



PROTEZIONE SISMICA DELLE STRUTTURE ESISTENTI MEDIANTE CONTROVENTI DISSIPATIVI DI TIPO ISTERETICO

E. Bruschi

Politecnico di Milano
Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente del Costruito
Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano, Italy

Sommario

Questo contributo si propone di fornire indicazioni progettuali per il dimensionamento di dispositivi di dissipazione di energia per l'adeguamento sismico di edifici esistenti a telaio. La prima parte dello studio presenta un inquadramento teorico generale, nel quale sono richiamate le nozioni di base del controllo passivo delle vibrazioni mediante dissipazione di energia, seguito da una presentazione dei principali dispositivi a comportamento non lineare presenti sul mercato. Viene quindi illustrato uno schema progettuale semplice e diretto per il predimensionamento di controventi dissipativi all'interno di edifici a telaio. Lo schema è sviluppato in modo da assistere il progettista nel dimensionamento del sistema di dissipazione di energia al fine di perseguire un livello di prestazione sismica desiderato, in funzione degli stati limite considerati. Viene quindi presentata l'applicazione di tale procedura su due edifici a telaio in calcestruzzo armato, e sono condotte analisi statiche e dinamiche non-lineari volte a confermare la affidabilità del metodo progettuale.

1 CONTROLLO PASSIVO MEDIANTE CONTROVENTI DISSIPATIVI

1.1 Introduzione

L'isolamento alla base e la dissipazione di energia sono due interventi di mitigazione sismica volti alla protezione delle strutture dall'azione dei terremoti [1]. In particolare, l'isolamento alla base consiste nel ridurre l'energia sismica in ingresso separando il movimento della struttura da quello del terreno. L'inserimento di questi dispositivi all'interno di una costruzione genera un aumento del periodo di vibrazione con conseguente riduzione delle accelerazioni e aumento degli spostamenti, come chiaramente mostrato dagli spettri di Figura 1.

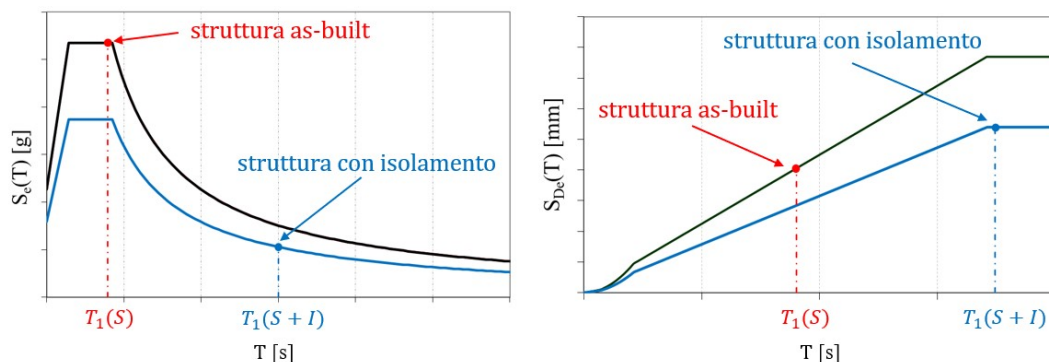


Figura 1: Confronto tra la struttura originale (S) e la struttura sismicamente adeguata con isolamento alla base (S+I): a sinistra, spettro di risposta elastico in accelerazione; a destra, spettro di risposta elastico in spostamento

Tuttavia, tale tecnica non è sempre applicabile e, come riportato anche all'interno della Circolare della Normativa Italiana (NTC 2018 C7.10.1 [2]), non risulta efficace nel caso di strutture molto alte, per le quali gli spostamenti risulterebbero troppo elevati, e strutture erette su terreni soffici, perché gli spettri forniti da normativa per suoli soffici presentano amplificazioni delle ordinate spettrali particolarmente rilevanti per gli alti periodi; pertanto, la riduzione di accelerazione fornita dall'isolamento risulterebbe molto modesta [3], [4]. Inoltre, l'isolamento alla base viene prevalentemente impiegato in strutture di nuova costruzione, mentre si predilige la tecnica della dissipazione di energia per l'adeguamento sismico di strutture esistenti [4]-[6]. Tale tecnica prevede di inserire nella struttura dei dispositivi, denominati appunto dissipatori sismici, capaci di dissipare la maggior parte dell'energia sismica. Questi sistemi vengono solitamente inseriti all'interno di controventi in acciaio; pertanto, l'installazione dei controventi dissipativi comporta, oltre al contributo dissipativo stesso, un irrigidimento della struttura con riduzione del periodo di vibrazione [6], come mostrato in Figura 2. Questo metodo presenta diversi vantaggi intrinseci, tra cui quello di poter essere utilizzato in presenza di qualsiasi tipo di azione dinamica, indipendentemente dal contenuto in frequenze della forzante [2]; inoltre, i dispositivi di dissipazione si prestano bene ad essere installati anche in strutture esistenti, in particolar modo negli edifici intelaiati, negli interventi di adeguamento o di miglioramento sismico della costruzione [3]-[6].

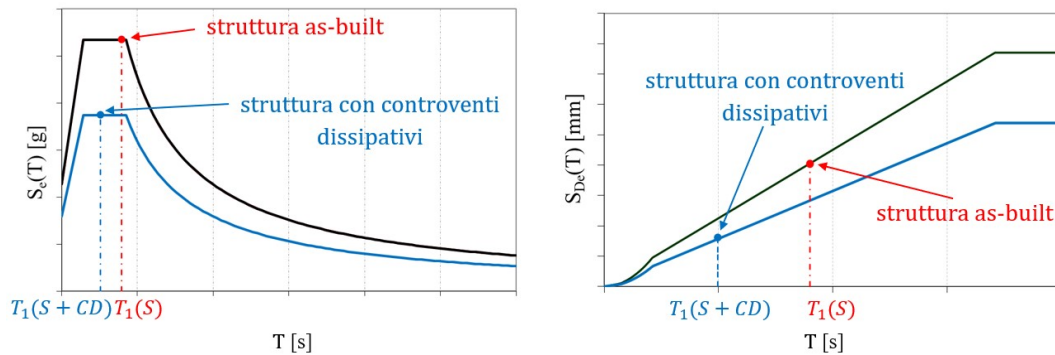


Figura 2: Confronto tra la struttura originale (S) e la struttura sismicamente adeguata con controventi dissipativi (S+CD): a sinistra, spettro di risposta elastico in accelerazione; a destra, spettro di risposta elastico in spostamento

