

PROTEZIONE SISMICA DI STRUTTURE MEDIANTE SISTEMI DI CONTROLLO ATTIVI

GUIDA ALL'UTILIZZO DEL PLUG-IN AMDesign

Report tecnico
Ing. F. Menardo

INDICE.

1.	INTRODUZIONE	3
2.	OVERVIEW DI AMDesign.....	4
3.	PROGETTAZIONE DEL SISTEMA DI CONTROLLO ATTIVO ATTRAVERSO AMDesign	5
3.1	Analisi agli autovalori.....	5
3.2	Progettazione del sistema di controllo attivo.....	5
3.3	Architettura del sistema	10
3.4	Impostazione delle analisi in storia temporale.....	10
3.5	Svolgimento delle analisi	11
3.6	Risultati strutturali	12
3.7	Risultati del sistema di controllo	13
3.8	Salvataggio dei casi di carico in SAP2000®	14
3.9	Altre opzioni di salvataggio e di caricamento.....	14
4.	CONCLUSIONI.....	15

1. INTRODUZIONE

AMDesign è un plug-in del software commerciale SAP2000[®], sviluppato da ISAAC Antisismica in collaborazione con CSI Italia, per permettere al progettista strutturale di inserire sistemi di controllo attivo per la protezione sismica all'interno dei modelli numerici di calcolo per applicazioni nell'ambito dell'ingegneria civile.

AMDesign consente di progettare dei veri e propri smorzatori inerziali attivi (in inglese Active Mass Damper) per studiare il comportamento dinamico delle strutture soggette ad azione sismica.

Inoltre, il software consente di indagare le caratteristiche meccaniche del sistema per verificare il corretto funzionamento dello stesso, proprio come se questo fosse installato su di una struttura reale. In questo modo, non solo è possibile valutare il miglioramento apportato dal sistema attivo sull'edificio, ma è anche consentito di tenere traccia delle performance degli AMD così da ottimizzarne i parametri di controllo.

AMDesign garantisce un'ottima affidabilità in termini di simulazioni dinamiche al passo che siano esse lineari o non lineari, consentendo una buona flessibilità nella definizione dei parametri in gioco pur fornendo un ambiente di calcolo semplice ed intuitivo.

2. OVERVIEW DI AMDESIGN

Come anticipato nell'introduzione, AMDesign è un'applicazione che si appoggia al software SAP2000[®]. Per questo motivo è necessario creare un modello numerico della struttura all'interno di quest'ultimo per poter successivamente effettuare la progettazione del sistema di controllo attivo attraverso il plug-in AMDesign.

Nel modello strutturale di input è importante che siano definite le caratteristiche più importanti della struttura, in maniera tale da svolgere la progettazione degli AMD all'interno di una simulazione che rispecchi il comportamento dinamico reale della costruzione in esame. Quindi, sarà necessario creare un file .sdb che contenga la geometria della struttura, i materiali utilizzati, le sezioni delle membrature, i vincoli opportuni, i carichi agenti, le masse in gioco ed altri aspetti, alcuni dei quali verranno approfonditi nel seguito dell'articolo.

Una volta creato il modello è possibile avviare l'applicazione AMDesign e caricare il file .sdb.

In questa fase l'applicazione avvierà automaticamente un'istanza di SAP2000[®] che permetterà all'utente di interagire con il software di calcolo strutturale durante l'utilizzo di AMDesign così da consentire un'interoperabilità completa tra i due programmi.

I pannelli presenti all'interno del plug-in, che verranno indagati più approfonditamente nel prosieguo dell'articolo, sono elencati e brevemente descritti nel seguito:

- **modal analysis** per poter svolgere un'analisi agli autovalori;
- **active control design** per poter progettare il sistema di controllo attivo;
- **show architecture** per visualizzare il sistema appena progettato all'interno del modello;
- **time history analysis setup** per impostare le proprietà delle analisi da effettuare;
- **run analysis** per poter svolgere le analisi impostate;
- **results structure** per visualizzare i risultati ottenuti lato struttura;
- **results control** per visualizzare i risultati ottenuti lato sistema di controllo;
- **save model and export data** per poter salvare i casi di carico creati e permettere lo svolgimento delle analisi direttamente dal software SAP2000.

