



Proposta di una tecnica di retrofit sismico con l'impiego di un sistema di dissipazione esterno

Antonio Sabino^a, Antonio Mannella^a, Andrea de Leo^b

^a Istituto per le Tecnologie della Costruzione – Consiglio Nazionale delle Ricerche, ITC-CNR L'Aquila, Via Giosuè Carducci, 32, 67100, L'Aquila, Italia

^b Università dell'Aquila, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile - Architettura ed Ambientale, L'Aquila, Italia

Keywords: seismic retrofit; dissipation; earthquake; viscous damper

ABSTRACT

Nella memoria è presentato uno studio volto alla valutazione dell'efficacia di una tecnica di miglioramento sismico di strutture esistenti che prevede l'introduzione di dispositivi di dissipazione di energia opportunamente collegati alla struttura attraverso un sistema di cavi e di meccanismi di amplificazione degli spostamenti.

Uno dei principali aspetti inerenti l'introduzione di elementi volti alla dissipazione di energia in strutture esistenti riguarda la definizione della posizione ottimale degli stessi, con configurazioni tali da consentire di massimizzarne l'efficacia senza produrre limitazioni nella funzionalità dell'opera. Il raggiungimento di tali obiettivi è legato, indipendentemente dalla tipologia adottata, all'entità dell'energia dissipata in ciascun ciclo, in genere direttamente proporzionale all'entità degli spostamenti cui è soggetto il dispositivo. Molte configurazioni proposte in letteratura e correntemente adottate nella pratica professionale prevedono l'inserimento di sistemi di dissipazione aggiuntiva variamente collegati a controventi installati all'interno del telaio strutturale e in grado, quindi, di sfruttare gli spostamenti di interpiano prodotti dalla sollecitazione sismica. Il sistema proposto sfrutta invece gli spostamenti della struttura rispetto alla base della stessa, amplificati con leverismi e trasferiti al dispositivo attraverso un sistema di cavi opportunamente configurato. In questo articolo è illustrata la prima fase dello studio, nella quale un semplice modello ad un grado di libertà è stato preso in considerazione per valutare gli effetti dell'introduzione del sistema proposto in termini di riduzione della domanda sismica sulla struttura. Una specifica analisi parametrica è stata inoltre effettuata al fine di ottenere prime indicazioni per il dimensionamento del sistema in relazione alle caratteristiche geometriche ed inerziali della struttura.

1 INTRODUZIONE

La protezione sismica delle strutture può essere realizzata adottando differenti strategie quali, solo per citarne alcune, l'isolamento alla base, l'utilizzo di TMD (Fabrizio et al. 2017, Fabrizio et al. 2019) o la dissipazione. L'introduzione di dispositivi di dissipazione dell'energia all'interno di strutture esistenti rappresenta un importante sistema di protezione sismica ampiamente utilizzato soprattutto per le strutture intelaiate. La deformabilità di tali strutture generalmente consente, con limiti ben definiti, di sfruttare gli spostamenti di interpiano per attivare i dispositivi e raggiungere consistenti livelli di dissipazione dell'energia di input. Numerose configurazioni sono state proposte al fine di ottimizzare la localizzazione e la funzionalità dei dispositivi, generalmente applicati in serie ad un controvento posto all'interno della maglia del telaio e in grado

di trasferire al dispositivo una frazione degli spostamenti di interpiano cui è soggetta la struttura, dipendente dalla configurazione geometrica dello stesso. Risulta evidente, quindi, come la deformabilità della struttura risulti un requisito essenziale per l'efficacia dei sistemi di dissipazione. Per le situazioni in cui le strutture non risultino sufficientemente flessibili, sono state sviluppate interessanti soluzioni da diversi autori, tra cui quella di un sistema a cavi (Damped cable system, DCS), inizialmente proposta dal gruppo di ricerca dell'Università di Buffalo (Peckan G., 1998; Peckan and Mander, 2000), ed ulteriormente sviluppato (Terenzi, 1999; Sorace e Terenzi, 2001; Naeem, et al., 2018) anche nell'ambito di un progetto di ricerca finanziato dalla Commissione Europea, denominato SPIDER (Strand Prestressing for Internal Damping of Earthquake Response); tale sistema consiste in un cavo preteso

di acciaio con alto grado di snervamento, costituito da trefoli scorrevoli e lubrificati, dotati di opportuna protezione, disponibili come produzione standard sul mercato, la cui estremità inferiore è collegata ad un dissipatore fluido-viscoso fissato alla fondazione dell'edificio. Il cavo ha connessioni scorrevoli a livello degli impalcati, in corrispondenza dei quali subisce deviazioni fino a collegarsi con l'impalcato di copertura. Tale disposizione del cavo permette di trasmettere al dispositivo di dissipazione lo spostamento totale misurato in copertura del fabbricato, aumentando la capacità dissipativa dello stesso e riducendo il numero di dispositivi necessari. Allo stesso tempo la deviazione del cavo in corrispondenza di ciascun impalcato permette di trasferire allo stesso una reazione che bilancia i carichi laterali prodotti dall'eccitazione delle masse a livello degli impalcati. Sistemi di dissipazione tesi ad incrementare lo spostamento sul sistema di dissipazione sono stati proposti da vari autori (Saito, 2017) e consistono generalmente in leverismi o sistemi di carrucole in grado di amplificare lo spostamento di interpiano. Il sistema proposto nel presente studio sfrutta entrambi i sistemi precedentemente descritti, utilizzando un sistema di cavi in acciaio in grado di trasmettere una porzione dello spostamento totale del fabbricato (funzione dell'inclinazione dei cavi) a livello della fondazione in corrispondenza della quale lo stesso è collegato ad un sistema di amplificazione degli spostamenti che consente di trasferire al dispositivo di dissipazione uno spostamento amplificato rispetto a quello della struttura da proteggere. Nel caso di un telaio monopiano, il sistema proposto si configura secondo lo schema illustrato in Figura 1: un unico cavo (6), vincolato con le due estremità agli estremi superiori del telaio attraverso morsetti (7), è disposto con configurazione a X lungo le diagonali e deviato in corrispondenza della base dei ritti, a quota di fondazione, da pulegge (4). Il cavo, quindi, percorre la base del telaio orizzontalmente; In tale zona viene collegato all'estremità di un leverismo (1), alla cui estremità opposta è collegato il dispositivo di dissipazione (2). La particolare configurazione del cavo, che percorre entrambe le diagonali del prospetto del fabbricato, proseguendo senza soluzione di continuità a livello di fondazione, consente allo stesso di essere sempre attivo in entrambi i sensi della sollecitazione sismica. La porzione di cavo disposta sulla diagonale tesa (in blu nella figura), infatti, esercita un'azione di richiamo su quella presente lungo la diagonale compressa (in rosso nella figura), impedendone la deflessione.

