

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 1 da km 85+585 a km 85+647  
Relazione di calcolo strutture

SCALA:

-

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

I V 0 I 0 0 D 2 6 C L G A 1 2 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 .....	7
5.1	CALCESTRUZZO.....	7
5.2	ACCIAIO DA CEMENTO ARMATO .....	7
6	CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICO – GEOTECNICA.....	8
7	CARATTERIZZAZIONE SISMICA.....	9
8	DESCRIZIONE DELLE OPERE.....	11
9	APPROCCIO PROGETTUALE .....	11
10	GALLERIA ARTIFICIALE (SEZIONE CORRENTE) .....	11
10.1	DESCRIZIONE DEL MODELLO .....	11
10.2	ANALISI DEI CARICHI.....	13
10.2.1	<i>Peso proprio</i> .....	13
10.2.2	<i>Spinta terreno</i> .....	13
10.2.3	<i>Carico variabile da traffico ferroviario</i> .....	13
10.2.4	<i>Sovraccarico variabile</i> .....	13
10.2.5	<i>Azione sismica</i> .....	13
10.3	STATI LIMITE CONSIDERATI .....	14
10.3.1	<i>Stati limiti ultimi</i> .....	14
10.3.2	<i>Stati limiti di esercizio</i> .....	15
10.4	COMBINAZIONI DI CALCOLO .....	16
10.5	RISULTATI DEL MODELLO DI CALCOLO .....	17
10.6	VERIFICHE STRUTTURALI.....	20



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 1 DA KM 85+583 A  
KM 85+645 -RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 26 CL	GA 12 00 001	A	3 di 23

11 INCIDENZA ARMATURE .....23



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 1 DA KM 85+583 A  
KM 85+645 -RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 26 CL	GA 12 00 001	A	4 di 23

## 1 PREMESSA

La WBS GA12 in oggetto tratta la Galleria Artificiale denominata Bastia 1, compresa tra le progressive 85+585 (imbocco lato Genova) e 85+647 (imbocco lato Ventimiglia) per una lunghezza complessiva di 62 m.

Sono inoltre presenti opere di imbocco di lunghezza pari a 7.50 m e 8.90 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.