3. PROGETTAZIONE DEL SISTEMA DI CONTROLLO ATTIVO ATTRAVERSO AMDESIGN

Per effettuare una progettazione ottimale del sistema di controllo attivo all'interno dei modelli di calcolo è opportuna la compilazione e la presa in visione di tutte le schede presentate al Capitolo 2. Nel seguito si esaminano nel dettaglio le caratteristiche di ogni singola scheda sopra citata.

3.1 ANALISI AGLI AUTOVALORI

L'applicazione AMDesign permette di effettuare, come prima operazione e previa la selezione di una sorgente di massa precedentemente definita in SAP2000[®], un'analisi agli autovalori per studiare il comportamento dinamico lineare della struttura analizzata.

Questo aspetto è importante perché consente di definire, in prima battuta, le caratteristiche dinamiche della costruzione, mettendo in evidenza eventuali fragilità da proteggere in fase di progettazione del sistema.

Il software fornisce i risultati sia in forma tabellare, dove vengono mostrati periodi e frequenze dei primi modi di vibrare della struttura, sia in forma grafica attraverso un pannello che dà la possibilità di visualizzare le forme modali.

È possibile scalare i grafici attraverso l'inserimento di uno *Scale Factor*.

3.2 PROGETTAZIONE DEL SISTEMA DI CONTROLLO ATTIVO

Il presente pannello costituisce il cuore dell'applicazione, in quanto permette di progettare il sistema di controllo attivo per la protezione sismica della struttura analizzata.

In questa scheda è possibile, innanzitutto, definire la tipologia di Active Mass Damper che si vuole utilizzare all'interno delle simulazioni numeriche. Il programma permette di scegliere tra due soluzioni preimpostate, relative ai sistemi che Isaac Antisismica propone sul mercato. Attraverso il comando *Advanced Options* è possibile andare ad indagare le caratteristiche del sistema selezionato, le quali comprendono i dati di targa del sistema stesso. Queste informazioni sono brevemente elencate nel seguito:

- dati nominali del sistema;
- dati di picco del sistema;
- dati relativi al sistema di misurazione che si andrà ad installare, come il rumore dei sensori (parametro estraibile dalla scheda tecnica del produttore), e l'utilizzo di eventuali filtri;
- funzione di trasferimento per permettere di definire la dinamica reale del sistema;
- altri parametri legati al controllo, come per esempio il parametro relativo alla soglia di attivazione che identifica il livello limite di accelerazione del terreno alla base della struttura, tale per cui le macchine installate sul piano di copertura entrano in funzione.

Tali parametri sono parzialmente editabili. Infatti, non è permessa la modifica di alcuni parametri che sono specifici per il sistema scelto.

Ad ogni modo AMDesign, per garantire la massima flessibilità nell'introduzione dei sistemi, consente di definire Active Mass Damper ad hoc andando a selezionare dal menu a tendina l'opzione *Future Release*, permettendo così di modificare liberamente i parametri di input dei sistemi, qualora si volesse inserire sistemi personalizzati.

All'interno dell'applicazione, per simulare il comportamento degli AMD, è implementato un algoritmo di controllo di tipo Sky-Hook. La forza di controllo di ciascuna macchina i -esima è definita come:

$$F_{c,i} = -G_{SH,i} \cdot (v_{t,i} - v_{b,i}) = -G_{SH,i} \cdot v_{rel,i}$$

Dove:

- $v_{t,i}$ è la velocità del punto di misura posizionato in corrispondenza della macchina i -esima, sul piano di copertura, lungo la direzione di applicazione della forza;
- $v_{b,i}$ è la velocità del piano terra dell'edificio in corrispondenza di un punto verticalmente allineato con la macchina i -esima, sempre nella direzione di applicazione della forza della macchina stessa;
- $G_{SH,i}$ è il guadagno (anche chiamato Gain) impostato sulla macchina i -esima. Il guadagno $G_{SH,i}$ definisce la costante di proporzionalità diretta tra la velocità relativa del tetto e la forza

di controllo applicata. Il segno negativo garantisce che la macchina generi una forza che vada a “contrastare” l’azione del sisma e che abbia sempre un comportamento dissipativo: infatti, la macchina agisce idealmente come un elemento viscoso posto tra la base e la sommità dell’edificio; l’unità di misura del guadagno è $\frac{N \cdot s}{m}$.

