



Sistemi minimi per la progettazione sismica di ponti con diverse soluzioni per lo schema di vincolo

Stefano Silvestri ^a, Michele Palermo ^a, Pietro Maria Palma ^a, Francesco Tangocci ^a, Niccolò Zampini ^a, Francesco Tomaselli ^b

^aDipartimento DICAM, Università di Bologna, Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna, Italy

^bFIP MECsrl, Via Scapacchiò 41, 35030 Selvazzano Dentro (PD), Italy

Parole chiave: ponti a travata, schema di vincolo, isolatori, dissipatori, shock-transmitters, sistemi minimi

ABSTRACT

Il comportamento di un ponte sottoposto all'azione sismica è principalmente governato dal sistema di connessione ("schema di vincolo") progettato tra la sovrastruttura (impalcato) e le sottostrutture (pile e spalle). La scelta dello "schema di vincolo" rappresenta quindi l'aspetto cruciale della concezione strutturale sismica di un ponte di nuova progettazione e assume grande rilevanza per un'efficace progettazione degli interventi di miglioramento/adequamento sismico di ponti esistenti, con una notevole ripercussione sui costi di tali opere. Le possibilità a disposizione del progettista sono molteplici. Accanto alle soluzioni tradizionali che prevedono appoggi fissi, monodirezionali e multidirezionali, i dispositivi attualmente disponibili in commercio consentono diverse soluzioni strutturali, quali, ad esempio, (i) l'impiego di Shock Transmitters, (ii) la dissipazione dell'energia sismica mediante smorzatori viscosi, (iii) l'isolamento dell'impalcato rispetto alle sottostrutture, (iv) l'accoppiamento di isolatori e dissipatori. Al fine di fornire al progettista un quadro completo delle possibili scelte per lo schema di vincolo più adatto al caso in esame, in questa memoria si passano in rassegna diverse soluzioni tecniche identificando modelli minimi con un numero discreto di gradi di libertà, utili per l'analisi preliminare del comportamento sismico del ponte. Per ogni soluzione la memoria fornisce i sistemi dinamici minimi elaborati in due direzioni del moto nel piano (longitudinale e trasversale), nel caso di impalcato rettilineo infinitamente rigido, trasversalmente ed assialmente. L'analisi del ponte mediante i sistemi minimi consente al progettista di valutare e confrontare velocemente, attraverso simulazioni dinamiche non lineari con accelerogrammi, le prestazioni sismiche ottenibili con i diversi dispositivi.

1 INTRODUZIONE

Questa memoria ha come obiettivo quello di fornire un supporto ordinato e di facile applicazione per il progetto di nuovi ponti o di interventi di miglioramento/adequamento sismico di ponti esistenti, ottimizzando il processo iterativo di scelta della soluzione di vincolo (Merli et al. 2005), in base ai dispositivi di protezione sismica disponibili (Soong & Dargush 1997, Christopoulos & Filiatrault 2006, Patel 2013, Tomaselli et al. 2006b). Recentemente ci si affida sempre più spesso ai software di calcolo che non permettono la piena comprensione fisica del sistema da parte del progettista: la riduzione a sistemi dinamici minimi (Chopra 2001) diventa quindi uno strumento di controllo semplice e potente al tempo stesso (Silvestri et al. 2010, Palermo et al. 2018). Nel seguito si evidenziano le caratteristiche dei dispositivi principali in commercio e quindi si presentano singolarmente gli schemi di vincolo più frequenti con i relativi sistemi minimi in senso longitudinale e trasversale.

2 I DISPOSITIVI DI PROTEZIONE SISMICA PER I PONTI

Il panorama dei dispositivi di protezione sismica in commercio risulta piuttosto vario, comprendendo decine di prodotti con caratteristiche ed ambito d'uso diversi. In questa sede si fa riferimento alle tre tipologie di dispositivi più diffuse per l'adequamento sismico degli impalcati da ponte: Shock Transmitters, dissipatori (viscosi), isolatori.

2.1 Shock Transmitters

Lo Shock Transmitter (nel seguito ST), altrimenti noto come *Shock Transmission Unit* (Patel 2013) o *Shock Absorber* o *Lock Up Device*, è un dispositivo di protezione sismica costituito da un pistone in acciaio inossidabile, all'interno di un cilindro a tenuta stagna che contiene fluidi siliconici estremamente stabili nel tempo e in un ampio intervallo di temperatura (Fig. 1).