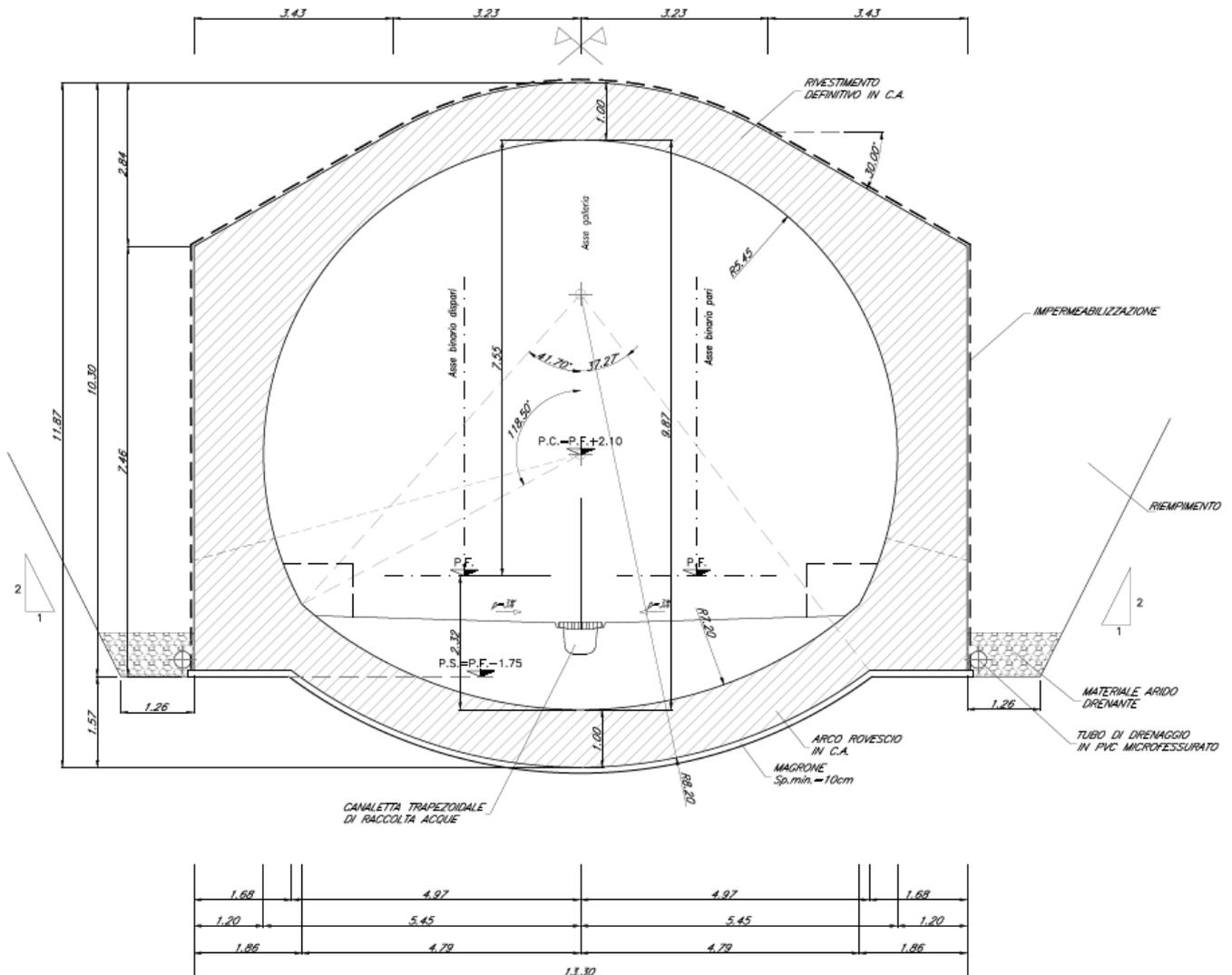


Figura 2-1 Sezione trasversale corrente della galleria

### 3 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

#### 3.1 Documenti Referenziati

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

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

- I. Planimetria generale dell'intervento e prospetto (IV0I00D26P9GA1200001A)



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 1 DA KM 85+583 A  
KM 85+645 -RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 26 CL	GA 12 00 001	A	6 di 23

- II. Pianta scavi e prospetto (IV0I00D26P9GA1200002A)
- III. Sezione longitudinale (IV0I00D26BBGA1200002A)
- IV. Sezioni trasversali (IV0I00D26BBGA1200001A)
- V. Fasi realizzative (IV0I00D26BBGA1200003A)
- VI. Carpenteria galleria (IV0I00D26Z9GA1200001A)
- VII. Particolari, dettagli e finiture (IV0I00D26BZGA1200001A)

### 3.2 Documenti Correlati

I documenti di calcolo correlati alla presente sono:

Rif. [1] Relazione Geotecnica galleria Bastia 1 (IV0I00D26RBGA1200001A)

Rif. [2] Profilo Descrittiva (IV0I00D26RGGA1200001A)

## 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.



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 1 DA KM 85+583 A  
KM 85+645 -RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 26 CL	GA 12 00 001	A	7 di 23

## 5 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

### 5.1 Calcestruzzo

#### 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 imbocchi

Classe di esposizione ambientale XC4

Classe di resistenza caratteristica a compressione C32/40

Classe di resistenza allo scarico S4

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

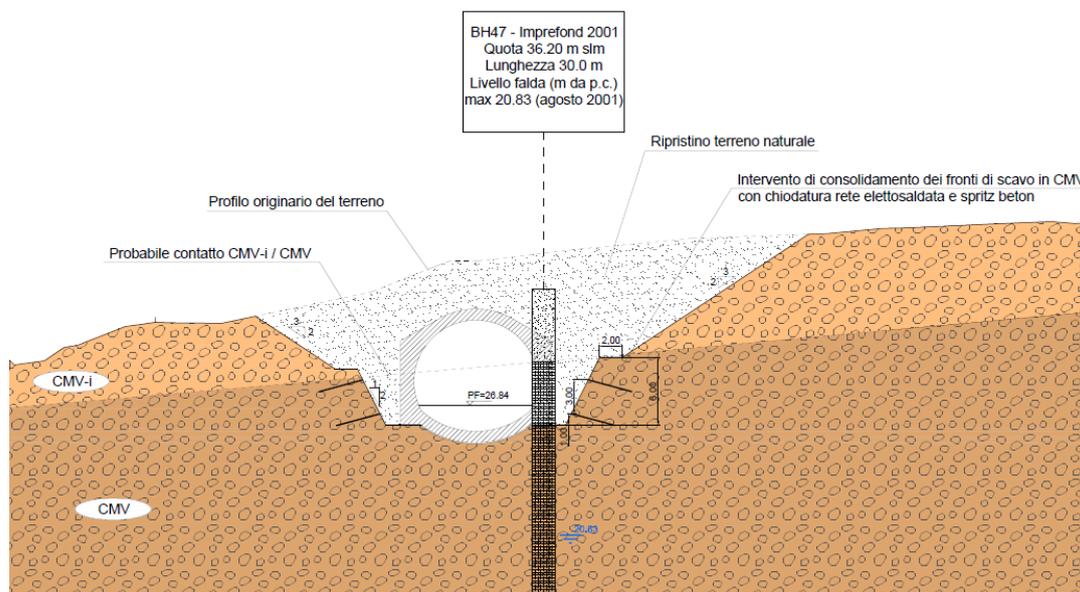
## 6 CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICO – GEOTECNICA

Di seguito si indicano i principali parametri geotecnici dei terreni adottati nelle verifiche.

