



COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Città Metropolitana di Bologna

VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI CUP G27H190002300004 - CIG 8677030FA9



PONTE VIA CARLINE

(Ponte di Via Carline sullo Scolo Dosolo)



PONTE VIA ZACCARELLI

(Ponte di Via Gramsci sullo Scolo Dosolo)

PROGETTO ESECUTIVO

FINANZIATO DALL'UNIONE EUROPEA - NextGenerationEU 



Lungotevere delle Navi, 19 - 00196 - ROMA
Tel. 0636010314 - e-mail main@studiosperi.it

Ing. Giorgio Lupoi

Categoria documento

Elaborati Strutturali

Codice Elaborato

ST-RL-02

Scala

Titolo Elaborato

Relazione di verifica Ponte Via Carline
Stato di Fatto e di Progetto

Data di emissione

MAGGIO 2022



INDICE

1. PREMESSA.....	3
2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO	4
3. LIVELLO DI CONOSCENZA.....	5
4. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E DEL TERRENO	10
4.1 Caratteristiche dei materiali	10
4.2 Caratteristiche del terreno	10
4.3 Caratteristiche geofisiche.....	11
5. ANALISI DEI CARICHI E COMBINAZIONI DELLE AZIONI.....	12
5.1 Pesi propri.....	12
5.2 Spinta passiva del riempimento	12
5.3 Carichi da ponti stradali	14
5.4 Azione sismica.....	16
5.5 Condizioni di carico	20
5.6 Combinazione delle azioni	21
6. MODELLO DI CALCOLO E MODALITÀ DI VERIFICA.....	23
6.1 Modello di calcolo	23
6.2 Criteri di verifica	25
7. ANALISI STATO ATTUALE	27
7.1 Introduzione	27
7.2 Analisi statica	29
7.3 Riepilogo analisi statica	41
7.4 Analisi sismica +X	42



7.5	Analisi sismica -X	43
7.6	Riepilogo risultati analisi sismica	45
7.7	Verifica a liquefazione	46
8.	CONFRONTO CON CALCOLI MANUALI	47
9.	DEFINIZIONE DELL'INTERVENTO	48
9.1	Premessa	48
9.2	Consolidamento con cappa in calcestruzzo	51
10.	ANALISI STATO DI PROGETTO	52
10.1	Introduzione	52
10.2	Analisi statica	54
10.3	Riepilogo analisi statica	64
10.4	Analisi sismica +X	65
10.5	Analisi sismica -X	68
10.6	Riepilogo risultati analisi sismica	70
10.7	Verifica unione Ancorata Post-Installata Acciaio-Clis	72



1. PREMESSA

La relazione riporta la valutazione della sicurezza di un ponte monocampata in muratura; il ponte è ubicato a Sala Bolognese (BO), su via Carline, e scavalca il corso d'acqua Scolo Dosolo del Consorzio di Bonifica Renana.



Figura 1-1 Ponte su Via Carline (Palazzazzo)

L'analisi viene condotta applicando la metodologia di calcolo sviluppata dal Dipartimento di Costruzioni dell'Università degli Studi di Firenze, Facoltà di Architettura, fondata sugli studi di Heyman.

La capacità resistente viene identificata con il moltiplicatore di collasso dei carichi verticali λ ($\equiv \alpha_0$) applicati sul piano di transito. Un valore di λ non inferiore a 1.000 può essere identificato con un sufficiente grado di sicurezza per il transito del ponte.

Successivamente all'analisi dello stato attuale saranno valutati eventuali interventi di miglioramento o adeguamento.



2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- **D.M. 17.1.2018:** "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", Supplemento ordinario alla "Gazzetta Ufficiale", n.42 del 20 febbraio 2018
- **Circolare 21.1.2019, n. 7 C.S.LL.PP.:** Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018
- **Edifici monumentali: Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 9.2.2011:** "Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008", di cui costituisce parte integrante la **Circ. 26 del 2.12.2010 del Ministero per i Beni e le Attività Culturali:** "Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale"
- **Ponti in muratura: CNR-DT 213/2015:** "Istruzioni per la Valutazione della Sicurezza Strutturale di Ponti Stradali in Muratura"
- **Normativa RFI, Rete Ferroviaria Italiana:**
 - RFI DTC INC PO SP IFS 001A. Specifica per la progettazione e l'esecuzione dei ponti ferroviari e di altre opere minori ferroviarie sotto binario
 - RFI DTC INC CS SP IFS 001 A, Specifica per la progettazione geotecnica delle opere civili ferroviarie
 - RFI DIN ICI LG IFS 001 A, Linea Guida per la verifica strutturale dei ponti ad arco in muratura



3. LIVELLO DI CONOSCENZA

E' stata svolta una campagna di indagini e di rilievo volta a determinare i parametri relativi al terreno circostante e le caratteristiche geometriche e meccaniche delle strutture murarie.

Per dettagli si rimanda agli elaborati di riferimento.

Si tratta di un arco ellittico, a spessore costante.

I dati geometrici sono i seguenti:

- Freccia = 250 cm
- Corda = 490 cm
- Spessore all'imposta = 40 cm
- Spessore in chiave = 40 cm

In chiave, il riempimento sopra l'estradosso si considera pari a 25 cm.

La profondità dell'arco nella direzione ortogonale al piano di sezione è pari a 675 cm.

È stato riscontrato un degrado diffuso sugli elementi strutturali (volta e spalle) legato a presenza di umidità, efflorescenze e disgregazione di alcuni conci costituenti la muratura. Seguendo §6.5.4 della CNR-DT 213, si ritiene che il tipo di degrado sia rappresentabile con T3 - Q3, da cui si ricava un livello di degrado significativo D3 cui corrisponde $\gamma_D=1.20$, coefficiente di degrado da applicare, come fattore di riduzione, alle resistenze del materiale murario sia della volta sia delle spalle.

Sulla base delle informazioni acquisite sulla geometria e sui dettagli costruttivi nonché sulle proprietà dei materiali, è stato acquisito il **livello di conoscenza LC2**, con corrispondente fattore di confidenza di riferimento $FC=1.20$. Il valore di progetto del fattore di confidenza per ognuno degli elementi strutturali costitutivi del ponte verrà determinato, come nel seguito evidenziato, considerando la conformità delle dimensioni alla regola dell'arte secondo quanto indicato nella CNR-DT 213.



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

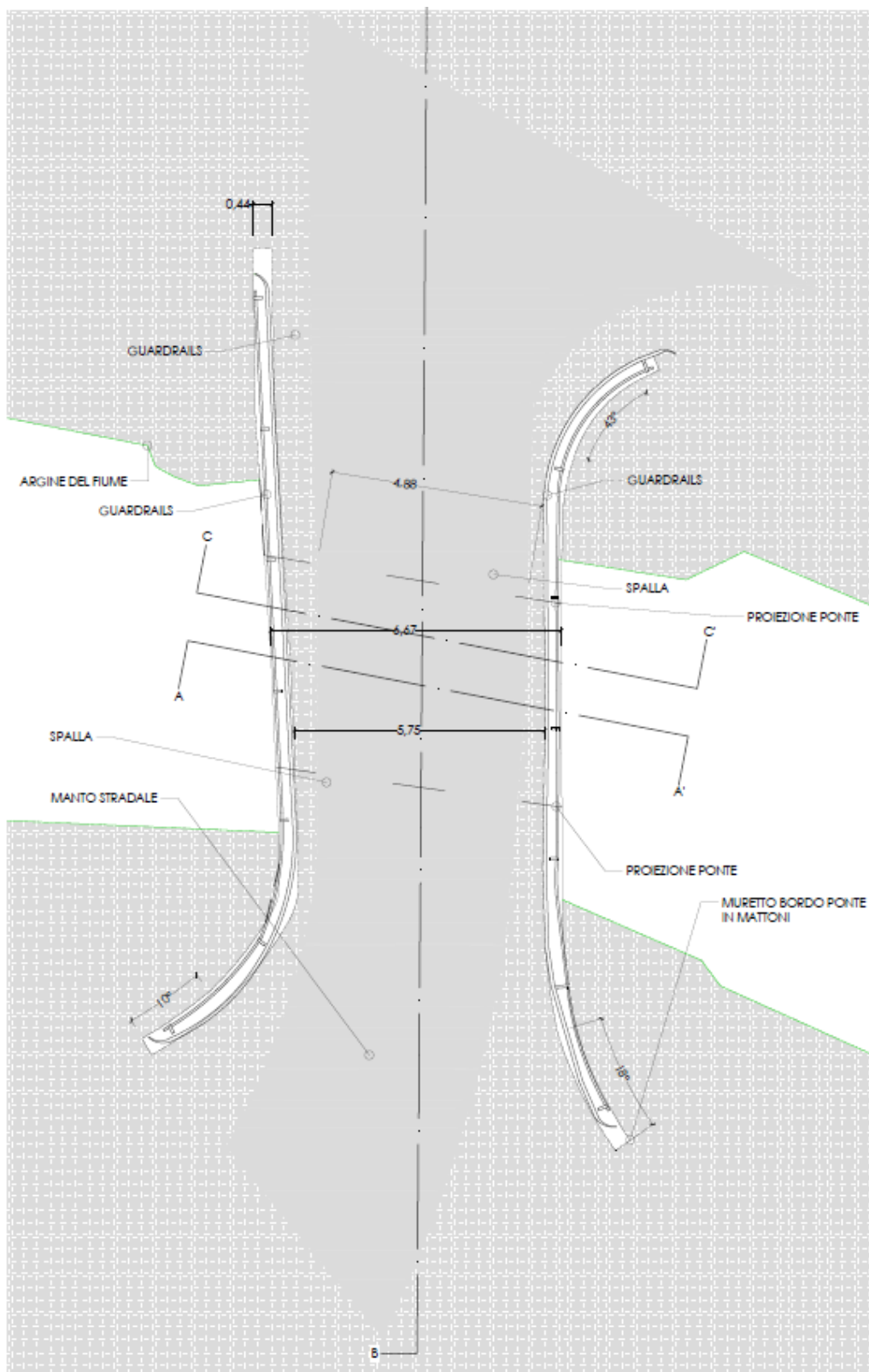


Figura 3-1 Pianta



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto



Figura 3-2 Arco: vista frontale



Figura 3-3 Vista ponte arco

SEZIONE A-A'
SCALA 1:100

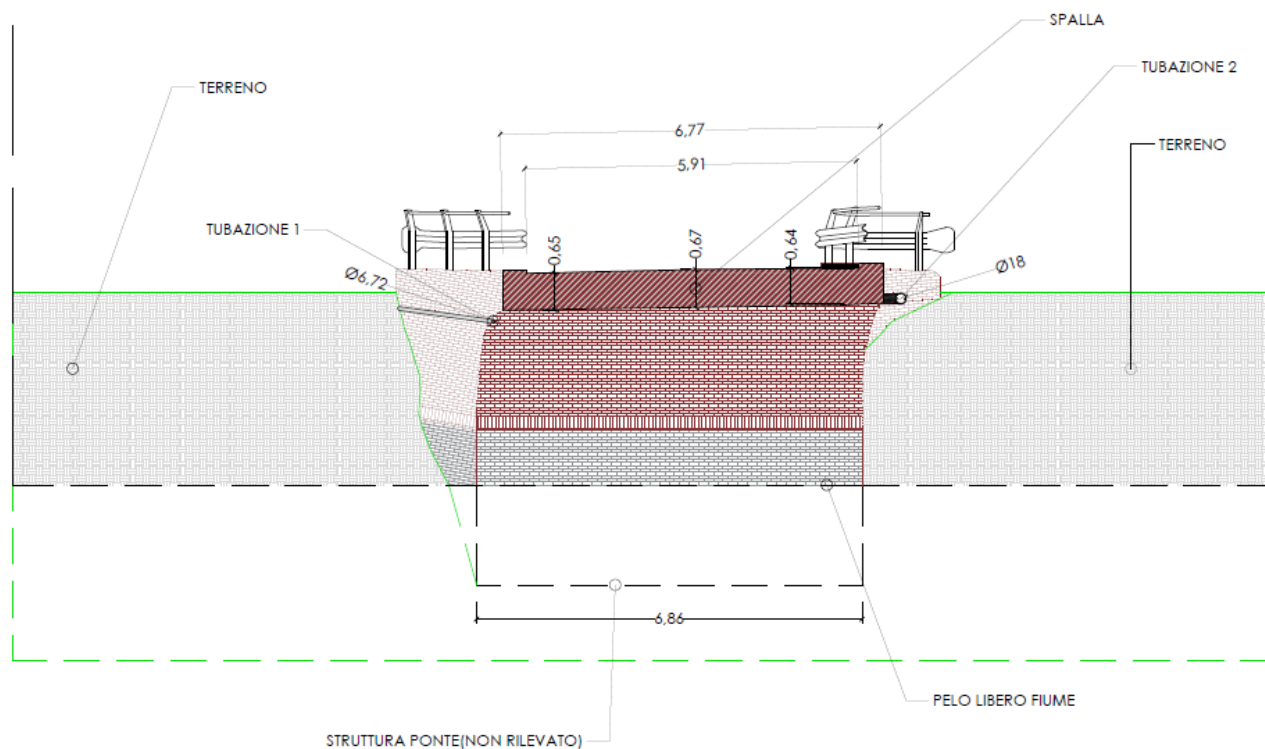


Figura 3-4 Sezione A-A'



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

SEZIONE B-B'
SCALA 1:100

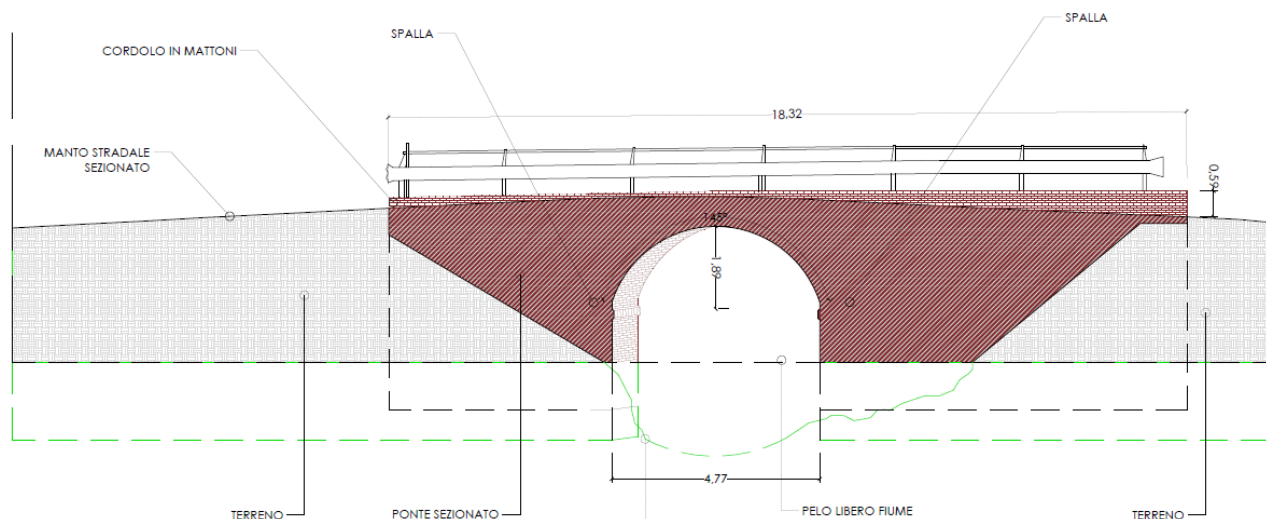


Figura 3-5 Sezione B-B'

SEZIONE C-C'
SCALA 1:100

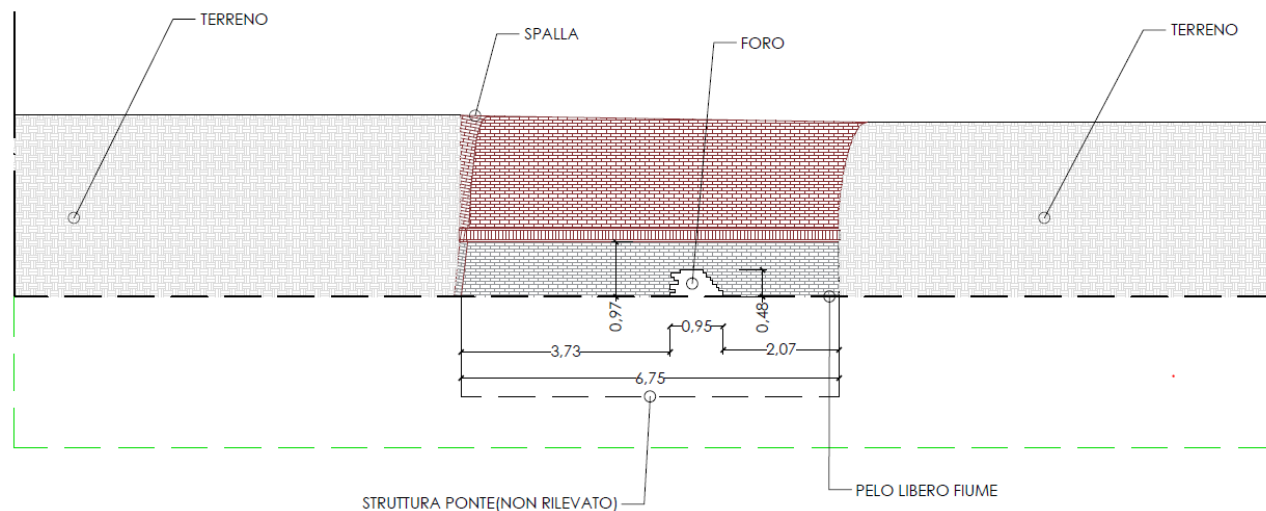


Figura 3-6 Sezione C-C'



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

PROSPETTO 1
SCALA 1:100

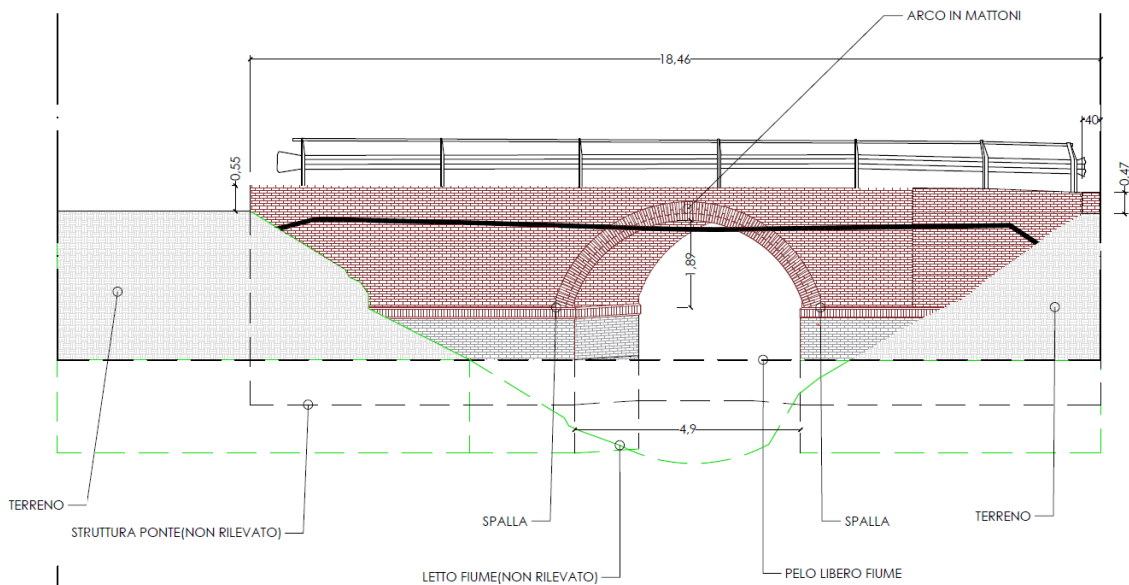


Figura 3-7 Prospetto 1

PROSPETTO 2
SCALA 1:100

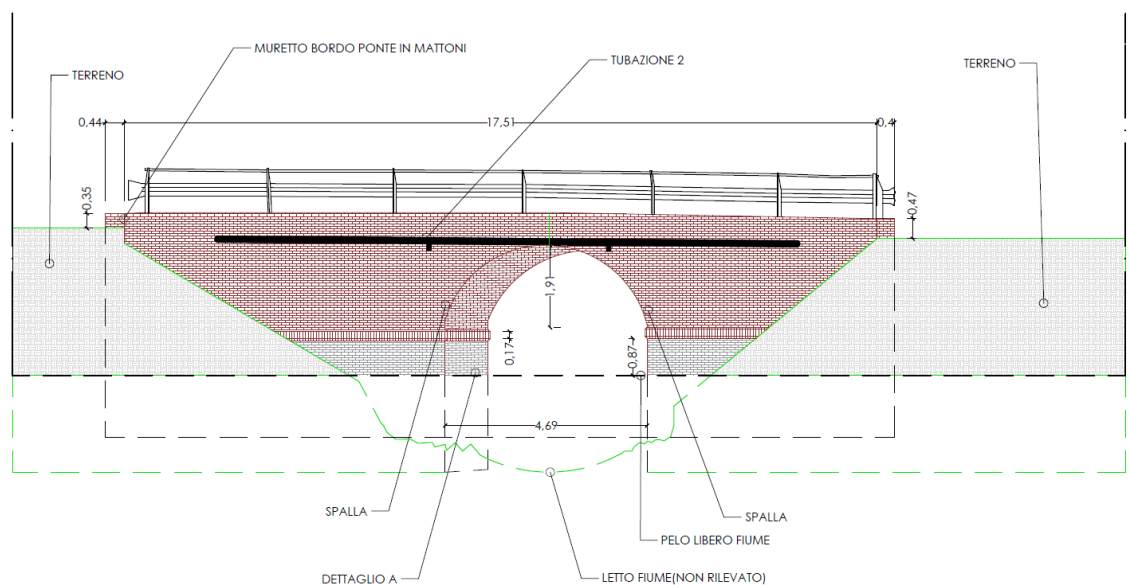


Figura 3-8 Prospetto 2



4. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E DEL TERRENO

4.1 Caratteristiche dei materiali

In base ai risultati ottenuti dalle prove eseguite, è stata individuata la seguente tipologia muraria tenendo conto della **Tabella C8.5.I** della Circolare 7/2019:

- muratura in mattoni pieni e malta di calce di buone caratteristiche; la resistenza a compressione viene assunta pari a 3.45 N/mm^2 , resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali pari a 0.09 N/mm^2 , valore medio del modulo di elasticità normale pari a 1500 N/mm^2 e peso specifico medio pari a 18 kN/m^3

4.2 Caratteristiche del terreno

Per le proprietà meccaniche del terreno sono stati assunti i seguenti valori:

- Peso specifico 18.00 kN/m^3
- Angolo di attrito interno $\varphi' 28.00^\circ$
- Angolo d'attrito terra-paramento $\delta 25.33^\circ$

La superficie è pianeggiante, si adotta la categoria topografica T1.