Il comportamento dello ST è legato alle velocità relative che si sviluppano all'estremità dello stesso e segue una legge costitutiva Forza-Velocità non lineare del tipo $F=cv^\alpha$ con $\alpha > 1$ (in genere pari a 2). A causa della loro legge

costitutiva, gli ST hanno la peculiarità di non opporre significativa resistenza quando sottoposti a velocità basse, associate ad esempio a spostamenti lenti come quelli dovuti alle deformazioni termiche. Viceversa, se investiti da segnali impulsivi, come nel caso del sisma (velocità elevate in breve tempo), esplicano la loro funzione di reazione fino alla loro massima capacità. Quest'ultima è teoricamente maggiore rispetto alla forza che devono trasmettere alla sottostruttura in base al sisma di progetto, per un marcato incrudimento della legge costitutiva. Tali caratteristiche permettono di realizzare vincoli temporanei che si attivano durante il sisma e consentono di ridistribuire le forze associate al sisma anche alle sottostrutture su cui vengono predisposti. Teoricamente rigidi, nella realtà questi vincoli sono cedevoli, con rigidità elevata ma non infinita (ottenibile dal rapporto tra forza massima di progetto e una percentuale della semicorsa del pistone). Inoltre i dispositivi sono provvisti di snodi sferici alle estremità e lavorano sia in trazione che compressione, assicurando grande flessibilità di impiego e la possibilità di essere integrati con gli apparecchi di appoggio a costituire un unico dispositivo. Garantiscono le loro prestazioni anche dopo ripetuti cicli di sollecitazione.



Figura 1. Uno Shock Transmitter integrato in un appoggio classico da ponte (per gentile concessione di FIP MEC srl, Selvazzano (PD)).

2.2 Dissipatori (o smorzatori)

In commercio esistono molteplici dispositivi di dissipazione dell'energia sismica in ingresso nel sistema strutturale (dispositivi fluido-viscosi, visco-elastici, metallici o isteretici, ecc.) che assolvono il problema di protezione sismica abbattendo lo spettro elastico di progetto, conferendo alla struttura rapporti di smorzamento anche fino a valori attorno a $\xi = 50\% - 60\%$ (Tomaselli et al. 2001, 2006b).

Il presente lavoro si concentra sui dispositivi fluido-viscosi (*Viscous Dampers*), di frequente

applicazione nel caso degli impalcati da ponte (Fig. 2). Questi sono strutturalmente molto simili agli ST descritti precedentemente, costituiti da un pistone in acciaio inossidabile, all'interno di un cilindro a tenuta stagna, pieno di un fluido siliconico altamente viscoso ed estremamente stabile nel tempo e in un ampio intervallo di temperatura.

Il comportamento dello smorzatore viscoso è legato alle velocità relative che si sviluppano all'estremità dello stesso e segue una legge costitutiva Forza-Velocità non lineare del tipo $F=cv^\alpha$, con $\alpha < 1$ (in genere variabile tra 0.10 e 0.15). L'esponente minore di 1 per i *Viscous Dampers* è ottenuto con un circuito idraulico diverso da quello degli ST. Tale curva di lavoro permette di esplicitare una reazione viscosa anche per valori relativamente bassi di velocità. Si fa notare come un esponente α troppo piccolo ($\alpha < 0.10$) porterebbe il dispositivo a trasferire alla struttura quasi la totalità della forza di progetto anche per velocità molto basse, ovverosia anche in condizioni di esercizio, mentre il valore di riferimento ($0.10 < \alpha < 0.15$) garantisce sostanzialmente un tetto alla forza massima trasmessa dal dispositivo, a tutela della struttura di supporto, beneficio non ottenibile con valori di α maggiori.

I dissipatori viscosi si dividono in due tipi in base al vincolo che esplicano in esercizio, in assenza di sisma. I primi sono dissipatori liberi di scorrere allungandosi o accorciandosi senza apprezzabili attriti se soggetti a basse velocità (ad es. a causa di deformazioni termiche) qui chiamati *Thermic Viscous Damper* (TVD); i secondi sono dissipatori che, attraverso valvole aggiuntive, assicurano un vincolamento rigido anche nei confronti delle azioni lente e pertanto si definiscono "fissi in esercizio", qui chiamati *Viscous Damper* (VD). Questi ultimi possono essere utilizzati per realizzare il punto fisso in esercizio o su un'unica pila (solitamente quella centrale) o su un'unica spalla, definita quindi "spalla/pila resa fissa", o "spalla/pila fissa in esercizio". Il comportamento dinamico è invece il medesimo per le due tipologie di dissipatori.

Come gli ST, i VD/TVD sono provvisti di snodi sferici alle estremità e lavorano sia in trazione che compressione, assicurando grande flessibilità di impiego e la possibilità di essere integrati con gli apparecchi di appoggio a costituire un unico dispositivo. Garantiscono le loro prestazioni anche dopo ripetuti cicli di

sollecitazione, e non richiedono né manutenzione, né sostituzione a seguito di un evento sismico.



