

Seismic retrofitting of the Caldarola Viaduct along the SS 77 in the province of Macerata

Intervento di miglioramento sismico del Viadotto Caldarola sulla SS 77 in provincia di Macerata

Luigino Dezi¹, Gabriele Dezi¹, Marcello Merlino²

¹ DSD Dezi Steel Design srl, Ancona, Italy

² Kaltha srl, Florence, Italy

ABSTRACT: The paper describes the seismic retrofitting of the Caldarola Viaduct along the SS 77 “Val di Chienti”, after the Central Italy earthquake of 2016. The viaduct, crossing the Chienti River between the Serrapetrona and Caldarola towns in the province of Macerata, presents a total length of 397 m, with 11 spans of approximately 36 m constituted by simply supported 16 m wide decks containing two roadways. Each deck is constituted by 6 post-tensioned precast beams. The seismic retrofitting was obtained by introducing lead rubber isolators, able to produce a damping significant increase and consequently an important reduction of the horizontal seismic actions on piers and abutments. The isolation system was combined with elastic nonlinear devices, only reacting to compression, inserted over the piers among the ends of two beams, in order to avoid the deck pounding. / La memoria illustra gli interventi di ripristino e miglioramento sismico del Viadotto Caldarola ubicato sulla SS 77 “Val di Chienti” a seguito del terremoto del Centro Italia del 2016. Il viadotto, che attraversa il fiume Chienti fra i comuni di Serrapetrona e Caldarola in provincia di Macerata, ha uno sviluppo complessivo di 397 m, con 11 campate da circa 36 m costituite da impalcati semplicemente appoggiati larghi 16 m, in grado di ospitare due carreggiate stradali. Ogni impalcato è costituito da 6 travi pre-sollecitate con cavi post-tesi. Il miglioramento sismico è stato ottenuto introducendo degli isolatori in neoprene armato con nucleo in piombo, in grado di produrre un significativo aumento dello smorzamento e quindi una rilevante riduzione delle azioni sismiche orizzontali sulle sottostrutture. Il sistema di isolamento è stato abbinato a dispositivi elastici non lineari reagenti solo a compressione, posizionati tra le testate di due travi con funzione anti-martellamento.

KEYWORDS: Simply supported decks, precast concrete beams with post-tensioned cables, seismic retrofitting, lead rubber isolators, nonlinear elastic devices. / Impalcati a travi appoggiate, travi in cap con cavi post-tesi, miglioramento sismico, isolatori in gomma con nucleo in piombo, dispositivi elastici non lineari anti-martellamento.

1 INTRODUZIONE

Il Viadotto Caldarola è ubicato tra i km 62+213 e 62+623 della SS 77 “Val di Chienti” e attraversa il fiume Chienti fra i comuni di Serrapetrona e Caldarola in provincia di Macerata.

E' costituito da 11 campate aventi luce di circa 36 m in asse pile con impalcati semplicemente appoggiati, che ospitano due corsie per ogni senso di marcia, per una lunghezza complessiva di circa 397 m.

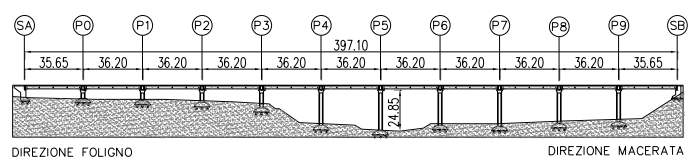


Figure 1. Longitudinal view of the viaduct / Prospetto longitudinale del viadotto.



Figure 2. Overview of the viaduct / Foto aerea del viadotto.

La costruzione dell'opera risale agli anni 1973-1976 e il collaudo al 1980.

A seguito del terremoto del Centro Italia del 2016 l'opera aveva subito danni localizzati in corrispondenza dei baggioli con fessurazioni ed espulsione del copriferro. Il viadotto era inoltre interessato da uno

stato di degrado piuttosto avanzato, principalmente dovuto ad infiltrazione delle acque di piattaforma.

Il Committente è così pervenuto alla decisione di eseguire un intervento di miglioramento sismico e al contempo operare il ripristino strutturale degli elementi danneggiati dal sisma o interessati da degrado.

Nella presente memoria si illustra la soluzione adottata per il miglioramento sismico dell'opera, che è consistita nella sostituzione degli appoggi esistenti con isolatori elastomerici con nucleo in piombo (LRB, Lead Rubber Bearing) e l'inserimento di dispositivi anti-martellamento tra le testate degli impalcati. I risultati ottenuti dalle verifiche sismiche, condotte con analisi dinamiche non lineari, hanno consentito di valutare l'efficienza della soluzione proposta sia in termini di abbattimento delle ordinate spettrali per effetto dell'elevato smorzamento degli isolatori, sia di contenimento degli spostamenti relativi in corrispondenza dei giunti per la presenza dei dispositivi anti-martellamento.

