

I DISPOSITIVI ANTISISMICI ELASTOPLASTICI NELL'ISOLAMENTO DI PONTI A STRUTTURA MISTA

ISOLATION DEVICE OF CONTINUOUS GIRDER BRIDGES USING DEVICES WITH STEEL HYSTERETIC DAMPERS

Paola Rita Marcantonio, Marco Petrangeli
Università "G. D'Annunzio"
Dipartimento INGEO
Pescara, Italia
paola.marcantonio@integer.it, marco@integer.it

Paolo Tortolini
INTEGRA srl
Roma ,Italia
paolo.tortolini@integer.it,

ABSTRACT

Bridge isolation is today very popular in the design of strategic new structures such as road-way and railway bridges as well as in the retrofit of existing ones. With reference to the most common bridge configurations the paper try to establish some basic rules to help clients and practitioner engineers with choosing the most cost effective isolation devices based on bridge dynamics and probabilistic occurrence of seismic events. The paper specifically addresses the longitudinal seismic behaviour of continuous girders, a scheme that nowadays account for the large majority of new constructions. Their dynamic response is therefore analyzed in details comparing different configurations with and without isolation over a range of seismic intensity representative of the Italian territory. The study, carried out with linear and non-linear fibre models in the time domain, provides some interesting results on the response of these structure and the effect of friction on sliding bearings, typically used in these structures.

SOMMARIO

Gli impalcati a travata continua rivestono un ruolo primario nel panorama delle nuove realizzazioni di infrastrutture stradali e ferroviarie. Considerata la funzione strategica che in genere assolvono, è molto diffuso oggi ad adottare soluzioni tecnico-progettuali che prevedono l'isolamento sismico dell'impalcato. Tuttavia, tali scelte scaturiscono il più delle volte dalle particolari esigenze del cliente o dalle consuetudini della regione/nazione dove sorge l'opera, piuttosto che non in base a criteri di ottimizzazione tecnico-economica. La memoria affronta lo studio del comportamento dinamico longitudinale di impalcati a travata continua, considerando differenti configurazioni prive e con isolamento mediante ritegni elastoplastici. Lo studio, condotto utilizzando analisi non lineari nel dominio del tempo, pur analizzando casi limitati, fornisce alcuni interessanti spunti sulla disposizione ottimale del sistema d'isolamento, sui livelli di sismicità oltre cui risulta vantaggioso introdurre tali dispositivi ed introduce un interessante motivo di riflessione sulla modellazione dell'attrito degli appoggi scorrevoli, spesso sottovalutato ai fini di un corretto inquadramento della risposta sismica dei

viadotti. La memoria si conclude con la presentazione di due viadotti realizzati lungo la s.s.212 nella val del Fortore di cui gli scriventi hanno curato il progetto.

1 INTRODUZIONE

Lo schema statico longitudinale da adottare nei ponti a travata continua in zona sismica, è oggi risolto in modo differente, anche in presenza di configurazioni geometriche e situazioni ambientali simili. Queste differenze sono in parte riconducibili all'attività dei principali produttori nazionali dei dispositivi antisismici, ma in parte anche dovute a una carenza di riferimenti riguardo alla valutazione dei effettivi costi associabili alle diverse soluzioni di isolamento, che l'ente proprietario o gestore dell'opera dovrà sostenere non solo inizialmente, ma anche nell'arco della vita di servizio dell'infrastruttura [1].

2 SISMICITÀ DI SOGLIA E DUTTILITÀ STRUTTURALE

Le strutture da ponte sono soggette a forze orizzontali di diversa natura ed intensità. Tra queste azioni è opportuno distinguere quelle in direzione trasversale da quelle longitudinali all'asse del ponte. Nei viadotti a travata, l'azione variabile più importante in direzione longitudinale è rappresentata sicuramente dalle deformazioni termiche dell'impalcato, giornaliere e stagionali, che si trasformano in azioni sulle sottostrutture attraverso l'attrito dei dispositivi di appoggio. L'attrito di primo distacco sugli appoggi mobili può facilmente superare il 5% del peso presente, arrivando quindi a circa 10 kN/m per un impalcato tipo acciaio-calcestruzzo che pesa dai 150 ai 200 kN/m. L'altra azione longitudinale principale è rappresentata dalla frenatura/accelerazione dei veicoli, evento questo più teorico che reale. Infatti difficilmente i veicoli transitanti sul ponte sono in grado di generare azioni della portata prevista dalle normative. In direzione trasversale invece, l'azione orizzontale più frequente ed importante è quella del vento. Tale azione può raggiungere, in base alla situazione morfologie e geografica, valori di circa 1.5 kN/m^2 , a cui corrispondono forze applicate tra 5 e 10 kN/m sull'impalcato degli usuali viadotti stradali e ferroviari. La pressione del vento agisce anche sulle pile, la forza risultante è chiaramente funzione della sezione e dell'altezza delle stesse e tranne che per viadotti molto bassi, questa può rappresentare una percentuale rilevante rispetto al vento di calcolo agente sull'impalcato.

