

Principi di funzionamento, modellazione ed analisi di sistemi Active Mass Damper in Midas Gen.

Giorgio D'Agostino⁽¹⁾, Fabio Menardo⁽²⁾, Giovanni Rebecchi⁽³⁾

⁽¹⁾ Senior Civil Engineer, ISAAC s.r.l., giorgio.dagostino@isaacsrl.com

⁽²⁾ Head of Structural Engineering, ISAAC s.r.l., fabio.menardo@isaacsrl.com

⁽³⁾ Tech Sales Manager, ISAAC s.r.l., giovanni.rebecchi@isaacsrl.com

Abstract

ISAAC antisismica è una start-up italiana con sede a Milano, attiva dal 2018, che si propone come player di riferimento nel mercato delle costruzioni per la fornitura di tecnologie smart per la protezione sismica e monitoraggio di edifici e infrastrutture. Essa sviluppa e produce Active Mass Damper (AMD), una soluzione modulare, scalabile e non invasiva per il controllo attivo di strutture esistenti finalizzata alla protezione sismica ed al controllo vibrazioni. In questa memoria viene descritto il principio di funzionamento del sistema AMD - Electro Pro 20x, il suo metodo di modellazione in Midas Gen e l'iter di progetto per il predimensionamento di interventi di retrofit. Un semplice esempio applicativo illustra poi l'operatività ed i benefici perseguibili.

Introduzione

Nel campo della protezione sismica degli edifici è stata proposta nel corso degli anni una moltitudine di strategie per il rinforzo di edifici vulnerabili. La scelta dell'intervento ottimale è influenzata da numerosi fattori, e quindi determinata dalle peculiarità dello specifico caso.

In questo ambito hanno preso piede di recente soluzioni di controllo attivo della risposta dinamica delle strutture che riducono la domanda sismica mediante l'assorbimento di una parte dell'energia di input immessa nella struttura durante il sisma. Tra queste soluzioni, quella sulla quale la ricerca e l'industria hanno rivolto più interesse nel recente passato è identificata dagli smorzatori attivi inerziali (AMD, *Active Mass Damper*, ISO 3010:2017). Al pari degli smorzatori a massa accordata (TMD, *Tuned Mass Damper*), questi sono solitamente installati sulla sommità degli edifici, rendendo la loro adozione largamente meno invasiva della maggior parte degli interventi tradizionali rivolti alla modifica o integrazione della capacità e rigidità del sistema strutturale. Diversamente dai TMD, i quali ricadono nel più ampio insieme dei sistemi di controllo passivo o semi-attivo, gli AMD richiedono una fonte di energia esterna e risultano, a parità di massa e ingombri, sensibilmente più efficaci nel controllo delle vibrazioni.

ISAAC, azienda italiana specializzata nello sviluppo di tecnologie smart per la protezione sismica, ha brevettato dei sistemi *Active Mass Damper*, declinando questa tecnologia in una generazione di macchine elettriche, modulari e adatte a varie tipologie di edificio. In particolare, Electro Pro 20x è costituito da macchine completamente elettriche e dotate di motori lineari elettrici a magneti permanenti. Il sistema è modulare, scalabile a seconda dell'edificio, e le caratteristiche di lunghezza e peso delle unità macchina possono essere adattate alle esigenze in base alle necessità imposte dalla struttura (Figura 1 e Figura 2).



Figura 1 - Electro Pro 20x nel laboratorio ISAAC lab.



Figura 2 - Modularità e scalabilità del sistema.

Nel seguito sono descritti i componenti principali ed il principio di funzionamento di un sistema AMD. Successivamente, viene illustrata la procedura di implementazione del sistema in un modello FEM utilizzando Midas Gen e la relativa impostazione dell'analisi strutturale. Infine, si chiarisce come interpretare i risultati ottenuti dalle analisi attraverso alcune operazioni di post-processing.