La configurazione appena descritta, si presta all'impiego del sistema su strutture esistenti, senza la necessità di operazioni di demolizione delle tamponature e di costosi ripristini delle finiture o impianti.

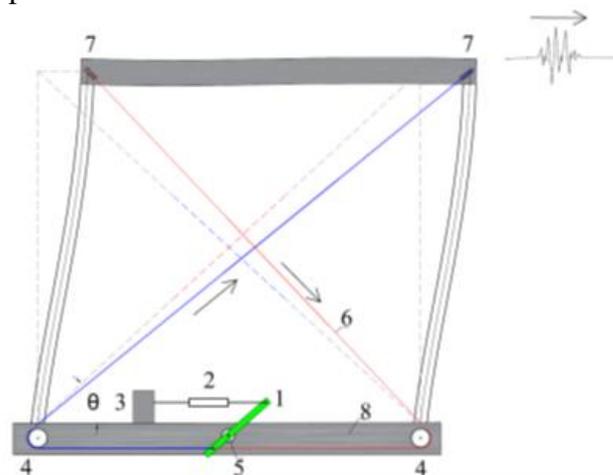


Figura 1. Modello concettuale di struttura semplice a 1 piano del sistema proposto: 1 braccio di leva; 2 damper viscosi (VD); 3 contrasti; 4 pulegge; 5 cerniera; 6 fili; 7 morsetti; 8 fondazioni.

2 MODELLO FISICO-MATEMATICO

Per la valutazione del comportamento di una struttura equipaggiata con il sistema di dissipazione a cavi proposto, viene utilizzato un semplice sistema a due gradi di libertà riprodotto nella seguente Figura 2, rappresentativo di un telaio mono-piano con la massa concentrata nel traverso. La struttura nuda possiede un proprio smorzamento interno, assunto pari a $\xi = 0,05$, e caratteristiche inerziali, quali massa m_2 e frequenza naturale ω_2 , da cui si ricava il valore del coefficiente di dissipazione c_2 . Il modello così descritto è dotato di un sistema di smorzamento aggiuntivo, con un dispositivo di dissipazione di natura viscosa con caratteristiche lineari, descritto dalla seguente equazione:

$$F_d = c_1 \dot{u} = \alpha_d c_2 \dot{u} \quad (1)$$

Il coefficiente di smorzamento, viene quindi espresso come funzione dello smorzamento interno della struttura attraverso il parametro α_d . Con riferimento alle caratteristiche di rigidità del sistema, sono definite la rigidità della struttura k_2 e la rigidità degli elementi costituenti il sistema di dissipazione aggiuntivo, ovvero il cavo e i leverismi, k_1 . In realtà come sarà meglio specificato nel seguito, la componente principale è rappresentata dalla rigidità estensionale del cavo. L'esame del sistema illustrato in Figura 1 evidenzia che, per entrambi i versi di spostamento della struttura, la parte del cavo in tiro è la metà

ancorata all'estremo dell'impalcato posto nella parte concorde con il verso dello spostamento fino al collegamento con il dispositivo di dissipazione (cavo blu); nella valutazione della rigidità estensionale, quindi, occorre fare riferimento ad una lunghezza del cavo pari alla metà del completo sviluppo della fune. La parte restante della fune è soggetta ad una tensione nulla (cavo rosso). In questa fase è stata trascurata la componente legata alla rigidità propria del dispositivo, ritenendolo indeformabile, e gli attriti del cavo con le pulegge. La rigidità k_1 è stata espressa come funzione della rigidità della struttura nuda attraverso il coefficiente α_k :

$$k_1 = \alpha_k \cdot k_2 \quad (2)$$

Infine è stato definito il coefficiente α_M legato al rapporto di amplificazione prodotto dal leverismo attraverso l'espressione:

$$\alpha_M = \frac{l_1}{l_2} \quad (3)$$

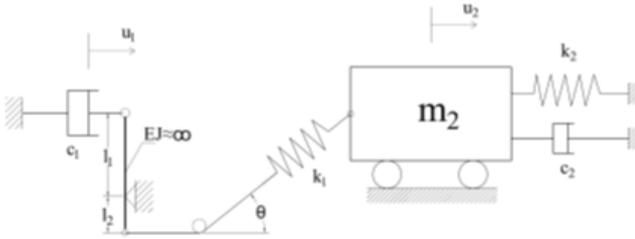


Figura 2. Modello meccanico di una struttura equipaggiata con il sistema proposto.

Sono state scritte quindi le equazioni del moto del sistema, ipotizzando una forzante generica:

$$m\ddot{u}_2 + k_2 u_2 + k_1 (u_2 \cos(\theta) - u_1) + c_2 \dot{u}_2 = F \quad (4)$$

Nell'equazione compare il termine $\cos(\theta)$, necessario per considerare la reale configurazione del cavo, disposto in senso diagonale. L'angolo θ rappresenta infatti l'inclinazione della diagonale del telaio rispetto all'orizzontale, dipendente dai rapporti di lunghezza tra i ritti ed il traverso. Al diminuire dell'angolo della diagonale rispetto all'orizzontale, cavo la componente dello spostamento totale orizzontale della struttura trasferito al cavo aumenta. Quanto appena esposto costituisce una semplificazione accettabile in caso di spostamenti piccoli rispetto alle dimensioni strutturali e che comportano variazioni piccole dell'angolo θ durante il moto del sistema.

