

PROVINCIA DI LECCO
COMUNE DI CALOLZIOCORTE

VERIFICA STATICA PONTE IN CORSO EUROPA SUL TORRENTE CARPINE

PROGETTO DEFINITIVO

ELABORATO: **Relazione di valutazione della sicurezza**

DATA: **Dicembre 2021**
FILE: **1040**
SCALA: **-**

01.01

AGGIORNAMENTI: **-**

RICHIEDENTE:



Comune di Calolziocorte
P.zza Vittorio Veneto 13 - 23801 Calolziocorte (LC)
SETTORE SERVIZI DEL TERRITORIO

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO: Arch. **Ottavio Federici**

● Ing. LORENZO AURI ●
STUDIO D'INGEGNERIA

via Guido da Suzzara, 18 - 46029 SUZZARA (MN)
Telfax 0376.525175 - @mail: studioauri@tin.it

Indice

Indice	3
Relazione tecnica e valutazione della sicurezza	5
1. Premessa	5
2. Descrizione generale dell'opera	5
Analisi storico-critica	6
Esito del rilievo geometrico-strutturale	6
Valutazione dello stato di danno	6
Livelli di conoscenza	7
3. Inquadramento normativo.....	7
4. Vita nominale, classe d'uso e periodo di riferimento	7
5. Azioni agenti sugli impalcati.....	7
Azioni permanenti	7
Peso proprio degli elementi strutturali g_1	7
Carichi permanenti portati g_2	7
Azioni variabili da traffico	8
Carichi verticali q_1	8
Incremento dinamico addizionale q_2	9
Azione longitudinale di frenamento o di accelerazione q_3	9
Azione centrifuga q_4	9
Azione di neve e di vento q_5	10
Azioni idrodinamiche q_6	10
Azioni della temperatura q_7	10
Azioni sui parapetti e urto di veicoli in svio q_8	10
Resistenze passive dei vincoli q_9	10
Azioni sismiche	10
6. Caratterizzazione meccanica dei materiali esistenti	10
Strutture in muratura.....	10
Strutture in c.a.	11
7. Analisi globale.....	11
Modellazione della struttura	12
Informazioni sul codice di calcolo adottato.....	12
Modellazione delle azioni.....	12

Casi di carico adottati	12
Combinazioni di carico adottate	12
Risultati delle analisi	14
8. Ipotesi di intervento	16
9. Considerazioni conclusive	19

Relazione tecnica e valutazione della sicurezza

1. Premessa

Nell'ambito dei controlli predisposti per la verifica dello stato di conservazione delle opere infrastrutturali provinciali, l'Amministrazione del Comune di Calolziocorte (LC) ha affidato al sottoscritto ing. Lorenzo Auri l'incarico di condurre una valutazione della sicurezza dell'opera in oggetto e definire una strategia di intervento che ne consenta il consolidamento ed il rafforzamento.

Con il presente documento, redatto in conformità al punto 10.1 del D.M. delle Infrastrutture e dei Trasporti del 17/01/2018 – “Aggiornamento delle Norme Tecniche sulle Costruzioni”, si procede innanzitutto ad una descrizione dell'opera, all'individuazione dei fenomeni di degrado e di danneggiamento che la interessano ed alla valutazione dei livelli di sicurezza da essa raggiunti nei confronti delle azioni statiche e sismiche agenti. Si procederà quindi sulla base delle evidenze raccolte alla formulazione di un'ipotesi di intervento che consenta la riparazione ed il rafforzamento dell'opera d'arte.

2. Descrizione generale dell'opera

L'opera in oggetto è un ponte ad arco in muratura posto lungo Corso Europa nel Comune di Calolziocorte (LC), alla progressiva chilometrica 31+888 km.



Il ponte funge da scavalco di un piccolo corso d'acqua ed è posto a servizio della SP639, che consente il collegamento diretto con la città di Lecco e risulta quindi soggetta a livelli di traffico consistenti.

Analisi storico-critica

Al momento non sono disponibili documenti relativi alla progettazione e realizzazione originaria del manufatto.

L'arteria in oggetto era già contemplata nel piano generale delle strade aventi requisiti di statale del 1959 e, pertanto, è da presumere che l'opera d'arte risalga ad un periodo precedente; di realizzazione successiva sono ovviamente i cordoli laterali in c.a. e le barriere di sicurezza. Da un'analisi visiva di tali elementi si presume inoltre come questi possano essere stati oggetto di modifiche e allargamenti in diversi periodi di tempo.

Esito del rilievo geometrico-strutturale

L'opera d'arte, come anticipato, è un ponte ad arco ellittico in muratura di pietrame disordinata, con singola campata di luce pari a circa 5,1 m e monta di circa 1,5 m; lo sviluppo dell'arco è pari a circa 8,25 m; le due spalle sono completamente interrate e presumibilmente realizzate con muratura in pietrame; l'arcata presenta uno spessore di circa 40 cm. La larghezza complessiva della struttura è pari a 9,45 m.

L'impalcato, anche a seguito di un sondaggio eseguito in situ, è composto da uno strato di materiale incoerente di spessore pari a circa 40-45 cm e dalla soprastante pavimentazione stradale; la sovrastruttura è completata da cordoli laterali in c.a. posti a sbalzo rispetto allo sviluppo dell'arco, con funzione principale di ancoraggio delle barriere di sicurezza. Tali cordoli poggiano presumibilmente sulle spalle del ponte e sulla volta mediante un riempimento laterale di calcestruzzo, non connesso efficacemente con la volta del ponte.

Valutazione dello stato di danno

Allo stato attuale, a seguito delle indagini visive condotte sono risultati alcuni danneggiamenti e criticità, provocate indubbiamente dalla vetustà dell'opera e dalle azioni da traffico e, in particolare, dalle vibrazioni che esse comportano.

I danneggiamenti rilevati si concretizzano innanzitutto nel distacco e nel degrado della malta della muratura, probabilmente sia a seguito delle vibrazioni indotte dal traffico, sia dalle costanti e continue infiltrazioni di acqua attraverso l'impalcato; questo ha portato in alcuni casi anche al distacco ed alla caduta di elementi in pietra delle arcate, con conseguente criticità locali dal punto di vista del funzionamento e della stabilità dell'arco. La presenza di numerose efflorescenze, oltre a testimoniare il passaggio e la presenza di acqua, mina maggiormente la stabilità della tessitura muraria.

