

PROCEDURA DI PREDIMENSIONAMENTO DI CONTROVENTI DISSIPATIVI ISTERETICI IMPLEMENTATA DA AIDApp ED APPLICAZIONE AD UN CASO STUDIO

SOMMARIO

In questo documento viene presentata la procedura progettuale eseguita da AIDApp per il predimensionamento di sistemi dissipativi composti da controventi in acciaio nei quali vengono inseriti dispositivi dissipativi a comportamento non-lineare dipendente dallo spostamento. Lo schema progettuale è sviluppato in modo da assistere il progettista nel dimensionamento del sistema di dissipazione di energia in modo da perseguire un livello di prestazione sismica desiderato, in funzione degli stati limite considerati. Secondo la procedura, il comportamento del sistema strutturale costituito da edificio originale e dissipatori sismici viene modellato attraverso un sistema equivalente a un grado di libertà, in cui la struttura esistente (S) e il controvento dissipativo (DB) sono caratterizzati attraverso la rispettiva rigidità elastica e il suo coefficiente di smorzamento viscoso equivalente. Tali sistemi lavorano in parallelo e forniscono la risposta del sistema equivalente della struttura adeguata con il controvento dissipativo (S + DB), come mostrato in Figura 1.

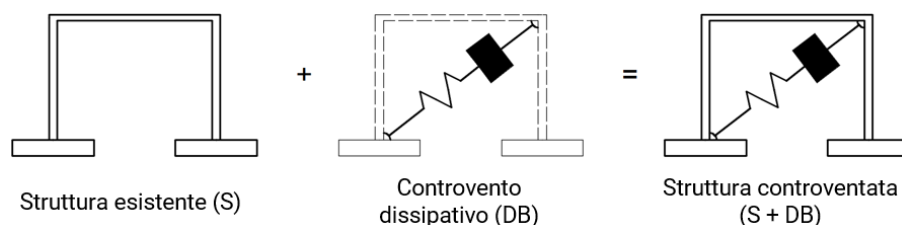


Figura 1: Modello reologico del sistema equivalente di: (i) struttura esistente (S), (ii) controvento dissipativo (DB) e (iii) struttura adeguata con il controvento dissipativo (S + DB).

Entrambi questi sistemi sono definiti in relazione a un “punto di prestazione” che è assegnato sulla base del danno strutturale permesso e del primo modo deformativo della struttura originale. La rigidità e la resistenza del controvento dissipativo equivalente a un grado di libertà (DB) vengono quindi ripartiti ai piani dell’edificio in modo da ottenere sotto sisma, per la struttura rinforzata, spostamenti orizzontali ai piani proporzionali al modo fondamentale della struttura esistente.

La procedura si caratterizza per la semplicità di applicazione. Viene infatti richiesta la esecuzione di una sola analisi statica non-lineare, che può essere condotta con qualsiasi software commerciale, al passo 1 al fine di valutare la curva di capacità dell’edificio esistente. Ad ogni iterazione successiva la curva di capacità della struttura su cui sono ora installati i controventi dissipativi viene sostituita dalla rappresentazione bilineare equivalente, costruita tramite semplici equazioni analitiche che possono essere facilmente automatizzate in un semplice foglio di calcolo (come ad esempio Excel), senza richiedere un ulteriore intervento del progettista.

Questo metodo è applicabile a edifici a telaio di bassa e media altezza, sia in calcestruzzo armato che in acciaio, regolari in pianta e in elevazione, per i quali le deformazioni laterali sono essenzialmente governate dai modi traslazionali e il contributo dei modi superiori al primo è trascurabile.

In questo documento di supporto al progettista, tale metodo è stato applicato ad un caso studio relativo ad un telaio in calcestruzzo armato, al fine di dimostrare l’efficacia della procedura proposta, ottenendo un soddisfacente accordo tra l’obiettivo progettuale e le curve di capacità prodotte numericamente. Inoltre, sono state condotte analisi dinamiche non-lineari che hanno confermato la affidabilità della procedura.

PROCEDURA DI PROGETTAZIONE DEL SISTEMA DI DISSIPAZIONE DI ENERGIA

La procedura progettuale implementata da AIDApp è basata sul metodo dello spettro di capacità, o *Capacity Spectrum Method* [15], [16], e si applica a dispositivi non lineari con comportamento isteretico dipendente dallo spostamento (NTC 2018 [6], par. 11.9.5) utilizzati per la riabilitazione sismica di edifici con struttura a telaio caratterizzati da una certa deformabilità sotto azioni orizzontali. La procedura comprende 5 fasi, come illustrato in Figura 2. Inizialmente la curva di capacità della struttura originaria viene valutata attraverso un'analisi statica non-lineare e ricondotta a una curva bilineare equivalente (Circolare [14], par. C7.3.4.2). Viene quindi definito il livello di prestazione dell'edificio rinforzato sismicamente mediante l'inserimento dei controventi dissipativi (indicato come S+DB), e che include anche la possibilità di escursioni controllate in campo plastico per azioni sismiche caratterizzate da un elevato periodo di ritorno. Tutta la procedura è svolta nel piano accelerazione spettrale - spostamento spettrale o ADRS (*Acceleration-Displacement Response Spectrum*) e il punto di prestazione, o *performance point*, della struttura viene ottenuto dalla intersezione della curva di capacità con lo spettro di domanda abbattuto in funzione della dissipazione aggiuntiva introdotta dai dispositivi. La procedura proposta è iterativa dal momento che l'inserimento di controventi dissipativi comporta un aumento di rigidità per la struttura rinforzata, e la corrispondente curva di capacità deve essere continuamente aggiornata ogni volta che vengono definite nuove caratteristiche meccaniche dei dissipatori.

