

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**U.O. PROGETTAZIONE INTEGRATA NORD**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**RADDOPPIO DELLA LINEA GENOVA – VENTIMIGLIA  
TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA**

**OPERE PRINCIPALI – GALLERIE ARTIFICIALI**

Galleria artificiale Bastia 2 da km 85+792 a km 85+890  
Relazione di calcolo strutture

SCALA:

-

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

I V 0 I 0 0 D 2 6 R B G A 1 3 0 0 0 0 1 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	C. Soave	Gennaio 2022	M. Severi	Gennaio 2022	G. Fadda	Gennaio 2022	A. Perego Gennaio 2022



## INDICE

1	PREMESSA .....	4
2	SCOPO DEL DOCUMENTO .....	4
3	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....	5
3.1	DOCUMENTI REFERENZIATI.....	5
3.2	DOCUMENTI CORRELATI .....	6
4	NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....	6
5	CARATTERISTICHE DEI MATERIALI .....	6
5.1	CALCESTRUZZI.....	6
5.2	ACCIAIO DA CEMENTO ARMATO .....	7
6	CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICO – GEOTECNICA.....	7
7	CARATTERIZZAZIONE SISMICA.....	9
8	DESCRIZIONE DELLE OPERE.....	11
9	APPROCCIO PROGETTUALE .....	12
10	GALLERIA ARTIFICIALE (SEZIONE CORRENTE) .....	12
10.1	DESCRIZIONE DEI MODELLI.....	12
10.2	ANALISI DEI CARICHI.....	15
10.2.1	<i>Peso proprio</i> .....	15
10.2.2	<i>Spinta del terreno</i> .....	15
10.2.3	<i>Carico variabile da traffico ferroviario</i> .....	15
10.2.4	<i>Sovraccarico variabile</i> .....	15
10.2.5	<i>Azione sismica</i> .....	15
10.3	STATI LIMITE CONSIDERATI .....	16
10.3.1	<i>Stati limiti ultimi</i> .....	16
10.3.2	<i>Stati limiti di esercizio</i> .....	17
10.4	COMBINAZIONI DI CALCOLO .....	17
10.5	MODELLO DI CALCOLO N. 1 – ALTEZZA DI RICOPRIMENTO 6 M.....	19
10.5.1	<i>Risultati del modello di calcolo</i> .....	19



INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA  
LEGGE OBIETTIVO N.443/01

All. [2] **PROGETTO DEFINITIVO**

**RADDOPPIO LINEA GENOVA – VENTIMIGLIA – TRATTA FINALE L.  
ANDORA**

GALLERIA ARTIFICIALE BASTIA 2 DA KM 85+792 A  
KM 85+890 - RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 26 CL	GA 13 00 001	A	3 di 31

10.5.2	Verifiche strutturali .....	22
10.6	MODELLO DI CALCOLO N. 2 – ALTEZZA DI RICOPRIMENTO 11 M.....	25
10.6.1	Risultati del modello di calcolo .....	25
10.6.2	Verifiche strutturali .....	28
11	INCIDENZE ARMATURE .....	31

## 1 PREMESSA

La WBS GA13 in oggetto tratta la Galleria Artificiale denominata Bastia 2, compresa tra le progressive 85+791.61 (imbocco lato Genova) e 85+889.96 (imbocco lato Ventimiglia) per una lunghezza complessiva di 98.49 m.

Sono inoltre presenti opere di imbocco di lunghezza pari a 14.62 m e 15.03 m rispettivamente lato Genova e lato Ventimiglia.

## 2 SCOPO DEL DOCUMENTO

Scopo del presente documento è il calcolo strutturale della galleria di cui in premessa.

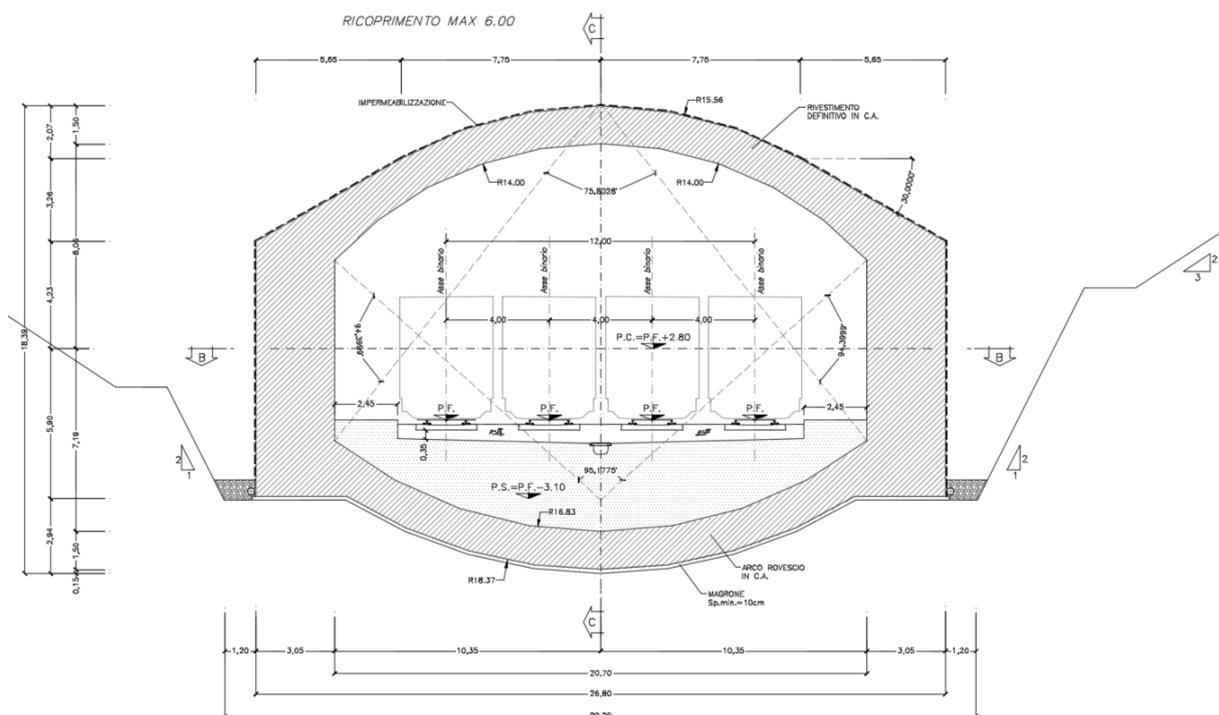
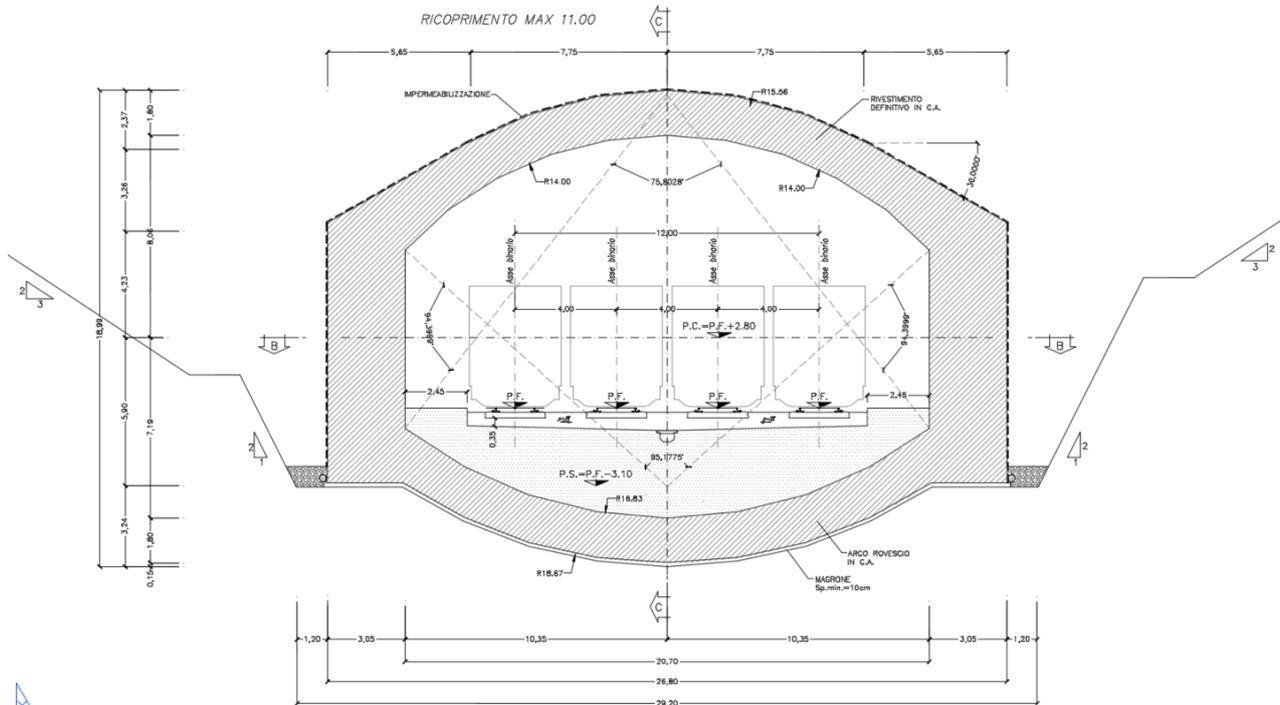


Figura 2-1 Sezione trasversale tipo 1, valida per spessori di ricoprimento massimo pari a 6.00m



**Figura 2-2 Sezione trasversale tipo 2, valida per spessori di ricoprimento massimo pari a 11.20m**

### 3 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

#### 3.1 Documenti Referenziati

Nella presente relazione, si è fatto riferimento ai seguenti elaborati grafici:

- [I] Planimetria generale dell'intervento e prospetto (IV0100D26P9GA1300001A)
- [II] Pianta (IV0100D26P9GA1300002A)
- [III] Sezione longitudinale (IV0100D26P9GA1300003A)
- [IV] Sezioni trasversali (IV0100D26WBGA1300001A)
- [V] Fasi realizzative (IV0100D26WBGA1300002A)
- [VI] Carpenteria galleria (IV0100D26BBGA1300001A)
- [VII] Particolari, dettagli e finiture (IV0100D26BZGA1300001A)



INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA  
LEGGE OBIETTIVO N.443/01

All. [2] **PROGETTO DEFINITIVO**

**RADDOPPIO LINEA GENOVA – VENTIMIGLIA – TRATTA FINALE L.  
ANDORA**

GALLERIA ARTIFICIALE BASTIA 2 DA KM 85+792 A  
KM 85+890 - RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 26 CL	GA 13 00 001	A	6 di 31

### 3.2 Documenti Correlati

I documenti di calcolo correlati alla presente sono:

[I] Relazione descrittiva (IV0I00D26RGGGA1300001A)

[II] Relazione geotecnica galleria 3/3 – Galleria Bastia II (IV0I00D26RBGE1300001A)

## 4 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

I calcoli sono svolti in ottemperanza alla Normativa vigente :

- NTC 2018 – D.M. Infrastrutture 17 gennaio 2018;
- RFI-DTC-ICI-PO SP INF 001 A - Istruzione per la progettazione e l'esecuzione di ponti ferroviari;
- RFI-DTC-ICI-PO SP INF 004 A - Istruzione 44B – istruzioni tecniche per la progettazione di manufatti sotto binario da costruire in zona sismica;

## 5 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

### 5.1 CALCESTRUZZI

#### Calcestruzzo per sottofondazioni

Classe di resistenza caratteristica a compressione C12/15

#### Calcestruzzo per solette e opere in elevazione

Classe di esposizione ambientale XC3

Classe di resistenza caratteristica a compressione C28/35

Classe di resistenza allo scarico S4

#### Calcestruzzo per imbicchi

Classe di esposizione ambientale XC4

Classe di resistenza caratteristica a compressione C32/40

Classe di resistenza allo scarico S4



INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA  
LEGGE OBIETTIVO N.443/01

All. [2] **PROGETTO DEFINITIVO**

**RADDOPPIO LINEA GENOVA – VENTIMIGLIA – TRATTA FINALE L.  
ANDORA**

GALLERIA ARTIFICIALE BASTIA 2 DA KM 85+792 A  
KM 85+890 - RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 26 CL	GA 13 00 001	A	7 di 31

## 5.2 ACCIAIO DA CEMENTO ARMATO

È previsto l'utilizzo di acciaio appartenente alla classe B450C, con le seguenti caratteristiche:

Resistenza caratteristica a snervamento  $f_{yk} = 450 \text{ N/mm}^2$ ;

Resistenza caratteristica a rottura  $f_{tk} = 540 \text{ N/mm}^2$ ;

Modulo elastico  $E_s = 206000 \text{ N/mm}^2$ .

