

Ricerca

Un metodo semplificato per il dimensionamento e l'analisi di strutture equipaggiate con smorzatori viscosi

A simplified method for dimensioning and analyzing equipped structures with viscous dampers

Michele Palermo¹, Stefano Silvestri¹, Giada Gasparini¹, Tomaso Trombetti¹ ■

Sommario

La presente memoria presenta un metodo diretto per il dimensionamento di strutture a telaio dotate di smorzatori viscosi che permette: (1) di dimensionare la taglia degli smorzatori viscosi da inserire nella struttura in modo da soddisfare un determinato obiettivo prestazionale; (2) di stimare le massime sollecitazioni negli elementi strutturali attraverso l'involuppo di due analisi statiche equivalenti.

Parole chiave: analisi statica equivalente, smorzatori viscosi, progettazione prestazionale, procedura diretta.

Abstract

The present work introduces a direct procedure for the preliminary design of building structures equipped with viscous dampers which allows: (1) to size the viscous dampers to be inserted in the building in order to achieve a specific performance objective and (2) to estimate the peak internal actions in the structural members through the envelope of two equivalent static analyses.

Keywords: equivalent static analysis, viscous dampers, performance based seismic design, direct procedure.

1. Introduzione

Da un punto di vista ingegneristico l'effetto di un terremoto su un edificio viene modellato attraverso azioni dinamiche impresse alla base delle strutture (tipicamente accelerazioni del suolo), le quali determinano una complessa risposta dinamica della struttura che dipende fondamentalmente dall'intensità e dalle caratteristiche dell'input sismico, nonché dalle proprietà elastiche, inerziali e dissipative della struttura.

Per caratterizzare ingegneristicamente la risposta sismica delle strutture è spesso adottato un approccio di tipo energetico. In estrema sintesi, il sisma trasmette una data energia alla struttura (energia in ingresso), la quale viene in parte immagazzinata dalla struttura sotto forma di deformazione elastica, in parte dissipata nell'ambiente ed in parte associata al moto della struttura:

$$E_i = E_k + E_c + E_d \quad (1)$$

E_i = Energia in ingresso, E_k = energia elastica immagazzinata dalla struttura attraverso deformazioni elastiche (reversibili) degli elementi strutturali, E_d = energia dissipata nell'ambiente, E_c = energia cinetica associata al moto della struttura.

La massima energia elastica che può essere immagazzinata dalla struttura è limitata dalle capacità resistenti degli elementi strutturali. In caso di sismi violenti l'energia in ingresso può risultare significativamente superiore alla massima energia elastica immagazzinabile dalla struttura e quindi causare l'escursione della struttura in campo inelastico, lo sviluppo di deformazioni irreversibili e meccanismi di danneggiamento (dissipazione di energia per isteresi dei materiali). Nel caso di edifici

¹ Università di Bologna, Scuola di Ingegneria e Architettura, Dipartimento DICAM - Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Bologna, Italia.

tradizionali la dissipazione di energia si manifesta sostanzialmente a fronte di danneggiamenti progressivi che, in casi estremi, possono condurre sino al collasso strutturale.

La breve disamina del comportamento sismico attraverso l'approccio energetico consente di individuare tre possibili percorsi progettuali finalizzati alla concezione di edifici aventi prestazioni sismiche superiori: (1) concepire strutture in grado di immagazzinare elevate quantità di energia elastica, ovvero strutture "resistenti", (2) concepire strutture in grado di dissipare una significativa quota parte della energia in ingresso, ovvero strutture "dissipative", (3) ridurre l'energia in ingresso mediante specifici disaccoppiamenti dinamici, ovvero strutture "isolate".

L'ingegneria sismica, sin dagli anni '50/'60 del secolo scorso, si è dedicata allo studio dettagliato dei sistemi costruttivi a telaio che, per intrinseche caratteristiche geometriche (assenza di controventi e capacità di sostenere forze orizzontali affidate ai nodi trave-pilastri), sono caratterizzati da limitate capacità resistenti nei confronti delle azioni orizzontali (come noto sin dai primi studi su telai in c.a. dell'ingegnere svizzero Robert Maillart). Tali limitate capacità resistenti delle strutture a telaio sono emerse durante il terremoto del 1971 di San Fernando negli Stati Uniti i cui effetti sulle strutture rilevarono l'esigenza di incrementare le proprietà dissipative delle strutture a telaio verso una progettazione di tipo multi-prestazionale (il cosiddetto "Performance-Based Seismic Design" introdotto nel 1995 con il rapporto Vision 2000, SEAOC) basata sui concetti di duttilità e gerarchia delle resistenze.

Parallelamente, grazie al rapido sviluppo tecnologico, a partire dagli anni '70 del secolo scorso sono state introdotte le cosiddette strategie di protezione antisismica basate sull'utilizzo di dispositivi di isolamento alla base e di dissipazione aggiuntiva (ad esempio attraverso dissipatori fluido-viscosi, visco-elastici, isteretici). L'approccio progettuale basato sulla dissipazione è finalizzato ad incrementare in modo significativo la quota parte di energia dissipata E_d preservando così gli elementi strutturali che rispondono in fase elastica (con assenza di danneggiamento).

Il presente lavoro ha l'obiettivo di fornire al progettista strutturale strumenti per il dimensionamento e l'analisi sismica di strutture a telaio dotate di smorzatori fluido-viscosi. Nel dettaglio, viene dapprima fornita una breve disamina dei principali contributi di ricerca sviluppati negli ultimi anni nel campo dei dispositivi di dissipazione, e di seguito introdotto un metodo diretto a "cinque passi" (in letteratura scientifica: "Direct Five-Step Procedure") per il dimensionamento degli smorzatori e la valutazione delle massime sollecitazioni agenti negli elementi strutturali in caso di evento sismico. A titolo esemplificativo, la procedura di progetto viene infine applicata con riferimento ad un edificio scolastico.

2. I principi di funzionamento ed il dimensionamento di smorzatori viscosi da inserire in strutture a telaio

Gli smorzatori viscosi attualmente in commercio sono dispositivi del tipo cilindro/pistone in cui la laminazione di un fluido siliconico attraverso un idoneo circuito idraulico permette la dissipazione di energia. Stante la natura viscosa di tali dispositivi, la forza da essi sviluppata risulta proporzionale alla velocità di allungamento/accorciamento del pistone. Il comportamento meccanico (legame forza - velocità, F_d-v) degli attuali dispositivi commerciali è non-lineare del tipo:

$$F_d = c \cdot \text{sign}(v) \cdot |v|^\alpha \quad (2)$$

c è il coefficiente di smorzamento, α è l'esponente dello smorzatore (tipicamente per dispositivi commerciali $\alpha < 1$).

Nell'ambito dell'ingegneria sismica è prassi comune il quantificare la capacità dissipativa di una struttura per mezzo del cosiddetto rapporto di smorzamento ξ , definito, nel caso di sistemi ad un grado di libertà, come rapporto tra il coefficiente di smorzamento c ed il coefficiente di smorzamento critico della struttura c_{cr} . Nel caso di costruzioni prive di dispositivi di dissipazione aggiuntiva, la quantità di energia dissipata (per attrito, isteresi, giochi nelle connessioni, ...) conduce a valori di rapporti di smorzamento (equivalente) dell'ordine di qualche punto percentuale (tipicamente 2-5%). Nel caso specifico di strutture equipaggiate con smorzatori viscosi aggiuntivi, il rapporto di smorzamento equivalente può raggiungere valori intorno al 30%. Numerosi studi scientifici hanno studiato il legame tra il rapporto di smorzamento e la riduzione della risposta sismica. Un parametro che tipicamente è utilizzato per quantificare tale relazione è il cosiddetto fattore di riduzione dello spettro elastico η . Negli anni, in letteratura scientifica, sono state proposte diverse formulazioni $\eta - \xi$, alcune delle quali sono state poi recepite dalle principali normative sismiche mondiali. La formulazione più diffusa a livello internazionale, e recepita sia dagli Eurocodici (EC8) che dalle attuali norme tecniche italiane (NTC08), è quella proposta da Bommer et al. (2000):

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}} \quad (3)$$

Solitamente, nelle applicazioni pratiche e soprattutto nei casi di interventi su edifici esistenti, i dispositivi di smorzamento vengono inseriti in controventi diagonali (comunemente in acciaio) in modo tale da collegare due piani consecutivi (posizionamento di interpiano), secondo la schematizzazione riportata nella Figura 1 (c indica il coefficiente di smorzamento, θ è l'angolo di inclinazione dello smorzatore rispetto all'orizzontale, δ è lo spostamento relativo di interpiano lungo la direzione orizzontale).

