

 **Polirex**[®] polietilene espanso
 **Fioccotex**[®] geotessuto
 **Sistema Armatex**[®]

 **Glasstex**[®] rete in fibra di vetro
 **Fibromix**[®] fibre di polipropilene
 **Sistema Stabilflex**[®]



SISTEMA STABILFLEX[®]

Criteri di dimensionamento dei dispositivi di connessione trave-pilastro

- BIEMME S.r.l. -

Numero totale di pagine compresa la presente: 42

**Manuale sviluppato nell'ambito di un progetto
di ricerca e sviluppo di BIEMME SRL
in collaborazione con
UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BERGAMO**

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	4
2. DIMENSIONAMENTO DEI DISPOSITIVI IN EDIFICI ESISTENTI.....	6
2.1 Scelta del numero di dispositivi	9
2.2 Verifica preliminare elastica degli spostamenti attesi	14
2.3 Verifica del comportamento strutturale con dispositivi dissipativi	15
2.3.1 Verifica nel piano del dispositivo.....	17
2.3.2 Verifica nel fuori piano del dispositivo	19
3. ESEMPIO DI CALCOLO	23
3.1 Scelta del numero di dispositivi	23
3.2 Calcolo del periodo proprio della struttura e stima degli spostamenti attesi a seguito dell'inserimento dei dispositivi	25
3.3 Criteri generali di modellazione.....	26
3.4 Verifica nel piano – Analisi statica non lineare (Capacity Spectrum)	27
3.5 Verifica nel piano – Analisi dinamica non lineare (Time History)	30
3.6 Valutazione del taglio associato all'innesco del ribaltamento.....	32
3.7 Verifica nel piano ortogonale – Analisi del ribaltamento fuori piano.....	32
3.8 Ulteriori considerazioni.....	34
3.8.1 Presenza di attrito nel collegamento trave-colonna.....	34
3.8.2 Diminuzione del numero di dispositivi rispetto a quanto ottenuto dalla procedura di progetto .	37
3.8.3 Abbattimento dei valori del sisma all'80% (Circolare 21/01/2019 n.7, cap. 8.4.3).....	38
APPENDICE 1: INSERIMENTO IN NUOVE COSTRUZIONI	40
APPENDICE 2: SOLUZIONE NEL CASO DI INGOMBRO IMPIANTI.....	40
APPENDICE 3: SOSTITUZIONE DEI DISPOSITIVI IN CASO DI TERREMOTO.....	41

1. INTRODUZIONE

I dispositivi Stabilflex (Figura 1 e Figura 2) sono elementi dissipativi a forma di mezzaluna (Crescent Moon) per il collegamento Trave-Pilastro in strutture prefabbricate. Essi sono caratterizzati da un comportamento quasi perfettamente elasto-plastico.

I dispositivi sono marcati CE secondo la norma UNI-EN 15129 (Anti-seismic devices).

Per la realizzazione di collegamenti trave-pilastro in edifici esistenti sono presenti due possibili configurazioni: la prima prevede l'utilizzo di 'Dispositivi Grandi' (Mezzaluna M1) con distanza da foro a foro pari a 72 cm, e la seconda prevede la possibilità di utilizzare 'Dispositivi Piccoli' (Dissipatore 190), con distanza da foro a foro pari a 19 cm.



Figura 1. Immagine del dispositivo grande – Mezzaluna M1 (a sinistra) e di quello piccolo – Dissipatore 190 (a destra) prima delle prove di caratterizzazione.