4.3 Caratteristiche geofisiche

L'indagine MASW ha riscontrato la presenza di terreni che si collocano nella categoria di suolo C, secondo le NTC 2018 e mostra un graduale aumento delle velocità sismiche con la profondità. In particolare, l'unico netto aumento delle V_s lo si riscontra a circa 10 m dal p.c. suggerendo il passaggio ad un materiale con maggiore grado di compattazione, con V_s che aumentano da circa 155 m/s a 218 m/s.

Sismostrato	Profondità		Spessore	Vs (m/s)	Vs _{eq(0-30)}	201 m/s
1	0.00	3.52	3.52	140.00		
2	3.52	9.45	5.93	155.00		
3	9.45	16.00	6.55	218.00	Suolo	C
4	16.00	Inf.	Inf.	250.00		



5. ANALISI DEI CARICHI E COMBINAZIONI DELLE AZIONI

5.1 Pesi propri

Si assumono i seguenti pesi specifici:

Muratura in mattoni pieni e malta di calce	18.0 kN/m ³
Riempimento	19.0 kN/m ³
Sottofondo	19.0 kN/m ³
Pavimentazione	22.0 kN/m ³

5.2 Spinta passiva del riempimento

Per modellare la spinta passiva, si ipotizza che la pressione orizzontale dovuta al riempimento sia proporzionale alla pressione verticale del peso proprio esercitata dal materiale di riempimento.

La pressione orizzontale alla profondità z , rispetto al piano di viabilità, è quindi pari a:

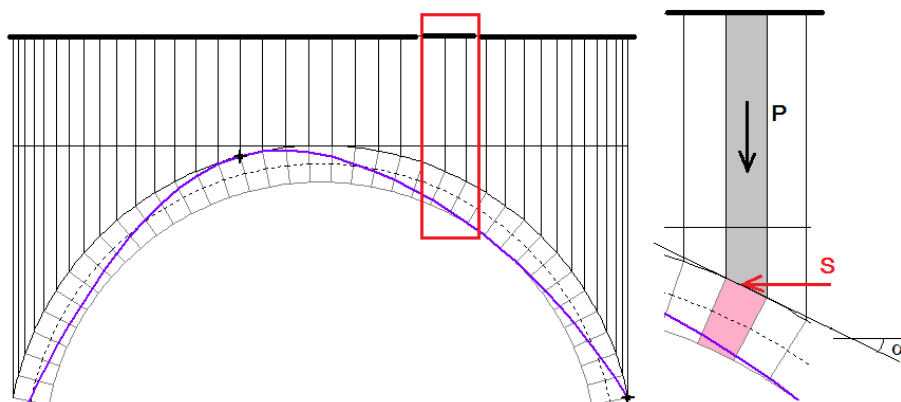
$$\sigma(z) = k_p \cdot \gamma \cdot z$$

dove il coefficiente di pressione passiva del terreno k_p è funzione dello spostamento dell'arco che spinge sul riempimento. Il valore di k_p è stato assunto pari a 1.00.

Per studiare l'equilibrio dell'arco, le pressioni orizzontali passive vengono tradotte in forze orizzontali (spinte passive S) applicate sui conci che tendono a muoversi verso il riempimento. La forza orizzontale agente su di uno di tali conci è espressa dalla relazione:

$$S = k_p \cdot P \cdot \tan \alpha$$

dove P è il peso della colonna di riempimento che sovrasta il concio stesso:



L'azione della spinta passiva determina una curva delle pressioni più centrata, favorendo in tal modo l'equilibrio e la riduzione delle massime tensioni di compressione agenti nelle sezioni dell'arco.

Dal punto di vista sismico, il comportamento dell'arco sotto forze orizzontali inerziali, corrispondenti alle masse movimentate è il seguente: la spinta passiva esercitata dal riempimento nel verso opposto a quello dell'azione sismica ostacola la formazione del cinematismo.



5.3 Carichi da ponti stradali

La Figura 5-1 è un estratto da §5.1.3.3.5 del D.M. 17.1.2018. L'immagine indica i tipi di carico per ponte stradale.

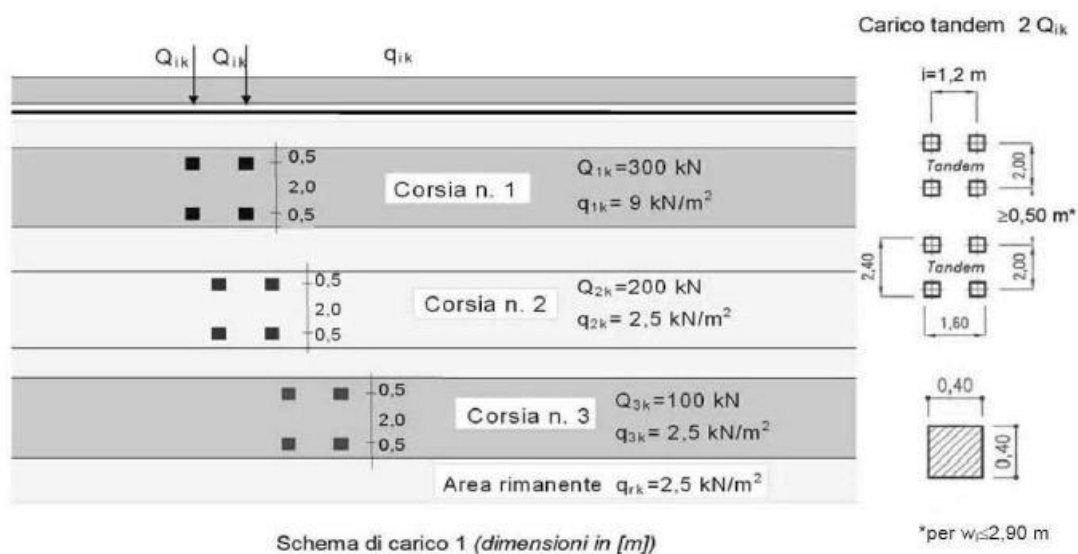


Figura 5-1 Schemi di carico su ponte stradale secondo D.M. 17.01.2018

Tab. 5.1.II - Intensità dei carichi Q_{ik} e q_{ik} per le diverse corsie

Posizione	Carico asse Q_{ik} [kN]	q_{ik} [kN/m²]
Corsia Numero 1	300	9,00
Corsia Numero 2	200	2,50
Corsia Numero 3	100	2,50
Altre corsie	0,00	2,50

Figura 5-2 Tab. 5.1.II del D.M. 17.1.2018 (ponti stradali)

Il ponte oggetto di studio ha una larghezza della superficie carrabile w compresa tra 5,4 m e 6,0 m (Tab. 5.1.I D.M. 17.1.2018) e quindi viene interessato dal carico di due corsie avente larghezza 2.85 m.



Seguendo lo schema normativo riportato in Figura 5-2 le coppie di carichi concentrati vengono applicati in numero pari a 2 in corrispondenza delle corsie in cui la volta viene suddivisa, con valori decrescenti: 300 kN nella prima corsia, 200 kN nella seconda. La coppia di carichi concentrati viene predisposta in posizione eccentrica a 1/4 della luce dell'arco, posizione che si ritiene possa generare i massimi effetti.

Il carico distribuito, definito come carico di superficie, viene ricondotto a carico lineare moltiplicando per la larghezza della corsia. Anche per il carico distribuito viene considerata la suddivisione in corsie, in base alla profondità della volta, ed il valore del carico lineare è di 25.65 kN/m per la prima corsia e di 7.125 kN/m per la seconda corsia.

Per quanto riguarda l'azione di frenamento dei carichi stradali, essa viene definita in §5.1.3.5 del D.M. 17.1.2018.

La forza di frenamento q_3 è funzione del carico verticale totale agente sulla corsia convenzionale n.1 ed è uguale a:

$$180kN \leq q_3 = 0,6(2Q_{1k}) + 0,10q_{1k} \cdot w_1 \cdot L \leq 900kN$$

essendo w_1 la larghezza della corsia e L la lunghezza della zona caricata. La forza, applicata a livello della pavimentazione ed agente lungo l'asse della corsia, è assunta uniformemente distribuita sulla lunghezza della zona caricata e include gli effetti di interazione.

L'azione viene assunta uniformemente distribuita e pari a $q_3 = 66$ kN/m



5.4 Azione sismica

L'azione sismica è valutata a partire dalla "pericolosità sismica di base", in condizioni ideali di sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale.

Allo stato attuale, la pericolosità sismica su reticolo di riferimento nell'intervallo di riferimento è fornita dai dati pubblicati sul sito <http://esse1.mi.ingv.it/>. Per punti non coincidenti con il reticolo di riferimento e periodi di ritorno non contemplati direttamente si opera come indicato nell' allegato alle NTC (rispettivamente media pesata e interpolazione).

L'azione sismica viene definita in relazione ad un periodo di riferimento V_R che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicandone la vita nominale per il coefficiente d'uso (vedi tabella Parametri della struttura). Fissato il periodo di riferimento V_R e la probabilità di superamento P_{VR} associata a ciascuno degli stati limite considerati, si ottiene il periodo di ritorno T_R e i relativi parametri di pericolosità sismica (vedi tabella successiva):

- a_g è accelerazione orizzontale massima del terreno;
- F_o è il valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- T^*_C è il periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Nella tabella seguente si riportano i parametri della struttura:

Parametri della struttura					
Classe d'uso	Vita V_N [anni]	Coeff. Uso	Periodo V_R [anni]	Tipo di suolo	Categoria topografica
III	75	1.5	75	C	T1

Individuati su reticolo di riferimento i parametri di pericolosità sismica si valutano i parametri spettrali riportati in tabella:

- S è il coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche mediante la relazione seguente $S = S_s * S_T$ (3.2.3)



- F_0 è il fattore che quantifica l'amplificazione spettrale massima, su sito di riferimento rigido orizzontale
- F_v è il fattore che quantifica l'amplificazione spettrale massima verticale, in termini di accelerazione orizzontale massima del terreno a_g su sito di riferimento rigido orizzontale
- T_B è il periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante.
- T_C è il periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a velocità costante.
- T_D è il periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a spostamento costante.

Lo spettro di risposta elastico in accelerazione della componente orizzontale del moto sismico, S_e , è definito dalle seguenti espressioni:

$$\begin{aligned} 0 \leq T < T_B & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right] \\ T_B \leq T < T_C & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \\ T_C \leq T < T_D & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right) \\ T_D \leq T & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right) \end{aligned}$$

Dove per sottosuolo di categoria **A** i coefficienti S_s e C_c valgono 1; mentre per le categorie di sottosuolo B, C, D, E i coefficienti S_s e C_c vengono calcolati mediante le espressioni riportate nella seguente tabella:

Categoria sottosuolo	S_s	C_c
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,20$	$1,10 \cdot (T_C^*)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,50$	$1,05 \cdot (T_C^*)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,80$	$1,25 \cdot (T_C^*)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,60$	$1,15 \cdot (T_C^*)^{-0,40}$

Per tenere conto delle condizioni topografiche e in assenza di specifiche analisi di risposta sismica locale, si utilizzano i valori del coefficiente topografico S_T riportati nella seguente tabella:



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S_T
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media minore o uguale a 30°	1,2
T4	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media maggiore di 30°	1,4

Lo spettro di risposta elastico in accelerazione della componente verticale del moto sismico, S_{ve} , è definito dalle espressioni:

$$\begin{aligned}
 0 \leq T < T_B & \quad S_{ve}(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right] \\
 T_B \leq T < T_C & \quad S_{ve}(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \\
 T_C \leq T < T_D & \quad S_{ve}(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right) \\
 T_D \leq T & \quad S_{ve}(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left(\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right)
 \end{aligned}$$

I valori di S_s , T_B , T_C e T_D , sono riportati nella seguente tabella:

Categoria di sottosuolo	S_s	T_B	T_C	T_D
A, B, C, D, E	1,0	0,05 s	0,15 s	1,0 s

Id nodo	Longitudine	Latitudine
Loc.	11.271	44.660
16285	11.244	44.614
16063	11.242	44.664
16064	11.312	44.665
16286	11.314	44.615

SL	T_R [anni]	a_g [g]	F_o	T^*_C [sec]	S	T_B [sec]	T_C [sec]	T_D [sec]	F_v
SLO	45	0.0560	2.510	0.268	1.500	0.145	0.435	1.824	0.802
SLD	75	0.0718	2.462	0.279	1.500	0.149	0.446	1.887	0.891
SLV	712	0.1874	2.541	0.278	1.414	0.148	0.445	2.350	1.485
SLC	1462	0.2459	2.484	0.286	1.334	0.151	0.454	2.584	1.663



Nella Figura 5-3 si riportano gli spettri di risposta elastici per i diversi Stati Limite.

Spettri di risposta elastici per i diversi Stati Limite

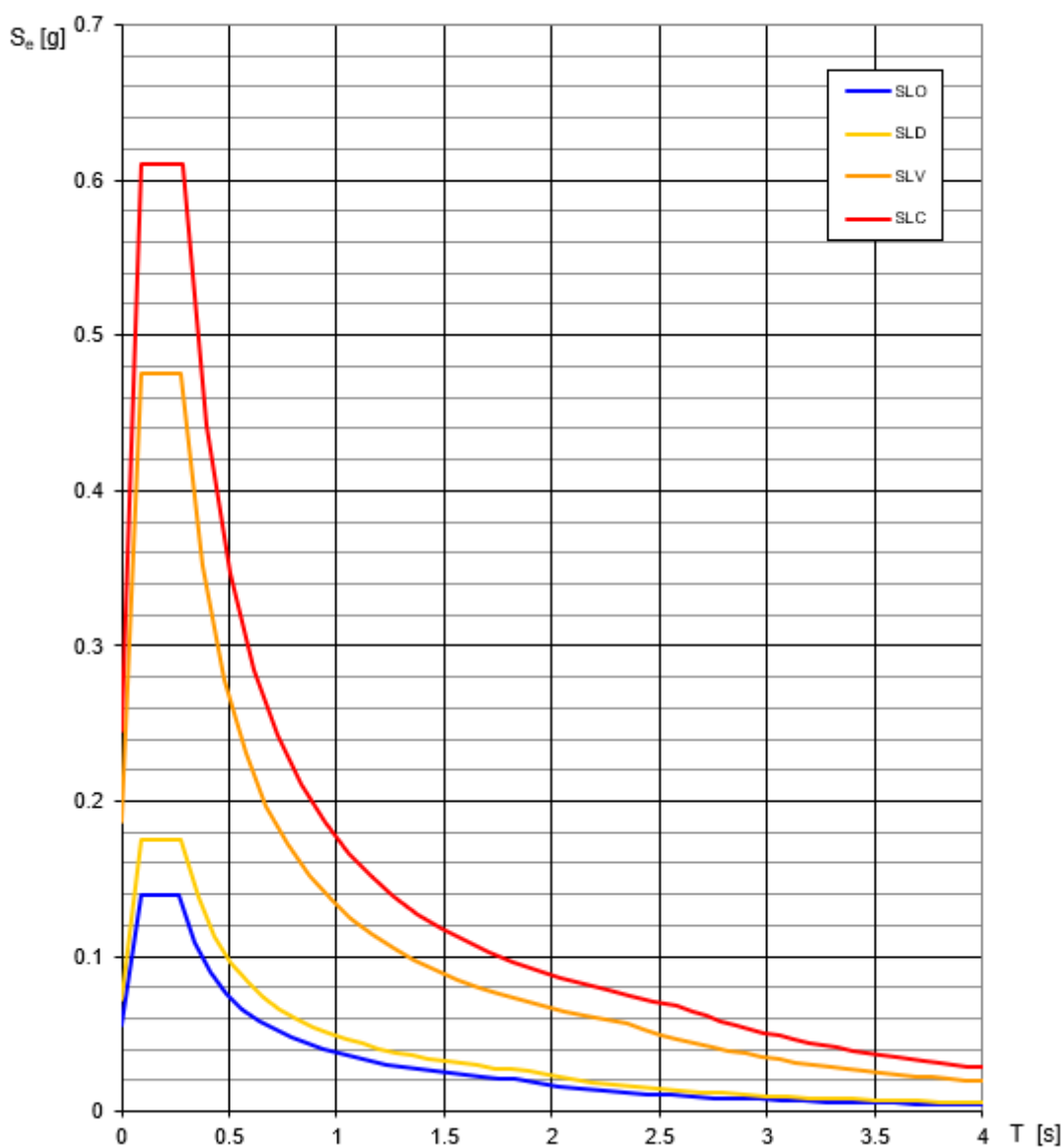


Figura 5-3 Spettri di risposta elastici per i diversi Stati Limite



5.5 Condizioni di carico

Le condizioni di carico elementari agenti sull'arco sono:

CCE	Carichi	
1	Permanenti strutturali e non strutturali	Pesi propri volta, rinfianchi, sottofondo e pavimentazione
2	Carichi stradali distribuiti	$q_{1k} = 9.00 \text{ kN/m}^2$ $q_{2k} = 2.50 \text{ kN/m}^2$
3	Carichi stradali concentrati	$Q_{1k} = 300 \text{ kN}$ $Q_{2k} = 200 \text{ kN}$
4	Azione di frenamento	$q_3 = 66 \text{ kN/m}$
5	Spinta passiva verso sinistra	
6	Spinta passiva verso destra	



5.6 Combinazione delle azioni

Analisi Statica

L'Analisi Statica viene eseguita per le seguenti combinazioni delle condizioni di carico elementari:

CCC	Azioni	CCE					
		1	2	3	4	5	6
1	Permanente incluso pesi propri	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	Permanenti Carichi distribuiti q_{ik} Carichi concentrati Q_{ik} Spinta passiva destra	1.00	1.35	1.35	0.00	0.00	0.00
3	Permanenti Carichi distribuiti q_{1k} Carichi concentrati Q_{1k} Azione di frenamento verso dx Spinta passiva verso sx	1.00	$0.40 \cdot 1.35$	$0.75 \cdot 1.35$	1.35	0.90	0.00
4	Permanenti Carichi distribuiti q_{ik}	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00

Per ogni CCC è stato calcolato il moltiplicatore di carico verticale facendo crescere tutti i carichi affetti da moltiplicatore verticale contenuti nella CCE che costituiscono la CCC.

In accordo con la Normativa vigente (§2.5.3), i coefficienti di combinazione delle CCC coincidono con i coefficienti parziali per le azioni γ_G e γ_Q .