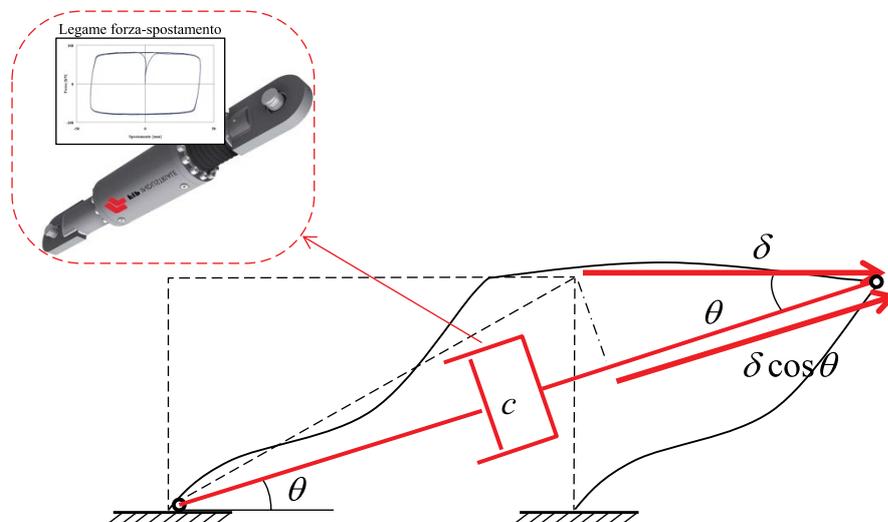


Figura 1
Singolo portale equipaggiato con smorzatore viscoso di interpiano.

È opportuno notare come, in questi casi, in virtù della specifica inclinazione del dispositivo rispetto alla direzione orizzontale, la sua efficacia nel dissipare le azioni orizzontali indotte dal sisma sia “ridotta” rispetto a quella del medesimo dispositivo disposto lungo la direzione orizzontale. Inoltre, la disposizione di interpiano attraverso elementi diagonali determina un accoppiamento del moto nelle direzioni orizzontale e verticale che comporta lo sviluppo di specifiche sollecitazioni aggiuntive (sforzi normali) nelle membrature. Tale aspetto verrà analizzato nel dettaglio nella presente memoria.

Sebbene in letteratura scientifica siano disponibili vari studi teorici inerenti il comportamento dinamico e sismico di strutture equipaggiate con smorzatori viscosi, la maggior parte di essi è indirizzata principalmente alla problematica della disposizione “ottimale” dei dispositivi, ovvero la disposizione che consente il raggiungimento di una prefissata “performance” (es. la limitazione degli spostamenti di interpiano) con l’utilizzo del minimo numero possibile di dispositivi. D’altro canto, in ambito accademico, la problematica pratica del dimensionamento degli smorzatori è considerata di minore interesse scientifico, tant’è che le attuali normative sismiche italiane (NTC08) non contengono alcuna procedura progettuale semplificata per il dimensionamento diretto dei dispositivi e delle membrature. Di fatto, ad oggi, la progettazione di strutture dotate di smorzatori può essere condotta unicamente tramite lo sviluppo di analisi numeriche di tipo dinamico non-lineare che richiedono strumenti e competenze computazionali di livello accademico, spesso non alla portata del progettista strutturale. Tale lacuna normativa ha fortemente limitato, per lo meno in territorio italiano, la diffusione di tali dispositivi.

A tal proposito, è opportuno ricordare che a livello internazionale sono già disponibili procedure per la progettazione di strutture dotate di smorzatori viscosi. Tali procedure, frutto di ricerche risalenti alla fine degli anni ‘90 condotte all’Università di Buffalo (si veda ad esempio il rapporto tecnico MCEER-00-0010), sono adottate dalle norme americane NEHRP 2000. Nel dettaglio, le NEHRP 2000 introducono due procedure di analisi alternative alle analisi dinamiche con integrazione al passo: (1) analisi con forze laterali equivalenti “Equivalent Lateral Force” (ELF) ed (2) analisi modale a spettro di risposta “Response Spectrum Analysis” (RSA). Tuttavia, come già accennato, tali procedure, pur rappresentando un riferimento rigoroso e di comprovata validità scientifica, appaiono di non immediata comprensione ed implementazione per l’ingegnere progettista italiano, essendo sviluppate con riferimento ad una serie di convenzioni progettuali tipiche dell’approccio americano e non adottate in Europa.

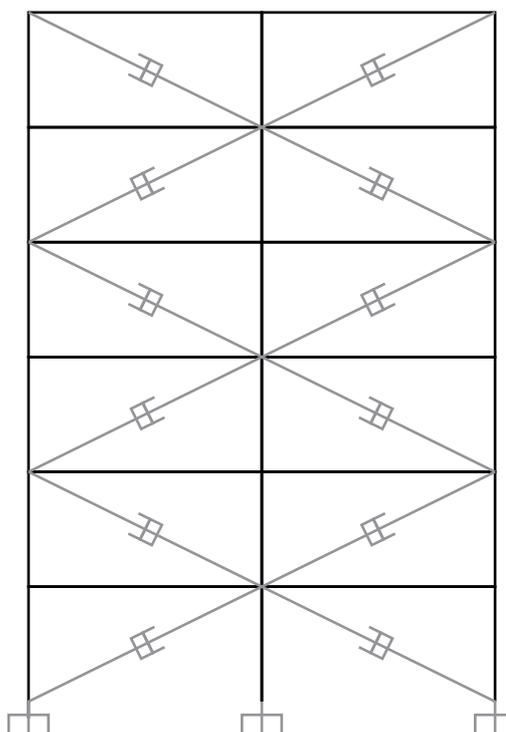
In aggiunta, appare opportuno menzionare la presenza in letteratura scientifica di procedure di progetto alternative, ma ancora poco conosciute nell’ambito della comunità progettuale. Una prima procedura alternativa per il dimensionamento dei coefficienti di smorzamento di dissipatori viscosi lineari da inserire all’interno di edifici a telaio è descritta nel testo del 2006 a cura di Christopoulos e Filiatrault. La procedura si limita a fornire una stima dei coefficienti di smorzamento degli smorzatori, senza indicazioni sulle forze massime sviluppate dagli stessi. Ricerche condotte dagli scriventi presso l’Università di Bologna a partire dai primi anni 2000 hanno condotto allo sviluppo di una procedura “a cinque passi” nota in letteratura come “Five-Step Procedure” (Silvestri et al., 2010). La procedura consente il dimensionamento degli smorzatori viscosi da inserire nelle strutture a telaio. L’applicazione della formulazione originale richiede, tuttavia, lo sviluppo di analisi numeriche di tipo dinamiche lineari con una integrazione al passo (time-history) per consentire la valutazione delle massime forze nei dispositivi e delle azioni interne nelle membrature strutturali.

3. Una procedura pratica per il dimensionamento degli smorzatori

La procedura pratica di progetto presentata in questa memoria, denominata “Direct Five-Step Procedure” (Palermo et al., 2016), rappresenta una semplificazione della “Five-Step Procedure” (Silvestri et al., 2010) ed è stata concepita dagli scriventi con lo specifico obiettivo di fornire al progettista strutturale degli strumenti analitici che consentano (1) di dimensionare la taglia degli smorzatori e (2) di valutare le massime sollecitazioni negli elementi strutturali. A tal fine, i passi che nella originale “Five-Step Procedure” richiedevano lo sviluppo di modelli ad elementi finiti e di analisi dinamiche di tipo time-history vengono sostituiti da semplici formulazioni analitiche, ovviamente approssimate ma efficaci ai fini sia di un dimensionamento preliminare che di un controllo dei risultati ottenuti con software FEM. Nel dettaglio, le formule analitiche che vengono nel seguito presentate sono derivate con specifico riferimento ad una struttura a telaio piana ad N piani caratterizzata da (Figura 2):

- Maglia strutturale regolare di luce L in entrambe le direzioni ($L \times L$).
- Altezza di interpiano h costante a tutti i piani.
- Disposizione uniforme dei dispositivi lungo l'altezza: in corrispondenza di ciascun interpiano si suppone di disporre n dispositivi uguali inclinati di un angolo θ rispetto all'orizzontale.
- Forma del primo modo di vibrare con andamento lineare lungo l'altezza e periodo di vibrazione $T_1 < 1.5$ s.
- Massa sismica di piano m uguale a tutti i piani ($W = N \cdot m \cdot g$ indica il peso sismico totale dell'intera struttura, g è l'accelerazione di gravità).

Figura 2
Struttura a telaio multipiano equipaggiata con smorzatori viscosi di interpiano.



I passi della procedura di predimensionamento, cui poi dovrà seguire opportuna verifica del comportamento sismico della struttura mediante analisi numeriche dinamiche di tipo time-history non lineari, sono i seguenti (Figura 4):

STEP 1: Definizione degli obiettivi prestazionali, in termini di:

- selezione di una desiderata prestazione sismica (ad esempio: riduzione dell'effetto dell'azione sismica di progetto = x %) e valutazione del corrispondente fattore di riduzione dello spettro elastico:

$$\bar{\eta} = 1 - \frac{x}{100}$$

- rapporto di smorzamento obiettivo:

$$\bar{\xi} = \frac{10}{\bar{\eta}^2} - 5$$

STEP 2: Identificazione del coefficiente di smorzamento per il singolo smorzatore viscoso (inizialmente è ipotizzato un comportamento lineare $F_L = c_L \cdot v$):

$$c_L = \bar{\xi} \cdot \omega_1 \cdot \frac{W}{g} \cdot \left(\frac{N+1}{n} \right) \cdot \frac{1}{\cos^2 \theta} \quad (4)$$

ω_1 è la frequenza fondamentale ($\omega_1 = 2\pi/T_1$).