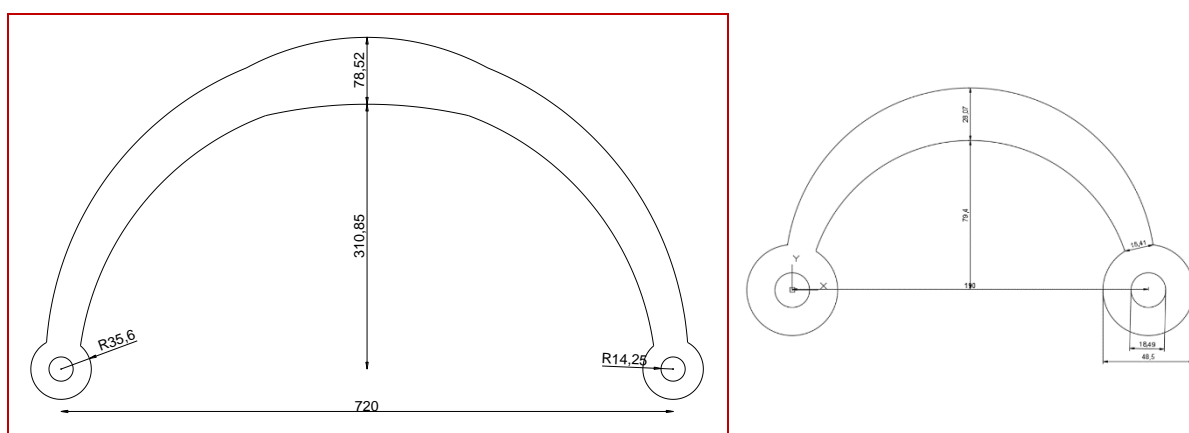


Figura 2. Geometria del dispositivo grande – Mezzaluna M1 (a sinistra) e di quello piccolo – Dissipatore 190 (a destra).

I principali parametri di progetto dei dispositivi grandi (Mezzaluna M1) sono riportati in Tabella 1, in accordo alla normativa UNI EN 15129 (Figura 3):

Tabella 1. Riepilogo dei risultati medi riferiti al terzo ciclo per il dispositivo Mezzaluna M1.

Mezzaluna M1 – ampiezza 72cm	Parametri di Progetto	
Spostamento di progetto	d_{bd} [mm]	40.0
Spostamento associato allo snervamento	d_1 [mm]	18.6
Rigidezza di progetto del primo ramo	k_1 [kN/mm]	1.00
Rigidezza di progetto del secondo ramo	k_2 [kN/mm]	0.27
Rigidezza di progetto efficace	k_{eff} [kN/mm]	0.595
Smorzamento di progetto efficace	ξ_{eff} [%]	18.9
Carico assiale di progetto a d_{bd}	V_{Ebd} [kN]	23.9

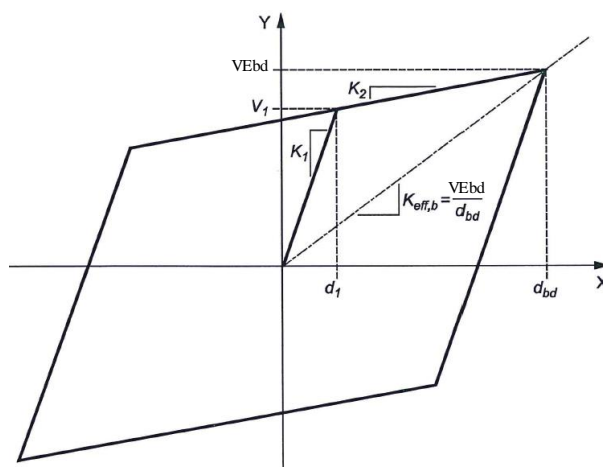


Figura 3. Legame isteretico per dispositivi dissipativi non lineari (UNI EN 15129).

I dispositivi piccoli (Dissipatore 190) si rendono necessari nel caso la presenza di impianti impedisca o renda difficoltoso l'inserimento dei dispositivi grandi (Mezzaluna M1). I principali parametri dei dispositivi piccoli sono:

Tabella 2. Riepilogo dei risultati medi riferiti al terzo ciclo per i dispositivi Dissipatori 190.