## 6 CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICO – GEOTECNICA

Di seguito si indicano i principali parametri geotecnici dei terreni adottati nel dimensionamento della galleria artificiale Bastia 2.

Dalle indagini disponibili in questa fase è possibile affermare che gli imbocchi della galleria interesseranno prevalentemente la porzione incoerente CMV-i, costituita prevalentemente da sabbia e ghiaia in matrice limosa argillosa, mentre la parte centrale sarà realizzata, con molta probabilità, all'interno della formazione dei conglomerati pliocenici (CMV).

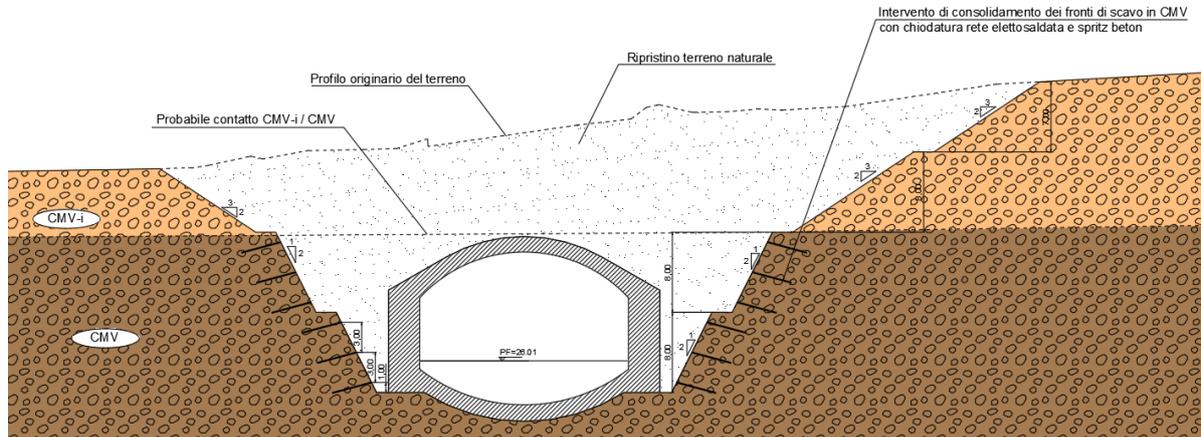
La falda è presente a quota decisamente inferiore rispetto a quella dell'arco rovescio.

Si specifica che si ritiene necessario effettuare, nelle successive fasi della progettazione, indagini integrative che accertino quanto riscontrato con i sondaggi attualmente disponibili. Tali indagini consentiranno di effettuare le scelte progettuali più idonee per la realizzazione della galleria in esame.

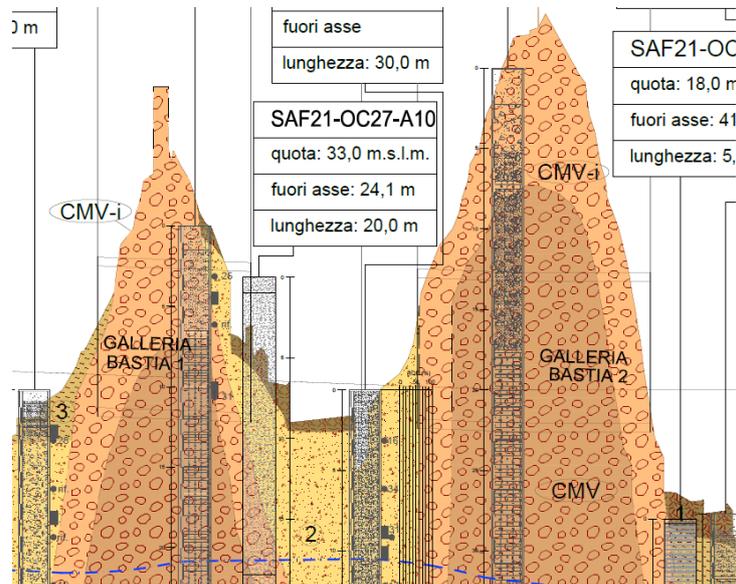
I parametri geotecnici ipotizzati per il dimensionamento strutturale della galleria artificiale Bastia 2 sono riepilogati in Tabella 6-1.

	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c'$ [kPa]	$\phi'$ [°]	$E'$ [MPa]
<b>Unità 2</b>	20.0	0	35	35
<b>CMV-i</b>	21.0	0	40	50
<b>CMV</b>	22.0	50	45	500
<b>Riempimento</b>	19.0	0	35	30

**Tabella 6-1 Parametri geotecnici di riferimento - Galleria artificiale Bastia II**



**Figura 6-1 Sezione geologico-geotecnica della galleria Bastia II**



**Figura 6-2 Profilo geologico dell'opera**



INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE OBIETTIVO N.443/01

All. [2] **PROGETTO DEFINITIVO**

**RADDOPPIO LINEA GENOVA – VENTIMIGLIA – TRATTA FINALE L. ANDORA**

GALLERIA ARTIFICIALE BASTIA 2 DA KM 85+792 A KM 85+890 - RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 26 CL	GA 13 00 001	A	9 di 31

## 7 CARATTERIZZAZIONE SISMICA

La opera in progetto si trova nella località di Bastia nel comune di Albenga, in provincia Savona, regione Liguria, in un sito con le seguenti coordinate geografiche: Latitudine 44.01653 , Longitudine 8.204775.

Alle strutture di tipo definitivo, si attribuisce una vita nominale  $V_N$  pari a 75 anni e una classe d'uso III a cui corrisponde il coefficiente  $C_u$  pari a 1.5 (*Tab. 2.4.I e Tab. 2.4.II, NTC 2018 – D.M. Infrastrutture 17 gennaio 2018*). Di conseguenza il periodo di riferimento per la definizione dell'azione sismica risulta pari a  $V_R = V_N \cdot C_u = 112.5$  anni.

Con riferimento alla probabilità di superamento dell'azione sismica,  $P_{VR}$ , attribuita allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (SLV), nel periodo  $V_R$  dell'opera in progetto, si determina il periodo di ritorno  $T_R$  del sisma di progetto. Sulla base delle coordinate geografiche del sito e del tempo di ritorno del sisma di progetto,  $T_R$ , sopra definito, si ricavano i parametri che caratterizzano il sisma di progetto relativo al sito di riferimento, rigido ed orizzontale (*Tabella 1 dell'allegato B del D.M. 14/01/2018*):

- $a_g$ : accelerazione orizzontale massima
- $F_0$ : valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale
- $T^*c$ : periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Per le opere in esame il periodo di ritorno si determina con l'espressione:

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

Per tenere conto dei fattori locali del sito, l'accelerazione orizzontale massima attesa al sito è valutata con la seguente relazione:

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

dove:

$a_g$  è l'accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido.

$S_s$  è il fattore di amplificazione stratigrafica del terreno, funzione della categoria del sottosuolo di fondazione e dei parametri sismici  $F_0$  e  $a_g/g$  (*Tabella 3.2.IV del D.M. Infrastrutture 17 gennaio 2018*);

$S_T$  è il fattore di amplificazione che tiene conto delle condizioni topografiche, il cui valore dipende dalla categoria topografica e dall'ubicazione dell'opera (*Tabella 3.2.V del D.M. Infrastrutture 17 gennaio 2018*).

Sulla base delle evidenze riscontrata in sito si assegna una categoria di sottosuolo B.

I valori delle grandezze necessarie per la definizione dell'azione sismica sono riepilogate nella seguente tabella.

Vita Nominale dell'opera	$V_N$	75	anni
Coefficiente D'uso	$C_u$	1.5	
Periodo di riferimento	$V_R$	112.5	anni
Probabilità di Superamento Evento	$P_{VR}$	10	
Periodo di Ritorno	$T_R$	1068	anni
Acc. orizzontale di picco al sito	$a_g$	0.189	g
Amplificazione Spettrale max.	$F_0$	2.456	
Categoria sottosuolo		B	
Categoria topografica		T1	
Coeff. di amp. stratigrafica	$S_s$	1.2	
Coeff. di amp. Topografica	$S_T$	1	

**Tabella 7-1 Parametri sismici considerati per la valutazione dell'azione sismica per l'opera in esame**

I parametri sismici utilizzati nel modello di calcolo sono:

$$k_h = a_{max}/g = 0.223$$

$$k_v = \pm 0.5k_h = \pm 0.112$$

	INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE OBIETTIVO N.443/01 All. [2] <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>RADDOPPIO LINEA GENOVA – VENTIMIGLIA – TRATTA FINALE L. ANDORA</b>					
GALLERIA ARTIFICIALE BASTIA 2 DA KM 85+792 A KM 85+890 - RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURE	COMMESSA <b>IV01</b>	LOTTO 00	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO GA 13 00 001	REV. A	FOGLIO 11 di 31

## 8 DESCRIZIONE DELLE OPERE

La necessità di riprofilare il terreno naturale esistente comporta il fatto che la galleria sia caricata da spessori di ricoprimento diversi lungo il suo sviluppo. La scelta progettuale è stata quella di utilizzare una sezione classica di tipo policentrico, mantenendo inalterato lo spessore dei muri laterali e aumentando lo spessore della calotta superiore e dell'arco rovescio, nei tratti in cui il ricoprimento superava i 6.00m. Lo spessore massimo di ricoprimento risulta pari a 11.00m in corrispondenza della progressiva 85+850.00.

Nascono così due tipi di sezione, la sezione tipo 1 e la sezione tipo 2, utilizzate con la seguente scansione. Procedendo da Genova verso Ventimiglia, si ha, compresi anche i tratti iniziali con i becchi di flauto:

- L=33.75m, Sezione tipo 1
- L=62.70m, Sezione tipo 2
- L=31.55m, Sezione tipo 1

Le due sezioni tipo hanno in comune il raggio interno della calotta superiore pari a 14m e il raggio interno dell'arco rovescio di 16.83m. I due montanti sono a parete verticali di spessore 3.05m. Si differenziano per:

- Spessore calotta superiore
  - Sezione tipo 1: 1.50m in chiave che si raccorda con il muro da 3.05m
  - Sezione tipo 2: 1.80m in chiave che si raccorda con il muro da 3.05m
- Spessore arco rovescio
  - Sezione tipo 1: 1.50m costante
  - Sezione tipo 2: 1.80m costante

Ad opera finita, la galleria ha un'altezza interna netta massima pari a 15.24m costante in mezzeria, ed una distanza tra P.F. e intradosso calotta superiore pari a 10.85m costante sempre in mezzeria. Il franco massimo in mezzeria garantito è di 6.0m.

La piattaforma ferroviaria è costituita da 4 binari rettilinei ad interasse costante pari a 4m e da due marciapiedi di servizio da 2.45m.