STEP 3: Stima della velocità massima di lavoro del singolo smorzatore v_{\max} (corrispondente alla velocità di allungamento/accorciamento del pistone) e del massimo "interstorey drift" ID_{\max} (spostamento differenziale di interpiano):

$$v_{\max} = \frac{S_e(T_1, \bar{\eta})}{\omega_1} \cdot \frac{2}{N+1} \cdot \cos \theta \quad (5)$$

$$ID_{\max} = \frac{S_e(T_1, \bar{\eta})}{\omega_1^2} \cdot \frac{2}{N+1} \quad (6)$$

dove: $S_e(T_1, \bar{\eta})$ rappresenta l'ordinata dello spettro elastico in accelerazione delle componenti orizzontali in cui si tiene conto del fattore di riduzione $\bar{\eta}$ dovuto alla presenza degli smorzatori nella struttura.

Stima della massima forza di progetto negli smorzatori lineari $F_{L,\max}$:

$$F_{L,\max} = 2 \cdot \bar{\xi} \cdot \frac{W}{g} \cdot \frac{S_e(T_1, \bar{\eta})}{n \cdot \cos \theta} \quad (7)$$

Stima della corsa massima dello smorzatore lineare s_{\max}

$$s_{\max} = \frac{S_e(T_1, \bar{\eta})}{\omega_1^2} \cdot \frac{2}{N+1} \cdot \cos \theta \quad (8)$$

STEP 4: Stima del coefficiente di smorzamento per il dispositivo commerciale non-lineare (Figura 3) c_{NL} :

$$c_{NL} = c_L \cdot (0.8 \cdot v_{\max})^{1-\bar{\alpha}} \quad (9)$$

È opportuno prevedere, al fine di non ridurre l'efficacia dell'azione degli smorzatori, una rigidità assiale del dispositivo k_{axial} (smorzatore ed asta di supporto) almeno pari a:

$$k_{axial} \geq 10 \cdot c_L \cdot \omega_1 \quad (10)$$

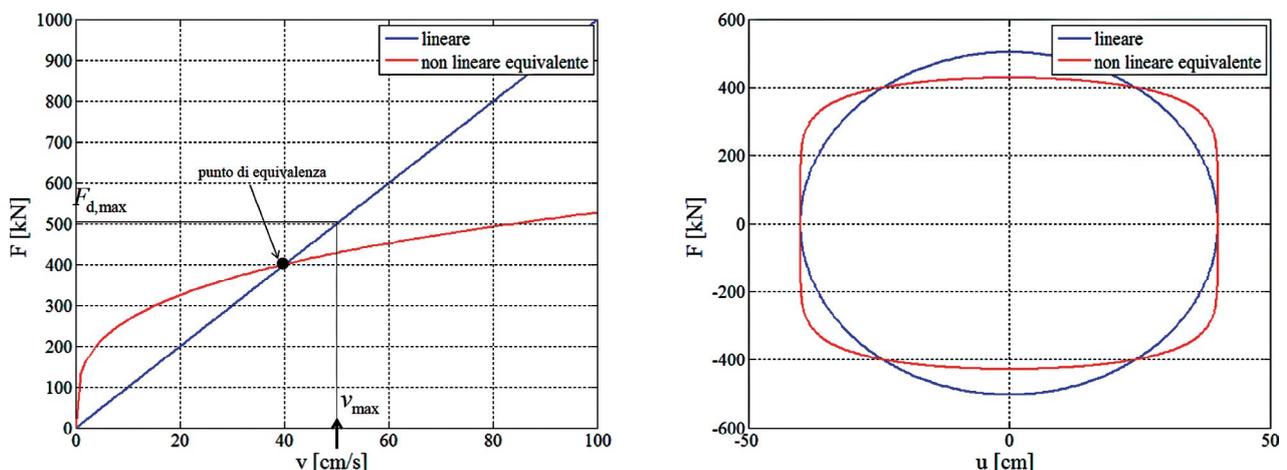


Figura 3 - Legame costitutivo di uno smorzatore lineare e dell'equivalente smorzatore non lineare dimensionato in accordo alla procedura qui presentata.

STEP 5: La stima delle massime sollecitazioni agenti negli elementi strutturali può essere ottenuta tramite involuppo di due analisi statiche equivalenti (Equivalent Static Analysis, ESA1 ed ESA2).

- ESA1: la struttura, priva degli smorzatori, è soggetta ad un sistema di forze statiche equivalenti orizzontali da applicare in corrispondenza dei diversi impalcati (Figura 6b):

$$F_{L,i} = F_h \cdot \frac{z_i \cdot W_i}{\sum_{j=1,2,\dots,N} z_j \cdot W_j}$$

$$F_h = S_e(T_1, \bar{\eta}) \cdot \frac{W}{g}$$
(11)

$F_{L,i}$ indica la forza orizzontale da applicare al piano i -esimo; F_h indica la sommatoria delle forze orizzontali $F_{L,i}$, pari al taglio sismico alla base V_{base} .

È opportuno sottolineare come, formalmente, tale distribuzione di forze coincida con la distribuzione di forze da adottare in accordo alla analisi lineare statica prevista dalle attuali normative tecniche.

- ESA2: la struttura, in cui gli smorzatori sono sostituiti da diagonali rigidi, è soggetta ad una forza statica equivalente orizzontale $F_{D,h,max}$ applicata in corrispondenza dell'ultimo impalcato data da (Figura 7c):

$$F_{D,h,max} = F_{L,max} \cdot \cos \theta = 2 \cdot \bar{\xi} \cdot \frac{W}{g} \cdot \frac{S_e(T_1, \bar{\eta})}{n}$$
(12)

Tale distribuzione di forze risulta equivalente alla risultante delle forze massime trasmesse dagli smorzatori alla struttura, che nel caso particolare in esame (forze massime uguali a tutti i piani) si traduce in una unica forza da applicare in sommità. Lo stato di sollecitazione risultante da tale schematizzazione si riconduce sostanzialmente a sforzi assiali aggiuntivi che vanno a gravare su travi e pilastri (schema di Figura 8).

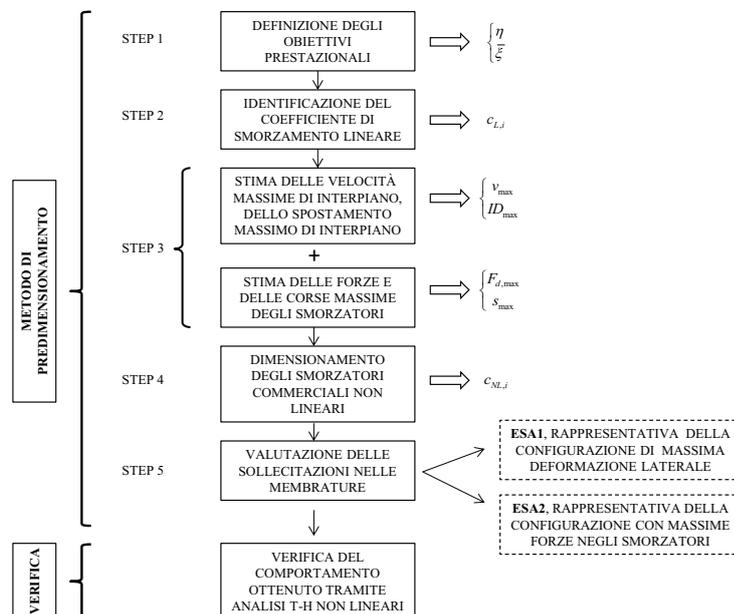
Lo sforzo normale agente nel pilastro al piano i -esimo $P_{i,max}$ è valutato con la seguente espressione:

$$P_{i,max} = (N - i + 1) F_{D,v,max} = (N - i + 1) \cdot 2 \cdot \bar{\xi} \cdot \frac{W}{g} \cdot \frac{S_e(T_1, \bar{\eta})}{n} \cdot \tan \theta$$
(13)

Lo sforzo normale agente alla base della pilastrata P_{base} (al piano terra, $i=1$) è pari a:

$$P_{base} = N \cdot 2 \cdot \bar{\xi} \cdot \frac{W}{g} \cdot \frac{S_e(T_1, \bar{\eta})}{n} \cdot \tan \theta$$
(14)

Figura 4
Flow chart della procedura di dimensionamento ed analisi proposta.



4. Sulle analisi statiche equivalenti ESA1 ed ESA2

Le due analisi statiche equivalenti da sviluppare nello step 5 sono basate su schemi statici idealizzati corrispondenti alle due seguenti configurazioni della struttura smorzata soggetta ad input sismico (Figura 5):

- Configurazione 1 (Figura 6): rappresentativa dell'istante temporale t_1 nel quale la struttura manifesta le massime deformazioni orizzontali. In tale istante temporale, le forze negli smorzatori possono essere assunte, in prima approssimazione, nulle poiché le velocità sono circa nulle.
- Configurazione 2 (Figura 7): rappresentativa dell'istante temporale t_2 nel quale si manifestano le massime forze negli smorzatori. In tale istante temporale, gli spostamenti orizzontali possono essere assunti, in prima approssimazione, nulli.