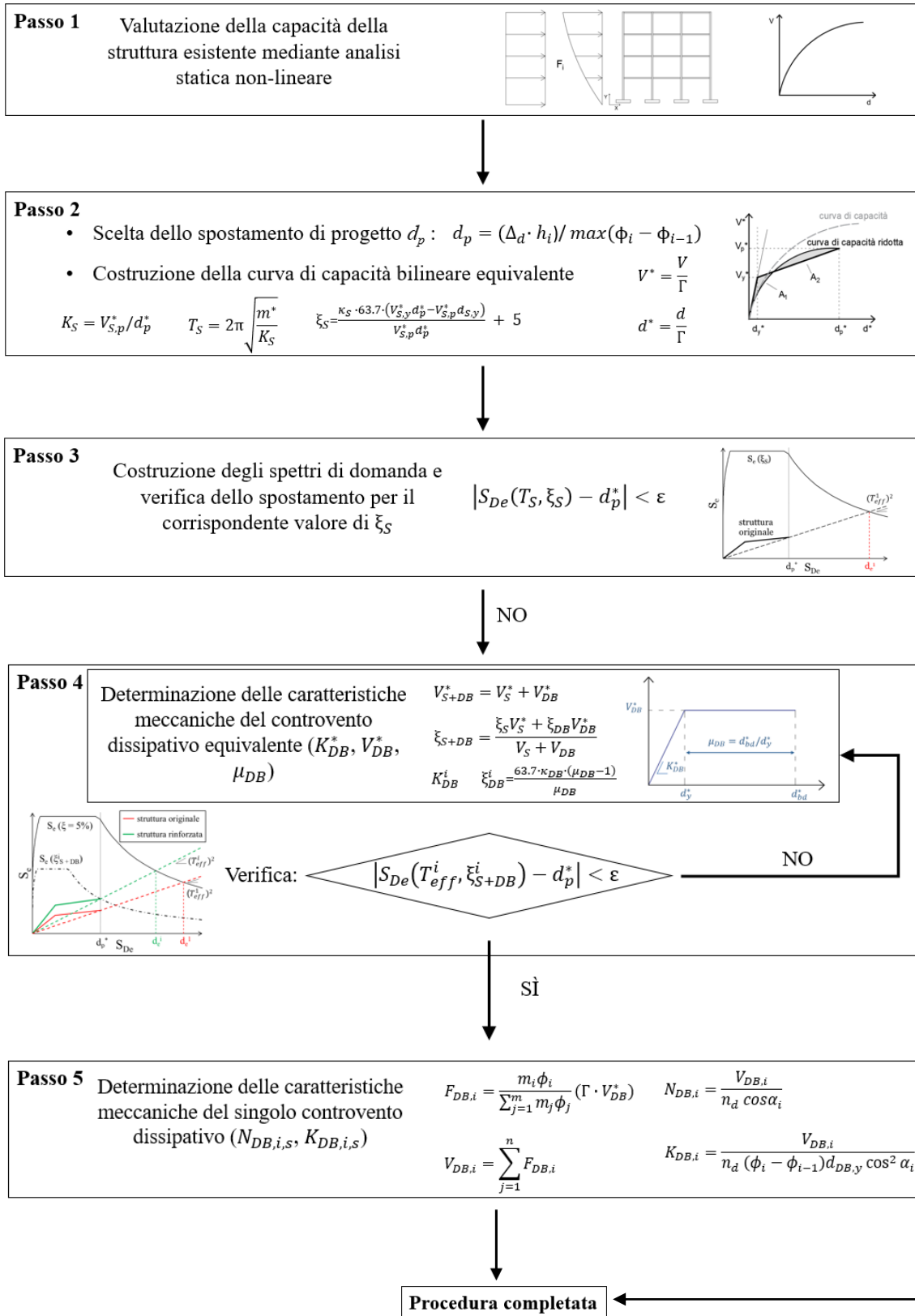


Figura 2: Schema riassuntivo della procedura di progetto.

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

Come primo passo viene determinata la curva di capacità della struttura esistente (S). A tale scopo viene condotta una analisi statica non-lineare, che può essere condotta con qualsiasi software commerciale. Per l'analisi si utilizzano due distribuzioni di forze orizzontali, applicate ai baricentri delle masse di ciascun piano: una distribuzione uniforme e proporzionale alla massa di piano m_i (dove $i = 1 \dots n$, e n è il numero di piani) e una distribuzione modale, ottenuta moltiplicando ciascun componente ϕ_i del primo autovettore per la corrispondente massa di piano m_i (NTC 2018 [6], par. 7.3.4.2). Nella modellazione della struttura vengono considerati i carichi gravitazionali applicati a ogni piano e una ulteriore eccentricità accidentale del 5% della massa di piano, in accordo alle prescrizioni della normativa (NTC 2018 [6], par. 7.2.6). 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.

La curva di capacità $V_S - d_S$ della struttura reale viene quindi convertita nella curva di capacità $V_S^* - d_S^*$ del sistema equivalente a un grado di libertà attraverso il fattore di partecipazione modale Γ definito in equazione (1) (Circolare [14], par. C7.3.4.2), Figura 3. La forza di taglio V_S^* , lo spostamento d_S^* e la massa m_S^* del sistema equivalente sono definiti nelle equazioni (2)-(4).

$$\Gamma = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \phi_i}{\sum_{i=1}^n m_i \phi_i^2} \quad (1)$$

$$d_S^* = \frac{d_S}{\Gamma} \quad (2)$$

$$V_S^* = \frac{V_S}{\Gamma} \quad (3)$$

$$m^* = \sum_{i=1}^n m_i \phi_i \quad (4)$$

Passo 2: Definizione dell'obiettivo prestazionale di progetto e costruzione della curva di capacità bilineare equivalente

L'obiettivo prestazionale di progetto viene definito attraverso la selezione dello spostamento obiettivo d_p per la struttura dotata del sistema di dissipazione

$$d_p = \min \frac{\Delta_d h_i}{\delta_i} \quad (5)$$

cui Δ_d rappresenta il valore obiettivo del rapporto di scorrimento di interpiano, selezionato in funzione della prestazione della struttura per ciascuno degli stati limite richiesti; h_i è l'altezza dell' i -esimo interpiano; $\delta_i = (\phi_i - \phi_{i-1})$ è la differenza tra le componenti del primo autovettore relative a due piani consecutivi. Indicativamente, quando lo scopo dell'intervento con controventi dissipativi è quello di mantenere la struttura in campo elastico, si consiglia di definire il valore obiettivo del rapporto di scorrimento di interpiano Δ_d in modo da soddisfare i requisiti per le verifiche di rigidità introdotti dalla normativa per le strutture di nuova costruzione (NTC 2018, §7.3.6.1). Viceversa, quando si intende permettere la formazione controllata di cerniere plastiche nella struttura adeguata, il valore obiettivo di Δ_d sarà definito sulla base dei tassi di lavoro dei materiali con riferimento alla duttilità disponibile a livello locale e globale. Nel caso di edifici con altezza di interpiano costante $h_i = h_0$, l'equazione (1) si semplifica nella forma

$$d_p = \frac{\Delta_d h_0}{\max \delta_i} \quad (6)$$

Una volta riportato lo spostamento obiettivo d_p sulla curva di capacità del sistema equivalente $V_S^* - d_S^*$ e individuato il corrispondente punto di prestazione di coordinate $(d_p^*, V_{S,p}^*)$, si costruisce la curva bilineare equivalente, in termini energetici, ottenuta adottando un primo tratto con pendenza uguale alla rigidità iniziale della struttura, ed identificando la forza V_y^* e la pendenza del tratto $d_y^* - d_p^*$

imponendo l'uguaglianza delle aree A_1 e A_2 sottese dalle due curve, come mostrato in Figura 3 (Circolare [14], par. C7.3.4.2).

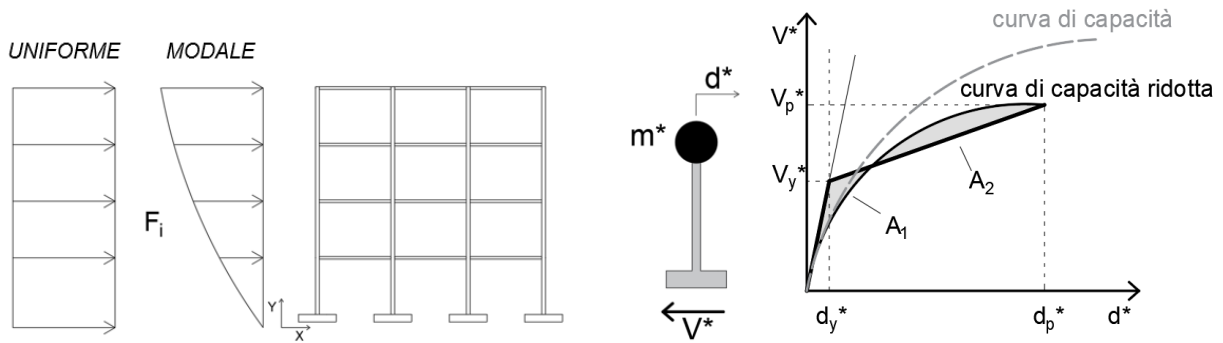


Figura 3: Sistema e costruzione della curva bilineare equivalente.

Il sistema bilineare equivalente alla struttura esistente è quindi caratterizzato da una rigidezza secante $K_S^* = V_{S,p}^*/d_p^*$ e da un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente ξ_S espresso (in %) dalla equazione (7)

$$\xi_S = K_S \cdot \frac{63.7 \cdot (V_{S,y}^* d_p^* - V_{S,p}^* d_{y,S}^*)}{V_{F,p}^* d_p^*} + 5 \quad (7)$$

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 [14], [17]. Il termine 5 (%) che compare a destra nella equazione (7) rappresenta lo smorzamento convenzionale della struttura.

Passo 3: Costruzione degli spettri di domanda

Per ciascuno degli stati limite richiesti si converte lo spettro di domanda nel relativo spettro sul 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 [6]. A partire dallo spettro elastico viene costruita una famiglia di spettri corrispondenti a diversi valori ξ_{eff} del coefficiente di smorzamento viscoso scalando le coordinate spettrali attraverso la relazione 3.2.4 di NTC 2018 [6]

$$S_e(T_{eff}; \xi_{eff}) = S_e(T_{eff}; \xi=5\%) \sqrt{\frac{10}{5+\xi_{eff}}} \quad (8.a)$$

$$S_{De}(T_{eff}; \xi_{eff}) = S_{De}(T_{eff}; \xi=5\%) \sqrt{\frac{10}{5+\xi_{eff}}} \quad (8.b)$$

dove T_{eff} è il periodo di vibrazione, in secondi, del sistema a un grado di libertà equivalente. È utile ricordare che nel piano ADRS valori spettrali a pari periodo si trovano su rette uscenti dall'origine, con pendenza T^2 .