Le macchine predefinite all’interno del programma, come le macchine reali, sono principalmente soggette a tre vincoli di natura meccanica che ne definiscono le potenzialità: la forza massima generata dall’attuatore, la velocità e la corsa massima della massa mobile:

- la forza dell’attuatore per movimentare la massa mobile è limitata dalla pressione massima di 315 bar raggiungibile dall’impianto idraulico della macchina; la pressione massima è a sua volta limitata dalla servo-valvola;
- considerando la sezione del pistone delle macchine, la forza massima che ciascuna di esse è in grado di generare è pari a 220 kN;
- la velocità a cui è possibile movimentare la massa mobile è limitata dalla massima portata di olio che può attraversare la servo-valvola; la velocità massima è di 5 m/s;
- la corsa dell’attuatore è limitata a ± 500 mm (+100 mm per le frenature).

Per rispettare questi limiti tecnologici, all’interno del modello numerico è necessario introdurre delle saturazioni affinché tali vincoli siano soddisfatti:

- saturazione in forza: $|F_{c_{max}}| = 220 \text{ kN}$;
- saturazione in velocità: $|v_{AMD_{max}}| = 5 \text{ m/s}$;
- saturazione in corsa: $|s_{AMD_{max}}| = 0.5 \text{ m}$.

Per quanto riguarda i sistemi predefiniti, i limiti sono impostati in automatico all’interno di AMDDesign e vengono presi in conto solo per alcune tipologie di simulazione che verranno espone nel seguito all’interno del presente paragrafo.

Le saturazioni sopra espone determinano le performance del sistema. Si osservi che il comportamento delle macchine è influenzato dalle proprietà dinamiche della struttura.

Infatti, se la struttura oscilla a frequenze basse, anche la massa mobile dell'AMD oscillerà a frequenze basse. Oscillando a frequenze basse, a parità di forza, lo spostamento della massa mobile dell'AMD è molto più grande rispetto all'oscillazione della stessa su di una costruzione più rigida. La forza di controllo di ciascuna macchina si può esprimere in valore assoluto come:

$$F_c = m_{AMD} \cdot a_{AMD}$$

Fissata la forza F_c , e quindi l'accelerazione a_{AMD} , la velocità e lo spostamento della massa mobile dell'AMD (nell'ipotesi semplificativa che la macchina risponda solamente alla prima frequenza propria della struttura) dipendono dalla sua frequenza di oscillazione ω :

$$v_{AMD} = \frac{a_{AMD}}{\omega}$$

$$s_{AMD} = \frac{a_{AMD}}{\omega^2}$$

A parità di forza F_c (e quindi di accelerazione a_{AMD}), se ω diminuisce, lo spostamento dell'AMD s_{AMD} aumenta proporzionalmente a $1/\omega^2$, mentre la velocità dell'AMD v_{AMD} aumenta proporzionalmente a $1/\omega$. Per questo motivo, il sistema che agisce su di una struttura particolarmente flessibile, dove il valore di ω è basso, potrebbe raggiungere le saturazioni in velocità e/o spostamento, andando a perdere di efficacia nel ridurre le oscillazioni della costruzione, in quanto la macchina non riuscirebbe ad esprimere tutte le sue potenzialità in termini di forza di controllo scaricata in copertura, agendo con performance degradate.

Questo aspetto è da prendere in considerazione in fase di simulazione numerica per la progettazione del sistema e per la valutazione dei risultati ottenuti.

All'interno dell'applicazione AMDesign, è possibile svolgere tre tipologie differenti di simulazione, che si differenziano in funzione del grado di dettaglio con il quale si vuole simulare il comportamento del sistema attivo:

- sistema ideale;
- sistema vincolato o *constrained*;
- sistema reale.