La presenza di dispositivi di smorzamento determina l'accoppiamento del moto nelle direzioni orizzontale e verticale. Tale fenomeno, pur nella usuale ipotesi di considerare la sola componente orizzontale dell'azione sismica, fa sì che, a causa del posizionamento diagonale di interpiano, gli smorzatori trasferiscano azioni assiali aggiuntive negli elementi strutturali verticali, oltre che ridurre le azioni orizzontali. Tali azioni possono indurre uno stato di sollecitazione non trascurabile (in particolare alla base dei pilastri in alti edifici) la cui valutazione tramite simulazioni numeriche richiede particolari accorgimenti, tra cui l'utilizzo dei vettori di Ritz per l'analisi modale, utilizzando un numero appropriato di modi verticali tali da poter descrivere le effettive deformazioni assiali dei pilastri. A tal proposito si segnala che l'attivazione di una percentuale di massa prossima al 100% in direzione verticale potrebbe non essere sufficiente se non associata ad un numero e ad una forma adeguati di modi verticali per cogliere gli effettivi sforzi assiali nei pilastri.

Nel paragrafo seguente, a titolo esemplificativo, si analizza la risposta dinamica di una semplice struttura costituita da un portale dotato di smorzatore viscoso diagonale (nel seguito indicato come portale "smorzato") al fine di mostrare come sia possibile descriverne la massima risposta sotto input sismico attraverso l'involuppo di due analisi statiche equivalenti.

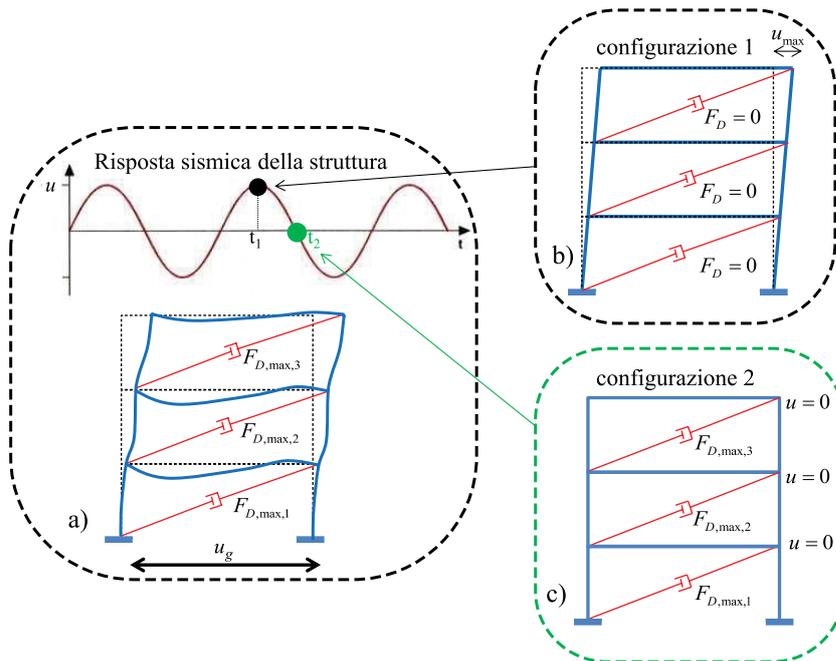


Figura 5
Le due configurazioni (istanti t_1 e t_2) della struttura smorzata sotto sisma.

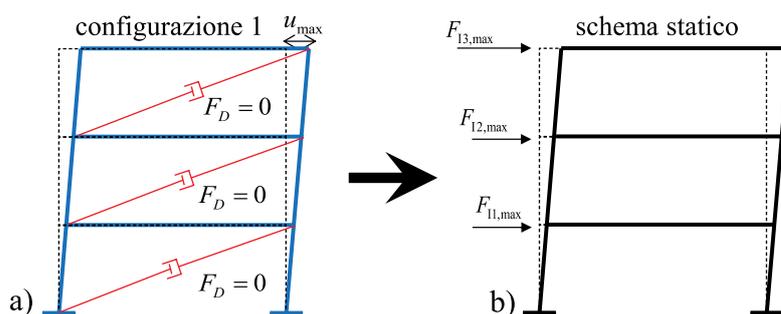


Figura 6:
(a) Configurazione 1. (b) Schema statico rappresentativo della configurazione 1.

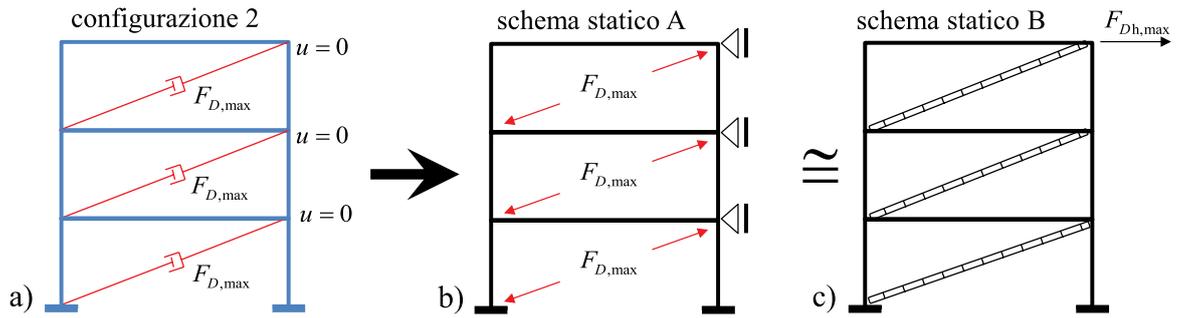
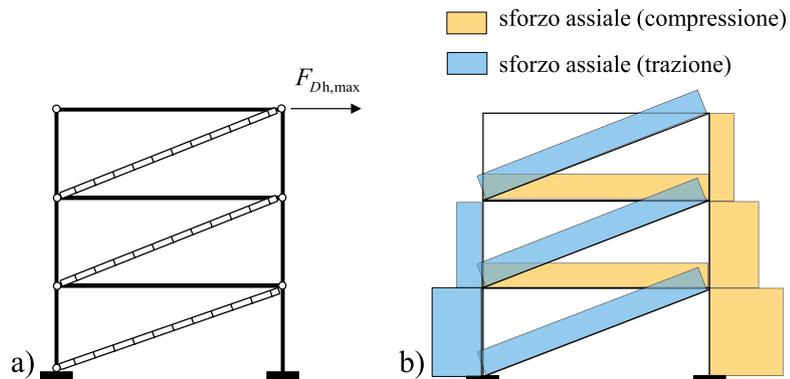


Figura 7
 (a) Configurazione 2.
 (b) Schema statico A rappresentativo della configurazione 2. (c) Schema statico B rappresentativo della configurazione 2 (in alto).

Figura 8
 (a) Il sistema principale associato allo schema statico B di Figura 7. (b) Gli sforzi normali nelle membrature (a destra).



5. La risposta dinamica del portale “smorzato”

Si consideri la struttura di Figura 9 costituita da un telaio ad un piano ed una campata dotato di uno smorzatore viscoso lineare diagonale inclinato di un angolo θ rispetto alla direzione orizzontale e caratterizzato da un coefficiente di smorzamento c . La struttura in esame è soggetta ad una accelerazione sismica impressa alla base $\ddot{u}_g(t)$.

Nell'ipotesi che l'asta diagonale sia assialmente inestensibile e la trave infinitamente rigida flessionalmente rispetto ai pilastri, la struttura in esame si può schematizzare come un sistema a due gradi di libertà (traslazioni orizzontale e verticale della massa agente sulla trave) la cui risposta dinamica è governata dal seguente sistema di equazioni di equilibrio dinamico:

$$\begin{cases} f_{Ih} + f_{Dh} + f_{Sh} = 0 \\ f_{Iv} + f_{Dv} + f_{Sv} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

o, in notazione estesa:

$$\begin{cases} m\ddot{u}_h + c_h\dot{u}_h + c_{hv}\dot{u}_v + k_h u_h = -m\ddot{u}_g(t) \\ m\ddot{u}_v + c_{hv}\dot{u}_h + c_v\dot{u}_v + k_v u_v = 0 \end{cases} \quad (16)$$

I simboli utilizzati nelle equazioni 15 e 16 hanno il seguente significato: f_{Ih} ed f_{Iv} sono le componenti della forza di inerzia lungo le direzioni orizzontale e verticale, $f_{Dh} = f_D \cos\theta$ e $f_{Dv} = f_D \sin\theta$ sono le componenti lungo le direzioni orizzontale e verticale della forza di dissipazione f_D sviluppata dallo smorzatore; f_{Sh} ed f_{Sv} sono le forze di richiamo elastico lungo le direzioni orizzontale e verticale; m è la massa del sistema; k_h e k_v indicano le rigidità traslazionali lungo le direzioni orizzontale e verticale; c è il coefficiente di smorzamento ($c_h = c \cdot \cos^2\theta$, $c_{hv} = c \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta$ e $c_v = c \cdot \sin^2\theta$).

Dalle equazioni del moto, si nota come, in generale, la presenza dello smorzatore inclinato determini l'accoppiamento del moto nelle due direzioni. Tuttavia, dal momento che, nelle strutture tipiche a telaio, la rigidità alla traslazione verticale significativamente maggiore della rigidità alla traslazione orizzontale, è lecito trascurare nella prima equazione del moto il termine legato alla velocità verticale \dot{u}_v . L'equazione di equilibrio dinamico alla traslazione orizzontale coincide quindi, di fatto, con l'equazione del moto di un sistema ad un grado di libertà soggetto ad input sismico:

$$m\ddot{u}_h + c_h\dot{u}_h + k_h u_h = -m\ddot{u}_g(t) \quad (17)$$

Come ben noto in ingegneria sismica, la risposta massima del sistema lungo la direzione orizzontale può essere valutata a partire dall'ordinata dello spettro di risposta elastico delle pseudo-accelerazioni $S_e(T_1, \bar{\eta})$ valutata con riferimento al periodo fondamentale della struttura lungo la direzione orizzontale $T_1 = 2\pi/\omega_h$ ed al rapporto di smorzamento corrispondente al coefficiente di smorzamento $\xi = c_h/(2m\omega_h)$.

$$k_h \cdot u_h = f_{lh, \max} = m \cdot S_e(T_1, \bar{\eta}) \quad (18)$$

Si fa presente che la soluzione dell'equazione (18) consente di valutare le massime azioni interne che si sviluppano nelle membrature nell'istante t_1 di massimo spostamento laterale.