Principio di funzionamento di un sistema AMD

I sistemi di controllo attivo della risposta sismica permettono di migliorare le performance dinamiche della costruzione e, contemporaneamente, monitorare la struttura h24. Il principio di funzionamento degli AMD si basa sul moto di una o più masse mobili impresso dai rispettivi attuatori, installati in punti specifici della struttura da proteggere (Figura 3).

In questo modo, durante il sisma l'insieme di tutte le unità macchina installate trasferisce alle strutture portanti dell'edificio una forza variabile nel tempo che contrasta il suo movimento riducendone le ampiezze di oscillazione, e di conseguenza gli sforzi applicati agli elementi strutturali.

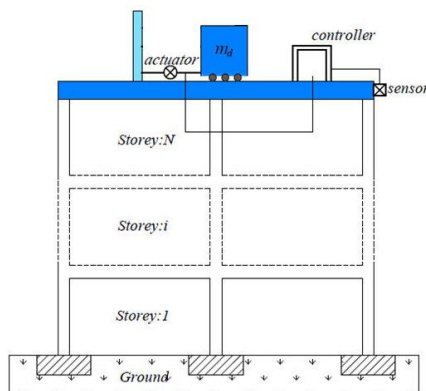


Figura 3 - Componenti di un sistema AMD

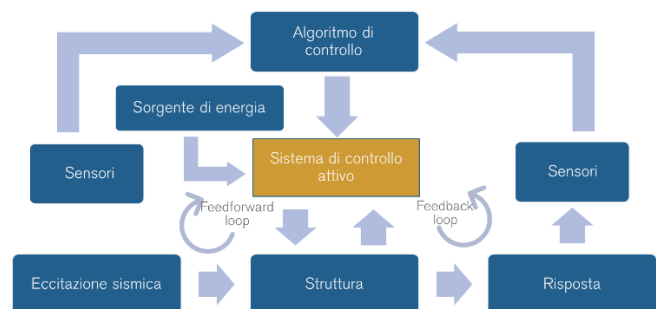


Figura 4 - Schema di funzionamento di un sistema AMD

Perché l'andamento temporale della forza prodotta eserciti effettivamente un'azione di dissipazione dell'energia sismica, è necessario che questa venga definita secondo uno specifico algoritmo di controllo (Figura 4). Esso prevede che all'arrivo dell'azione sismica (inteso come il superamento di un'accelerazione minima di soglia), l'eccitazione e la risposta della struttura vengano rilevate da alcuni sensori allocati opportunamente; questi segnali vengono elaborati in tempo reale da un computer centrale che restituisce in output il moto da imprimere alla massa mobile.

Una delle più comuni leggi di controllo, denominata "Sky-Hook" (in italiano, letteralmente, "gancio nel cielo"), permette di calcolare la forza come il prodotto di una costante (G , Gain) per la velocità relativa tra la sommità dell'edificio ed il terreno, misurata dall'impianto di sensoristica accessorio:

$$F = -G \cdot v_{rel.}$$

Tale forza è poi fattivamente generata dal moto oscillatorio di una massa e ciò fa sì che il device si differenzi dai classici dispositivi passivi che rispondono con forze stabilizzanti definibili con un preciso legame costitutivo di tipo meccanico. Tuttavia, se a posteriori si verifica che alcune ipotesi sulla dinamica del comportamento di Electro Pro 20x siano state rispettate durante la storia temporale di attività, è possibile approssimarne il funzionamento a quello di un semplice smorzatore

viscoso equivalente (*dashpot* o *damper*), avente un'estremità ancorata alla struttura e l'altra in un nodo vincolato, appunto, nel cielo.

Modellazione di un sistema AMD in Midas Gen

Dal momento che la forza di controllo generata deve essere valutata in ogni singolo istante della storia temporale accelerometrica del sisma considerato, è indispensabile che il software FEM di riferimento possa eseguire analisi dinamiche con integrazione al passo, e che in esso sia disponibile l'elemento *dashpot* o *damper*, rappresentativo del comportamento ideale del sistema AMD.

In Midas Gen è possibile disporre di un solutore estremamente raffinato per l'analisi dinamica di storia temporale e, inoltre, nella libreria dei *General Link* è incluso l'elemento *Dashpot* di tipo *Elastic Bilinear* (Figura 5).