Le fasi esecutive delle opere da realizzare sono:

- Scavo 3:2 fino alla possibile quota di intersezione tra l'unità geotecnica CMV e l'unità CMV-i;
- Scavo 1:2 fino a quota fondo scavo e consolidamento scarpate;
- Realizzazione galleria;
- Realizzazione opere di finitura e ripristino del profilo terreno preesistente

	INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE OBIETTIVO N.443/01 All. [2] <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>RADDOPPIO LINEA GENOVA – VENTIMIGLIA – TRATTA FINALE L. ANDORA</b>					
GALLERIA ARTIFICIALE BASTIA 2 DA KM 85+792 A KM 85+890 - RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURE	COMMESSA <b>IV01</b>	LOTTO 00	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO GA 13 00 001	REV. A	FOGLIO 12 di 31

## 9 APPROCCIO PROGETTUALE

Le verifiche strutturali eseguite per il dimensionamento della galleria Bastia 2 sono state svolte in accordo alle NTC2018.

## 10 GALLERIA ARTIFICIALE (SEZIONE CORRENTE)

### 10.1 Descrizione dei modelli

Il presente paragrafo illustra i modelli di calcolo e le verifiche svolte per il dimensionamento strutturale della galleria artificiale Bastia 2.

Le sezioni tipologiche della galleria sono state modellate con il software Midas Gen 2021 implementando un modello di calcolo bidimensionale che rappresenta una sezione trasversale di spessore unitario con elementi beam aventi sezione pari a 1.0 m di larghezza e spessore secondo le caratteristiche geometriche previste. Agli elementi è stato assegnato il materiale corrispondente al calcestruzzo di classe C28/35.

Il modello di calcolo viene analizzato con il modello di trave su suolo elastico alla Winkler, cioè assimilabile ad un letto di molle elastiche non lineari (sola compressione) di opportuna rigidezza mutuamente indipendenti. Il valore di rigidezza di tali molle deve essere calibrato, considerando sia le caratteristiche meccaniche del terreno di fondazione, sia le dimensioni geometriche della fondazione stessa.

Nei modelli di calcolo, la rigidezza delle molle è stata definita facendo ricorso ai contributi di Terzaghi e Peck (1948). In particolare, per una fondazione di larghezza B, la rigidezza delle molle è assunta pari:

$$k_s = k_1 \cdot \left( \frac{B + b}{2B} \right)^2$$

Dove:

b rappresenta la dimensione della piastra standard per l'esecuzione delle prove su piastra, pari a 30 cm,

$k_1$  indica il valore ottenuto da una prova di carico su piastra quadrata di lato unitario. In particolare, Viggiani (1999) propone i seguenti valori di costante di reazione  $k_1$  del terreno.

Il dimensionamento eseguito è stato svolto considerando una sezione ricadente nella quale il solettone di fondazione risulta appoggiato prevalentemente sull'unità CMV, costituita principalmente da depositi di tipo coesivo.

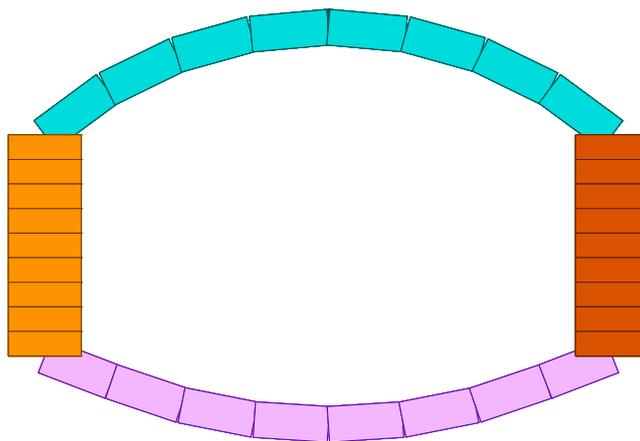
Consistenza	Compatta ( $c_u=50\div 100$ kPa)	Molto compatta ( $c_u=100\div 200$ kPa)	Dura ( $c_u>200$ kPa)
Campo	18÷35	35÷70	>70
Val. consigliato	25	50	100

**Tabella 10-1 Valori tipici di  $k_1$  [ $N/cm^3$ ] per terreni coesivi (Viggiani, 1999)**

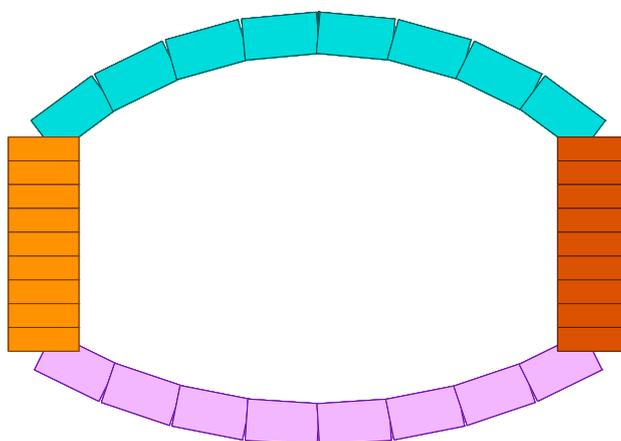
In analogia alle sezioni tipologiche individuate, sono stati implementati i seguenti modelli di carico:

- Modello n. 1, con massima altezza di ricoprimento prevista pari a 6 m,
- Modello n. 2, con massima altezza di ricoprimento prevista pari a 11 m.

Le seguenti figure illustrano i modelli di calcolo implementati.



**Figura 10-1 Modello di calcolo n. 1 – Altezza di ricoprimento pari a 6 m**



	<p>INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE OBIETTIVO N.443/01</p> <p>All. [2] <b>PROGETTO DEFINITIVO</b></p> <p><b>RADDOPPIO LINEA GENOVA – VENTIMIGLIA – TRATTA FINALE L. ANDORA</b></p>					
<p>GALLERIA ARTIFICIALE BASTIA 2 DA KM 85+792 A KM 85+890 - RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURE</p>	<p>COMMESSA <b>IV01</b></p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA D 26 CL</p>	<p>DOCUMENTO GA 13 00 001</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 14 di 31</p>

**Figura 10-2 Modello di calcolo n. 2 – Altezza di ricoprimento pari a 11 m**

	INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE OBIETTIVO N.443/01 All. [2] <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>RADDOPPIO LINEA GENOVA – VENTIMIGLIA – TRATTA FINALE L. ANDORA</b>					
	GALLERIA ARTIFICIALE BASTIA 2 DA KM 85+792 A KM 85+890 - RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURE	COMMESSA <b>IV01</b>	LOTTO 00	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO GA 13 00 001	REV. A

## 10.2 Analisi dei carichi

### 10.2.1 Peso proprio

Si considera il peso proprio della struttura, considerando un peso specifico del c.a. pari a  $25 \text{ kN/m}^3$ .

### 10.2.2 Spinta del terreno

Si considera agente in condizioni di spinta a riposo il terreno di riempimento valutato con il coefficiente  $k_0=1-\text{sen}\varphi$ .

### 10.2.3 Carico variabile da traffico ferroviario

Si introduce il sovraccarico variabile dovuto al traffico ferroviario valutato considerando i 4 treni di carico del modello LM71 amplificati considerando linee a ridotto standard manutentivo ( $\varphi_3=1.35$ ) e il relativo coefficiente di adattamento ( $\alpha=1.1$ ), ripartiti su una distanza pari a 6.40m e successivamente redistribuiti considerando la larghezza della traversina (2.40m), e diffusi nel ballast (con inclinazione 4:1) e in metà della soletta di fondazione. Il carico rappresentativo del traffico ferroviario è stato assunto pari a 40 kPa.

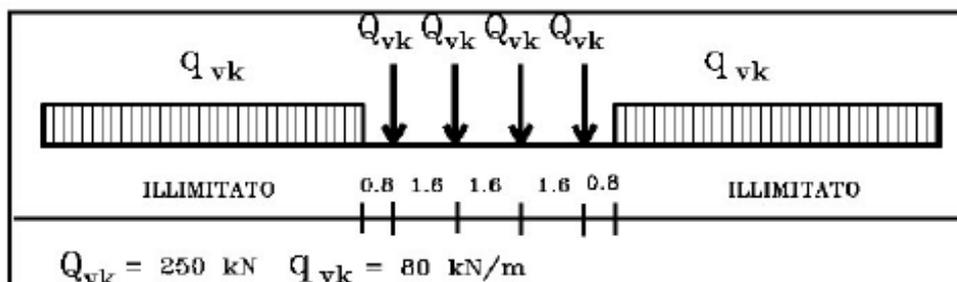


Figura 10-3 Modello di carico ferroviario LM71

### 10.2.4 Sovraccarico variabile

È stato previsto un ulteriore sovraccarico verticale variabile agente sulla calotta pari a 20 kPa.

### 10.2.5 Azione sismica

l'azione sismica è valutata con riferimento alle indicazioni riportate nelle NTC2018.

Le verifiche sismiche sono condotte seguendo una analisi di tipo pseudostatica. Nel caso dell'analisi pseudostatica si applicano alla struttura, in aggiunta agli altri carichi già presenti, le forze di inerzia sulla struttura e l'azione dinamica del terreno rappresentate da carichi statici equivalenti.



INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE OBIETTIVO N.443/01

All. [2] **PROGETTO DEFINITIVO**

**RADDOPPIO LINEA GENOVA – VENTIMIGLIA – TRATTA FINALE L. ANDORA**

GALLERIA ARTIFICIALE BASTIA 2 DA KM 85+792 A KM 85+890 - RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 26 CL	GA 13 00 001	A	16 di 31

I coefficienti sismici orizzontali  $k_h$  e verticale  $k_v$  sono valutati mediante le relazioni:

$$k_h = \frac{a_{max}}{g}$$

$$k_v = \pm 0.5 k_h$$

dove:

$a_{max}$  è l'accelerazione massima attesa al sito

I parametri sismici utilizzati per lo stato limite SLV sono riportati al Capitolo 7.

L'incremento della spinta del terreno dovuto all'azione sismica, agente sulle pareti dello scatolare, è stata valutato con la teoria di Wood (1973). Secondo tale teoria, l'incremento di sforzo sismico da assumere per una parete di spessore unitario è dato dall'espressione:

$$\Delta P_d = \frac{a_g}{g} \cdot S \cdot \gamma \cdot H$$

Dove  $\gamma$  e  $H$  indicano il peso specifico del terreno e l'altezza della struttura.

Le forze inerziali agenti a livello dell'impalcato dello scatolare sono quelle dovute al peso del manto stradale e del ricoprimento, oltre a quelle prodotte dall'impalcato e da metà dei piedritti dello scatolare, valutate secondo la seguente espressione:

$$\Delta P_d = k_h \cdot W$$

### 10.3 Stati limite considerati

#### 10.3.1 Stati limiti ultimi

Gli stati limite ultimi considerati sono riferiti alle seguenti combinazioni:

SLU combinazione STATICA  $\gamma_{G1}G_1 + \gamma_{G2}G_2 + \gamma_Q Q + \gamma_Q \sum \psi_{0i} Q_i$

SLU combinazione SISMICA  $E + G_1 + G_2 + \sum \psi_{2i} Q_i$

Per il caso in esame, i coefficienti adottati sono:



INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE OBIETTIVO N.443/01

All. [2] **PROGETTO DEFINITIVO**

**RADDOPPIO LINEA GENOVA – VENTIMIGLIA – TRATTA FINALE L. ANDORA**

GALLERIA ARTIFICIALE BASTIA 2 DA KM 85+792 A KM 85+890 - RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 26 CL	GA 13 00 001	A	17 di 31

$$\gamma_{G1} = 1.35 \text{ se A1+M1; } 1 \text{ se favorevole}$$

$$\gamma_{G2} = 1.50 \text{ se A1+M1; } 0 \text{ se favorevole}$$

$$\gamma_{Q1} = 1.45 \text{ se A1+M1; } 0 \text{ se favorevole (azione variabile da traffico)}$$

$$\gamma_{Q2} = 1.50 \text{ se A1+M1; } 0 \text{ se favorevole}$$

Per ciascuna azione variabile, sono stati considerati i coefficienti di combinazione riportati nella seguente tabella:

Carico	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2(*)$
Treno	0.8	0.8	0
Sovraccarico variabile	0.7	0.7	0.6

**Tabella 10-2: Coefficienti di combinazione. NTC 2018**

(\*) Nella combinazione sismica è stato assunto il coefficiente  $\psi_2=0.2$ , in accordo con quanto riportato al paragrafo 5.1.3.12 delle NTC 2018.

