb} A_s / \gamma_{M2},$$

dove:

$f_{tb}$  è la resistenza di rottura a trazione del bullone secondo la tabella 11.3.XII.b delle NTC2008

$A_s$  è l'area resistente del bullone

$\gamma_{Mb}$  è pari a 1.25

Le resistenze per i bulloni M24 di classe 8.8 sono dunque le seguenti:

M24 (8.8) – Resistenza a trazione:  $F_{t,Rd} = 203$  kN

M24 (8.8) – Resistenza a taglio:  $F_{v,Rd} = 136$  kN

A causa dell'azione combinata della trazione e del taglio nel bullone si deve verificare che:

$$\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Sd}}{1.4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1 \quad \text{con la limitazione} \quad \frac{F_{t,Sd}}{F_{t,Rd}} \leq 1$$

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 20 di 34

VARIANTE TECNICA N.4

Le verifiche sopra riportate sono effettuate per le sollecitazioni più sfavorevoli riscontrate in corrispondenza delle giunzioni della struttura metallica. Nella tabella seguente sono riportati i risultati delle verifiche sopra descritte.

Tabella 6.4: verifiche delle unioni bullonate

ID Giunzione	Tipologia bulloni	$N_{Ed}$ [kN]	$M_{Ed-1}$ [kNm]	$M_{Ed-2}$ [kNm]	$T_{Ed}$ [kN]	$F_{t,Sd}$ [kN]	$F_{v,Sd}$ [kN]	$\frac{F_{t,Sd}}{F_{t,Rd}}$	$\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Sd}}{1.4 \cdot F_{t,Rd}}$
nodo traversa principale / centine	M24 (8.8)	-14054	2113	609	1834	4	131	0.022	0.982
nodo traverse secondarie / centine	M24 (8.8)	41	125	8	620	112	78	0.550	0.965
centine	M24 (8.8)	331	138	59	247	180	31	0.886	0.861

Dove:

$N_{Ed}$  è lo sforzo normale di calcolo agente sulla giunzione (-compressione);

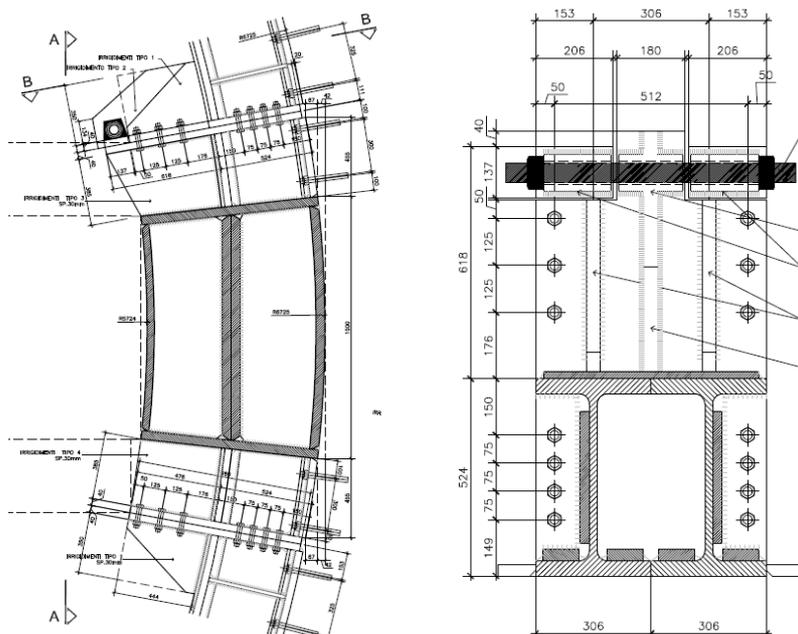
$M_{Ed}$  è il momento flettente di calcolo agente sul rinforzo metallica;

$T_{Ed}$  è lo sforzo di taglio di calcolo agente sulla giunzione metallica;

$F_{t,Ed}$  è la forza di trazione massima di calcolo agente sul singolo bullone;

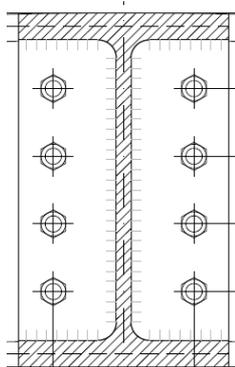
$F_{v,Ed}$  è la forza di taglio di calcolo agente sul singolo bullone.