Al fine di considerare l'effetto della deformabilità dei componenti del sistema (cavo, leverismo, ecc..), insieme allo spostamento della struttura u_2 , è stato introdotto un ulteriore grado di libertà u_1 , che rappresenta lo spostamento del dissipatore. In questo modo è possibile differenziare lo spostamento a cui è soggetto il leverismo da quello trasferito dalla struttura al cavo. Nel caso di rigidità estensionale del cavo e

flessionale del leverismo infinite, i due spostamenti sarebbero identici. L'introduzione dello spostamento u_2 , inoltre, permette di valutare l'effetto della deformabilità del cavo sull'efficienza delle prestazioni del sistema. La (4) contiene quindi i due spostamenti incogniti, u_1 e u_2 , per la determinazione dei quali è necessario introdurre la seguente relazione, che descrive appunto l'effetto della deformabilità del cavo posto in serie al dispositivo di dissipazione e che costituisce la seconda equazione del moto del sistema:

$$\alpha_M c_1 \dot{u}_1 - k_1 (u_2 \cos(\theta) - u_1) = 0 \quad (5)$$

Attraverso la sostituzione delle relazioni (1) e (2), in (4) e (5) si ottengono le equazioni del moto del sistema in funzione dei parametri α_M , α_d ed α_k :

$$\begin{cases} m\ddot{u}_2 + k_2 u_2 + \alpha_k k_2 (u_2 \cos(\theta) - u_1) + c_2 \dot{u}_2 = F \\ \alpha_M \alpha_d c_2 \cdot \dot{u}_1 - \alpha_k k_2 (u_2 \cdot \cos(\theta) - u_1) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Procedendo con le seguenti posizioni:

$$\omega_2^2 = \frac{k_2}{m_2} \quad (6a)$$

$$\xi = \frac{c_2}{2m_2\omega_2}$$

Il sistema (5) può essere espresso nella forma:

$$\begin{cases} \ddot{u}_2 + \omega_2^2 u_2 + \alpha_k \omega_2^2 (u_2(t) \cos(\theta) - u_1) + 2\xi \omega_2 \dot{u}_2 = \frac{F}{m_2} \\ 2\alpha_M \cdot \alpha_d \cdot \xi \cdot \omega_2 \cdot \dot{u}_1 - \alpha_k \omega_2^2 (u_2 \cos(\theta) - u_1) = 0 \end{cases} \quad (6b)$$

Attraverso il sistema di equazioni differenziali (6b), la dinamica del sistema è completamente definita.

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}} \quad (7a)$$

$$\omega_{2d} = \sqrt{\frac{k_2 \left[\alpha_k \left(1 - \frac{\cos(\theta)}{\alpha_M} \right) + 1 \right]}{m_2}} \quad (7b)$$

$$\zeta = \frac{c_2 (1 + \alpha_d)}{2m_2 \omega_{2d}} \quad (8)$$

$$\omega_{2d_{iss}} = \omega_{2d} \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (9)$$

La (7a) rappresenta la frequenza naturale della struttura nuda. La (7b) invece, rappresenta la frequenza della struttura equipaggiata con il sistema in assenza di smorzamento. La (8) è il valore assunto dal rapporto di smorzamento considerando sia lo smorzamento interno della struttura c_2 che quello aggiuntivo prodotto dal dispositivo di dissipazione c_1 . Infine, la (9) fornisce il valore della frequenza propria del sistema smorzato.

Il rapporto tra le frequenze naturali del sistema nudo e del sistema smorzato conduce alla seguente relazione:

$$\frac{\omega_{2diss}}{\omega_2} = \sqrt{\left(\alpha_k \left(1 - \frac{\cos(\theta)}{\alpha_M}\right) + 1\right) (1 - \zeta^2)} \quad (10)$$

Da cui si deduce che l'introduzione del sistema porta sia ad un aumento della frequenza naturale della struttura proporzionale ai coefficienti α_k e α_M , sia ad una riduzione dovuta all'effetto della dissipazione per il tramite della (9). La risultate dei due effetti descritti, definisce la risposta dinamica risultante della struttura. In genere, per il campo di valori possibili per i coefficient α_k , α_d e α_M l'effetto risultante produce un irrigidimento della struttura (ad esempio per una struttura con $\omega_2 = 20$ e valori di $\alpha_k = 0.5$, $\alpha_d = 2$ e $\alpha_M = 5$, si ottengono aumenti della frequenza naturale del sistema dell'ordine del 15%).

Ipotizzando di adottare una forzante $F(t)$ sinusoidale, con legge del tipo:

$$F(t) = P \sin(\Omega t) \quad (10b)$$

Il sistema (5) assume la forma

$$\begin{cases} u_2 + \omega_2^2 u_2 + \alpha_k \omega_2^2 (u_2 \cos(\theta) - u_1) + 2\xi \omega_2 \dot{u}_2 = \frac{P}{m_2} \sin(\Omega t) \\ 2\alpha_M \alpha_d \xi \omega_2 \dot{u}_1 - \alpha_k \omega_2^2 (u_2 \cos(\theta) - u_1) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

e può essere risolto in forma chiusa o numericamente, ad esempio, con il metodo di integrazione di Runge-Kutta.