Per le combinazioni in esame, le sollecitazioni risultanti vanno confrontate con la resistenza a rottura delle sezioni in calcestruzzo armato, determinata dalle seguenti caratteristiche di resistenza dei materiali:

$$R_{ck} = 35 \text{ MPa}$$

$$f_{ck} = 0.83 \times R_{ck} = 29.05 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = 29.05 \times 0.85 / 1.5 = 16.46 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = 450 / 1.15 = 391.3 \text{ MPa}$$

### 10.3.2 Stati limiti di esercizio

Le strutture in esame rientrano nella classe di esposizione XC3 riferibile a condizioni ambientali *ordinarie*. L'armatura è di tipo *poco sensibile*. In considerazione di ciò, gli stati limite di esercizio considerati sono:

SLE combinazione RARA:  $G_1 + G_2 + Q_1 + \sum \psi_{0i} Q_i$

Limiti tensionali:  $\sigma_c = 0.55 \times f_{ck} = 0.55 \times 29.05 = 15.98 \text{ MPa}$

$$\sigma_s = 0.75 \times f_{yk} = 0.75 \times 450 = 337.5 \text{ MPa}$$

Limiti fessurativi:  $w_d \leq 0.2 \text{ mm}$

	INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE OBIETTIVO N.443/01 All. [2] <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>RADDOPPIO LINEA GENOVA – VENTIMIGLIA – TRATTA FINALE L. ANDORA</b>					
GALLERIA ARTIFICIALE BASTIA 2 DA KM 85+792 A KM 85+890 - RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURE	COMMESSA <b>IV01</b>	LOTTO 00	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO GA 13 00 001	REV. A	FOGLIO 18 di 31

## 10.4 Combinazioni di calcolo

Per le verifiche degli stati limite, sono stati considerati le seguenti combinazioni di carichi, secondo le specificazioni al punto 2.5.3, NTC 2018.

### 2.5.3 COMBINAZIONI DELLE AZIONI

Ai fini delle verifiche degli stati limite si definiscono le seguenti combinazioni delle azioni.

- Combinazione fondamentale, generalmente impiegata per gli stati limite ultimi (SLU):

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.1)$$

- Combinazione caratteristica (rara), generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) irreversibili, da utilizzarsi nelle verifiche alle tensioni ammissibili di cui al § 2.7:

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.2)$$

- Combinazione frequente, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) reversibili:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.3)$$

- Combinazione quasi permanente (SLE), generalmente impiegata per gli effetti a lungo termine:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.4)$$

- Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E (v. § 3.2):

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots \quad (2.5.5)$$

- Combinazione eccezionale, impiegata per gli stati limite ultimi connessi alle azioni eccezionali di progetto  $A_d$  (v. § 3.6):

$$G_1 + G_2 + P + A_d + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots \quad (2.5.6)$$

**Figura 10-4 Combinazioni di carico previste dalle NTC 2018**

La seguente tabella riepiloga le combinazioni di carico implementate nei modelli di calcolo.

Carico / Combinazioni	SLU T-CV	SLU CV-T	SLV	SLER T-CV	SLER CV-T	SLEF T-CV	SLEF CV-T	SLE QP
<b>Peso proprio</b>	1.35	1.35	1	1	1	1	1	1
<b>Ricoprimento</b>	1.35	1.35	1	1	1	1	1	1
<b>Ballast + Riempimento</b>	1.5	1.5	1	1	1	1	1	1
<b>Spinta terreno riposo</b>	1.35	1.35	1	1	1	1	1	1
<b>Spinta carico variabile</b>	1.05	1.5	0.6	0.7	1	0.6	0.7	0.6
<b>Treno</b>	1.45	1.16	0.2	1	0.8	0.6	0	0
<b>Azione sismica</b>	0	0	1	0	0	0	0	0

**Tabella 10-3** Combinazioni di calcolo implementate nel modello di calcolo (nei nomi delle combinazioni T indica il carico variabile da traffico ferroviario del treno e CV rappresenta il generico carico variabile pari a 20 kPa)

## 10.5 Modello di calcolo n. 1 – Altezza di ricoprimento 6 m

### 10.5.1 Risultati del modello di calcolo

Nel presente paragrafo sono riportati i risultati delle analisi numeriche in termini di inviluppo di momento flettente e taglio allo stato limite ultimo (SLU) e salvaguarda della vita (SLV). Si riporta inoltre l'inviluppo di momento flettente allo stato limite di esercizio (SLE).

A seguire sono riportate i risultati del modello numerico e le verifiche strutturali eseguite.

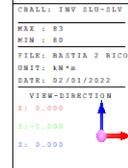
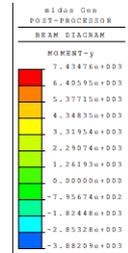
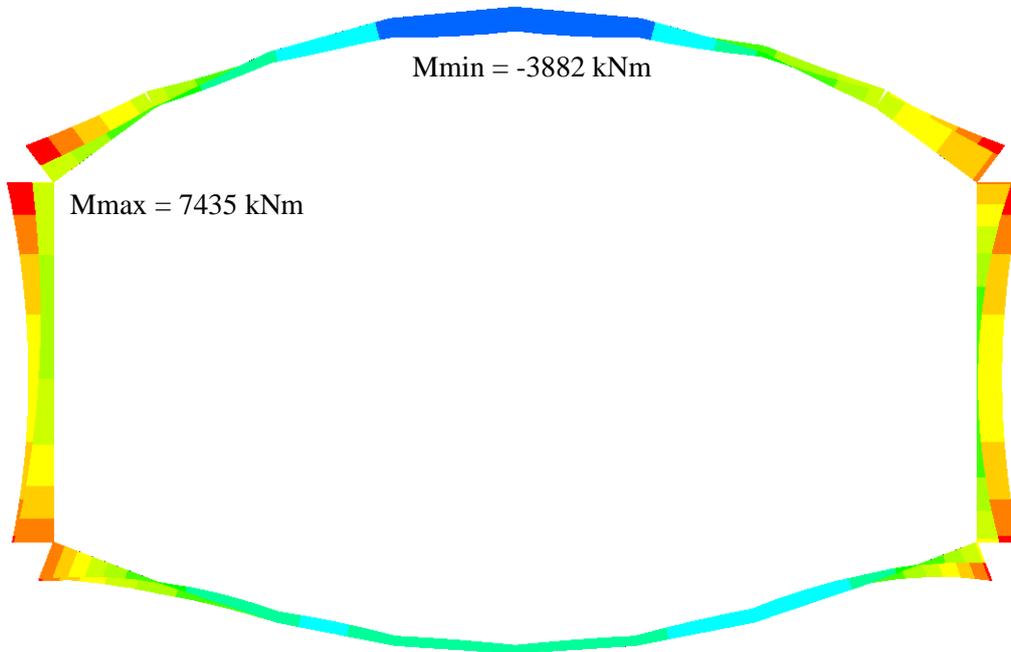


Figura 10-5 Inviluppo SLU SLV – Momento flettente

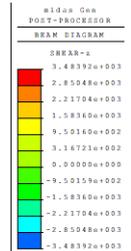
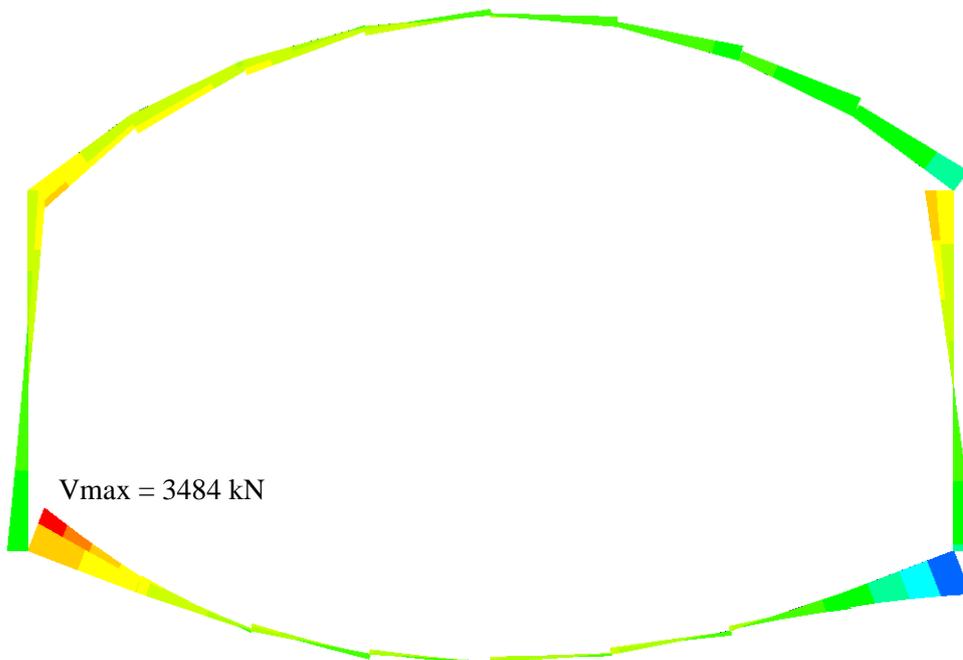
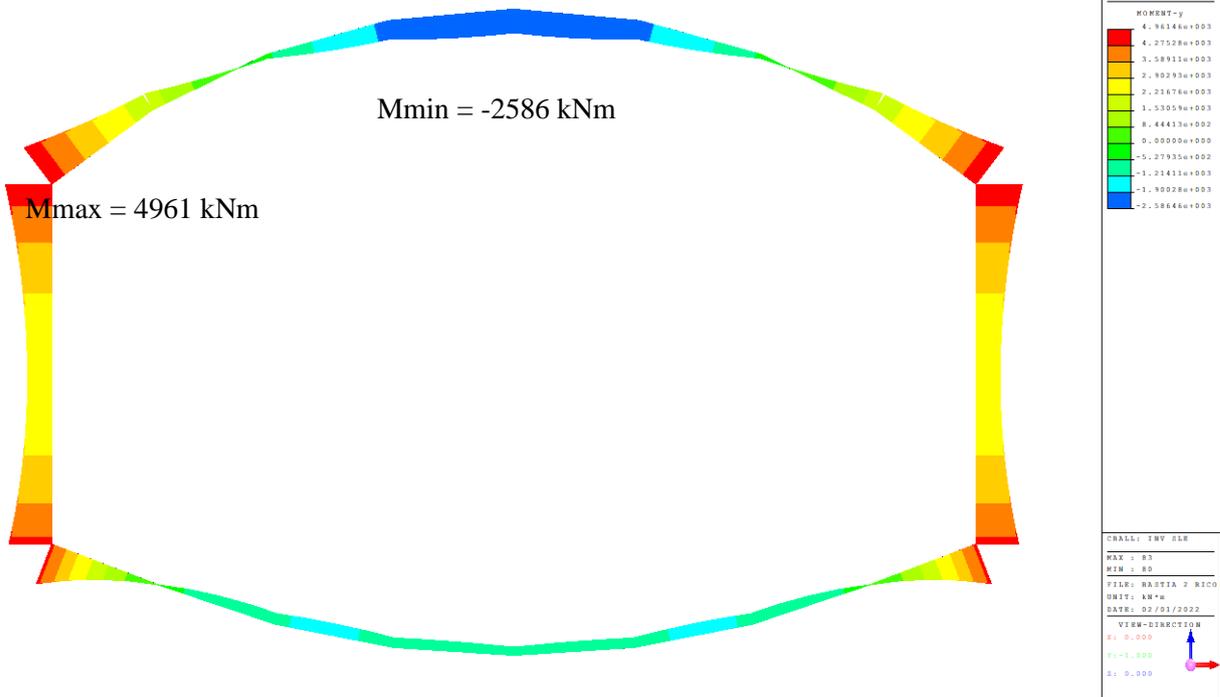


Figura 10-6 Inviluppo SLU SLV - Taglio



**Figura 10-7 Involuppo SLE – Momento flettente**

Nella seguente tabella sono riepilogati i massimi valori di sollecitazione in corrispondenza delle sezioni di verifica.