Dai risultati delle verifiche delle giunzioni si evince che le azioni sui bulloni, assiali e di taglio, sono sempre inferiori alle resistenze.

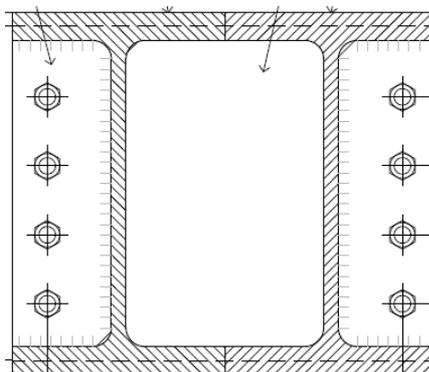


Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali	Pagina 21 di 34

Giunzione traversa principale-centine



Giunzione traverse secondarie-centine



Giunzione centine

Figura 6.1: giunzioni della struttura metallica.

#### 6.4 Verifica a rifollamento delle piastre di collegamento delle giunzioni

La verifica a rifollamento delle piastre di spessore 40mm sotto l'azione di taglio dei bulloni M24 delle giunzioni bullonate è effettuata per la condizione più sfavorevole, in accordo a quanto specificato nel paragrafo 4.2.8.1.1 del D.M. del 14-01-2008, secondo la seguente:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{b,Rd}} \leq 1$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k \alpha f_{tk} dt}{\gamma_{M2}} = \frac{2.5 \cdot 0.654 \cdot 510 \cdot 24 \cdot 40}{1.25} = 640 \text{ kN}$$

dove

$F_{v,Ed}$  è il taglio agente sul bullone;

$F_{b,Rd}$  è la resistenza di calcolo a rifollamento;

$k$   $k = \min(2.8e_2/d_0 - 1.7 ; 2.5) = 2.5$  per bulloni di bordo nella direzione perpendicolare al carico applicato;

$\alpha$   $\alpha = \min(e_1/3d_0 ; f_{tb}/f_{tk} ; 1) = 0.654$  per bulloni di bordo nella direzione del carico applicato;

$f_{tk}$  è la resistenza a rottura del materiale della piastra (pari a 510MPa per acciaio tipo S355);

$d$  è il diametro nominale del gambo del bullone, pari a 24mm;

$t$  è lo spessore della piastra collegata, pari a 40mm;

$\gamma_{M2}$  pari a 1.25 (Tab. 4.2 XII del D.M.);

$e_1, e_2$  distanze asse bullone bordi piastra, pari a 50mm;

$d_0$  diametro foro, pari a 25.5mm;

$f_{tb}$  resistenza a rottura del bullone, pari a 800MPa per bulloni di classe 8.8.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali	Pagina 22 di 34

La resistenza a rifollamento è pari a 640kN, il taglio massimo nei bulloni vale 131kN. La verifica risulta soddisfatta.

## 6.5 Verifica delle bullonature degli elementi strutturali con il rivestimento della galleria

La struttura a telaio è collegata tramite bulloni al rivestimento della galleria, in particolare la bullonatura assolve la duplice funzione di mantenere la struttura temporanea nella corretta posizione al momento della messa in opera e rendere solidale il telaio al rivestimento della galleria, trasferendo quindi le forze che questo trasmette alla centinatura, oltreché solidarizzare gli anelli non coinvolti dall'apertura. Inoltre la bullonatura sistematica limita la possibilità alle centine compresse di instabilizzarsi. Le bullonature che rendono solidali la struttura a telaio e il rivestimento della galleria sono quindi sollecitate principalmente a taglio. La disposizione delle bullonature è riportata nella sviluppata della Figura 2.1, per ulteriori dettagli si rimanda agli elaborati grafici.