1.2 Dispositivi di dissipazione di tipo isteretico

I dispositivi di dissipazione vengono classificati sulla base del loro principio di funzionamento [3], [4], [6]. In particolare, il Capitolo 11 delle NTC 2018 [8], in accordo alla normativa europea EN 15129 [9], fornisce una classificazione delle tipologie di dispositivi antisismici, in cui sono annoverati i dispositivi di vincolo temporaneo, i dispositivi di isolamento e i dispositivi di dissipazione il cui comportamento dipende o dalla velocità o dallo spostamento. I dispositivi con comportamento dipendente dalla velocità (*Velocity Dependent Devices*) presentano appunto un legame costitutivo in cui la forza dipende esclusivamente dalla velocità, oppure da velocità e spostamento contemporaneamente. Il loro funzionamento è basato sulle forze di reazione generate dal flusso di un fluido viscoso attraverso orifizi o sistemi di valvole. Solitamente questi sistemi hanno un costo più elevato rispetto ai dispositivi con comportamento dipendente dallo spostamento (*Displacement Dependent Devices*), che infatti costituiscono la tipologia di dispositivi maggiormente diffusa per l'adeguamento sismico di edilizia ordinaria, quali ad esempio edifici residenziali, scolastici e capannoni industriali [3]-[7]. I dispositivi dipendenti dallo spostamento sono realizzati con sistemi meccanici piuttosto semplici, composti da materiali poco sensibili alle condizioni ambientali, quali ad esempio la variazione di temperatura o l'umidità, e dall'invecchiamento, e quindi risultano più economici. Questi sistemi dissipano energia sfruttando la plasticizzazione di elementi in metallo (quali ad esempio, acciaio, shape memory alloys, ecc.) di forma opportuna. Si individuano tre principali categorie di dispositivi dipendenti dallo spostamento, che presentano comportamento:

- rigido-plastico: sono i dispositivi di tipo attritivo che quindi dissipano energia tramite l'attrito tra due elementi metallici;
- elasto-plastico: sono i dispositivi di tipo isteretico che dissipano energia attraverso lo snervamento di un metallo;
- ricentrante: a questa categoria appartengono principalmente i dispositivi in leghe a memoria di forma (SMA – Shape Memory Alloys).

I dispositivi di tipo isteretico sono attualmente la categoria di dispositivi maggiormente diffusa per la protezione sismica nell'edilizia ordinaria, specialmente se si fa riferimento ai dissipatori isteretici assiali ad instabilità impedita (*BRB - Buckling Restrained Braces*). In questi sistemi l'elemento deformabile in acciaio dolce è inserito all'interno di un elemento di confinamento che si oppone allo svergolamento, permettendo di avere in tal modo un comportamento pressoché simmetrico a trazione e compressione, come mostrato in Figura 3.

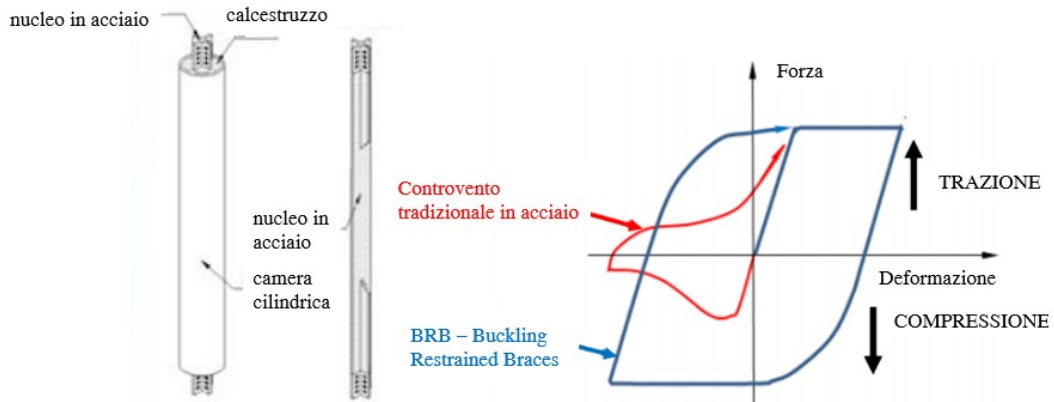


Figura 3: Esempio di BRB e corrispondente ciclo isteretico

Solo nel contesto italiano, vi sono numerosi esempi di applicazioni di questi sistemi sia in edifici di nuova costruzione che per l'adeguamento sismico di strutture esistenti. La Figura 4 mostra l'applicazione di alcuni dispositivi di tipo BRB all'interno del nuovo polo didattico della facoltà di ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche ad Ancona [10], mentre in Figura 5 sono mostrati gli interventi di adeguamento sismico del plesso scolastico Leopardi ad Ancona e della scuola materna Colle dei Frati a Zagarolo (Rimini).



Figura 4: Nuovo polo didattico della facoltà di ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche (Ancona) [10]

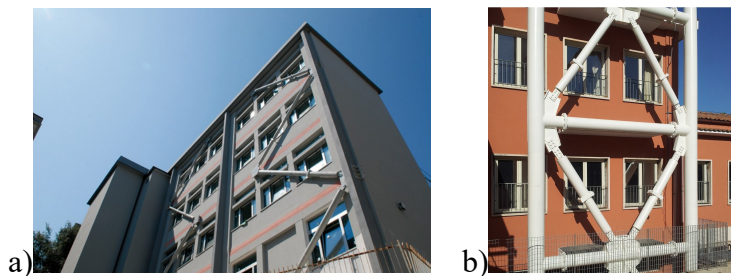


Figura 5: (a) plesso scolastico Leopardi (Ancona); (b) scuola materna Colle dei Frati a Zagarolo (Rimini)

Infine, la Figura 6 mostra il caso di riabilitazione sismica degli stabilimenti Fratelli Carli ad Imperia, in cui dispositivi isteretici e dispositivi fluido-viscosi sono stati inseriti su telai esterni per garantire la funzionalità dell'edificio durante i lavori e per non incidere troppo sulla distribuzione interna degli spazi.



Figura 6: Stabilimenti Fratelli Carli (Imperia)

2 DIMENSIONAMENTO DI CONTROVENTI DISSIPATIVI IN STRUTTURE INTELAIATE

In letteratura sono stati proposti alcuni metodi per la progettazione di interventi di adeguamento sismico in strutture esistenti con controventi dissipativi, come ad esempio [11]-[15]. Tuttavia, la diffusione di questi metodi tra i professionisti appare ancora piuttosto limitata e la progettazione consiste spesso in un processo iterativo in cui si formula una prima ipotesi sulle dimensioni dei dispositivi e sulla loro posizione all'interno dell'edificio e si procede ad affinamenti successivi a seguito di esiti negativi delle verifiche.