Figura 2. Uno smorzatore viscoso installato su una spalla (per gentile concessione di FIP MEC srl, Selvazzano (PD)).

2.3 Isolatori

Gli isolatori sono dispositivi utilizzati con l'obiettivo primario di aumentare il periodo proprio di oscillazione di un sistema e con l'obiettivo secondario di incrementare anche lo smorzamento complessivo della struttura, riducendo in entrambi i casi l'ordinata dello spettro elastico di progetto. Ogni isolatore è infatti caratterizzato da un proprio smorzamento equivalente (ζ_{eq}) che comunemente può variare tra il 10% ed il 15%. Le due funzioni sono sempre accoppiate in parallelo indipendentemente dalla tipologia utilizzata.

Gli isolatori di uso più frequente sono: (i) elastomerici armati, dove lo smorzamento è dato dall'isteresi della gomma; (ii) elastomerici con nucleo in piombo, dove il piombo dissipa energia tramite la propria plasticizzazione (il piombo è un materiale che può subire infinite plasticizzazioni successive senza rottura, quindi il dispositivo non necessita di sostituzione a seguito di un evento sismico); (iii) isolatori a scorrimento a singola o doppia superficie curva (raggio equivalente di curvatura fino a 4÷5 m), dove lo smorzamento si esplica per attrito tra un opportuno materiale di scorrimento certificato CE e superfici curve in acciaio inox lucidato a specchio (Fig. 3). Si noti che ognuno di questi dispositivi risulti essere autocentrante, anche se con diversa efficienza in base alla tipologia.



Figura 3. Un isolatore a scorrimento (per gentile concessione di Matildi+Partners, Bologna).

3 SCHEMI DI VINCOLO E SISTEMI MINIMI

3.1 Ipotesi

In questo lavoro si è considerato il caso di un ponte con impalcato rettilineo a travata continua, ipotizzato infinitamente rigido sia assialmente sia trasversalmente. Ciò permette di ridurre notevolmente il numero di gradi di libertà del sistema. Il disaccoppiamento tra moto in senso longitudinale e trasversale è garantito qualora sussista simmetria delle strutture (spalle, pile e relative palificate di fondazione) rispetto all'asse longitudinale dell'impalcato (Trombetti & Conte 2005). Si trascura la variabilità spaziale del moto sismico (causato dal carattere asincrono del fenomeno di propagazione) lungo lo sviluppo del ponte e l'interazione terreno-struttura.

3.2 Soluzione tradizionale

Questa soluzione (Fig. 4) è spesso la situazione da studiare in partenza per poter confrontare i risultati degli interventi di miglioramento/adequamento. Lo schema di vincolo individua una "spalla fissa", dove si installano appoggi fissi e unidirezionali trasversali, mentre sulle pile e sulla spalla mobile si installano appoggi scorrevoli multidirezionali e unidirezionali longitudinali. Tale disposizione è realizzata per consentire le dilatazioni termiche in esercizio. Sia in esercizio che durante un sisma, in direzione longitudinale, l'azione sismica grava interamente sulla spalla fissa mentre trasversalmente la forza si ripartisce fra tutte le sottostrutture in base alle loro rigidità.

In questo studio si considerano gli appoggi scorrevoli come carrelli perfetti, trascurandone

cioè la reazione che potrebbero trasmettere alla sottostruttura per attrito, solitamente quantificabile con una piccola percentuale del carico verticale.

3.3 Soluzione con Shock Transmitters

L'introduzione di Shock Transmitters (ST) consente di rendere idealmente solidali impalcato e sottostruttura nell'eventualità di un'azione impulsiva quale il sisma. È possibile realizzare la collaborazione in senso longitudinale sia tra le sole spalle (Fig. 5) sia tra tutte le sottostrutture (Fig. 6), incluse le pile, laddove la loro snellezza non sia eccessiva (ovvero abbiano un'adeguata rigidità nella direzione di funzionamento del dispositivo). Nella pratica si posizionano due o più dispositivi simmetrici rispetto all'asse dell'impalcato.

In senso trasversale, la soluzione tradizionale permette già di ridistribuire l'azione sismica tra le sottostrutture: non vi è quindi nessun vantaggio ad introdurre uno ST.

Va comunque notato come uno ST presenti una rigidità assiale grande ma non infinita, valutabile in prima approssimazione attraverso il rapporto tra la forza massima di progetto e una percentuale della semicorsa massima del pistone stesso, comunque specificata dal produttore. Lo schema minimo proposto tiene quindi conto dello ST come vincolo cedevole, che può però, all'occorrenza, e in via semplificata, essere considerato un vincolo rigido.