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, equazione (4). A partire dalla rigidezza secante della struttura esistente valutata in corrispondenza del punto di prestazione, $K_S^* = V_{S,p}^*/d_p^*$, viene calcolato il periodo efficace della

struttura $T_S^* = 2\pi \sqrt{m^*/K_S^*}$, e di conseguenza, lo spostamento spettrale

$S_{De}(T_S^*; \xi_S) = S_{De}(T_S^*; \xi=5\%) \sqrt{10/(5+\xi_S)}$ dove ξ_S è il coefficiente di smorzamento viscoso equivalente della struttura definito dalla equazione (7).

Se $S_{De}(T_S^*; \xi_S) > d_p^*$ la struttura non soddisfa l'obiettivo prestazionale e si rende necessario un intervento di riqualificazione mediante inserimento del sistema di dissipazione supplementare di energia.

Passo 4: Determinazione delle caratteristiche meccaniche del controvento dissipativo equivalente (K_{DB}^* , V_{DB}^* , μ_{DB})

A partire dal sistema bilineare a un grado di libertà equivalente alla struttura originale individuato in precedenza, si determinano, separatamente per le due direzioni principali dell'edificio, le caratteristiche V_{DB}^* , K_{DB}^* , μ_{DB} di un controvento equivalente (Figura 4) con comportamento elastico-perfettamente plastico (Figura 5). Il controvento equivalente viene schematizzato come un sistema in serie caratterizzato da una rigidezza K_B^* associata al controvento in acciaio e da una duttilità μ_D e una rigidezza K_D^* associate al dissipatore isteretico, che vengono combinate secondo le relazioni riportate in Figura 4 per definire le proprietà V_{DB}^* , K_{DB}^* , μ_{DB} . La Tabella 1 riporta alcuni valori tipici di controventi dissipativi di tipo isteretico.

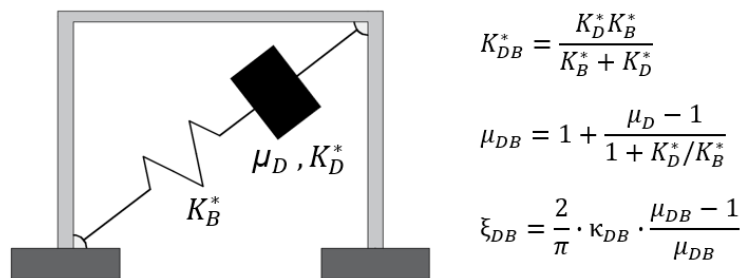


Figura 4: Controvento equivalente composto da un controvento in acciaio con rigidezza K_B^* in serie ad un dissipatore isteretico con duttilità μ_D e rigidezza K_D^* .

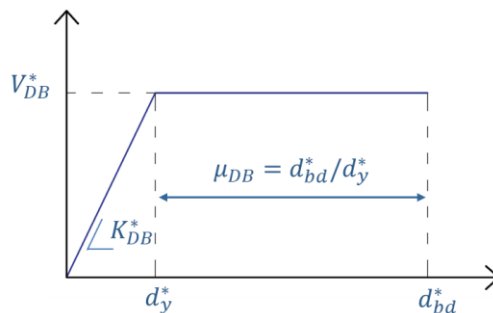


Figura 5: Rappresentazione della curva bilineare equivalente del controvento dissipativo.

	$\frac{K_B}{K_D} = 2$		$\frac{K_B}{K_D} = 3$		$\frac{K_B}{K_D} = 4$		$\frac{K_B}{K_D} = 5$	
μ_D	μ_{DB} (-)	ξ_{DB} (%)	μ_{DB} (-)	ξ_{DB} (%)	μ_{DB} (-)	ξ_{DB} (%)	μ_{DB} (-)	ξ_{DB} (%)
4	3,0	42,4	3,3	44,1	3,4	44,9	3,5	45,5
6	4,3	49,0	4,8	50,3	5,0	50,9	5,2	51,3
8	5,7	52,4	6,3	53,5	6,6	54,0	6,8	54,3
10	7,0	54,6	7,8	55,4	8,2	55,9	8,5	56,2
12	8,3	56,0	9,3	56,8	9,8	57,2	10,2	57,4
14	9,7	57,1	10,8	57,7	11,4	58,1	11,8	58,3
16	11,0	57,9	12,3	58,5	13,0	58,8	13,5	58,9

Tabella 1: Valori tipici di controventi dissipativi di tipo isteretico.

La determinazione delle caratteristiche viene condotta adottando una procedura iterativa. Al passo iniziale, la struttura originale (S) possiede una rigidezza efficace $K_{eff}^1 = K_S^*$ e un periodo efficace $T_{eff}^1 = T_S^*$, dove K_S^* e T_S^* sono calcolati come definito in precedenza. Si identifica quindi lo spostamento d_e^1 di un oscillatore elastico avente periodo pari a T_{eff}^1 come l'ascissa del punto di intersezione dello spettro di domanda elastico con la retta uscente dall'origine e avente pendenza $(T_{eff}^1)^2$, Figura 6. L'apice 1 si riferisce al fatto che i valori sopra riportati si riferiscono alla prima iterazione.

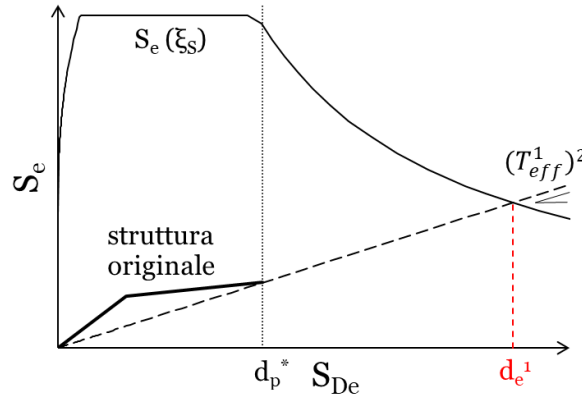


Figura 6: Valutazione dello spostamento spettrale d_e^1 .

Si determina quindi lo smorzamento equivalente ξ_{eff}^1 che deve essere fornito all'oscillatore elastico per ridurre il suo spostamento al valore obiettivo d_p^* . Imponendo l'uguaglianza $S_{De}(T_{eff}^1; \xi_{eff}^1) = d_p^*$ si determina ξ_{eff}^1 mediante l'equazione (9):

$$\xi_{eff}^1 = 10 \cdot \left(\frac{S_{De}(T_{eff}^1; \xi=5\%)}{d_p^*} \right)^2 - 5 = 10 \cdot \left(\frac{d_e^1}{d_p^*} \right)^2 - 5 \quad (9)$$

Le proprietà del controvento dissipativo equivalente vengono determinate in funzione del coefficiente di duttilità μ_{DB} , che viene definito all'inizio della progettazione in funzione del dispositivo di dissipazione selezionato dal progettista. Il coefficiente di smorzamento viscoso equivalente di un controvento dissipativo con comportamento elastico-perfettamente plastico come quello mostrato

in Figura 5 può essere espresso in funzione del coefficiente di duttilità secondo la equazione (10), riportata anche in Figura 4:

$$\xi_{DB} = \frac{2}{\pi} \cdot \kappa_{DB} \frac{(\mu_{DB}-1)}{\mu_{DB}} \quad (10)$$

Il valore del coefficiente κ_{DB} , che tiene conto della capacità dissipativa del controvento in funzione della forma effettiva del ciclo isteretico, può essere selezionato sulla base dell'esperienza o di prove sperimentali condotte sul dispositivo in esame.