Come visto, dunque, le sottostrutture di un ponte sono soggette ad azioni orizzontali di origine non sismica comprese tra il 5 ed il 10% dei carichi verticali. Senza dubbio tale livello di azioni deve essere assorbito in campo elastico dalle sottostrutture; si può ipotizzare che la resistenza ultima, allora, sia almeno doppia a quella elastica e quindi non inferiore al 20% dei carichi verticali. Ecco quindi che è possibile calcolare un'intensità dell'azione sismica di soglia sotto la quale non vale la pena neanche prendere in considerazione l'ipotesi di isolare il ponte, che orientativamente è compresa tra 0.15g e 0.2g.

Tali livelli di soglia possono essere superiori in funzione del livello di duttilità che si è in grado di dotare le sottostrutture. Se per gli interventi di adeguamento sull'esistente la mancanza di duttilità può essere un dato di fatto, nel caso di nuove realizzazioni dovrebbe invece sempre essere possibile progettare sottostrutture tali da avere una duttilità adeguata.

3 SCHEMA VINCOLARE E ACCOPPIAMENTO DELLE PILE

Lo schema vincolare più efficace, in direzione longitudinale, per ridurre le sollecitazioni associate alle deformazioni indotte dalle azioni statiche principali (termica), è quello di porre il fisso su una pila centrale. Nelle valli con un'orografia (profilo) regolare tale scelta porta il più delle volte ad avere il vincolo fisso in corrispondenza delle pile più alte e quindi anche più flessibili, nel caso molto frequente in cui viene utilizzato lo stesso cassero per tutte le pile. Questo schema è generalmente il più efficace, perché consente di contenere l'escursione dei

giunti posti alle due estremità dell'impalcato continuo. In regioni a forte sismicità, tale soluzione può non essere sempre percorribile. In taluni casi, può essere vantaggioso accoppiare altre pile utilizzando degli apparecchi oleodinamici (shock transmitters). Questa soluzione ha il vantaggio di sfruttare le risorse di resistenza e duttilità di più pile, evitando di introdurre coazioni e stress termici delle deformazioni lente da temperatura e ritiro/viscosità del calcestruzzo. In molti casi però, l'accoppiamento di altre pile può non essere sufficiente a contenere gli spostamenti/deformazioni, soprattutto quando si verifica che la risposta dell'opera resta sul ramo piatto dello spettro in spostamenti. Tale situazione è tanto più frequente quanto maggiore è la lunghezza del viadotto e l'intensità sismica del sito. Viceversa, accoppiando una sottostruttura troppo rigida, le forze che vengono attratte da quest'ultima possono risultare troppo onerose per la sottostruttura stessa e/o per le sue fondazioni.

4 I RITEGNI ELASTOPLASTICI

L'isolamento sismico può essere raggiunto grazie a diversi tipi di dispositivi, nella cui scelta si avverte la recente tendenza a prediligere quelli che garantiscono la funzionalità dell'opera anche dopo l'evento massimo di progetto (utilizzando apparecchi dotati di sistemi di ricentraggio). Tale preferenza rispetto ad altri dispositivi, che garantiscono pari sicurezza strutturale, solitamente viene giustificata con un presunto vantaggio economico per l'ente gestore o proprietario della infrastruttura, in quanto è esclusa la necessità di intervento nel post-terremoto. Questa tesi però è facilmente confutabile, in realtà i benefici economici legati all'utilizzo di apparecchi rientranti sono minimi o del tutto inesistenti nel contesto sismico italiano [1].