3.4 Soluzione con smorzatori viscosi

Esternamente identici agli ST, gli smorzatori viscosi risultano convenienti in genere se installati in senso longitudinale, tra le sottostrutture e l'impalcato. L'appoggio del ponte viene realizzato esclusivamente con vincoli scorrevoli unidirezionali in senso longitudinale e multidirezionali perché appoggi fissi ed unidirezionali trasversali ostacolerebbero il libero movimento dell'impalcato in fase sismica. Il "punto" fisso longitudinale viene realizzato con l'inserimento di VD con valvole particolari come descritto in precedenza. Altrove si potranno o meno inserire TVD.

Gli smorzatori viscosi generalmente si installano solo sulle spalle (Fig. 7) (Tomaselli et al. 2004, 2006a) o su tutte le sottostrutture (Fig. 8).

L'introduzione di questi dispositivi permette di incrementare lo smorzamento proprio del sistema, quindi di ridurre lo spettro elastico di progetto.

In direzione trasversale non si ha un cambiamento di comportamento rispetto allo schema di vincolo tradizionale.

3.5 Soluzione con isolatori

L'uso di isolatori ha un duplice effetto: incrementare il periodo proprio del sistema (con conseguente abbattimento dello spettro elastico di progetto) e aumentare lo smorzamento del sistema, sia nel caso di isolatori in gomma/gomma-piombo per isteresi e/o plasticizzazione dei materiali, sia nel caso di isolatori a pendolo dove si ha dissipazione per attrito. Questi vantaggi sono comunque legati al trasferimento di forze tra i dispositivi e le sottostrutture. In base alla geometria di queste ultime può risultare conveniente isolare le sole spalle (Fig. 9), le sole pile (Fig. 10) o entrambe (Fig. 11). Nel caso di isolamento parziale, si provvede generalmente a disporre appoggi multidirezionali dove non sono previsti isolatori. L'impiego di isolatori, a causa della loro simmetria di comportamento, implica chela

protezione sismica avvenga anche in senso trasversale. Si noti come l'isolamento diffuso di tutte le sottostrutture rimanga nella pratica la soluzione più diffusa, relegando il caso (raro) di isolamento delle sole spalle ai ponti molto corti, e l'isolamento delle sole pile ai casi poco frequenti di ponti sorretti da un gran numero di pile.

3.6 Soluzione con isolatori e smorzatori viscosi

Qualora si abbiano spalle adeguatamente robuste, è possibile l'accoppiamento in parallelo di dissipatori viscosi sulle spalle e isolatori diffusi su tutte le sottostrutture (Fig. 12). È una soluzione che unisce i pregi di entrambi i dispositivi e può essere un'alternativa valida, seppur costosa, applicabile per qualche caso di adeguamento, laddove la richiesta di abbattimento dello spettro elastico sia particolarmente rilevante. Si noti come la grande riduzione degli spostamenti longitudinali permetta il risparmio sul costo dei giunti stradali. In direzione trasversale agiscono solo gli isolatori, ricadendo quindi nel caso degli schemi minimi ottenuti per le soluzioni con isolatori sviluppate in precedenza.

SOLUZIONE TRADIZIONALE			
S_1	Spalla Fissa		<ul style="list-style-type: none"> Appoggio fisso Appoggio unidirezionale Appoggio multidirezionale
AC	Appoggio Classico su pila i-esima		
S_2	Spalla Mobile		
Comportamento Longitudinale		Comportamento Trasversale	
$m_1 = \frac{1}{2} m_{pali,S1} + \frac{1}{2} m_{S1}$		$m_1 = \frac{1}{2} m_{pali,S1} + \frac{1}{2} m_{S1}$	$m_2 = \frac{1}{2} m_{pali,S2} + \frac{1}{2} m_{S2}$
$m_2 = \frac{1}{2} m_{S1} + m_{imp}$		$m_3 = \frac{1}{2} m_{S1+S2} + \sum \frac{1}{2} m_{pila,i} + m_{imp}$	
		$m_i = \frac{1}{2} m_{pali,i} + \frac{1}{2} m_{pila,i}$	

Figura 4. Soluzione tradizionale – Schema di vincolo e sistemi minimi nelle due direzioni.

SOLUZIONE CON SHOCK TRANSMITTERS SU SPALLA MOBILE			
S ₁	Spalla Fissa		
AC	Appoggio Classico su pila i-esima		
S ₂	Spalla Mobile		
Comportamento Longitudinale		Comportamento Trasversale	
$m_1 = \frac{1}{2} m_{pali,S1} + \frac{1}{2} m_{S1}$	$m_4 = \frac{1}{2} m_{S1} + m_{imp}$	$m_1 = \frac{1}{2} m_{pali,S1} + \frac{1}{2} m_{S1}$	$m_2 = \frac{1}{2} m_{pali,S2} + \frac{1}{2} m_{S2}$
$m_2 = \frac{1}{2} m_{pali,S2} + \frac{1}{2} m_{S2}$		$m_3 = \frac{1}{2} m_{S1+S2} + \sum \frac{1}{2} m_{pila,i} + m_{imp}$	
$m_3 = \frac{1}{2} m_{S2}$		$m_i = \frac{1}{2} m_{pali,i} + \frac{1}{2} m_{pila,i}$	

Figura 5. Soluzione con Shock Transmitters su spalla mobile – Schema di vincolo e sistemi minimi nelle due direzioni.