La presenza di un link forza-velocità con comportamento bilineare risulta particolarmente vantaggiosa, poiché attraverso il tratto orizzontale del legame (imposto mediante un coefficiente molto piccolo del *Damping Reduction Factor* di Figura 5) è possibile tenere in conto del limite intrinseco nell'AMD relativo alla massima forza erogabile dall'attuatore (*Relief Damping Force* della Figura 5), dovuta ad esempio dai limiti in corrente per un motore elettrico, o in pressione d'olio per un attuatore idraulico.

Il parametro *Initial Damping Coefficient* della Figura 5 è invece completamente confondibile con il parametro *Gain G* dell'algoritmo di controllo del sistema AMD che si sta modellando.

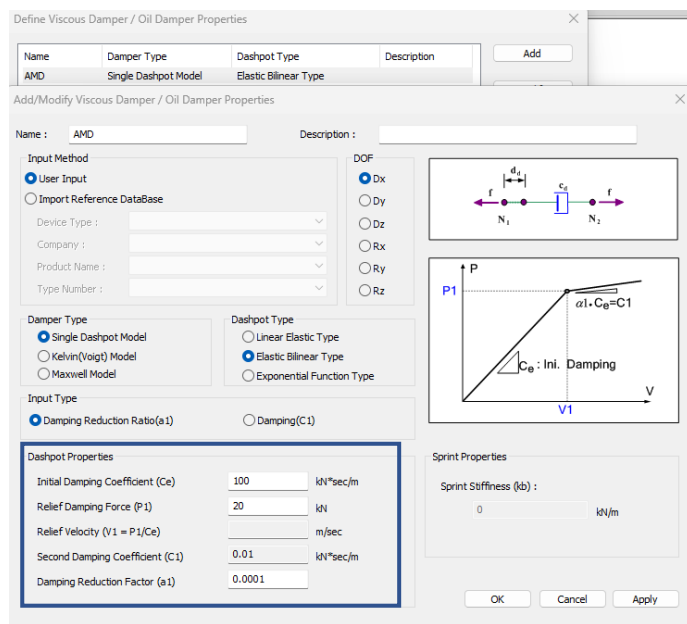


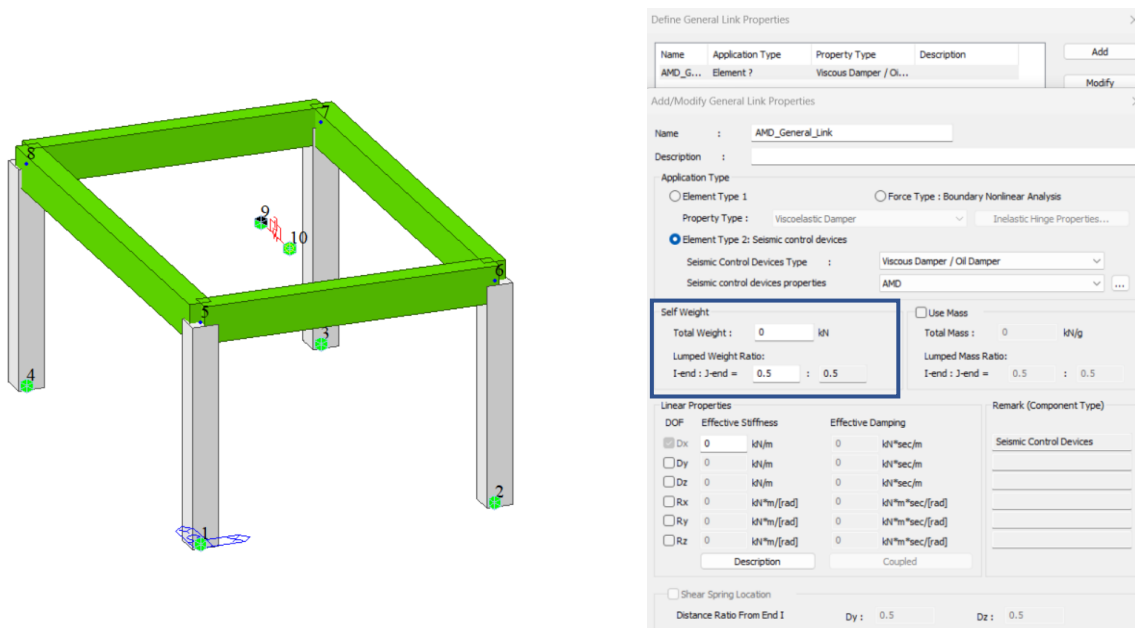
Figura 5 - Finestra per la definizione dell'Elastic Bilinear Dashpot in MidasGen