I sistemi d'isolamento e dissipazione basati su ritegni metallici (Fig.1), che si plasticizzano al raggiungimento di una prestabilita forza appaiono fortemente indicati per le opere infrastrutturali più comuni del nostro paese, perché in grado di assicurare la massima economia e affidabilità in esercizio e la protezione dal crollo o dal danneggiamento severo nel caso di sismi di forte intensità.

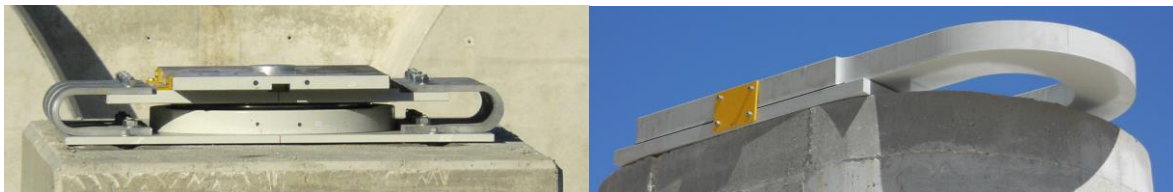


Fig 1. Alcuni esempi di ritegni elasto-plastici.

5 I CASI DI STUDIO

Con riferimento al viadotto schematizzato in Fig.2 sono state condotte delle analisi sismiche non lineari nel dominio del tempo, considerando differenti condizioni di vincolo, di rigidzze delle pile e di livelli dell'azione sismica.

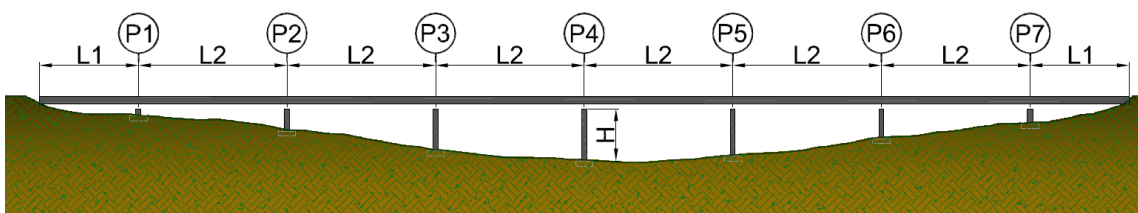


Fig 2. Profilo del viadotto a travata utilizzato nello studio.

5.1 Modellazione strutturale

Le pile hanno una sezione rettangolare pari a 3.0x4.5 metri, armate allo 0.30%. Il momento resistente della sezione vale 51 MNm, valutato sotto un carico verticale di 16 MN. Sono state simulate due diverse configurazioni di viadotti, uno più alto (Mod. A), in cui le due pile centrali hanno rispettivamente altezze di 21 e 19 metri (aspect ratio di circa 6-7) ed uno più tozzo (Mod. B) con pile centrali di 11 e 10 metri (aspect ratio di circa 3-4). Le condizioni di vincolo sono state scelte per simulare le possibili configurazioni vincolari oggi utilizzate con e senza isolamento. Per facilitare la comprensione delle analisi svolte, nella tabella 1 sono elencati i 26 modelli utilizzati.