La galleria Bastia 1 interessa principalmente la formazione incoerente dei conglomerati di Monte Villa (CMV-i), costituita da sabbia e ghiaia in matrice limosa argillosa, e la formazione dei conglomerati di Monte Villa (CMV).

La seguente figura illustra la sezione geologico-geotecnica ricostruita alla prog. 85+600.

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



**Figura 6-1 Sezione geologica-geotecnica alla prog. 85+600**

Si specifica che si ritiene necessario effettuare, nelle successive fasi di progettazione, ulteriori indagini integrative che confermino 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 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>	19.00	0	35	30

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



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 1 DA KM 85+583 A KM 85+645 -RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 26 CL	GA 12 00 001	A	9 di 23

## 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 relazione (DM 14/01/2018):

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

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 1 DA KM 85+583 A KM 85+645 -RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURE	COMMESSA <b>IV01</b>	LOTTO 00	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO GA 12 00 001	REV. A	FOGLIO 11 di 23

## 8 DESCRIZIONE DELLE OPERE

La sezione corrente della galleria è di tipo policentrico con raggio interno della calotta superiore e delle pareti di 5.45m e raggio interno della calotta inferiore di 7.20m. Lo spessore della calotta inferiore è costante pari a 1m, quello della calotta superiore è variabile con un minimo di 1m in chiave fino ad un massimo di 2.12m all'intersezione con i piedritti.

Ad opera finita, la galleria ha un'altezza interna netta massima pari a 9.87m costante in mezzeria, ed una distanza tra P.F. e intradosso calotta superiore pari a 7.55m costante sempre in mezzeria.

La condizione di massimo ricoprimento la si ha circa a metà dello sviluppo della galleria dove, a sistemazione ultimata, si avrà un rinterro di massimo di circa 4.70m al disopra della calotta.

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;
- Consolidamento scarpate;
- Realizzazione galleria;
- Realizzazione opere di finitura e ripristino del profilo terreno preesistente

## 9 APPROCCIO PROGETTUALE

Le verifiche strutturali eseguite per il dimensionamento della galleria Bastia 1 sono state svolte in accordo alle NTC2018.

## 10 GALLERIA ARTIFICIALE (SEZIONE CORRENTE)

### 10.1 Descrizione del modello

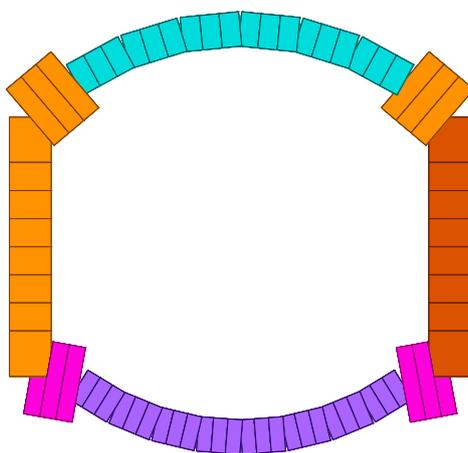
Il presente paragrafo illustra i modelli di calcolo e le verifiche svolte per il dimensionamento strutturale della galleria artificiale Bastia 1.

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.

	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 1 DA KM 85+583 A KM 85+645 -RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURE	COMMESSA <b>IV01</b>	LOTTO 00	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO GA 12 00 001	REV. A

La seguente figura illustra il modello di calcolo implementato.



**Figura 10-1 Modello di calcolo galleria Bastia 1**

Nei modelli di calcolo, la rigidità delle molle è stata definita facendo ricorso ai contributi di Terzaghi e Peck (1948). In particolare, per una fondazione di larghezza B, la rigidità 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 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<sup>3</sup>] per terreni coesivi (Viggiani, 1999)**

	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 1 DA KM 85+583 A KM 85+645 -RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURE	COMMESSA <b>IV01</b>	LOTTO 00	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO GA 12 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 kN/mc.

### 10.2.2 Spinta terreno

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

### 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 57 kPa.

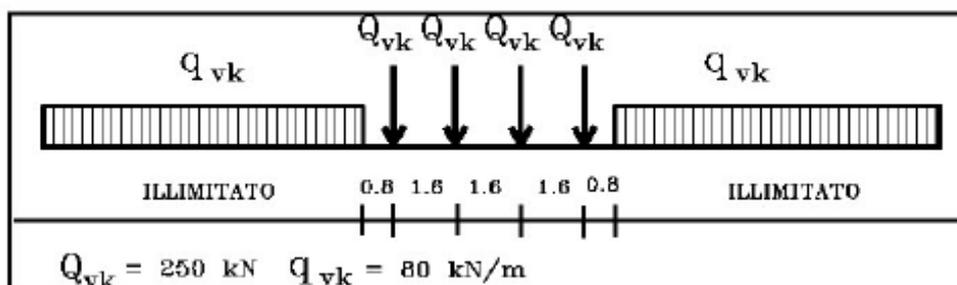


Figura 10-2: Modello di carico ferroviario LM71

### 10.2.4 Sovraccarico variabile

È stato previsto un sovraccarico variabile pari a 20 kPa agente in corrispondenza della calotta e a tergo dei piedritti.