Nel seguito, si mostra l'inserimento di un *General Link* di tipo *Elastic Bilinear Dashpot* nel modello di Midas Gen di una semplice struttura in calcestruzzo ideata a scopo dimostrativo, costituita da quattro travi e pilastri, ed un impalcato modellato mediante i carichi agenti (con lo strumento *Floor Load*) ed il vincolo cinematico di piano rigido (Figura 6).

A scopo semplificativo, si suppone che il sisma di riferimento (1940, El Centro Site, 270 Deg) agisca nella sola direzione Y, e che quindi si intenda controllare la risposta della struttura in questa stessa direzione mediante un dispositivo Electro Pro 20x disposto al centro dell'impalcato, capace di una forza di controllo massima di circa 20 kN.

Il nodo della struttura sul quale l'AMD scaricherà la forza inerziale (nodo 9) è vincolato agli altri nodi dell'impalcato mediante il vincolo automatico di *Floor Diaphragm*; onde evitare labilità è necessario dunque introdurre un vincolo di incastro (*Support*) per la direzione verticale (Dz) e per le rotazioni attorno agli assi orizzontali (Rx e Ry). Il nodo vincolato "al cielo" (nodo 10) può essere posizionato ad una qualsivoglia distanza dal suddetto nodo, purché entrambi giacciono su un asse

Una volta inserito il *General Link* tra i nodi 9 e 10 (Figura 7), si può procedere all'impostazione dell'analisi di integrazione al passo (*Time History Load Case*), che deve essere necessariamente del tipo *Analysis Type: Nonlinear; Analysis Method: Direct Integration; Time History Type: Transient*.



Analisi dei risultati e post-processing

A valle dell'analisi è possibile visualizzare la storia di forza fornita dal *General Link* mediante il comando *Results – Time History Graph* (Figura 9).

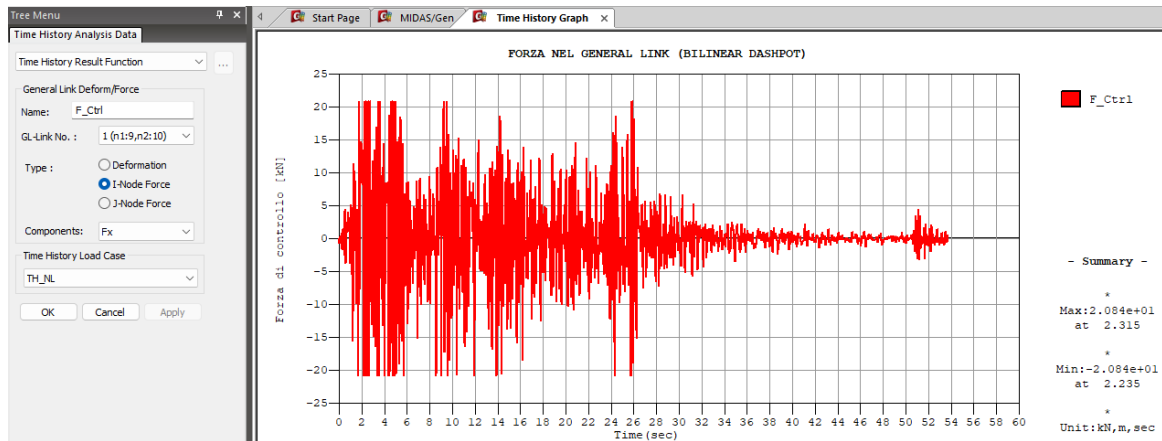


Figura 9 - Uso del comando Time History Graph per l'estrazione della forza di controllo