Il sistema simulato come ideale non ha alcun limite in merito alle saturazioni viste in precedenza. Quindi, simulando in questo modo le macchine, il software, nel corso delle analisi, tratterà la macchina come un dissipatore viscoso ideale che non presenta limite di alcun genere.

Il sistema vincolato presenta, invece, le saturazioni in forza, velocità e spostamento, così come accade nella realtà. Per questo motivo, la simulazione sarà molto più completa rispetto a quella ideale.

Le simulazioni con il sistema reale considerano, oltre alle tre saturazioni, la dinamica del sistema, attraverso la definizione di una funzione di trasferimento specifica. Per le macchine preimpostate, la funzione di trasferimento di default è stata definita attraverso opportune prove sperimentali.

In Figura 1 si riporta la schermata di AMDesign relativa alla scheda *Active control design*.

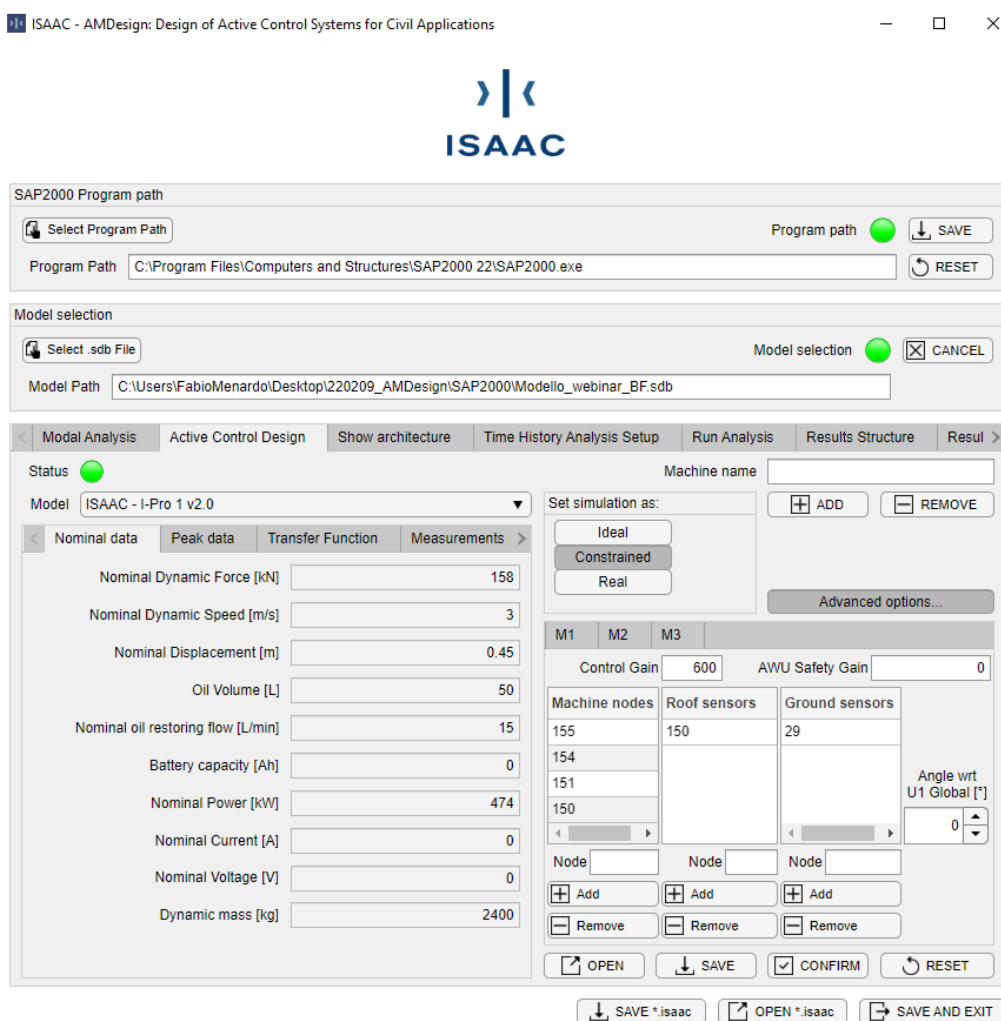


Figura 1 – Pannello “Active Control Design”

Attraverso il processo di analisi sarà fondamentale andare a tarare adeguatamente il parametro relativo al *Control Gain* che costituisce un parametro fondamentale nel processo di progettazione dell'AMD per la struttura in esame. Più il valore sarà alto e più alta sarà la forza richiesta agli AMD installati. Nel caso di simulazioni differenti da quelle ideali il valore del Gain sarà influenzato dai limiti in saturazione visti in precedenza.