Si fa riferimento ai seguenti contenuti normativi:

- Tab. 5.1.V §5 NTC18;
- §C5 Circ. 2019.



Con riferimento allo stato limite di equilibrio come corpo rigido (EQU), nel quale viene inquadrata l'analisi limite, valori significativi dei coefficienti sono i seguenti:

- per i carichi permanenti: 0.9 se favorevoli (ad es. pesi propri, che sono distribuiti su tutto l'arco e tendono a stabilizzarlo) e 1.1 se sfavorevoli (ai fini della verifica di resistenza, un maggior carico verticale può impegnare maggiormente la resistenza della sezione trasversale);
- per le azioni variabili da traffico stradale: 1.35 se sfavorevoli (carichi concentrati eccentrici, o carichi distribuiti nel caso di verifiche di resistenza) e 0.00 se favorevoli (carichi distribuiti ai fini delle verifiche di stabilità).

Analisi Sismica

Combinazione sismica:

$$E + G_1 + G_2 + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$

- Per le azioni sismiche dei ponti stradali (§5.1.3.12 delle NTC 2018) si assume $\psi_2=0$.



6. MODELLO DI CALCOLO E MODALITÀ DI VERIFICA

6.1 Modello di calcolo

La metodologia di calcolo è stata sviluppata dal Dipartimento di Costruzioni dell'Università degli Studi di Firenze, Facoltà di Architettura e si fonda sugli studi di Heyman, in accordo con i più avanzati studi del settore e supportata da indagini sperimentali condotte in ambito universitario.

Si considera un arco, costituito da n conci e da $m = n+1$ interfacce, su ciascuna delle quali agiscono le azioni interne N (sforzo normale), M (momento flettente) e T (taglio), per effetto del sistema di carichi applicati (peso proprio, altre azioni esterne). L'arco è stato discretizzato, numerando i conci e le interfacce progressivamente da sinistra a destra.

I conci costituiscono gli elementi finiti del modello; l'interfaccia consente la trasmissione degli sforzi da un concio a quello adiacente. Si è fatto riferimento ai conci reali, separati da interfacce costituite dai giunti di malta.

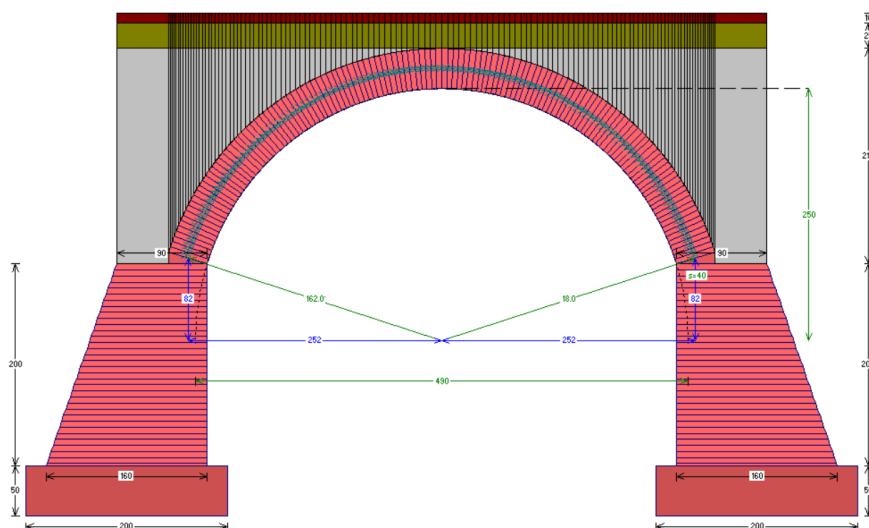


Figura 6-1 Prospetto del ponte

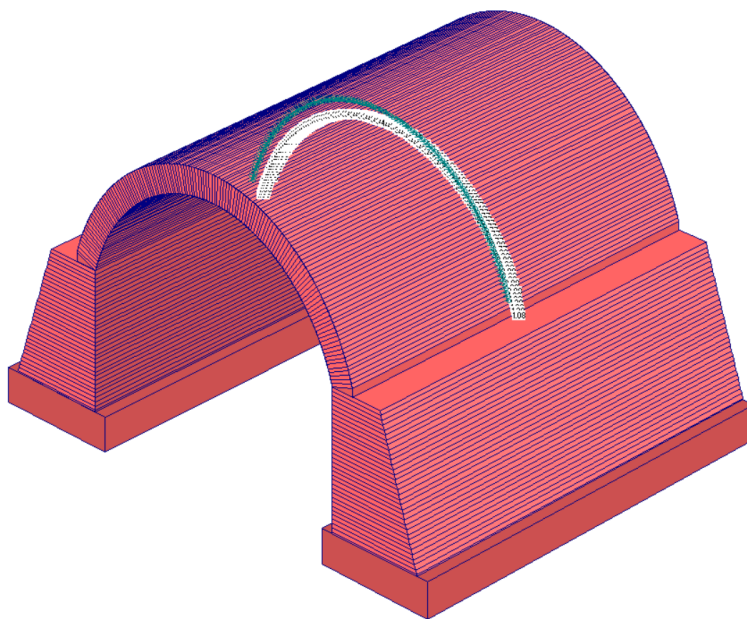


Figura 6-2 Vista assonometrica del modello di calcolo

Il problema statico è retto dalla seguente formulazione:

$$AN + BM + CT = F$$

Dove A, B, C sono le matrici di configurazione geometrica relative rispettivamente ai vettori incogniti N, M e T, e F è il vettore dei carichi assegnati sotto le condizioni:

- $N_i \leq 0$
- $N_i h_i - M_i \geq 0$
- $N_i h_i + M_i \geq 0$

Dove $2h_i$ è l'altezza del concio i-esimo

Le incognite sono le $3m = 3(n+1) = 3n+3$ caratteristiche di sollecitazione agenti nelle interfacce, mentre l'equazione $AN + BM + CT = F$ sono pari al numero dei conci $3n$.



6.2 Criteri di verifica

Si esegue l'analisi delle seguenti verifiche:

- Equilibrio della struttura (Verifica di Stabilità);
- Verifica ad attrito (Taglio nei giunti);
- Verifica a Compressione della muratura;
- Verifica a Trazione dei rinforzi.

La verifica è direttamente eseguita applicando la metodologia di calcolo sviluppata dal Dipartimento di Costruzioni dell'Università degli Studi di Firenze, Facoltà di Architettura, e si fonda sugli studi di Heyman.

La verifica ad attrito viene eseguita utilizzando le azioni interne derivanti dall'analisi precedente, corrispondenti cioè alla curva delle pressioni determinata.

Per la verifica a compressione della muratura, la tensione viene calcolata nell'ipotesi di diagramma trapezoidale se lo sforzo normale è interno al nocciolo d'inerzia, triangolare con sola resistenza a compressione (quindi con zona reagente minore della sezione), se lo sforzo normale è esterno al nocciolo d'inerzia. In corrispondenza delle sezioni dove è presente trazione, sia nel caso di rinforzo che non, la massima tensione di muratura viene calcolata adottando lo schema uniforme (rettangolare), distribuendovi lo sforzo normale agente nella biella compressa. Ciò equivale quindi a supporre che lo schiacciamento della muratura nella realtà non sia "puntuale" ma interessi uno spessore dell'arco, supposto pari a $s/2$, secondo indicazioni provenienti dalla Ricerca sperimentale.

La verifica a trazione dei rinforzi viene eseguita solo in caso di presenza di rinforzi, dove esiste una struttura associata alla muratura in grado di reagire a trazione, sia essa una catena piuttosto che una cappa in calcestruzzo armato o nastri in composito fibrorinforzato.

Il moltiplicatore di collasso in direzione verticale viene determinato con riferimento alle verifiche eseguite (stabilità attrito, compressione della muratura, trazione nei rinforzi), per



ogni Combinazione delle Condizioni di Carico: il valore minimo costituisce, per una data Combinazione delle Condizioni di Carico, il moltiplicatore di collasso della Volta.

In alcuni casi è possibile che il moltiplicatore di collasso statico non sia calcolabile, e viene indicato come "n.d." (non disponibile).

Il moltiplicatore di collasso in direzione orizzontale X , viene determinato con riferimento alle verifiche eseguite (stabilità attrito, compressione della muratura, trazione nei rinforzi), per ognuno dei due versi ($+X$ e $-X$): il valore minimo costituisce il moltiplicatore di collasso della volta. A partire da tale valore, viene svolta la verifica in Analisi Sismica Cinematica.



7. ANALISI STATO ATTUALE

7.1 Introduzione

Le analisi sono state svolte con il software Aedes SAV.

Le verifiche previste riguardano l'arcata e le spalle e sono le seguenti:

- perdita di equilibrio della struttura o di una sua parte (verifica di stabilità);
- raggiungimento della massima capacità di resistenza di parti o dell'insieme della struttura (verifiche di resistenza a compressione e ad attrito).

In analisi sismica viene inoltre esaminato il meccanismo di collasso del timpano, completando in tal modo l'analisi per componenti suggerita dalla CNR-DT 213 (§9).

Lo stato limite EQU, in analisi limite, incorpora anche la verifica allo stato limite STR (stato limite di resistenza della struttura, compresi gli elementi di fondazione) (§3.5.1 CNR DT-213).

Nella verifica statica, le combinazioni di condizioni di carico (combinazioni fondamentali: D.M. 17.1.2018, [2.5.1] in §2.5.3) sono definite in base alla massimizzazione degli effetti riguardanti sia la verifica di stabilità, per la quale i carichi permanenti sono favorevoli mentre i variabili sono posti in posizione sfavorevole, sia la verifica di resistenza (per la compressione tutti i carichi sono sfavorevoli); ne consegue l'adozione di opportuni coefficienti secondo la Tab. 5.1.V, colonna EQU, del D.M. 17.1.2018. Poiché la verifica del ponte, come richiesto dalla CNR-DT 213, deve essere articolata in due fasi: sotto il carico permanente, e sotto il permanente + i carichi variabili, viene considerata anche la combinazione con i soli carichi permanenti.

La verifica sismica è condotta con la combinazione di carico prevista dal D.M. 17.1.2018: [2.5.5] in §2.5.3, secondo +X e -X, essendo X la direzione orizzontale corrispondente al piano della struttura (arco + spalle). La verifica sismica include anche la verifica del timpano, sotto l'ipotesi di azione sismica in direzione trasversale al piano della struttura.



Data la limitata luce del ponte, nel presente progetto non sono stati considerati effetti sismici verticali.

L'esito della verifica di sicurezza sismica consiste nell'indicatore di rischio sismico ζ_E , definito in termini di PGA e calcolato come rapporto fra capacità e domanda: per i ponti esistenti in muratura il livello di adeguamento sismico è dato da $\zeta_E \geq 0.800$ (§C.8.8.7).

Nelle immagini seguenti: curva delle pressioni, tensioni di compressione e risultati per le diverse combinazioni statiche e sismiche.



7.2 Analisi statica

Nelle figure seguenti si riportano i risultati delle analisi eseguite.

- **CCC 1: permanente incluso pesi propri**

- Curva delle Pressioni
- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 1 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)
- Passo di iterazione: 1 (1)

Arco STABILE - Verifica Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica Soddisfatta

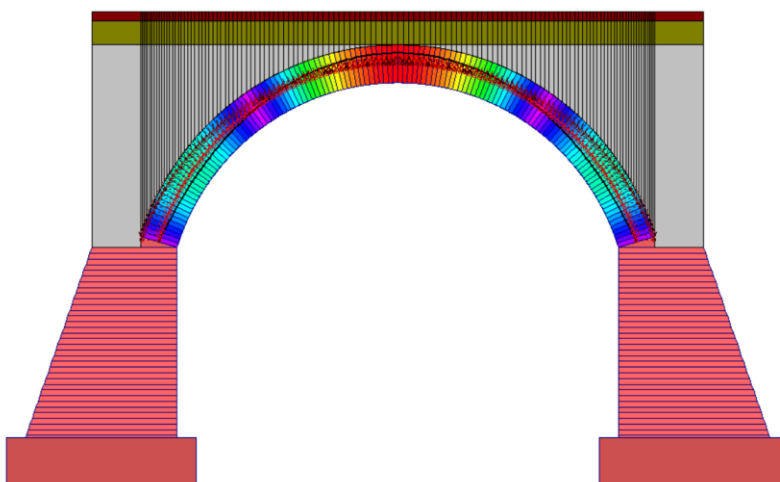


Figura 7-1 CCC 1: Curva delle pressioni

- Sforzo Normale
- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 1 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)
- Passo di iterazione: 1 (1)

Arco STABILE - Verifica Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica Soddisfatta

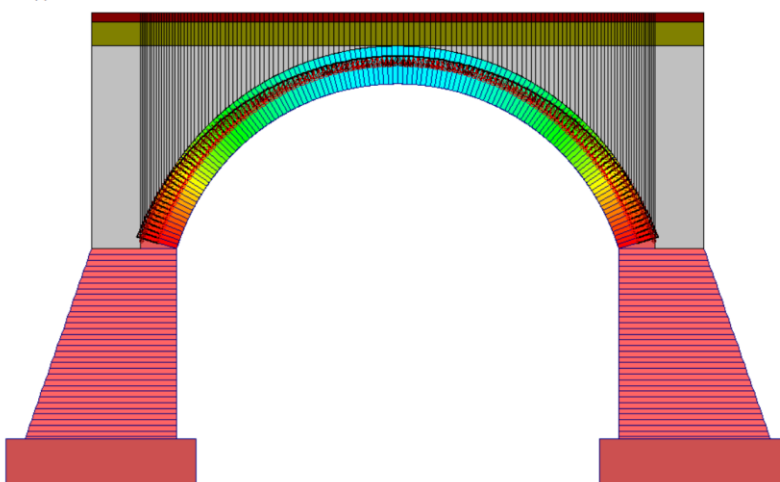


Tabella 7-1 CCC 1: Sforzo Normale N



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 1 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)

Arco STABILE - Verifica Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica Soddisfatta

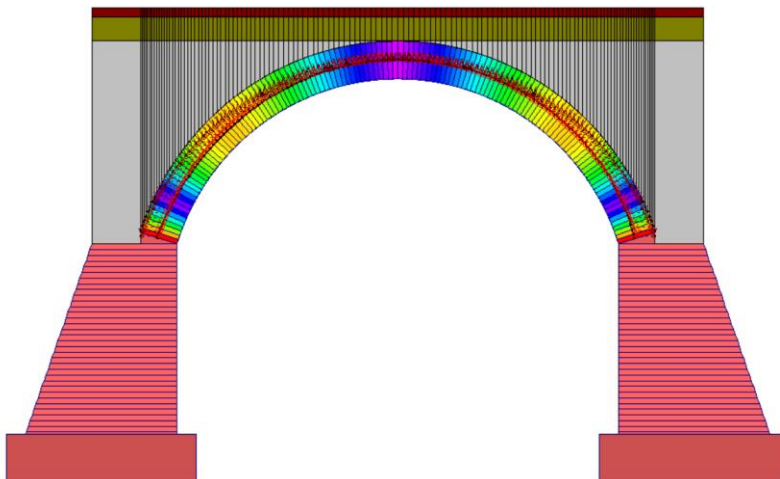


Figura 7-2 CCC 1: Momento M

- Angoli di Scorrimento
- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 1 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)
- Passo di iterazione: 1 (1)

Arco STABILE - Verifica Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica Soddisfatta

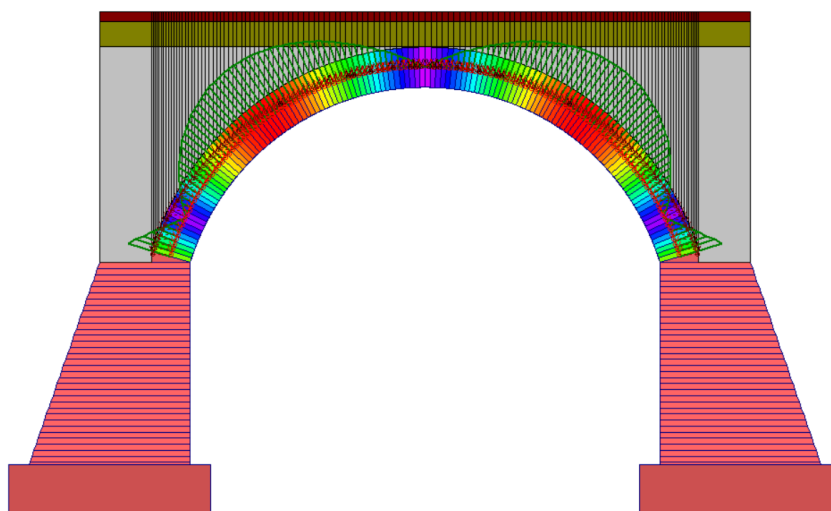


Figura 7-3 CCC 1: Angoli di scorrimento



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

- Tensioni di Compressione
- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 1 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)
- Passo di iterazione: 1 (1)

Arco STABILE - Verifica Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica Soddisfatta

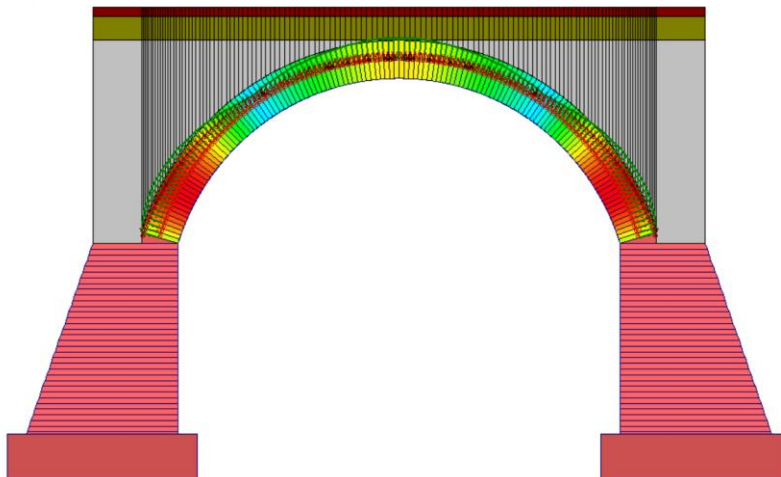


Figura 7-4 CCC 1: Tensioni di compressione

Arco Ideale: 1 (1)				
ANALISI STATICA				
CCC 1 (3)		Moltiplicatore verticale di collasso		
Verifica Soddisfatta		minimo fra tutti gli Archi ideali e tutte le CCC :		0.783
Struttura:	Arco	Arco n°:	1	CCC n°: 2
Tipo di Verifica	Arco	Pied. Sx	Pied. Dx	
Stabilità (Equilibrio della struttura)	n.d.	>> 1	>> 1	
Attrito (Taglio nei giunti)	n.d.	>> 1	>> 1	
Compressione della muratura	n.d.	>> 1	>> 1	
Trazione dei rinforzi				

Figura 7-5 Statica CCC 1: Rapporto di elaborazione



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

• **CCC 2: permanenti + carichi stradali distribuiti q_{1k}**

- Curva delle Pressioni
- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 2 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)
- Passo di iterazione: 2 (2)

Arco STABILE - Verifica NON Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica NON Soddisfatta

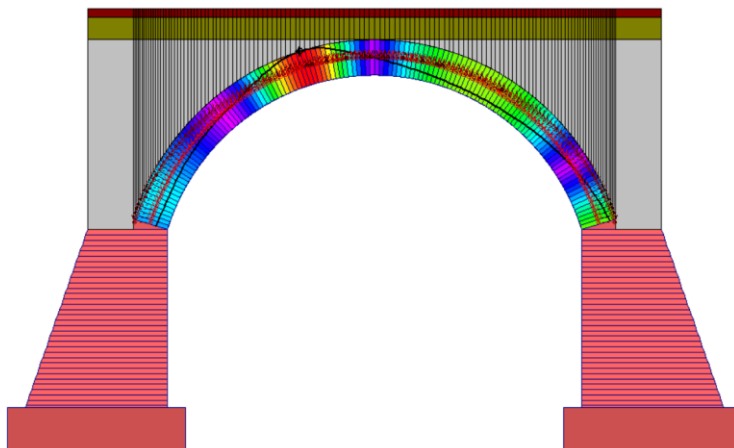


Figura 7-6 CCC 2: Curva delle pressioni

- Sforzo Normale
- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 2 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)
- Passo di iterazione: max

Arco STABILE - Verifica NON Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica NON Soddisfatta