Tabella 1. Modelli di analisi

<i>Nome modello</i>	<i>Descrizione modello</i>
Mod-A-1P	Duttilità alta e 1 pila fissa
Mod-A-1Pa	Duttilità alta, 1 pila fissa e il contributo dell'attrito degli appoggi
Mod-A-2P	Duttilità alta e 2 pile fisse
Mod-A-2Pa	Duttilità alta e 2 pile fisse e il contributo dell'attrito degli appoggi
Mod-B-1P	Duttilità bassa e 1 pila fissa
Mod-A-ISO-1P	Duttilità alta e 1 pila isolata
Mod-A-ISO-1Pa	Duttilità alta e 1 pila isolata e il contributo dell'attrito degli appoggi
Mod-A-ISO-1SP	Duttilità alta e 1 spalla isolata
Mod-A-ISO-1SPa	Duttilità alta e 1 spalla isolata e il contributo dell'attrito degli appoggi
Mod-A-ISO-2P	Duttilità alta, 2 pile isolate
Mod-A-ISO-2Pa	Duttilità alta, 2 pile isolate e il contributo dell'attrito degli appoggi
Mod-A-ISO-1SP(2)	Duttilità alta, 1 spalla isolata (isolatore doppio)
Mod-A-ISO-1SPa(2)	Duttilità alta, 1 spalla isolata (isolatore doppio) e il contributo dell'attrito degli appoggi
Mod-B-1P	Duttilità bassa e 1 pila fissa
Mod-B-1Pa	Duttilità bassa e 1 pila fissa e il contributo dell'attrito degli appoggi
Mod-B-2P	Duttilità bassa e 2 pile fisse
Mod-B-2Pa	Duttilità bassa e 2 pile fisse e il contributo dell'attrito degli appoggi
Mod-B-ISO-1P	Duttilità bassa e 1 pila isolata
Mod-B-ISO-1Pa	Duttilità bassa e 1 pila isolata e il contributo dell'attrito degli appoggi
Mod-B-ISO-1SP	Duttilità bassa e 1 spalla isolata
Mod-B-ISO-1SPa	Duttilità bassa e 1 spalla isolata e il contributo dell'attrito degli appoggi
Mod-B-ISO-2P	Duttilità bassa, 2 pile isolate
Mod-B-ISO-2Pa	Duttilità bassa, 2 pile isolate e il contributo dell'attrito degli appoggi
Mod-B-ISO-1SP(2)	Duttilità bassa, 1 spalla isolata (isolatore doppio)
Mod-B-ISO-1SPa(2)	Duttilità bassa, 1 spalla isolata (isolatore doppio) e il contributo dell'attrito degli appoggi

5.2 Modellazione delle azioni

L'azione sismica di progetto è simulata mediante l'uso di accelerogrammi derivati da un'unica forma spettrale scalata in modo da ottenere accelerazioni al suolo (PGA) comprese tra 0.1g e 0.5g. Per ogni intensità sismica analizzata sono stati considerati 3 diversi accelerogrammi la cui spettro-compatibilità è stata raggiunta seguendo le prescrizioni dell'Eurocodice 8 [6].

5.3 Modellazione degli appoggi scorrevoli

Un aspetto poco conosciuto e generalmente tralasciato nella valutazione della risposta sismica longitudinale dei viadotti è rappresentato dall'attrito degli appoggi scorrevoli [2]. I valori di attrito che caratterizzano un moderno appoggio in acciaio-teflon sono, all'installazione, intorno all'1% ma tendono ad aumentare con il passare del tempo a causa della continua esposizione agli agenti atmosferici fino a raggiungere valori intorno al 2-3%. In fase sismica, l'attrito radente può essere ancora superiore per via del comportamento viscoso del teflon, che per le velocità sismiche tende ad indurirsi [5], aumentando, quindi, il proprio coefficiente di attrito.

Si è voluto dunque analizzare l'influenza di tale fenomeno sulla risposta strutturale, dunque nelle analisi questo è stato simulato attraverso elementi finiti dotati di una legge forza-

deformazione rigido-plastica in cui la forza limite di scorrimento è stata assunta pari al 2% del peso agente.

$$F_x(d) = \pm 0.02F_z \quad (1)$$

5.4 Effetto dell'attrito sulla risposta longitudinale del viadotto

I grafici di Fig.3 rappresentano i massimi spostamenti longitudinali dell'impalcato (Mod.A e Mod.B) nelle quattro diverse configurazioni senza isolamento. Le curve relative al Mod.A (caratterizzato da una più alta flessibilità delle sottostrutture) evidenziano una marcata influenza dell'attrito sulla risposta sismica del ponte. Le riduzioni di spostamento ottenute si attestano mediamente intorno al 50%. Gli smorzamenti (riduzioni di risposta) percentualmente maggiori si manifestano per bassi spostamenti, vale a dire minori intensità sismiche. Il modello con una pila fissa risente maggiormente della modellazione dell'attrito rispetto al caso di due pile fisse; ciò è dovuto in gran parte al fatto che si ha un elemento dissipante in più (si ha infatti un appoggio scorrevole in più).

Differente è il caso di viadotti con sottostrutture meno flessibili (Mod.B), dove gli effetti dell'attrito sono molto meno significativi, specialmente per intensità sismiche più alte, poiché in queste situazioni l'effetto dissipativo delle sottostrutture (isteresi delle sezioni di base delle pile) risulta predominante rispetto a quello dell'attrito degli appoggi.