Dissipatori 190 – ampiezza 19cm	Parametri di Progetto	
Spostamento di progetto	d_{bd} [mm]	10.0
Spostamento associato allo snervamento	d_1 [mm]	3.60
Rigidezza di progetto del primo ramo	k_1 [kN/mm]	1.749
Rigidezza di progetto del secondo ramo	k_2 [kN/mm]	0.39
Rigidezza di progetto efficace	k_{eff} [kN/mm]	0.868
Smorzamento di progetto efficace	ξ_{eff} [%]	17.50
Carico assiale di progetto a d_{bd}	V_{Ebd} [kN]	8.44

Figura 4 riporta la risposta sperimentale di entrambe le tipologie di dispositivi.

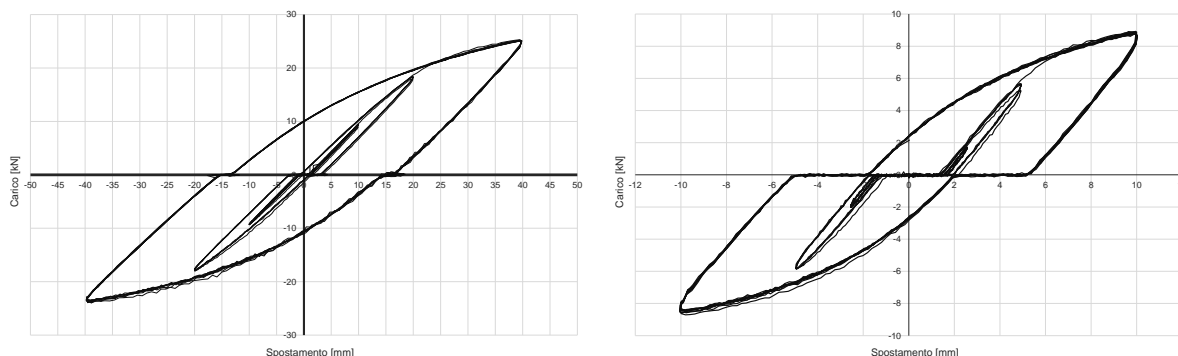


Figura 4. Grafico carico-spostamento della traversa per la prova ciclica della mezzaluna M1 (a sinistra) e del dissipatore 190 (a destra), in cui è evidente il gioco foro-bullone.

Il presente manuale illustra i criteri di progettazione nel caso di inserimento dei dispositivi dissipativi Stabilflex nelle connessioni trave-pilastro. La procedura di dimensionamento illustrata vale per entrambe le tipologie di dispositivo.

A supporto della procedura, nella sezione conclusiva del manuale, è stato realizzato un esempio di dimensionamento prendendo a riferimento un caso studio.

In appendice è descritto il caso di inserimento dei dispositivi di collegamento trave-pilastro nelle nuove costruzioni, i quali contribuiscono a irrigidire la struttura e a dissipare energia sismica. Sempre in appendice sono riportate le principali caratteristiche dei dispositivi di connessione di dimensioni ridotte (Dissipatore 190), che possono essere utilizzati nel caso la presenza di impianti in prossimità dei giunti trave-pilastro impedisca o renda difficile l'inserimento dei dispositivi di dimensioni maggiori, e le disposizioni da seguire per la sostituzione dei dispositivi a seguito di un evento sismico.

2. DIMENSIONAMENTO DEI DISPOSITIVI IN EDIFICI ESISTENTI

La procedura di dimensionamento consiste nella definizione del numero di dispositivi da impiegare a partire dal presupposto di formazione di una cerniera plastica al piede dei pilastri. Questo approccio porta alla definizione del numero di dispositivi da utilizzare in ciascuna connessione nell'ipotesi di comportamento dissipativo della medesima. A valle della progettazione, viene proposta una procedura per valutare gli spostamenti attesi a seguito dell'inserimento dei dispositivi.