### 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.

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



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 1 DA KM 85+583 A KM 85+645 -RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 26 CL	GA 12 00 001	A	14 di 23

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

$$k_v = \pm 0.5 k_h$$

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 sono quelle dovute al ricoprimento, oltre a quelle prodotte dall'impalcato e da piedritti della galleria, 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:

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

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

$$\gamma_{Q1} = 1.45 \text{ se } A1+M1; 0 \text{ se favorevole}$$



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 1 DA KM 85+583 A KM 85+645 -RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 26 CL	GA 12 00 001	A	15 di 23

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

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 – NTC2018**

(\*) 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:  $w_d \leq 0.2 \text{ mm}$

## 10.4 Combinazioni di calcolo

Per le verifiche degli stati limite, sono stati considerati le seguenti combinazioni di carichi, come illustrato al punto 2.5.3 delle 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 10-3 Combinazioni di verifica – NTC 2018**

La seguente tabella riepiloga le combinazioni di carico implementate nel modello di calcolo.

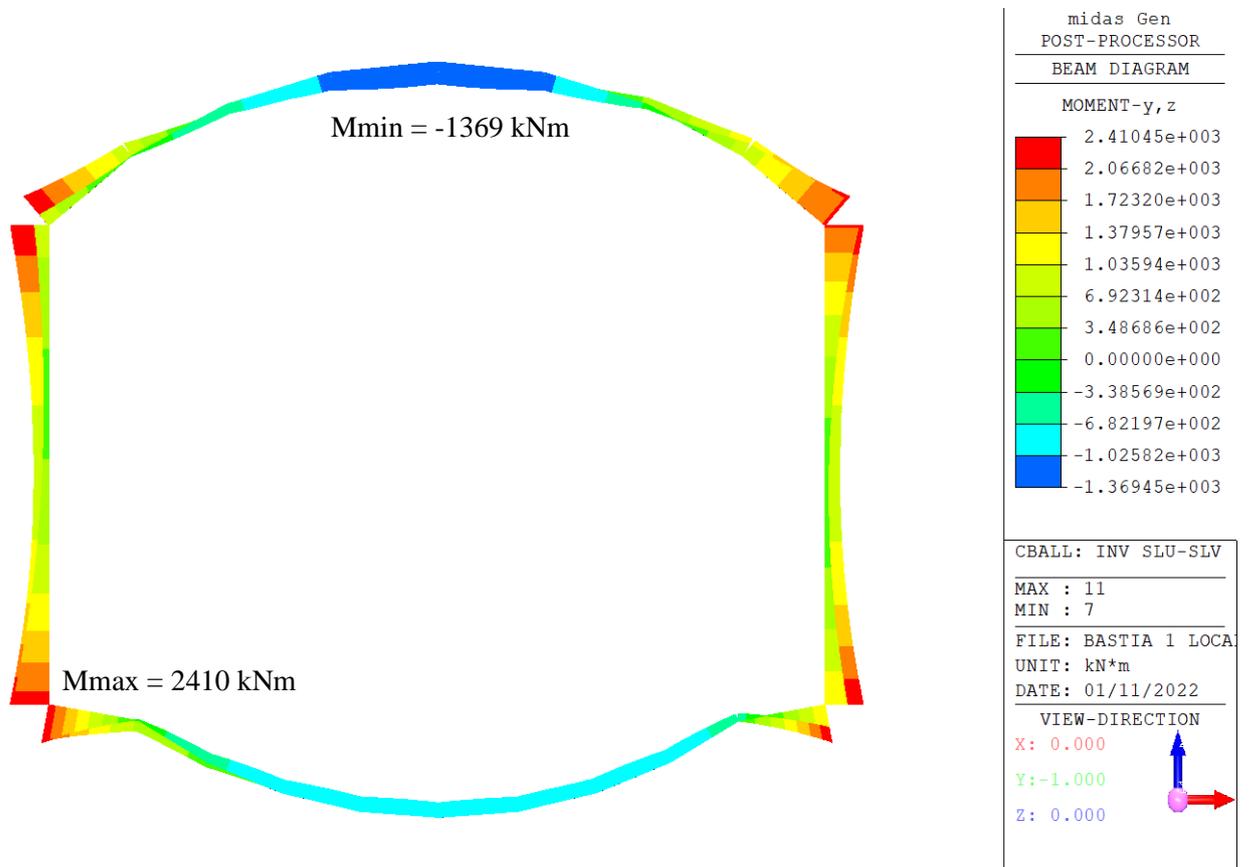
	SLU T-CV	SLU CV-T	SLV	SLER T-CV	SLER CV-T	SLEF T-CV	SLEF CV-T	SLE QP
Peso proprio	1.35	1.35	1	1	1	1	1	1
Carico reinterro	1.5	1.5	1	1	1	1	1	1
Ballast + Riempimento	1.5	1.5	1	1	1	1	1	1
Spinta terreno	1.35	1.35	1	1	1	1	1	1
Carico Variabile	1.05	1.5	0.6	0.7	1	0.6	0.7	0.6
Treno	1.45	1.16	0.2	1	0.8	0.6	0	0
Azio. Sism. Inerziale	0	0	1	0	0	0	0	0
Incr. spinta sismica	0	0	1	0	0	0	0	0