Ai fini analisi illustrate nel seguito è stata utilizzata una semplice struttura, costituita da un telaio piano con traverso infinitamente rigido flessionalmente ed estensionalmente, con massa totale pari a 20 Kg_{massa}, rigidità flessionale dei ritti pari a 8000 N/mm, frequenza di risonanza pari a $\omega=20$ e periodo fondamentale di $T=0,3146$ s. I ritti hanno altezza $H=4$ m, e il traverso è lungo $B=5$ m. La configurazione è tale per cui il cavo diagonale forma un angolo rispetto all'orizzontale pari a

$$\theta = \cot\left(\frac{B}{H}\right) = 0.675 = 38.69^\circ \quad (11a)$$

In considerazione della grande rilevanza sul moto del sistema del contenuto in frequenza della forzante rispetto alla frequenza naturale del sistema stesso, appare opportuno considerare le condizioni di risonanza, ovvero

$$\Omega = \omega_{2diss} \quad (11b)$$

Tali condizioni, infatti, massimizzano gli effetti della forzante, in termini di accelerazione e spostamenti, sulla struttura. Nella figura seguente sono presentati i risultati di un'analisi condotta sulla struttura benchmark nuda (BS – bare structure) e quelli sulla stessa struttura equipaggiata con il sistema di dissipazione descritto (DS - damped structure), adottando per i parametri α_M , α_k , α_d rispettivamente i valori 4, 1, 5. Come è chiaramente visibile in Figura 3, si ottengono consistenti riduzioni sia nell'accelerazione relativa rispetto alla base che nello spostamento relativo. La riduzione delle azioni in termini di accelerazione e spostamento può essere quantificata tramite i parametri γ_d e γ_a , definiti fattori di guadagno, che quantificano l'efficienza del sistema e definiti come segue:

$$\begin{cases} \gamma_d = \frac{u_{BSmax} - u_{DSmax}}{u_{BSmax}} \\ \gamma_a = \frac{a_{BSmax} - a_{DSmax}}{a_{BSmax}} \end{cases} \quad (12)$$

Dove u_{BSmax} è il massimo valore dello spostamento del sistema nudo, u_{DSmax} è il massimo spostamento del sistema smorzato e a_{BSmax} e a_{DSmax} le massime accelerazioni, rispettivamente del sistema nudo e smorzato. Nella configurazione illustrata γ_d e γ_a assumono i valori, rispettivamente, di 0.958 e 0.953.

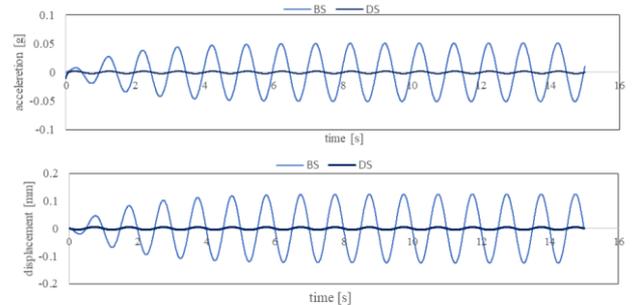


Figura 3. Accelerazione e spostamento della struttura nuda (BS) e della struttura equipaggiata col sistema di smorzamento (DS)

La capacità dissipativa viene evidenziata anche nel caso di vibrazione libera a seguito di una perturbazione iniziale. Il grafico di Figura 4 mostra

infatti, che al sistema smorzato bastano 3 cicli per esaurire il proprio moto, al contrario della struttura libera che invece al nono ciclo manifesta ancora oscillazioni di ampiezza non trascurabile. In termini energetici, il rapporto tra l'energia di input con quella dissipata tramite il dispositivo viscosoraggiunge valori prossimi al 94%.

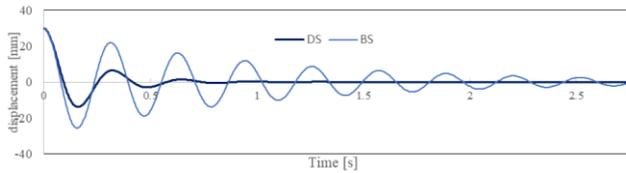


Figura 4. Spostamenti di strutture BS e DS SDOF dopo una perturbazione iniziale.

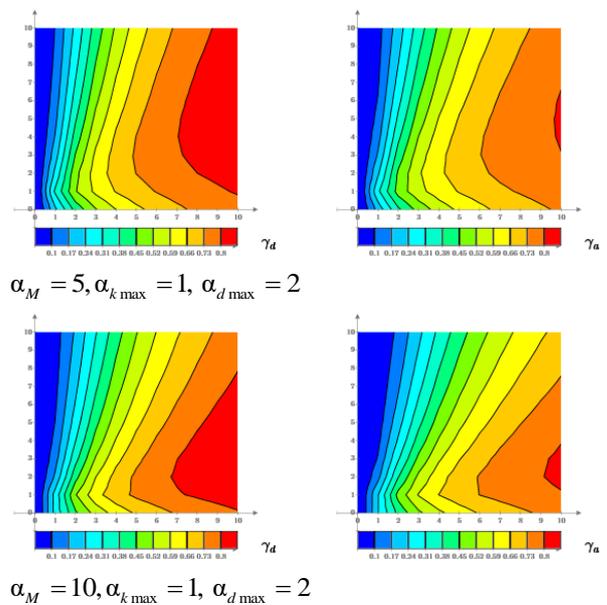
3 ANALISI PARAMETRICA

L'introduzione dei parametri α_k e α_d permette di condurre un'analisi parametrica volta ad investigare il comportamento del sistema al variare delle proprietà del dissipatore (in termini di coefficiente di smorzamento) e della rigidezza del cavo (in rapporto alla rigidezza della struttura nuda). Nell'ipotesi, infatti, di infinita rigidezza del cavo ($k \approx \infty \rightarrow \alpha_k \approx \infty$), lo spostamento del dissipatore è esclusivamente funzione del rapporto di amplificazione prodotto dal leverismo (α_M) e dell'angolo formato dal cavodiagonale con l'orizzontale. Con angoli prossimi a 0° ($\cos(\theta) \approx 1$), lo spostamento orizzontale del telaio viene trasferito completamente al cavo e quindi, amplificato, allo smorzatore. Tale configurazione è però difficile da realizzare, almeno volendo mantenere il cavo aderente alla struttura e senza collegamenti a elementi rigidi esterni, perché sarebbe necessaria una struttura con uno sviluppo orizzontale molto grande rispetto all'altezza. Allo stesso modo le configurazioni che prevedono angoli prossimi a 90° ($\cos(\theta) \approx 0$) riducono in maniera determinante l'aliquota dello spostamento trasferito al cavo, che invece tende a ruotare intorno alla puleggia di base. Le configurazioni più ricorrenti risultano quelle che vedono dimensioni paragonabili dei ritti e del traverso e quindi angoli $\theta \approx 45^\circ$ ed efficienza nel trasferimento dello spostamento orizzontale dell'ordine del 70%.