Un altro aspetto che vale la pena considerare è quello della presenza dei cordoli in c.a.; sebbene il loro comportamento a trave non dovrebbe consentire il loro appoggio sulle arcate, si ritiene che questo in minima parte possa in realtà verificarsi a seguito delle deformazioni dei cordoli stesse e, in aggiunta alle spinte orizzontali prodotte dal riempimento delle volte in corrispondenza del passaggio dei veicoli, possa col tempo indurre una sorta di rotazione verticale del paramento esterno delle arcate.

Livelli di conoscenza

Visto il rilievo geometrico-strutturale condotto, la mancanza di documentazione progettuale originaria e indagini visive eseguite in sito, si ritiene di poter assumere un livello di conoscenza *L_{CI} – Conoscenza limitata*, a cui corrisponde un fattore di confidenza *FC* pari a 1,35.

3. Inquadramento normativo

Per la redazione del presente documento si ricorrerà principalmente all'utilizzo della seguente normativa:

- Decreto del Ministero Infrastrutture e dei Trasporti 17 gennaio 2018 e allegato "Aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni" (di seguito nominato NTC2018);
- Circolare 21 gennaio 2019 n. 7/C.S.LL.PP. – Istruzioni per l'applicazione dell' "Aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni" di cui al DM 17/01/2018.

Eventuali documenti normativi adottati verranno nominati in seguito.

4. Vita nominale, classe d'uso e periodo di riferimento

Vista la tipologia di opera, si ritiene opportuno far ricadere tale edificio nella casistica delle *Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari*, secondo quanto indicato al punto 2.4.1 delle NTC2018. In funzione della destinazione d'uso, si ritiene inoltre opportuno attribuire ad esso una *Classe d'uso III*, per la quale valgono le seguenti caratteristiche (paragrafi 2.4.2 e 2.4.3 delle NTC2018):

- | | |
|---|----------|
| • vita nominale V_N | 50 anni; |
| • coefficiente d'uso C_u | 1,5; |
| • periodo di riferimento per l'azione sismica V_R | 75 anni. |

5. Azioni agenti sugli impalcati

Azioni permanenti

Peso proprio degli elementi strutturali g_1

Il peso proprio degli elementi strutturali è tenuto in conto automaticamente dal modello numerico adottato, sulla base del materiale impostato e delle caratteristiche geometriche di ogni elemento strutturale. Il peso proprio degli elementi è calcolato sulla base delle seguenti masse volumiche:

- | | |
|---------------------------|----------------------------|
| • muratura in pietrame: | 1.900 daN/m ³ ; |
| • calcestruzzo ordinario: | 2.400 daN/m ³ ; |
| • calcestruzzo armato: | 2.500 daN/m ³ ; |
| • acciaio d'armatura: | 7.850 daN/m ³ . |

Carichi permanenti portati g_2

Si ritiene opportuno introdurre in tale categoria i seguenti elementi:

- pavimentazione stradale;
- riempimento;
- cordoli laterali in c.a. e barriere di sicurezza.

Per quanto riguarda la pavimentazione stradale, le indagini effettuate in sito hanno restituito uno spessore medio della pavimentazione bituminosa pari a circa 10 cm, che comporta un carico permanente pari a circa 180 daN/m².

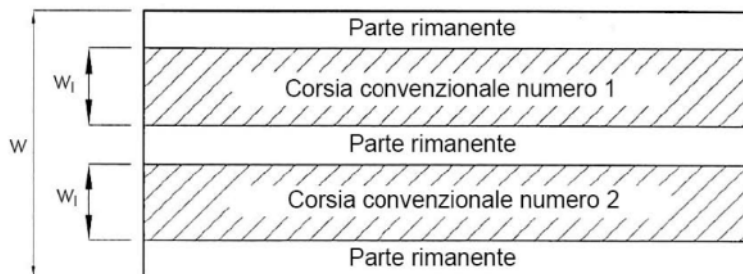
Per quanto riguarda il riempimento in materiale incoerente, del peso specifico pari cautelativamente a 2.000 daN/m², questo presenta uno spessore variabile da circa 45 cm (in mezzzeria) a circa 150 cm (in corrispondenza delle spalle); il carico permanente che ne deriva è quindi variabile tra 900 daN/m² e 3.000 daN/m².

Infine, relativamente ai cordoli in c.a. si considera un carico lineare di 1.500 daN/m mentre relativamente alle barriere di sicurezza si considera un peso di 100 daN/m.

Azioni variabili da traffico

Carichi verticali q_1

In riferimento a quanto indicato al paragrafo 5.1.3.3 delle NTC2018, si procede innanzitutto determinando il numero di corsie convenzionali da dover considerare in fase di calcolo. Data la larghezza complessiva della carreggiata w pari a 7,47 m, stando a quanto riportato dalla tabella 5.1.I si ottengono n. 2 corsie convenzionali di larghezza w_l pari a 3,0 m, circonscritte da “zone rimanenti” di estensione pari a circa 0,5 m.

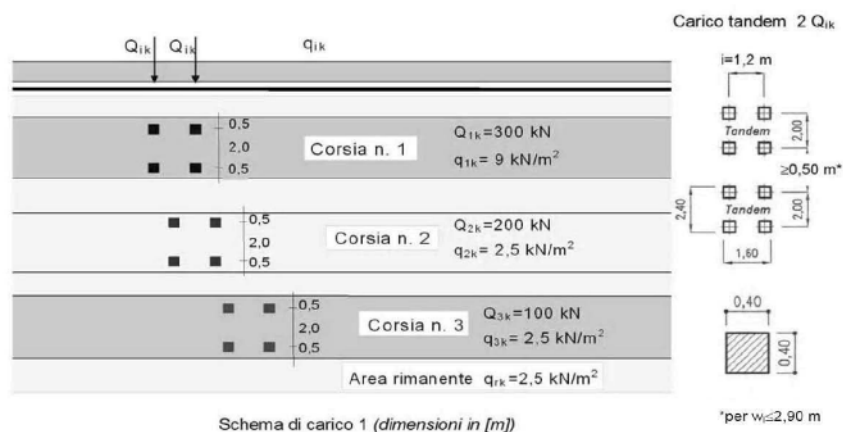


Tab. 5.1.I - Numero e larghezza delle corsie

Larghezza della superficie carrabile " w "	Numero di corsie convenzionali	Larghezza di una corsia convenzionale [m]	Larghezza della zona rimanente [m]
$w < 5,40$ m	$n_l = 1$	3,00	$(w-3,00)$
$5,4 \leq w < 6,0$ m	$n_l = 2$	$w/2$	0
$6,0 \text{ m} \leq w$	$n_l = \text{Int}(w/3)$	3,00	$w - (3,00 \times n_l)$

Avendo il problema in oggetto una configurazione geometrica perfettamente simmetrica, risulta influente il posizionamento reciproco tra la corsia convenzionale numero 1 e la numero 2.