Nelle tabelle seguenti sono riportate le caratteristiche di resistenza degli ancoranti M30 utilizzati per la bullonatura della struttura a telaio.

Tabella 6.5: resistenze di calcolo a trazione e taglio bulloni lato acciaio.

Classe acciaio	M30	
	Trazione, $N_d$ [kN]	Taglio, $T_d$ [kN]
8.8	276.8	199.3

Tabella 6.6: resistenza assiale caratteristica del bullone, rottura conica calcestruzzo (per la tipologia di bulloni adottata, per classe di calcestruzzo  $R_{ck} = 25\text{N/mm}^2$ ).

M30
Trazione, $N_{rd,c}^0$ [kN]
145.6

Tabella 6.7: resistenza assiale di calcolo del bullone, rottura conica calcestruzzo (per la tipologia di bulloni adottata e per la classe del calcestruzzo di progetto).

Classe calcestruzzo	M30
	Trazione, $N_{rd,c}$ [kN]
C40/50	136.5

La resistenza assiale di calcolo del bullone,  $N_{rd,c}$  è calcolata come segue:

$$N_{rd,c} = N_{Rd,c}^0 \cdot f_{B,N} \cdot f_T \cdot f_{A,N} \cdot f_{R,N}$$

dove

$N_{Rd,c}^0$  resistenza di progetto alla rottura conica, valutata a partire dalla resistenza caratteristica di trazione  $N_{0Rk,c}$  divisa per il fattore di sicurezza 1.8 e profondità di ancoraggio  $h_{nom}$  pari a 300mm

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 23 di 34

VARIANTE TECNICA N.4

$f_{B,N}$	influenza della resistenza del calcestruzzo, per C40/50 pari a 1.25
$f_T$	influenza della profondità di ancoraggio, per la lunghezza adottata di 300mm, pari a 1.00
$f_{A,N}$	influenza dell'interasse tra gli ancoranti, $f_{A,N} = 0.5 + \frac{S}{4 \cdot h_{nom}}$ per s pari a 300mm $f_{A,N} = 0.75$
$f_{R,N}$	influenza della distanza dal bordo, posta pari a 1.00 poiché non si ha bordo nel caso in esame.

Di seguito si verificano i bulloni di collegamento tra le centine a sezione rinforzata e il rivestimento della galleria e tra le centine costituite da profili HEM500 non rinforzati al di sopra del taglio nel rivestimento della galleria e il rivestimento della galleria, sono state considerate le condizioni più sfavorevoli.

Le due condizioni di carico dei bulloni sono le seguenti:

- 1) per il collegamento tra i profili HEM500 rinforzati e il rivestimento della galleria in condizioni di SLU, il taglio che la bullonatura deve assorbire è pari a 11121kN, i bulloni risultano tutti in compressione. In corrispondenza delle centine rinforzate sono presenti 60 bulloni M30, sul singolo bullone agisce quindi uno sforzo di taglio pari a  $F_{v,Ed} = 185.4\text{kN}$ ;
- 2) per il collegamento tra i profili HEM500 e il rivestimento della galleria sopra il taglio nel rivestimento della galleria in condizioni di SLU, il taglio che la bullonatura della centina maggiormente sollecitata deve assorbire è pari a 6753kN, i bulloni risultano tutti in compressione. Al di sopra del taglio nel rivestimento della galleria per le centine centrali (maggiormente sollecitate) sono presenti 40 bulloni M30, sul singolo bullone agisce quindi uno sforzo di taglio pari a  $F_{v,Ed} = 168.8\text{kN}$ .

Per l'azione combinata della trazione e del taglio nel bullone si deve verificare che:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1 \text{ con la limitazione } \frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} \leq 1$$

Tabella 6.8: verifiche delle bullonature tra elementi strutturali e rivestimento della galleria.