Nell'ipotesi opposta, ovvero di cavo infinitamente flessibile ($k \approx 0 \rightarrow \alpha_k \approx 0$), gran parte dello spostamento della struttura non raggiunge il dissipatore in quanto il tiro della fune produce deformazioni talmente elevate da assorbire completamente lo spostamento in testa alla struttura. Tale situazione è assimilabile a quella della struttura nuda, priva del sistema di dissipazione.

Valori intermedi del coefficiente α_k comportano lo sviluppo di deformazioni all'interno del cavo a seguito della messa in carico conseguente allo spostamento della struttura; tali deformazioni possono essere considerate delle "perdite" che influenzano l'efficienza del sistema ed inoltre la deformabilità del cavo influenza a sua volta la dinamica del sistema attraverso la (7b).

La variazione del coefficiente di smorzamento del dissipatore, espressa in funzione dello smorzamento interno della struttura, produce effetti tanto più consistenti all'aumentare del suo valore, in ragione del fatto che, mantenendo l'ipotesi di dissipatore lineare, la forza opposta dal dispositivo è esclusivamente una funzione lineare, della differenza di velocità tra i suoi estremi. Il valore assunto dal coefficiente di smorzamento del dissipatore ha un effetto anche sul comportamento dinamico della struttura (equazione 9), in quanto tende a rendere la stessa più flessibile, al crescere del valore del coefficiente di smorzamento. La variazione delle caratteristiche dinamiche della struttura equipaggiata con il sistema descritto comporta una variazione dell'azione sismica sollecitante diversa rispetto a quella a cui sarebbe soggetta la struttura nuda. L'adozione di dispositivi di dissipazione con coefficiente di smorzamento molto ridotti, pur consentendo elevati spostamenti, produce modesti valori dell'energia dissipata per ogni ciclo, sebbene l'adozione del leverismo, sia in grado di amplificare di α_M il valore della componente dell'energia di input dissipata dal sistema.



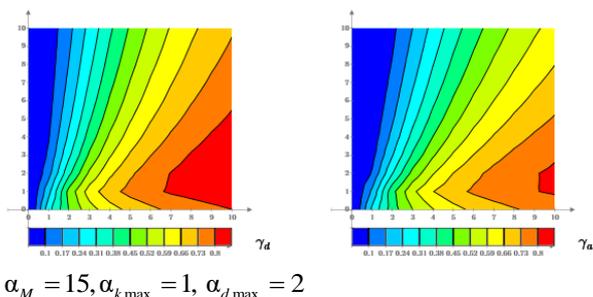


Figura 5. Mappa di guadagno in termini di γ_d e γ_a per diversi valori di α_M . L'Asse x riporta i valori di $(\alpha_k / \alpha_{kmax}) \cdot 10$ e l'asse y i valori $(\alpha_d / \alpha_{dmax}) \cdot 10$

Il valore di α_M influisce direttamente sulle proprietà di dissipazione del sistema; come già rilevato, infatti, all'aumentare del rapporto di amplificazione del leverismo, vengono amplificati gli spostamenti del dissipatore (al netto delle perdite dovute alla deformabilità del cavo e della configurazione geometrica del sistema, attraverso l'angolo θ), oltre che le velocità dell'estremità collegata al cavo. È importante sottolineare che in questa fase, per semplicità, sono stati trascurati i contributi connessi alla deformabilità del leverismo, del dispositivo di dissipazione e agli eventuali giochi presenti tra gli elementi di connessione dei leverismi e delle pulegge. In considerazione, però, delle possibilità offerte dall'industria meccanica di realizzare meccanismi compatti e molto sensibili, la semplificazione non appare priva di fondamento. Un altro fenomeno da considerare riguarda il contributo alla deformabilità del cavo, connesso con i fenomeni di dilatazione termica o di deformazione a tensione costante. La presenza di un cavo inflesso risulta in grado di produrre la perdita di gran parte dello spostamento della struttura, che verrebbe impiegato in parte per ritesare lo stesso e in parte trasferito al dissipatore. Tale situazione risulta comunque in gran parte controllabile, fornendo al cavo un'adeguata pretensione e abbinando al dissipatore un elemento fusibile in grado di bloccare gli spostamenti dello stesso fino ad un prefissato livello di tensione nella fune, in modo tale che la pre-tensione nel cavo non produca spostamenti nel dispositivo di dissipazione. In alternativa si può adottare un sistema attivo di tensionamento, in grado di verificare, ad intervalli di tempo prefissati lo stato di tensionamento nel cavo e provvedere a eventuali ritesaggi, quando necessario. In ragione di ciò, nello studio qui descritto è stata mantenuta l'ipotesi semplificativa di cavo non soggetto ad inflessione.

Alla luce delle considerazioni appena esposte, in Figura 5 sono illustrati i risultati di un'analisi parametrica, nella quale, con riferimento alla struttura benchmark descritta in precedenza, è

stato introdotto il sistema di dissipazione oggetto di studio, facendo variare i parametri α_M , α_k e α_d all'interno di un range di valori plausibili in rapporto ai limiti dimensionali del cavo e dei dispositivi di dissipazione attualmente in commercio. La struttura è stata sottoposta ad una forzante sinusoidale, con frequenza Ω pari a quella di risonanza della struttura ω_{2diss} , ed è stata monitorata la variazione delle accelerazioni e degli spostamenti massimi in termini di fattori di guadagno, γ_d e γ_a , definiti nell'equazione (12).