Per quanto riguarda gli schemi di carico da adottare, ai fini delle seguenti analisi si ritiene sufficiente adottare il cosiddetto *Schema di Carico 1*, che prevede l'azione contemporanea, su ogni corsia, di un serie di carichi tandem e di un carico uniformemente distribuito.



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

Si considererà inoltre lo *Schema di Carico 5*, il quale si riferisce alla folla agente con una intensità caratteristica di 500 daN/m².

Incremento dinamico addizionale q_2

I carichi verticali da traffico sopra definiti sono già comprensivi della componente dinamica dettata dalla mobilità del carico stesso; data la conformazione dal piano stradale e dei giunti presenti, non si ritiene necessario valutare e adottare ulteriori incrementi dinamici dei suddetti valori di carico.

Azione longitudinale di frenamento o di accelerazione q_3

La forza di frenamento o di accelerazione è stabilita in funzione dei carichi verticali agenti sulla corsia convenzionale 1, in base alla seguente formulazione:

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

Considerando una lunghezza della corsia L pari alla campata in oggetto (5,1 m), si ottiene un valore di q_3 pari a circa 374 kN; si procederà quindi all'adozione di un carico uniformemente distribuito su tutta l'area della corsia caricata pari a 2.444 daN/m².

Ai fini della valutazione presente e date le ridotte dimensioni ed estensioni del manufatto, si ritiene di poter escludere tale azione variabile.

Azione centrifuga q_4

L'impalcato in oggetto risulta perfettamente rettilineo, non si ritiene quindi necessario procedere alla determinazione delle azioni centrifughe indotte dai carichi veicolari.

Azione di neve e di vento q_5

Per quanto riguarda l'azione della neve, visti i carichi variabili da traffico coinvolti e la non contemporaneità tra questi ed il carico da neve, si ritiene opportuno trascurare l'azione della neve indotta sugli impalcati.

Per quanto riguarda invece l'azione del vento, vista la tipologia di struttura e di opera si ritiene di poter omettere il calcolo delle azioni indotte dal vento.

Azioni idrodinamiche q_6

Data la geometria del problema e l'assenza di struttura in alveo, non si ritiene necessaria la quantificazione delle azioni idrodinamiche.

Azioni della temperatura q_7

Data la tipologia di struttura, non si ritiene necessario calcolare la azioni indotte da eventuali variazioni termiche.

Azioni sui parapetti e urto di veicoli in svio q_8

Dovendo procedere ad una valutazione statica e dinamica globale del manufatto, si ritiene superfluo in questa sede introdurre tale azione variabile.

Resistenze passive dei vincoli q_9

Dovendo procedere ad una valutazione statica e dinamica globale del solo impalcato, si ritiene superfluo introdurre tale azione variabile.

Azioni sismiche

Data la tipologia della struttura, le relative dimensioni ed i carichi agenti, si ritiene superfluo implementare le azioni sismiche di progetto, in quanto sicuramente meno gravose delle azioni gravitazionali previste.

6. Caratterizzazione meccanica dei materiali esistenti

Si riportano di seguito le caratteristiche dei materiali esistenti adottate ai fini delle analisi necessarie, desunte sulla base del rilievo geometrico-strutturale effettuato e delle indagini visive; trattandosi di materiali strutturali esistenti, i valori riportati sono da intendersi come valori medi.

Strutture in muratura

Stando a quanto riportato nella tabella C8.5.I della Circolare alle NTC2018, è possibile fare riferimento alla tipologia “*muratura in pietrame disordinata*”, per la quale valgono i seguenti valori (dato il livello di conoscenza LC1 assunto, è necessario considerare relativamente agli intervalli riportati in tabella i valori minimi per le resistenze ed i valori medi per le caratteristiche elastiche):

- | | |
|---|---------------------------|
| • resistenza a compressione f | 1,00 N/mm ² ; |
| • resistenza a taglio in assenza di sforzi normali f_{v0} | 0,018 N/mm ² ; |
| • modulo di elasticità normale E | 870 N/mm ² ; |
| • modulo di elasticità tangenziale G | 290 N/mm ² . |

Tabella C8.5.I -Valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura, da usarsi nei criteri di resistenza di seguito specificati (comportamento a tempi brevi), e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura. I valori si riferiscono a: f = resistenza media a compressione, τ_0 = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3), f_{v0} = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3), E = valore medio del modulo di elasticità normale, G = valore medio del modulo di elasticità tangenziale, w = peso specifico medio.

Tipologia di muratura	f (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min-max	min-max		min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	- -	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	- -	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	- -	1500-1980	500-660	21
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,4-2,2	0,028-0,042	- -	900-1260	300-420	13 ÷ 16(**)
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,) (**)	2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
Muratura a blocchi lapidei squadriati	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤40%)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

(*) Nella muratura a conci sbozzati i valori di resistenza tabellati si possono incrementare se si riscontra la sistematica presenza di zeppe profonde in pietra che migliorano i contatti e aumentano l'ammorsamento tra gli elementi lapidei; in assenza di valutazioni più precise, si utilizzi un coefficiente pari a 1,2.

(**) Data la varietà litologica della pietra tenera, il peso specifico è molto variabile ma può essere facilmente stimato con prove dirette. Nel caso di muratura a conci regolari di pietra tenera, in presenza di una caratterizzazione diretta della resistenza a compressione degli elementi costituenti, la resistenza a compressione f_{pu} può essere valutata attraverso le indicazioni del § 11.10 delle NTC.

(***) Nella muratura a mattoni pieni è opportuno ridurre i valori tabellati nel caso di giunti con spessore superiore a 13 mm; in assenza di valutazioni più precise, si utilizzi un coefficiente riduttivo pari a 0,7 per le resistenze e 0,8 per i moduli elastici.

Strutture in c.a.