Con la coadiuvazione dell'istanza di SAP2000[®] per individuare le etichette dei nodi, è necessario selezionare i nodi del modello in cui si vuole scaricare la forza di controllo di ogni singola unità macchina posta sul piano di copertura. È inoltre necessario individuare un nodo di applicazione del sensore in prossimità del tetto e un nodo per il sensore collineare previsto alla base della costruzione, in maniera tale da consentire al programma di calcolare la velocità relativa in fase di analisi.

A questo punto, il sistema di controllo attivo per la protezione sismica della struttura è completato.

3.3 ARCHITETTURA DEL SISTEMA

Nel presente pannello, attraverso uno specchietto interattivo, è possibile visualizzare il posizionamento degli AMD progettati nella scheda precedente.

È possibile esportare un file .png raffigurante il posizionamento degli AMD e dei sensori, riportando una vista planimetrica del piano di copertura appartenente all'edificio.

3.4 IMPOSTAZIONE DELLE ANALISI IN STORIA TEMPORALE

In questa scheda è possibile impostare un caso di carico per svolgere analisi dinamiche time-history lineari e/o non lineari. L'approccio di input è simile a quello presente all'interno del software SAP2000[®].

Il primo dato di input è il *sample time* ovvero la frequenza alla quale sono stati campionati i dati degli accelerogrammi. Per permettere maggior flessibilità in fase di analisi e per soddisfare quanto prescritto dalla Normativa Tecnica per le Costruzioni del 2018 al §7.3.5, AMDesign consente di definire due storie di accelerazione differenti per le due direzioni. I file di input per gli

accelerogrammi, proprio come accade in ambiente SAP, devono essere costruiti impostando un'unica colonna in cui sono presenti i soli dati accelerometrici.

È necessario, successivamente, definire la configurazione per lo svolgimento delle analisi, andando a impostare il tempo di durata della simulazione ed il passo temporale per la risoluzione delle equazioni risolventi.

Qualora si ritenga necessario è anche possibile definire uno smorzamento strutturale alla Rayleigh. Nel caso di analisi non lineari, il programma consente di scegliere il tipo di soluzione (integrazione diretta o modale), l'eventuale caso di carico iniziale (per tenere in considerazione dei carichi gravitativi statici), il caso di carico modale (solo per le FNA) e gli eventuali effetti geometrici del secondo ordine (solo per la soluzione che prevede l'integrazione diretta dell'equazione del moto). Una volta inseriti i dati all'interno del presente pannello è possibile passare alla fase di analisi.

3.5 SVOLGIMENTO DELLE ANALISI

La presente scheda permette di svolgere le analisi strutturali per la costruzione equipaggiata del sistema di controllo attivo progettato in precedenza, a partire dai dati inseriti all'interno del pannello relativo alla definizione del caso di carico dinamico.

Prima di eseguire le simulazioni è utile verificare la correttezza nella definizione degli input all'interno dei pannelli precedenti. Questa operazione è semplice perché basterà controllare che tutti i segnali luminosi circolari siano di colore verde.