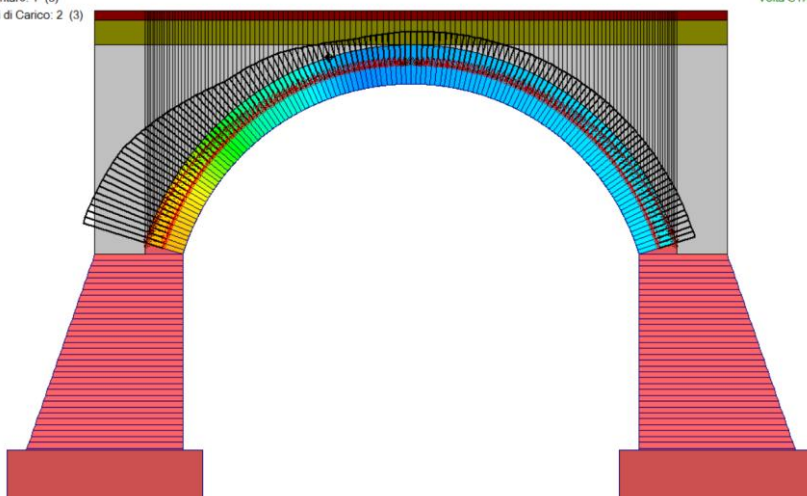


Figura 7-7 CCC 2: Sforzo Normale N



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 2 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)

Arco STABILE - Verifica NON Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica NON Soddisfatta

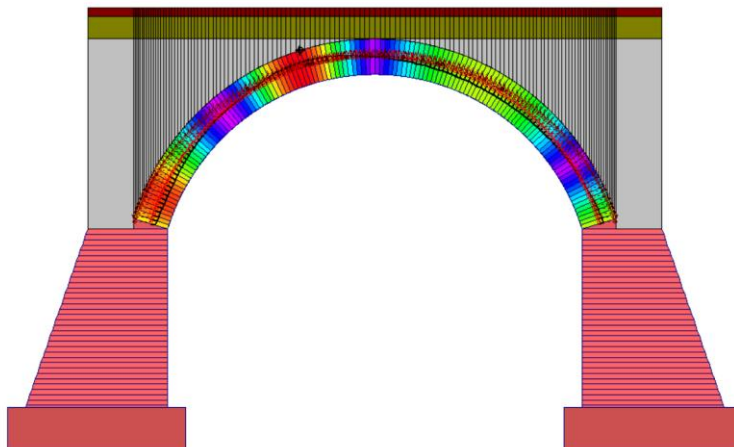


Figura 7-8 CCC 2: Momento M

- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 2 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)

Arco STABILE - Verifica NON Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica NON Soddisfatta

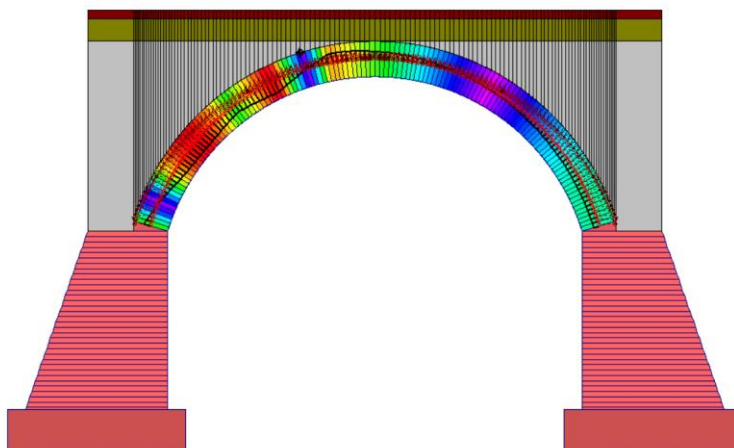


Figura 7-9 CCC 2: Taglio



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

- Angoli di Scorrimento
- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 2 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)
- Passo di iterazione: 2 (2)

Arco STABILE - Verifica NON Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica NON Soddisfatta

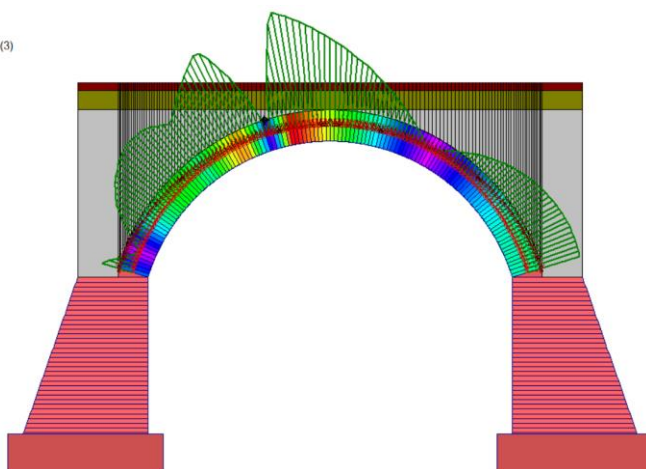


Figura 7-10 CCC 2: Angoli di scorrimento

- Tensioni di Compressione
- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 2 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)
- Passo di iterazione: 2 (2)

Arco STABILE - Verifica NON Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica NON Soddisfatta

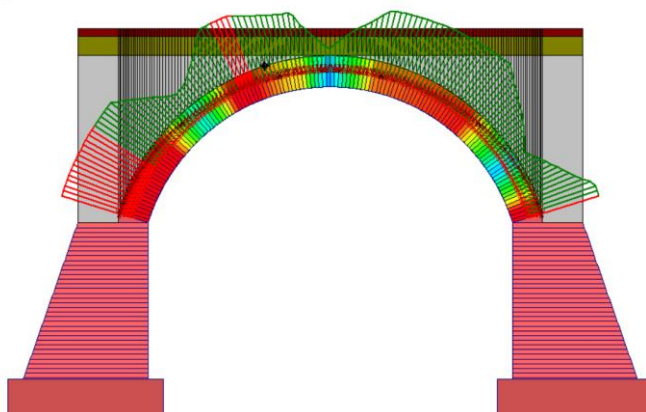


Figura 7-11 CCC 2: Tensioni di compressione

Arco Ideale: 1 (1)					
ANALISI STATICA					
CCC 2 (3)		Info Multiplicatore verticale di collasso			
Verifica NON Soddisfatta		minimo fra tutti gli Archi ideali e tutte le CCC: 0.783			
		Struttura:	Arco	Arco n°:	1
				CCC n°:	2
Tipo di Verifica	Arco	Pied. Sx	Pied. Dx		
Stabilità (Equilibrio della struttura)	1.672	1.672	1.672		
Attrito (Taglio nei giunti)	1.672	1.672	1.672		
Compressione della muratura	0.783	1.011	1.672		
Trazione dei rinforzi					

Figura 7-12 CCC 2 Rapporto di elaborazione



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

• **CCC 3: permanenti + carichi stradali q_{1k} + azione di frenamento q_3**

- Curva delle Pressioni
- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 3 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)
- Passo di iterazione: 4 (4)
- Trazione max mur. (kN) = -0.348 (interf.: 42)

Arco INSTABILE - Verifica NON Soddisfatta
Volta INSTABILE - Verifica NON Soddisfatta

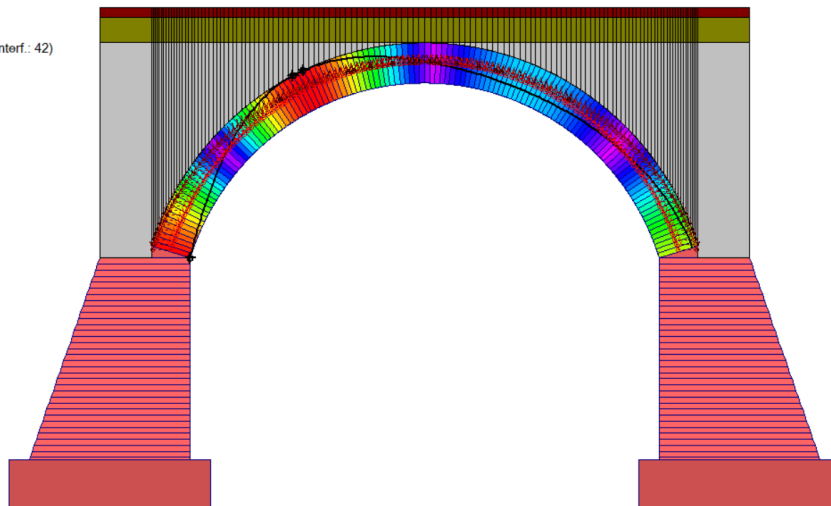


Figura 7-13 CCC 3: Curva delle pressioni

- Sforzo Normale
- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 3 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)
- Passo di iterazione: 4 (4)
- Trazione max mur. (kN) = -0.348 (interf.: 42)

Arco INSTABILE - Verifica NON Soddisfatta
Volta INSTABILE - Verifica NON Soddisfatta

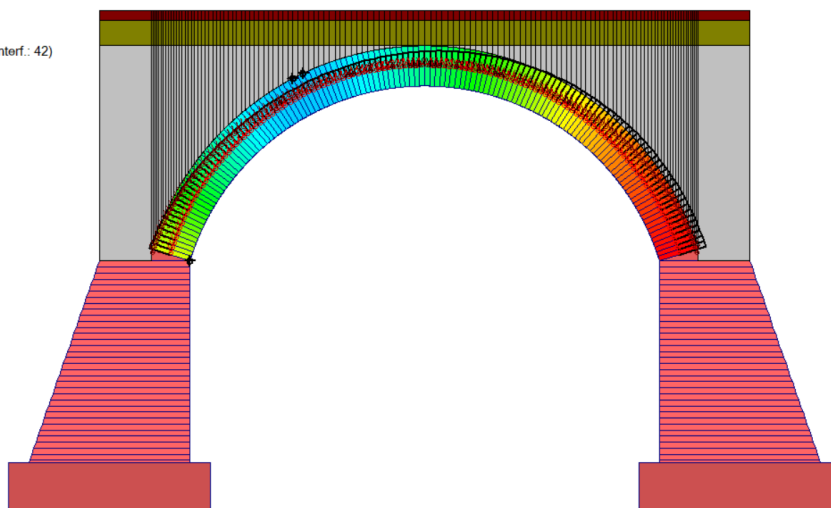


Figura 7-14 CCC 3 Sforzo Normale N



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

- Angoli di Scorrimento
- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 3 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)
- Passo di iterazione: 4 (4)
- Trazione max mur. (kN) = -0.348 (interf.: 42)

Arco INSTABILE - Verifica NON Soddisfatta
Volta INSTABILE - Verifica NON Soddisfatta

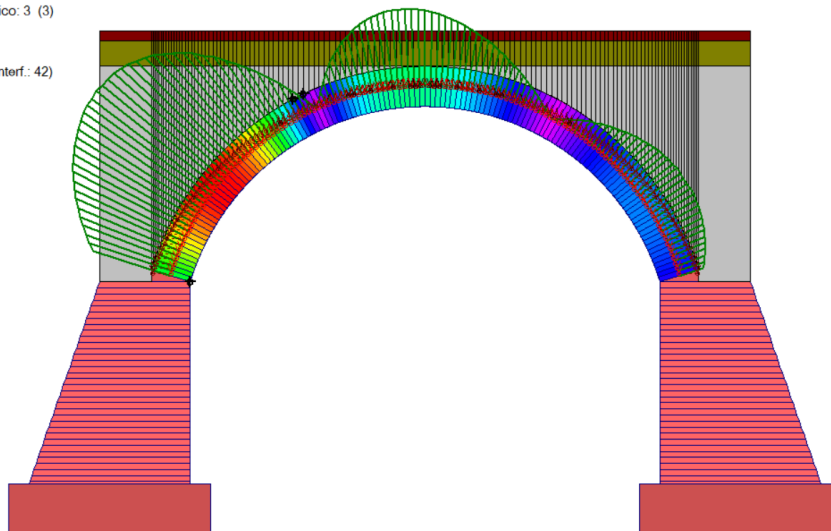


Figura 7-15 CCC 3: Angoli di scorrimento

- Tensioni di Compressione
- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 3 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)
- Passo di iterazione: 4 (4)
- Trazione max mur. (kN) = -0.348 (interf.: 42)

Arco INSTABILE - Verifica NON Soddisfatta
Volta INSTABILE - Verifica NON Soddisfatta

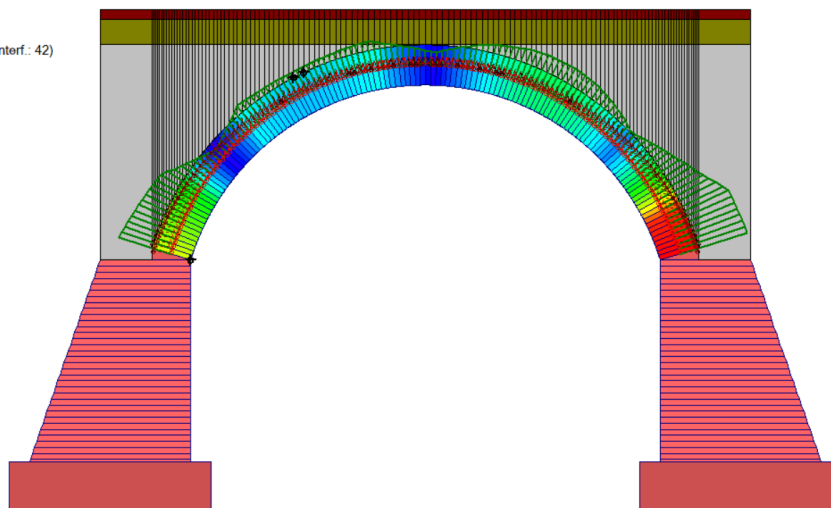


Figura 7-16 CCC 3: Tensioni di compressione



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

Arco Ideale: 1 (1)							
ANALISI STATICA		Info Moltiplicatore verticale di collasso					
CCC 3 (3)		minimo fra tutti gli Archi ideali e tutte le CCC :				0.783	
Verifica NON Soddisfatta		Struttura:	Arco	Arco n°:	1	CCC n°:	2
Tipo di Verifica	Arco	Pied. Sx	Pied. Dx				
Stabilità (Equilibrio della struttura)	>> 1	>> 1	>> 1				
Attrito (Taglio nei giunti)	>> 1	>> 1	>> 1				
Compressione della muratura	>> 1	>> 1	>> 1				
Trazione dei rinforzi							

Figura 7-17 CCC 3 Rapporto di elaborazione



- CCC 4: permanenti + carichi stradali distribuiti q_{ik}

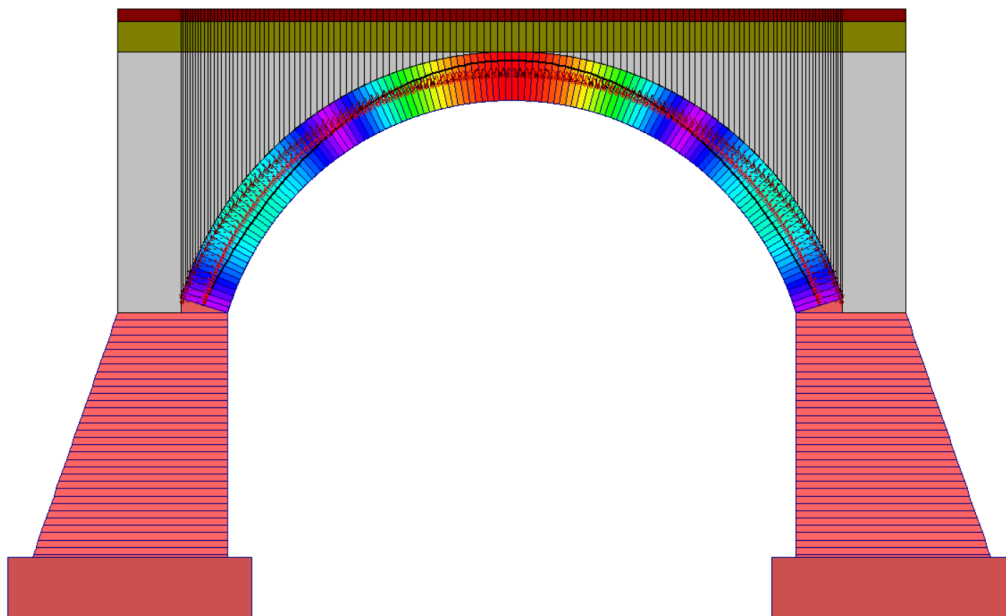


Figura 7-18 CCC 4: Curva delle pressioni

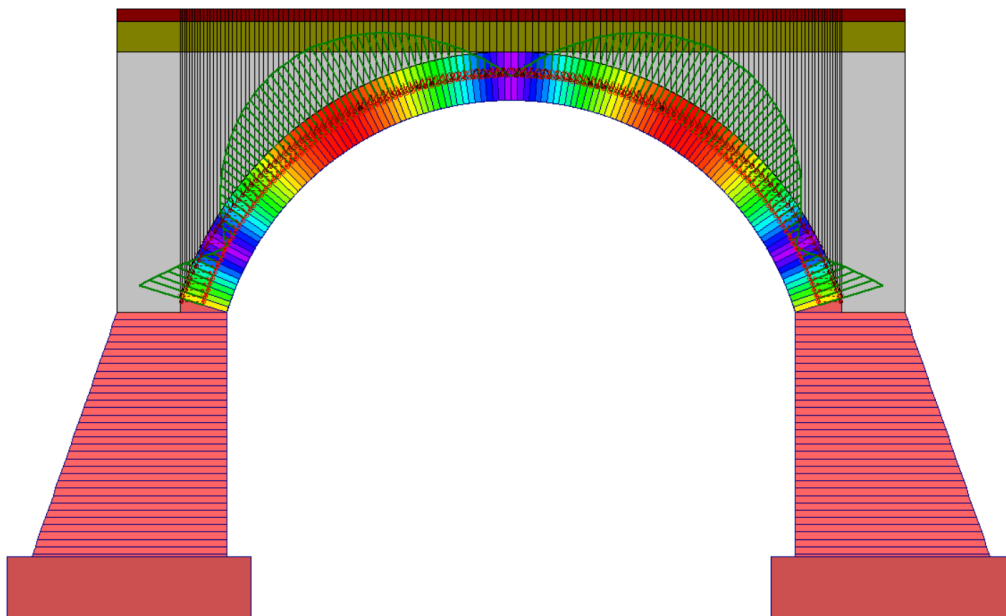


Figura 7-19 CCC 4: Angoli di scorrimento



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

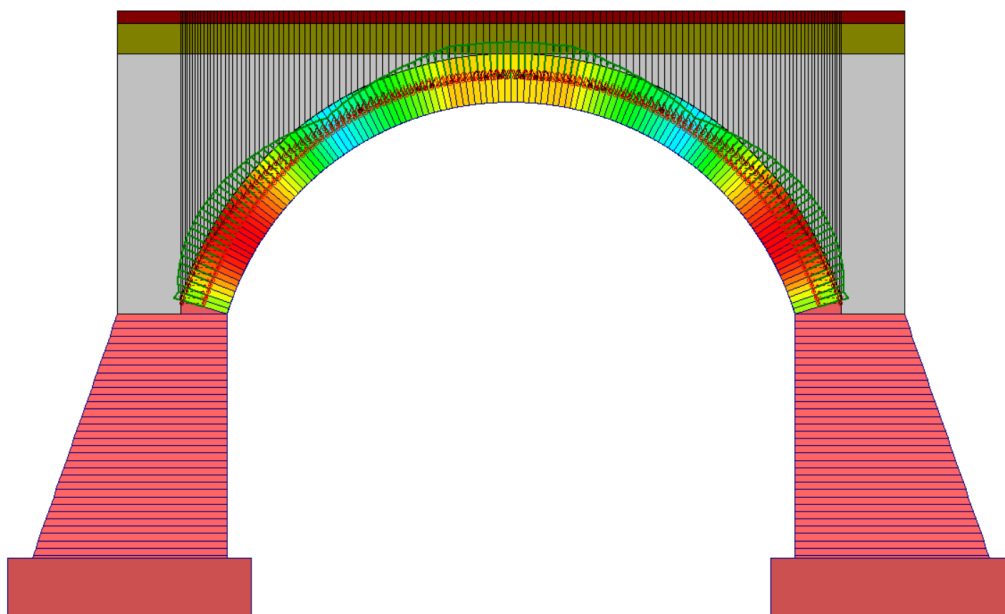


Figura 7-20 CCC 4: Tensioni di compressione

Arco Ideale: 1 (1)							
<div><div>III</div><div>ANALISI STATICA</div></div>							
CCC 4 (4)		<div>Info</div> <div>Moltiplicatore verticale di collasso</div> <div>minimo fra tutti gli Archi ideali e tutte le CCC : 0.783</div>					
Verifica Soddisfatta							
		Struttura:	Arco	Arco n°:	1	CCC n°:	2
Tipo di Verifica		Arco		Pied. Sx		Pied. Dx	
Stabilità (Equilibrio della struttura)		>> 1		>> 1		>> 1	
Attrito (Taglio nei giunti)		>> 1		>> 1		>> 1	
Compressione della muratura		>> 1		>> 1		>> 1	
Trazione dei rinforzi							

Figura 7-21 Statica CCC 4: Rapporto di elaborazione



7.3 Riepilogo analisi statica

Come si evince dalle tabelle riportate di seguito, le verifiche risultano soddisfatte per le combinazioni 1 e 4 in cui sono presenti solo carichi uniformemente distribuiti mentre per le combinazioni 2 e 3 le verifiche non sono soddisfatte; il moltiplicatore verticale di collasso minimo fra tutte le combinazioni delle condizioni di carico risulta pari a 0.783 per la verifica a compressione della muratura dell'arco dovuta principalmente al carico tandem che rappresenta un carico convenzionale. Per la combinazione 3, in cui l'azione di frenamento rappresenta l'azione principale, non è stato possibile determinare il moltiplicatore di collasso verticale considerando le tensioni di trazione agenti su un un concio dell'arco.