Relativamente alle strutture in c.a., sulla base della pratica costruttiva dell'epoca presunta di realizzazione delle opere, si ritiene opportuno adottare le seguenti caratteristiche di resistenza:

calcestruzzo:

- resistenza a compressione cilindrica f_c 25 N/mm²;
- resistenza a compressione cubica R_c 30 N/mm²;
- modulo elastico E 31.476 N/mm²;
- modulo di taglio G 13.115 N/mm²;

acciaio da armatura:

- tensione di snervamento f_y 450 N/mm²;
- tensione di rottura per trazione f_t 540 N/mm²;
- modulo elastico E 210.000 N/mm².

7. Analisi globale

Si è proceduto mediante un'analisi statica lineare alla valutazione del comportamento dell'arcata del ponte ed all'analisi del suo stato tensionale.

Modellazione della struttura

Il modello matematico con elaboratore elettronico è stato sviluppato inserendo la struttura dell'arcata del ponte, senza considerare eventuali contributi irrigidenti dati dai cordoli laterali in c.a.

In particolare si sono adottati elementi piastra *shell* per la modellazione dell'arcata, alla quale sono stati applicati i carichi permanenti e variabili agenti; la struttura è stata considerata incernierata alle estremità, in quanto la tipologia di muratura in pietra e di tessitura non si ritiene essere in grado di instaurare un vincolo ad incastro.

Informazioni sul codice di calcolo adottato

Si riportano di seguito le caratteristiche del software di calcolo adottato ai fini delle analisi.

Titolo:	PRO_SAP PROfessional Structural Analysis Program
Versione:	PROFESSIONAL (build 2021-09-193)
Produttore-Distributore:	2S.I. Software e Servizi per l'Ingegneria s.r.l., Ferrara
Codice Licenza:	Licenza dsi4031

Modellazione delle azioni

Casi di carico adottati

Si è proceduto implementando i seguenti casi di carico:

CDC	Tipo	Sigla Id
1	Ggk	CDC=Ggk (peso proprio della struttura)
2	Gk	CDC=G2k (permanente generico n.c.d.) pavimentazione e cordoli
3	Qk	CDC=Qk (variabile generico) traffico – schema di carico 1
4	Qk	CDC=Qk (variabile generico) traffico – schema di carico 4

Combinazioni di carico adottate

I suddetti casi di carico sono stati combinati secondo quanto riportato dalle tabelle 5.1.IV, 5.1.V e 5.1.VI delle NTC2018, ottenendo le combinazioni di carico riportate nel seguito.

Tab. 5.1.IV – Valori caratteristici delle azioni dovute al traffico

Carichi sulla superficie carrabile						Carichi su marciapiedi e piste ciclabili non sormontabili
Carichi verticali				Carichi orizzontali		Carichi verticali
Gruppo di azioni	Modello principale (schemi di carico 1, 2, 3, 4 e 6)	Veicoli speciali	Folla (Schema di carico 5)	Frenatura	Forza centrifuga	Carico uniformemente distribuito
1	Valore caratteristico					Schema di carico 5 con valore di combinazione 2,5KN/m ²
2a	Valore frequente			Valore caratteristico		
2b	Valore frequente				Valore caratteristico	
3 (*)						Schema di carico 5 con valore caratteristico 5,0KN/m ²
4 (**)			Schema di carico 5 con valore caratteristico 5,0KN/m ²			Schema di carico 5 con valore caratteristico 5,0KN/m ²
5 (***)	Da definirsi per il singolo progetto	Valore caratteristico o nominale				

(*) Ponti pedonali
(**) Da considerare solo se richiesto dal particolare progetto (ad es. ponti in zona urbana)
(***) Da considerare solo se si considerano veicoli speciali

Tab. 5.1.V – Coefficienti parziali di sicurezza per le combinazioni di carico agli SLU

		Coefficiente	EQU ⁽¹⁾	A1	A2
Azioni permanenti g ₁ e g ₃	favorevoli sfavorevoli	γ _{G1} e γ _{G3}	0,90 1,10	1,00 1,35	1,00 1,00
Azioni permanenti non strutturali ⁽²⁾ g ₂	favorevoli sfavorevoli	γ _{G2}	0,00 1,50	0,00 1,50	0,00 1,30
Azioni variabili da traffico	favorevoli sfavorevoli	γ _Q	0,00 1,35	0,00 1,35	0,00 1,15
Azioni variabili	favorevoli sfavorevoli	γ _{Qi}	0,00 1,50	0,00 1,50	0,00 1,30
Distorsioni e presollecitazioni di progetto	favorevoli sfavorevoli	γ _{ε1}	0,90 1,00 ⁽³⁾	1,00 1,00 ⁽⁴⁾	1,00 1,00
Ritiro e viscosità, Cedimenti vincolari	favorevoli sfavorevoli	γ _{ε2} , γ _{ε3} , γ _{ε4}	0,00 1,20	0,00 1,20	0,00 1,00

Tab. 5.1.VI - Coefficienti ψ per le azioni variabili per ponti stradali e pedonali

Azioni	Gruppo di azioni (Tab. 5.1.IV)	Coefficiente ψ_0 di combi- nazione	Coefficiente ψ_1 (valori frequent)	Coefficiente ψ_2 (valori quasi permanenti)
Azioni da traffico (Tab. 5.1.IV)	Schema 1 (carichi tandem)	0,75	0,75	0,0
	Schemi 1, 5 e 6 (carichi distribuiti)	0,40	0,40	0,0
	Schemi 3 e 4 (carichi concentrati)	0,40	0,40	0,0
	Schema 2	0,0	0,75	0,0
	2	0,0	0,0	0,0
	3	0,0	0,0	0,0
	4 (folla)	--	0,75	0,0
	5	0,0	0,0	0,0
Vento	a ponte scarico SLU e SLE	0,6	0,2	0,0
	in esecuzione	0,8	0,0	0,0
	a ponte carico SLU e SLE	0,6	0,0	0,0
Neve	SLU e SLE	0,0	0,0	0,0
	in esecuzione	0,8	0,6	0,5
Temperatura	SLU e SLE	0,6	0,6	0,5