Terminato il dimensionamento, le successive verifiche richiedono l'adozione di analisi non-lineari, statiche ("push-over") oppure dinamiche ("time history").

La procedura di dimensionamento prevede l'ipotesi di equivalenza tra il telaio con i dispositivi nella loro effettiva posizione e un telaio con connessioni elastiche di tipo rotazionale in corrispondenza del nodo trave-pilastro. Tale equivalenza è giustificata dalle considerazioni seguenti.

Si consideri inizialmente la seguente schematizzazione, in cui il dispositivo di connessione trave-pilastro è rappresentato da una molla assiale.

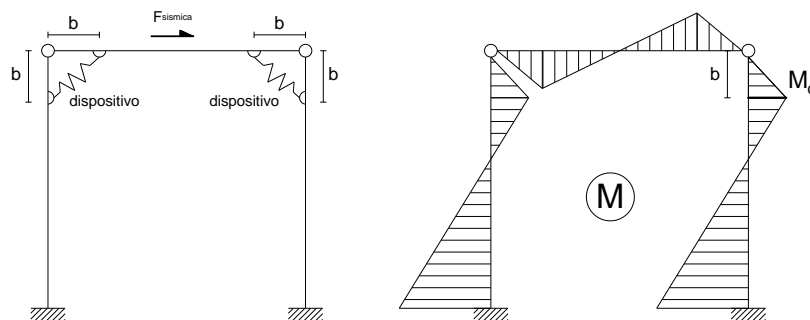


Figura 5. Schema statico telaio con molla assiale e andamento del momento flettente.

Dove M_d è il momento dovuto alla presenza del dispositivo e b rappresenta la distanza tra i punti di applicazione del dispositivo e il vincolo trave-pilastro, che in fase di pre-dimensionamento è considerato una cerniera. Sulla base della schematizzazione presentata in Figura 5 è possibile effettuare una valutazione delle sollecitazioni di taglio e momento flettente nella trave e nel pilastro prima (Figura 6) e dopo (Figura 7) l'inserimento dei dispositivi di connessione.

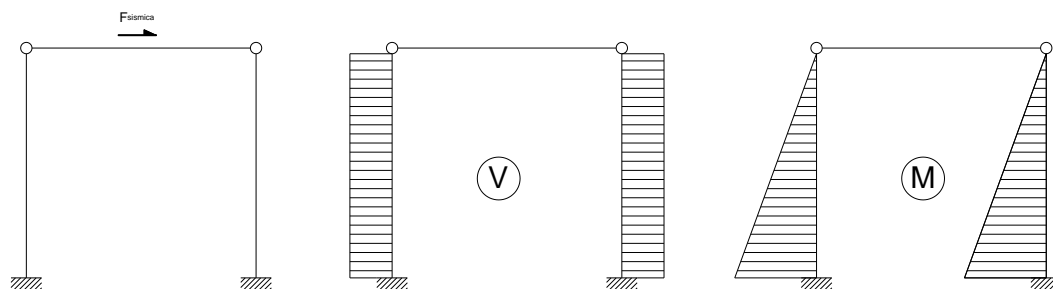


Figura 6. Andamento delle azioni interne in assenza di dispositivi di connessione trave-pilastro.