La resistenza del controvento equivalente viene quindi determinata tramite l'equazione (11) di equivalenza energetica [18], dove compare come unica incognita

$$\xi_{eff}^1 \cdot V_{S,p}^* = \xi_S \cdot V_{S,p}^* + \xi_{DB} \cdot V_{DB,1}^* \quad (11)$$

Si costruisce ora sul piano ADRS la curva di capacità del sistema a un grado di libertà S+DB 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, $V_{p,2}^* = V_{S,p}^* + V_{DB,1}^*$. Il sistema equivalente così ottenuto possiede una rigidezza efficace K_{eff}^2 e un periodo efficace T_{eff}^2 uguali a $K_{eff}^2 = V_{p,2}^*/d_p^*$ e $T_{eff}^2 =$

$2\pi \sqrt{m^*/K_{eff}^2}$, rispettivamente, e un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente pari a $\xi_{S+DB}^2 = (\xi_S V_{S,p}^* + \xi_{DB} V_{DB,1}^*) / (V_{S,p}^* + V_{DB,1}^*) + 5$. Si determina lo spostamento $S_{De}(T_{eff}^2; \xi_{S+DB}^2)$ del sistema equivalente S+DB, Figura 7, e lo si confronta con lo spostamento obiettivo.

Se $|S_{De}(T_{eff}^2; \xi_{S+DB}^2) - d_p^*|/d_p^* \leq \varepsilon$, dove ε è un valore sufficientemente piccolo assegnato dal progettista (solitamente compreso tra 0.01 e 0.05), la convergenza è raggiunta e si passa al passo 5; altrimenti, è necessario proseguire con le iterazioni fintanto che non si ottiene una differenza trascurabile tra i valori $S_{De}(T_{eff}^i; \xi_{S+DB}^i)$ e d_p^* , dove con i si indica il numero di iterazioni.

Alla i -esima iterazione, il sistema a un grado di libertà S+DB equivalente alla struttura rinforzata con il controvento è caratterizzato dalle seguenti proprietà:

$$V_{p,i}^* = V_{F,p}^* + V_{DB,i-1}^* \quad (12)$$

$$\xi_{S+DB}^i = \frac{\xi_S V_{S,p}^* + \xi_{DB} V_{DB,i-1}^*}{V_{S,p}^* + V_{DB,i-1}^*} \quad (13)$$

$$K_{eff}^i = \frac{V_{p,i}^*}{d_p^*} \quad (14)$$

$$T_{eff}^i = 2\pi \sqrt{\frac{m^*}{K_{eff}^i}} \quad (15)$$

Il coefficiente di smorzamento viscoso efficace alla i -esima iterazione è calcolato come $\xi_{eff}^i = 10 \cdot \left(\frac{d_e^i}{d_p^*}\right)^2 - 5$ dove $d_e^i = S_{De}(T_{eff}^i; \xi = 5\%)$ è lo spostamento dell'oscillatore elastico con periodo T_{eff}^i , e la resistenza del dissipatore equivalente viene determinata tramite l'equazione (16) in cui l'unica incognita è $V_{DB,i}^*$

$$\xi_{eff}^i (V_{S,p}^* + V_{DB,i-1}^*) = \xi_S V_{S,p}^* + \xi_{DB} V_{DB,i}^* \quad (16)$$

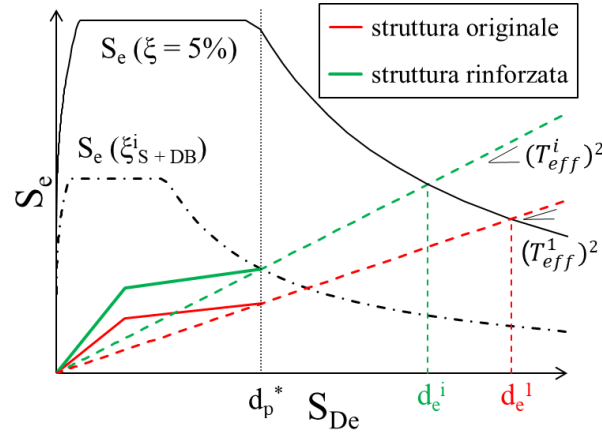


Figura 7: Rappresentazione grafica della procedura per il dimensionamento meccanico del controvento dissipativo equivalente.

Passo 5: Determinazione delle caratteristiche meccaniche del singolo controvento dissipativo ($K_{DB,i,s}$, $V_{DB,s}$, μ_{DB})

Una volta determinate le caratteristiche meccaniche del controvento dissipativo equivalente, si procede a distribuire le proprietà tra i singoli controventi dissipativi in elevazione utilizzando un criterio di proporzionalità rispetto alla deformazione del modo principale della struttura originale [7], [8]. La resistenza e la rigidezza del singolo controvento dissipativo installato all' i -esimo piano, indicate rispettivamente come $N_{DB,i,s}$ e $K_{DB,i,s}$, sono determinate attraverso le equazioni (17)-(20), dove le grandezze utilizzate sono definite in Figura 8:

$$F_{DB,i} = \frac{m_i \phi_i}{\sum_{j=1}^m m_j \phi_j} (\Gamma \cdot V_{DB}^*) \quad (17)$$

$$V_{DB,i} = \sum_{j=1}^n F_{DB,i} \quad (18)$$

$$K_{DB,i} = \frac{V_{DB,i}}{(\phi_i - \phi_{i-1}) d_{DB,i}} \quad (19)$$

$$N_{DB,i,s} = \frac{V_{DB,i}}{n_{d,i} \cos \alpha_i} \quad (20)$$

$$K_{DB,i,s} = \frac{K_{DB,i}}{n_{d,i} \cos^2 \alpha_i} \quad (21)$$

dove $n_{d,i}$ è il numero totale di controventi dissipativi al piano. La procedura garantisce che la struttura sismicamente adeguata mantenga il modo di vibrare della struttura originale [7], [8], [12]: se la struttura rimane in campo elastico, la struttura si deforma proporzionalmente al suo modo fondamentale, mantenendo la medesima distribuzione di scorrimenti di interpiano ad ogni livello e garantendo in tal modo la contemporanea attivazione di tutti i controventi dissipativi.

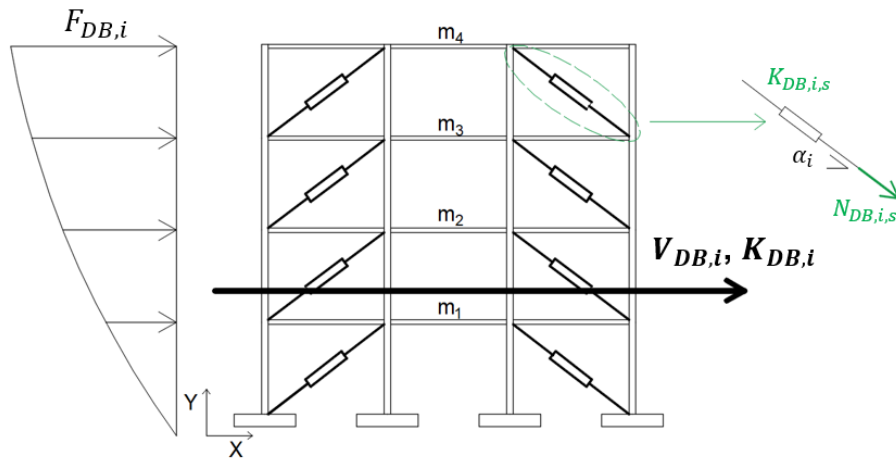


Figura 8: Schematizzazione grafica della procedura per la distribuzione in elevazione delle caratteristiche dei controventi dissipativi.

Si tenga presente che AIDApp fornisce in output i valori di forza $V_{DB,i}$ e rigidezza $K_{DB,i}$ a ciascun piano, in quanto la scelta del numero di dispositivi da installare ad ogni piano, così come la loro posizione, rimane una scelta del progettista, nel rispetto dei vincoli architettonici e strutturali della struttura in esame. Si fa notare che le equazioni (20) e (21) si riferiscono a una disposizione diagonale di controventi come mostrato in Figura 8; in caso di configurazioni differenti (per esempio a V o a K), le formule dovranno essere adattate alla diversa geometria.