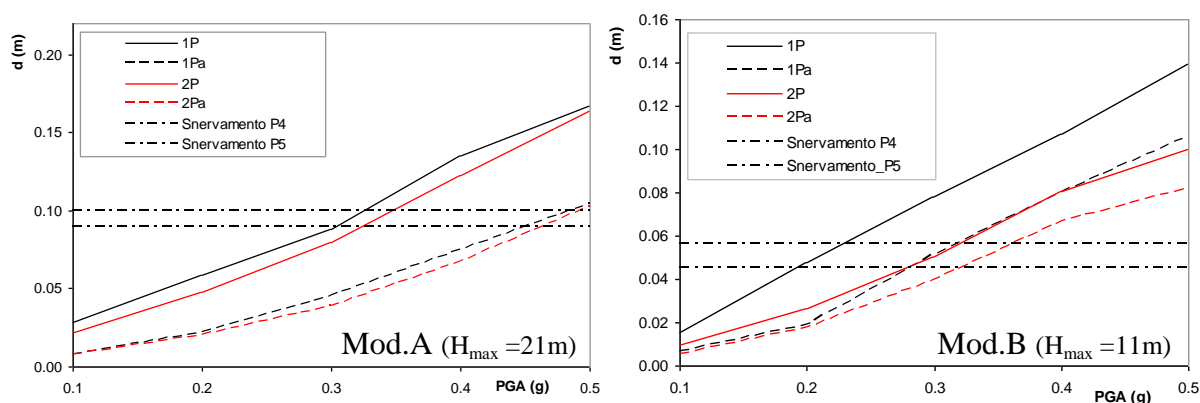


Fig 3. Effetti dell'attrito dei vincoli mobili sul Mod.A e sul Mod.B.

5.5 Modellazione degli isolatori

I ritegni elasto-plastici sono stati modellati con elementi finiti dotati di legge costitutiva bilineare, caratterizzati da una rigidità elastica (K_e) adeguatamente elevata, a garanzia di minime deformazioni dell'elemento sotto le azioni statiche e quasi-statiche (termica, ritiro, viscosità, frenatura, etc..) e da una reazione massima tale da garantire il comportamento elastico della pila sottostante ($K_e d_e = 0.7 M_{Rd}/H$).

$$F_x(d) = \begin{cases} K_e d & |d| \leq d_e \\ K_e d_e & |d| > d_e \end{cases} \quad (2)$$

dove con d si indica la deformazione dell'elemento, ovvero lo spostamento relativo tra l'impalcato e la sottostruttura.

5.6 Effetto dell'isolatore sulla risposta longitudinale del viadotto

I grafici nelle figure 4 e 5 riportano i massimi spostamenti longitudinali dell'impalcato considerando l'isolatore posizionato sulla pila centrale oppure su una spalla. I risultati delle analisi sismiche effettuate rivelano che la disposizione degli isolatori sulla spalla non migliora il comportamento sismico della struttura, anzi per terremoti più forti i fenomeni di fessurazione

del calcestruzzo, che comunque s'innescano sulle pile isolate, aiutano a ridurre gli spostamenti massimi dell'impalcato (far lavorare gli isolatori al 70% della forza di snervamento della pila, non preclude la fessurazione del calcestruzzo alla sezione di base). Introducendo l'attrito degli appoggi scorrevoli le risposte delle due soluzioni tendono ad uniformarsi, mentre gli effetti dissipativi risultano molto più modesti rispetto alla situazioni non isolate analizzate precedentemente; ciò in virtù del fatto che l'effetto dissipativo principale è quello dell'isolatore e non certo quello dell'attrito.