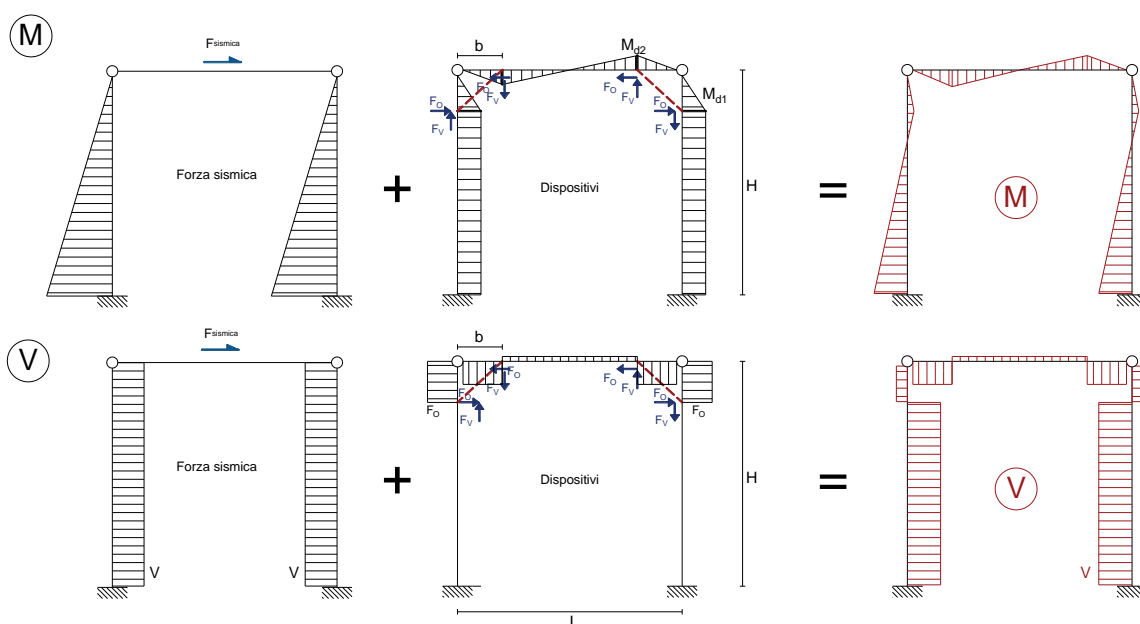


Figura 7. Andamento delle azioni interne (M momento flettente; V taglio) in presenza dei dispositivi di connessione trave-pilastro

Dove F_O e F_V sono rispettivamente la forza orizzontale e la forza verticale associate al dispositivo di connessione trave-pilastro, mentre $2V$ è la forza sismica applicata al telaio. Dalla Figura 7 è possibile ottenere le seguenti espressioni:

$$M_{d1} = F_O \cdot b$$

$$M_{d2} = \frac{F_V \cdot b}{L/2} \cdot \left(\frac{L}{2} - b\right)$$

Sulla base degli schemi statici sopra riportati e nell'ipotesi che la dimensione b del dispositivo sia piccola rispetto alla lunghezza della trave e all'altezza del pilastro, si ottiene che $M_{d2} = F_V \cdot b$. È quindi possibile operare una semplificazione sostituendo allo schema statico con molla assiale (riportato in Figura 5) lo schema statico con molla rotazionale che porta a un valore di momento pari a M_d (Figura 8).

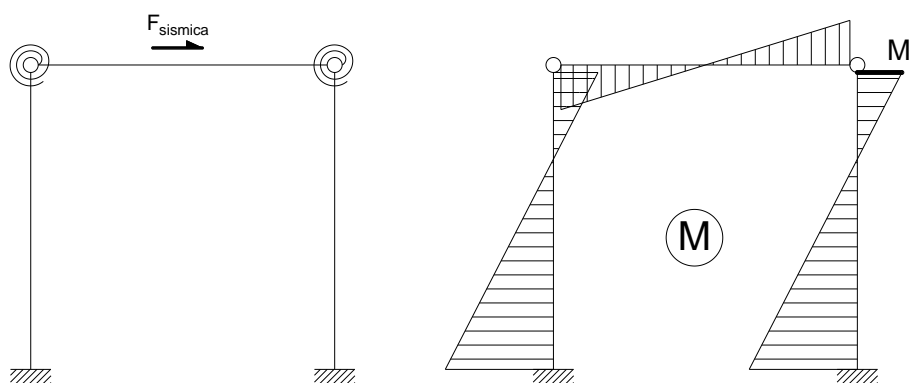


Figura 8. Schema statico con molla rotazionale.