Una volta determinate le caratteristiche del singolo controvento dissipativo è possibile ricavare quelle degli elementi costituenti il controvento stesso, cioè l'asta metallica e il dispositivo isteretico disposti in serie. La rigidezza del sistema dissipativo deriva infatti dalla combinazione delle rigidezze dei singoli componenti, secondo la relazione [14]

$$K_{DB,i,s} = \frac{1}{\frac{1}{K_{D,i,s}} + \frac{1}{K_{B,i,s}}} \quad (22)$$

dove $K_{D,i,s}$ è la rigidezza del dispositivo dissipativo isteretico e $K_{B,i,s}$ è la rigidezza del supporto metallico. In generale, il sistema di supporto deve possedere una elevata rigidezza iniziale per concentrare la deformazione indotta dal sisma nei dispositivi di dissipazione, e consentire una elevata dissipazione di energia per piccoli spostamenti [14]; la sua sezione resistente deve essere dimensionata in modo tale da soddisfare la verifica all'instabilità per le forze di progetto nei dispositivi ed evitare la plasticizzazione del materiale allo stato limite ultimo. Le caratteristiche meccaniche del singolo dispositivo dissipativo (rigidezza, resistenza e duttilità) devono essere compatibili con i valori indicati nei cataloghi delle case produttrici; preferibilmente devono essere scelte dimensioni che minimizzano l'area dell'asta di supporto ottimizzando in tal modo lo sfruttamento del materiale.

ESEMPIO

La procedura progettuale proposta viene applicata ad una struttura in calcestruzzo armato situata nel comune di Potenza (long. 15.8094°, lat. 40.6453°) [10], e risalente agli anni '80 in un'area caratterizzata da una sismicità medio-alta con PGA di 2.45 m/s²; la struttura è edificata su un suolo di tipo B e di categoria topografica T1. In Figura 9, si riporta una rappresentazione schematica dell'edificio in pianta e in elevazione. I pilastri hanno sezione 30x30 cm, e sono armati longitudinalmente con 4 barre $\phi 16$ + 2 barre $\phi 14$ al primo piano e con 4 barre $\phi 16$ ai piani superiori; l'armatura trasversale (uniforme a tutti i piani) è costituita da barre $\phi 6$ passo 15 cm costante su tutta la lunghezza. Le travi hanno sezione 30x50 cm, armata con 4 barre $\phi 14$ superiori + 2 barre $\phi 14$ inferiori in mezzera e armatura invertita alle estremità, la staffatura è realizzata con barre $\phi 6$ passo 15 cm alle estremità e $\phi 6$ passo 20 cm in mezzera. I materiali sono calcestruzzo tipo R_{ck} 25 e armatura FeB38K.

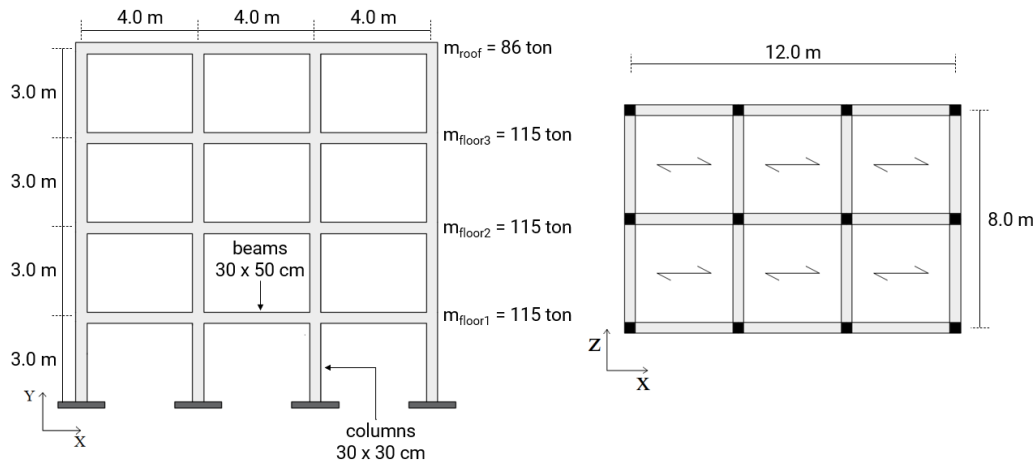


Figura 9: Pianta strutturale e sezione verticale dell'edificio di studio.

Modellazione strutturale

È stato creato un modello 3D della struttura nel software OpenSees [19], utilizzando elementi a plasticità concentrata per travi e pilastri; nello specifico, la plasticizzazione della struttura viene consentita solo alle estremità di ciascun membro per un tratto di lunghezza corrispondente alla lunghezza delle cerniere plastiche definite nell'Eurocodice 8 [20]:

$$L_{pl} = \frac{z}{30} + 0.2h + 0.11 \left(\frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}} \right) \quad (23)$$

dove z è la lunghezza di libera inflessione, h l'altezza della sezione, d_b il diametro delle barre longitudinali, f_c la resistenza a compressione del calcestruzzo, e f_y la resistenza allo snervamento dell'armatura longitudinale. Per la valutazione della lunghezza delle cerniere plastiche si sono utilizzati i valori nominali di resistenza dei materiali ipotizzando un fattore di confidenza unitario pari a un Livello di Conoscenza 3. Alle estremità di pilastro e trave per un tratto di lunghezza L_{pl} ¹ vengono definite delle sezioni a fibre, in cui ogni barra di armatura corrisponde ad una singola fibra con associato il legame costitutivo Giuffrè-Menegotto-Pinto [21]. La porzione di calcestruzzo è discretizzata utilizzando 20 fibre nel nucleo confinato e 5 fibre nel copriferro; si trascura la resistenza del calcestruzzo a trazione mentre vengono applicate le formule (A6 – A8) da Eurocodice 8 [20] per valutare le proprietà del calcestruzzo confinato. Il tratto interno di ciascun elemento strutturale presenta invece un comportamento elastico-lineare. Per tener conto della fessurazione dei materiali fragili, nel modello la rigidezza flessionale è stata ridotta del 50% rispetto al valore di rigidezza dei corrispondenti elementi non fessurati (NTC 2018 [6], par. 7.2.6). Le masse di tutti gli elementi strutturali (travi, pilastri e solai) sono concentrate nei baricentri della massa di ogni piano; carichi permanenti G e variabili Q sono distribuiti uniformemente lungo le travi e gli effetti P-Delta sono considerati nelle analisi. I pilastri si assumono incastrati alla base e con nodi rigidi ai piani, i solai vengono modellati come piano rigido e lo smorzamento equivalente della struttura è definito in accordo al metodo di Rayleigh in funzione della sola matrice di rigidezza, assumendo un 5% di smorzamento viscoso, per considerare la dissipazione di energia fornita dai tamponamenti e da altri elementi non-strutturali presenti nell'edificio [22].

I controventi dissipativi selezionati per l'intervento sono composti da aste metalliche accoppiate in serie a dispositivi dissipativi a comportamento non-lineare, dipendenti dallo spostamento (NTC 2018 [6], par. 11.9.5), del tipo BRB (Buckling Restrained Braces). I dispositivi BRB sfruttano le capacità isteretiche dissipative di elementi metallici opportunamente sagomati e dimensionati in modo di resistere a deformazioni di trazione e compressione all'interno di un certo intervallo senza andare incontro a fenomeni di instabilità; ai fini del presente studio viene associato un comportamento assiale di tipo elastico-perfettamente plastico. Sebbene siano disponibili modelli

¹ La lunghezza risultante L_{pl} delle cerniere plastiche è pari a 0.25 m per i pilastri e 0.31 m per le travi

più raffinati all'interno dei software commerciali di calcolo strutturale, come ad esempio Opensees [19], Midas [23] e SAP2000 [24], la modellazione adottata fornisce una descrizione sufficientemente accurata del comportamento globale di dispositivi isteretici in acciaio, ed è usata frequentemente in letteratura per tale tipologia di dispositivi [10], [25].

È stato progettato un intervento di adeguamento sismico per lo stato limite di Salvaguardia della Vita (SLV) considerando una classe d'uso $cu = II$, una PGA di 2.45 m/s^2 , suolo tipo B e categoria topografica T1. Si decide di utilizzare una distribuzione diagonale dei controventi, come mostrato in Figura 10, con quattro controventi per piano lungo ciascuna delle due direzioni principali dell'edificio.