Come visto in precedenza, questa è la forza di controllo che l'attuatore eroga durante l'analisi svolta, che si suppone generata dal reale movimento della relativa massa mobile. La fattiva corrispondenza tra la forza di controllo ottenuta durante l'analisi e quella realmente erogabile dall'attuatore, e quindi la predittività dell'analisi stessa, è confermata a seguito di un controllo sulle performance richieste all'attuatore stesso (diagramma di flusso di Figura 10).

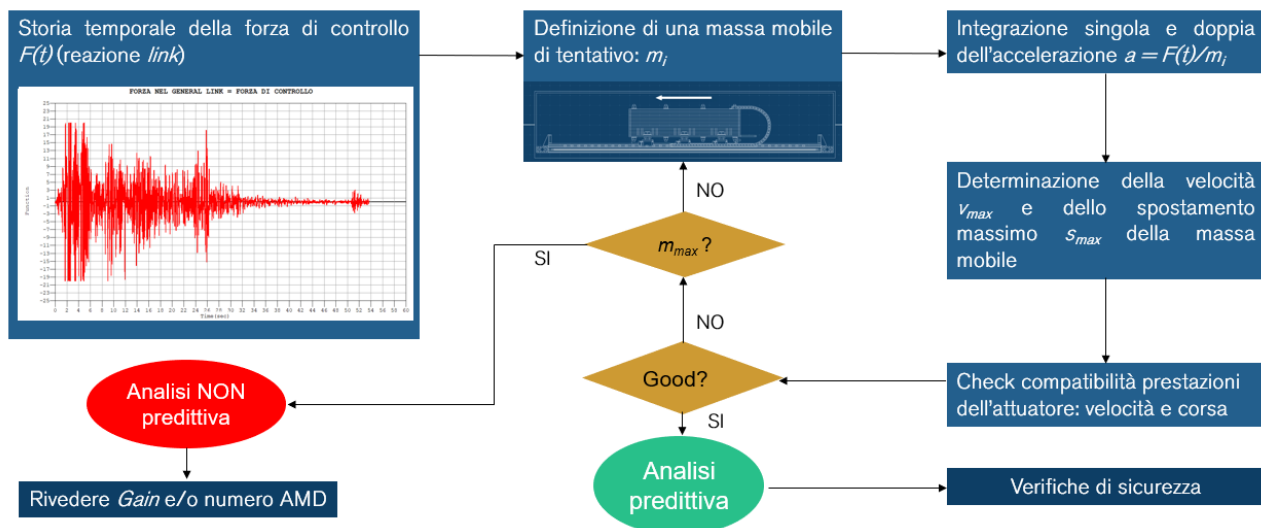


Figura 10 - Diagramma di flusso per i check di post-processing

Con l'elemento *Bilinear Dashpot* è possibile tenere conto della saturazione in forza dell'attuatore già in fase di analisi, come visibile dai valori massimi e minimi di Figura 11 (± 20 kN); tuttavia, vi sono altri limiti fisici di funzionamento dell'attuatore che è necessario controllare a posteriori, come il limite in spostamento o in velocità.

Il primo limite è relativo alla massima ampiezza del moto della massa mobile che, per vincoli geometrici e/o costruttivi può avere restrizioni ben precise. Nel caso di Electro Pro 20x non ci sono restrizioni costruttive, in quanto la dimensione dell'AMD, e quindi la corsa della massa mobile, è un parametro prettamente progettuale e può essere realizzata in fase costruttiva secondo la reale necessità.

Il limite sulla velocità, strettamente dipendente dalla tecnologia dell'AMD, è funzione del tipo di attuazione e può essere subordinato, per esempio, alla massima portata d'olio per un attuatore idraulico, oppure alla forza elettromotrice per gli attuatori elettrici (circa 5 m/s per Electro Pro 20x).