Condizione	numero di bulloni coinvolti	$F_{t,Sd}$ [kN]	$F_{v,Sd}$ [kN]	$\frac{F_{t,Sd}}{F_{t,Rd}}$	$\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Sd}}{1.4 \cdot F_{t,Rd}}$
1	60	-	185.4	-	0.930
2	40	-	168.8	-	0.847

La verifica risulta soddisfatta.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 24 di 34

## 6.6 Verifica del blocco in c.a. alla base

### 6.6.1 Resistenze di calcolo

I valori di calcolo delle resistenze dei materiali si ricavano dividendo ciascun valore caratteristico per il fattore di sicurezza parziale  $\gamma_M$  specifico del materiale considerato (vedi tabella seguente).

Tabella 6.9: fattore di sicurezza parziale dei materiali.

Stato limite	Acciaio $\gamma_s$	Calcestruzzo $\gamma_c$
SLU	1.15	1.50

Di seguito si riportano i valori delle resistenze di calcolo, ottenute come rapporto tra la resistenza caratteristica ed il coefficiente  $\gamma_M$ :  $f_d = f_k/\gamma_M$

Tabella 6.10: tensione di snervamento di calcolo.

Acciaio	$f_{yd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
B450C	391

Tabella 6.11: resistenze di calcolo calcestruzzo.

Calcestruzzo Classe	$f_{cd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{ctd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{ctd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Rck35	18.7	1.3	1.56

dove:

$f_{cd}$  = resistenza a compressione cilindrica di calcolo

$f_{ctd}$  = resistenza a trazione di calcolo

$f_{ctd}$  = resistenza a trazione per flessione di calcolo ( $=1.2 \cdot f_{ctd}$ )

### 6.6.2 Verifiche strutturali

Le verifiche sono state condotte, sulla base dell'involuppo delle sollecitazioni, secondo il metodo semiprobabilistico degli stati limite.

Vengono effettuate le seguenti verifiche:

- in condizioni statiche (condizioni di normale esercizio):
  - Verifica a S.L.U. per flessione;
  - Verifica a S.L.U. per taglio.

Per le verifiche allo stato limite ultimo si verifica che il fattore di sicurezza  $F_{Su}$ , definito come  $M_u/M$ , sia maggiore di 1, dal momento che il coefficiente parziale sulle azioni è già tenuto in conto. Le sezioni di verifica sono riportate nelle figure seguenti.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 25 di 34