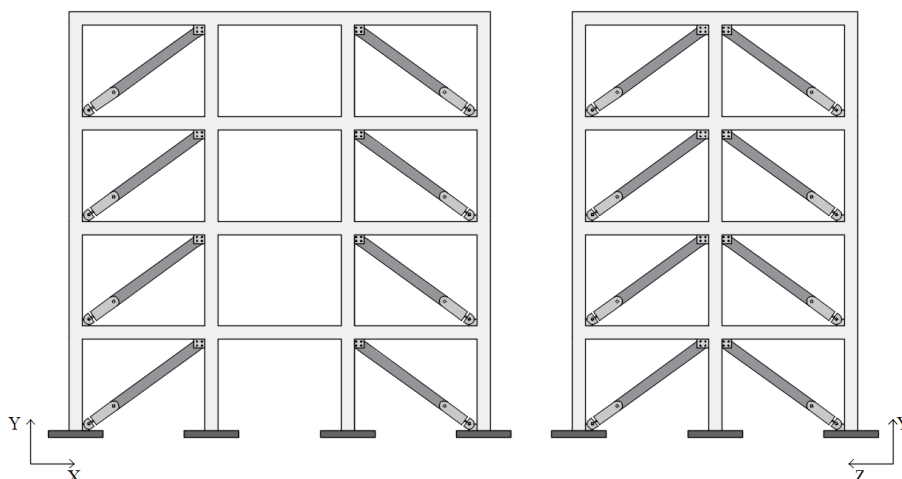


Figura 10: Disposizione dei controventi dissipativi nell'edificio.

Dimensionamento del sistema di controventi dissipativi

Il primo passo consiste nella determinazione delle curve di capacità della struttura originale lungo le due direzioni principali dell'edificio (X e Z), selezionando, per ciascuna direzione, la curva di capacità inferiore (Circolare [14], par. C7.3.4.2). In Figura 11 si riportano le curve di capacità ottenute con distribuzione orizzontale di forze proporzionali alle masse di piano (UNIFORM) ovvero con distribuzione modale (MODAL), applicate ai baricentri di massa di piano con 5% di eccentricità accidentale e dirette lungo i due versi di ciascuna direzione. In entrambe le direzioni la curva di capacità MODAL è quella caratterizzata da resistenza minore e per questo viene utilizzata per determinare le proprietà del sistema a un grado di libertà equivalente secondo le equazioni (1) – (4). Il fattore di partecipazione modale è uguale a $\Gamma = 1.23$ e la massa del sistema equivalente a $m^* = 340 \text{ ton}$.

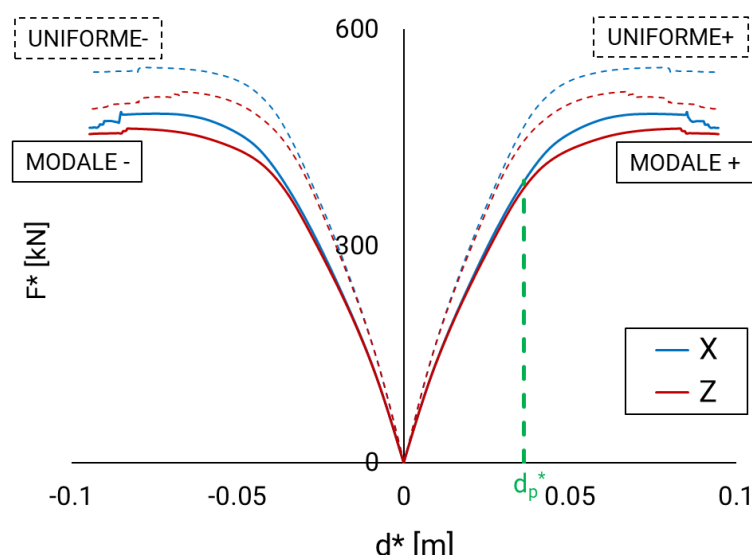


Figura 11: Determinazione delle curve di capacità dell'edificio lungo le due direzioni principali.

Dal momento che la struttura è stata progettata prima dell'entrata in vigore delle più recenti disposizioni normative in tema di progettazione anti-sismica (NTC 2008 [26], N.d.R.), lo spostamento obiettivo viene selezionato allo scopo di mantenere la struttura in campo elastico, limitando al massimo la possibilità di danneggiamento degli elementi strutturali. Utilizzando l'equazione (5) e fissando come obiettivo un rapporto di scorrimento di interpiano $\Delta_d = 0.005$ m/m, si ottiene uno spostamento di progetto per la struttura pari a $d_p = 0.045$ m in entrambe le direzioni. Le proprietà della curva bilineare equivalente al sistema a un grado di libertà dell'edificio, calcolate secondo la procedura definite al passo 2 del metodo, sono riportate in Tabella 2.

DIREZIONE	d_y^* (m)	$V_{s,y}^*$ (kN)	d_p^* (m)	$V_{s,p}^*$ (kN)	ξ_s (%)	d_y^* (m)	$V_{s,y}^*$ (kN)
X	0.012	182	0.036	388	5.7	0.012	182
Z	0.012	186	0.036	385	6.4	0.012	186

Tabella 2: Proprietà della curva bilineare equivalente.

La determinazione delle caratteristiche meccaniche del controvento dissipativo equivalente viene condotta separatamente per le due direzioni X e Z: dopo aver costruito nel piano ADRS lo spettro di domanda secondo normativa per lo stato limite di salvaguardia della vita, si riporta lo spettro di capacità della struttura originale (S) e, dopo aver identificato lo spostamento dell'oscillatore elastico d_e^1 avente il medesimo periodo efficace, si utilizza l'equazione (9) per determinare il coefficiente di smorzamento viscoso ξ_{eff}^1 richiesto al sistema costituito da struttura e controvento dissipativo.

Occorre ora selezionare la duttilità dei controventi dissipativi e nel presente caso studio, la progettazione è stata eseguita per due valori di duttilità μ_{DB} , pari a 4 e 10, che i valori del coefficiente di smorzamento equivalente pari rispettivamente a $\xi_{DB} = 47.8$ % e $\xi_{DB} = 57.3$ %.

Separatamente per ciascuno dei due fattori di duttilità selezionati si applica la procedura definita al passo 4 del metodo progettuale e si itera il procedimento fino a che lo spostamento del punto di prestazione del sistema a un grado di libertà equivalente al sistema di struttura e controvento dissipativo (S+DB) approssima lo spostamento obiettivo d_p^* con una differenza trascurabile, $\varepsilon < 0.05$, come illustrato nell'esempio di Figura 12.

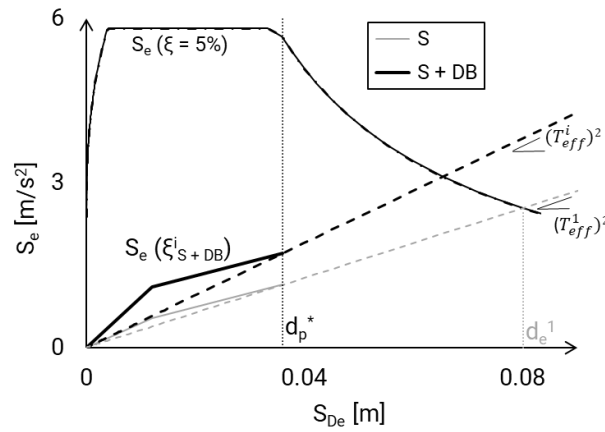


Figura 12: Procedura per il dimensionamento meccanico del controvento dissipativo equivalente lungo la direzione X, fattore di duttilità $\mu_{DB} = 10$.

La convergenza viene raggiunta dopo sole tre iterazioni in entrambe le direzioni dell'edificio (Figura 13).