In questo paragrafo viene presentata una procedura progettuale di facile applicazione basata sul metodo dello spettro di capacità (*Capacity Spectrum Method*) [16], [17]. Si tratta di una procedura iterativa composta da 5 fasi che possono essere facilmente automatizzate in un semplice foglio di calcolo (come, ad esempio, Excel) e che vengono dettagliate nel presente Capitolo. La procedura è stata automatizzata e resa disponibile al sito <https://aidapp.it/>.

Fase 1: Valutazione della capacità della struttura esistente mediante analisi statica non-lineare

La curva di capacità dell'edificio caso-studio viene valutata in accordo a quanto prescritto dalle NTC 2018 [8]. In particolare, viene condotta una analisi statica non-lineare, che può essere realizzata mediante qualsiasi software commerciale. Per l'analisi vengono utilizzate due distribuzioni di forze orizzontali, come prescritto al §7.3.4.2 delle NTC 2018 [8]: una distribuzione uniforme e proporzionale alla massa di piano e una distribuzione modale ottenuta moltiplicando ciascun componente del primo autovettore per la corrispondente massa di piano, come mostrato in Figura 7. L'analisi statica viene condotta separatamente per le due direzioni principali dell'edificio, applicando ciascuna distribuzione di forze orizzontali nei due versi e selezionando per ogni direzione la curva a resistenza minore.

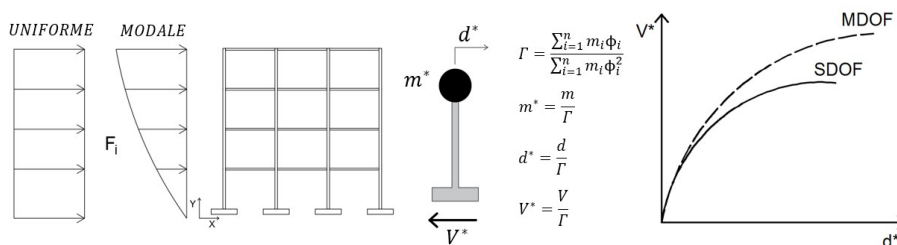


Figura 7: Valutazione della curva di capacità della struttura esistente e conversione nel sistema equivalente ad un grado di libertà

La curva di capacità $V_s - d_s$ della struttura reale (struttura a più gradi di libertà, MDOF) viene convertita nella curva di capacità $V_s^* - d_s^*$ di un sistema equivalente ad un grado di

libertà (SDOF) attraverso il fattore di partecipazione modale Γ definito in accordo al §C7.3.4.2 della Circolare [8], come mostrato in Figura 7.

Fase 2: Selezione del punto di prestazione e costruzione della curva bilineare equivalente

Il punto di prestazione viene definito attraverso la selezione di uno spostamento obiettivo d_p^* per la struttura dotata del sistema di dissipazione. Tale spostamento viene riportato sulla curva di capacità SDOF e la curva bilineare equivalente viene costruita in accordo al Metodo B della Circolare [8] (§C7.3.4.2), mediante una equivalenza energetica. In particolare, la bilineare presenta un primo tratto con pendenza uguale alla rigidezza iniziale della struttura; viene poi identificato il valore della forza $V_{y,s}^*$ e la pendenza del tratto $d_{y,s}^* - d_p^*$ imponendo l'uguaglianza delle aree A_1 e A_2 sottese dalle due curve, come mostrato in Figura 8.

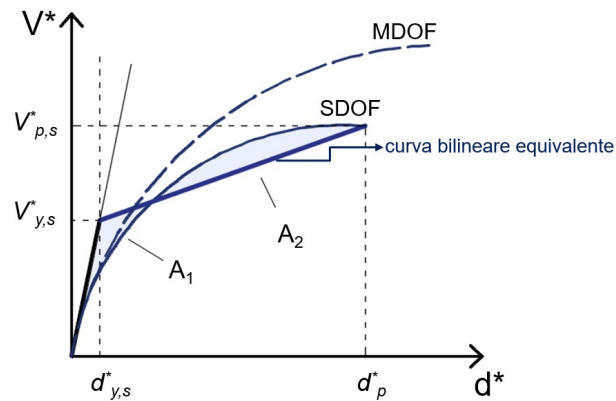


Figura 8: Costruzione della curva bilineare equivalente secondo Metodo B della Circolare [8]

Il sistema bilineare equivalente è quindi caratterizzato da un periodo di vibrazione efficace T_s^* , una rigidezza secante K_s^* e da un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente ζ_s (in %) definiti in accordo alle equazioni (1) - (3) [8].

$$T_s^* = 2\pi\sqrt{(m^* / K_s^*)} \quad (1)$$

$$K_s^* = V_{p,s}^* / d_p^* \quad (2)$$

$$\zeta_s = 5 + \kappa_s \cdot 63.7 \cdot (V_{y,s}^* \cdot d_p^* - V_{p,s}^* \cdot d_{y,s}^*) / (V_{p,s}^* \cdot d_p^*) \quad (3)$$

Il termine 5 (%) che compare nella equazione (3) rappresenta lo smorzamento convenzionale della struttura, mentre il coefficiente κ_s tiene conto della capacità dissipativa della struttura esistente e può essere preso pari a 1.0 per strutture con ottime capacità dissipative, 0.66 per strutture con discrete capacità dissipative e 0.33 per strutture con scarse capacità dissipative [8].

Fase 3: Costruzione dello spettro di domanda

Tutta la procedura viene svolta all'interno del piano ADRS, in cui le accelerazioni spettrali S_e sono rappresentate in funzione degli spostamenti spettrali S_{De} , ottenuti attraverso l'espressione [3.2.10] delle NTC 2018 [8]. Lo spettro di domanda viene confrontato con lo spettro di capacità della struttura esistente ottenuto dividendo le ordinate della curva bilineare equivalente per la massa m^* del sistema equivalente a un grado di libertà. Viene quindi valutato lo spostamento spettrale $d_e^l = S_{De}(T_s^*; \zeta_s)$, come mostrato in Figura 9: se $d_e^l > d_p^*$ la struttura non è in grado di soddisfare l'obiettivo prestazionale e pertanto è necessario procedere alla progettazione del sistema di dissipazione supplementare di energia. L'apice l indica che il valore di spostamento appena calcolato si riferisce alla prima iterazione.