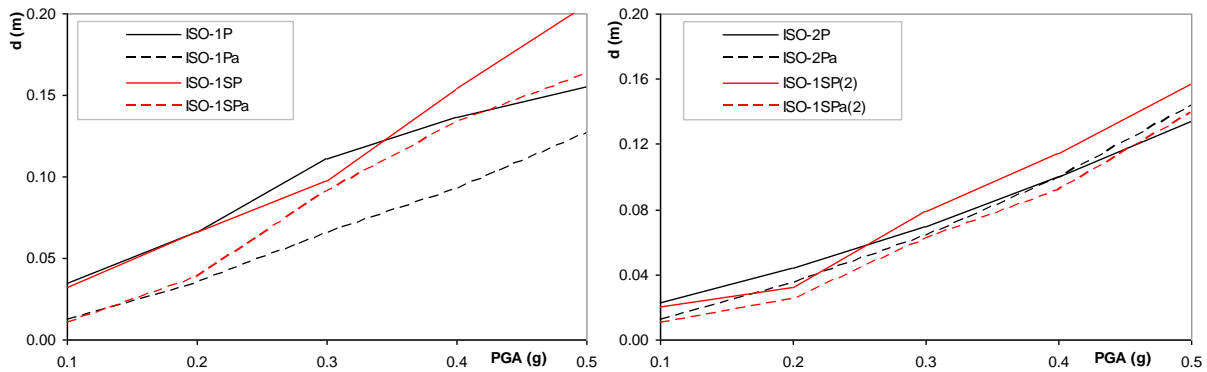


Fig 4. Risultati analisi isolamento longitudinale Mod.A

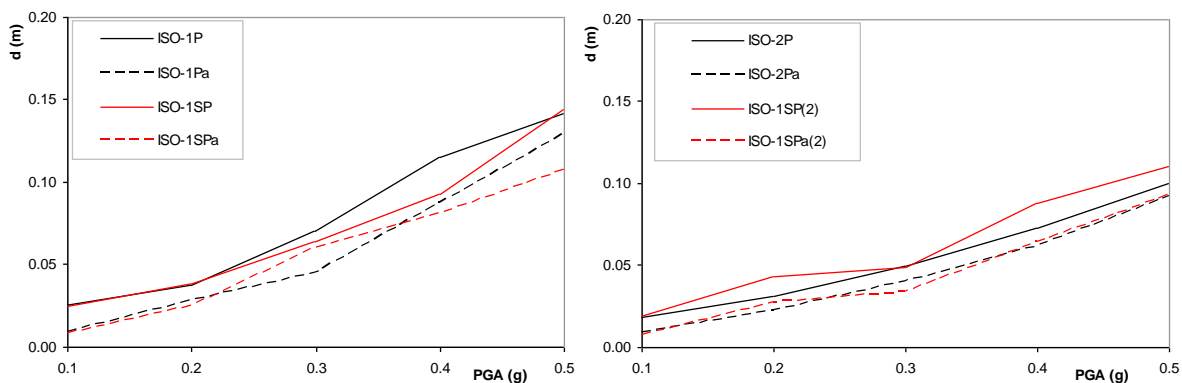


Fig 5. Risultati analisi isolamento longitudinale Mod.B considerando

E' stato infine affrontato il problema del fuori-piombo post-evento dei ritegni. Le analisi condotte hanno messo in luce che tale problema è importante a seguito di terremoti violenti (deformazioni residue dell'ordine di 30-50% della deformazione ultima del dispositivo). Mentre per eventi sismici più modesti (assimilabili a terremoti di esercizio per opere comuni in zone nazionali anche ad alto livello di pericolosità sismica $PGA=0.1-0.2g$), il problema appare praticamente trascurabile, risultando dalle analisi fuori-piombo inferiori al 2% e 7% della deformazione ultima del dispositivo, rispettivamente con isolatore in posizione centrale o su spalla.

6 I VIADOTTI TAMMARO I E II

Lungo la nuova statale 212 "della Val Fortore" nella provincia di Benevento, sono stati recentemente costruiti due viadotti con impalcato bi-trave a struttura mista acciaio-calcestruzzo, di lunghezza complessiva pari a 384m (Tammaro I) e 504m (Tammaro II). L'allora normativa vigente (OPCM. 3274) prevedeva per quest'area, un'accelerazione al suolo con probabilità di superamento durante la vita di riferimento del 10% pari a $PGA_{10\%} = 0.42g$. La sezione delle pile dei due viadotti è la medesima. Tale sezione è stata studiata per garantire una sufficiente resistenza e duttilità per il viadotto più alto (Tammaro II) e poi impiegata anche sull'altro viadotto consecutivo (Tammaro I) che presenta altezze minori e campate di luce inferiore. La se-

zione piena con forma ad “osso di cane” è in grado di assicurare buona resistenza e duttilità oltre che gradevole aspetto estetico, associato ad una equilibrata semplicità costruttiva.