Particolare attenzione è dedicata, infine, alle fasi esecutive di sollevamento degli impalcati, sostituzione degli appoggi e ripristino strutturale.

I lavori sono stati eseguiti nel periodo Giugno - Settembre 2018 per un importo pari a circa 1.758.000 €.

2 DESCRIZIONE DELL'OPERA

2.1 Impalcato

L'impalcato ha una larghezza complessiva di 16.00 m a contenimento della piattaforma stradale di 15.20 m e due cordoli di 0.40 m per l'alloggiamento delle barriere di sicurezza.

La campata tipo è costituita da 6 travi in c.a.p. lunghe 35 m aventi sezione a doppio T di 1.98 m di altezza, 5 traversi, di cui 3 intermedi e 2 d'appoggio, aventi sezione rettangolare larga 30 cm pre-sollecitati con cavi post-tesi e una soletta in c.a. di 22 cm di spessore.

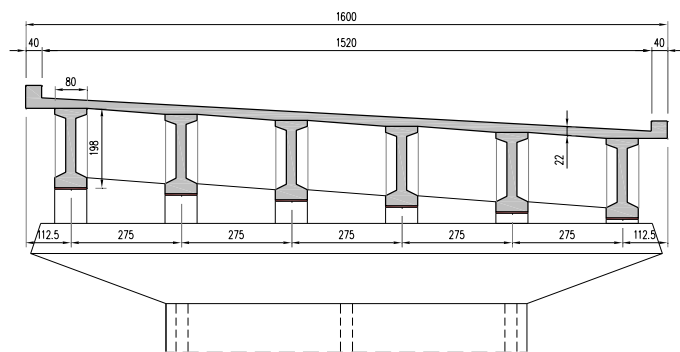


Figure 3. Cross section of the deck / Sezione trasversale dell'impalcato.

L'armatura di precompressione delle travi principali è costituita da 6 cavi parabolici, di cui 4 da 16 e 2 da 12 trefoli da (1/2)".

I traversi d'appoggio sono precompressi con 2 cavi da 8 trefoli da (1/2)", mentre quelli intermedi hanno in più un cavo da 16 trefoli.

Tutti i cavi sono post-tesi e caratterizzati da terminali d'ancoraggio tipo Morandi M5.



Figure 4. Photo from below / Foto dal basso.

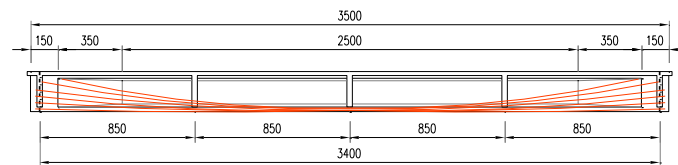


Figure 5. Longitudinal view of the main girder with cables trend / Prospetto longitudinale della trave principale con andamento dei cavi.

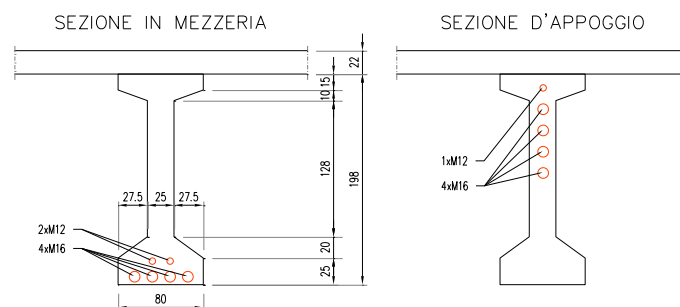


Figure 6. Main girder cross section and prestressing cables / Sezione trasversale e cavi di precompressione delle travi principali.

2.2 Pile

Le pile sono a fusto unico di sezione rettangolare cava, di dimensioni 9.00x2.50 m con un setto intermedio, ed hanno altezza variabile da 3.32 a 22.85 m. Le pareti del fusto hanno spessore di 40 cm, mentre gli elementi trasversali hanno spessore di 30 cm.

Le travi sono sostenute da un pulvino a sezione piena con sbalzi laterali di 3.375 m a sezione variabile da 2.00 m a 0.75 m.

Le fondazioni sono costituite da zattere di dimensioni 16.00x8.70x2.50 m su 14 pali di 1.00 m di diametro.