ARCO			
CCC	Stabilità (Equilibrio della struttura)	Attrito (Taglio nei giunti)	Compressione della muratura
1	n.d.	n.d.	n.d.
2	1.672	1.672	0.783
3	N.V.	N.V.	N.V.
4	>> 1	>> 1	>> 1

Tabella 7-2 Analisi statica Ante-Operam: moltiplicatori di collasso verticale arco

SPALLA sx			
CCC	Stabilità (Equilibrio della struttura)	Attrito (Taglio nei giunti)	Compressione della muratura
1	>> 1	>> 1	>> 1
2	1.672	1.672	1.011
3	N.V.	N.V.	N.V.
4	>> 1	>> 1	>> 1

Tabella 7-3 Analisi statica Ante-Operam: moltiplicatori di collasso verticale spalle sinistra

SPALLA dx			
CCC	Stabilità (Equilibrio della struttura)	Attrito (Taglio nei giunti)	Compressione della muratura
1	>> 1	>> 1	>> 1
2	1.672	1.672	1.672
3	N.V.	N.V.	N.V.
4	>> 1	>> 1	>> 1

Tabella 7-4 Analisi statica Ante-Operam: moltiplicatori di collasso verticale spalle destra



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

7.4 Analisi sismica +X

Nelle figure seguenti si riportano la curva delle pressioni e le tensioni di compressione per l'analisi sismica in direzione +X.

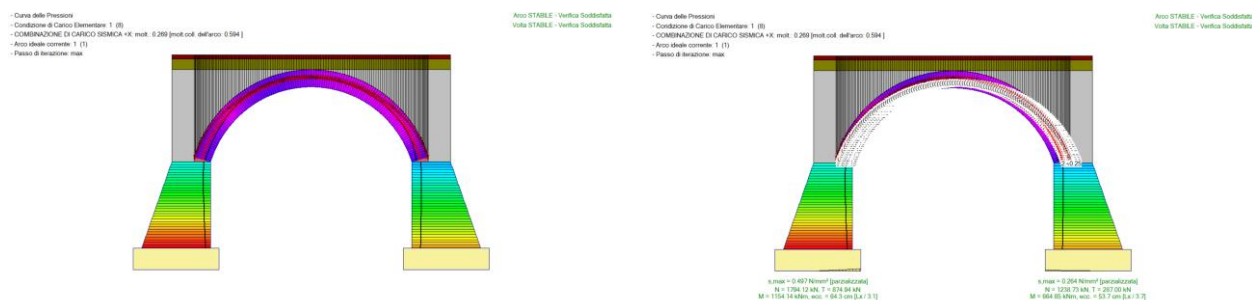


Figura 7-22 Analisi sismica +X: Curva delle pressioni

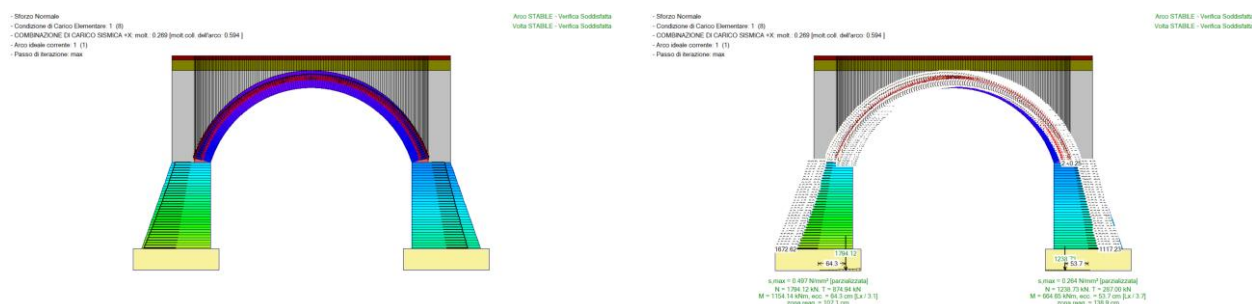


Figura 7-23 Analisi sismica +X: Sforzo Normale N

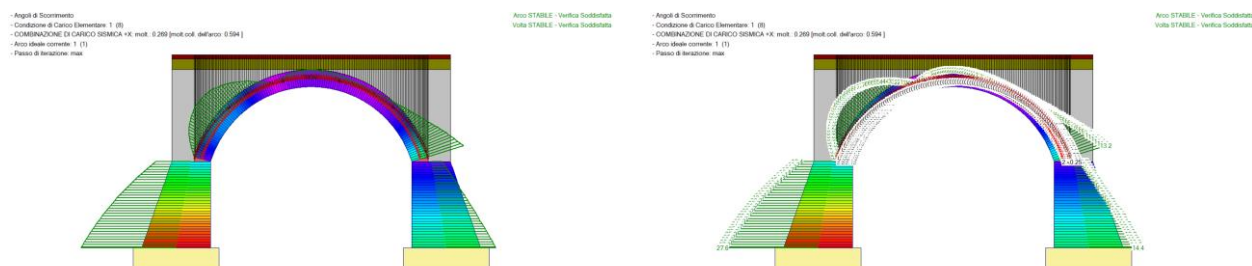


Figura 7-24 Analisi sismica +X: Angoli di scorrimento



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

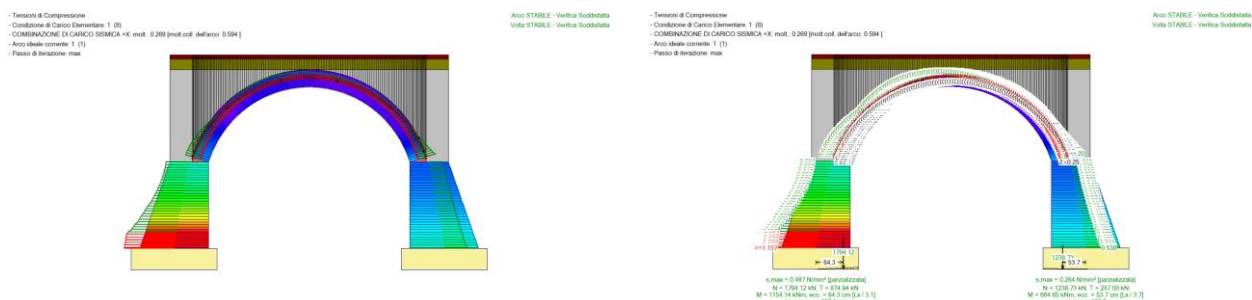


Figura 7-25 Analisi sismica +X: Tensioni di compressione

7.5 Analisi sismica -X

Nelle figure seguenti si riportano la curva delle pressioni e le tensioni di compressione per l'analisi sismica in direzione -X.

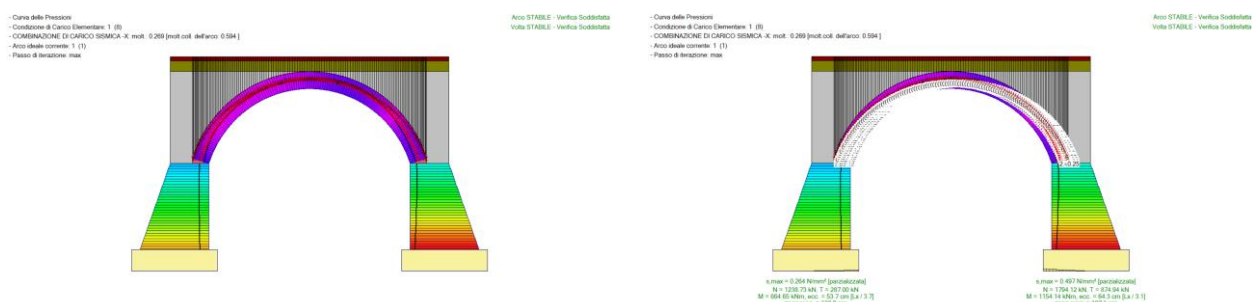


Figura 7-26 Analisi sismica -X: Curva delle pressioni

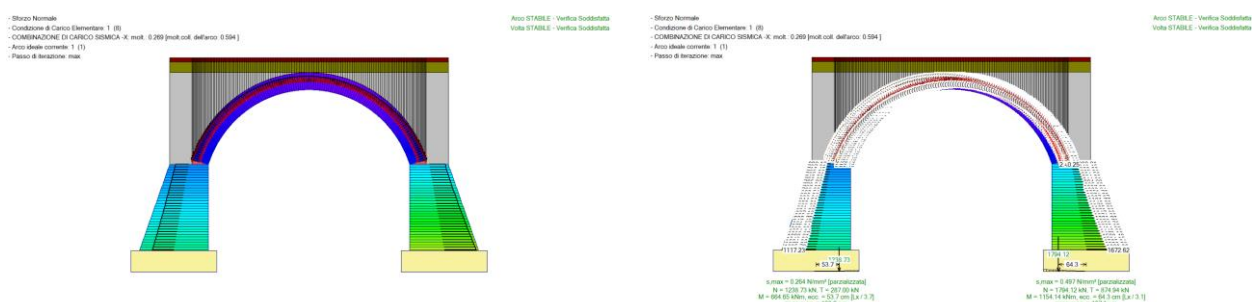


Figura 7-27 Analisi sismica -X: Sforzo Normale N



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

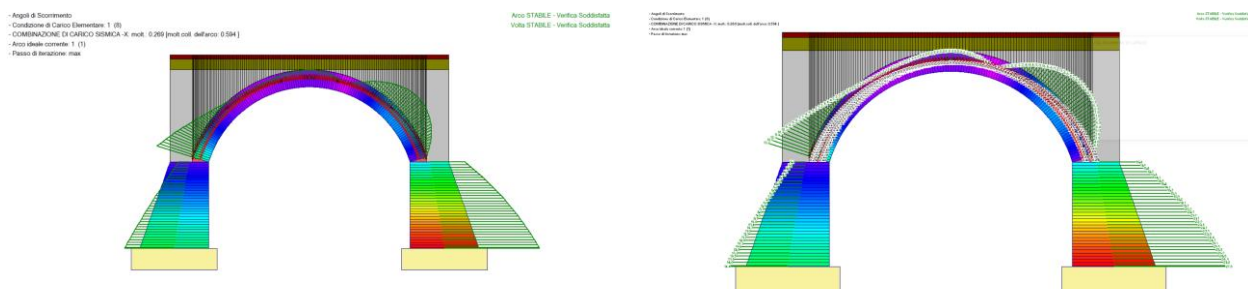


Figura 7-28 Analisi sismica -X: Angoli di scorrimento

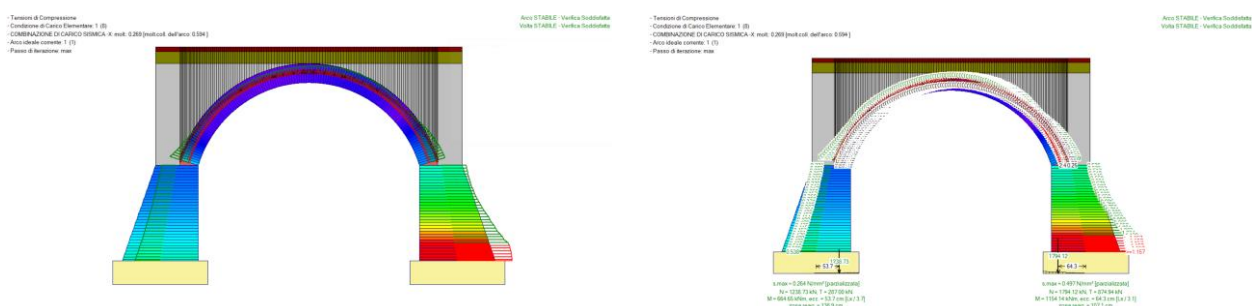



Figura 7-29 Analisi sismica -X: Tensioni di compressione



7.6 Riepilogo risultati analisi sismica

Come riportato nella Figura 7-30 le verifiche risultano soddisfatte per la combinazione sismica.

 ANALISI SISMICA		<div>Moltiplicatore orizzontale di collasso</div> <div>minimo fra tutti gli Archi ideali e i due versi : 0.269</div> <div>Struttura: Piedritto Sx Arco n°: 1 Verso: - X</div>					
Moltiplicatori di collasso	Arco		Pied. Sx		Pied. Dx		Timpano
Tipo di Verifica	+ X	- X	+ X	- X	+ X	- X	
Stabilità (Equilibrio della struttura)	0.594	0.594	0.321	0.593	0.593	0.321	0.511
Attrito (Taglio nei giunti)	0.594	0.594	0.297	0.593	0.593	0.297	
Compressione della muratura	0.594	0.594	0.269	0.593	0.593	0.269	
Trazione dei rinforzi							

Verifica per SLV domanda: PGA,DLV = 0.263 g TR,DLV = 712 anni	Verifica Soddisfatta		ζ_E	Indicatori di Rischio Sismico	
	PGA,CLV (g)	TR,CLV (anni)		PGA,CLV / PGA,DLV	TR,CLV / TR,DLV
				target = 0.800	
	Arco	0.377	>=2475	1.431	3.476
	Piedritti	0.377	>=2475	1.431	3.476
Timpano	0.377	>=2475		1.431	3.476
Minimo	0.377	>=2475		1.431	3.476

Figura 7-30 Analisi sismica: rapporto di elaborazione



Nelle seguenti tabelle si riportano i moltiplicatori di collasso per i tipi di verifica eseguiti sia per l'arco che per le spalle.

Arco			
Direzione	Stabilità	Attrito	Compressione
+X	0.594	0.594	0.594
-X	0.594	0.594	0.594

Spalla Sx			
Direzione	Stabilità	Attrito	Compressione
+X	0.321	0.297	0.269
-X	0.593	0.593	0.593
Spalla Dx			
Direzione	Stabilità	Attrito	Compressione
+X	0.593	0.593	0.593
-X	0.321	0.297	0.269

Nella Tabella 10-1 si riportano gli indicatori di rischio sismico in termini di PGA.

Parte d'opera	ζ_E
Arco	1.431
Spalle	1.431
Timpano	1.431
Minimo	1.431

Tabella 7-5 Indicatori di rischio sismico in termini di PGA

7.7 Verifica a liquefazione

Alla luce delle verifiche di liquefazione effettuate e riportate nella relazione geologica, il potenziale di liquefazione IL per la CPTU1, per una profondità dai 0 ai 4.80 m, risulta essere **alto** ma il cedimento registrato *non è compatibile* con la struttura.



8. CONFRONTO CON CALCOLI MANUALI

Al fine di valutare l'affidabilità dei risultati si esegue un controllo sulle reazioni alle imposte svolgendo semplici verifiche di equilibrio e prendendo in considerazione i carichi uniformemente distribuiti.

$$V = \frac{pl}{2}$$
$$H = \frac{pl^2}{8}$$

Dove:

- p è il carico uniformemente distribuito;
- l è la luce di calcolo.

Calcolo	Carico uniformemente distribuito	H [kN]	V [kN]
Manuale	Peso sottofondo e pavimentazione	79	124
SAV		75	127
Manuale	Peso sottofondo e pavimentazione Carico stradale distribuito q_{1k} Carico stradale distribuito q_{2k}	136	214
SAV		135	228

Tabella 8-1 Confronto manuale e modello di calcolo

Dalla **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** emerge come i valori siano sostanzialmente identici, pertanto il modello di calcolo eseguito con il software Aedes SAV risulta validato.

Inoltre, è stato eseguito un confronto per la tensione media di compressione sui conci di imposta considerando come carico uniformemente distribuito solo i carichi stradali.

Calcolo	Carico uniformemente distribuito	σ_{compr} [N/mm ²]
Manuale	Carichi stradali distribuiti q_{1k} e q_{rk}	0.102
SAV		0.068

Tabella 8-2 Tensione media di compressione: confronto manuale e modello di calcolo



9. DEFINIZIONE DELL'INTERVENTO

9.1 Premessa

L'opera si trova in mediocre stato di conservazione.

Dalle ispezioni e dalle indagini effettuate sono stati evidenziati i seguenti difetti:

- fessurazione della muratura;
- distacco di elementi murari;
- lesioni murie;
- presenza di patina biologica;
- distacco della malta.

La spalla del ponte lato Nord presenta un foro irregolare di sezione all'incirca romboidale di larghezza circa 90 cm ed altezza circa 100 cm, e profondità circa 75 cm; tale foro è dovuto al distacco di elementi murari a seguito di erosione della malta. Anche in prossimità dei muri d'ala (Figura 9-2), sono presenti dei fori nella muratura ma sono molto più contenuti.



Figura 9-1 Foro spalla Nord



Figura 9-2 Foro presente sul muro d'ala

Sul muro d'ala lato nord-est, la muratura in un tratto risulta essere spanciata verso l'esterno.



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto



Figura 9-3 Lesioni e patina biologica

Come si evince dalla Figura 9-4, sulla muratura non sono presenti strati di rifinitura; i fenomeni atmosferici e il corso d'acqua hanno provocato il distacco di mattoni interi; inoltre, tali difetti sono dovuti principalmente ad una mancanza di manutenzione dell'opera.



Figura 9-4 Stato di conservazione Prospetto Ovest

In sintesi, il difetto più significativo è la presenza di un foro irregolare di sezione all'incirca romboidale di larghezza circa 90 cm ed altezza circa 100 cm, e profondità circa 75 cm



nella spalla lato Nord; tale foro è dovuto al distacco di elementi murari a seguito di erosione della malta.

Le verifiche eseguite risultano soddisfatte per i carichi da Codice della Strada mentre per i casi col carico tandem e con l'azione di frenamento le verifiche non risultano soddisfatte e il moltiplicatore di collasso verticale minimo è il seguente:

- 0.78 per la combinazione con il carico tandem (carico convenzionale).

L'attività di risanamento prevede la ristilatura dei giunti e l'intervento del cuci e scuci che avviene attraverso il ripristino della continuità muraria con la rimozione di elementi di laterizio lesionati e la realizzazione di una nuova tessitura muraria con nuovi elementi, senza però spezzare la funzione statica della muratura nel corso dell'applicazione stessa.

Il consolidamento dell'opera, al fine di raggiungere la stabilità dell'opera per i carichi previsti dalle NTC 2018, viene invece eseguito con l'esecuzione di una cappa superiore in conglomerato cementizio armato in estradosso di spessore 10 cm, armata con rete elettrosaldata e ancorata ad archi di irrigidimento vincolati alle muratura di perimetro.