Le analisi all'interno di AMDesign vengono svolte attraverso un complesso simulatore che permette l'interazione tra il software SAP2000® e Matlab®. Il primo software è utilizzato per simulare la storia temporale della risposta della struttura soggetta sia al movimento del suolo che alla forza sprigionata dal sistema di protezione sismica progettato. Il secondo software, invece, simula la logica di controllo ed il comportamento delle macchine nel fornire la forza richiesta dalla logica di controllo stessa. Il principio di funzionamento è illustrato in Figura 2: ad ogni step, la storia temporale viene elaborata dal software ad elementi finiti; l'output viene così letto dal codice Matlab® e, esattamente come accadrebbe nella realtà, l'algoritmo di controllo calcola le forze che devono essere sprigionate dalle macchine in copertura nello step successivo, analizzando il moto della struttura nei punti in cui vengono applicati i sensori. Le forze calcolate vengono così esercitate sulla struttura e il ciclo si ripete continuamente. Le forze erogate dal sistema di protezione sismica vengono considerate agenti, per ogni AMD, nei punti scelti nella fase di definizione delle macchine.

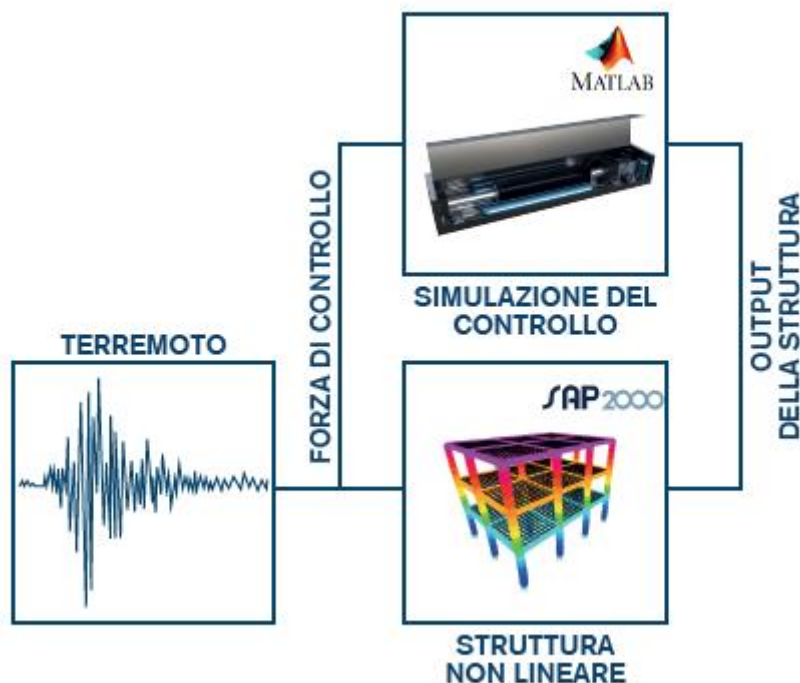


Figura 2 – Simulatore utilizzato da AMDesign per il processo di analisi

Durante il processo di analisi, l'applicazione permette di visualizzare le informazioni salienti riguardanti la struttura, in termini di spostamento in copertura, e inerenti agli AMD, in termini di forza di controllo. Queste informazioni consentono, in maniera speditiva, di valutare l'apporto del sistema in termini di miglioramento sulla struttura e permettono di controllare che le macchine lavorino in maniera corretta.

I grafici vengono aggiornati con un valore di frequenza impostato dall'utente attraverso il comando *update plot*.

3.6 RISULTATI STRUTTURALI

Questo pannello costituisce un utile strumento per confrontare il comportamento della struttura equipaggiata del sistema di controllo attivo (struttura controllata) con quello della struttura sprovvista di esso (struttura non controllata).

La prima operazione da svolgere all'interno della scheda, però, è quella relativa allo svolgimento delle analisi sulla struttura non controllata.

Una volta svolte le simulazioni per entrambe le costruzioni è possibile eseguire i seguenti confronti:

- in termini di spostamenti relativi alla base nelle tre direzioni;
- in termini di velocità relative alla base nelle tre direzioni;
- in termini di accelerazioni relative alla base nelle tre direzioni;
- in termini di taglio alla base nelle tre direzioni.

Per poter svolgere le valutazioni di comparazione che riguardano gli spostamenti, le velocità e le accelerazioni è necessario scegliere un nodo di riferimento.

AMDesign permette, inoltre, di esportare i risultati derivanti dalle analisi sia in formato testo che in formato immagine. Questa opzione, oltre a dare la possibilità di inserire velocemente le varie immagini all'interno di relazioni e/o report, permette di effettuare analisi dei dati in fase di post-processing.