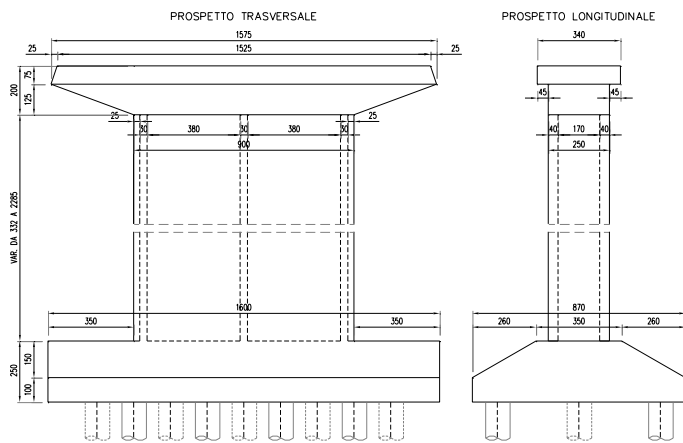


Figure 7. Pier geometry / Geometria delle pile.



Figure 8. Photo of a pier / Foto di una pila.

2.3 Spalle

Le spalle sono di tipo scatolare con parete frontale di 1.25 m di spessore, paraghiaia di 0.30 m, muri andatori di 1.95 m e risvolti laterali di 4.00 m. La spalla lato Macerata è addossata ad uno scatolare senza risvolti laterali. Entrambe le spalle sono fondate su 11 pali trivellati di 1.00 m di diametro disposti a quinconce.



Figure 9. Photo of the Foligno side abutment / Foto della spalla lato Foligno.

2.4 Appoggi

Gli appoggi delle travi sono in neoprene armato di dimensioni 600x800 mm con doppia lamina e spessore complessivo di 38 mm.

3 DANNI PRODOTTI DAL SISMA E STATO DI DEGRADO

A seguito delle scosse sismiche che avevano colpito il Centro Italia nel 2016, il viadotto aveva riportato danni principalmente localizzati in corrispondenza dei baggioli, con fessurazioni diagonali ed espulsione dei copriferro. Tali danni si erano sovrapposti allo stato di degrado piuttosto avanzato che era già presente nelle zone di appoggio.

Lo stato di conservazione del viadotto era infatti caratterizzato dalla presenza di alcune importanti criticità, riguardanti principalmente i giunti, i pulvini e le solette, tali da richiedere interventi di ripristino.

I giunti non erano più in grado di garantire la tenuta delle acque di piattaforma e gli intradossi delle solette che escono a sbalzo dalle testate delle travi risultavano interessati da un forte degrado superficiale con espulsione del copriferro e ossidazione delle barre di armatura.

I pulvini presentavano anch'essi un avanzato stato di degrado che interessava i baggioli e le superfici esposte alla percolazione delle acque fuoriuscite dai giunti, con ammaloramenti del copriferro e ossidazione delle barre.



Figure 10. Degradation of a) joints and pier caps, b) beams and slab and c) supports / Stato di degrado di a) giunti e pulvini, b) travi e soletta e c) baggioli.

Un ulteriore elemento di degrado era costituito dai discendenti pluviali, non tutti efficienti, che riversavano le acque di piattaforma all'intradosso degli sbalzi della soletta e sulle travi di bordo.

L'impalcato presentava infine alcuni campi di soletta fortemente degradati, con distacco del copriferro.

ro e ossidazione delle barre, a causa delle infiltrazioni delle acque provenienti dalla piattaforma stradale per cattivo funzionamento del manto di impermeabilizzazione.

4 DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI

4.1 Miglioramento sismico

4.1.1 Dispositivi di protezione sismica

Al fine di ridurre le sollecitazioni indotte dall'azione sismica sulle sottostrutture è stato previsto un sistema di isolamento degli impalcati attraverso l'inserimento di nuovi dispositivi d'appoggio LRB in neoprene armato con nucleo in piombo, in grado di produrre un significativo aumento dello smorzamento con dissipazione d'energia e nel contempo un aumento seppure lieve del periodo proprio di vibrare della struttura.

Gli isolatori hanno dimensioni in pianta 300x500 mm per 104 mm di spessore e sono formati da un pacchetto di neoprene armato di 54 mm, composto da 7 strati di gomma da 6 mm e 6 lamierini d'acciaio da 2 mm, e due nuclei in piombo di 100 mm di diametro, compresi tra due piastre da 25 mm.