VARIANTE TECNICA N.4

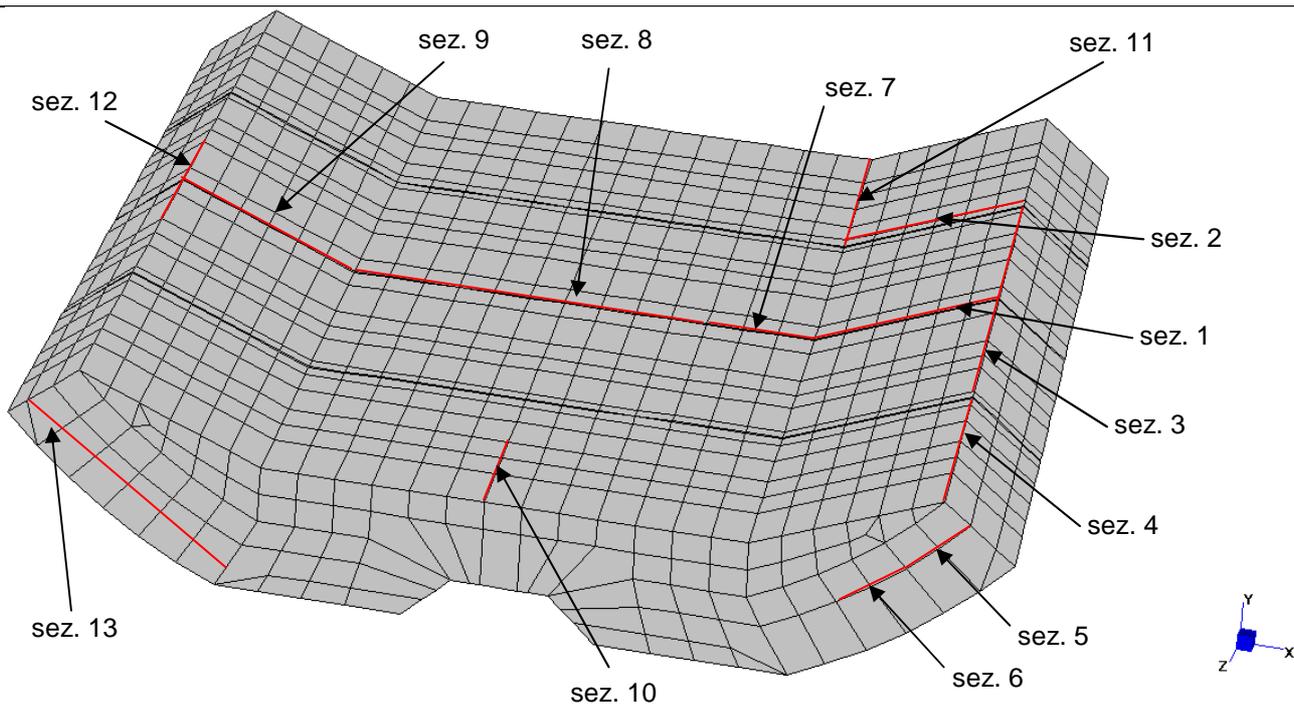


Figura 6.2: ubicazione delle sezioni di verifica del blocco in c.a. di contrasto alla base.

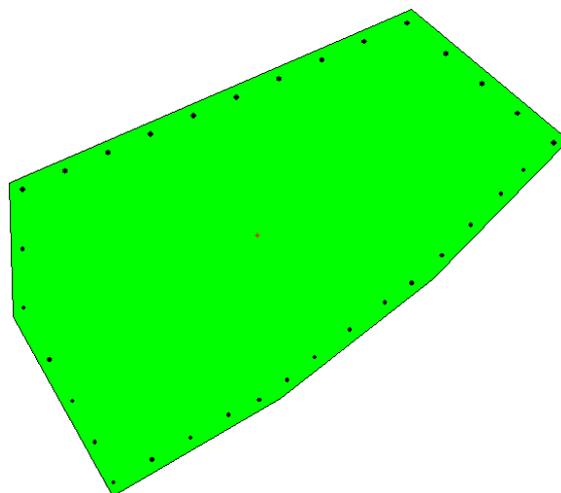
Tabella 6.12: verifiche sollecitazioni flettenti.

Comb.di carico	Altezza sezione [cm]	Direzione	Armatura flettente	N [kN]	M [kNm]	Mu [kNm]	FSu
SLU	233	Long.	1 Sup: 50φ26 Inf: 28φ20	-6264	-15719	-16221	1.03

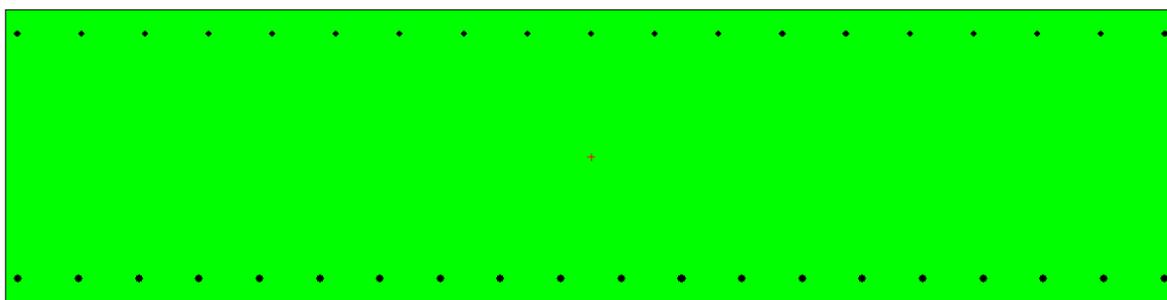
Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 26 di 34