9.2 Consolidamento con cappa in calcestruzzo

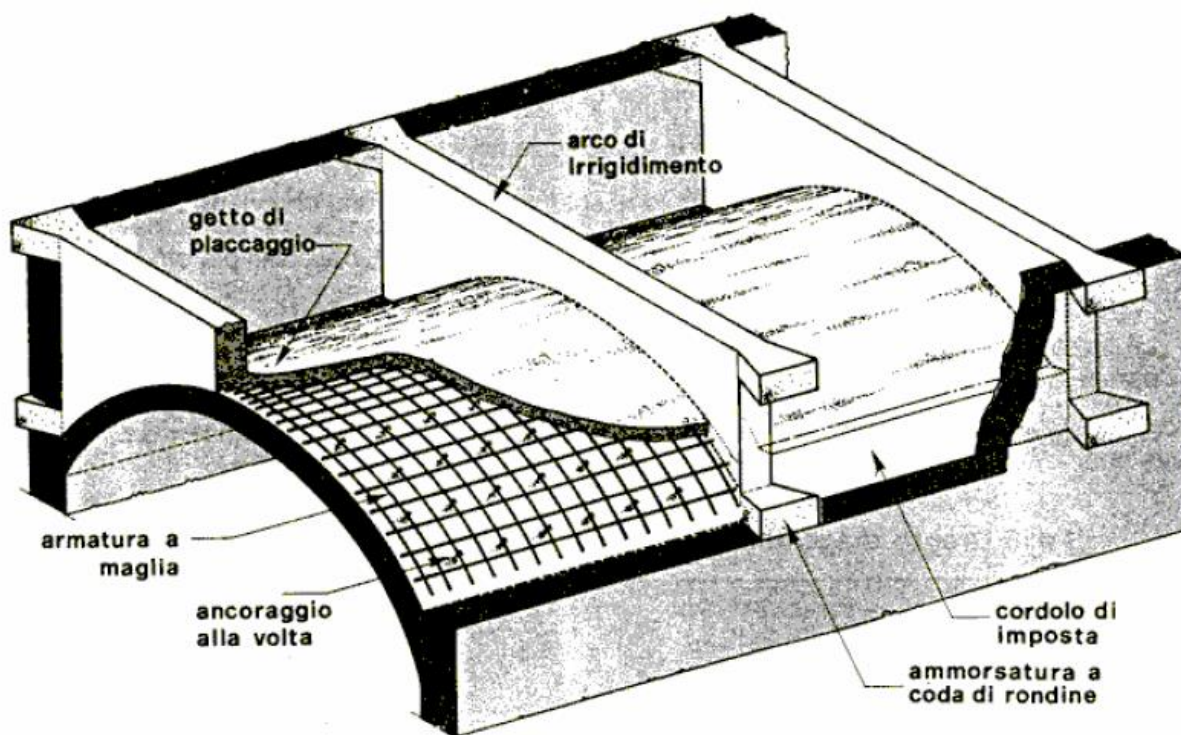


Figura 9-5 Consolidamento con cappa superiore armata

Dal punto di vista operativo, effettuata la preparazione dell'estradosso della volta, anzitutto si pone in opera l'armatura adagiando la rete metallica in modo che segua perfettamente la forma dell'estradosso della volta. Per ottenere ciò, la rete potrà essere tagliata, piegata, sovrapponendo debitamente le eventuali giunzioni. Si procederà quindi al collegamento della rete con la muratura, attraverso l'infissione di chiodi metallici nella stessa. Quindi si effettuerà il getto di calcestruzzo.

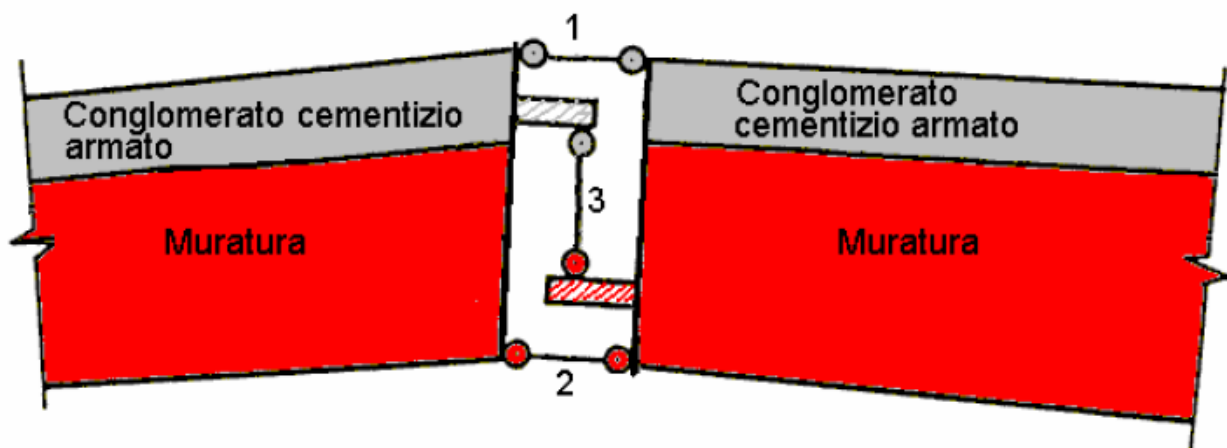
La cappa ha la funzione di aumentare la sezione resistente della struttura e di dare alla struttura finale (arco in muratura + arco in calcestruzzo sovrastante collaborante) la capacità di resistenza a trazione in corrispondenza dell'estradosso.



10. ANALISI STATO DI PROGETTO

10.1 Introduzione

Relativamente alla verifica di stabilità dell'arco, occorre inserire la modifica illustrata nella figura seguente.



I blocchi sono costituiti da due parti, una in muratura all'intradosso e una in calcestruzzo armato all'estradosso. Si vuole schematizzare il comportamento strutturale dei conci e della loro interfaccia, mantenendo, per quanto possibile, l'impostazione della metodologia di calcolo applicabile all'arco in sola muratura. Si può ipotizzare che la biella "2", ortogonale all'interfaccia e competente alla muratura, sia sempre unilatera, cioè capace di trasmettere solo sforzi di compressione, mentre la biella "1", ortogonale all'interfaccia e competente al calcestruzzo, sia bilatera, cioè capace di trasmettere sforzi ed di trazione e di compressione.

Per la schematizzazione della biella "3" parallela all'interfaccia non vi sono variazioni: possono essere trasmessi sforzi di taglio positivi e negativi.



Le operazioni di compensazione riguarderanno esclusivamente le bielle di tipo 2 della parte di arco in muratura; ma è possibile affermare già a priori che l'arco risulterà sicuramente stabile in quanto è impossibile la formazione di cerniere all'estradosso (è noto che un meccanismo di collasso può formarsi solo con cerniere alternate all'intradosso e all'estradosso). Il procedimento iterativo proseguirà fino all'individuazione di una configurazione equilibrata che rispetta le condizioni sugli sforzi nelle bielle 2.

In corrispondenza di tale configurazione occorrerà rilevare gli sforzi di trazione nelle bielle 1 della parte di arco in calcestruzzo, ed accertarsi della loro compatibilità con l'acciaio e la maglia (sezione e passo) della rete elettrosaldata scelta: lo sforzo dovrà essere inferiore alla tensione di snervamento dell'acciaio stesso. Ciò affinché sia effettivamente impossibile la formazione di cerniere all'estradosso.

Nell'impostazione del calcolo, le equazioni di equilibrio dovranno riferirsi al baricentro della sezione composta. A causa del diverso peso specifico di calcestruzzo e muratura, la posizione effettiva del baricentro non sarà a metà spessore ma dovrà essere determinata con un'operazione di media pesata.

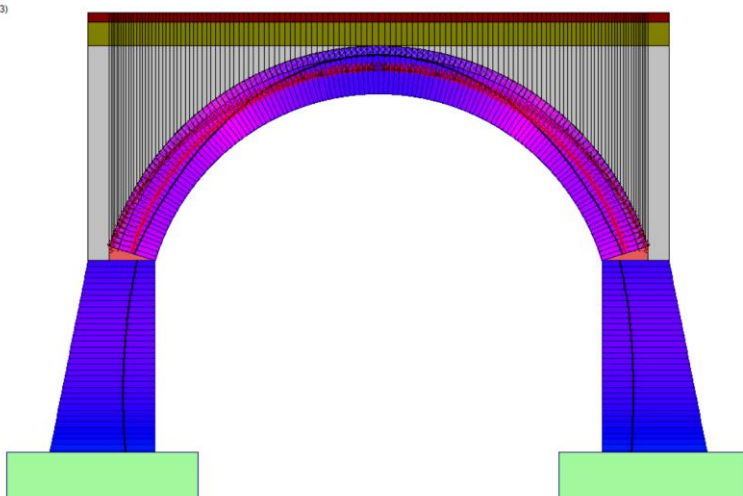


10.2 Analisi statica

Nelle figure seguenti si riportano i risultati delle analisi eseguite.

- **CCC 1: permanente incluso pesi propri**

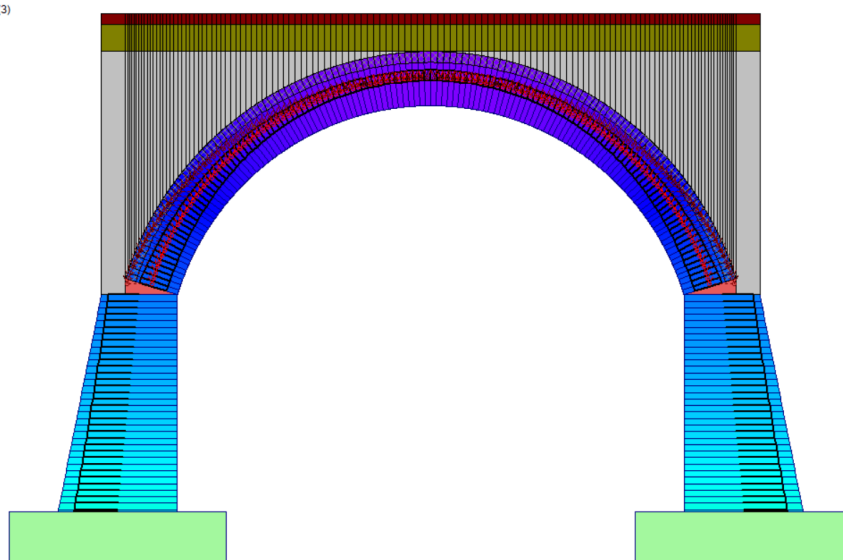
- Curva delle Pressioni
- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 1 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)
- Passo di iterazione: max



Arco STABILE - Verifica Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica Soddisfatta

Figura 10-1 CCC 1: Curva delle pressioni

- Sforzo Normale
- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 1 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)
- Passo di iterazione: max



Arco STABILE - Verifica Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica Soddisfatta

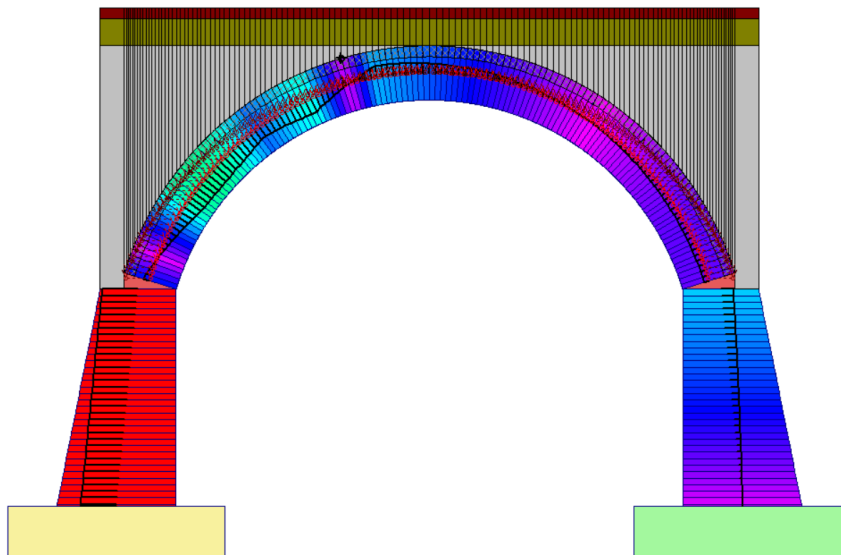
Figura 10-2 CCC 1: Sforzo Normale



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 2 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)

Arco STABILE - Verifica Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica Soddisfatta



Arco Ideale: 1 (1)				
ANALISI STATICA				
CCC 1 (3)				
Verifica Soddisfatta				
Moltiplicatore verticale di collasso				
minimo fra tutti gli Archi ideali e tutte le CCC :				1.132
Struttura:	Piedritto Sx	Arco n°:	1	CCC n°: 2
Tipo di Verifica	Arco	Pied. Sx	Pied. Dx	
Stabilità (Equilibrio della struttura)	n.d.	>> 1	>> 1	
Attrito (Taglio nei giunti)	n.d.	>> 1	>> 1	
Compressione della muratura	n.d.	>> 1	>> 1	
Trazione dei rinforzi	n.d.			

Figura 10-3 Statica CCC 1: Rapporto di elaborazione



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

• CCC 2: permanenti + carichi stradali distribuiti q_{1k}

- Curva delle Pressioni
- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 2 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)
- Passo di iterazione: max

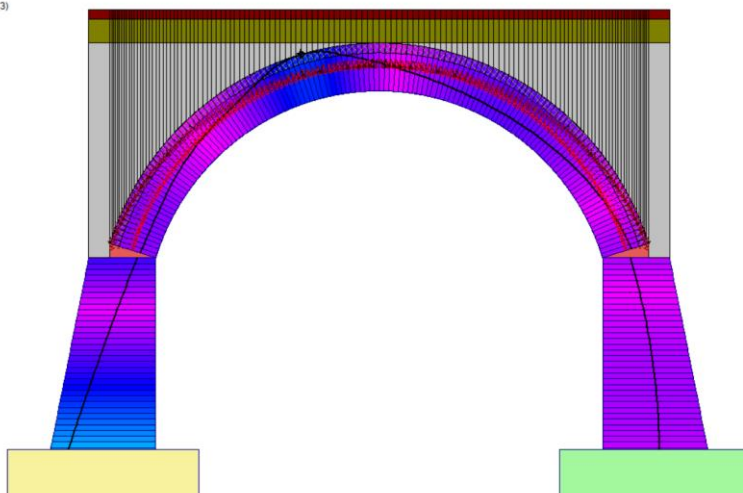


Figura 10-4 CCC 2: Curva delle pressioni

- Sforzo Normale
- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 2 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)
- Passo di iterazione: max

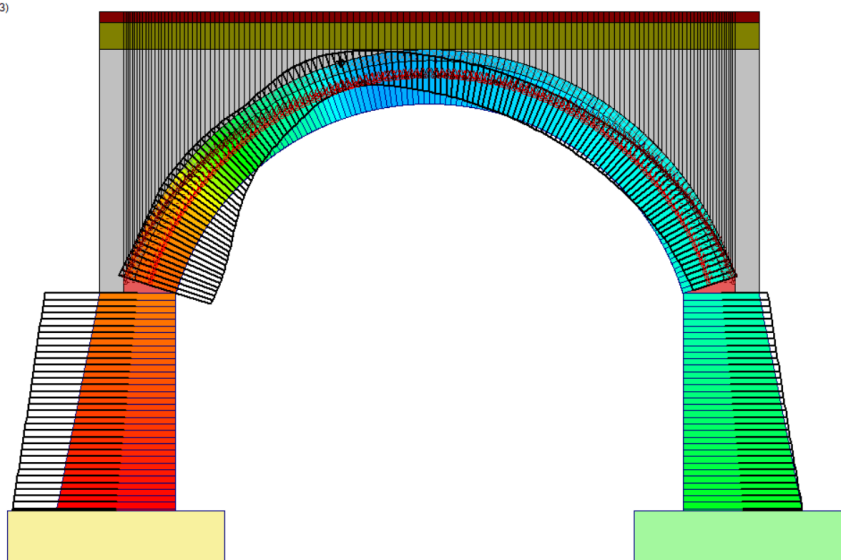


Figura 10-5 CCC 2: Sforzo Normale



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 2 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)

Arco STABILE - Verifica Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica Soddisfatta

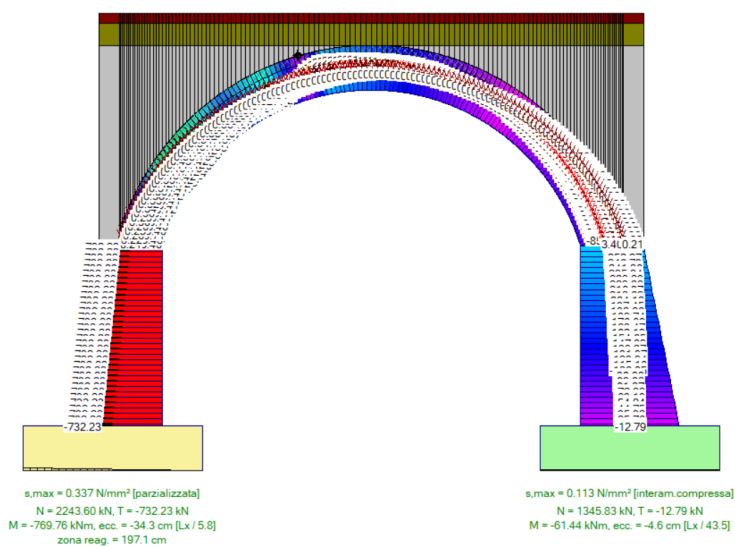


Figura 10-6 CCC 2: Taglio

- Angoli di Scorrimento
- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 2 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)
- Passo di livellazione: max

Arco STABILE - Verifica Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica Soddisfatta

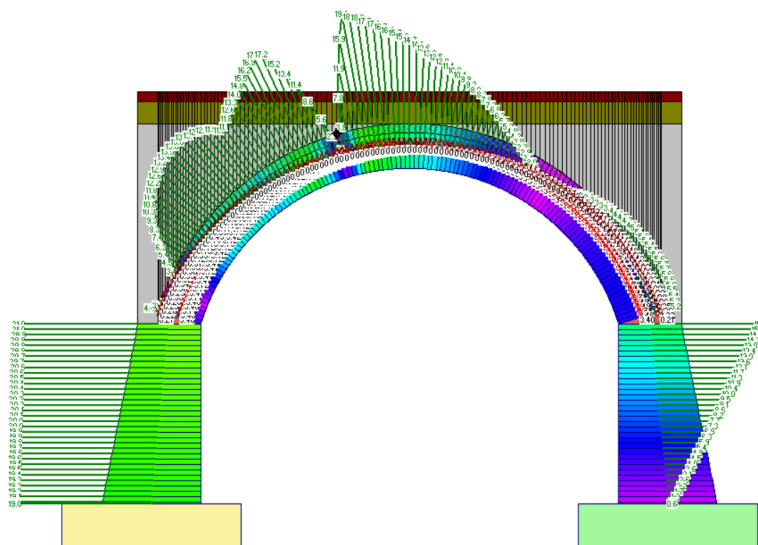


Figura 10-7 CCC 2: Angoli di scorrimento



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

- Tensioni di Compressione
- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 2 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)
- Passo di iterazione: max

Arco STABILE - Verifica Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica Soddisfatta

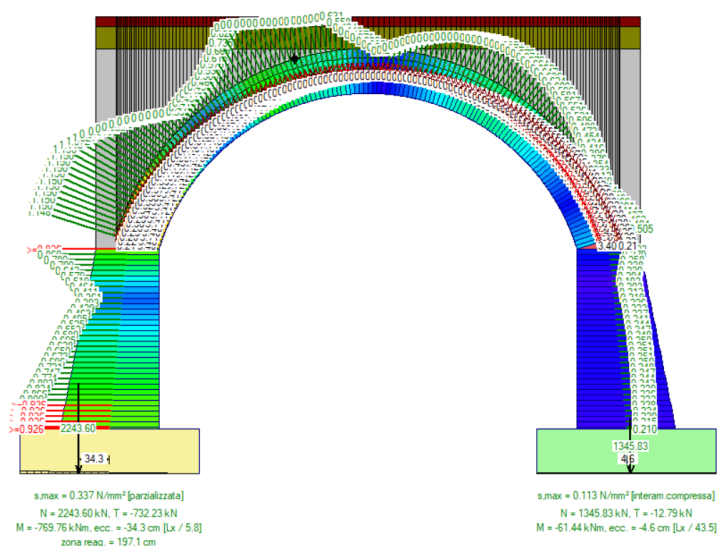


Figura 10-8 CCC 2: Tensioni di compressione

Arco Ideale: 1 (1)					
ANALISI STATICA					
CCC 2 (3)		Info Multiplicatore verticale di collasso			
Verifica Soddisfatta		minimo fra tutti gli Archi ideali e tutte le CCC : 1.132			
		Struttura:	Piedritto Sx	Arco n°:	1
				CCC n°:	2
Tipo di Verifica	Arco	Pied. Sx	Pied. Dx		
Stabilità (Equilibrio della struttura)	>> 1	>> 1	1.600		
Attrito (Taglio nei giunti)	>> 1	>> 1	>> 1		
Compressione della muratura	1.271	1.132	1.444		
Trazione dei rinforzi	5.967				

Figura 10-9 Statica CCC 2: Rapporto di elaborazione



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

• **CCC 3: permanenti + carichi stradali q_{1k} + azione di frenamento**

- Curva delle Pressioni
- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 3 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)
- Passo di iterazione: max

Arco STABILE - Verifica Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica Soddisfatta