SOLUZIONE CON SHOCK TRANSMITTERS DIFFUSI			
S ₁	Spalla Fissa		
AC	Appoggio Classico su pila i-esima		
S ₂	Spalla Mobile		
Comportamento Longitudinale		Comportamento Trasversale	
$m_1 = \frac{1}{2} m_{pali,S1} + \frac{1}{2} m_{S1}$	$m_{i,1} = \frac{1}{2} m_{pali,i} + \frac{1}{2} m_{pila,i}$	$m_1 = \frac{1}{2} m_{pali,S1} + \frac{1}{2} m_{S1}$	$m_2 = \frac{1}{2} m_{pali,S2} + \frac{1}{2} m_{S2}$
$m_2 = \frac{1}{2} m_{pali,S2} + \frac{1}{2} m_{S2}$	$m_{i,2} = \frac{1}{2} m_{pila,i}$	$m_3 = \frac{1}{2} m_{S1+S2} + \sum \frac{1}{2} m_{pila,i} + m_{imp}$	
$m_3 = \frac{1}{2} m_{S2}$	$m_4 = \frac{1}{2} m_{S1} + m_{imp}$	$m_i = \frac{1}{2} m_{pali,i} + \frac{1}{2} m_{pila,i}$	

Figura 6. Soluzione con Shock Transmitters diffusi – Schema di vincolo e sistemi minimi nelle due direzioni.

SOLUZIONE CON SMORZATORI VISCOSI SU SPALLE			
S_1	Spalla resa fissa		
AC	Appoggio Classico su pila i -esima		
S_2	Spalla Mobile		
Comportamento Longitudinale		Comportamento Trasversale	
$m_1 = \frac{1}{2} m_{pali,S1} + \frac{1}{2} m_{S1}$	$m_4 = \frac{1}{2} m_{S2}$	$m_1 = \frac{1}{2} m_{pali,S1} + \frac{1}{2} m_{S1}$	$m_2 = \frac{1}{2} m_{pali,S2} + \frac{1}{2} m_{S2}$
$m_2 = \frac{1}{2} m_{pali,S2} + \frac{1}{2} m_{S2}$		$m_3 = \frac{1}{2} m_{S1+S2} + \sum \frac{1}{2} m_{pila,i} + m_{imp}$	
$m_3 = \frac{1}{2} m_{S1}$		$m_i = \frac{1}{2} m_{pali,i} + \frac{1}{2} m_{pila,i}$	

Figura 7. Soluzione con smorzatori viscosi su spalle – Schema di vincolo e sistemi minimi nelle due direzioni.

SOLUZIONE CON SMORZATORI VISCOSI DIFFUSI			
S_1	Spalla Mobile		
AC	Appoggio Classico su pila i -esima		
S_2	Spalla Mobile		
<i>NOTA: Il VD (fisso in esercizio) è previsto su una singola pila (centrale). Altrove si dispongono solo TVD.</i>			
Comportamento Longitudinale		Comportamento Trasversale	
$m_1 = \frac{1}{2} m_{pali,S1} + \frac{1}{2} m_{S1}$	$m_4 = \frac{1}{2} m_{S2}$	$m_1 = \frac{1}{2} m_{pali,S1} + \frac{1}{2} m_{S1}$	$m_2 = \frac{1}{2} m_{pali,S2} + \frac{1}{2} m_{S2}$
$m_2 = \frac{1}{2} m_{pali,S2} + \frac{1}{2} m_{S2}$	$m_{i,1} = \frac{1}{2} m_{pali,i} + \frac{1}{2} m_{pila,i}$	$m_3 = \frac{1}{2} m_{S1+S2} + \sum \frac{1}{2} m_{pila,i} + m_{imp}$	
$m_3 = \frac{1}{2} m_{S1}$	$m_{i,2} = \frac{1}{2} m_{pila,i}$	$m_i = \frac{1}{2} m_{pali,i} + \frac{1}{2} m_{pila,i}$	

Figura 8. Soluzione con smorzatori viscosi diffusi – Schema di vincolo e sistemi minimi nelle due direzioni.