Nell'ipotesi di approssimare la velocità massima \dot{u}_h con l'ordinata dello spettro delle pseudo-velocità S_v (legato all'ordinata dello spettro in accelerazione dalla relazione $S_v = S_e(T_1, \bar{\eta})/\omega_h$), la massima forza di smorzamento esplicita nell'istante t_2 dallo smorzatore può essere stimata come segue:

$$f_{D, \max} = c_h \cdot \frac{S_v}{\cos(\theta)} = 2 \cdot \bar{\xi} \cdot m \cdot \frac{S_e(T_1, \bar{\eta})}{\cos(\theta)} \quad (19)$$

È importante osservare come per stimare la massima forza di smorzamento sia sufficiente conoscere le seguenti quantità: la massa sismica della struttura m , il rapporto di smorzamento equivalente obiettivo $\bar{\xi}$, e l'ordinata dello spettro elastico delle pseudo-accelerazioni $S_e(T_1, \bar{\eta})$ in corrispondenza del periodo proprio della struttura, T_1 , ridotta del fattore $\bar{\eta}$ corrispondente al rapporto di smorzamento obiettivo $\bar{\xi}$. Lungo la direzione verticale si ha:

$$k_v \cdot u_{v, \max} = f_{Dv, \max} = c \cdot \frac{S_e(T_1, \bar{\eta})}{\omega_h} \cdot \tan \theta = 2 \cdot \bar{\xi} \cdot m \cdot S_e(T_1, \bar{\eta}) \cdot \tan \theta \quad (20)$$

Si fa presente che la soluzione dell'equazione (20) consente di valutare le massime azioni interne (sforzi assiali nei pilastri) che si sviluppano per effetto delle forze trasferite dallo smorzatore alle membrature nell'istante t_2 di massima velocità. Tali azioni non vanno dunque sommate alle azioni interne ricavate dalla soluzione dell'equazione (18).

Si è mostrato, pertanto, come la risposta massima del sistema dinamico descritto dal sistema di equazioni accoppiato nelle due direzioni (equazioni (15) e (16)) possa essere valutata come involuppo delle due analisi statiche descritte dalle equazioni (18) e (20) (come schematicamente mostrato in Figura 9).

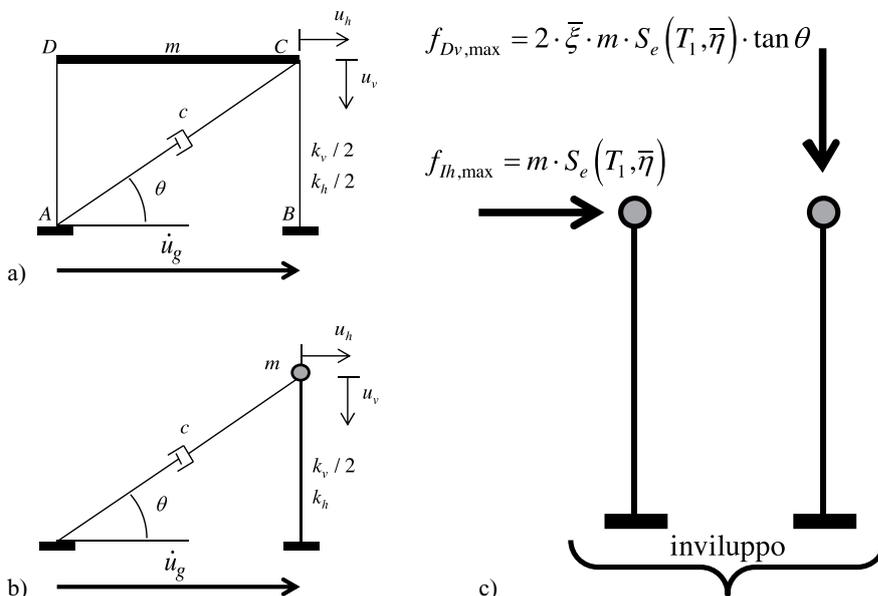


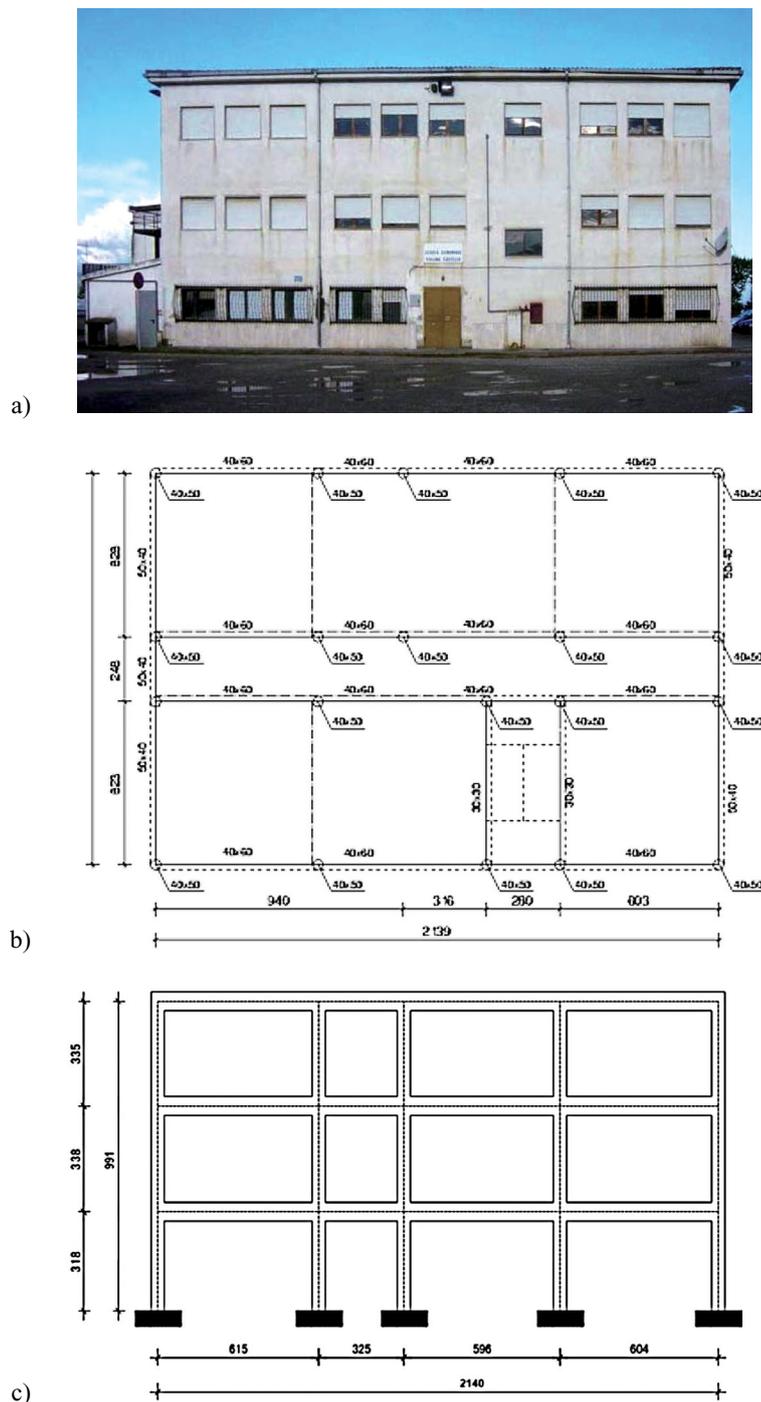
Figura 9
 (a) Il portale "smorzato".
 (b) Il sistema equivalente a due gradi di libertà.
 (c) Le due analisi statiche equivalenti per la stima della massima risposta del sistema.

6. Esempio applicativo

L'esempio applicativo è riferito alla scuola elementare "Collina Castello" di Bisignano (CS), realizzata nel 1983. L'edificio presenta tre piani più la copertura a falde ed è caratterizzato da una pianta rettangolare di dimensioni 21.4 m × 15 m circa. I primi due impalcati, adibiti a scuola (ambiente suscettibile di affollamento), sono a quota + 3.18 m e + 6.56 m. Il terzo impalcato, adibito a sottotetto, è alla quota + 9.91 m. La copertura a falde presenta quota max pari a + 11.97 m. La struttura in calcestruzzo armato è caratterizzata da una maglia abbastanza regolare, costituita da 4 telai principali con 5 pilastri ciascuno disposti lungo la direzione longitudinale. I pilastri hanno dimensioni 50 cm × 40 cm e le travi longitudinali, a tutti i livelli, hanno sezione 40 cm × 60 cm. I telai principali sono collegati da travi di bordo di dimensioni 50 cm × 40 cm disposte in direzione trasversale. La struttura in c.a. non è in grado di sopportare le azioni sismiche di progetto previste dalla normativa tecnica vigente ($a_g = 0.323$ g) con riferimento alle sollecitazioni massime alla base dei pilastri.