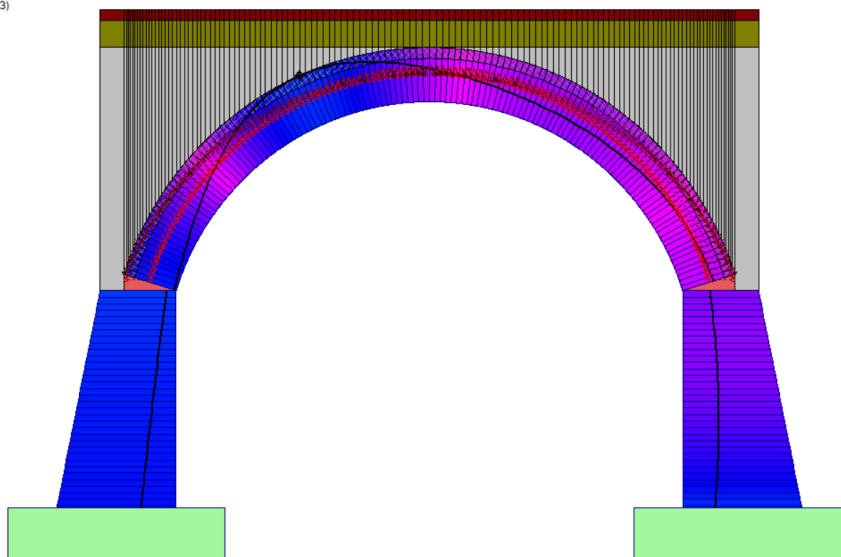


Figura 10-10 CCC 3: Curva delle pressioni

- Sforzo Normale
- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 3 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)
- Passo di iterazione: max

Arco STABILE - Verifica Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica Soddisfatta

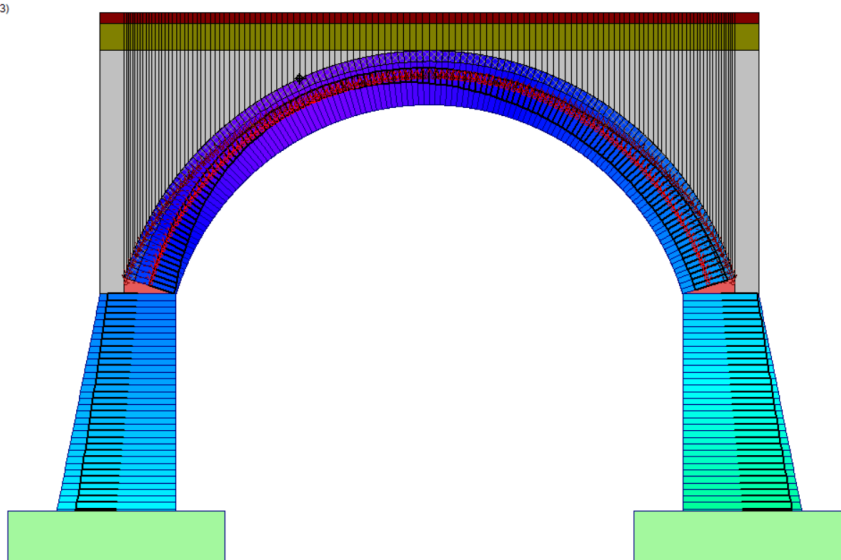


Figura 10-11 CCC 3: Sforzo Normale



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

- Angoli di Scorrimento
- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 3 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)
- Passo di iterazione: max

Arco STABILE - Verifica Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica Soddisfatta

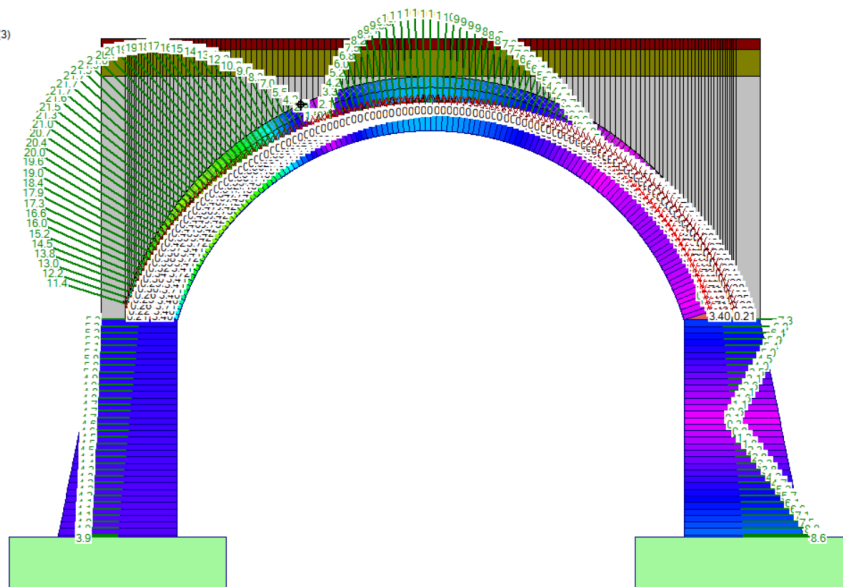


Figura 10-12 CCC 3: Angoli di scorrimento

- Tensioni di Compressione
- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- Combinazione di Condizioni di Carico: 3 (3)
- Arco ideale corrente: 1 (1)
- Passo di iterazione: max

Arco STABILE - Verifica Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica Soddisfatta

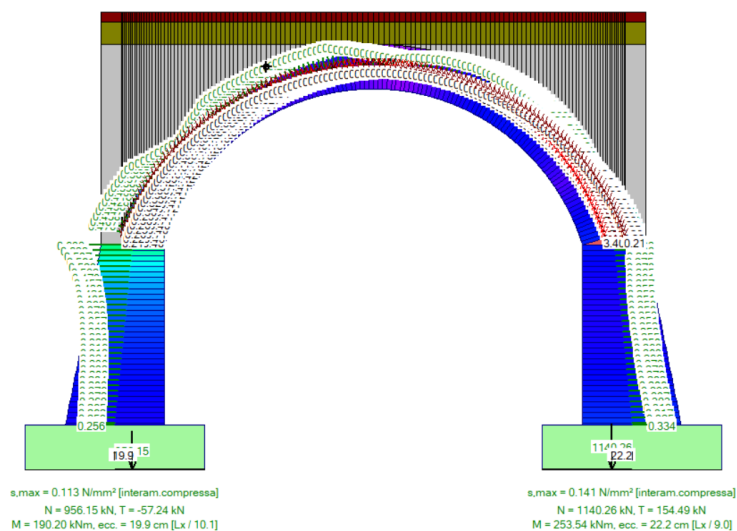


Figura 10-13 CCC 3: Tensioni di compressione



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

Arco Ideale: 1 (1)							
<div><div>III</div><div>ANALISI STATICA</div></div>							
CCC 3 (3)		Info ...	Moltiplicatore verticale di collasso				
Verifica Soddisfatta			minimo fra tutti gli Archi ideali e tutte le CCC :			1.132	
			Struttura:	Piedritto Sx	Arco n°:	1	CCC n°:
Tipo di Verifica		Arco		Pied. Sx		Pied. Dx	
Stabilità (Equilibrio della struttura)		>> 1		>> 1		>> 1	
Attrito (Taglio nei giunti)		>> 1		>> 1		>> 1	
Compressione della muratura		>> 1		>> 1		>> 1	
Trazione dei rinforzi		>> 1					

Figura 10-14 Statica CCC 3: Rapporto di elaborazione



- **CCC 4: permanenti + carichi stradali distribuiti q_{ik}**

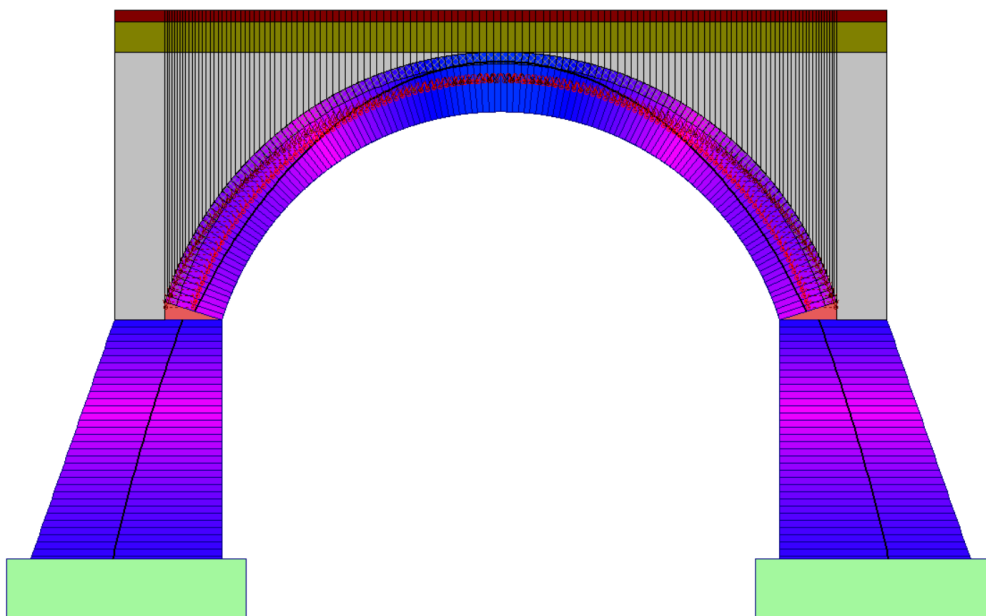


Figura 10-15 CCC 4: Curva delle pressioni

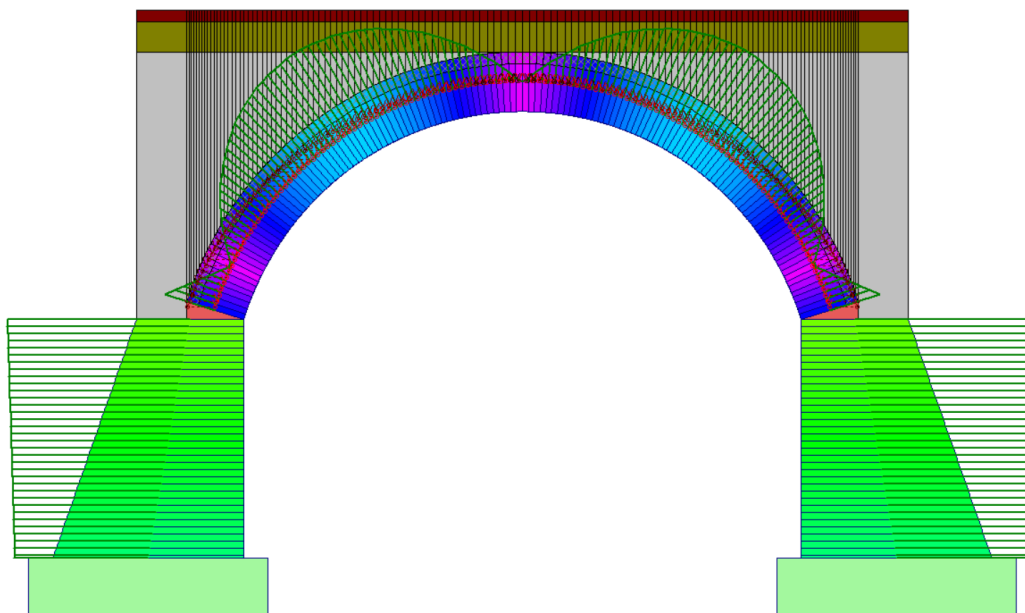


Figura 10-16 CCC 4: Angoli di scorrimento



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

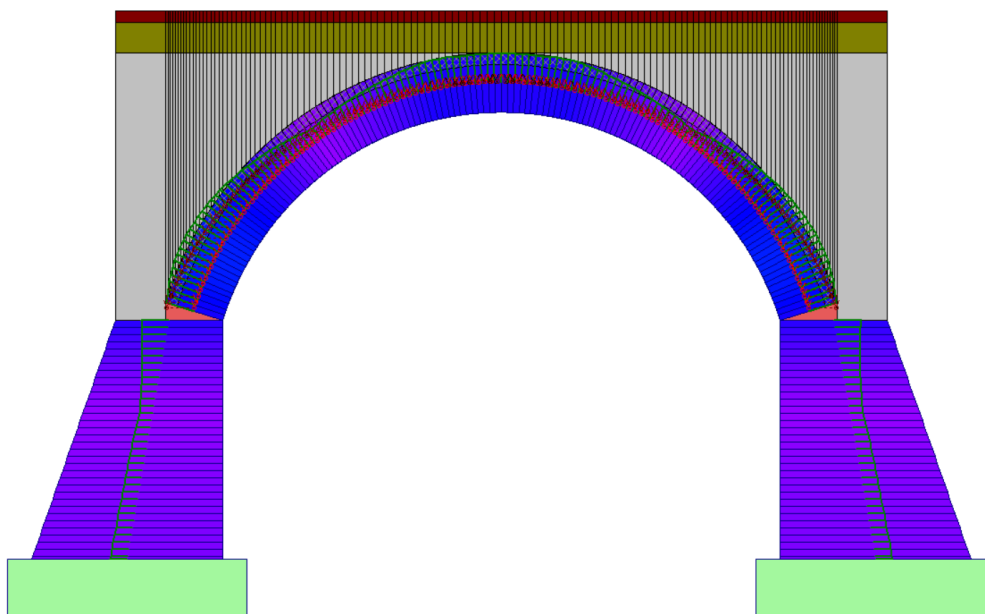


Figura 10-17 CCC 4: Tensioni di compressione

Arco Ideale: 1 (1)						
<div><div>III</div><div>ANALISI STATICA</div></div>						
CCC 4 (4)		Info	Moltiplicatore verticale di collasso			
Verifica Soddisfatta			minimo fra tutti gli Archi ideali e tutte le CCC :			1.271
		Struttura:	Arco	Arco n°:	1	CCC n°: 2
Tipo di Verifica		Arco		Pied. Sx		Pied. Dx
Stabilità (Equilibrio della struttura)		>> 1		>> 1		>> 1
Attrito (Taglio nei giunti)		>> 1		>> 1		>> 1
Compressione della muratura		>> 1		>> 1		>> 1
Trazione dei rinforzi		>> 1				

Figura 10-18 Statica CCC 4: Rapporto di elaborazione



10.3 Riepilogo analisi statica

Come riportato nelle tabelle seguenti, le verifiche risultano soddisfatte per tutte le combinazioni delle azioni considerate e il moltiplicatore verticale di collasso minimo fra tutte le combinazioni delle condizioni di carico risulta pari a 1.271 per la verifica a compressione della muratura della spalla sinistra.

ARCO				
CCC	Stabilità (Equilibrio della struttura)	Attrito (Taglio nei giunti)	Compressione della muratura	Trazione dei rinforzi
1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
2	>> 1	>> 1	1.271	5.967
3	>> 1	>> 1	>> 1	>> 1
4	>> 1	>> 1	>> 1	>> 1

SPALLA sx			
CCC	Stabilità (Equilibrio della struttura)	Attrito (Taglio nei giunti)	Compressione della muratura
1	>> 1	>> 1	>> 1
2	>> 1	>> 1	1.132
3	>> 1	>> 1	>> 1
4	>> 1	>> 1	>> 1

SPALLA dx			
CCC	Stabilità (Equilibrio della struttura)	Attrito (Taglio nei giunti)	Compressione della muratura
1	>> 1	>> 1	>> 1
2	1.600	>> 1	1.444
3	>> 1	>> 1	>> 1
4	>> 1	>> 1	>> 1



10.4 Analisi sismica +X

Nelle figure seguenti si riportano la curva delle pressioni e le tensioni di compressione per l'analisi sismica in direzione +X.

- Curva delle Pressioni
- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- COMBINAZIONE DI CARICO SISMICA +X: molt.: 0.269 [molt.coli. dell'arco: 0.755]
- Arco ideale corrente: 1 (1)
- Passo di iterazione: max

Arco STABILE - Verifica Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica Soddisfatta

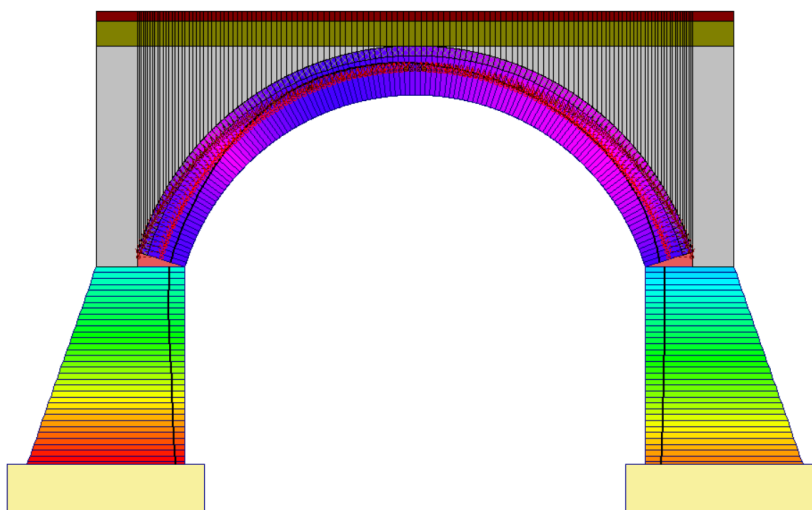


Figura 10-19 Analisi sismica +X: Curva delle pressioni

- Sforzo Normale
- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- COMBINAZIONE DI CARICO SISMICA +X: molt.: 0.269 [molt.coli. dell'arco: 0.755]
- Arco ideale corrente: 1 (1)
- Passo di iterazione: max

Arco STABILE - Verifica Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica Soddisfatta

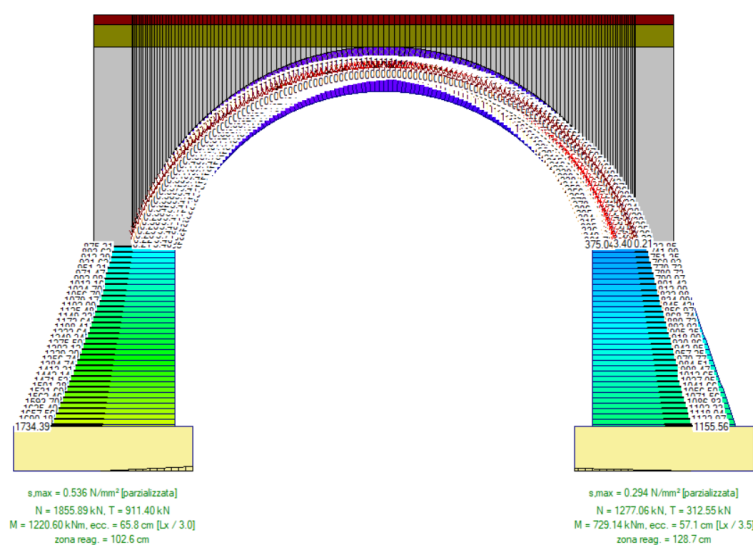


Figura 10-20 Analisi sismica +X: Sforzo Normale



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- COMBINAZIONE DI CARICO SISMICA +X: molt.: 0.269 [molt.coll. dell'arco: 0.755]
- Arco ideale corrente: 1 (1)

Arco STABILE - Verifica Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica Soddisfatta

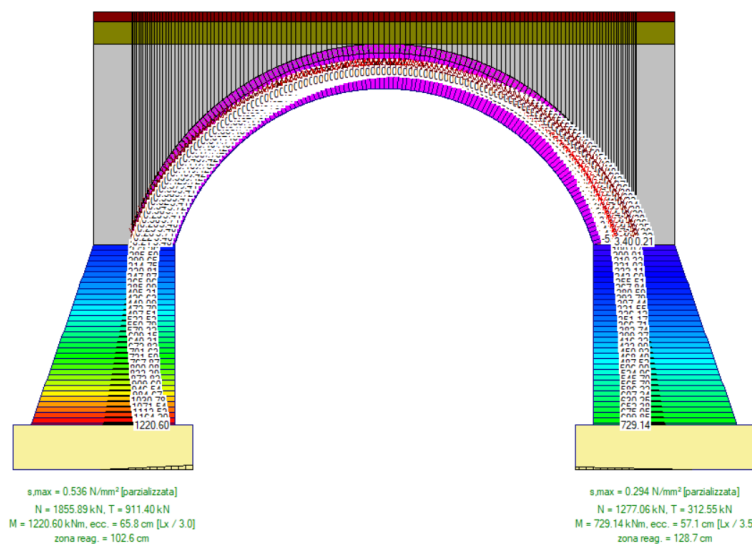


Figura 10-21 Analisi sismica +X: Momento

- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- COMBINAZIONE DI CARICO SISMICA +X: molt.: 0.269 [molt.coll. dell'arco: 0.755]
- Arco ideale corrente: 1 (1)

Arco STABILE - Verifica Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica Soddisfatta