La richiesta di spostamento e velocità massime cui la massa mobile è soggetta si possono calcolare a partire dalla storia di accelerazione relativa della massa, calcolata semplicemente come forza di controllo divisa per un valore della massa di primo tentativo m_i , e poi integrando il segnale ottenuto. Dal valore di spostamento massimo si ottiene la dimensione di progetto della corsa dell'AMD; dal massimo valore di velocità si controlla la compatibilità con il dato di targa dell'attuatore.

La suddetta procedura può anche essere automatizzata con un semplice *script* dedicato al post-processing e che visualizzi in output le storie temporali di spostamento e velocità della massa mobile, come visualizzato nella "curva di lavoro in velocità" dell'attuatore in Figura 11.

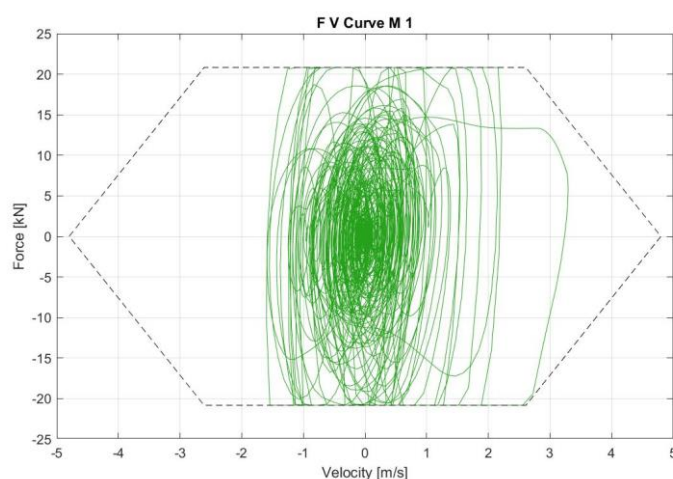


Figura 11 - Curva di lavoro in velocità dell'attuatore: richiesta vs. limiti di macchina

Nel caso non vi fosse compatibilità con i valori massimi di spostamento e velocità, si procede con l'iterazione della procedura aggiornando di volta in volta il valore di massa mobile di riferimento, fino a considerare la massima capacità (per Electro Pro 20x pari a 1000 kg).

Se non è possibile trovare uno scenario compatibile allora si deve concludere che l'analisi svolta non può considerarsi predittiva ed occorre modificare il *Gain* di progetto dell'AMD (modificando la proprietà C_e del *Bilinear Dashpot*), oppure il numero degli AMD utilizzati nel modello FEM.

È importante che, al termine della procedura di predimensionamento, lo smorzamento offerto dal sistema di AMD progettato raggiunga il massimo dell'efficienza che esso possa offrire. In quest'ottica, è necessario che per ciascun AMD si definisca un *Gain*, o *Initial Damping Coefficient* C_e della Figura 5, tale da produrre il massimo della forza di controllo disponibile e, contemporaneamente, richiedere spostamenti e velocità alla massa mobili compatibili con le prestazioni dell'attuatore. Una volta identificato questo scenario, è possibile procedere alle verifiche di sicurezza previste dallo Stato Limite considerato nell'analisi.

È opportuno infine osservare che, al solo scopo di dimensionamento preliminare del sistema (identificazione del numero di macchine AMD), è possibile ignorare i check di velocità e spostamento sull'attuatore se, per ciascun AMD modellato, si osserva che la massima forza di controllo non superi il valore della forza massima erogabile (20 kN per Electro Pro 20x).

Nella Figura 12 e nella Figura 13 si riportano due grafici relativi alla riduzione di spostamento e di sollecitazione conseguiti per l'esempio mostrato in Figura 7. Si osservano per entrambi i casi riduzioni di domanda sismica dell'ordine del 30%.