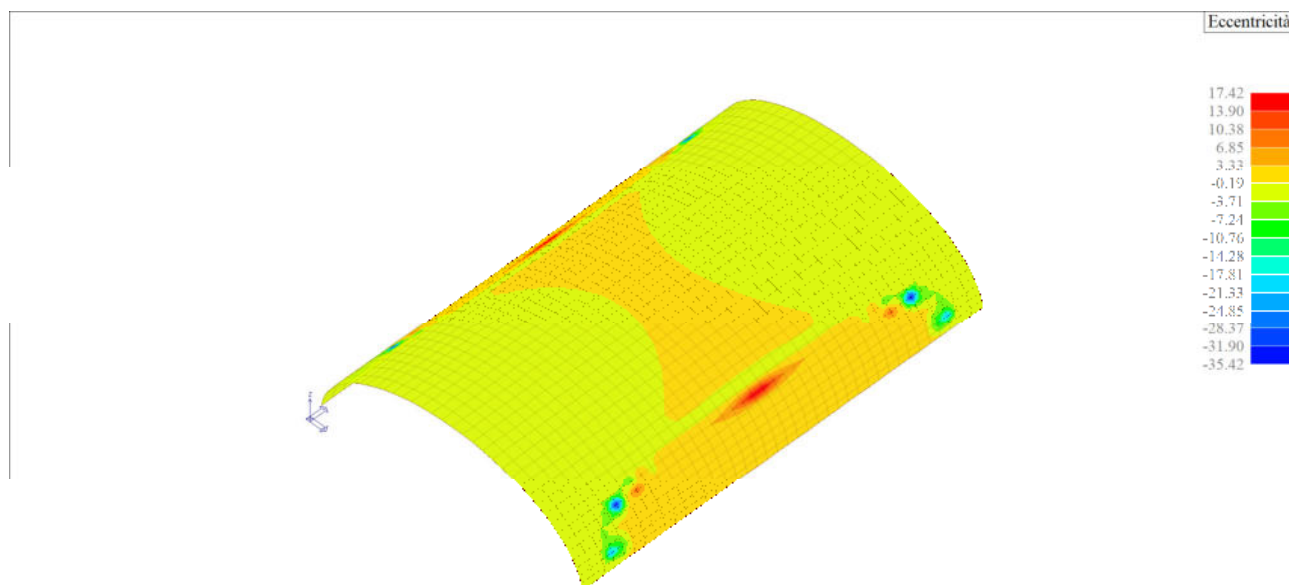
Cmb	Tipo	Sigla Id
1	SLU	Comb. SLU A1 1
2	SLU	Comb. SLU A1 2
3	SLU	Comb. SLU A1 3
4	SLU	Comb. SLU A1 4
5	SLU	Comb. SLU A1 5
6	SLU	Comb. SLU A1 6
7	SLU	Comb. SLU A1 7
8	SLU	Comb. SLU A1 8
9	SLE(r)	Comb. SLE(rara) 9
10	SLE(r)	Comb. SLE(rara) 10
11	SLE(r)	Comb. SLE(rara) 11
12	SLE(r)	Comb. SLE(rara) 12
13	SLE(f)	Comb. SLE(freq.) 13
14	SLE(f)	Comb. SLE(freq.) 14
15	SLE(f)	Comb. SLE(freq.) 15
16	SLE(p)	Comb. SLE(perm.) 16

Cmb	CDC 1/15...	CDC 2/16...	CDC 3/17...	CDC 4/18...
1	1.35	1.50	0.0	0.0
2	1.00	0.80	0.0	0.0
3	1.35	1.50	1.35	0.0
4	1.00	0.80	1.35	0.0
5	1.35	1.50	1.01	0.0
6	1.00	0.80	1.01	0.0
7	1.35	1.50	0.0	1.35
8	1.00	0.80	0.0	1.35
9	1.00	1.00	0.0	0.0
10	1.00	1.00	1.00	0.0
11	1.00	1.00	0.75	0.0
12	1.00	1.00	0.0	1.00
13	1.00	1.00	0.0	0.0
14	1.00	1.00	0.75	0.0
15	1.00	1.00	0.0	0.75
16	1.00	1.00	0.0	0.0

Risultati delle analisi

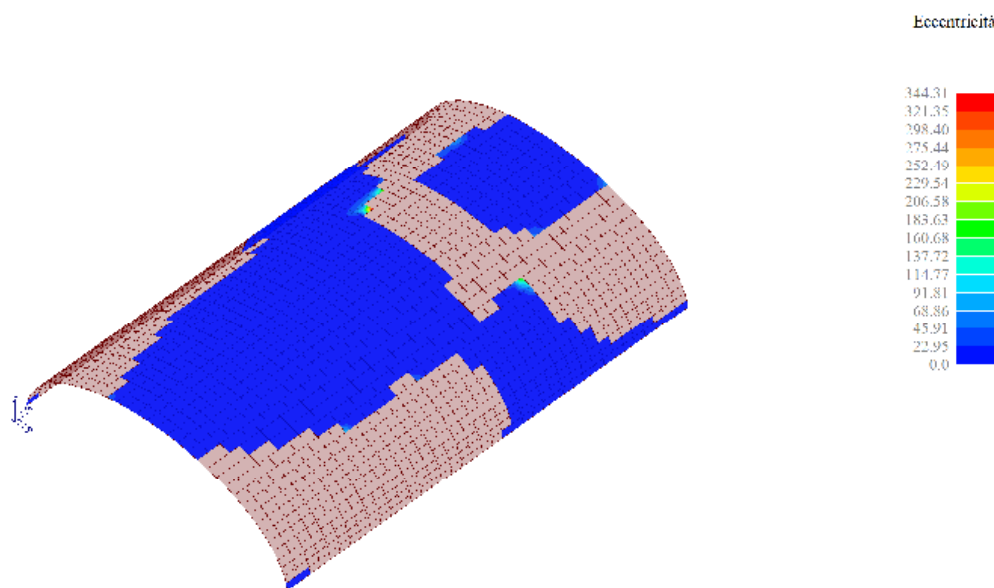
Si riportano di seguito alcuni risultati delle analisi svolte, al fine di comprendere lo stato tensionale agente sulla volta in muratura di pietra.