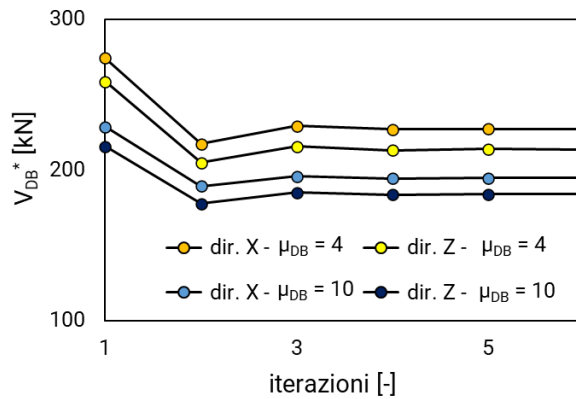


Figura 13: Convergenza della resistenza meccanica del controvento dissipativo equivalente.

Si distribuiscono ora in elevazione le caratteristiche dei controventi dissipativi utilizzando le equazioni (17) – (20), facendo riferimento alla configurazione mostrata in Figura 10, con 4 controventi diagonali per ciascuna direzione. I valori finali delle caratteristiche di rigidezza e resistenza dei singoli controventi dissipativi a ciascun piano sono riportati in Tabella 3.

PIANO	$\mu_{DB} = 4$				$\mu_{DB} = 10$			
	DIREZIONE X		DIREZIONE Z		DIREZIONE X		DIREZIONE Z	
	$K_{DB,i,s}$	$V_{DB,i,s}$	$K_{DB,i,s}$	$V_{DB,i,s}$	$K_{DB,i,s}$	$V_{DB,i,s}$	$K_{DB,i,s}$	$V_{DB,i,s}$
	$\left(\frac{kN}{mm}\right)$	(kN)	$\left(\frac{kN}{mm}\right)$	(kN)	$\left(\frac{kN}{mm}\right)$	(kN)	$\left(\frac{kN}{mm}\right)$	(kN)
1	31.5	90.0	29.1	84.7	67.4	77.0	62.6	73.0
2	26.2	79.0	24.0	74.6	56.1	68.0	51.5	64.1
3	26.0	56.7	23.6	53.5	55.5	48.6	51.0	46.0
4	24.4	26.0	22.1	24.5	52.3	22.4	47.6	21.1

Tabella 3: Distribuzione in elevazione delle caratteristiche dei controventi dissipativi.

Verifica della struttura adeguata

Al fine di verificare l'efficacia della procedura progettuale, si conducono analisi statiche non-lineari in entrambe le direzioni e si plottano le curve di capacità della struttura sismicamente adeguata sul piano ADRS, Figura 14.

La verifica dell'intervento di adeguamento è effettuata con il metodo dell'analisi statica non-lineare (NTC 2018 [6], par. 7.3.4.2) nei confronti dello stato limite di salvaguardia della vita, sul modello dell'edificio adeguato sismicamente mediante l'inserimento dei controventi dissipativi. La Figura 14 illustra il confronto nel piano ADRS tra la capacità del sistema equivalente a un grado di libertà e la domanda. In entrambe le direzioni, la progettazione del sistema di controventi dissipativi risulta appropriata e la struttura controventata rispetta il requisito prestazionale formulato in termini di spostamento obiettivo.

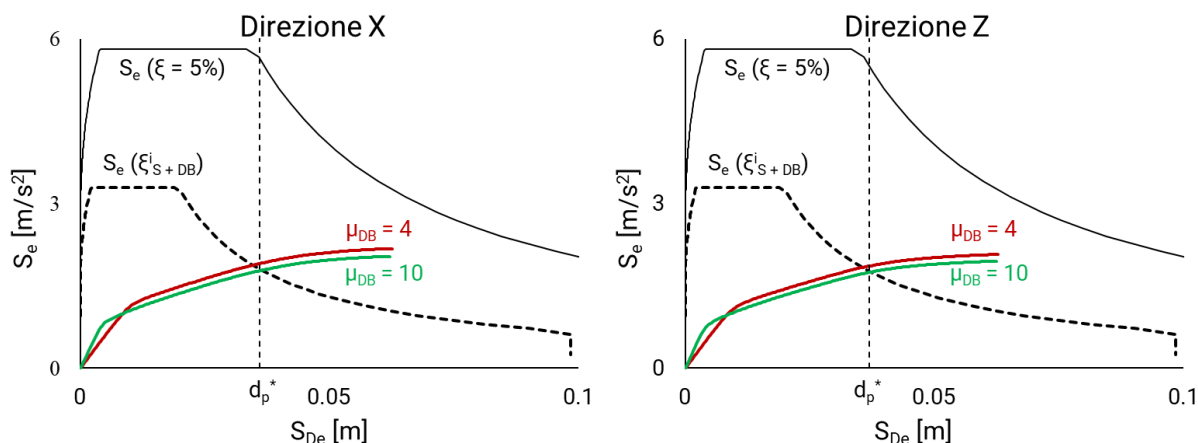


Figura 14: Verifica dell'edificio rinforzato nelle due direzioni principali mediante confronto tra domanda e capacità nel piano ADRS.

Le analisi statiche non-lineari permettono di valutare la risposta dell'edificio in termini di quantità globali, quali appunto il taglio totale alla base e lo spostamento del punto di controllo, convenzionalmente assunto come il centro di massa dell'ultimo piano. Tuttavia, per la validazione del metodo progettuale proposto, si ritiene opportuno analizzare la risposta strutturale anche a livello locale, in termini di scorrimento di interpiano e forze di taglio sui pilastri ad ogni piano. Allo scopo sono state condotte analisi dinamiche non-lineari (NTC 2018 [6], par. 7.3.4.1) utilizzando sette accelerogrammi bidirezionali generati artificialmente dal software SIMQKE [27]. In accordo a quanto prescritto dalle NTC 2018 [6] (par. 3.2.3.6) gli accelerogrammi presentano una parte pseudo-stazionaria di durata 10 secondi, preceduta e seguita da tratti di ampiezza crescente da zero e decrescente a zero, in modo che la durata complessiva dell'accelerogramma sia non inferiore a 25 secondi; inoltre nell'intervallo di periodi 0.15÷2 secondi l'ordinata spettrale media degli accelerogrammi presenta uno scarto in difetto non superiore al 10% rispetto alla corrispondente componente dello spettro elastico per un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente del 5%. I risultati delle analisi dinamiche bidirezionali sono valutati in termini di rapporti di scorrimento di interpiano e forza di taglio ai piani. La Figura 15 mostra i massimi valori assoluti del rapporto di scorrimento di interpiano Δ lungo le due direzioni principali dell'edificio, e la Figura 16 i massimi valori assoluti delle forze di taglio nei pilastri. Nelle due figure si indicano con S i risultati relativi alla struttura originale, e con S+DB i risultati relativi alla struttura adeguata sismicamente mediante inserimento dei controventi dissipativi.

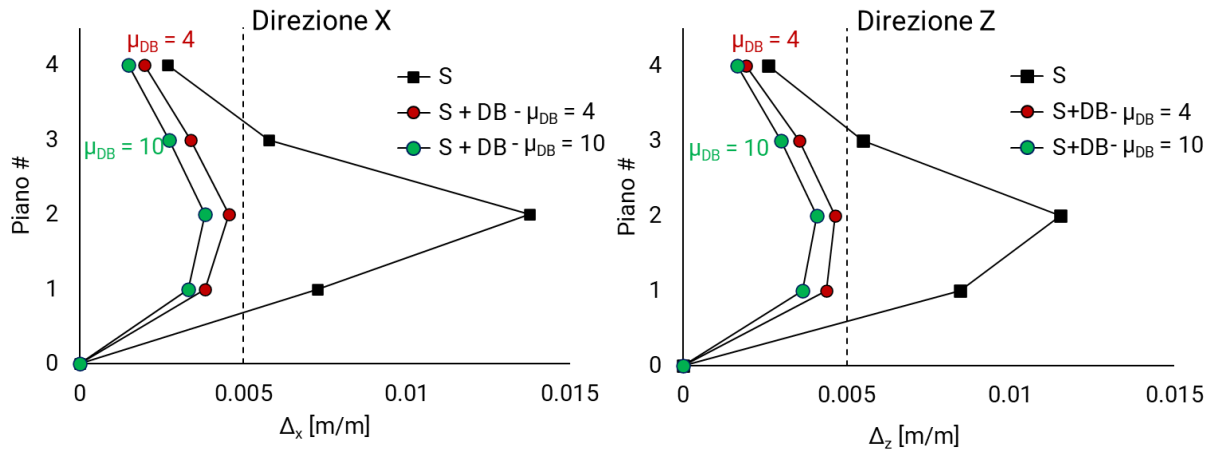


Figura 15: Rapporto di scorrimento di interpiano nelle due direzioni principali dell'edificio: struttura originale (S) e struttura adeguata con controventi dissipativi (S+DB) con diversi valori di duttilità del controvento (μ_{DB}).