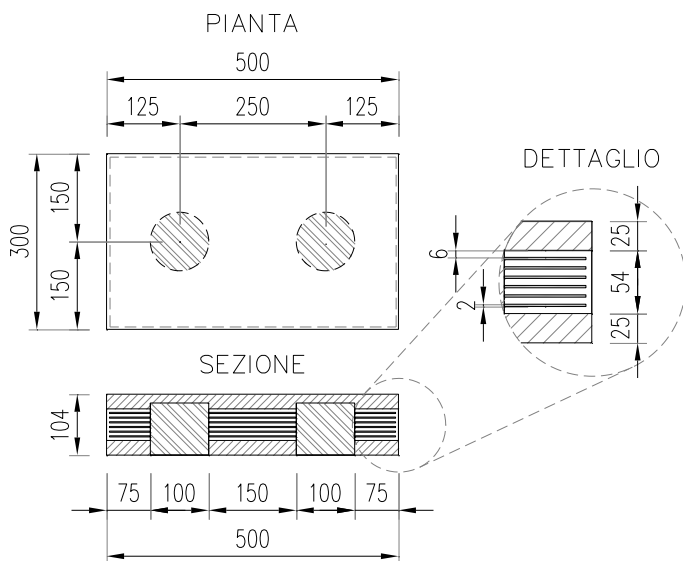


Figure 11. Geometry of LRB isolators / Geometria degli isolatori LRB.

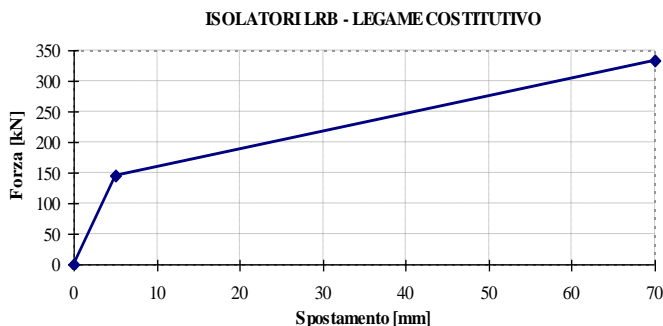


Figure 12. Constitutive law of LRB isolators / Legame costitutivo degli isolatori LRB.

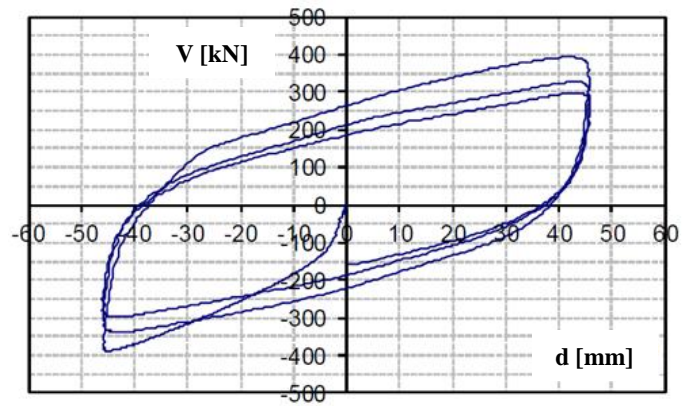


Figure 13. Experimental hysteretic behavior of LRB isolators / Comportamento isteretico sperimentale degli isolatori LRB.

Il sistema di isolamento è stato abbinato a dispositivi elastici non lineari posizionati tra le testate delle travi poggianti sulla stessa pila, caratterizzati da una rigidità a trazione nulla e da una rigidità a compressione molto bassa per spostamenti inferiori a 20 mm e molto alta nel range 20-40 mm, al fine di evitare il martellamento degli impalcati contigui per movimenti in controfase in situazione sismica.

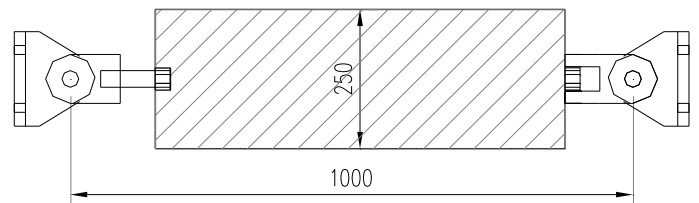


Figure 14. Geometry of nonlinear elastic devices / Geometria dei dispositivi elastici non lineari.