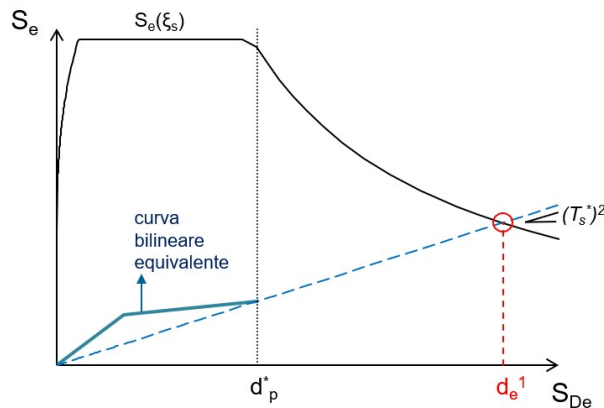


Figura 9: Valutazione dello spostamento spettrale d_e^l nel piano ADRS

È quindi possibile determinare lo smorzamento equivalente ζ_{eff}^l che deve essere fornito all'oscillatore elastico per ridurre il suo spostamento al valore obiettivo d_p^* , mediante l'equazione (4):

$$\zeta_{eff}^l = 10 \cdot (d_e^l / d_p^*)^2 - 5 \quad (4)$$

Fase 4: Valutazione delle proprietà meccaniche del controvento dissipativo equivalente

Dal momento che la presente procedura è finalizzata al dimensionamento di controventi dissipativi di tipo isteretico, è lecito assumere che il comportamento di questi sistemi sia schematizzabile come elastico – perfettamente plastico [13], [18], [19] e che il controvento equivalente possa essere definito in accordo a Figura 10.

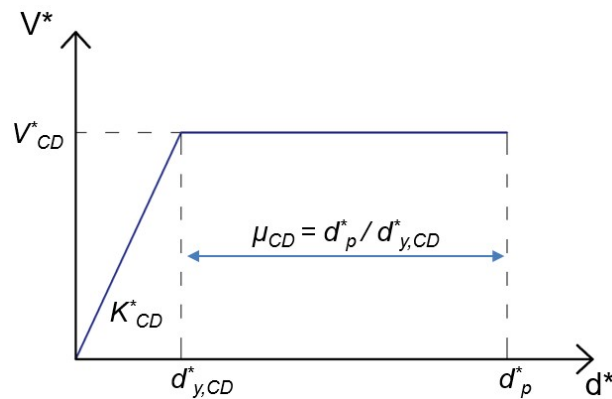


Figura 10: Comportamento elastico-perfettamente plastico del controvento dissipativo equivalente

Le proprietà del controvento dissipativo equivalente vengono determinate in funzione del coefficiente di duttilità μ_{CD} , che viene definito all'inizio della progettazione in funzione del dispositivo di dissipazione selezionato dal progettista. Il coefficiente di smorzamento viscoso del controvento dissipativo risulta quindi pari a $\kappa_{CD} \cdot 63.7 \cdot (\mu_{CD} - 1) / \mu_{CD}$, dove il coefficiente κ_{CD} tiene conto della capacità dissipativa del controvento in funzione della forma effettiva del ciclo isteretico e può essere selezionato sulla base dell'esperienza o di prove sperimentali condotte sul dispositivo in esame.

Attraverso l'equazione (5) di equivalenza energetica, viene quindi valutata la resistenza del controvento dissipativo $V_{CD,1}^*$, in cui l'apice 1 si riferisce alla prima iterazione:

$$\xi_{eff}^i \cdot V_{p,s}^* = \xi_s \cdot V_{p,s}^* + \xi_{CD} \cdot V_{CD,i}^* \quad (5)$$

Si costruisce ora sul piano ADRS la curva di capacità del sistema a un grado di libertà S+CD equivalente alla struttura rinforzata con il controvento dissipativo, il cui spostamento ultimo rimane uguale allo spostamento di progetto d_p^* , mentre il corrispondente valore di resistenza si ottiene sommando alla resistenza della struttura originale in corrispondenza di d_p^* la resistenza del controvento ricavata al passo precedente. Questa nuova curva di capacità (S+CD) viene confrontata con lo spettro di domanda che tiene conto del nuovo coefficiente di smorzamento viscoso equivalente della struttura adeguata (S+CD). Si determina dunque lo spostamento spettrale d_e^2 e lo si confronta con lo spostamento obiettivo d_p^* : se la differenza è sufficientemente piccola (solitamente compresa tra 0.01 e 0.05), la convergenza è raggiunta e si passa alla fase 5; altrimenti, è necessario proseguire con le iterazioni fintanto che non si ottiene una differenza trascurabile tra i due valori. La Figura 11 mostra uno schema del processo iterativo e le equazioni che devono essere applicate per determinare ad ogni iterazione i le proprietà del sistema ad un grado di libertà S+CD equivalente alla struttura rinforzata.

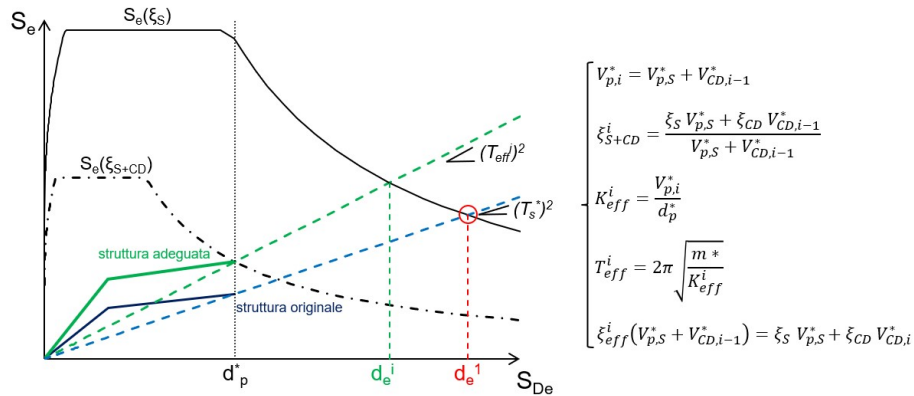


Figura 11: Rappresentazione grafica della procedura per il dimensionamento meccanico del controvento dissipativo equivalente

Fase 5: Calcolo delle proprietà dei singoli controventi ai piani

Nell'ultimo step della procedura vengono calcolate le proprietà dei singoli controventi dissipativi ai piani utilizzando un criterio di proporzionalità rispetto alla deformazione del modo principale della struttura originale [11], [12]. La Figura 12 mostra come vengono determinate la resistenza $N_{CD,i,s}$ e la rigidezza $K_{CD,i,s}$ del singolo controvento dissipativo installato all' i -esimo piano, dove $n_{d,i}$ è il numero totale di controventi dissipativi al piano.