Figura 10

- (a) Prospetto.
- (b) Pianta del secondo piano.
- (c) Sezione longitudinale dell'edificio.



Le proprietà meccaniche dei materiali sono riportate di seguito:

- Calcestruzzo (da prove sperimentali):
 - resistenza cubica a compressione media $R_{cm} = 24.6$ MPa
 - modulo di elasticità secante $E_{c,sec} = 25000$ MPa
- Acciaio da armatura (da prove sperimentali):
 - tensione di snervamento media $f_{ym} = 315$ MPa

I carichi agenti sulla struttura sono riportati in Tabella 1.

Tabella 1 - Analisi dei carichi

Carichi	Piano 1	Piano 2	Piano 3 + Copertura
Permanenti G1	3.00 kN/m ²	3.00 kN/m ²	4.00 kN/m ²
Permanenti G2	2.00 kN/m ²	2.00 kN/m ²	3.00 kN/m ²
Variabili Q	3.00 kN/m ² ($\Psi_2 = 0.6$)	3.00 kN/m ² ($\Psi_2 = 0.6$)	2.50 kN/m ² ($\Psi_2 = 0$)
TOTALE in condizioni statiche	8.00 kN/m ²	8.00 kN/m ²	9.50 kN/m ²
TOTALE in condizioni sismiche	6.80 kN/m ²	6.80 kN/m ²	7.00 kN/m ²

Inoltre si è assunto:

- peso pareti di tamponamento: 4.00 kN/m²
- pesi propri elementi strutturali (travi e pilastri in c.c.a.): 25 kN/m³

Il peso totale dell'edificio in condizioni sismiche è pari a $W = 11900$ kN.

I parametri sismici necessari per la valutazione dell'azione sismica di progetto sono riportati in Tabella 2.

Tabella 2 - Parametri sismici di riferimento

Parametri della Struttura	
Classe d'uso:	III
Coefficiente d'uso:	$C_U = 1.5$
Vita Nominale:	VN = 50 anni
Periodo di riferimento per l'azione sismica:	VR = 75 anni
Parametri del Terreno	
Categoria di sottosuolo:	C ($S_s = 1.23$)
Condizione topografica:	T1 ($S_T = 1.0$)
Coefficiente S	$S = 1.23$
Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV)	
Accelerazione orizzontale massima al sito:	$a_g = 0.323$ g
Amplificazione max dello spettro in acc. orizz.:	$F_0 = 2.43$
Periodo TC*:	$T_C^* = 0.385$ s
Periodo di ritorno:	$T_R = 712$ anni

L'obiettivo progettuale è mantenere gli elementi strutturali (pilastri e travi) sostanzialmente in campo elastico lineare, aumentando la capacità dissipativa della struttura mediante l'inserimento di smorzatori viscosi, con posizionamento di interpiano in entrambe le direzioni della struttura.

Il modello FEM tridimensionale della struttura, riportato in Figura 12, presenta 3 piani, in quanto, considerata la tipologia a falde della copertura, il basso valore di altezza di interpiano e la conseguente elevata rigidità dei pilastri tra il piano di sottotetto e la copertura, questi due livelli possono essere considerati insieme nell'analisi sismica.

Al fine di ridurre le sollecitazioni negli elementi strutturali (travi e pilastri) in entrambe le direzioni principali della struttura, si è scelto di predisporre gli smorzatori lungo i quattro lati perimetrali dell'edificio, in modo tale da ottenere una configurazione simmetrica e torsio-rigida (relativamente alle forze degli smorzatori).

Figura 11
Lo spettro elastico in accelerazione di progetto ($\xi=5\%$) (a destra).

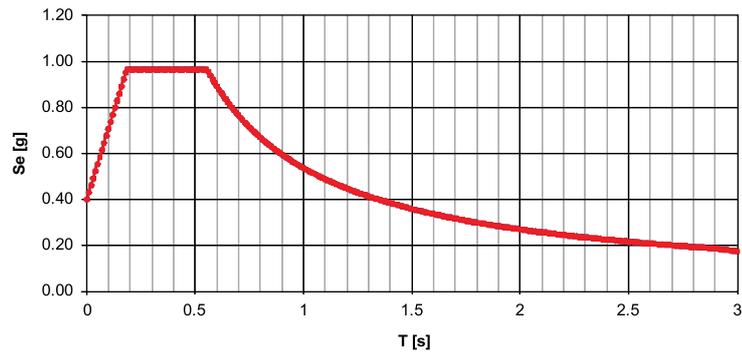
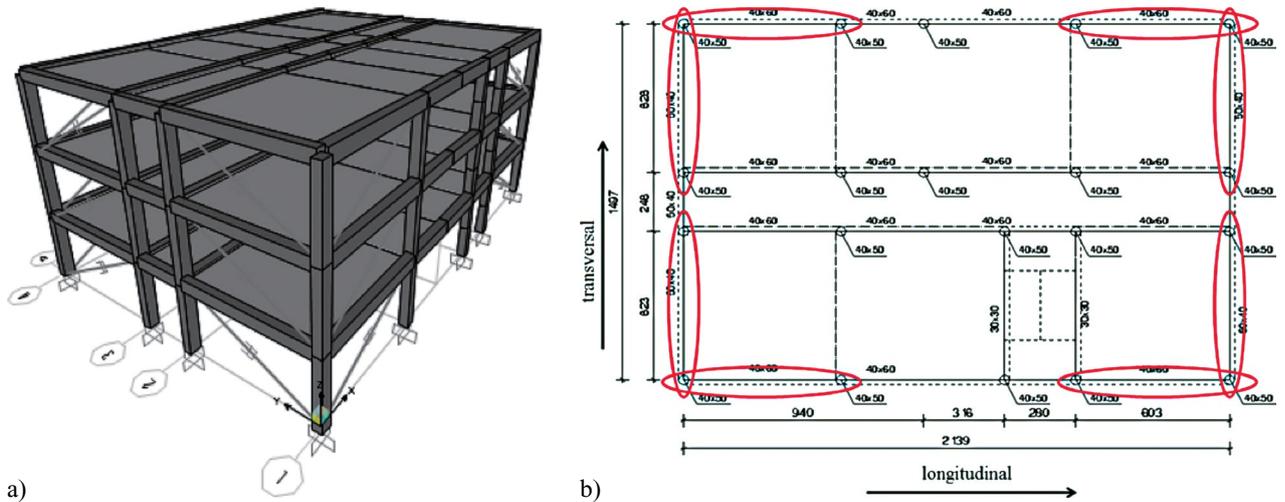


Figura 12
(a) Vista 3D FEM dell'edificio controventato.
(b) Disposizione in pianta degli smorzatori (in basso).



L'assenza di travi nella direzione trasversale fa sì che il primo modo di vibrare (modo fondamentale traslazionale in direzione trasversale) sia caratterizzato da un periodo notevolmente più alto (0.80 s) di quello (0.45 s) del terzo modo (modo fondamentale traslazionale in direzione longitudinale). Il secondo modo, caratterizzato da un periodo pari a 0.52 s, è puramente rotazionale. In virtù della simmetria strutturale, i primi tre modi di vibrare eccitano circa l'85% della massa in entrambe le direzioni. Le deformate dei primi tre modi di vibrare sono mostrate in Figura 13.

Nel seguito vengono esplicitate le calcolazioni necessarie per l'applicazione del metodo semplificato "Direct Five-Step Procedure" al caso studio. Stante la notevole diversità del comportamento dinamico dell'edificio lungo le due direzioni principali, il dimensionamento degli smorzatori deve essere sviluppato in modo indipendente lungo entrambe le direzioni principali. A titolo esemplificativo si illustrano unicamente i calcoli relativi alla direzione longitudinale.

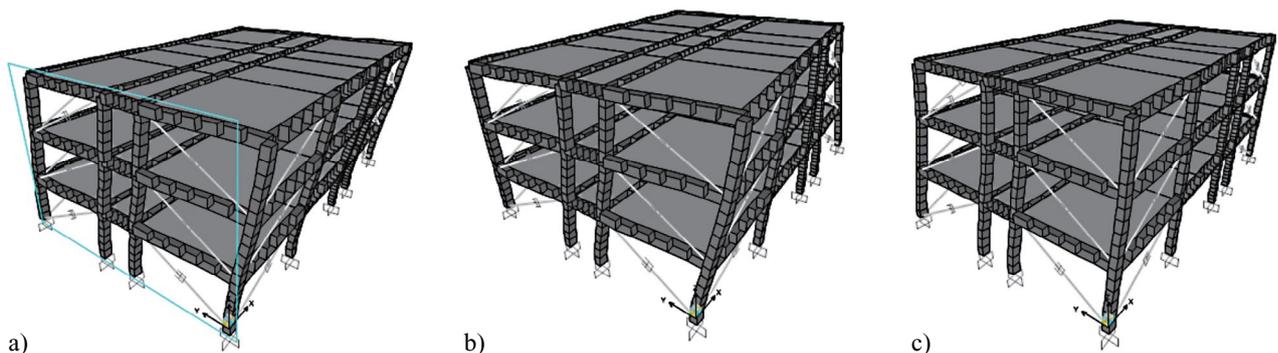


Figura 13 - Deformate dei primi tre modi di vibrare: (a) Modo 1; (b) Modo 2; (c) Modo 3.