SOLUZIONE CON ISOLATORI SU SPALLE			
S_1	Spalla Mobile		
AC	Appoggio Classico su pila i -esima		
S_2	Spalla Mobile		
Comportamento Longitudinale		Comportamento Trasversale	
$m_1 = \frac{1}{2} m_{pali,S1} + \frac{1}{2} m_{S1}$	$m_4 = \frac{1}{2} m_{S2}$	$m_1 = \frac{1}{2} m_{pali,S1} + \frac{1}{2} m_{S1}$	$m_4 = \frac{1}{2} m_{S2}$
$m_2 = \frac{1}{2} m_{pali,S2} + \frac{1}{2} m_{S2}$		$m_2 = \frac{1}{2} m_{pali,S2} + \frac{1}{2} m_{S2}$	
$m_3 = \frac{1}{2} m_{S1}$		$m_3 = \frac{1}{2} m_{S1}$	

Figura 9. Soluzione con isolatori su spalle – Schema di vincolo e sistemi minimi nelle due direzioni.

SOLUZIONE CON ISOLATORI SU PILE			
S_1	Spalla Mobile		
AC	Appoggio Classico su pila i -esima		
S_2	Spalla Mobile		
Comportamento Longitudinale		Comportamento Trasversale	
$m_{i,1} = \frac{1}{2} m_{pali,i} + \frac{1}{2} m_{pila,i}$		$m_{i,1} = \frac{1}{2} m_{pali,i} + \frac{1}{2} m_{pila,i}$	
$m_{i,2} = \frac{1}{2} m_{pila,i}$		$m_{i,2} = \frac{1}{2} m_{pila,i}$	

Figura 10. Soluzione isolatori su pile – Schema di vincolo e sistemi minimi nelle due direzioni.