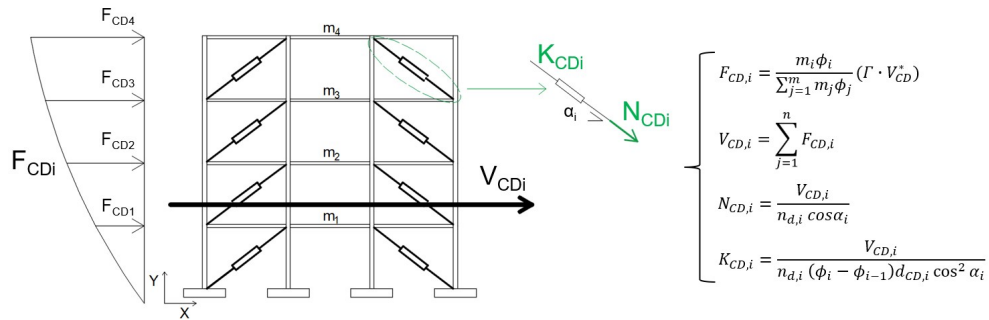


Figura 12: Schematizzazione grafica della procedura per il calcolo delle proprietà dei singoli controventi ai piani

3 APPLICAZIONE DELLA PROCEDURA PROGETTUALE A DUE EDIFICI ESISTENTI IN CA

3.1 Edifici caso studio

Le strutture scelte come caso studio sono due palazzine residenziali di 3 e 6 piani in CA progettate in conformità alle prescrizioni della normativa italiana NTC 2018 [8] nel comune di Pordenone, caratterizzato da una $PGA = 1.91 \text{ m/s}^2$ e suolo tipo B [20]. La Figura 13 mostra la pianta dell'edificio, mentre la Figura 14 mostra la vista in elevazione. Si rimanda alla pubblicazione di Faleschini et al. [20] per i dettagli relativi all'armatura longitudinale e trasversale di travi e pilastri.

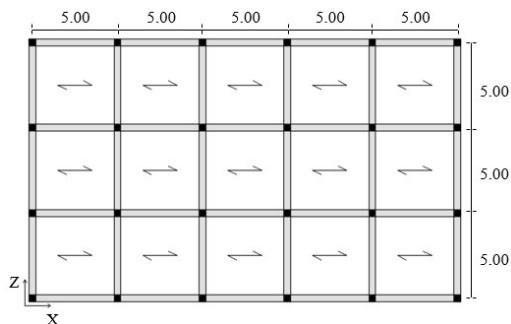


Figura 13: Pianta strutturale degli edifici caso studio (unità di misura: metri)

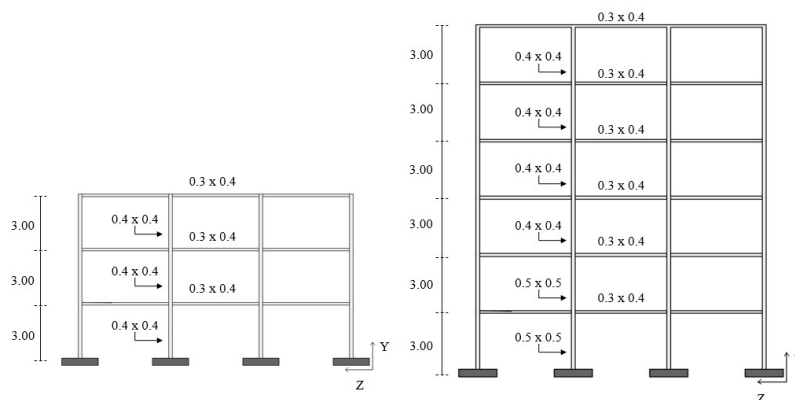


Figura 14: Sezione verticale degli edifici caso studio (unità di misura: metri)

I carichi permanenti strutturali g agenti su ciascun piano sono pari a 2.95 kN/m^2 , mentre il carico g associato al solaio di copertura è di 1.35 kN/m^2 . La struttura è a destinazione d'uso residenziale, pertanto in accordo alle NTC 2018 [8], viene assunto un carico variabile q pari a 2 kN/m^2 .

3.2 Progettazione dell'intervento di adeguamento sismico

È stato progettato un intervento di adeguamento sismico per lo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) considerando una PGA di 2.94 m/s^2 , corrispondente al sito di Benevento (Long 14.787° , Lat 41.1305°), suolo tipo B e categoria topografica T_1 , classe d'uso $cu = II$ e vita nominale $V_n = 50$ anni. È stata impiegata una distribuzione diagonale dei controventi, come mostrato in Figura 15, con quattro controventi per piano lungo ciascuna delle due direzioni principali dell'edificio.

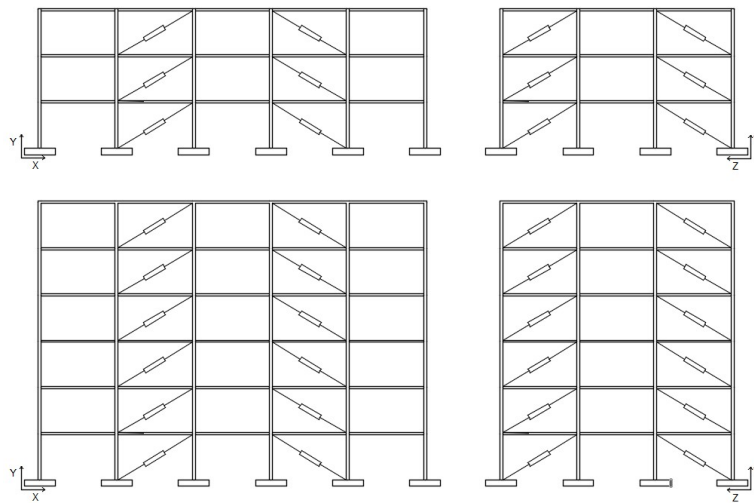


Figura 15: Distribuzione dei controventi dissipativi negli edifici caso studio

La progettazione dell'intervento di adeguamento con controventi dissipativi di tipo isteretico è stata realizzata selezionando per entrambe le strutture un punto di prestazione d_p corrispondente allo spostamento limite del ramo elastico della curva di capacità della struttura in esame, in accordo a quanto fatto nello studio [19]. Questa scelta garantisce che le strutture siano accessibili e funzionanti immediatamente dopo un terremoto di progetto allo SLV, dal momento che la resistenza e la rigidezza degli elementi strutturali non risultano compromesse. Per motivi di brevità, in Figura 16 si riportano solo le curve di capacità SDOF delle strutture as-built lungo la direzione X e lo spostamento target selezionato per l'intervento di adeguamento. Le analisi statiche non-lineari condotte per valutare le curve di capacità dei due casi studio sono state realizzate mediante il software OpenSees [21]; i dettagli relativi alla modellazione sono riportati all'interno delle pubblicazioni [18], [19], [22].