**Tabella 10-3 Combinazioni di carico implementate nel modello di calcolo (nelle colonne l'indicazione T indica il carico variabile dovuto al traffico ferroviario, la sigla CV indica il carico variabile di 20 kPa)**

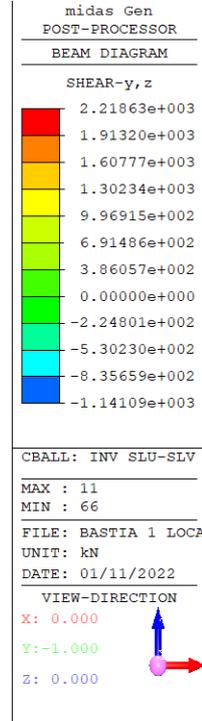
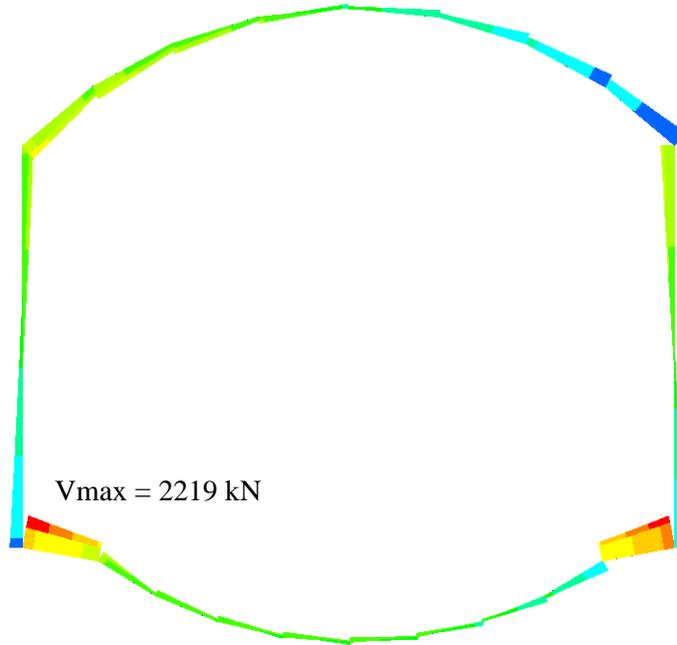
## 10.5 Risultati del modello di calcolo

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 salvaguardia della vita (SLV). Si riporta inoltre l'involucro di momento flettente allo stato limite di esercizio (SLE).

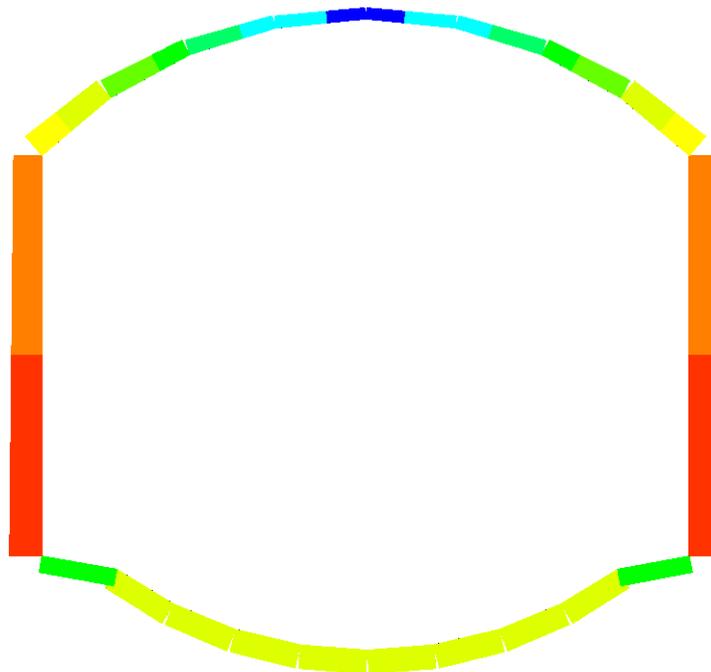
A seguire sono riepilogati i risultati del modello numerico e le verifiche strutturali eseguite.