In particolare si riporta mediante mappa di colore il valore del rapporto tra l'eccentricità calcolata con le tensioni membranali e metà dello spessore dell'elemento; in questo modo, eventuali valori positivi lascerebbero intendere uno stato tensionale di trazione nella volta, sforzo di trazione al quale le caratteristiche della tessitura e della malta presenti non sarebbero in grado di opporsi. Le immagini si riferiscono alle combinazioni di carico più sfavorevoli e significative.



| Combinazione SLU 1

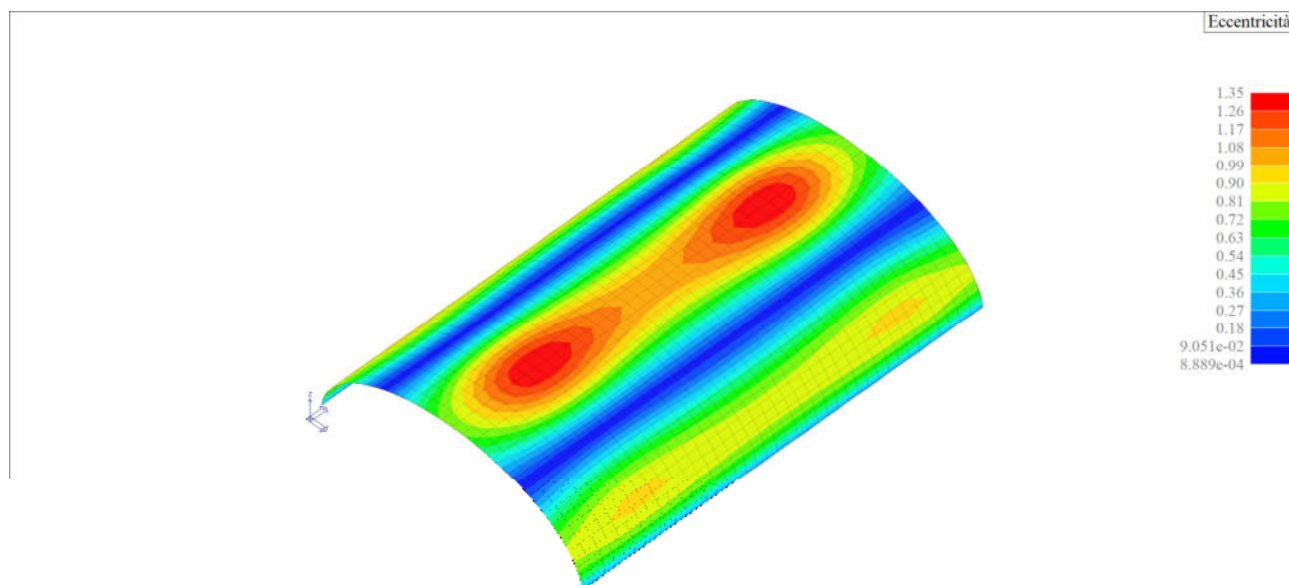
L'immagine sopra si riferisce alla combinazione che include i soli carichi permanenti; si osserva come, al netto di alcune singolarità, nella zona delle reni dell'arco ed in tutta la porzione centrale si verificano sforzi di trazione, anche se piuttosto ridotti (zona arancione).



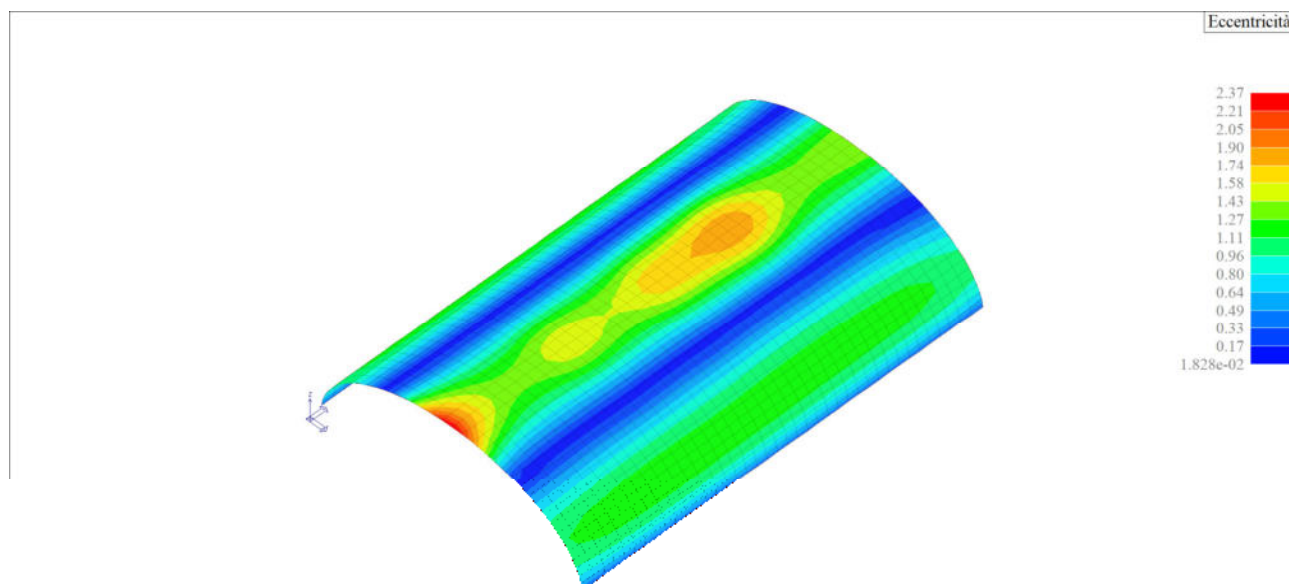
| Combinazione SLU 3

L'immagine sopra invece, in relazione alla combinazione SLU più gravosa che prevede anche la presenza dei carichi da traffico, si possono osservare tutte le zone che risultano soggette a sforzi di trazione più o meno rilevanti. Le immagini finora riportate si riferiscono alle azioni nella direzione principale dell'arcata (coincidente con la direzione del traffico).

In direzione trasversale si può invece osservare quanto segue:



| Combinazione SLU 1



| Combinazione SLU 3

In tal caso, ovviamente, tutta la volta è soggetta a tensioni di trazione; tali tensioni potrebbero essere coinvolte nella comparsa delle fessurazioni longitudinali rilevate e della conseguente caduta di pietrisco, non più trattenuto dagli sforzi di compressione principali e dalla malta.