VARIANTE TECNICA N.4

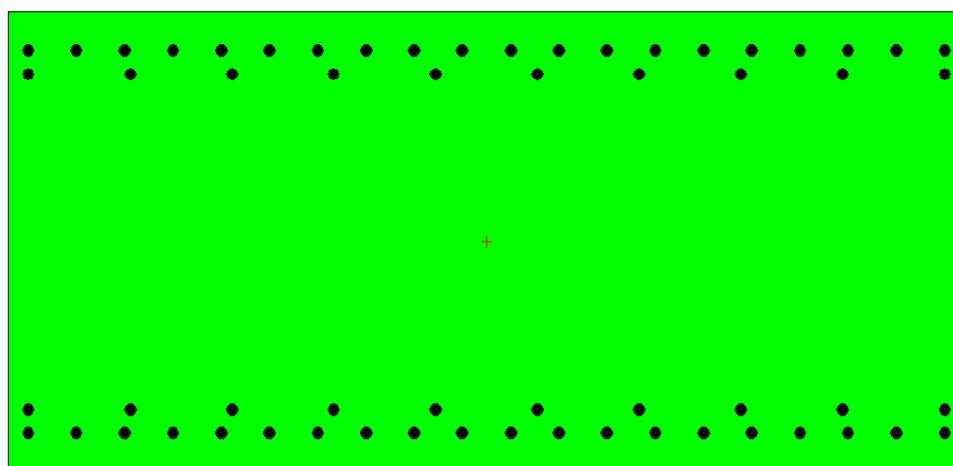
Comb.di carico	Altezza sezione [cm]	Direzione	Armatura flettente	N [kN]	M [kNm]	Mu [kNm]	FSu
----------------	----------------------	-----------	--------------------	--------	---------	----------	-----



2							
SLU	233	Long.	Sup: 10φ26 Inf: 14φ20)	-1747	-2819	-2884	1.02



3							
SLU	98	Trasv.	Sup: φ20/20 Inf: φ26/20	-4231	1509	1586	1.05



4							
SLU	98	Trasv.	Sup: φ26/10+φ26/20 Inf: φ26/10+φ26/20	17390	-5537	-5728	1.03

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 27 di 34

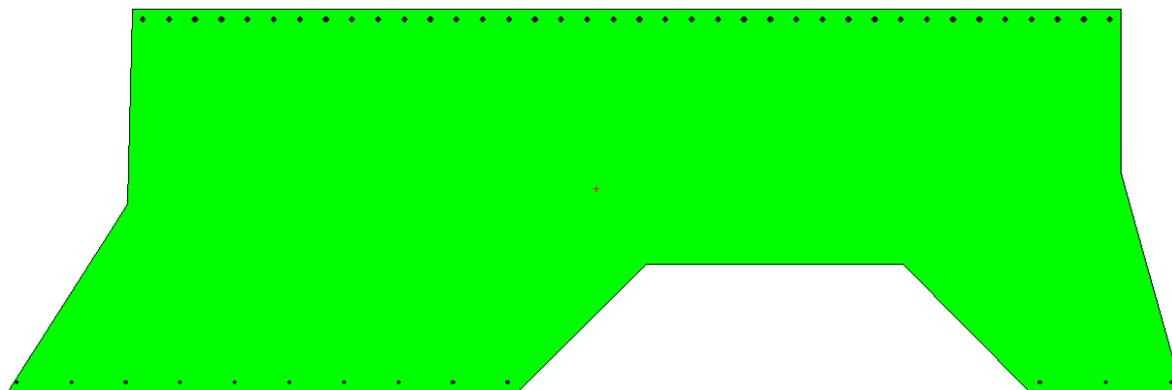
VARIANTE TECNICA N.4

Comb.di carico	Altezza sezione [cm]	Direzione	Armatura flettente	N [kN]	M [kNm]	Mu [kNm]	FSu
SLU	85	Trasv.	Sup: $\phi 18/20$ Inf: $\phi 18/20$	-1493	219	222	1.01
SLU	85	Trasv.	Sup: $\phi 14/20$ Inf: $\phi 14/20$	-752	47	84	1.79
SLU	150	Long.	Sup: $\phi 24/10$ Inf: $\phi 16/20$	4386	-4605	-4988	1.08