STEP 1

Si ipotizza un rapporto di smorzamento di target pari a $\bar{\xi} = 0.30$, cui corrisponde un fattore di riduzione dello spettro elastico pari a

$$\bar{\eta} = \sqrt{\frac{10}{5 + \bar{\xi}}} = \sqrt{\frac{10}{5 + 5 + 30}} = 0.50.$$

Si progettano gli smorzatori facendo riferimento a $T_1 = 0.45\text{s}$ e $S_e(T_1, \bar{\eta}) = 0.512\text{g}$.

STEP 2

Dati di base:

- Posizionamento di interpiano.
- Numero di smorzatori per piano per singola direzione: $n = 4$
- Inclinazione rispetto all'orizzontale dello smorzatore $\theta = 27^\circ$:

Il coefficiente di smorzamento lineare risulta:

$$c_L = \bar{\xi} \cdot \omega_1 \cdot \frac{W}{g} \cdot \left(\frac{N+1}{n} \right) \frac{1}{\cos^2 \theta} = 0.30 \cdot \frac{2\pi}{0.45\text{s}} \cdot \frac{11900 \text{ kN}}{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \cdot \left(\frac{3+1}{4} \right) \cdot \frac{1}{\cos^2 27^\circ} \cong 6400 \frac{\text{kN} \cdot \text{s}}{\text{m}}$$

STEP 3

Stima della velocità massima negli smorzatori lineari:

$$v_{\max} = \frac{S_e(T_1, \bar{\eta})}{\omega_1} \cdot \frac{2}{N+1} \cdot \cos \theta = \frac{0.512 \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\left(\frac{2\pi}{0.45\text{s}} \right)} \cdot \frac{2}{3+1} \cdot \cos \theta \cong 0.16 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Stima della forza massima negli smorzatori lineari:

$$F_{d,\max} = 2 \cdot \bar{\xi} \cdot \frac{W}{g} \cdot \frac{S_e(T_1, \bar{\eta})}{n \cdot \cos \theta} = 2 \cdot 0.30 \cdot \frac{11900 \text{ kN}}{g} \cdot \frac{0.512\text{g}}{4 \cdot \cos 27^\circ} = 1025 \text{ kN}$$

Stima della corsa massima negli smorzatori lineari:

$$s_{\max} = \frac{S_e(T_1, \bar{\eta})}{\omega_1^2} \cdot \frac{2}{N+1} \cdot \cos \theta = \frac{\left(0.512 \cdot 981 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} \right)}{\left(\frac{2\pi}{0.45\text{s}} \right)^2} \cdot \frac{2}{3+1} \cdot \cos 27^\circ \cong 1.15 \text{ cm}$$

STEP 4

Esponente dello smorzatore non lineare $\alpha = 0.15$.

Coefficiente di smorzamento non lineare:

$$c_{NL} = c_L \cdot (0.8 \cdot v_{\max})^{1-\alpha} = 6400 \frac{\text{kN} \cdot \text{s}}{\text{m}} \cdot \left(0.8 \cdot 0.16 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^{1-0.15} \cong 1115 \frac{\text{kN} \cdot \text{s}^{0.15}}{\text{m}^{0.15}}$$

Minima rigidezza assiale del dispositivo (smorzatore + asta di supporto):

$$k_{axial} \geq 10 \cdot c_L \cdot \omega_1 = 10 \cdot 6400 \frac{\text{kN} \cdot \text{s}}{\text{m}} \cdot \frac{2\pi}{0.45\text{s}} = 8.93 \cdot 10^5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Stima della forza massima negli smorzatori non-lineari:

$$F_{NL,max} = 0.8^{1-\alpha} \cdot F_{L,max} = 0.8^{1-0.15} \cdot 1025 \text{ kN} \cong 848 \text{ kN}$$

STEP 5

L'analisi statica equivalente (ESA1) è sviluppata con riferimento alle seguenti forze di piano:

$$F_1 = F_h \cdot \frac{z_1 \cdot W_1}{\sum_{j=1,2,\dots,N} z_j \cdot W_j} = 6090 \text{ kN} \cdot \frac{3.18 \text{ m} \cdot 3928 \text{ kN}}{(3.18 \text{ m} \cdot 3928 \text{ kN} + 6.56 \text{ m} \cdot 3928 \text{ kN} + 9.91 \text{ m} \cdot 4044 \text{ kN})} \cong 6090 \text{ kN} \cdot 0.16 = 975 \text{ kN}$$

$$F_2 = F_h \cdot \frac{z_2 \cdot W_2}{\sum_{j=1,2,\dots,N} z_j \cdot W_j} = 6090 \text{ kN} \cdot \frac{6.56 \text{ m} \cdot 3928 \text{ kN}}{(3.18 \text{ m} \cdot 3928 \text{ kN} + 6.56 \text{ m} \cdot 3928 \text{ kN} + 9.91 \text{ m} \cdot 4044 \text{ kN})} \cong 6090 \text{ kN} \cdot 0.33 = 2016 \text{ kN}$$

$$F_3 = F_h \cdot \frac{z_3 \cdot W_3}{\sum_{j=1,2,\dots,N} z_j \cdot W_j} = 6090 \text{ kN} \cdot \frac{9.91 \text{ m} \cdot 4044 \text{ kN}}{(3.18 \text{ m} \cdot 3928 \text{ kN} + 6.56 \text{ m} \cdot 3928 \text{ kN} + 9.91 \text{ m} \cdot 4044 \text{ kN})} \cong 6090 \text{ kN} \cdot 0.51 = 3116 \text{ kN}$$

con

$$F_h = S_e(T_1, \bar{\eta}) \cdot \frac{W}{g} = 0.512g \cdot \frac{11900 \text{ kN}}{g} \cong 6090 \text{ kN}$$

Assumendo impalcati infinitamente rigidi nel proprio piano e tenendo conto che i quattro telai longitudinali sono uguali tra loro, le forze di piano si distribuiscono ugualmente sui 4 telai. Con riferimento ad un singolo telaio longitudinale, lo schema statico da risolvere è riportato in Figura (14a).

L'analisi statica equivalente (ESA2) è sviluppata con riferimento alla forza statica equivalente:

$$F_{D,h,max} = 2 \cdot \bar{\xi} \cdot \frac{W}{g} \cdot \frac{S_e(T_1, \bar{\eta})}{n} = 2 \cdot 0.30 \cdot \frac{11900 \text{ kN}}{g} \cdot \frac{0.512g}{4} = 910 \text{ kN}$$

Con riferimento ad uno dei due telai di bordo, lo schema statico da risolvere è riportato in Figura (14b), in cui gli smorzatori sono sostituiti da diagonali rigidi.

Stima dello sforzo normale agente alla base della pilastrate B e D:

$$P_{base} = N \cdot 2 \cdot \bar{\xi} \cdot \frac{W}{g} \cdot \frac{S_e(T_1, \bar{\eta})}{n} \cdot \tan \theta = 3 \cdot 2 \cdot 0.30 \cdot \frac{11900 \text{ kN}}{g} \cdot \frac{0.512g}{4} \cdot \tan 27^\circ = 1392 \text{ kN}$$

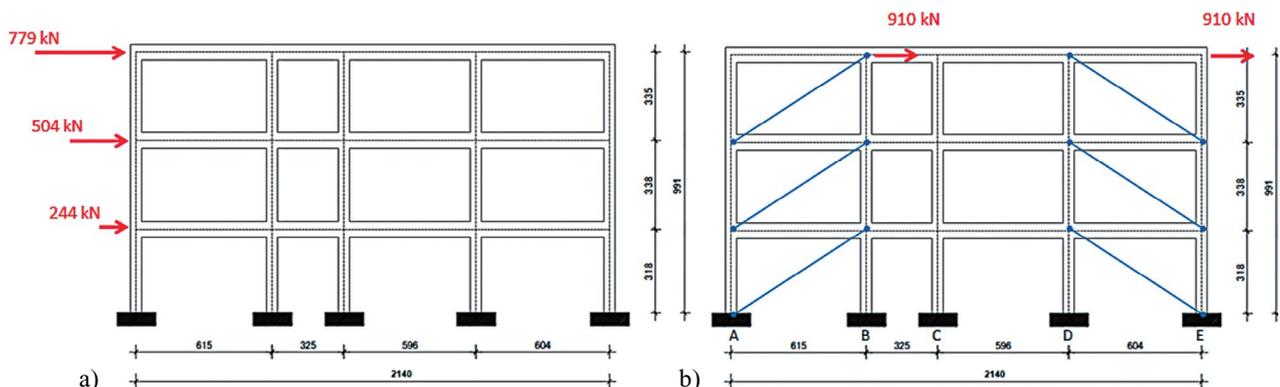


Figura 14 - (a) Analisi statica equivalente ESA1. (b) Analisi statica equivalente ESA2.

Si intende che, successivamente al predimensionamento di smorzatori viscosi ed elementi strutturali, al fine di verificare le effettive prestazioni sismiche ottenute e di apportare gli aggiustamenti del caso, si consiglia di eseguire opportuna verifica del comportamento sismico della struttura mediante analisi numeriche dinamiche non-lineari di tipo time-history da svilupparsi con accelerogrammi spettro-compatibili.