Sezione	Momento SLU-SLV [kNm]	Taglio SLU-SLV [kN]	Momento. SLE [kNm]
Calotta – Mezzeria	-3882	636	-2586
Calotta - Incastro	7435	1836	4961
Piedritto - Incastro	7435	1537	4961
Arco rovescio - Incastro	6621	3484	4588
Arco rovescio - Mezzeria	-1561	-	-1072

**Tabella 10-4 Sollecitazioni ottenute dal modello numerico**

### 10.5.2 Verifiche strutturali

La seguente tabella riepiloga l'armatura prevista per le diverse sezioni di verifica.

	Armatura di forza [cm <sup>2</sup> /m]	Armatura a taglio (a metro lineare)
Calotta – Mezzeria	Lembo compresso: 70.7 Lembo teso: 141.4	Ganci Ø10/25x40 cm
Calotta – Incastro	Lembo compresso: 70.7 Lembo teso: 141.4	Ganci Ø10/25x40 cm
Piedritto – Incastro	Lembo compresso: 70.7 Lembo teso: 141.4	Ganci Ø10/25x40 cm
Arco rovescio – Mezzeria	Lembo compresso: 70.7 Lembo teso: 70.7	Ganci Ø10/25x40 cm
Arco rovescio – Incastro	Lembo compresso: 70.7 Lembo teso: 141.4	Ganci Ø10/25x10 cm

**Tabella 10-5 Riepilogo armatura nelle diverse sezioni di verifica in esame**

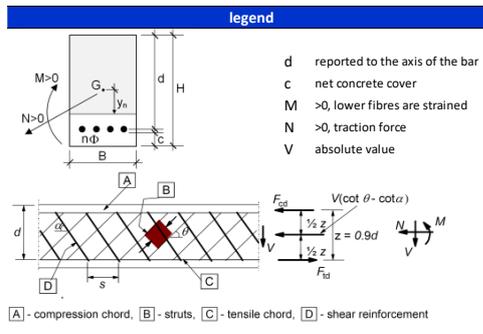
Si riportano a seguire le verifiche strutturali per le diverse sezioni sopra indicate.

geometry				
transversal section				
B	H	c	d	z
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
100	150	4.0	145.0	130.5
longitudinal reinforcement				
nbarre	φ	d	Asl	
	[mm]	[cm]	[cm <sup>2</sup> ]	
10	30	5.0	70.69	
10	30	135.0	70.69	
10	30	145.0	70.69	
shear reinforcement				
narms	φ	s	α	Asw
	[mm]	[cm]	[°]	[cm <sup>2</sup> ]
4	10	40	90	3.14

stresses and results	
SLS	ULS
M <sub>ed</sub> -2586 [kNm]	M <sub>ed</sub> -3882 [kNm]
N <sub>ed</sub> -1190 [kN]	N <sub>ed</sub> -1694 [kN]
V <sub>ed</sub>	V <sub>ed</sub> 636 [kN]
tensions and cracks	
M <sub>dec</sub> -387.7 [kNm]	M <sub>rd</sub> -5042.8 [kNm]
M <sub>cr</sub> -952.4 [kNm]	FS 1.30
shear	
V <sub>rdc</sub> 27.64 [cm]	V <sub>rdc</sub> 676.9 [kN]
σ <sub>c,min</sub> -6.4 [MPa]	no shear reinforcement
σ <sub>s,min</sub> -86.1 [MPa]	V <sub>Rds</sub> 992.7 [kN]
σ <sub>s,max</sub> 198.4 [MPa]	V <sub>Rdmax</sub> 3831.8 [kN]
ε <sub>sm-ε<sub>cm</sub></sub> 0.81 [%]	θ 22.0 [°]
S <sub>r,max</sub> 20.9 [cm]	section: ductile
W <sub>k</sub> 0.170 [mm]	a <sub>i</sub> 145.0 [cm]

verifica EC2	
tipo di rottura	2
1 lato acciaio	
2 lato cls - acciaio snervato	
3 lato cls - acciaio elastico	
4 sez. tot. compressa	
contributo Asl	
scelta	no
angolo θ	
scelta	imposto
θ <sub>imposto</sub>	22 [°]
θ <sub>calcolato</sub>	11.0 [°]
θ <sub>inf</sub>	21.8 [°]
θ <sub>sup</sub>	45 [°]

materials			
concrete		steel	
f <sub>ck</sub>	28 [MPa]	f <sub>yk</sub>	450 [MPa]
γ <sub>c</sub>	1.5	γ <sub>s</sub>	1.15
α <sub>cc</sub>	0.85	f <sub>yd</sub>	391.3 [MPa]
f <sub>cd</sub>	15.9 [MPa]	E <sub>s</sub>	200000 [MPa]
v	0.533	ε <sub>uk</sub>	75 [%]
ε <sub>c2</sub>	2.0 [%]		
ε <sub>cu2</sub>	3.5 [%]		
α <sub>e</sub>	15.0		
kt	0.4		
k <sub>1</sub>	0.8		
k <sub>2</sub>	0.5	0,55f <sub>ck</sub>	15.4 [MPa]
k <sub>3</sub>	3.4	0,75f <sub>yk</sub>	337.5 [MPa]
k <sub>4</sub>	0.425	W <sub>k,lim</sub>	0.2 [mm]



α <sub>cc</sub>	coeff. effetti a lungo termine
v	coeff. riduzione resistenza bielle
α <sub>e</sub>	=E <sub>s</sub> /E <sub>c</sub>
kt	0.6 azioni di breve durata
	0.4 azioni di lunga durata
k <sub>1</sub>	0.8 barre aderenza migliorata
	1.6 barre lisce
k <sub>2</sub>	0.5 flessione
	(ε <sub>1</sub> +ε <sub>2</sub> )/2ε <sub>1</sub> trazione eccentrica
	1 trazione pura
k <sub>3</sub>	3.4 o da Annesso Nazionale
k <sub>4</sub>	0.425 o da Annesso Nazionale
σ	> 0 se di trazione
a <sub>i</sub>	traslazione armatura longitudinale

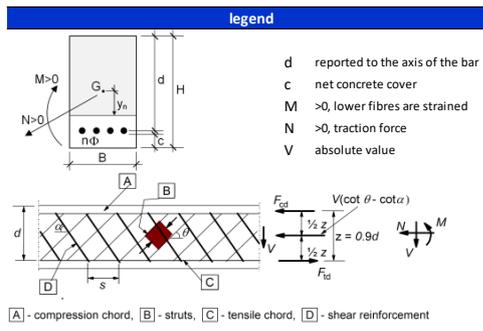
Tabella 10-6 Verifica strutturale calotta – sezione di mezzera

geometry				
transversal section				
B	H	c	d	z
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
100	210	4.0	200.0	180.0
longitudinal reinforcement				
nbarre	φ	d	Asl	
	[mm]	[cm]	[cm <sup>2</sup> ]	
10	30	5.0	70.69	
10	30	195.0	70.69	
10	30	205.0	70.69	
shear reinforcement				
narms	φ	s	α	Asw
	[mm]	[cm]	[°]	[cm <sup>2</sup> ]
4	10	20	90	3.14

stresses and results	
SLS	ULS
M <sub>ed</sub> 4961 [kNm]	M <sub>ed</sub> 7435 [kNm]
N <sub>ed</sub> -2000 [kN]	N <sub>ed</sub> -1931 [kN]
V <sub>ed</sub>	V <sub>ed</sub> 1836 [kN]
tensions and cracks	
M <sub>dec</sub> 787.8 [kNm]	M <sub>rd</sub> 12207.1 [kNm]
M <sub>cr</sub> 2127.7 [kNm]	FS 1.64
shear	
V <sub>rdc</sub> -16.31 [cm]	V <sub>rdc</sub> 835.2 [kN]
σ <sub>c,min</sub> -7.2 [MPa]	shear reinforcement
σ <sub>s,min</sub> -102.1 [MPa]	V <sub>Rds</sub> 2738.4 [kN]
σ <sub>s,max</sub> 141.8 [MPa]	V <sub>Rdmax</sub> 5285.2 [kN]
ε <sub>sm-ε<sub>cm</sub></sub> 0.53 [%]	θ 22.0 [°]
S <sub>r,max</sub> 20.9 [cm]	section: ductile
W <sub>k</sub> 0.111 [mm]	a <sub>i</sub> 222.8 [cm]

verifica EC2	
tipo di rottura	2
1 lato acciaio	
2 lato cls - acciaio snervato	
3 lato cls - acciaio elastico	
4 sez. tot. compressa	
contributo Asl	
scelta	no
angolo θ	
scelta	imposto
θ <sub>imposto</sub>	22 [°]
θ <sub>calcolato</sub>	15.6 [°]
θ <sub>inf</sub>	21.8 [°]
θ <sub>sup</sub>	45 [°]

materials			
concrete		steel	
f <sub>ck</sub>	28 [MPa]	f <sub>yk</sub>	450 [MPa]
γ <sub>c</sub>	1.5	γ <sub>s</sub>	1.15
α <sub>cc</sub>	0.85	f <sub>yd</sub>	391.3 [MPa]
f <sub>cd</sub>	15.9 [MPa]	E <sub>s</sub>	200000 [MPa]
v	0.533	ε <sub>uk</sub>	75 [%]
ε <sub>c2</sub>	2.0 [%]		
ε <sub>cu2</sub>	3.5 [%]		
α <sub>e</sub>	15.0		
kt	0.4		
k <sub>1</sub>	0.8		
k <sub>2</sub>	0.5	0,55f <sub>ck</sub>	15.4 [MPa]
k <sub>3</sub>	3.4	0,75f <sub>yk</sub>	337.5 [MPa]
k <sub>4</sub>	0.425	W <sub>k,lim</sub>	0.2 [mm]



α <sub>cc</sub>	coeff. effetti a lungo termine
v	coeff. riduzione resistenza bielle
α <sub>e</sub>	=E <sub>s</sub> /E <sub>c</sub>
kt	0.6 azioni di breve durata
	0.4 azioni di lunga durata
k <sub>1</sub>	0.8 barre aderenza migliorata
	1.6 barre lisce
k <sub>2</sub>	0.5 flessione
	(ε <sub>1</sub> +ε <sub>2</sub> )/2ε <sub>1</sub> trazione eccentrica
	1 trazione pura
k <sub>3</sub>	3.4 o da Annesso Nazionale
k <sub>4</sub>	0.425 o da Annesso Nazionale
σ	> 0 se di trazione
a <sub>i</sub>	traslazione armatura longitudinale