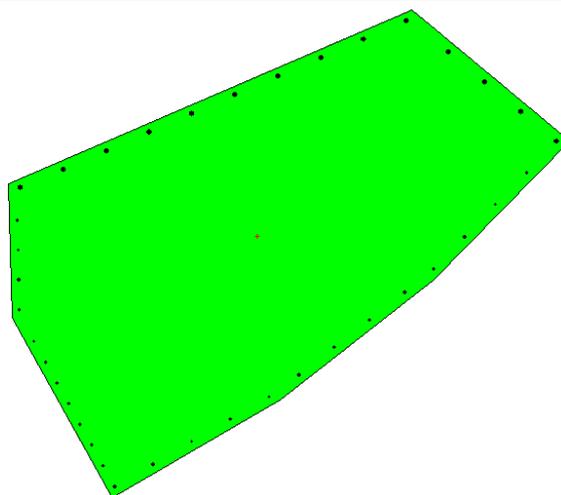
Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 28 di 34

VARIANTE TECNICA N.4

Comb.di carico	Altezza sezione [cm]	Direzione	Armatura flettente	N [kN]	M [kNm]	Mu [kNm]	FSu
----------------	----------------------	-----------	--------------------	--------	---------	----------	-----



SLU	150	Long.	Sup: $\phi 24/10$ Inf: $\phi 16/20$	800	-4487	-9788	2.18
-----	-----	-------	--	-----	-------	-------	------

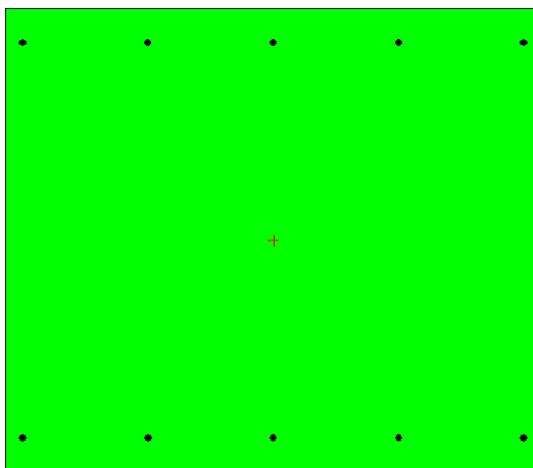


SLU	233	Long.	Sup: $10\phi 24$ Inf: $15\phi 16$	-175	-1451	-3185	2.20
-----	-----	-------	--------------------------------------	------	-------	-------	------

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 29 di 34

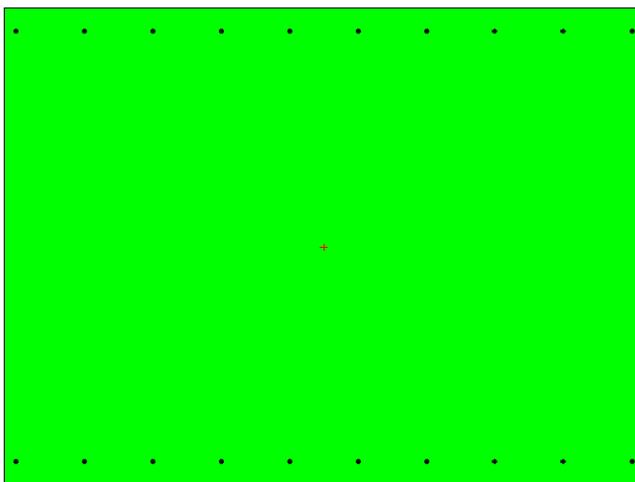
VARIANTE TECNICA N.4

Comb.di carico	Altezza sezione [cm]	Direzione	Armatura flettente	N [kN]	M [kNm]	Mu [kNm]	FSu
SLU	100	Trasv.	Sup: $\phi 16/20$ Inf: $\phi 16/20$	2228	-988	-1869	1.89