Fissata la dimensione b del dispositivo, all'aumentare della lunghezza della trave e/o dell'altezza del pilastro (per lo schema riportato assunte entrambe pari a L) si ottiene un'approssimazione sempre migliore da molla assiale in corrispondenza dei punti di applicazione del dispositivo a molla rotazionale in corrispondenza della connessione trave-pilastro. Pertanto, considerando le dimensioni ridotte del dispositivo e l'applicazione in edifici industriali che prevedono luci delle travi e altezza dei pilastri elevate, è possibile approssimare il comportamento statico riportato in Figura 5 con l'idealizzazione schematizzata in Figura 8.

Inoltre, a partire dagli schemi statici presentati precedentemente (in Figura 5, Figura 7 e Figura 8) è possibile definire una correlazione tra la forza di attivazione del dispositivo F_d e il momento M_d . Si consideri il seguente schema statico:

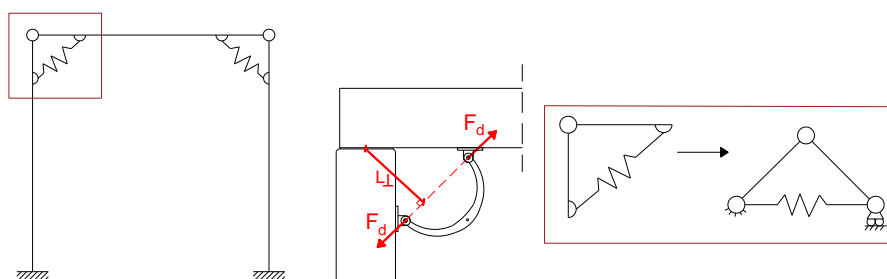


Figura 9. Schema statico con collegamento trave-pilastro schematizzato con molla assiale.

Ora, si ipotizzi di imprimere uno spostamento unitario nel nodo (Figura 10). Ciò, in campo elastico, darà luogo alla nascita di una forza nel dispositivo $F_{\text{dispositivo}}$ pari a $n_d^* \cdot k_1 \cdot 1$, dove k_1 è appunto la rigidezza elastica lineare del singolo dispositivo e n_d^* il numero di dispositivi presenti.

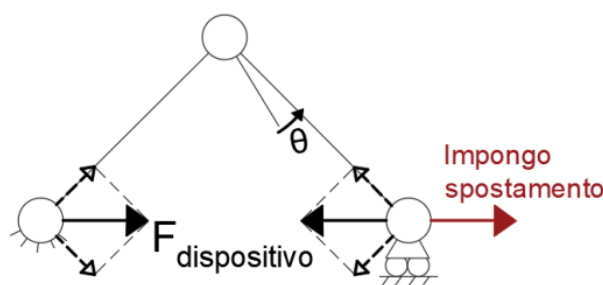


Figura 10. Schema statico con molla assiale e spostamento assegnato.

Attraverso lo schema riportato in Figura 10 è possibile ricavare il valore di rigidezza equivalente alla rigidezza rotazionale, k , dello schema statico illustrato in Figura 11. Tale valore è pari a

$$k = n_d \cdot k_1 \cdot (L_{\perp})^2$$

Dove L_{\perp} è la distanza tra l'asse del dispositivo (linea che collega i due punti di aggancio alla struttura) e il centro di rotazione (Figura 9), assunto ad esempio in corrispondenza della mezziera dell'appoggio della trave.

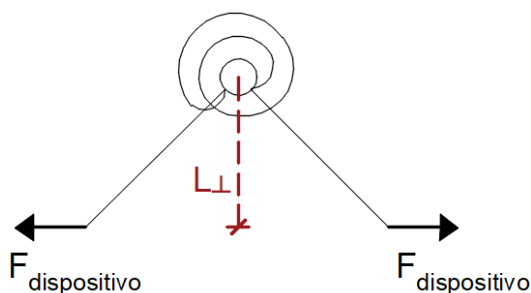


Figura 11. Schema statico con molla rotazionale.