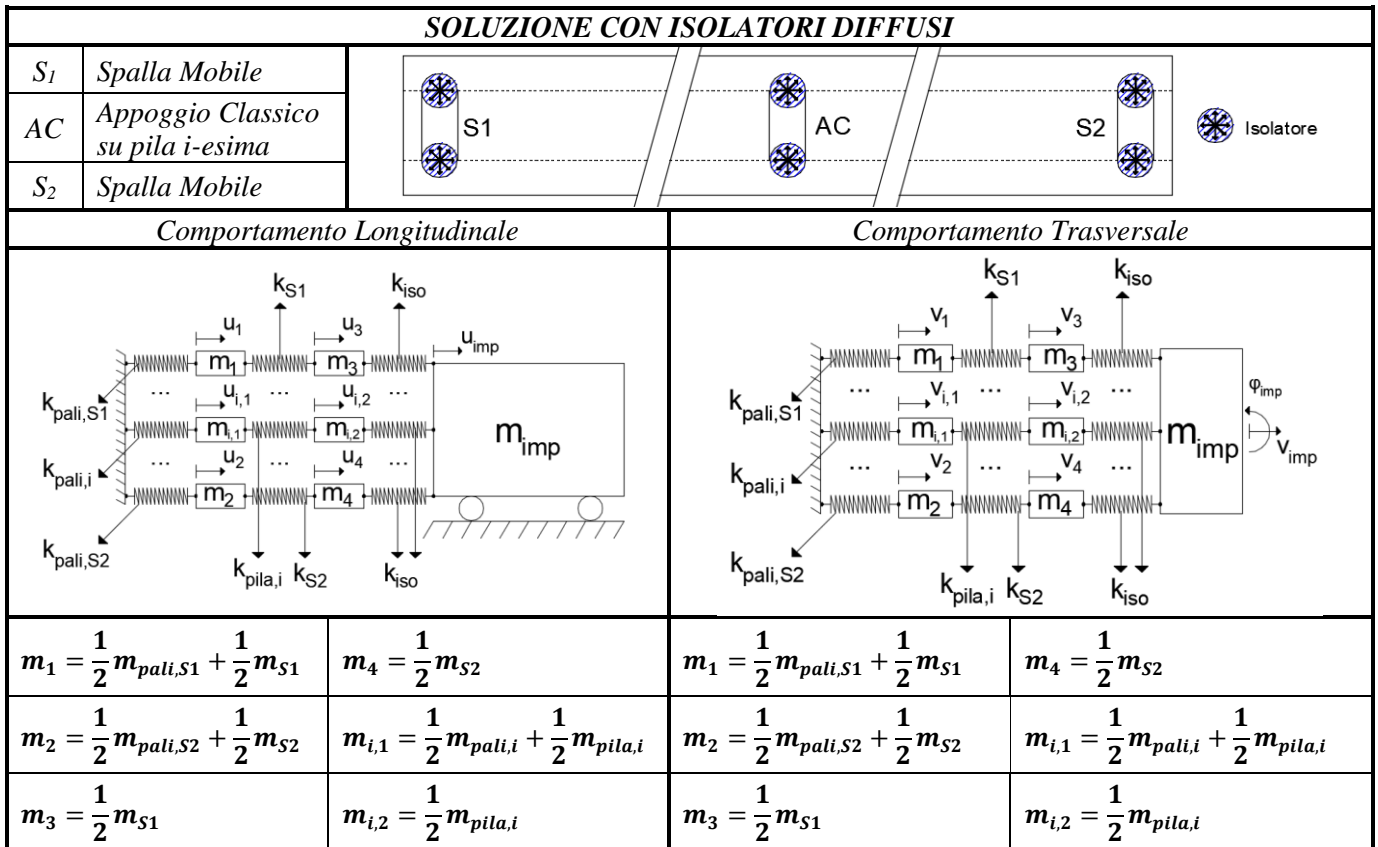


Figura 11. Soluzione con isolatori diffusi – Schema di vincolo e sistemi minimi nelle due direzioni.

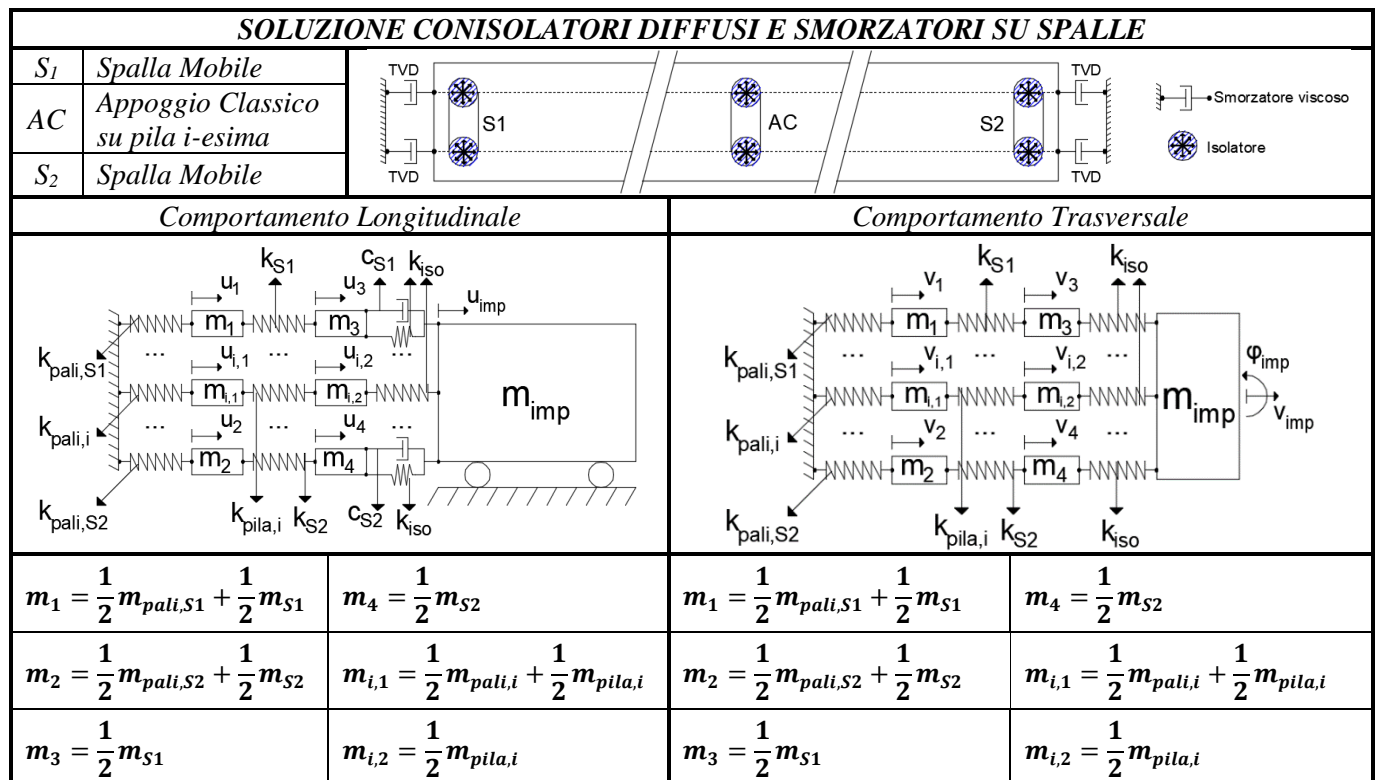


Figura 12. Soluzione con isolatori e smorzatori diffusi – Schema di vincolo e sistemi minimi nelle due direzioni.