Tabella 10-7 Verifica strutturale calotta – sezione di incastro



geometry				
transversal section				
B	H	c	d	z
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
100	150	4.0	145.0	130.5
longitudinal reinforcement				
nbarre	$\phi$	d	Asl	
	[mm]	[cm]	[cm <sup>2</sup> ]	
10	30	5.0	70.69	
10	30	145.0	70.69	
shear reinforcement				
n <sub>arms</sub>	$\phi$	s	$\alpha$	Asw
	[mm]	[cm]	[°]	[cm <sup>2</sup> ]
4	10	40	90	3.14

stresses and results		
SLS	ULS	
M <sub>Ek</sub> -1072 [kNm]	M <sub>Ed</sub> 1561 [kNm]	
N <sub>Ek</sub> -2567 [kN]	N <sub>Ed</sub> -3219 [kN]	
	V <sub>Ed</sub> [kN]	
tensions and cracks		
M <sub>dec</sub> -762.4 [kNm]	M <sub>Rd</sub> 5930.6 [kNm]	
M <sub>cr</sub> -1405.9 [kNm]	FS 3.80	
	shear	
$\gamma_n$ -48.61 [cm]	V <sub>Rdc</sub> 898.0 [kN]	no shear reinforcement
$\sigma_{c,min}$ -3.7 [MPa]	V <sub>Rds</sub> 992.7 [kN]	
$\sigma_{s,min}$ -52.7 [MPa]	V <sub>Rdmax</sub> 3831.8 [kN]	
$\sigma_{s,max}$ 9.5 [MPa]	$\theta$ 22.0 [°]	
$\epsilon_{sm}-\epsilon_{cm}$ - [%]	section: ductile	
S <sub>r,max</sub> - [cm]	a <sub>l</sub> 145.0 [cm]	
w <sub>k</sub> - [mm]		

verifica EC2	
tipo di rottura	2
1 lato acciaio	
2 lato cls - acciaio snervato	
3 lato cls - acciaio elastico	
4 sez. tot. compressa	
contributo Asl	
scelta	no
angolo $\theta$	
scelta	imposto
$\theta_{imposto}$	22 [°]
$\theta_{calcolato}$	11.0 [°]
$\theta_{inf}$	21.8 [°]
$\theta_{sup}$	45 [°]

materials			
concrete		steel	
f <sub>ck</sub>	28 [MPa]	f <sub>yk</sub>	450 [MPa]
$\gamma_c$	1.5	$\gamma_s$	1.15
$\alpha_{cc}$	0.85	f <sub>yd</sub>	391.3 [MPa]
f <sub>cd</sub>	15.9 [MPa]	E <sub>s</sub>	200000 [MPa]
$\nu$	0.533	$\epsilon_{uk}$	75 [%]
$\epsilon_{c2}$	2.0 [%]		
$\epsilon_{cu2}$	3.5 [%]		
$\alpha_e$	15.0		
k <sub>t</sub>	0.4		
k <sub>1</sub>	0.8		
k <sub>2</sub>	0.5	0,55f <sub>ck</sub>	15.4 [MPa]
k <sub>3</sub>	3.4	0,75F <sub>yk</sub>	337.5 [MPa]
k <sub>4</sub>	0.425	w <sub>k,lim</sub>	0.2 [mm]

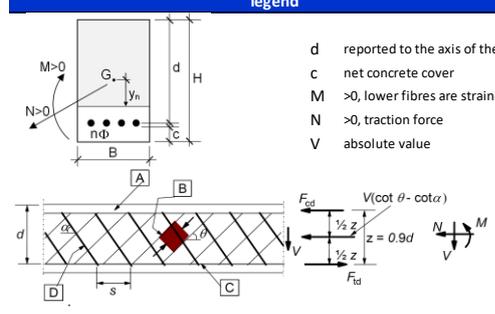
legend	
	d reported to the axis of the bar
	c net concrete cover
	M >0, lower fibres are strained
	N >0, traction force
	V absolute value
	$\alpha_{cc}$ coeff. effetti a lungo termine
	$\nu$ coeff. riduzione resistenza bielle
	$\alpha_e = E_s/E_c$
	k <sub>t</sub> 0.6 azioni di breve durata
	0.4 azioni di lunga durata
	k <sub>1</sub> 0.8 barre aderenza migliorata
	1.6 barre lisce
	k <sub>2</sub> 0.5 flessione
	( $\epsilon_{c1} + \epsilon_{c2}$ )/2 $\epsilon_{c1}$ trazione eccentrica
	1 trazione pura
	k <sub>3</sub> 3.4 o da Annesso Nazionale
	k <sub>4</sub> 0.425 o da Annesso Nazionale
	$\sigma$ >0 se di trazione
	a <sub>l</sub> traslazione armatura longitudinale

Tabella 10-10 Verifica strutturale arco rovescio – sezione in mezzeria

## 10.6 Modello di calcolo n. 2 – Altezza di ricoprimento 11 m

### 10.6.1 Risultati del modello di calcolo

Nel presente paragrafo sono riportati i risultati delle analisi numeriche in termini di involucro di momento flettente e taglio allo stato limite ultimo (SLU) e salvaguarda della vita (SLV). Si riporta inoltre l'involucro di momento flettente allo stato limite di esercizio (SLE).

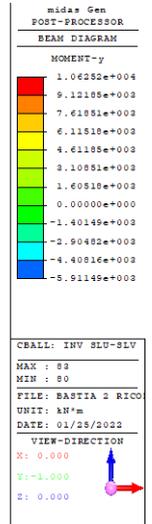
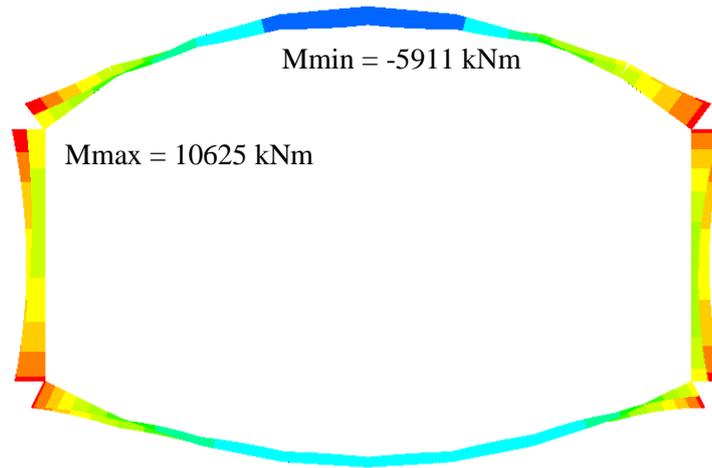


Figura 10-8 Involuppo SLU SLV- Momento flettente

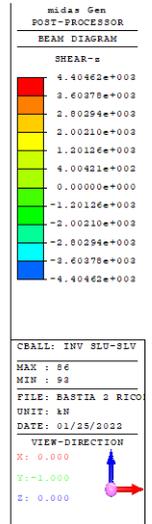
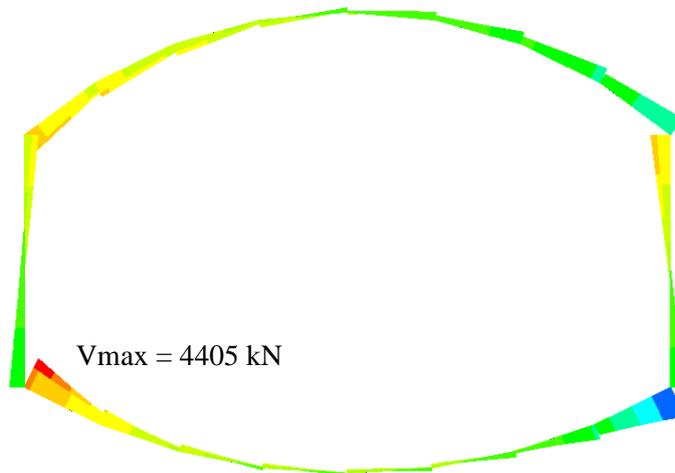
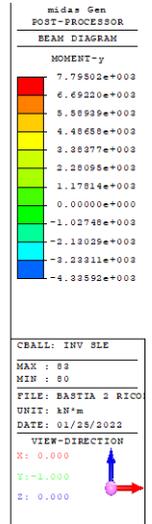
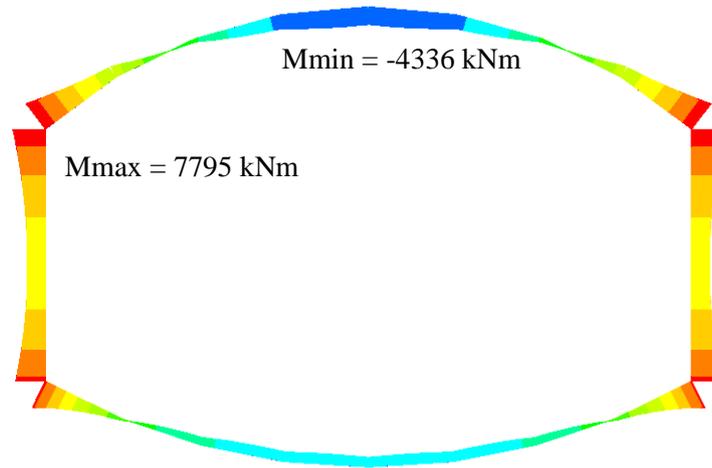


Figura 10-9 Involuppo SLU SLV - Taglio



**Figura 10-10 Involuppo SLE – Momento flettente**

Nella seguente tabella sono riepilogati i massimi valori di sollecitazione in corrispondenza delle sezioni di verifica.

Sezione	Momento SLU-SLV [kNm]	Taglio SLU-SLV [kN]	Momento SLE [kNm]
Calotta – Mezzeria	-5911	948	-4336
Calotta - Incastro	10625	2782	7795
Piedritto - Incastro	10625	2974	7795
Arco rovescio - Incastro	10044	4405	7115
Arco rovescio - Mezzeria	-3248	583	-2536

**Tabella 10-11 Sollecitazioni ottenute dal modello numerico**

### 10.6.2 Verifiche strutturali

La seguente tabella riepiloga l'armatura prevista per le diverse sezioni di verifica.