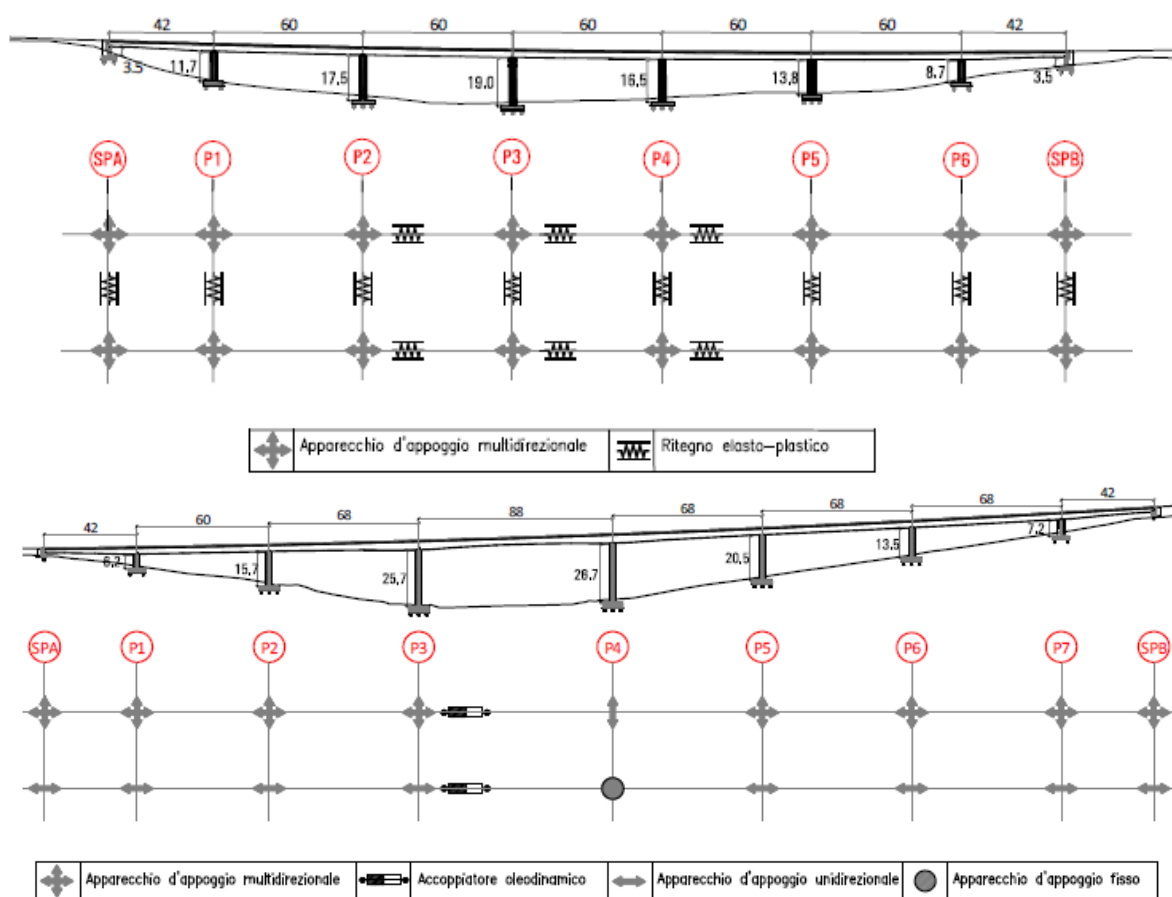


Fig 6. Profilo e disposizione degli appoggi , Tammaro I (sopra) e Tammaro II (sotto).

Per il viadotto più snello, Tammaro II, è stato possibile evitare l’utilizzo di isolatori sfruttando la flessibilità e la duttilità delle pile. In direzione longitudinale sono stati predisposti degli accoppiatori oleodinamici ubicati sulla pila 3, la cui altezza, circa 25m, analoga a quella dell’adiacente pila fissa (P4), favorisce questo tipo di soluzione (Fig. 6). Per il viadotto più basso, Tammaro I, (altezza massima delle pile circa 19m) si è invece dovuto ricorrere all’isolamento sia trasversale che longitudinale secondo lo schema riportato nella (Fig. 6). Con il terremoto che caratterizza lo stato limite di esercizio dell’opera ($PGA_{63\%} = 0.17g$), entrambi i viadotti restano in campo elastico, mentre, con il terremoto di progetto in condizioni ultime, per il Tammaro II si ottengono spostamenti appena superiori a quelli di snervamento; il che indica un minimo impiego della duttilità delle pile. L’isolamento del Tammaro I è stato realizzato tramite dispositivi elasto-plastici. In direzione longitudinale sono stati collocati sulle tre pile centrali di maggiore altezza. La resistenza elastica dei ritegni è stata calibrata in modo tale da poter associare alle deformazioni termiche di 60 metri di campata forze compatibili con le sottostrutture sottostanti. In fase sismica, questi ritegni hanno un’escursione massima in campo plastico pari a circa 12cm. Mentre gli spostamenti delle pile sono pari a circa 5 centimetri e comunque inferiore alla capacità elastica della pila. Le palificate di tutte le fondazioni dei due viadotti restano in ogni modo in campo elastico, essendo state dimensionate con il criterio della gerarchia delle resistenze.