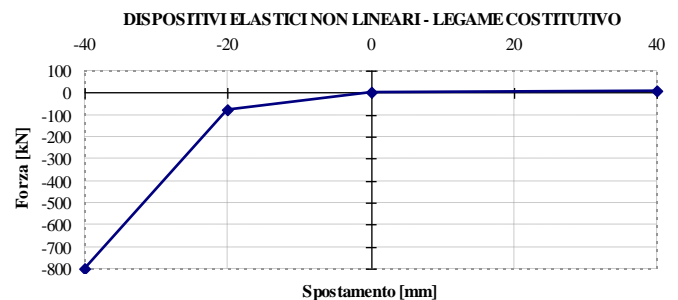


Figure 15. Constitutive law of nonlinear elastic devices / Legame costitutivo dei dispositivi elastici non lineari.

Sempre per garantire gli spostamenti sismici in controfase degli isolatori sono stati previsti nuovi giunti in gomma armata con i varchi allargati da 40 a 60 mm.

4.1.2 Modellazione e analisi

E' stato sviluppato un modello agli elementi finiti globale della struttura nello stato di fatto e nello stato di progetto, al fine di valutare gli effetti dell'isolamento in termini di spostamento dell'impalcato e sollecitazioni sulle sottostrutture.

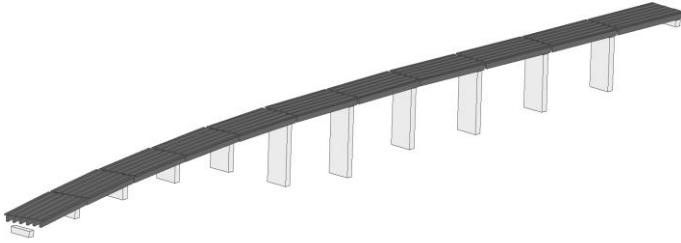


Figure 16. Global FEM model of the structure / Modello FEM globale della struttura.

Sono state eseguite analisi dinamiche lineari con spettro di risposta e analisi dinamiche non lineari con accelerogrammi artificiali spettro-compatibili, di cui si riportano nel seguito i risultati più significativi con riferimento allo Stato Limite di Collasso (SLC) e ai parametri sismici riportati nella tabella seguente.

Table 1. Seismic analysis parameters / Parametri per le analisi sismiche.

Parametro	Valore
Longitudine sito	13°13'17.41 E
Latitudine sito	43° 9'4.35" N
Vita nominale	50 anni
Classe d'uso	IV
Coefficiente d'uso	2
Vita di riferimento	100 anni
Stato Limite	SLC
Tempo di ritorno	1950 anni
Categoria di sottosuolo	B
Categoria topografica	T1
Fattore di struttura	1,000

L'isolamento sismico in termini di spettro di risposta elastica in pseudo-accelerazione produce un abbattimento delle ordinate spettrali per effetto dell'elevato smorzamento garantito dagli isolatori (30%) e, in misura più contenuta, un aumento del periodo del primo modo di vibrare della struttura, che passa da 0.52 a 0.68 s. In questo modo, l'accelerazione sismica è risultata significativamente ridotta, passando da 0.75 a 0.31 g.

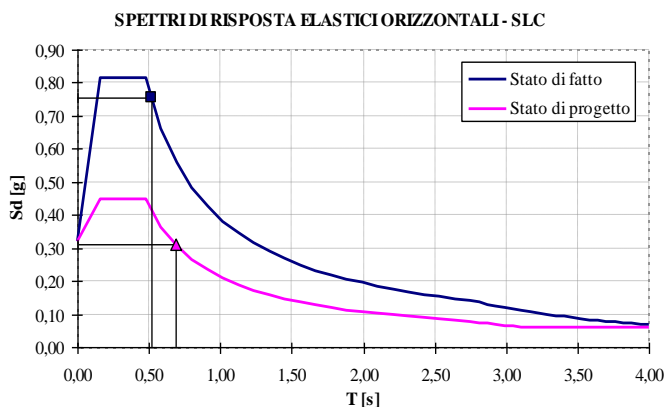


Figure 17. Response spectra with and without isolation / Spettri di risposta con e senza l'isolamento.

Le analisi dinamiche non lineari hanno consentito una valutazione più accurata della risposta sismica della struttura, tenendo conto sia del comportamento isteretico degli isolatori che del comportamento non lineare dei dispositivi anti-martellamento.

Per queste sono stati generati 3 accelerogrammi indipendenti spettro-compatibili, con i quali sono stati definiti 3 gruppi, ognuno costituito da due accelerogrammi applicati simultaneamente alla struttura nelle due direzioni del piano, alternativamente in x e y. Le verifiche sono state poi eseguite con i valori massimi delle sollecitazioni e degli spostamenti ottenuti dalle analisi con i tre gruppi nelle due direzioni alternate.