In questo studio sono stati assunti dispositivi caratterizzati da una duttilità μ_D pari a 4 e 10 che sono valori tipici per dispositivi di tipo isteretico [19]. La duttilità μ_{CD} associata al sistema controvento + dissipatore è legata alla duttilità μ_D dalla relazione (6):

$$\mu_D = (1 + k_D/k_C) \cdot [\mu_{CD} - 1 / (k_C/k_D + 1)] \quad (6)$$

in cui k_C/k_D rappresenta il rapporto tra la rigidezza associata al controvento in acciaio e la rigidezza associata al dispositivo. In questo studio, k_C/k_D è assunto pari a 2, in conformità a

quanto fatto in altri studi [13], al fine di garantire che la maggior parte della deformazione di piano sia concentrata nel dispositivo, massimizzando così l'energia dissipata [22].

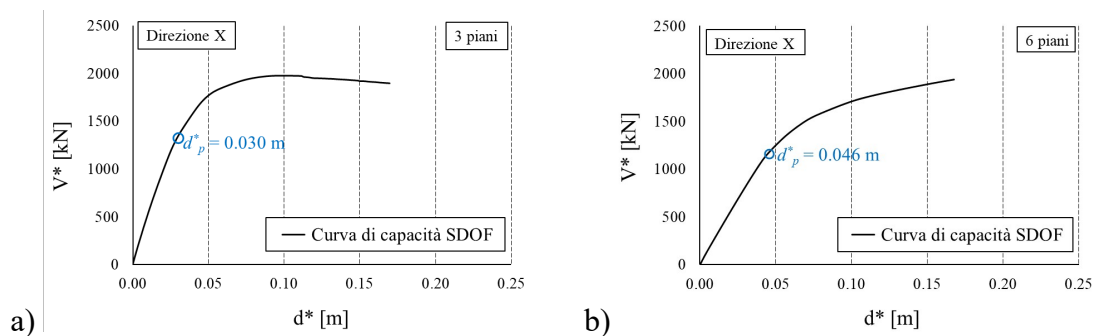


Figura 16: Curva di capacità SDOF in direzione X della struttura as-built 3 piani (a) e 6 piani (b) con indicazione del punto di prestazione d_p^*

3.3 Input sismico

Sono state condotte analisi time-history bidirezionali seguendo le indicazioni riportate al §3.2.3.6 delle NTC 2018 [8], considerando terremoti naturali selezionati a partire dal database europeo (European Ground Motion Database [23]) mediante il programma REXEL [24].

Questi input sismici sono stati selezionati e scalati in modo tale che i relativi spettri di risposta approssimino lo spettro di risposta elastico con 5% di smorzamento viscoso equivalente nell'intervallo di periodi compreso tra 0.15 secondi e 2 secondi. Inoltre, l'ordinata spettrale media presenta uno scarto in difetto non superiore al 10% e uno scarto in eccesso non superiore al 30% rispetto alla componente dello spettro elastico nel medesimo intervallo di periodi di interesse.

In accordo alle NTC 2018 [8], è stato selezionato lo stato limite di salvaguardia della vita SLV associato ad una struttura con classe d'uso cu II, vita nominale V_n di 50 anni, ubicata a Benevento, suolo tipo B e categoria topografica T_1 . Questi eventi sono caratterizzati da una magnitudo M_w compresa nell'intervallo 5-7 e presentano una distanza epicentrale R_{ep} inclusa nel range 0-30 km. Ulteriori dettagli relativi agli input sismici selezionati sono riportati in Figura 17.

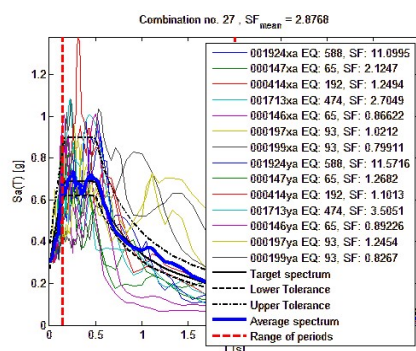


Figura 17: Spettri relativi ai terremoti selezionati per lo SLV

3.4 Risultati analisi non lineari

L'efficacia dell'intervento di retrofit è stata verificata mediante analisi statica non-lineare conforme al §7.3.4.2 delle NTC 2018 [8] nei confronti dello stato limite SLV, sul modello dell'edificio adeguato sismicamente mediante l'inserimento di controventi dotati di dispositivi di dissipazione caratterizzati da $\mu_D = 4$ e $\mu_D = 10$. Le curve di capacità delle strutture sismicamente adeguate sono state plottate sul piano ADRS e sono state confrontate con lo spettro di domanda. La Figura 18 illustra il confronto nel piano ADRS tra le capacità dei sistemi equivalenti a un grado di libertà lungo la direzione X e la domanda: per entrambi gli edifici la progettazione del sistema di controventi dissipativi risulta appropriata e la struttura controventata rispetta il requisito prestazionale formulato in termini di spostamento obiettivo. Simili risultati sono stati ottenuti anche in direzione Z, ma per brevità non vengono riportati nel presente articolo.