7 CONCLUSIONI

Nella valutazione del comportamento sismico longitudinale di viadotti a travata continua, non possono essere ignorati le conseguenze dell'attrito sugli appoggi mobili. Il fenomeno produce importanti effetti dissipativi. Una corretta valutazione del fenomeno, assieme ad una progettazione duttile delle sottostrutture, può senz'altro aiutare ad individuare le situazioni ove il ricorso a tecniche di isolamento è effettivamente necessario. In questo caso, considerato la sismicità relativamente contenuta di gran parte del territorio nazionale, sono senz'altro da prediligere dispositivi che basano il proprio funzionamento sul comportamento elasto-plastico delle leghe metalliche. Questi, grazie alla propria sostanziale semplicità di funzionamento, garantiscono un'ottima efficienza assieme a costi d'installazione e manutenzione molto vantaggiosi.

Nella disposizione delle macchine per l'isolamento longitudinale di impalcati continui risulta molto più conveniente una collocazione baricentrica rispetto allo sviluppo del ponte. Infatti, dal punto di vista statico i vantaggi della soluzione sono immediatamente comprensibili (riduzione delle deformazioni termiche alle estremità del ponte), mentre le controindicazioni teoriche di questa scelta legate al fatto che le pile centrali sono generalmente le pile alte e quindi flessibili, non appaiono giustificate. Le analisi sismiche condotte hanno evidenziato una sostanziale equivalenza tra questa soluzione e quella in cui gli isolatori sono posizionati sulla spalla, in termini di spostamenti assoluti dell'impalcato. Mentre in termini di deformazioni residue post-terremoto, la soluzione baricentrica appare superiore in quanto, non solo i fuoripiombo dei dispositivi sono generalmente minori, ma, per i sismi meno intensi, tali deformazioni residue appaiono minime, tanto da non richiedere interventi manutentivi straordinari di ricentraggio.

Considerato, pertanto, il panorama sismico nazionale, la soluzione di viadotti continui con isolamento centrale su pile tramite dispositivi elasto-plastici, rappresenta una soluzione progettuale vantaggiosa sia dal punto di vista tecnico che economico.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Petrangeli, M., Marcantonio, P.R., Tortolini, P., L'isolamento sismico longitudinale dei ponti a travata: criteri di ottimizzazione tecnico-economica. XV Congr. Anidis, Padova 2013
- [2] Petrangeli, M., Marcantonio, P.R., Tortolini, P., L'isolamento sismico dei ponti a travata: simulazione del comportamento longitudinale con modelli non lineari. XV Congr. Anidis, Padova, 2013
- [3] Ranzo, G., Petrangeli, M., Pinto, P.E., Vertical oscillation due to axial-bending coupling during seismic response of RC Bridge Piers, *Int. J. of Earthquake Eng. & Structural Dynamics*, 28(12), pp.1685-1704, 1999.
- [4] Elnashai, A.S., J.J. Bommer, C.I. Baron, D. Lee & A.I. Salama. Selected engineering seismology and structural engineering studies of the Hyogo-ken Nanbu (Great Hanshin) earthquake of 17 January 1995. ESEE Research Report No. 95-2, 258, 1995.
- [5] Taylor, J.C., Stanton, J.F. Friction coefficients for stainless steel/PTFE (Teflon) bearings, WisDOT Final Research Report No. WHRP 10-01, 111, 2010.
- [6] Eurocodice 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 2: Bridges, 2009.

PAROLE CHIAVE

attrito appoggi scorrevoli, isolamento sismico, ritegni elatoplastici, ponti