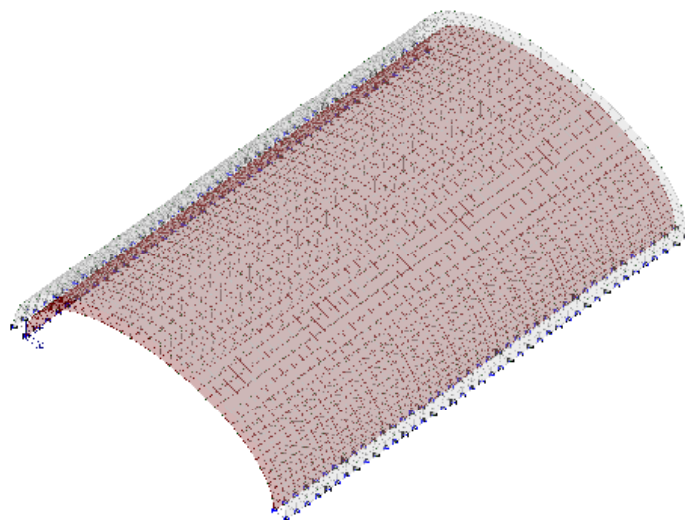
8. Ipotesi di intervento

Analizzate le criticità del manufatto e rilevati i danneggiamenti che esso ha subito, si ritiene necessario un suo rafforzamento e consolidamento mediante la realizzazione di una soletta in c.a. posta all'estradosso della volta in muratura, opportunamente connessa con quest'ultima, al fine di trasferire la maggior parte degli sforzi di trazione dalla porzione in muratura alla nuova struttura in c.a.; inoltre tale intervento consente anche di stabilizzare l'arco e mantenere la sua conformazione anche in presenza dei carichi variabili transitori,

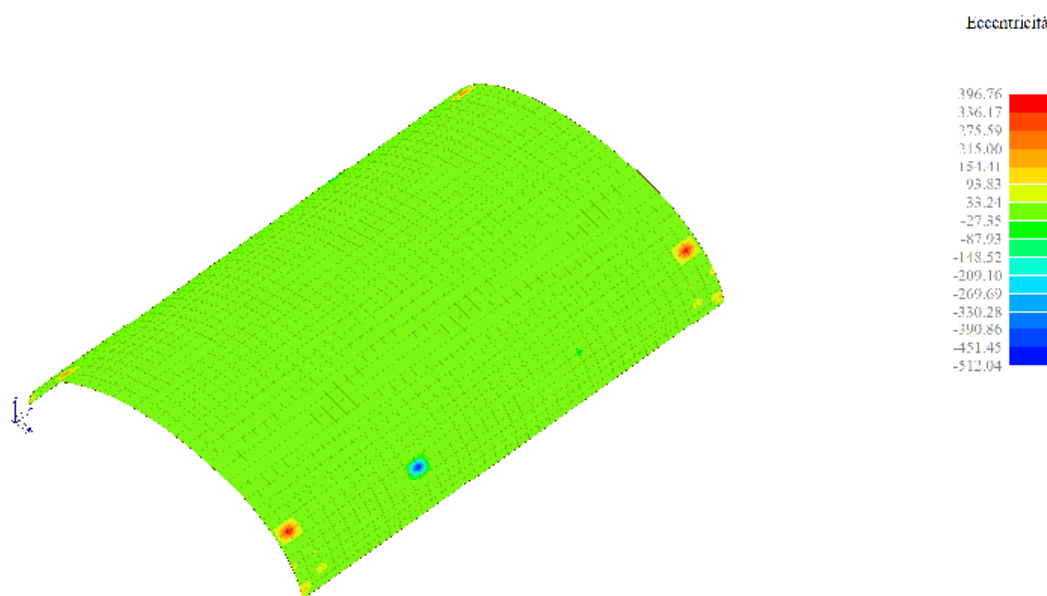
senza concedere deformazioni eccessive dell'opera; tale aspetto può essere inoltre rafforzato mediante la realizzazione di nuovi frenelli in c.a., in grado di mantenere in forma ed irrigidire l'intera volta.

In tale fase da valutazione e di studio si è proceduto realizzando un nuovo modello di calcolo che introducesse la soletta di rinforzo in c.a., escludendo per il momento la presenza dei frenelli.

| Modello FEM adottato

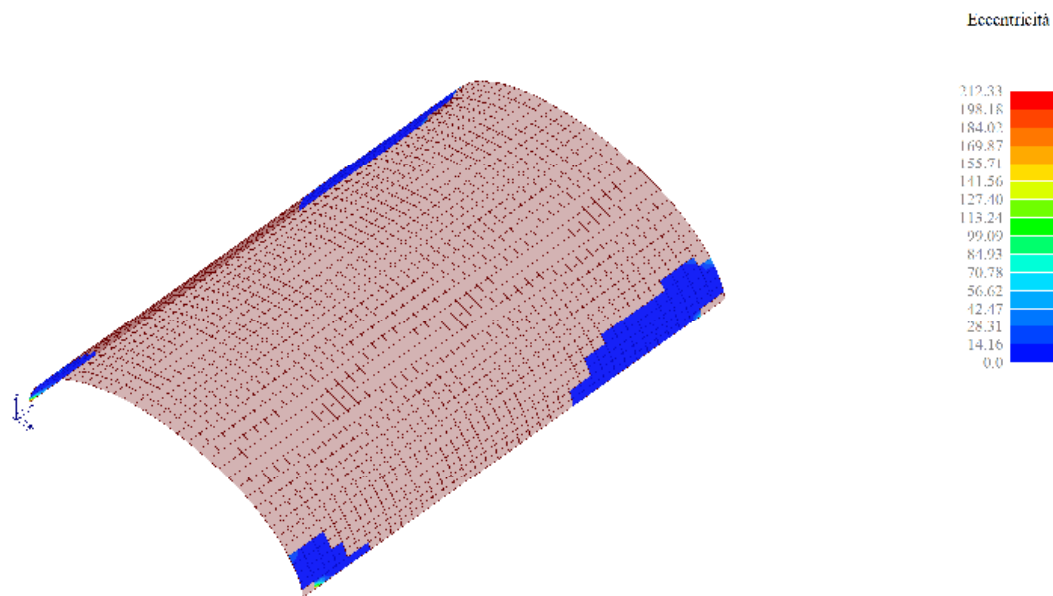


Si riportano quindi di seguito i medesimi risultati riportati in precedenza e riferiti alla sola volta in muratura, ai fini di un confronto diretto. Per quanto riguarda le sollecitazioni agenti parallelamente al senso del traffico:



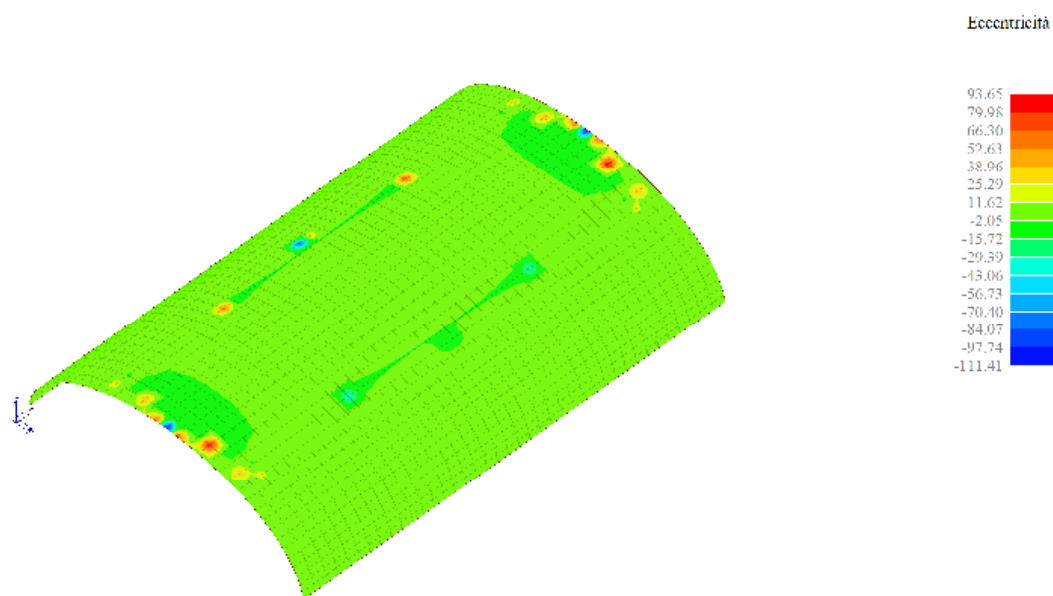
| Combinazione SLU 1

In assenza di traffico si può notare come, al netto di alcune singolarità frutto della modellazione effettuata, la volta risulti interamente compressa; in presenza di traffico invece, le zone in cui sono presenti sforzi di trazione si sono notevolmente ridotte:



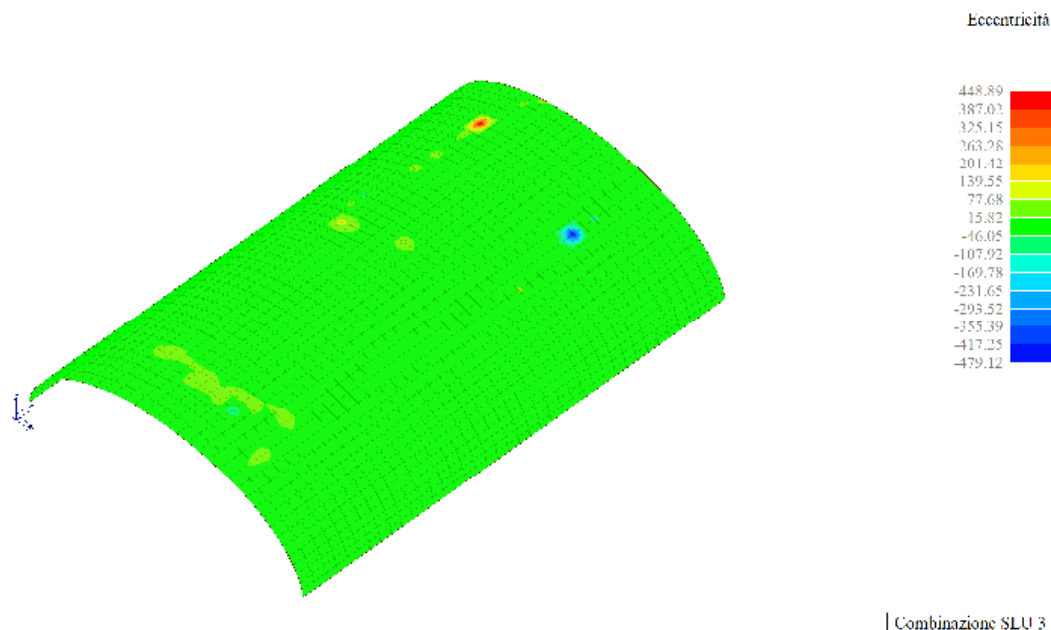
| Combinazione SLU 3

In senso trasversale, invece, ed in assenza di carichi da traffico:



| Combinazione SLU 1

Escludendo come sempre le singolarità prodotte dalla presenza puntuale dei connettori e non distribuita come nella realtà, si osserva generalmente la presenza di sforzi di compressione, pur non avendo proceduto alla modellazione dei setti di confinamento laterali.



Le stesse considerazioni possono essere condotte in condizioni di traffico, con le sollecitazioni di compressione che occupano gran parte della volta in muratura esistente.

9. Considerazioni conclusive

Le analisi condotte hanno mostrato come la volta dell'opera d'arte sia soggetta prevalentemente a sforzi di trazione anche rilevanti, sia in assenza che in presenza dei carichi da traffico. Questo è confermato dalla perdita della forma geometrica dell'arco. Tale condizione, unita alle caratteristiche scadenti della malta adottata, ha comportato la nascita del quadro fessurativo rilevato e delle conseguenti criticità, culminate anche con il distacco di alcuni elementi della volta; inoltre, la conformazione ellittica dell'arco che compone la volta tende a enfatizzare tali caratteristiche, soprattutto nei confronti delle reni.

L'intervento necessario proposto consente la stabilizzazione dell'arco in pietra ed al trasferimento delle azioni di compressione da questo alla nuova soletta in c.a.; la realizzazione dei frenelli consente inoltre di assorbire le sollecitazioni a livello delle reni, facendo assumere all'intero manufatto un più stabile e sicuro comportamento a trave in grado di sostenere i carichi derivanti dall'inteso traffico stradale.

In attesa di tali eventuali interventi di consolidamento, si ritiene di dover escludere i mezzi eccezionali dal transito sul manufatto e di limitare a 30 km/h la velocità di transito per i mezzi pesanti ordinari.

Si prescrive inoltre di procedere con cadenza semestrale alla verifica ed al monitoraggio delle strutture del ponte, al fine di rilevare l'evoluzione nel tempo dello stato di conservazione.

Il tecnico
Ing. Lorenzo Auri