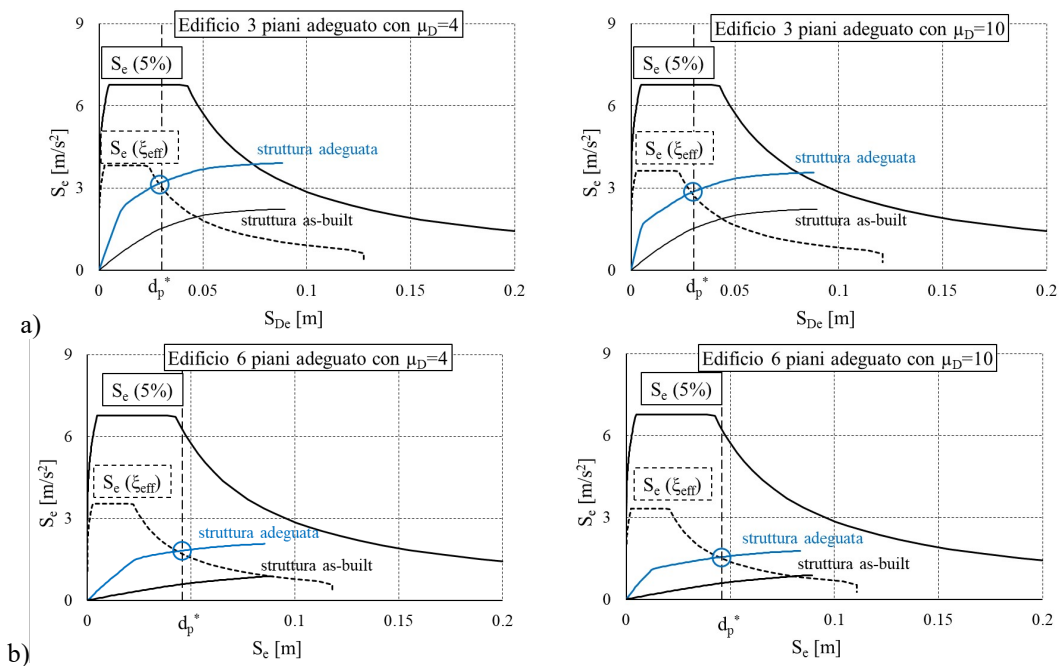


Figura 18: Verifica degli edifici adeguati in direzione X mediante confronto tra domanda e capacità nel piano ADRS

La validazione del metodo progettuale è stata condotta anche mediante analisi time-history, utilizzando sette accelerogrammi bidirezionali generati in accordo al §3.2.3.6 delle NTC 2018 [8], come descritto al paragrafo 3.3 del presente contributo. La Figura 19 mostra i risultati in termini di massimi spostamenti di piano delle strutture adeguate in direzione X. La procedura di dimensionamento dei controventi dissipativi risulta efficace per entrambi gli edifici in quanto permette di garantire uno spostamento all'ultimo piano, assunto come punto di controllo, sempre minore o al più uguale al valore d_p adottato come obiettivo per l'intervento di adeguamento. Si nota inoltre che, come atteso, gli edifici adeguati con dispositivi a maggiore duttilità ($\mu_D = 10$) presentano a tutti i piani spostamenti inferiori rispetto agli edifici adeguati con dispositivi a minore duttilità ($\mu_D = 4$), proprio grazie al maggior contributo dissipativo fornito.

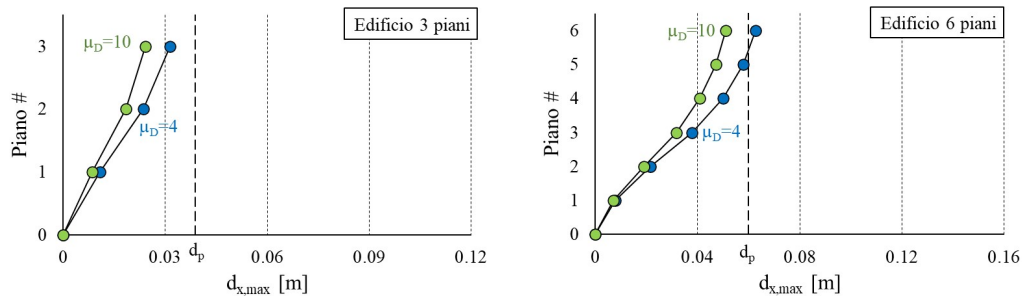


Figura 19: Massimi spostamenti ai piani degli edifici adeguati in direzione X

È interessante anche confrontare i risultati delle analisi non-lineari statiche e dinamiche: in Figura 20 il punto di prestazione (indicato con un quadrato blu) definito attraverso le analisi dinamiche e avente come coordinate in ascissa la media dei valori massimi di spostamento del punto di controllo e in ordinata la media dei valori massimi di taglio alla base viene confrontato con le curve di capacità della struttura originale e della struttura adeguata con dispositivi con duttilità $\mu_D = 10$. Il punto di prestazione si trova sulla curva di capacità ottenuta dalla analisi statica, confermando quindi un sostanziale accordo tra le due tipologie di analisi. Risultati simili sono stati ottenuti anche nel caso di adeguamento con dispositivi con duttilità $\mu_D = 4$ ma i relativi grafici non sono stati riportati per brevità.

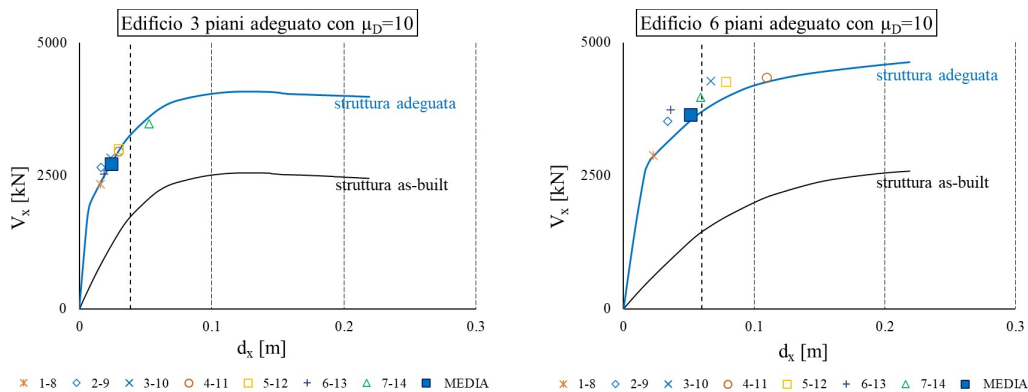


Figura 20: Confronto tra i risultati delle analisi statiche non-lineari e delle analisi dinamiche non-lineari

4 CONCLUSIONI

La dissipazione supplementare di energia è una tecnica di mitigazione sismica che trova applicazione sia per la protezione di nuovi edifici che per l'adeguamento o il miglioramento sismico di costruzioni esistenti. I dispositivi a comportamento dipendente dallo spostamento, che sono stati trattati in questo contributo, sono elementi semplici, affidabili ed economici, e rappresentano la tipologia preferenziale in caso di edilizia ordinaria.