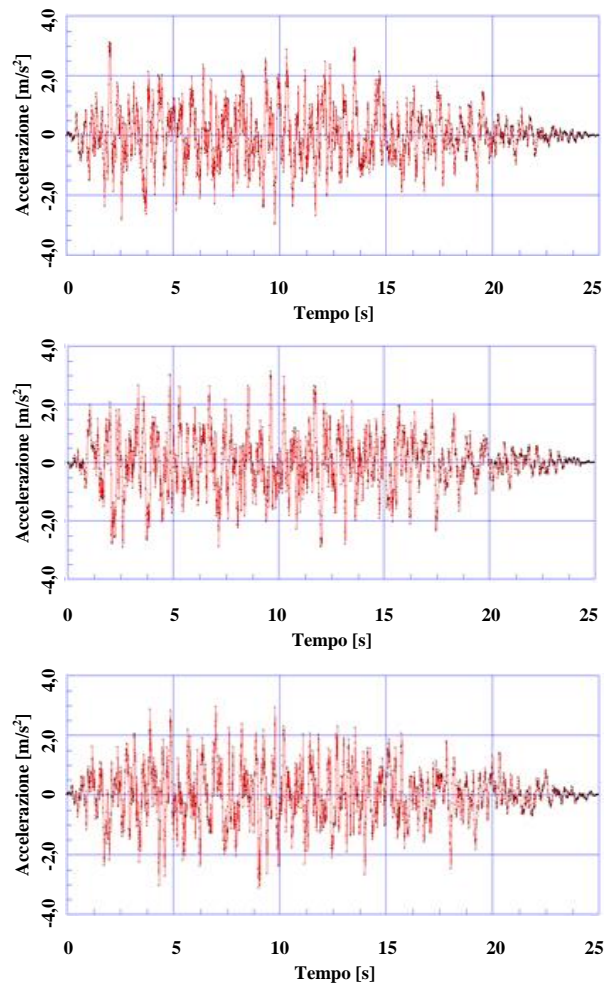


Figure 18. Generated accelerograms for non linear analyses / Accelerogrammi generati per le analisi non lineari

Dalle analisi dinamiche non lineari, effettuate per i 3 gruppi di accelerogrammi, sono state ricavate le storie temporali delle seguenti grandezze:

- spostamenti degli isolatori;
- taglio su un allineamento di isolatori;
- spostamento relativo tra gli impalcati in corrispondenza di un giunto;
- forza assiale sui dispositivi anti-martellamento.

Nelle figure che seguono si riportano unicamente le storie temporali che hanno condotto ai valori mas-

simi delle suddette grandezze, che fanno tutte riferimento all'allineamento destro sulla pila P5 e con cui sono state effettuate le verifiche allo SLC.

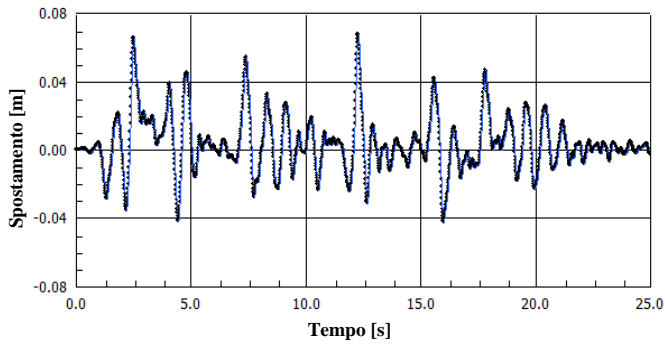


Figure 19. Maximum longitudinal displacement of a single isolator (pier 5) / Massimo spostamento longitudinale di un singolo isolatore (pila 5).

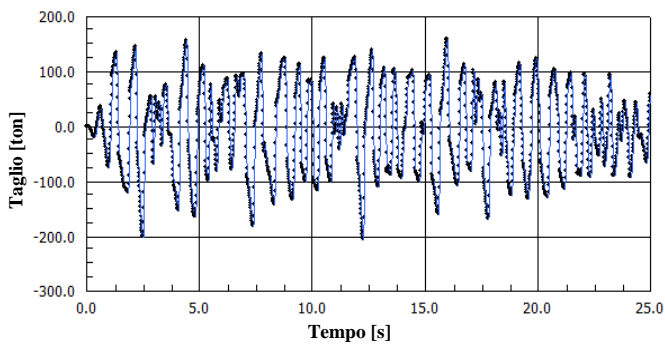


Figure 20. Maximum longitudinal shear force on a 6 isolator line (pier 5) / Massimo taglio longitudinale su un fila di 6 isolatori (pila 5).