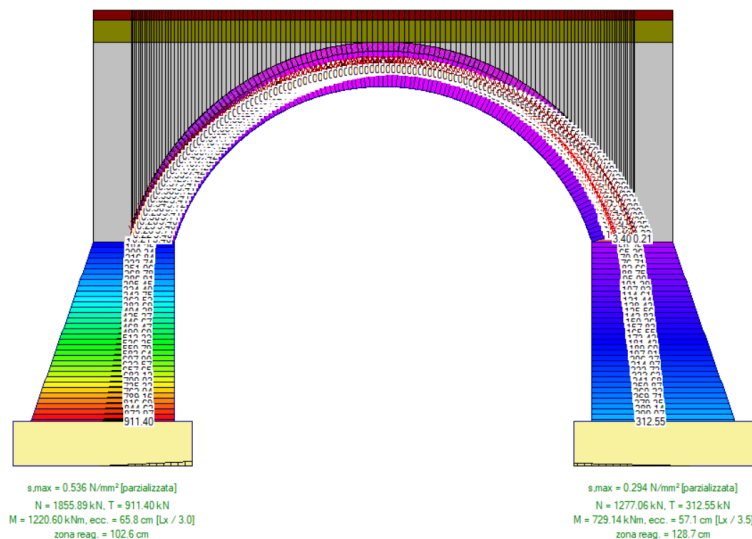


Figura 10-22 Analisi sismica +X: Taglio



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

- Angoli di Scommento
- Condizione di Carico Elementare: 1 (8)
- COMBINAZIONE DI CARICO SISMICA +X: molt.: 0.269 [molt.coll. dell'arco: 0.755]
- Arco ideale corrente: 1 (1)
- Passo di iterazione: max

Arco STABILE - Verifica Soddisfatta
Volta STABILE - Verifica Soddisfatta

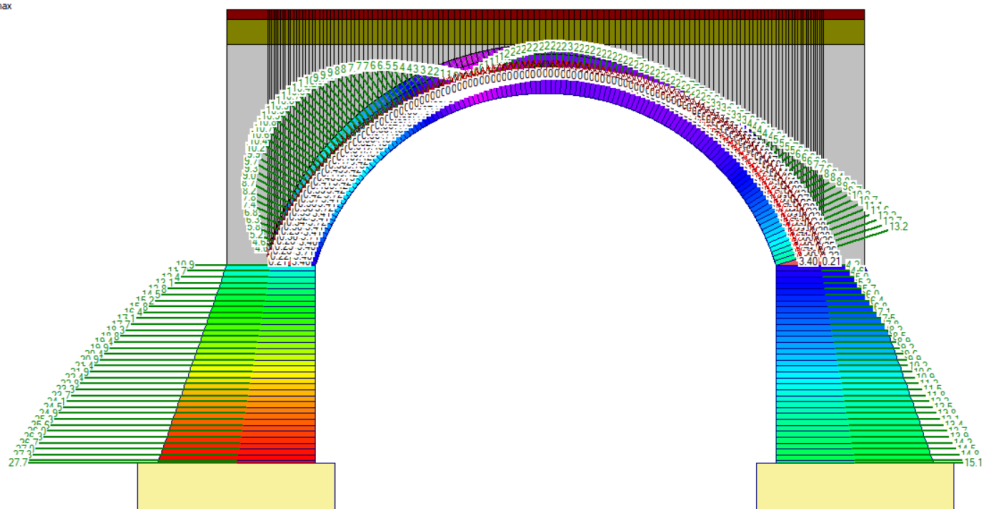


Figura 10-23 Analisi sismica +X: Angoli di scorrimento



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

10.5 Analisi sismica -X

Nelle figure seguenti si riportano la curva delle pressioni, le tensioni di compressione, gli angoli di scorrimento e le caratteristiche di sollecitazioni N, M e T per l'analisi sismica in direzione -X.



Figura 10-24 Analisi sismica -X: Curva delle pressioni



Figura 10-25 Analisi sismica -X: Sforzo Normale N



Figura 10-26 Analisi sismica -X: Momento M



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

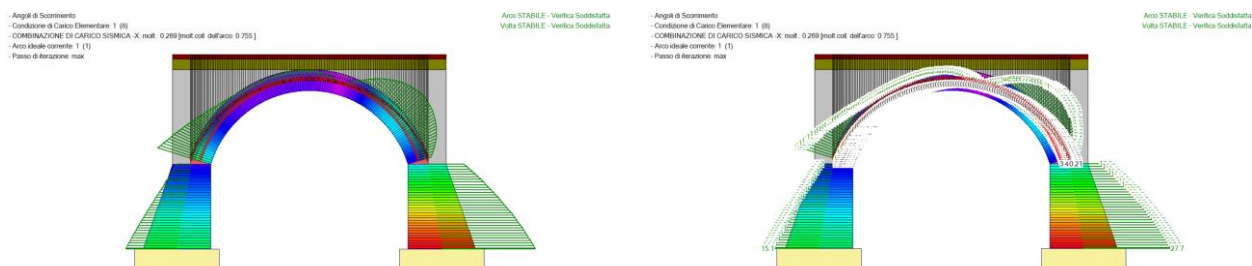


Figura 10-27 Analisi sismica -X: Angoli di scorrimento

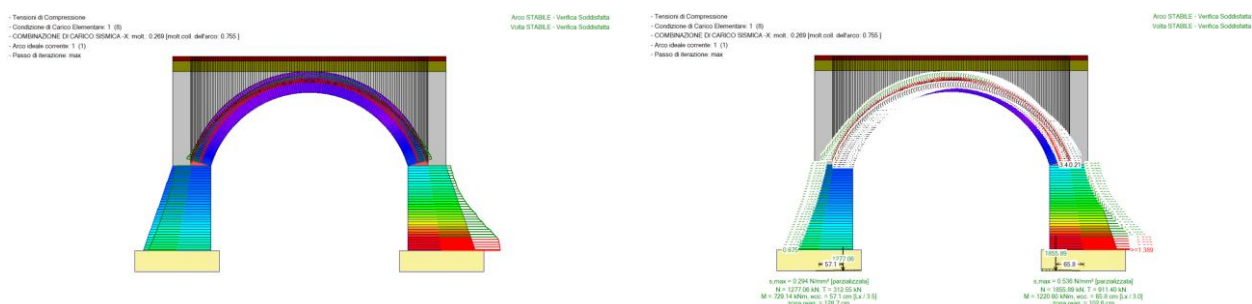


Figura 10-28 Analisi sismica -X: Tensioni di compressione



10.6 Riepilogo risultati analisi sismica

Come riportato nella Figura 10-29 le verifiche risultano soddisfatte per la combinazione sismica.


 ANALISI SISMICA		Info Moltiplicatore orizzontale di collasso minimo fra tutti gli Archi ideali e i due versi : 0.269 Struttura: Piedritto Sx Arco n°: 1 Verso: - X					
Moltiplicatori di collasso	Arco		Pied. Sx		Pied. Dx		Timpano
Tipo di Verifica	+ X	- X	+ X	- X	+ X	- X	
Stabilità (Equilibrio della struttura)	9.999	9.999	0.311	1.041	1.041	0.311	0.499
Attrito (Taglio nei giunti)	0.755	0.755	0.338	9.998	9.998	0.338	
Compressione della muratura	2.202	2.202	0.269	0.985	0.985	0.269	
Trazione dei rinforzi	1.146	1.146					
Verifica per SLV							
domanda: PGA,DLV = 0.263 g TR,DLV = 712 anni		Verifica Soddisfatta		ζ_E	Indicatori di Rischio Sismico		
	PGA,CLV (g)	TR,CLV (anni)	PGA,CLV / PGA,DLV		TR,CLV / TR,DLV		
Arco	0.377	>=2475	1.431		3.476		
Piedritti	0.377	>=2475	1.431		3.476		
Timpano	0.377	>=2475	1.431		3.476		
Minimo	0.377	>=2475	1.431		3.476		

Figura 10-29 Analisi sismica: rapporto di elaborazione



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

Nelle seguenti tabelle si riportano i moltiplicatori di collasso per i tipi di verifica eseguiti sia per l'arco che per le spalle.

Arco				
Direzione	Stabilità	Attrito	Compressione	Trazione dei rinforzi
+X	9.999	0.755	2.202	1.146
-X	9.999	0.755	2.202	1.146

Spalla Sx			
Direzione	Stabilità	Attrito	Compressione
+X	0.311	0.338	0.269
-X	1.041	9.998	0.985
Spalla Dx			
Direzione	Stabilità	Attrito	Compressione
+X	1.041	9.998	0.985
-X	0.311	0.338	0.269

Nella Tabella 10-1 si riportano gli indicatori di rischio sismico in termini di PGA.

Parte d'opera	ζ_E
Arco	1.431
Spalle	1.431
Timpano	1.431
Minimo	1.431

Tabella 10-1 Indicatori di rischio sismico in termini di PGA



10.7 Verifica unione Ancorata Post-Installata Acciaio-Cls

L'unione acciaio-cla viene realizzata impiegando 4 ancoranti chimici M16 e una piastra 250x250x15 mm.

Nella seguente tabella si riportano le proprietà della barriera:

h_{barriera}	<i>altezza barriera</i>	1.5	m
l_{barriera}	<i>Interasse barriera integrata</i>	2.25	m
G_{barriera}	<i>peso barriera al metro lineare</i>	0.50	kN/m

Nella seguente tabella si riporta l'analisi dei carichi.

Classe	<i>classe acciaio da carpenteria</i>	S235	-
f_{yk}	<i>tensione di snervamento caratteristica</i>	235	MPa
W_{pl}	<i>modulo plastico del montante in acciaio</i>	61.1	cm ³
M_{pl}	<i>momento plastico del montante in acciaio calcolato con la resistenza caratteristica</i>	14.36	kNm
h_{rinf}	<i>altezza del piatto di rinforzo a base montante</i>	15	cm
S_{piastro}	<i>spessore della piastra di base del montante</i>	1.5	cm
h_{cordolo}	<i>altezza del cordolo (esclusa la soletta)</i>	30	cm
h_{pav}	<i>altezza pavimentazione stradale</i>	20	cm
h_{CP}	<i>altezza cerniera plastica dal piano stradale</i>	26.5	cm
h_{urto}	<i>altezza urto dal piano stradale</i>	100	cm
F_{urto}	<i>forza d'urto che produce lo snervamento del montante in acciaio</i>	19.5	kN
M_{urto}	<i>momento d'urto trasferito all'estradosso del cordolo dal montante in acciaio</i>	17.6	kNm
V_{urto}	<i>taglio orizzontale d'urto trasferito all'estradosso del cordolo dal montante in acciaio</i>	19.5	kN
Y_{sr}	<i>fattore di amplificazione delle azioni da urto per valutazione degli effetti sul supporto</i>	1.50	-
M_{urto,d}	<i>momento d'urto agente all'estradosso del cordolo per il progetto del supporto del montante in acciaio</i>	26.4	kNm
V_{urto,d}	<i>taglio orizzontale d'urto agente all'estradosso del cordolo per il progetto del supporto del montante in acciaio</i>	29.3	kN
f_{urto}	<i>azione d'urto al metro lineare</i>	13.0	kN/m



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

Nella tabella seguente si riportano le sollecitazioni negli ancoranti.

Sollecitazioni nei tirafondi (fattorizzate e comprensive di non linearità)				
Condizione	Combinazione	Sforzo normale		Taglio
		kN		kN
		1, 2	3, 4	1, 2, 3, 4
Urto da strada verso ricettore	Eccezionale	compressi	70.33	7.33

Le caratteristiche dei materiali sono le seguenti:

Proprietà degli ancoranti			
classe	classe degli ancoranti	8.8	[-]
f_{yk}	resistenza a snervamento caratteristica	640	[MPa]
f_{uk}	resistenza a rottura caratteristica	800	[MPa]
φ	diametro degli ancoranti	16	[mm]
Proprietà calcestruzzo del supporto			
R_{ck}	resistenza cubica caratteristica	35.00	[MPa]
f_{ck}	resistenza cilindrica caratteristica	28.00	[MPa]
f_{ctm}	resistenza media a trazione	2.77	[MPa]
f_{ctk}	resistenza caratteristica a trazione	1.94	[MPa]
aderenza	condizione di aderenza delle barre nel supporto	buona	[-]
f_{bk}	resistenza di aderenza caratteristica	4.36	[MPa]
γ_M	coefficiente parziale di sicurezza	1.00	[-]
f_{bd}	resistenza di aderenza di progetto	4.36	[MPa]
Proprietà Acciaio staffe nuove			
tipologia	tipologia dell'acciaio di rinforzo	B450C	[-]
f_{yk}	resistenza a snervamento caratteristica	450.00	[MPa]



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

Si riportano di seguito le verifiche associate alla singola tipologia di collasso.

Verifica a trazione: Failure of supplementary reinforcement			
Riferimenti: §7.2.1.9 UNI EN 1992-4:2018			
Steel failure			
d_{max}	distanza massima di efficacia delle barre di rinforzo dagli ancoranti esterni (0,75hef)	188	[mm]
i_{anc}	interasse dei tirafondi tesi	188	[mm]
L_{tot}	Lunghezza totale di supporto attraversata da rinforzi efficaci	563	[mm]
Passo staffe	passo delle staffe nuove (pos. A)	100	[mm]
n bracci	numero dei bracci di staffa nella zona efficace (pos. A)	1	[-]
n_{re}	numero di barre di rinforzo totali nella zona efficace (pos. A)	6	[-]
φ_{re}	diametro barre di rinforzo nuove pos. A (max φ16)	12	[mm]
A_{re}	area barre di rinforzo nuove pos. A (max φ16)	113	A_{re}
N_{rk_re_anc}	resistenza a trazione caratteristica delle barre di rinforzo	305	N_{rk_re_anc}
γ_{Ms_re}	coefficiente parziale di sicurezza	1.00	γ_{Ms_re}
N_{rd_re_anc}	resistenza a trazione di progetto delle barre di rinforzo	305	N_{rd_re_anc}
N_{Ed_re}	azione di trazione del gruppo delle barre di rinforzo	141	N_{Ed_re}
C/D	Rapporto Capacità/Domanda	2.17	C/D

Verifica a trazione: Failure of supplementary reinforcement			
Riferimenti: §7.2.1.9 UNI EN 1992-4:2018			
Anchorage failure			
d_{max}	distanza massima di efficacia delle barre di rinforzo dagli ancoranti esterni (0,75hef)	188	[mm]
i_{anc}	interasse dei tirafondi tesi	188	[mm]
L_{tot}	Lunghezza totale di supporto attraversata da rinforzi efficaci	563	[mm]
Passo staffe	passo delle staffe nuove (pos. A)	100	[mm]
n bracci	numero dei bracci di staffa nella zona efficace (pos. A)	1	[-]
n_{re}	numero di barre di rinforzo totali nella zona efficace (pos. A)	6	[-]
φ_{re}	diametro barre di rinforzo nuove pos. A (max φ16)	12	[mm]
φ_{re}	diametro barre di rinforzo nuove pos. A (max φ16)	12	[mm]
tipologia ancoraggio	tipologia ancoraggio barre	non uncinati	[-]
l_{eff_min}	lunghezza di ancoraggio minima	0	[mm]



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

l_1	lunghezza di ancoraggio	220	[mm]
α_1	fattore che tiene conto della forma delle barre	0.7	[-]
α_2	fattore che tiene conto del ricoprimento	0.7	[-]
$N_{rd_a}^0$	resistenza a trazione di progetto della singola barra ancorata (pos.A)	74	[kN]
N_{rd_a}	resistenza a trazione di progetto delle barre di rinforzo	442	[kN]
N_{Ed_re}	azione di trazione del gruppo delle barre di rinforzo	141	[kN]
C/D	Rapporto Capacità/Domanda	3.15	[-]

Verifica a taglio: concrete pry-out failure			
Riferimenti: §7.2.2.4 UNI EN 1992-4:2018			
k_8	coefficiente che tiene conto della profondità dell'ancorante	2.0	[-]
N_{Rkc}	resistenza a trazione del gruppo di ancoranti caratteristica	305	[kN]
V_{Rkcp}	resistenza caratteristica a pry-out	458	[kN]
γ_{Mcp}	coefficiente parziale di sicurezza	1.20	[-]
V_{Rdcp}	resistenza di progetto a pry-out	382	[kN]
V_{Ed}	azione di taglio del gruppo delle barre di rinforzo	29	[kN]
C/D	Rapporto Capacità/Domanda	13.03	[-]

Verifica a taglio: Failure of supplementary reinforcement			
Riferimenti: §7.2.2.6 UNI EN 1992-4:2018			
Steel failure			
c	distanza del tassello dal bordo del supporto	31	[mm]
d_{max}	distanza massima di efficacia delle barre di rinforzo dagli ancoranti esterni (0,75c1)	23	[mm]
i_{anc}	interasse dei tirafondi tesi	188	[mm]
L_{tot}	Lunghezza totale di supporto attraversata da rinforzi efficaci	234	[mm]
Passo staffe	passo delle staffe nuove (pos. A)	100	[mm]
n bracci	numero dei bracci di staffa nella zona efficace (pos. A)	1	[-]
n_{re}	numero di barre di rinforzo totali nella zona efficace (pos. A)	2	[-]
φ_{re}	diametro barre di rinforzo nuove pos. A (max φ16)	12	[mm]
A_{re}	area barre di rinforzo nuove pos. A (max φ16)	113	[mm ²]
k₁₀	coefficiente che tiene conto dell'efficienza del tipo di rinforzo	0.5	[-]
N_{rk_re_anc}	resistenza a trazione caratteristica delle barre di rinforzo ancorate completamente	72	[kN]
γ_{Ms_re}	coefficiente parziale di sicurezza	1.00	[-]



COMUNE DI SALA BOLOGNESE - CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA
VERIFICA SISMICA E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI MANUTENZIONE
STRAORDINARIA PER LA MESSA IN SICUREZZA DI PONTI COMUNALI
Relazione di verifica Ponte Via Carline - Stato di Fatto e di Progetto

N_{rd_re}	resistenza a trazione di progetto delle barre di rinforzo	72	[kN]
V_{Ed_re}	azione di taglio del gruppo delle barre di rinforzo	15	[kN]
C/D	Rapporto Capacità/Domanda	4.9	[-]

Verifica a taglio: Failure of supplementary reinforcement			
Riferimenti: §7.2.2.6 UNI EN 1992-4:2018			
Anchorage failure			
c	distanza del tassello dal bordo del supporto	31	[mm]
d_{max}	distanza massima di efficacia delle barre di rinforzo dagli ancoranti esterni (0,75c1)	23	[mm]
i_{anc}	interasse dei tirafondi tesi	188	[mm]
L_{tot}	Lunghezza totale di supporto attraversata da rinforzi efficaci	234	[mm]
Passo staffe	passo delle staffe nuove (pos. A)	100	[mm]
n bracci	numero dei bracci di staffa nella zona efficace (pos. A)	1	[-]
n_{re}	numero di barre di rinforzo totali nella zona efficace (pos. A)	2	[-]
Φ_{re}	diametro barre di rinforzo nuove pos. A (max φ16)	12	[mm]
l_{eff_min}	lunghezza di ancoraggio minima	48	[mm]
l₁	lunghezza di ancoraggio	44	[mm]
α₁	fattore che tiene conto della forma delle barre	0.7	[-]
α₂	fattore che tiene conto del ricoprimento	0.7	[-]
N⁰_{rd_a}	resistenza a trazione di progetto della singola barra ancorata (esistente)	0	[kN]
N⁰_{rd_a}	resistenza a trazione di progetto della singola barra ancorata (pos. A)	15	[kN]
N_{rd_a}	resistenza a trazione di progetto totale delle barre di rinforzo	29	[kN]
V_{Ed_re}	azione di taglio del gruppo delle barre di rinforzo	15	[kN]
C/D	Rapporto Capacità/Domanda	2.00	[-]



Verifica combinata taglio-trazione: Steel Failure of fastener

Riferimenti: §7.2.3.1 UNI EN 1992-4:2018

N_{Rds}	resistenza di progetto a rottura dell'ancorante	96	[kN]
N_{Ed}	Trazione massima dell'ancorante	70	[kN]
V_{Rds}	resistenza di progetto a rottura dell'ancorante	38	[kN]
V_{Ed}	Trazione massima dell'ancorante	7	[kN]
C/D	Rapporto capacità domanda	1.74	[-]

Verifica combinata taglio-trazione: Failure modes other than steel failure

Riferimenti: §7.2.3.1 UNI EN 1992-4:2018

N_{Rdl}	resistenza di progetto a trazione minima degli altri meccanismi	305	[kN]
N_{Ed}	Trazione massima dell'ancorante	141	[kN]
V_{Rdl}	resistenza di progetto a taglio minima degli altri meccanismi	29	[kN]
V_{Ed}	Trazione massima dell'ancorante	15	[kN]
C/D	Rapporto Capacità/Domanda	1.50	[-]