L'esame delle mappe di guadagno rappresentate nella precedente Figura 5, evidenzia l'aumento dell'efficienza del sistema di smorzamento all'aumentare della rigidità del cavo, in quanto la riduzione della deformazione estensionale dello stesso in parte compensa gli spostamenti della struttura. L'aumento del coefficiente di smorzamento del dispositivo di dissipazione produce in una prima fase, fino a valori di α_d prossimi a 0.2, un aumento dell'efficienza del sistema (con riduzione degli spostamenti). Tale circostanza deriva dalla sovrapposizione di due tendenze opposte cui è soggetta la struttura: all'aumentare della costante di smorzamento del sistema di dissipazione, aumenta la forza esercitata dal dispositivo, secondo quanto previsto dalla legge costitutiva descritta nella (1), ma allo stesso tempo si riducono gli spostamenti; al contrario al diminuire di α_d la forza esercitata dal dispositivo si riduce ma aumentano gli spostamenti. Il punto di optimum è determinato dalla combinazione di F_d e spostamento in grado di massimizzare l'energia dissipata nel ciclo (Figura 6).

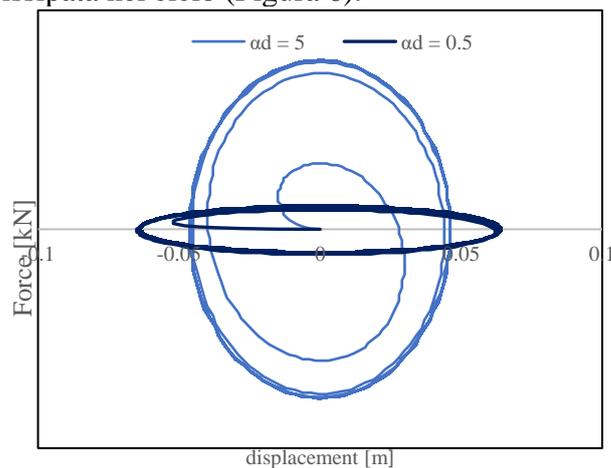


Figura 6. Andamento del legame forza-spostamento nel dissipatore viscoso nel caso di $\alpha_d = 0,5$ e di $\alpha_d = 5$

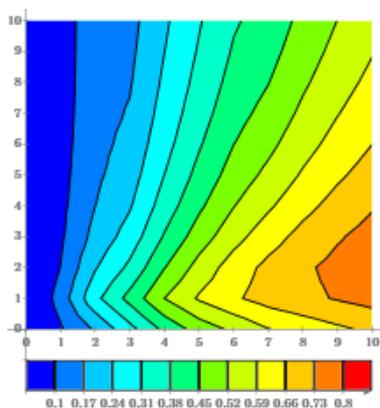
Il valore assunto dai fattori di guadagno al variare di α_M segue lo stesso principio; l'aumento del coefficiente di amplificazione α_M , infatti, produce come effetto un proporzionale incremento della velocità all'estremità del dispositivo di dissipazione e quindi, sostanzialmente, un

incremento delle forze prodotte dallo stesso; l'effetto dell'aumento degli spostamenti prodotti dal leverismo pertanto viene, oltre un dato valore, compensato e superato dall'aumento delle forze all'interno del dispositivo connesse all'aumento di velocità; ciò è meglio visibile introducendo un coefficiente viscoso apparente dato da:

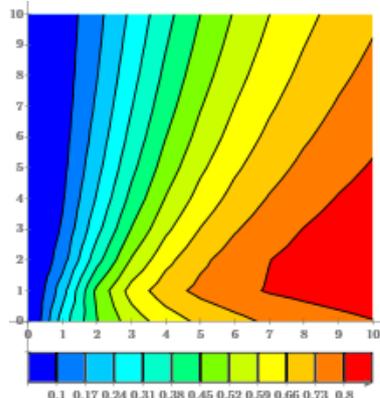
$$F_d = c_1 \dot{u} = \alpha_M \alpha_d c_2 \dot{u} \quad (13)$$

L'effetto dell'aumento di α_M è chiaramente visibile dalla (7b), dalla quale è evidente come la struttura subisca un aumento della frequenza naturale al crescere di α_M .

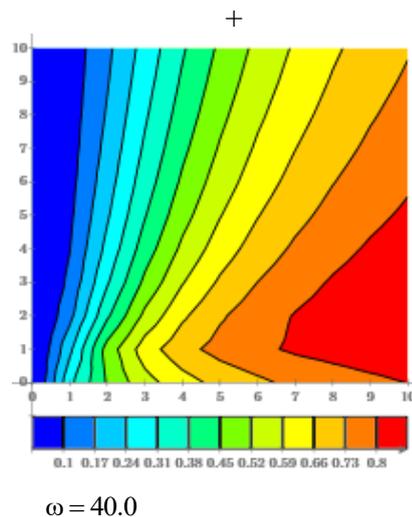
Il grafico di Figura 7, mostra come il fattore di guadagno dipenda in maniera determinante dalle caratteristiche dinamiche della struttura e della forzante (che nel caso specifico sono state poste di proposito uguali per ottenere effetti di risonanza). L'efficienza del sistema è più alta su strutture più rigide, con un'efficienza crescente al crescere della frequenza naturale della struttura. Nel grafico sono riportate le mappature del fattore di guadagno γ_d al variare dei parametri α_k e α_d , con α_M pari a 5 e per tre diverse strutture con frequenze di risonanza, pari rispettivamente a 4, 15 e 40. Andamento analogo presenta il fattore di guadagno γ_a .