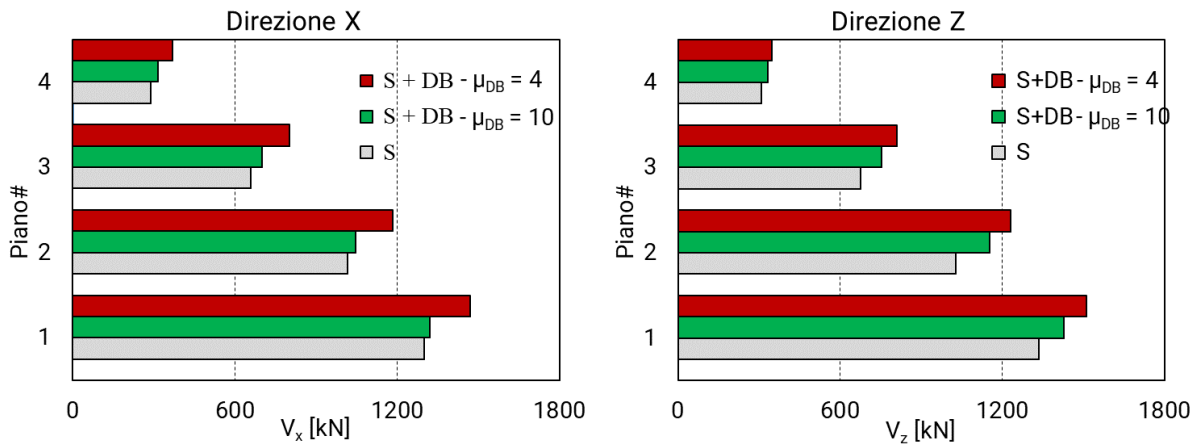


Figura 16: Forza di taglio nei pilastri nelle due direzioni principali dell'edificio: struttura originale (S) e struttura adeguata con controventi dissipativi (S+DB) con diversi valori di duttilità del controvento (μ_{DB}).

L'inserimento dei controventi dissipativi porta ad una significativa riduzione dei massimi scorrimenti di interpiano, fino al 67% quando si utilizzano i controventi con $\mu_{DB} = 4$ e al 72% con controventi caratterizzati da $\mu_{DB} = 10$. La procedura di proporzionamento dei controventi risulta efficace in quanto permette di ridurre, in entrambe le direzioni principali dell'edificio, il rapporto di scorrimento al di sotto del valore $\Delta_d = 0.5\%$ adottato come obiettivo per l'intervento di adeguamento. Come d'altra parte atteso, le forze di taglio nei pilastri subiscono un leggero incremento dovuto all'effetto di irrigidimento dei controventi; in particolare alla base il massimo incremento si ha lungo la direzione Z e pari a +13% con $\mu_{DB} = 4$ e +7% con $\mu_{DB} = 10$.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Manfredi V., Masi A., Ventura G., Chiauzzi L., Digrisolo A., "Rafforzamento sismico degli edifici esistenti in C.A.: una soluzione innovativa per interventi integrati e sostenibili", *Structural 215* – gennaio/febbraio 2018 – paper 03 – ISSN 2282-3794, DOI 10.12917/STRU215.03.
- [2] Ponzo F.C., Di Cesare A., Arleo G., Totaro P., "Protezione sismica di edifici esistenti con controventi dissipativi di tipo isteretico: aspetti progettuali ed esecutivi", *Progettazione Sismica* vol. 2, n. 1, 2010, p. 19-42.
- [3] Foraboschi P., Giani E., "Esoscheletri: prerogative architettoniche e strutturali" Prima parte, *Structural 214* – novembre/dicembre 2017 – paper 33 – ISSN 2282-3794, DOI 10.12917/STRU214.33.
- [4] Foraboschi P., Giani E., "Esoscheletri: miglioramento sismico e rigenerazione architettonica" Seconda parte, *Structural 215* – gennaio/febbraio 2018 – paper 05 – ISSN 2282-3794, DOI 10.12917/STRU215.05.
- [5] O.P.C.M. 3274, 2003, "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica".
- [6] 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, in Italiano.
- [7] Mazza F., Vulcano A., "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.
- [8] Mazza F., Vulcano A., "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.
- [9] Bergami A.V., Nuti C., "A design procedure of dissipative braces for seismic upgrading structures", *Earthquakes and Structures*, vo. 4, n. 1, 2013, p. 85-105; DOI: 10.12989/eas.2013.4.1.085.
- [10] Di Cesare A., Ponzo F.C., "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.
- [11] Barbagallo F., Bosco M., Marino E.M., Rossi P.P., Stramondo P., "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.
- [12] Nuzzo I., Losanno D., Caterino N., "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.
- [13] Levy R., Lavan O., Rutenberg A., "Seismic Design of Friction Damped Braced Frames Based on Historical Records", *Earthquake Spectra*, vol. 2, n. 3, 2005, p. 761-778.
- [14] 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, in Italiano.
- [15] ATC (1996) *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. ATC-40, Applied Technology Council, Redwood City, California.
- [16] Fajfar P., "Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 28, n. 9, 1999, p. 979-993.
- [17] Dwaire H.M., Kowalsky M.J., Nau J.M., "Equivalent damping in support of Direct Displacement-Based Design", *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 11, n. 4, 2007, p. 512-530; DOI: 10.1080/13632460601033884.
- [18] Mazza F., Vulcano A., "Design of hysteretic damped braces to improve the seismic performance of steel and R.C. framed structures", *International Journal of Earthquake Engineering*, vol. 31, n. 1, 2014, p. 5-16.
- [19] McKenna F., Fenves G.I., Scott M.H., "Open System for Earthquake Engineering Simulation", *PEER Report*, Berkeley, CA; 2000.
- [20] CEN (European Committee for Standardization). *Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Assessment and retrofitting of buildings*. EN 1998-3 Eurocode 8; 2005.

- [21] Menegotto M., Pinto P.E., "Method of analysis for cyclically loaded RC plane frames including changes in geometry and non-elastic behaviour of elements under combined normal force and bending", IABSE: Symposium on resistance and ultimate deformability of structures acted on by well defined repeated loads 1973 – Final Report.
- [22] Bruschi E., Calvi P.M., Quaglini V., "Concentrated plasticity modelling of RC frames in time-history analyses", *Engineering Structures*, vol. 243, 112716, 2021; DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112716.
- [23] CSPFEA. Midas Gen FX Manual, CSPFEA Engineering solutions. http://www.cspfea.net/portfolio_page/midas-gen-fx/; 2018.
- [24] SAP2000NL. Theoretical and Users' Manual, Release 18.05, Computers & Structures Inc.: Berkeley, CA, USA; 2017.
- [25] Gandelli E., Taras A., Disti J., Quaglini V., "Seismic retrofit of hospitals by means of hysteretic braces: influence on acceleration-sensitive non-structural components", *Frontiers in Built Environment*, vol. 5, n.100, 2019; DOI: doi.org/10.3389/fbuil.2019.00100.
- [26] CSLLPP (Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici). D.M. 14 gennaio 2008 in materia di "norme tecniche per le costruzioni". Gazzetta ufficiale n.29 del 4 febbraio 2008, Supplemento ordinario n.30, Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti, Roma; 2008, in Italiano.
- [27] SIMQKE (SIMulation of earthQuAKE ground motions). Available online at: https://gelfi.unibs.it/software/simqke/simqke_gr.htm (last accessed: July 2021).
- [28] CRESME Ricerche, Incentivi e riduzione del rischio sismico in Italia, Ingegneria Sismica Italiana, 2020, in Italiano.