Analogamente è possibile trovare la relazione tra la forza F_d e il momento M_d :

$$M_d = F_d \cdot L_{\perp}$$

2.1 Scelta del numero di dispositivi

Il primo step richiesto dalla procedura di dimensionamento è quello di conoscere la geometria del pilastro, l'azione sollecitante N_{Ed} sul pilastro, le caratteristiche medie dei materiali e il fattore di confidenza (FC) associato alla struttura. Per quanto riguarda il fattore di confidenza si fa riferimento alla seguente tabella.

Tabella 3. Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio [Circolare 21/01/2019, 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].

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e indagini limitate in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e prove limitate in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1.35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con indagini limitate in situ; in alternativa indagini estese in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con prove limitate in situ; in alternativa da prove estese in situ.	Tutti	1.20
LC3		Elaborati progettuali completi con indagini limitate in situ; in alternativa indagini esaustive in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con prove estese in situ; in alternativa da prove esaustive in situ.	Tutti	1.00

Si procede quindi per iterazioni ipotizzando la formazione di una cerniera plastica alla base del pilastro e che l'inserimento del dispositivo comporti la nascita di un momento flettente in sommità. Assumendo quindi una distribuzione lineare del momento flettente e in prima approssimazione il punto di inflessione (momento nullo) posto a $0,80 \cdot H$ (altezza efficace $H_{eff}^{(0)} = 0,80H$, Figura 12), si calcola il taglio $V^{(0)}$, che corrisponde all'azione trasmessa dalla trave al pilastro, associato all'altezza efficace di prima approssimazione $H_{eff}^{(0)}$:

$$V^{(0)} = \frac{M_{Rd}}{H_{eff}^{(0)}}$$

Dove M_{Rd} è il momento resistente alla base della colonna calcolato sulla base dei valori di resistenza medi dei materiali e del fattore di confidenza FC, come previsto dalle NTC2018, Cap. 8.

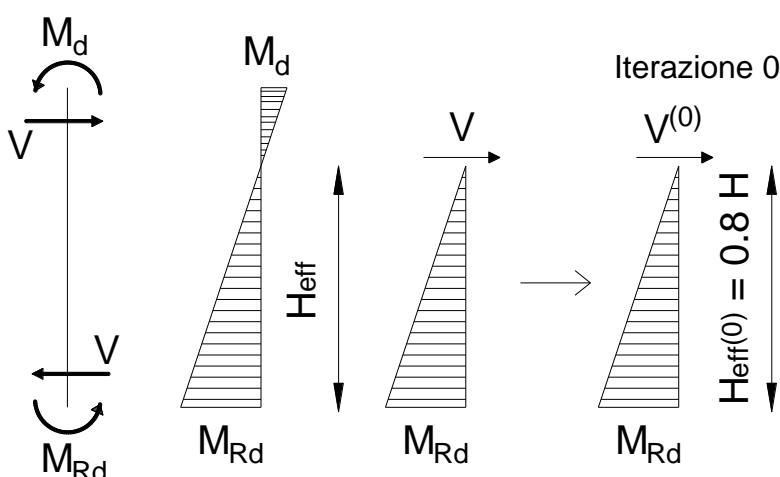


Figura 12. Schema semplificato per la distribuzione del momento flettente lungo la colonna per il calcolo di H_{eff} di prima approssimazione.