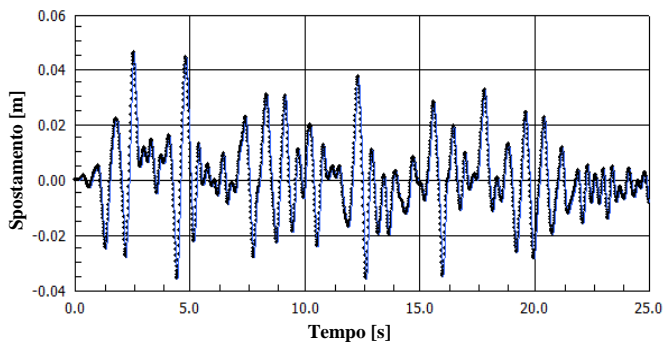


Figure 21. Maximum longitudinal relative displacement at joint (pier 5) / Massimo spostamento longitudinale relativo sul giunto (pila 5).

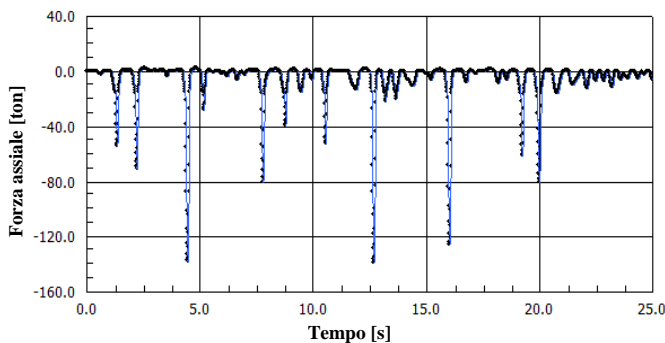


Figure 22. Maximum axial force on nonlinear elastic devices (pier 5) / Massima forza assiale sui dispositivi elastici non lineari (pila 5).

Nella figura seguente è riportato il ciclo di isteresi degli isolatori derivante dall'analisi numerica.

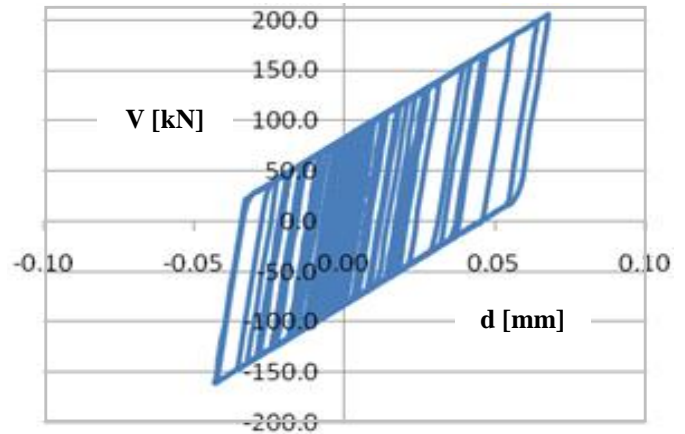


Figure 23. Maximum shear force on a 6 isolator line (pier 5) / Forza di taglio massima su una fila di 6 isolatori (pila 5).

L'efficienza del sistema di isolamento può essere apprezzata esaminando la riduzione del massimo taglio trasmesso dagli isolatori alle pile, che è passato da 60.5 a 25.7 t, con una riduzione del 58 % circa.

4.2 Ripristino strutturale

Gli interventi di ripristino eseguiti possono essere così sintetizzati:

1. Ripristino dei pulvini e dei tratti ammalorati del fusto di alcune pile, mediante rimozione del copriferro, sabbiatura e passivazione delle barre di armatura interessate da ossidazione e ricostruzione di copriferro con malte fibro-rinforzate.
2. Ripristino dei baggioli con allargamento delle dimensioni in pianta da 60x80 cm a 100x120 cm, previa demolizione delle parti ammalorate, passivazione delle armature ossidate e inserimento di barre di armatura d'ancoraggio sulle pareti dei pulvini e di staffe perimetrali di confinamento. L'allargamento dei baggioli è stato realizzato con una struttura metallica perimetrale in grado di esercitare un'azione di confinamento del calcestruzzo e nel contempo realizzare il collegamento dei perni dei nuovi isolatori.
3. Sostituzione dei giunti con aumento del varco.
4. Ripristino superficiale dell'intradosso delle solette in prossimità dei giunti e nei campi interessati da degrado mediante rimozione del copriferro, sabbiatura e passivazione delle barre e ricostruzione di copriferro con malte fibro-rinforzate.