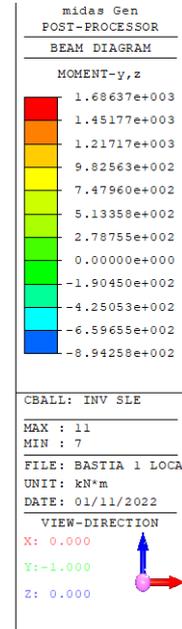
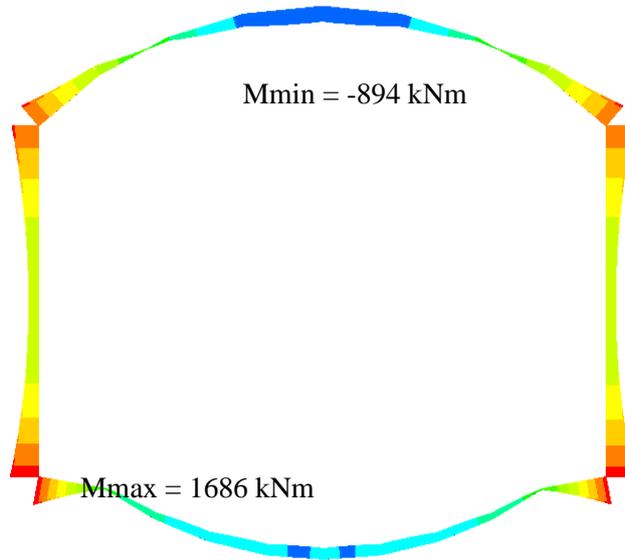
**Figura 10-4 Involucro SLU-SLV – Momento flettente**



**Figura 10-5 Inviluppo SLU-SLV – Taglio**



**Figura 10-6 Inviluppo SLU-SLV – Azione assiale**



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

Nella seguente tabella sono riepilogati i valori di sollecitazione nelle diverse sezioni di verifica.

Sezione	Momento SLU-SLV [kN*m]	Taglio SLU-SLV [kN]	Azione assiale SLU-SLV [kN]	Momento. SLE [kNm]	Azione assiale SLE [kN]
Arco rovescio - Mezzeria	-952	155	1780	-588	1142
Arco rovescio - Incastro	2410	2219	1120	1686	836
Piedritto - Incastro	2410	871	1360	1686	1450
Calotta - Mezzeria	-1369	-	744	-894	555
Calotta – Incastro	2386	1141	-1790	1583	-1225

**Tabella 10-4 Sollecitazioni ottenute dal modello di calcolo**

## 10.6 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: 35.3	Ganci Ø10/25x40 cm
Calotta - Incastro	Lembo compresso: 70.7 Lembo teso: 35.3	Ganci Ø10/25x20 cm
Piedritto – Incastro	Lembo compresso: 70.7 Lembo teso: 70.7	Ganci Ø10/25x40 cm
Arco rovescio – Mezzeria	Lembo compresso: 35.3 Lembo teso: 35.3	Ganci Ø10/25x40 cm
Arco rovescio – Incastro	Lembo compresso: 70.7 Lembo teso: 70.7	Ganci Ø10/25x10 cm

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

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

geometry					
transversal section					
B	H	c	d	z	
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
100	100	4.0	95.0	85.5	
longitudinal reinforcement					
nbarre	φ	d	Asl		
	[mm]	[cm]	[cm <sup>2</sup> ]		
5	30	5.0	35.34		
5	30	95.0	35.34		
shear reinforcement					
narms	φ	s	α	Asw	
	[mm]	[cm]	[°]	[cm <sup>2</sup> ]	
4	10	40	90	3.14	

stresses and results			
SLS		ULS	
MEk	-588 [kNm]	MEd	-952 [kNm]
NEk	-1142 [kN]	NEd	-1780 [kN]
		VEd	155 [kN]
tensions and cracks			
Mdec	-214.8 [kNm]	MRd	-2026.3 [kNm]
Mcr	-546.6 [kNm]	FS	2.13
yn	0.66 [cm]	shear	
σ <sub>c,min</sub>	-4.7 [MPa]	VRdc	563.7 [kN]
σ <sub>s,min</sub>	-62.8 [MPa]		no shear reinforcement
σ <sub>s,max</sub>	64.6 [MPa]	VRds	650.4 [kN]
ε <sub>sm-ε<sub>cm</sub></sub>	0.19 [‰]	VRdmax	2510.5 [kN]
Sr,max	29.9 [cm]	θ	22.0 [°]
wk	0.058 [mm]	section:	ductile
		ai	95.0 [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 [‰]	limit values	
ε <sub>cu2</sub>	3.5 [‰]	0,55 f <sub>ck</sub>	15.4 [MPa]
α <sub>de</sub>	15.0	0,75 f <sub>yk</sub>	337.5 [MPa]
k <sub>t</sub>	0.4	w <sub>k,lim</sub>	0.2 [mm]
k <sub>1</sub>	0.8		
k <sub>2</sub>	0.5		
k <sub>3</sub>	3.4		
k <sub>4</sub>	0.425		