$\omega = 4.0$



$\omega = 15.0$



$\omega = 40.0$

Figura 7. Mappa di Guadagno in termini di γ_d e γ_a per diversi valori ω . L'Asse x riporta i valori di $(\alpha_k/\alpha_{kmax}) \cdot 10$ e l'asse y i valori $(\alpha_d/\alpha_{dmax}) \cdot 10$

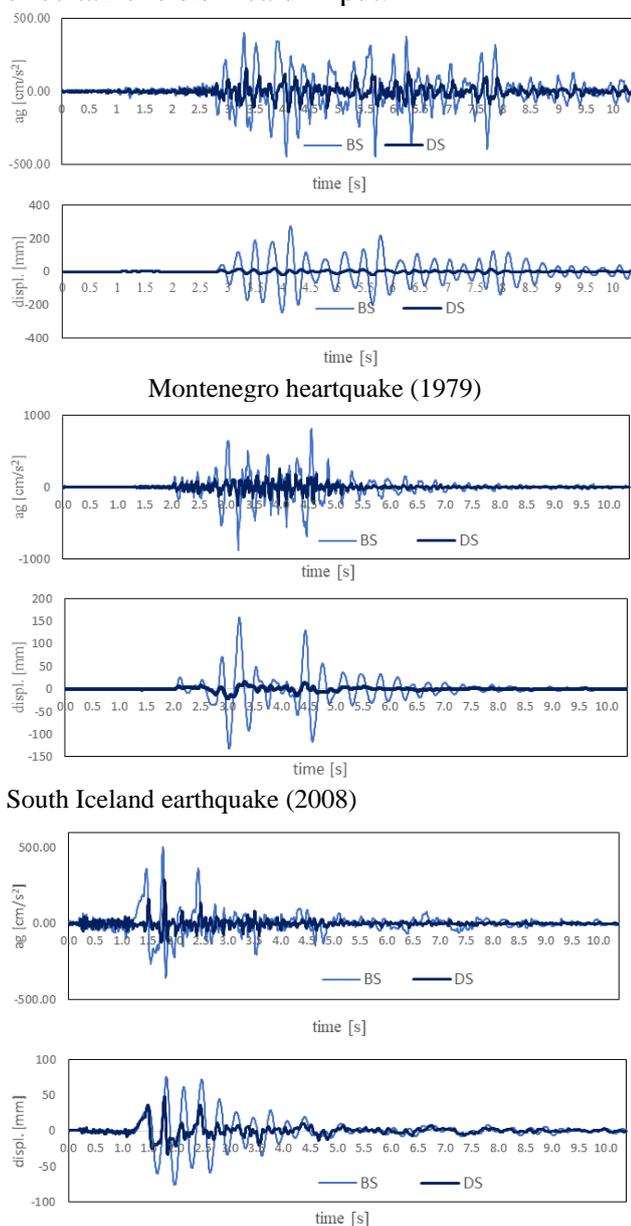
Nonostante l'efficienza del sistema migliori al crescere della frequenza naturale dello stesso, i fattori di guadagno restano abbastanza stabili (pur aumentando al crescere di ω) e ciò rappresenta una condizione positiva, che rende il sistema applicabile ad una larga varietà di strutture. Occorre notare, ad ogni modo, che all'aumentare della frequenza naturale del sistema, ovvero della rigidità della struttura, il sistema di cavi risulta sempre più oneroso e di difficile realizzazione a causa della necessità di aumentare i diametri delle funi e, di conseguenza, le dimensioni dei sistemi di deviazione (pulegge), al fine di conferire al sistema di dissipazione rigidità estensionali paragonabili a quelle flessionali della struttura nuda.

4 ESEMPI NUMERICI

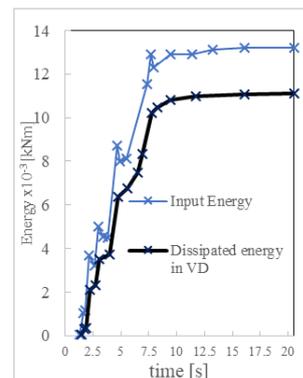
Nel capitolo precedente è stata analizzata la risposta della struttura sollecitata da forzanti di tipo sinusoidale, con frequenze coincidenti con quella di risonanza della struttura stessa, equipaggiata con il sistema di dissipazione. Al fine di completare lo studio sul comportamento teorico del sistema, in questo capitolo sono illustrati i risultati dell'analisi condotta sulla struttura benchmark, equipaggiata con il sistema di smorzamento descritto nei precedenti paragrafi, con i seguenti valori dei coefficienti precedentemente descritti: $\alpha_k = 1.0$, $\alpha_d = 5$ e $\alpha_M = 1$, e con forzante costituita da una serie di accelerogrammi spettro-compatibili (NTC, 2018), desunti da un set di accelerogrammi estratti dall'European Strong Motion Database, ESM (Luzi et al., 2016) attraverso il software REXEL (Smerzini et al., 2013), per il sito di L'Aquila, adottando una categoria di suolo tipo B, nell'intervallo di periodi tra 0.15 – 2 s.

Nella Figura 8 e nella Figura 9 è rappresentata la storia temporale delle accelerazioni e degli spostamenti della struttura dovuti all'applicazione

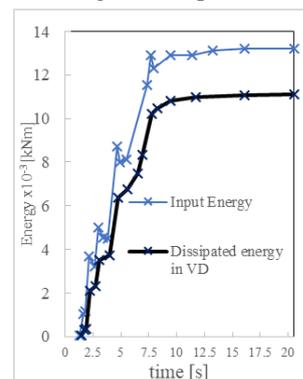
delle forzanti naturali sopra descritte. Il sistema permette di raggiungere consistenti livelli di dissipazione, riducendo sia l'accelerazione relativa della struttura rispetto alla base che gli spostamenti rispetto alla struttura nuda. L'entità della riduzione risulta comunque strettamente legata alle caratteristiche dinamiche della struttura rispetto al contenuto in frequenze della sollecitazione sismica di input.



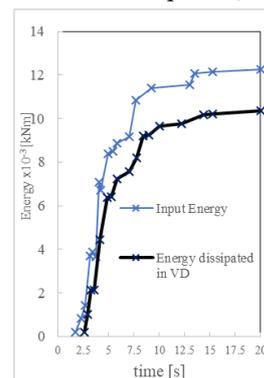
Erzincan earthquake (1992)
 Figura 8. Spostamenti e accelerazioni ottenuti dall'analisi time-history per la struttura nuda (BS) e la struttura equipaggiata con il sistema (DS), per vari input spettrocompatibili con NTC 2018.