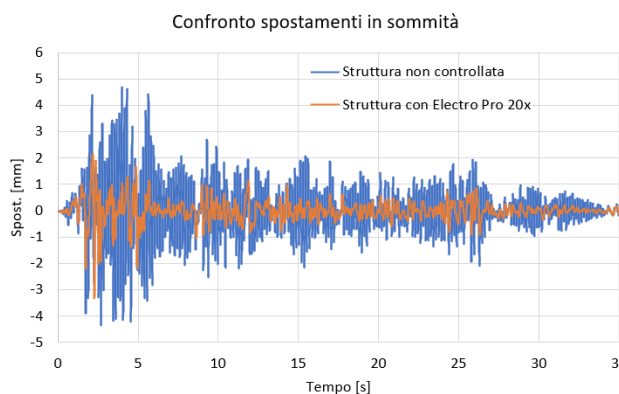


Figura 12 – Confronto in termini di spostamenti

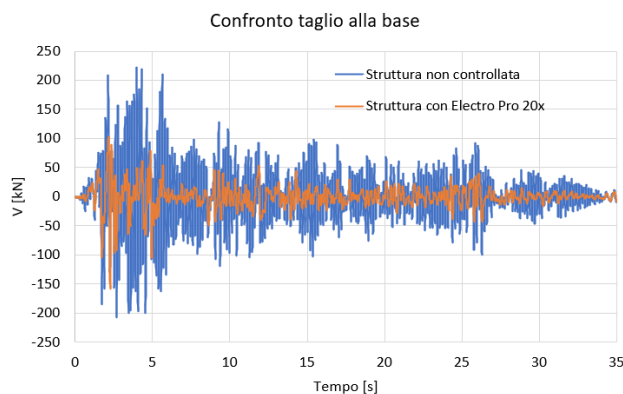


Figura 13 – Confronto in termini di sforzo di taglio

Nella Figura 14 e Figura 15 sono invece rappresentati gli involuپی dei momenti flettenti su travi e colonne per la struttura in assenza e con controllo dell'AMD. Le travi vedono una riduzione del 20% delle azioni flettenti, mentre le colonne di circa il 27%.

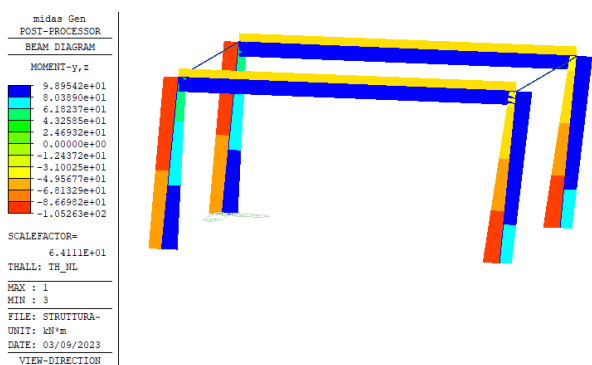


Figura 14 – Involuppo momenti flettenti, senza controllo

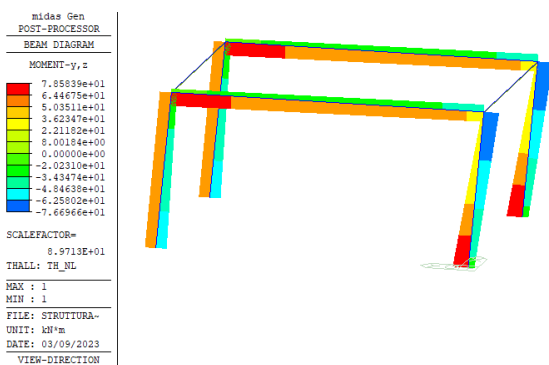


Figura 15 – Involuppo momenti flettenti, con AMD

Oltre che attraverso le comuni caratteristiche di sollecitazione e deformazioni, è possibile valutare l'efficacia del sistema di controllo attivo mediante i grafici che mostrano la ripartizione dell'energia di input nelle varie forme. Il comando di Midas Gen *Time History Energy Graph* permette di esplorare tali contributi ed è interessante notare come, in un modello lineare come quello in esame, per la struttura senza AMD (Figura 16), la maggior parte dell'energia venga dissipata dallo smorzamento strutturale, 96.4%. Quando invece è presente il *Bilinear Dashpot*, è quest'ultimo ad assorbire la quasi totalità dell'energia introdotta dal sisma 90.5%, abbattendo la quota parte dello smorzamento strutturale che scende al 7.2%, (Figura 17).