4 SVILUPPI FUTURI: ABACHI PER LA PROGETTAZIONE

Il lavoro di inquadramento presentato in questa memoria ha un suo naturale sviluppo nello studio di impalcati trasversalmente deformabili, per cui sono ugualmente individuabili opportuni schemi minimi di comportamento che includono i parametri di rigidità/flessibilità dell'impalcato in direzione trasversale. Avendo quindi definito il ventaglio di possibilità tra cui il progettista può scegliere, si intende procedere attraverso uno studio parametrico degli schemi minimi associati a ogni soluzione proposta, ottenendo dapprima i parametri fondamentali di studio (es. periodi propri di vibrazione), e infine elaborando abachi contenenti formulazioni semplificate (come quelle presenti in Silvestri et al. 2010 ed in Palermo et al. 2018) ma sufficientemente corrette, per la scelta dei migliori dispositivi di protezione sismica, a seconda del caso studio esaminato. Il progettista potrà quindi, prima ancora di sviluppare un modello FEM: (i) utilizzare i propri dati di progetto per ottenere, dagli abachi, indicazioni di base al fine di comprendere meglio il comportamento dell'opera che sta esaminando; (ii) valutare rapidamente l'efficacia delle alternative di adeguamento/miglioramento a sua disposizione; (iii) confrontarne il costo e le prestazioni; (iv) effettuare la scelta progettuale migliore.

5 CONCLUSIONI

Gli schemi minimi qui proposti per l'analisi del moto di un impalcato da ponte continuo trasversalmente ed assialmente rigido sono i più comuni ma ovviamente non gli unici. Ogni ponte ha le sue caratteristiche morfologiche e strutturali, ed anche il tipo di terreno e la zona sismica giocano un ruolo nella scelta della soluzione di vincolo. Questi schemi risultano comunque utili per l'analisi manuale, tramite opportune semplificazioni, o con software di calcolo. Il limitato numero di gradi di libertà permette una rapida comprensione dei parametri fondamentali per lo studio del comportamento sotto sisma, fornendo quindi un controllo sul problema non altrimenti possibile. Inoltre, il progettista troverà già un utile riferimento nell'elenco esaustivo delle soluzioni di adeguamento/miglioramento sismico più frequenti nella pratica a sua disposizione.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Dipartimento della Protezione Civile per il finanziamento nell'ambito del progetto RELUIS4 (Finanziamento DPC-RELUIS 2019-2021 – Linea di ricerca WP 15 – “Contributi normativi per Isolamento e Dissipazione”).

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Chopra, A. K., 2001. *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 2nd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Christopoulos, C., Filiatrault, A., 2006. *Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation*, IUSS Press, Pavia, Italy.
- Merli, M., Bergonzoni, S., Trombetti, T., Gasparini G., 2005. Effectiveness of commercial oil pressure seismic devices for bridges, *Proceedings of the “2005 New York City Bridge Conference”*, Bridge Engineering Association, September 12-13, New York, USA.
- Palermo, M., Silvestri, S., Landi, L., Gasparini, G., Trombetti, T., 2018. A “direct five-step procedure” for the preliminary seismic design of buildings with added viscous dampers, *Engineering Structures*, **173**, 933-950.
- Patel, D.J., 2013. *Shock Transmission Units in Construction*, ICE Publishing, London, UK.
- Silvestri, S., Gasparini, G., Trombetti, T., 2010. A Five-Step Procedure for the Dimensioning of Viscous Dampers to Be Inserted in Building Structures, *Journal of Earthquake Engineering*, **14**(3), 417-447.
- Soong, T. T., Dargush, G. F., 1997. *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Tomaselli, F., Baldo, P., Pimenta, F., 2004. Loureiro viaduct seismic protection: testing of non-linear viscous dampers. *6^a Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sismica*, April 14-16, Guimaraes, Portugal.
- Tomaselli, F., Baldo, P., Savor, Z., 2006a. Krka Arch Bridge seismic protection: viscous damper and special bearing system. *SECON International Conference of Bridges*, May 21-24, Dubrovnik, Croatia.
- Tomaselli, F., Infanti, S., Telemochos, T., Castellano, M.G., 2006b. Viscous dampers: recent major applications in European Bridges. *Sixth World Congress on Joints, Bearings and Seismic System for Concrete Structures*, September 17-21, Halifax, Canada.
- Tomaselli, F., Pérez, R.J., Nieto, J.J., Solórzano, E.R., Baldo, P., 2001. Design Criteria of the Seismic Dissipation System for the Viaducts of the Caracas - Tuy Medio Railway in Venezuela. *Fifth World Congress on Joints, Bearings and Seismic System for Concrete Structure*, October, Rome, Italy.
- Trombetti, T.L., Conte, J.P., 2005. New Insight into and simplified approach to seismic analysis of torsionally coupled one-story, elastic systems, *Journal of Sound and Vibration*, **286**, 265-312.