7. Conclusioni

Le attuali normative tecniche per le costruzioni (D.M. 14/01/2008) non contengono indicazioni specifiche per il dimensionamento e l'analisi strutturale di edifici dotati di sistemi di dissipazione. Pertanto, ad oggi, la progettazione di tali strutture è condotta unicamente attraverso lo sviluppo di modelli numerici agli elementi finiti e di simulazioni numeriche dinamiche di tipo time-history non lineari con un set di accelerogrammi spettro-compatibili. Tale approccio progettuale richiede tuttavia un rilevante onere computazionale ed una notevole esperienza nella modellazione dei dispositivi di dissipazione e nelle analisi non lineari, che non rientrano nelle usuali competenze del progettista strutturale.

Il metodo semplificato di progetto proposto nella presente memoria "Direct Five-Step Procedure" consente di effettuare il dimensionamento di massima e l'analisi strutturale preliminare di strutture a telaio equipaggiate con smorzatori viscosi senza l'ausilio di analisi numeriche di tipo time-history. Tale metodo rappresenta il frutto di anni di studi e ricerche condotte presso l'Università di Bologna.

L'applicazione di tale metodo consente, oltre che un pre-dimensionamento della taglia degli smorzatori ed una stima delle massime sollecitazioni indotte nelle membrature, anche la comprensione del funzionamento strutturale di edifici equipaggiati con smorzatori viscosi e soggetti all'azione sismica. Pertanto, il metodo proposto appare congruo sia come metodo di analisi strutturale (analisi statica equivalente) per strutture dalla configurazione geometrica semplice e regolare, sia come metodo di controllo per la valutazione dei risultati di simulazioni numeriche di tipo time-history, tipicamente adottato per strutture più complesse.

8. Ringraziamenti

Parte del presente lavoro è stato sviluppato nell'ambito del progetto di ricerca DPC-RELUIS 2014–2018 Linea PR6: "Isolamento e dissipazione".

Bibliografia

- Bommer J.J., Elnashai A.S., Weir A.G. (2000) - Compatible acceleration and displacement spectra for seismic design codes, Proc. of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand.
- Christopoulos C., Filiatrault A. (2006) - Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation, IUSS Press, Pavia, Italy, 2006.
- Lopez Garcia D. (2001) - A simple method for the design of optimal damper configurations in MDOF structures. *Earthquake Spectra*, 17 (3), 387-398.
- Palermo M., Silvestri S., Landi L., Gasparini G., Trombetti T. (2016) - Peak velocities estimation for a direct five-step design procedure of inter-storey viscous dampers - *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(2), 599-619.
- Pozzati P. (1977) - Teoria e tecnica delle strutture - UTET, 1977, Vol. I Cap. VI.
- Ramirez O.C., Constantinou M.C., Kircher C.A., Whittaker A.S., Johnson M.W., Gomez J.D., Chrysostomou C.Z. (2000) - Development and Evaluation of Simplified Procedures for Analysis and Design of Buildings with Passive Energy Dissipation Systems. MCEER-00-0010. Buffalo, N.Y, Technical report.
- 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.
- Silvestri S., Trombetti T. (2007) - Physical and numerical approaches for the optimal insertion of seismic viscous dampers in shear-type structures, *Journal of Earthquake Engineering*, 11(5) 787-828.
- Takewaki I. (1997) - Optimal damper placement for minimum transfer functions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 26, 1113-1124.
- Takewaki I. (2000) - Optimal damper placement for critical excitation, *Probabilistic Engineering Mechanics* 15, 317-325.
- Takewaki I. (2009) - Building Control with Passive Dampers: Optimal Performance-based Design for Earthquakes. John Wiley & Sons (Asia), Singapore.
- Trombetti T., Silvestri S. (2004) - Added viscous dampers in shear-type structures: the effectiveness of mass proportional damping, *Journal of Earthquake Engineering*, 8 (2), 275-313.
- Trombetti T., Silvestri S. (2006) - On the modal damping ratios of shear-type structures equipped with Rayleigh damping systems, *Journal of Sound and Vibration*, 292(2), 21-58.
- Trombetti T., Silvestri S. (2007) - Novel schemes for inserting seismic dampers in shear-type systems based upon the mass proportional component of the Rayleigh damping matrix, *Journal of Sound and Vibration*, 302(3), 486-526.
- Vanmarcke E.H., Cornell C.A., Gasparini D.A., Hou S. (1990) - SIMQKE-I: Simulation of Earthquake Ground Motions, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, Modified: T.F. Blake, Newbury Park, California.
- NTC08 - "Norme tecniche per le costruzioni" D.M. 14 Gennaio 2008. Roma.

Gli Autori

Stefano Silvestri

Stefano Silvestri è professore associato di Tecnica delle Costruzioni presso il Dipartimento DICAM, Scuola di Ingegneria ed Architettura, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna. È titolare dei corsi “Progetto di Ponti M” nel CdS Magistrale in Ingegneria Civile, “Advanced Design of Structures” (modulo 2: strutture in acciaio, in c.a.p. e miste) nel CdS Magistrale Internazionale in Civil Engineering, ed “Elementi di Tecnica delle Costruzioni T” nel CdS in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio. Dal 2000 svolge attività di ricerca scientifica nell'ambito dell'ingegneria strutturale, con specifico riferimento a nuove metodologie per la progettazione sismica delle strutture civili: smorzatori viscosi ed isteretici, fenomeni torsionali di strutture eccentriche in pianta, risposta sismica di silos, strutture a pannelli portanti, progettazione ed esecuzione di prove su tavola vibrante, edifici storico-monumentali. È autore di oltre 200 pubblicazioni scientifiche, tra cui più di 20 su riviste internazionali con peer-review.

Giada Gasparini

Giada Gasparini è nata a Bologna il 16 dicembre 1974. È ricercatore di Tecnica delle Costruzioni (SSD ICAR/09) dal 2008 presso il Dipartimento DICAM, Scuola di Ingegneria ed Architettura, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna. Dal 2009 è titolare dei corsi “Laboratorio di Costruzione dell'Architettura IIA” e “Teoria delle Strutture” nel CdS Magistrale in Architettura. Si è laureata nel luglio 2001 con lode in Ingegneria Civile all'Università di Bologna, dove nel 2005 consegue il titolo di Dottore di Ricerca in “Meccanica delle Strutture”. Dal 2001 svolge attività scientifica nell'ambito dell'ingegneria sismica, con specifico riferimento ai seguenti temi di ricerca: (1) analisi dei fenomeni torsionali indotti dall'azione sismica, (2) inserimento di smorzatori viscosi nelle strutture, (3) valutazioni di affidabilità strutturale. È autore di oltre 180 pubblicazioni scientifiche, tra cui più di 15 su riviste internazionali con peer-review.

Tomaso Trombetti

Tomaso Trombetti, nel 1991 si laurea in ingegneria con lode presso Università degli studi di Bologna. Nel 1996 consegue un Master in Ingegneria Civile presso la Rice University di Houston (Texas) e nell'anno successivo il titolo di Ph.D., sempre presso la stessa università. Dal 2005 è professore associato di “Tecnica delle Costruzioni” presso il Dipartimento DICAM della Università di Bologna. La sua attività scientifica è dedicata prevalentemente alla progettazione sismica delle strutture con particolare riferimento alle metodologie innovative per la protezione sismica degli edifici. È autore di più di 400 articoli pubblicati sia su riviste internazionali e nazionali che negli atti di Convegni specialistici. Nel 2004 è stato Visiting Research Scientist presso il dipartimento di ingegneria Strutturale della Università della California a San Diego. Attualmente coordina, fra gli altri, un progetto Smart Cities (finanziato dal MIUR) ed un progetto Made in Italy (finanziato dal MSE), tutti inerenti l'ingegneria sismica. Fa parte del Comitato Scientifico per la conservazione del Duomo di Modena e del Comitato Tecnico Scientifico dedicato alla riduzione de rischio sismico per la regione Emilia Romagna. Fa parte della redazione scientifica della rivista di ingegneria sismica “Earthquake and Structures”, è editore associato della rivista “Frontiers - Built environment, sezione Earthquake”.

Michele Palermo

Michele Palermo è assegnista di ricerca presso il Centro Interdipartimentale di Ricerca Industriale su Edilizia e Costruzioni (CIRI) dell'Alma Mater Studiorum - Università di Bologna. Nel 2010 ha svolto una internship di 6 mesi presso la Degenkolb Engineering (Los Angeles, California). Si è laureato (con lode) nel 2010 in Ingegneria Civile all'Università di Bologna. Nel corso del dottorato di ricerca (conseguito nel 2014) è stato visiting researcher presso l'Università di Granada (2010) e presso l'Università di Berkeley, California (2012). Dal 2010 svolge attività di ricerca nell'ambito dell'ingegneria sismica, con specifico riferimento alle seguenti tematiche: (1) effetti torsionali in strutture asimmetriche in pianta; (2) procedure di progettazione per strutture dotate di smorzatori viscosi; (3) strutture a pannelli portanti; (4) strutture a telaio con tamponamenti in muratura; (5) Analisi strutturale e monitoraggio di edifici storico-monumentali. È autore di oltre 80 pubblicazioni scientifiche, tra cui più di 15 su riviste internazionali con peer-review.