10

SLU	150	Trasv.	Sup: $\phi 16/20$ Inf: $\phi 16/20$	4464	-2063	-7890	3.82



11

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 30 di 34



VARIANTE TECNICA N.4

$$V_{Rd} = \min(V_{Rsd}, V_{Rcd})$$

$V_{Rsd}$ , è la resistenza di calcolo a "taglio trazione" dell'armatura trasversale

$$V_{Rsd} = 0.9 \cdot d \cdot (A_{sw}/s) \cdot f_{yd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) \cdot \sin\alpha$$

$V_{Rcd}$ , è la resistenza di calcolo a "taglio compressione" del calcestruzzo

$$V_{Rcd} = 0.9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) / (1 + \text{ctg}^2\theta)$$

Per il significato delle diverse entità si rimanda al paragrafo 4.1.2.1.3.1 delle NTC2008.

Tabella 6.13: verifiche sollecitazioni di taglio.

Sezione [m]	Comb.di carico	Dimensioni sezione, hxL [cm]	$V_d$ [kN]	$A_{sw}$ [cm <sup>2</sup> ]	$V_{Rsd}$ [kN]	$V_{Rcd}$ [kN]	$V_{Rd}$ [kN]
1	SLU	233x265	1835	1φ14/50x20	5352	7639	5352
2	SLU	233x265	4842	1φ12/50x20	4915	7639	4915
3	SLU	98x387	789	1φ14/50x20	4483	8007	4483
4	SLU	98x201	2029	1φ12/50x20	3202	3286	3202
5	SLU	85x260	3403	φ26/20x100	4983	4668	4983
6	SLU	85x260	180	φ26/20x140	1780	4668	1780
7	SLU	150x164	158	1φ12/50x20	2196	4550	2196
8	SLU	150x457	44	1φ12/50x20	5215	10021	5215
9	SLU	233x265	245	1φ12/50x20	3932	7639	3932
10	SLU	100x115	463	1φ12/50x20	966	2778	966
11	SLU	150x200	1065	1φ12/50x20	2927	6437	2927
12	SLU	98x170	776	1φ12/50x20	1411	3762	1411
13	SLU	278x154	2167	φ16/20x100	3408	9615	3408

Dalla tabella precedente si evince il soddisfacimento alla verifica a taglio essendo  $V_{Ed} \leq V_{Rd}$ .  
 La verifica al taglio è stata svolta prendendo in esame le condizioni più sfavorevoli.

### 6.7 Verifica a scorrimento della centinatura a telaio (zanche di collegamento tra le centine e il blocco in c.a. di base)

La verifica dell'incastro al piede delle centine, costituito da zanche metalliche affogate nel blocco in c.a. alla base della centinatura a telaio è effettuata sulla base delle forze normali e di taglio agenti alla base delle centine. Il massimo sforzo di taglio alla base delle centine è pari a  $T = 835\text{kN}$ , combinando i tagli rispetto all'asse forte (pari a  $835\text{kN}$ ) e all'asse debole (pari a  $9\text{kN}$ ) in condizioni di SLU; il corrispondente sforzo normale di compressione al piede

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH445A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Dicembre 2018
Nome file: v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	Pagina 32 di 34

della centina per la medesima condizione è pari a 7610kN. Tenendo conto del coefficiente di attrito tra calcestruzzo e acciaio, posto uguale a  $\mu = 0.7$ , si ottiene una forza di attrito disponibile pari a  $F = N \cdot \mu = 7610\text{kN} \times 0.7 = 5327\text{kN}$ , valore superiore al taglio agente. L'attrito sviluppato al piede centina, per effetto dello sforzo normale di compressione, è superiore al taglio agente, per cui le zanche di collegamento garantiscono solamente il corretto posizionamento delle centine prima della fase di carico e non assolvono una funzione resistente in fase di esercizio.

<i>Cod. elab.:</i> 125GN204GN02ZRH445A	<i>Titolo:</i> Galleria Caltanissetta	<i>Data:</i> Dicembre 2018
<i>Nome file:</i> v_3578-10 relaz di calcolo centine by-pass pedonali rev.a	<b>Relazione di calcolo strutture di sostegno per realizzazione by-pass pedonali</b>	<i>Pagina</i> 33 di 34