È stata quindi presentata una metodologia progettuale per il dimensionamento meccanico di controventi dissipativi realizzati con dispositivi a comportamento dipendente dallo spostamento di tipo isteretico. Si tratta di una procedura iterativa di facile applicazione, che può essere automatizzata in un semplice foglio di calcolo (come ad esempio Excel). La procedura è stata automatizzata e resa disponibile al sito <https://aidapp.it/>.

Questa procedura è stata applicata a due edifici di bassa e media altezza, regolari in pianta e in elevazione. L'adeguamento sismico è stato progettato mediante l'inserimento di

controventi dotati di dispositivi di dissipazione caratterizzati da duttilità $\mu_D = 4$ e $\mu_D = 10$. I risultati delle analisi statiche e dinamiche non-lineari hanno dimostrato l'efficacia e l'affidabilità della procedura proposta.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Christopoulos, A. Filiatrault - Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation - 1st ed. IUSS Press: Pavia, 2006.
- [2] CSLLPP (Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici). Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP. Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018, Roma; 2019.
- [3] L. Zoccolini, E. Bruschi, S. Cattaneo, V. Quaglini - *Current Trends in Fluid Viscous Dampers with Semi-Active and Adaptive Behavior* - Applied Sciences (Switzerland) 2023, 13, doi:[10.3390/app131810358](https://doi.org/10.3390/app131810358).
- [4] V. Quaglini, C. Pettoruso, E. Bruschi - *Experimental And Numerical Assessment Of Prestressed Lead Extrusion Dampers* - Ingegneria Sismica 2021, 38, 46–68.
- [5] V. Quaglini, C. Pettoruso, E. Bruschi - *Design and Experimental Assessment of a Prestressed Lead Damper with Straight Shaft for Seismic Protection of Structures* - Geosciences (Switzerland) 2022, 12, doi:[10.3390/geosciences12050182](https://doi.org/10.3390/geosciences12050182).
- [6] V. Quaglini, E. Bruschi - *Controllo passivo mediante controventi dissipativi. Principi generali, requisiti normativi ed evoluzione dei principali dispositivi a comportamento dipendente dallo spostamento* - Structural 2022, 240, 9, doi:[10.12917/STRU240.09](https://doi.org/10.12917/STRU240.09).
- [7] V. Quaglini, E. Bruschi, C. Pettoruso - *Dimensionamento di dispositivi dissipativi per la riabilitazione sismica di strutture intelaiate* - Structural 2021, 237, 1–19, doi:[10.12917/STRU237.25](https://doi.org/10.12917/STRU237.25).
- [8] CSLLPP (Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici). D.M. 17 gennaio 2018 in materia di “norme tecniche per le costruzioni”. Gazzetta ufficiale n.42 del 20 febbraio 2018, Supplemento ordinario n.8, Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti, Roma; 2018.
- [9] CEN (European Committee for Standardization). European Committee for Standardization (2009). EN 15129. Anti-seismic devices. Brussels.
- [10] R. Antonucci, F. Balducci, MG Castellano, F. Donà – *Precasted RC buildings with buckling restrained braces: the example of the new building of the faculty of engineering in Ancona* - Second International fib Congress, Napoli, Italy, June 5-8, 2006, paper No. 879.
- [11] F. Mazza, A. Vulcano - *Displacement-Based Design procedure of damped braces for the seismic retrofitting of RC framed buildings* - Bulletin of Earthquake Engineering, vol. 13, 2015, p. 2121-2143; doi:[10.1007/s10518-014-9709-7](https://doi.org/10.1007/s10518-014-9709-7).
- [12] F. Mazza, A. Vulcano - *Displacement-Based seismic Design of hysteretic damped braces for retrofitting in-elevation irregular RC framed buildings* - Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 69, 2015, p. 115-124, doi:[10.1016/j.soildyn.2014.10.029](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.10.029).
- [13] A. Di Cesare, F.C. Ponzio - *Seismic retrofit of reinforced concrete frame buildings with hysteretic bracing systems: design procedure and behaviour factor* - Hindawi, Shock and Vibration, vol. 2017, Article ID 2639361, 2017, doi:[10.1155/2017/2639361](https://doi.org/10.1155/2017/2639361).

- [14] F. Barbagallo, M. Bosco, E.M. Marino, P.P. Rossi, P. Stramondo - *A multi-performance design method for seismic upgrading of existing RC frames by BRBs* - Earthquake Engineering & Structural Dynamics, vol. 46, 2017, p. 1099-1119, doi: 10.1002/eqe.
- [15] I. Nuzzo, D. Losanno, N. Caterino - *Seismic design and retrofit of frames structures with hysteretic dampers: a simplified displacement-based procedure* - Bulletin of Earthquake Engineering, vol. 17, 2019, p. 2787-2819; doi:10.1007/s10518-019-00558-8.
- [16] ATC (1996) Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. ATC-40, Applied Technology Council, Redwood City, California.
- [17] P. Fajfar - *Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra* - Earthquake Engineering & Structural Dynamics, vol. 28, n. 9, 1999, p. 979-993.
- [18] E. Bruschi, V. Quaglini, P.M. Calvi - *A Simplified Design Procedure for Seismic Upgrade of Frame Structures Equipped with Hysteretic Dampers* - Engineering Structures 2022, 251, doi:10.1016/j.engstruct.2021.113504.
- [19] E. Bruschi, V. Quaglini - *Reliability Analysis of Two Archetype RC Buildings with Hysteretic Dampers* - Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2024, 176, doi:[10.1016/j.soildyn.2023.108290](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.108290).
- [20] F. Faleschini, M.A. Zanini, K. Toska - *Seismic reliability assessment of code-conforming reinforced concrete buildings made with electric arc furnace slag aggregates* - Engineering Structures 2019; 195: 324-339; doi:10.1016/j.engstruct.2019.05.083.
- [21] F. McKenna, G.I. Fenves, M.H. Scott - *Open System for Earthquake Engineering Simulation* - PEER Report, Berkeley, CA; 2000.
- [22] E. Bruschi, P.M. Calvi, V. Quaglini - *Concentrated Plasticity Modelling of RC Frames in Time-History Analyses* - Engineering Structures 2021, 243, doi:[10.1016/j.engstruct.2021.112716](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112716).
- [23] N. Ambraseys, P. Smit, R. Sigbjornsson, P. Suhadolc, B. Margaris - *Internet-Site for European Strong-Motion Data, European Commission* - Research-Directorate General, Environment and Climate Programme, 2002.
- [24] I. Iervolino, C. Galasso, E. Cosenza - *REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis* - Bulletin of Earthquake Engineering 2010;8:339-362, doi:10.1007/s10518-009-9146-1.