	Armatura di forza [cm <sup>2</sup> /m]	Armatura a taglio (a metro lineare)
Calotta – Mezzeria	Lembo compresso: 70.7 Lembo teso: 212	Ganci Ø10/25x40 cm
Calotta – Incastro	Lembo compresso: 70.7 Lembo teso: 141.4	Ganci Ø10/25x20 cm
Piedritto – Incastro	Lembo compresso: 70.7 Lembo teso: 141.4	Ganci Ø10/25x40 cm
Arco rovescio – Mezzeria	Lembo compresso: 70.7 Lembo teso: 141.4	Ganci Ø10/25x40 cm
Arco rovescio – Incastro	Lembo compresso: 70.7 Lembo teso: 212	Ganci Ø10/25x10 cm

**Tabella 10-12 Riepilogo armatura nelle diverse sezioni di verifica in esame**

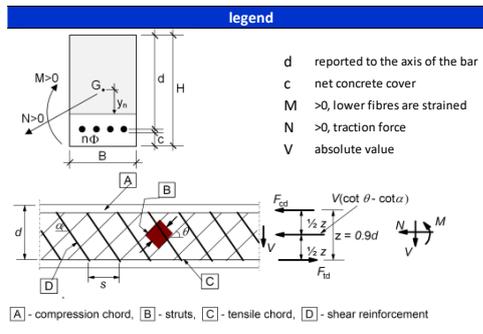
Si riportano a seguire le verifiche strutturali per le diverse sezioni sopra indicate.

geometry				
transversal section				
B	H	c	d	z
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
100	180	4.0	175.0	157.5
longitudinal reinforcement				
n <sub>barre</sub>	φ	d	A <sub>sl</sub>	
	[mm]	[cm]	[cm <sup>2</sup> ]	
15	30	5.0	106.03	
15	30	165.0	106.03	
10	30	175.0	70.69	
shear reinforcement				
n <sub>arms</sub>	φ	s	α	A <sub>sw</sub>
	[mm]	[cm]	[°]	[cm <sup>2</sup> ]
4	10	40	90	3.14

stresses and results		
SLS	ULS	
M <sub>ed</sub> -4336 [kNm]	M <sub>ed</sub> -5911 [kNm]	
N <sub>ed</sub> -1930 [kN]	N <sub>ed</sub> -2492 [kN]	
	V <sub>ed</sub> 1178 [kN]	
tensions and cracks		
M <sub>dec</sub> -764.8 [kNm]	M <sub>rd</sub> -8945.5 [kNm]	
M <sub>cr</sub> -1629.3 [kNm]	FS 1.51	
	bending	
	V <sub>rdc</sub> 865.1 [kN]	
	shear reinforcement	
	V <sub>Rds</sub> 1198.1 [kN]	
	V <sub>Rdmax</sub> 4624.6 [kN]	
	θ 22.0 [°]	
	section: ductile	
	a <sub>i</sub> 194.9 [cm]	
shear		
γ <sub>n</sub> 24.82 [cm]		
σ <sub>c,min</sub> -6.9 [MPa]		
σ <sub>s,min</sub> -96.0 [MPa]		
σ <sub>s,max</sub> 175.2 [MPa]		
ε <sub>sm-ε<sub>cm</sub></sub> 0.73 [‰]		
S <sub>r,max</sub> 17.9 [cm]		
W <sub>k</sub> 0.130 [mm]		

verifica EC2	
tipo di rottura	2
1 lato acciaio	
2 lato cls - acciaio snervato	
3 lato cls - acciaio elastico	
4 sez. tot. compressa	
contributo A <sub>sl</sub>	
scelta	no
angolo θ	
scelta	imposto
θ <sub>imposto</sub>	22 [°]
θ <sub>calcolato</sub>	11.0 [°]
θ <sub>inf</sub>	21.8 [°]
θ <sub>sup</sub>	45 [°]

materials			
concrete		steel	
f <sub>ck</sub>	28 [MPa]	f <sub>yk</sub>	450 [MPa]
γ <sub>c</sub>	1.5	γ <sub>s</sub>	1.15
α <sub>cc</sub>	0.85	f <sub>yd</sub>	391.3 [MPa]
f <sub>cd</sub>	15.9 [MPa]	E <sub>s</sub>	200000 [MPa]
v	0.533	ε <sub>uk</sub>	75 [‰]
ε <sub>c2</sub>	2.0 [‰]		
ε <sub>cu2</sub>	3.5 [‰]		
α <sub>e</sub>	15.0		
k <sub>t</sub>	0.4		
k <sub>1</sub>	0.8		
k <sub>2</sub>	0.5	0,55f <sub>ck</sub>	15.4 [MPa]
k <sub>3</sub>	3.4	0,75f <sub>yk</sub>	337.5 [MPa]
k <sub>4</sub>	0.425	W <sub>k,lim</sub>	0.2 [mm]
		limit values	



α <sub>cc</sub>	coeff. effetti a lungo termine
v	coeff. riduzione resistenza bielle
α <sub>e</sub>	=E <sub>s</sub> /E <sub>c</sub>
k <sub>t</sub>	0.6 azioni di breve durata
	0.4 azioni di lunga durata
k <sub>1</sub>	0.8 barre aderenza migliorata
	1.6 barre lisce
k <sub>2</sub>	0.5 flessione
	(ε <sub>1</sub> +ε <sub>2</sub> )/2ε <sub>1</sub> trazione eccentrica
	1 trazione pura
k <sub>3</sub>	3.4 o da Annesso Nazionale
k <sub>4</sub>	0.425 o da Annesso Nazionale
σ	>0 se di trazione
a <sub>i</sub>	traslazione armatura longitudinale

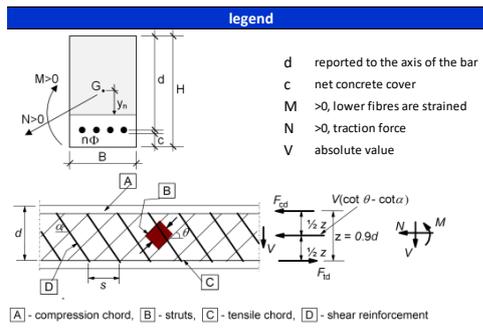
Tabella 10-13 Verifica strutturale calotta – sezione di mezzeria

geometry				
transversal section				
B	H	c	d	z
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
100	250	4.0	239.0	215.1
longitudinal reinforcement				
n <sub>barre</sub>	φ	d	A <sub>sl</sub>	
	[mm]	[cm]	[cm <sup>2</sup> ]	
10	30	5.0	70.69	
10	30	234.0	70.69	
10	30	244.0	70.69	
shear reinforcement				
n <sub>arms</sub>	φ	s	α	A <sub>sw</sub>
	[mm]	[cm]	[°]	[cm <sup>2</sup> ]
4	10	20	90	3.14

stresses and results		
SLS	ULS	
M <sub>ed</sub> 7795 [kNm]	M <sub>ed</sub> 10625 [kNm]	
N <sub>ed</sub> -3169 [kN]	N <sub>ed</sub> -2932 [kN]	
	V <sub>ed</sub> 2782 [kN]	
tensions and cracks		
M <sub>dec</sub> 1466.8 [kNm]	M <sub>rd</sub> 15653.3 [kNm]	
M <sub>cr</sub> 3431.8 [kNm]	FS 1.47	
	bending	
	V <sub>rdc</sub> 1068.4 [kN]	
	shear reinforcement	
	V <sub>Rds</sub> 3272.4 [kN]	
	V <sub>Rdmax</sub> 6315.8 [kN]	
	θ 22.0 [°]	
	section: ductile	
	a <sub>i</sub> 266.2 [cm]	
γ <sub>n</sub> -18.90 [cm]		
σ <sub>c,min</sub> -8.7 [MPa]		
σ <sub>s,min</sub> -123.8 [MPa]		
σ <sub>s,max</sub> 168.8 [MPa]		
ε <sub>sm-ε<sub>cm</sub></sub> 0.65 [‰]		
S <sub>r,max</sub> 25.2 [cm]		
W <sub>k</sub> 0.165 [mm]		

verifica EC2	
tipo di rottura	2
1 lato acciaio	
2 lato cls - acciaio snervato	
3 lato cls - acciaio elastico	
4 sez. tot. compressa	
contributo A <sub>sl</sub>	
scelta	no
angolo θ	
scelta	imposto
θ <sub>imposto</sub>	22 [°]
θ <sub>calcolato</sub>	15.6 [°]
θ <sub>inf</sub>	21.8 [°]
θ <sub>sup</sub>	45 [°]

materials			
concrete		steel	
f <sub>ck</sub>	28 [MPa]	f <sub>yk</sub>	450 [MPa]
γ <sub>c</sub>	1.5	γ <sub>s</sub>	1.15
α <sub>cc</sub>	0.85	f <sub>yd</sub>	391.3 [MPa]
f <sub>cd</sub>	15.9 [MPa]	E <sub>s</sub>	200000 [MPa]
v	0.533	ε <sub>uk</sub>	75 [‰]
ε <sub>c2</sub>	2.0 [‰]		
ε <sub>cu2</sub>	3.5 [‰]		
α <sub>e</sub>	15.0		
k <sub>t</sub>	0.4		
k <sub>1</sub>	0.8		
k <sub>2</sub>	0.5	0,55f <sub>ck</sub>	15.4 [MPa]
k <sub>3</sub>	3.4	0,75f <sub>yk</sub>	337.5 [MPa]
k <sub>4</sub>	0.425	W <sub>k,lim</sub>	0.2 [mm]
		limit values	



α <sub>cc</sub>	coeff. effetti a lungo termine
v	coeff. riduzione resistenza bielle
α <sub>e</sub>	=E <sub>s</sub> /E <sub>c</sub>
k <sub>t</sub>	0.6 azioni di breve durata
	0.4 azioni di lunga durata
k <sub>1</sub>	0.8 barre aderenza migliorata
	1.6 barre lisce
k <sub>2</sub>	0.5 flessione
	(ε <sub>1</sub> +ε <sub>2</sub> )/2ε <sub>1</sub> trazione eccentrica
	1 trazione pura
k <sub>3</sub>	3.4 o da Annesso Nazionale
k <sub>4</sub>	0.425 o da Annesso Nazionale
σ	>0 se di trazione
a <sub>i</sub>	traslazione armatura longitudinale

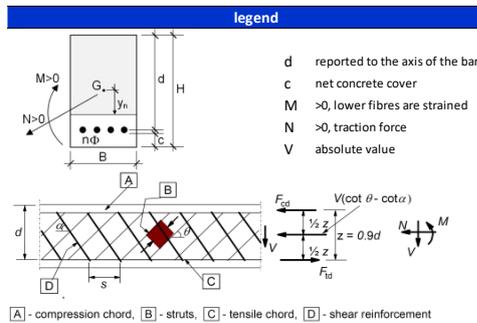
Tabella 10-14 Verifica strutturale calotta – sezione di incastro

geometry					
transversal section					
B	H	c	d	z	
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
100	305	4.0	295.0	265.5	
longitudinal reinforcement					
nbarre	φ	d	Asl		
	[mm]	[cm]	[cm <sup>2</sup> ]		
10	30	5.0	70.69		
10	30	290.0	70.69		
10	30	300.0	70.69		
shear reinforcement					
narms	φ	s	α	Asw	
	[mm]	[cm]	[°]	[cm <sup>2</sup> ]	
4	10	20	90	3.14	

stresses and results		
SLS	ULS	
M <sub>Ek</sub> <b>7795</b> [kNm]	M <sub>Ed</sub> <b>10625</b> [kNm]	
N <sub>Ek</sub> <b>-3590</b> [kN]	N <sub>Ed</sub> <b>-3622</b> [kN]	
	V <sub>Ed</sub> <b>2974</b> [kN]	
tensions and cracks		
M <sub>dec</sub> 2005.0 [kNm]	M <sub>Rd</sub> 20300.9 [kNm]	
M <sub>cr</sub> 4518.3 [kNm]	FS 1.91	
	bending	
γ <sub>n</sub> -12.79 [cm]	V <sub>Rd</sub> 1298.6 [kN]	
σ <sub>c,min</sub> -6.4 [MPa]	shear reinforcement	
σ <sub>s,min</sub> -91.9 [MPa]	V <sub>Rds</sub> 4039.1 [kN]	
σ <sub>s,max</sub> 109.3 [MPa]	V <sub>Rdmax</sub> 7795.7 [kN]	
	θ 22.0 [°]	
ε <sub>sm-ε<sub>cm</sub></sub> 0.37 [‰]	section: ductile	
S <sub>r,max</sub> 20.9 [cm]	a <sub>l</sub> 328.6 [cm]	
W <sub>k</sub> 0.077 [mm]		

verifica EC2	
tipo di rottura	2
1 lato acciaio	
2 lato cls - acciaio snervato	
3 lato cls - acciaio elastico	
4 sez. tot. compressa	
contributo Asl	
scelta	no
angolo θ	
scelta	imposto
θ <sub>imposto</sub>	22 [°]
θ <sub>calcolato</sub>	15.6 [°]
θ <sub>inf</sub>	21.8 [°]
θ <sub>sup</sub>	45 [°]

materials			
concrete		steel	
f <sub>ck</sub>	28 [MPa]	f <sub>yk</sub>	450 [MPa]
γ <sub>c</sub>	1.5	γ <sub>s</sub>	1.15
α <sub>cc</sub>	0.85	f <sub>yd</sub>	391.3 [MPa]
f <sub>ed</sub>	15.9 [MPa]	E <sub>s</sub>	200000 [MPa]
v	0.533	ε <sub>uk</sub>	75 [‰]
ε <sub>c2</sub>	2.0 [‰]		
ε <sub>cu2</sub>	3.5 [‰]		
α <sub>e</sub>	15.0		
k <sub>t</sub>	0.4		
k <sub>1</sub>	0.8		
k <sub>2</sub>	0.5		
k <sub>3</sub>	3.4		
k <sub>4</sub>	0.425		
		limit values	
		0,55f <sub>ck</sub>	15.4 [MPa]
		0,75f <sub>yk</sub>	337.5 [MPa]
		W <sub>k,lim</sub>	0.2 [mm]