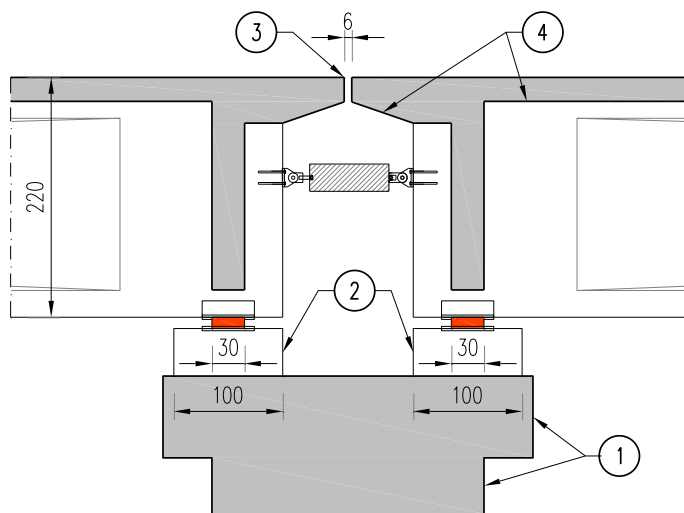


Figure 24. Structural repair works / Interventi di ripristino strutturale.

Particolare attenzione hanno richiesto le operazioni di sollevamento degli impalcati, effettuato con martinetti extra piatti posizionati davanti agli appoggi delle travi ed ulteriori martinetti posizionati sotto i traversi. Gli interventi di ripristino dei baggioli sono stati eseguiti con gli impalcati su supporti temporanei posizionati sotto i traversi.

Sono stati utilizzati 22 martinetti da 100 t a fronte di un peso di circa 1000 t.

Il traffico stradale sul viadotto è stato interdetto solamente durante le fasi di sollevamento e abbassamento, mentre durante le fasi di appoggio su supporti provvisori è stato limitato alle due corsie centrali.

La posa in opera dei nuovi dispositivi d'appoggio ha determinato un innalzamento della livelletta stradale di circa 70 mm.

5 CONCLUSIONI

Extraordinary maintenance works are a necessary activity to stop the structural degradation and extend the service life of structures.

In prestressed concrete bridges, these works often include the replacement of the existing bearings, which is complex and expensive. Therefore, where possible, it is advisable to improve the seismic behavior of the structure by installing isolation devices in place of the existing bearings.

On the Caldarola Viaduct, in addition to the structural deterioration due to road platform waters, there were damages caused by recent earthquakes, which suggested a seismic retrofitting, achieved through lead rubber isolators coupled with nonlinear elastic devices.

The works lasted 4 months and were carried out with reduced road traffic, thus limiting inconvenience to road users.

I lavori di manutenzione straordinaria rappresentano un'operazione necessaria per interrompere l'avanzamento del degrado strutturale e prolungare la vita utile delle strutture.

Nei ponti in c.a.p. spesso questi lavori comprendono la sostituzione degli appoggi esistenti, che risulta complessa e onerosa. Pertanto, laddove possibile, è consigliabile sfruttare questa esigenza per migliorare il comportamento sismico della struttura installando dispositivi d'isolamento al posto degli appoggi esistenti.

Sul Viadotto Caldarola, oltre al degrado strutturale dovuto al cattivo funzionamento del sistema di raccolta e allontanamento delle acque da piattaforma, erano presenti danni prodotti dai recenti eventi sismici, che hanno consigliato un miglioramento sismico dell'opera, conseguito attraverso isolatori in neoprene armato con nucleo in piombo accoppiati a dispositivi elastici non lineari anti-martellamento.

I lavori sono durati 4 mesi e sono stati effettuati in presenza di traffico ridotto, limitando così gli inconvenienti agli utenti stradali.

REFERENCES

- Dezi, L., Morettini, M. 2017. Progettazione di ponti e viadotti con isolamento sismico. *Quaderno AICAP N.ro 3*.
- Dezi, L., Merlini, M., Sturbini, C. 2018. Adeguamento sismico del Viadotto Chiaravalle sulla strada di collegamento tra la SS 76 e l'aeroporto di Falconara. *Italian Concrete Days, Lecco*.
- UNI EN 1337-1:2001 Appoggi strutturali – Regole generali di progetto.
- UNI EN 1337-3:2005 Appoggi strutturali – Parte 3: Appoggi elastomerici.
- UNI EN 15129:2018 Dispositivi antisismici.