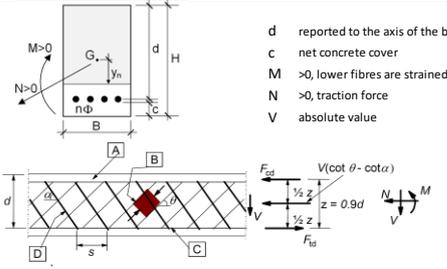
legend	
	<p>d reported to the axis of the bar</p> <p>c net concrete cover</p> <p>M &gt; 0, lower fibres are strained</p> <p>N &gt; 0, traction force</p> <p>V absolute value</p>
<p>α<sub>cc</sub> coeff. effetti a lungo termine</p> <p>v coeff. riduzione resistenza bielle</p> <p>α<sub>de</sub> = E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub></p> <p>k<sub>t</sub> 0.6 azioni di breve durata</p> <p>0.4 azioni di lunga durata</p> <p>k<sub>1</sub> 0.8 barre aderenza migliorata</p> <p>1.6 barre lisce</p> <p>k<sub>2</sub> 0.5 flessione</p> <p>(ε<sub>1</sub>+ε<sub>2</sub>)/2ε<sub>1</sub> trazione eccentrica</p> <p>1 trazione pura</p> <p>k<sub>3</sub> 3.4 o da Annesso Nazionale</p> <p>k<sub>4</sub> 0.425 o da Annesso Nazionale</p> <p>σ &gt; 0 se di trazione</p> <p>ai traslazione armatura longitudinale</p>	<p>A - compression chord, B - struts, C - tensile chord, D - shear reinforcement</p>

Tabella 10-6 Verifica strutturale arco rovescio - Mezzeria

geometry					
transversal section					
B	H	c	d	z	
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
100	100	4.0	95.0	85.5	
longitudinal reinforcement					
nbarre	φ	d	Asl		
	[mm]	[cm]	[cm <sup>2</sup> ]		
10	30	5.0	70.69		
10	30	95.0	70.69		
shear reinforcement					
narms	φ	s	α	Asw	
	[mm]	[cm]	[°]	[cm <sup>2</sup> ]	
4	10	10	90	3.14	

stresses and results			
SLS		ULS	
MEk	1686 [kNm]	MEd	2410 [kNm]
NEk	-836 [kN]	NEd	-1120 [kN]
		VEd	2219 [kN]
tensions and cracks			
Mdec	172.3 [kNm]	MRd	2996.4 [kNm]
Mcr	491.4 [kNm]	FS	1.24
yn	-14.31 [cm]	shear	
σ <sub>c,min</sub>	-9.0 [MPa]	VRdc	469.6 [kN]
σ <sub>s,min</sub>	-115.5 [MPa]		shear reinforcement
σ <sub>s,max</sub>	223.2 [MPa]	VRds	2601.5 [kN]
ε <sub>sm-ε<sub>cm</sub></sub>	0.94 [‰]	VRdmax	2510.5 [kN]
Sr,max	20.9 [cm]	θ	22.0 [°]
wk	0.196 [mm]	section:	ductile
		ai	105.8 [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>	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>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 [‰]	limit values	
ε <sub>cu2</sub>	3.5 [‰]	0,55 f <sub>ck</sub>	15.4 [MPa]
α <sub>de</sub>	15.0	0,75 f <sub>yk</sub>	337.5 [MPa]
k <sub>t</sub>	0.4	w <sub>k,lim</sub>	0.2 [mm]
k <sub>1</sub>	0.8		
k <sub>2</sub>	0.5		
k <sub>3</sub>	3.4		
k <sub>4</sub>	0.425		