α <sub>cc</sub>	coeff. effetti a lungo termine
v	coeff. riduzione resistenza bielle
α <sub>e</sub>	=E <sub>s</sub> /E <sub>c</sub>
k <sub>t</sub>	0.6 azioni di breve durata
	0.4 azioni di lunga durata
k <sub>1</sub>	0.8 barre aderenza migliorata
	1.6 barre lisce
k <sub>2</sub>	0.5 flessione
(ε <sub>1</sub> +ε <sub>2</sub> )/2ε <sub>1</sub>	trazione eccentrica
	1 trazione pura
k <sub>3</sub>	3.4 o da Annesso Nazionale
k <sub>4</sub>	0.425 o da Annesso Nazionale
σ	>0 se di trazione
a <sub>l</sub>	traslazione armatura longitudinale

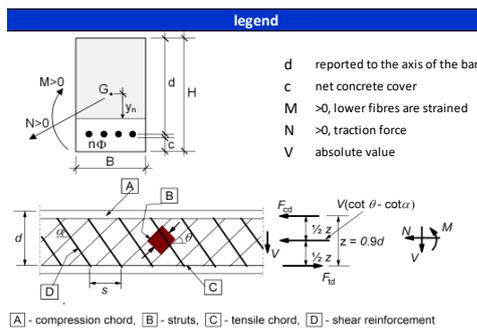
**Tabella 10-15 Verifica strutturale sezione piedritto – sezione di incastro**

geometry					
transversal section					
B	H	c	d	z	
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
100	180	4.0	170.0	153.0	
longitudinal reinforcement					
nbarre	φ	d	Asl		
	[mm]	[cm]	[cm <sup>2</sup> ]		
10	30	5.0	70.69		
15	30	165.0	106.03		
15	30	175.0	106.03		
shear reinforcement					
narms	φ	s	α	Asw	
	[mm]	[cm]	[°]	[cm <sup>2</sup> ]	
4	10	10	90	3.14	

stresses and results		
SLS	ULS	
M <sub>Ek</sub> <b>7115</b> [kNm]	M <sub>Ed</sub> <b>10044</b> [kNm]	
N <sub>Ek</sub> <b>-3221</b> [kN]	N <sub>Ed</sub> <b>-4043</b> [kN]	
	V <sub>Ed</sub> <b>4405</b> [kN]	
tensions and cracks		
M <sub>dec</sub> 1078.2 [kNm]	M <sub>Rd</sub> 14616.1 [kNm]	
M <sub>cr</sub> 2386.7 [kNm]	FS 1.46	
	bending	
γ <sub>n</sub> -0.29 [cm]	V <sub>Rd</sub> 1062.8 [kN]	
σ <sub>c,min</sub> -12.2 [MPa]	shear reinforcement	
σ <sub>s,min</sub> -172.8 [MPa]	V <sub>Rds</sub> 4655.3 [kN]	
σ <sub>s,max</sub> 174.0 [MPa]	V <sub>Rdmax</sub> 4492.4 [kN]	
ε <sub>sm-ε<sub>cm</sub></sub> 0.72 [‰]	θ 22.0 [°]	
S <sub>r,max</sub> 17.9 [cm]	section: ductile	
W <sub>k</sub> 0.129 [mm]	a <sub>l</sub> 189.3 [cm]	

verifica EC2	
tipo di rottura	2
1 lato acciaio	
2 lato cls - acciaio snervato	
3 lato cls - acciaio elastico	
4 sez. tot. compressa	
contributo Asl	
scelta	no
angolo θ	
scelta	imposto
θ <sub>imposto</sub>	22 [°]
θ <sub>calcolato</sub>	22.4 [°]
θ <sub>inf</sub>	21.8 [°]
θ <sub>sup</sub>	45 [°]

materials			
concrete		steel	
f <sub>ck</sub>	28 [MPa]	f <sub>yk</sub>	450 [MPa]
γ <sub>c</sub>	1.5	γ <sub>s</sub>	1.15
α <sub>cc</sub>	0.85	f <sub>yd</sub>	391.3 [MPa]
f <sub>ed</sub>	15.9 [MPa]	E <sub>s</sub>	200000 [MPa]
v	0.533	ε <sub>uk</sub>	75 [‰]
ε <sub>c2</sub>	2.0 [‰]		
ε <sub>cu2</sub>	3.5 [‰]		
α <sub>e</sub>	15.0		
k <sub>t</sub>	0.4		
k <sub>1</sub>	0.8		
k <sub>2</sub>	0.5		
k <sub>3</sub>	3.4		
k <sub>4</sub>	0.425		
		limit values	
		0,55f <sub>ck</sub>	15.4 [MPa]
		0,75f <sub>yk</sub>	337.5 [MPa]
		W <sub>k,lim</sub>	0.2 [mm]



α <sub>cc</sub>	coeff. effetti a lungo termine
v	coeff. riduzione resistenza bielle
α <sub>e</sub>	=E <sub>s</sub> /E <sub>c</sub>
k <sub>t</sub>	0.6 azioni di breve durata
	0.4 azioni di lunga durata
k <sub>1</sub>	0.8 barre aderenza migliorata
	1.6 barre lisce
k <sub>2</sub>	0.5 flessione
(ε <sub>1</sub> +ε <sub>2</sub> )/2ε <sub>1</sub>	trazione eccentrica
	1 trazione pura
k <sub>3</sub>	3.4 o da Annesso Nazionale
k <sub>4</sub>	0.425 o da Annesso Nazionale
σ	>0 se di trazione
a <sub>l</sub>	traslazione armatura longitudinale

**Tabella 10-16: Verifica strutturale arco rovescio – sezione di incastro**

geometry				
transversal section				
B	H	c	d	z
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
100	180	4.0	175.0	157.5
longitudinal reinforcement				
nbarre	$\phi$	d	Asl	
[mm]	[cm]	[cm <sup>2</sup> ]		
10	30	5.0	70.69	
10	30	170.0	70.69	
10	30	175.0	70.69	
shear reinforcement				
n <sub>arms</sub>	$\phi$	s	$\alpha$	Asw
[mm]	[mm]	[cm]	[°]	[cm <sup>2</sup> ]
4	10	40	90	3.14

stresses and results		
SLS	ULS	
M <sub>Ed</sub> -2536 [kNm]	M <sub>Ed</sub> -3248 [kNm]	
N <sub>Ed</sub> -3383 [kN]	N <sub>Ed</sub> -4104 [kN]	
V <sub>Ed</sub> 583 [kN]	V <sub>Ed</sub> 583 [kN]	
tensions and cracks		
M <sub>dec</sub> -1313.7 [kNm]	M <sub>Rd</sub> -8033.5 [kNm]	
M <sub>cr</sub> -2341.6 [kNm]	FS 2.47	
$\gamma_n$ -19.30 [cm]	shear	
$\sigma_{c,min}$ -5.0 [MPa]	V <sub>Rdc</sub> 1100.1 [kN]	
$\sigma_{s,min}$ -71.2 [MPa]	no shear reinforcement	
$\sigma_{s,max}$ 44.8 [MPa]	V <sub>Rds</sub> 1198.1 [kN]	
$\epsilon_{sm}-\epsilon_{cm}$ 0.13 [%]	V <sub>Rdmax</sub> 4624.6 [kN]	
S <sub>r,max</sub> 20.9 [cm]	$\theta$ 22.0 [°]	
w <sub>k</sub> 0.028 [mm]	section: ductile	
	a <sub>l</sub> 175.0 [cm]	

verifica EC2	
tipo di rottura	2
1 lato acciaio	
2 lato cls - acciaio snervato	
3 lato cls - acciaio elastico	
4 sez. tot. compressa	
contributo Asl	
scelta	no
angolo $\theta$	
scelta	imposto
$\theta_{imposto}$	22 [°]
$\theta_{calcolato}$	11.0 [°]
$\theta_{inf}$	21.8 [°]
$\theta_{sup}$	45 [°]

materials	
concrete	steel
f <sub>ck</sub> 28 [MPa]	f <sub>yk</sub> 450 [MPa]
$\gamma_c$ 1.5	$\gamma_s$ 1.15
$\alpha_{cc}$ 0.85	f <sub>yd</sub> 391.3 [MPa]
f <sub>cd</sub> 15.9 [MPa]	E <sub>s</sub> 200000 [MPa]
$\nu$ 0.533	$\epsilon_{uk}$ 75 [%]
$\epsilon_{c2}$ 2.0 [%]	
$\epsilon_{cu2}$ 3.5 [%]	
$\alpha_e$ 15.0	
k <sub>t</sub> 0.4	
k <sub>1</sub> 0.8	
k <sub>2</sub> 0.5	limit values
k <sub>3</sub> 3.4	0,55f <sub>ck</sub> 15.4 [MPa]
k <sub>4</sub> 0.425	0,75f <sub>yk</sub> 337.5 [MPa]
	w <sub>k,lim</sub> 0.2 [mm]

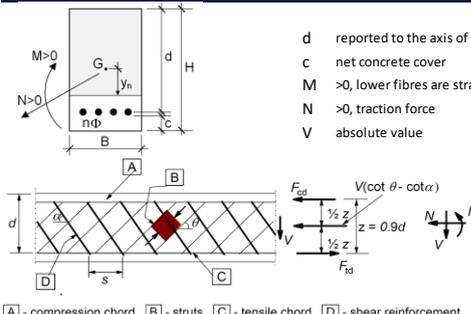
legend	
	d reported to the axis of the bar
	c net concrete cover
	M >0, lower fibres are strained
	N >0, traction force
	V absolute value
	$\alpha_{cc}$ coeff. effetti a lungo termine
	$\nu$ coeff. riduzione resistenza bielle
	$\alpha_e = E_s/E_c$
	k <sub>t</sub> 0.6 azioni di breve durata
	0.4 azioni di lunga durata
	k <sub>1</sub> 0.8 barre aderenza migliorata
	1.6 barre lisce
	k <sub>2</sub> 0.5 flessione
	$(\epsilon_1 + \epsilon_2)/2 \epsilon_1$ trazione eccentrica
	1 trazione pura
	k <sub>3</sub> 3.4 o da Annesso Nazionale
	k <sub>4</sub> 0.425 o da Annesso Nazionale
	$\sigma$ >0 se di trazione
	a <sub>l</sub> traslazione armatura longitudinale

Tabella 10-17 Verifica strutturale arco rovescio – sezione in mezzaria

## 11 INCIDENZE ARMATURE

I valori di incidenza medi previsti per le due sezioni di calcolo sono riepilogati in Tabella 11-1.

Incidenza [kg/mc]	Sezione tipo n. 1	Sezione tipo n. 2
	altezza ricoprimento 6 m	altezza ricoprimento 11 m
Calotta	115	115
Piedritti	75	75
Arco rovescio	125	125

Tabella 11-1 Riepilogo incidenze medie di armatura [kg/mc]