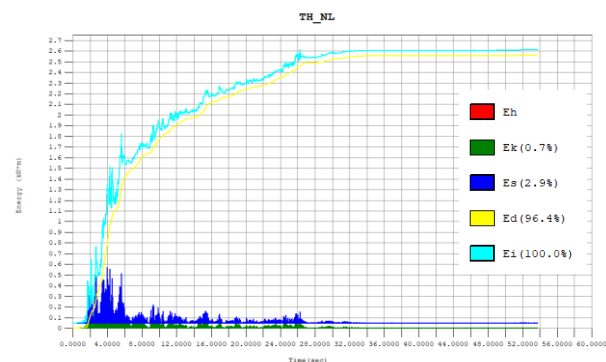


Figura 16 – Ripartizione dell'energia di input per la struttura non controllata

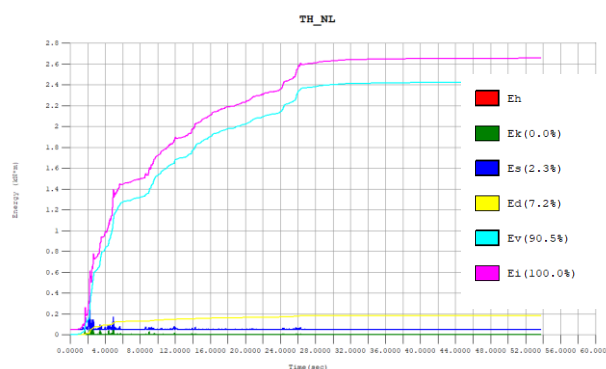


Figura 17 - Ripartizione dell'energia di input per la struttura provvista di AMD

Conclusioni

Nel presente contributo sono state fornite indicazioni sul principio di funzionamento di sistemi AMD e di un loro possibile approccio alla modellazione attraverso il software Midas Gen. Particolare attenzione è stata dedicata agli aspetti operativi del software ed alla procedura di progetto che consente il loro dimensionamento, in riferimento al sistema ISAAC Electro Pro 20x.

Attraverso un semplice modello FEM di una struttura di prova soggetta ad un noto sisma storico, sono stati poi messi in luce i miglioramenti raggiungibili in termini di spostamenti e sollecitazioni, tra il 20 e 30%, ed energia dissipata, -90%.

Riferimenti bibliografici

- Rebecchi G., Calvi P. M., Bussini A., Dacarro F., Bolognini D., Grottoli L., Rosti M., Ripamonti F., Cii S. “*Full-scale shake table tests of a reinforced concrete building equipped with a novel servo-hydraulic active mass damper*”, Journal of Earthquake Engineering, 2022. DOI: 10.1080/13632469.2022.2121338.
- Rosti M, Cii S, Bussini A, Calvi PM, Ripamonti F. “*Design and validation of a hardware-in-the-loop test bench for evaluating the performance of an active mass damper*”. Journal of Vibration and Control, 2022. DOI:10.1177/10775463221111262.
- Rebecchi G., Bussini A. “*La protezione sismica attiva: prove sperimentali, simulazioni numeriche e strumenti per la progettazione*”. Progettazione sismica – Eucentre. 2021. Vol. 13, N. 6. E-ISSN 2532-1560. <https://doi.org/10.7414/PS.13.1.6>.
- Rebecchi G., Menardo F., Rosti M., Bussini A., Diamanti P., Del Viva F., Masiello G., Sguazzo S. “*An innovative active control system for the seismic retrofit of a precast R.C. wall-bearing building*”. XIX ANIDIS Conference, Seismic Engineering in Italy. 2022. [Procedia Structural Integrity 44 \(2023\) 1180–1187](#).