3.7 RISULTATI DEL SISTEMA DI CONTROLLO

In questa fase è possibile indagare più da vicino il comportamento del sistema di controllo attivo durante il sisma simulato. Infatti, il presente pannello consente di verificare gli aspetti trattati in precedenza relativi alle saturazioni delle macchine. Entrando più nel dettaglio, attraverso AMDesign, è possibile visualizzare i seguenti grafici, per ogni AMD installato nel modello sul piano di copertura:

- spostamento della massa mobile al variare del tempo;
- velocità della massa mobile al variare del tempo;
- accelerazione della massa mobile al variare del tempo;
- forza di controllo al variare del tempo;
- potenza del sistema;
- riserva di olio.

Anche in questo caso è possibile esportare i risultati ottenuti sia in formato testo che in formato immagine.

3.8 SALVATAGGIO DEI CASI DI CARICO IN SAP2000[®]

L'aspetto legato al salvataggio dei casi di carico, creati attraverso AMDesign direttamente nel file di SAP2000[®] contenente il modello numerico, è uno dei punti di forza dell'applicazione. Infatti, al termine di una generica simulazione vi è la possibilità di salvare i casi di carico creati, relativi alla struttura controllata e alla struttura non controllata direttamente all'interno del file .sdb. Così facendo sarà possibile svolgere le medesime analisi direttamente in ambiente SAP, con l'inserimento delle storie delle forze di controllo calcolate attraverso AMDesign per ogni macchina progettata, con il vantaggio di poter indagare le caratteristiche della struttura a 360°. Per esempio, potranno essere effettuati alcuni confronti in merito alle caratteristiche di sollecitazione nelle membrature strutturali, ai bilanci energetici, al comportamento non lineare di elementi specifici e così via. In questo modo si lascia all'utente la libertà di eseguire tutta una serie di operazioni possibili esclusivamente all'interno del software ad elementi finiti dove, però, vengono inclusi anche gli effetti degli AMD progettati ed analizzati attraverso il plug-in.

Questa opzione è fondamentale, per esempio, qualora si dovesse svolgere un'analisi di vulnerabilità nei confronti della struttura oggetto di analisi.

3.9 ALTRE OPZIONI DI SALVATAGGIO E DI CARICAMENTO

Il plug-in presenta diverse funzionalità in tema di salvataggio e di caricamento dati. In primis, AMDesign permette i processi di salvataggio e caricamento per quanto riguarda il modello completo comprensivo dei parametri definiti per il sistema attivo e dei dati inerenti all'impostazione delle analisi. Chiaramente, in questo caso, non sarà possibile salvare e caricare i risultati ottenuti a seguito delle simulazioni, ma verranno mantenuti solo ed esclusivamente i dati di input.

Inoltre, l'applicazione consente il salvataggio ed il caricamento anche all'interno dei singoli pannelli *Active control design* e *Time history analysis setup*. In questo caso, però, il processo di salvataggio e di caricamento riguarderà solo ed esclusivamente i dati presenti all'interno della scheda specifica. Questo potrebbe risultare utile, per esempio, qualora si volesse modificare in corso d'opera il

posizionamento delle macchine oppure l'accelerogramma di input, senza operare modifiche generali al modello.

4. CONCLUSIONI

Come si è visto in queste pagine, AMDesign è il primo software al mondo che consente un design completo di sistemi inerziali attivi per la protezione sismica per applicazioni nell'ambito dell'ingegneria civile. In maniera semplice ed intuitiva permette la progettazione e l'applicazione di Active Mass Damper sul piano di copertura dei modelli strutturali per simulare il comportamento delle costruzioni soggette ad azioni sismiche.

In allegato al presente documento viene riportato un esempio applicativo svolto interamente con il plug-in AMDesign su di un caso studio generico. All'interno sarà possibile osservare la progettazione del sistema attraverso la modellazione esplicita nei capitoli precedenti e valutare gli effetti benefici apportati dalla tecnologia inserita.