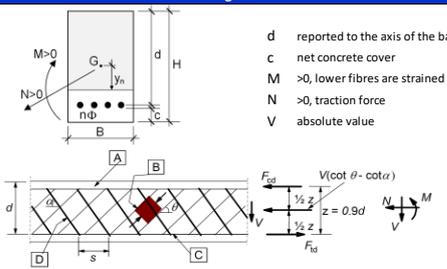
legend	
	<p>d reported to the axis of the bar</p> <p>c net concrete cover</p> <p>M &gt; 0, lower fibres are strained</p> <p>N &gt; 0, traction force</p> <p>V absolute value</p>
<p>α<sub>cc</sub> coeff. effetti a lungo termine</p> <p>v coeff. riduzione resistenza bielle</p> <p>α<sub>de</sub> = E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub></p> <p>k<sub>t</sub> 0.6 azioni di breve durata</p> <p>0.4 azioni di lunga durata</p> <p>k<sub>1</sub> 0.8 barre aderenza migliorata</p> <p>1.6 barre lisce</p> <p>k<sub>2</sub> 0.5 flessione</p> <p>(ε<sub>1</sub>+ε<sub>2</sub>)/2ε<sub>1</sub> trazione eccentrica</p> <p>1 trazione pura</p> <p>k<sub>3</sub> 3.4 o da Annesso Nazionale</p> <p>k<sub>4</sub> 0.425 o da Annesso Nazionale</p> <p>σ &gt; 0 se di trazione</p> <p>ai traslazione armatura longitudinale</p>	<p>A - compression chord, B - struts, C - tensile chord, D - shear reinforcement</p>

Tabella 10-7 Verifica strutturale arco rovescio – Incastro con i piedritti

geometry					
transversal section					
B	H	c	d	z	
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
100	219	4.0	204.0	183.6	
longitudinal reinforcement					
n <sub>barre</sub>	φ	d	A <sub>s1</sub>		
	[mm]	[cm]	[cm <sup>2</sup> ]		
10	30	5.0	70.69		
10	30	204.0	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> <b>1686</b> [kNm]	M <sub>Ed</sub> <b>2410</b> [kNm]	
N <sub>Ed</sub> <b>-1450</b> [kN]	N <sub>Ed</sub> <b>-1360</b> [kN]	
	V <sub>Ed</sub> <b>871</b> [kN]	
tensions and cracks		
M <sub>dec</sub> 598.1 [kNm]	M <sub>Rd</sub> 6923.8 [kNm]	
M <sub>cr</sub> 2160.0 [kNm]	FS 2.87	
	bending	
y <sub>n</sub> -7.05 [cm]	V <sub>Rdc</sub> 758.5 [kN]	⇒
σ <sub>c,min</sub> -2.9 [MPa]	shear reinforcement	
σ <sub>s,min</sub> -40.7 [MPa]		
σ <sub>s,max</sub> 42.4 [MPa]	V <sub>Rds</sub> 1396.6 [kN]	←
ε <sub>sm-ε<sub>cm</sub></sub> - [%]	V <sub>Rdmax</sub> 5390.9 [kN]	
S <sub>r,max</sub> - [cm]	θ 22.0 [°]	
w <sub>k</sub> - [mm]	section: ductile	
	a <sub>l</sub> 227.2 [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 A <sub>s1</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>ef</sub>	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	0,55 f <sub>ck</sub>	15.4 [MPa]
k <sub>4</sub>	0.425	0,75 f <sub>yk</sub>	337.5 [MPa]
		w <sub>k,lim</sub>	0.2 [mm]

legend	
<p>Tabella 10-8 Verifica strutturale piedritto – Sezione di incastro</p>	

geometry					
transversal section					
B	H	c	d	z	
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
100	100	4.0	95.0	85.5	
longitudinal reinforcement					
n <sub>barre</sub>	φ	d	A <sub>s1</sub>		
	[mm]	[cm]	[cm <sup>2</sup> ]		
10	30	5.0	70.69		
5	30	90.0	35.34		
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> <b>-894</b> [kNm]	M <sub>Ed</sub> <b>-1369</b> [kNm]	
N <sub>Ed</sub> <b>-555</b> [kN]	N <sub>Ed</sub> <b>-744</b> [kN]	
	V <sub>Ed</sub> [kN]	
tensions and cracks		
M <sub>dec</sub> -99.9 [kNm]	M <sub>Rd</sub> -2696.2 [kNm]	
M <sub>cr</sub> -379.4 [kNm]	FS 1.97	
	bending	
y <sub>n</sub> 9.83 [cm]	V <sub>Rdc</sub> 416.0 [kN]	⇒
σ <sub>c,min</sub> -5.8 [MPa]	no shear reinforcement	
σ <sub>s,min</sub> -65.2 [MPa]		
σ <sub>s,max</sub> 118.4 [MPa]	V <sub>Rds</sub> 650.4 [kN]	←
ε <sub>sm-ε<sub>cm</sub></sub> 0.41 [%]	V <sub>Rdmax</sub> 2510.5 [kN]	
S <sub>r,max</sub> 20.9 [cm]	θ 22.0 [°]	
w <sub>k</sub> 0.086 [mm]	section: ductile	
	a <sub>l</sub> 95.0 [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 A <sub>s1</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>ef</sub>	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	0,55 f <sub>ck</sub>	15.4 [MPa]
k <sub>4</sub>	0.425	0,75 f <sub>yk</sub>	337.5 [MPa]
		w <sub>k,lim</sub>	0.2 [mm]

legend	
<p>Tabella 10-9 Verifica strutturale calotta – Mezzeria</p>	