Montenegro earthquake (1979)



South Iceland earthquake (2008)



Erzincan earthquake (1992)

Figura 9. Funzioni energetiche ottenute dall'analisi time-history per la struttura nuda (BS) e la struttura equipaggiata con il sistema (DS), per vari input spettrocompatibili con NTC 2018.

5 DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Obiettivo principale della ricerca è di sviluppare una metodologia di miglioramento sismico degli edifici, che consenta di effettuare principalmente interventi dall'esterno, al fine di evitare, o comunque limitare fortemente gli interventi sulle componenti non strutturali, le finiture e gli impianti, notoriamente molto costosi. Il sistema proposto infatti, è stato sviluppato con per essere applicato principalmente sui prospetti dell'edificio. Permane la possibilità di interferenze tra il percorso delle funi e eventuali oggetti o sporgenze presenti sul prospetto del fabbricato (balconi ecc...). Sebbene, siano possibili, variazioni al percorso del cavo, risulta sicuramente

più semplice l'applicazione su strutture generalmente a pareti finestrate, prive di sporgenze significative, quali le scuole o gli edifici industriali o per il terziario.

I risultati ottenuti, sia nel caso di sollecitazione armonica, sia nel caso di applicazione di forzanti naturali, confermano le buone performances del sistema nella riduzione dei drift di interpiano e delle accelerazioni in corrispondenza degli impalcati. Tali aspetti sono collegati all'entità delle sollecitazioni generate negli elementi strutturali, al danneggiamento degli elementi non strutturali e alle condizioni di confort all'interno dell'edificio durante la sollecitazione sismica.

6 CONCLUSIONI

Il presente articolo illustra lo studio condotto per lo sviluppo di un sistema di miglioramento sismico di strutture esistenti in cemento armato, tramite l'impiego di dispositivi di dissipazione viscosa aggiuntiva, collegati alla struttura tramite un sistema di cavi atti a trasmettere gli spostamenti sommitali della struttura alla base, dove si attua l'amplificazione attraverso un leverismo e la trasmissione al dispositivo di dissipazione. Nell'articolo sono illustrati i risultati ottenuti per un sistema semplice a due gradi di libertà, definito con lo scopo di indagare l'influenza reciproca delle caratteristiche geometriche della struttura e del sistema dissipativo, oltre che dei parametri caratteristici dei dispositivi di dissipazione aggiuntiva e dei rapporti di rigidità tra la struttura stessa e i cavi. I risultati ottenuti mostrano una elevata efficienza del sistema già con rigidità assiali dei cavi dell'ordine del 10–15% della rigidità della struttura e per coefficienti di smorzamento dell'ordine del 50% dello smorzamento interno della struttura. L'amplificazione prodotta dal leverismo risulta avere grande influenza sia sulle caratteristiche dinamiche della struttura equipaggiata con il sistema, sia sull'entità della dissipazione prodotta. In linea generale, l'efficienza del sistema aumenta con la rigidità della struttura originaria, ferma restando, in tal caso, la difficoltà di dimensionamento del sistema di dissipazione.

È intenzione degli autori proseguire la ricerca al fine di investigare gli effetti dell'impiego di dispositivi di dissipazione di differente tipologia (dissipatori viscosi non lineari, attritivi ecc...) e l'applicazione a strutture più complesse e di diversa natura, quali strutture prefabbricate o in muratura, così come a opere infrastrutturali quali ponti o viadotti e per differenti configurazioni del sistema di cavi.

7 BIBLIOGRAFIA

- Fabrizio, C., Di Egidio, A., De Leo, A.M., 2017. Top isolation versus base isolation in structures subjected to harmonic excitation, *Engineering Structures*, **152**, 660–670.
- Fabrizio, C., De Leo, A.M., Di Egidio, A., 2019. Tuned mass damper and base isolation: a unitary approach for the seismic protection of conventional frame structures, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. **145**(4), DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001581.
- Peckan G, Mander JB, Chen SS., 2000. Balancing lateral loads using tendon-based supplemental damping system. *Journal of Structural Engineering* (ASCE); **126**, 896–905.
- Peckan, G., 1998. Design of seismic energy dissipation systems for reinforced concrete and steel structures. PhD Dissertation, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY.
- Terenzi, G., 1999. Dynamics of SDOF systems with nonlinear viscous damping. *Journal of Engineering Mechanics* (ASCE); **125**, 956–963.
- Sorace S., Terenzi G., 2001. Non-linear dynamic modelling and design procedure of FV spring-dampers for base isolation. *Engineering Structures*; **23**, 1556–1567.
- Sorace, S.; Terenzi, G., 2011. The damped cable system for seismic protection of frame structures—Part II: Design and application. *Earthquake Engng Struct. Dyn.*; **41**, 929–947.
- Saito, T.; Maegawa, T; Denno, S.; Sakai, S.; Uchikawa, M.; Kanagawa M.; Ryujin, H., 2017. New seismic response control system using block and tackle. *16th World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE 2017*. Santiago Chile 9-13 January 2017
- NTC, 2018. *Decreto Ministeriale 17 Gennaio 2018. Aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni*. G.U. n. 42, 20/02/2018, Roma.
- Naeem, A., Kim, J., 2018. Seismic performance evaluation of spring viscous damper cable system. *Engineering Structures* **176**, 455–467
- Luzi L, Puglia R, Russo E, ORFEUS WG5, 2016. Engineering Strong Motion Database, version 1.0. *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Observatories & Research Facilities for European Seismology*, DOI: 10.13127/ESM
- Smerzini C., Galasso C., Iervolino I., Paolucci R., 2013. Ground motion record selection based on broadband spectral compatibility. *Earthquake Spectra*. DOI 10.1193/052312EQS197M