Ipotizzando il sistema di dispositivi (in numero pari a n_a^*) di connessione trave-pilastro quale unico elemento in grado di trasferire l'azione di taglio in sommità del pilastro (trascurando cioè l'effetto attrito), si determina $F_d^{(0)}$ (cioè la forza totale richiesta al sistema di dispositivi di collegamento trave-pilastro). Si possono verificare due condizioni:

1) Pilastro laterale

Nel caso di pilastro laterale o di estremità, la forza del sistema di dispositivi, nell'ipotesi di posizionamento a 45° , deve essere tale da verificare la seguente condizione:

$$F_d^{(0)} = V^{(0)} \cdot \sqrt{2}$$

2) Pilastro centrale

Nel caso di pilastro centrale o interno, essendoci dispositivi di collegamento da ciascun lato del pilastro, la forza richiesta dal sistema di dispositivi su ciascun lato del pilastro deve essere superiore o uguale a:

$$F_d^{(0)} = V^{(0)} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}$$

Sulla base delle considerazioni descritte nel paragrafo 2, per entrambi i casi sopra descritti, cioè pilastro laterale e pilastro centrale, è possibile definire:

$$M_d^{(0)} = F_d^{(0)} \cdot L_{\perp} = (V^{(0)} \cdot \sqrt{2}) \cdot L_{\perp}$$

Dove $M_d^{(0)}$ è il momento associato al sistema di dispositivi trave-pilastro. Determinata $F_d^{(0)}$, e quindi $M_d^{(0)}$, è possibile ricalcolare l'altezza H_{eff} da considerazioni di equilibrio (Figura 13).

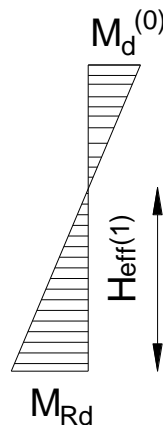


Figura 13. Schema semplificato per la distribuzione del momento flettente lungo la colonna per il calcolo di H_{eff} per le iterazioni successive.

$$H_{eff}^{(1)} = \frac{M_{Rd} \cdot H}{M_d^{(0)} + M_{Rd}}$$

E quindi ridefinire $V^{(1)}$ e $F_d^{(1)}$ sulla base delle considerazioni precedenti. È quindi possibile definire il numero di dispositivi n_d^i in ciascuna connessione trave-pilastro (su ciascun lato) dalla seguente espressione:

$$n_d^i \geq \frac{F_d^{(i)}}{V_{Ebd}}$$

Dove $F_d^{(i)}$ corrisponde alla forza F_d calcolata all'i-esima iterazione e V_{Ebd} corrisponde alla forza di attivazione del singolo dispositivo.

Se $F_d^{(0)}$ e $F_d^{(1)}$ sono associati allo stesso numero di dispositivi, quest'ultimo calcolato come il rapporto tra $F_d^{(0)}$ e la forza di attivazione del singolo dispositivo, allora il criterio di convergenza è verificato. In caso contrario si procede con delle ulteriori iterazioni attraverso il calcolo di $H_{eff}^{(2)} \rightarrow F_d^{(2)}$, $H_{eff}^{(3)} \rightarrow F_d^{(3)}$, ..., $H_{eff}^{(n)} \rightarrow F_d^{(n)}$.

Il criterio di convergenza è soddisfatto quando $F_d^{(i)}$ e $F_d^{(i-1)}$ sono associati allo stesso numero di dispositivi.

È quindi possibile definire il numero di dispositivi $n_{d\text{ finale}}$ in ciascuna connessione trave-pilastro (su ciascun lato) dalla seguente espressione:

$$n_{d \text{ Finale}} \geq \frac{F_d^{(n)}}{V_{Ebd}}$$

Dove $F_d^{(n)}$ corrisponde alla forza F_d calcolata all'ultima iterazione e V_{Ebd} corrisponde alla forza di attivazione del singolo dispositivo.

È inoltre opportuno verificare che la sommità del pilastro esistente sia in grado di incassare il momento generato dal dispositivo e che la componente verticale della forza associata al dispositivo non ecceda il peso proprio della trave, così da evitare il possibile sollevamento della stessa.

La procedura di dimensionamento è riassunta nel diagramma di flusso di Figura 14.

EDIFICI ESISTENTI

Dimensionamento

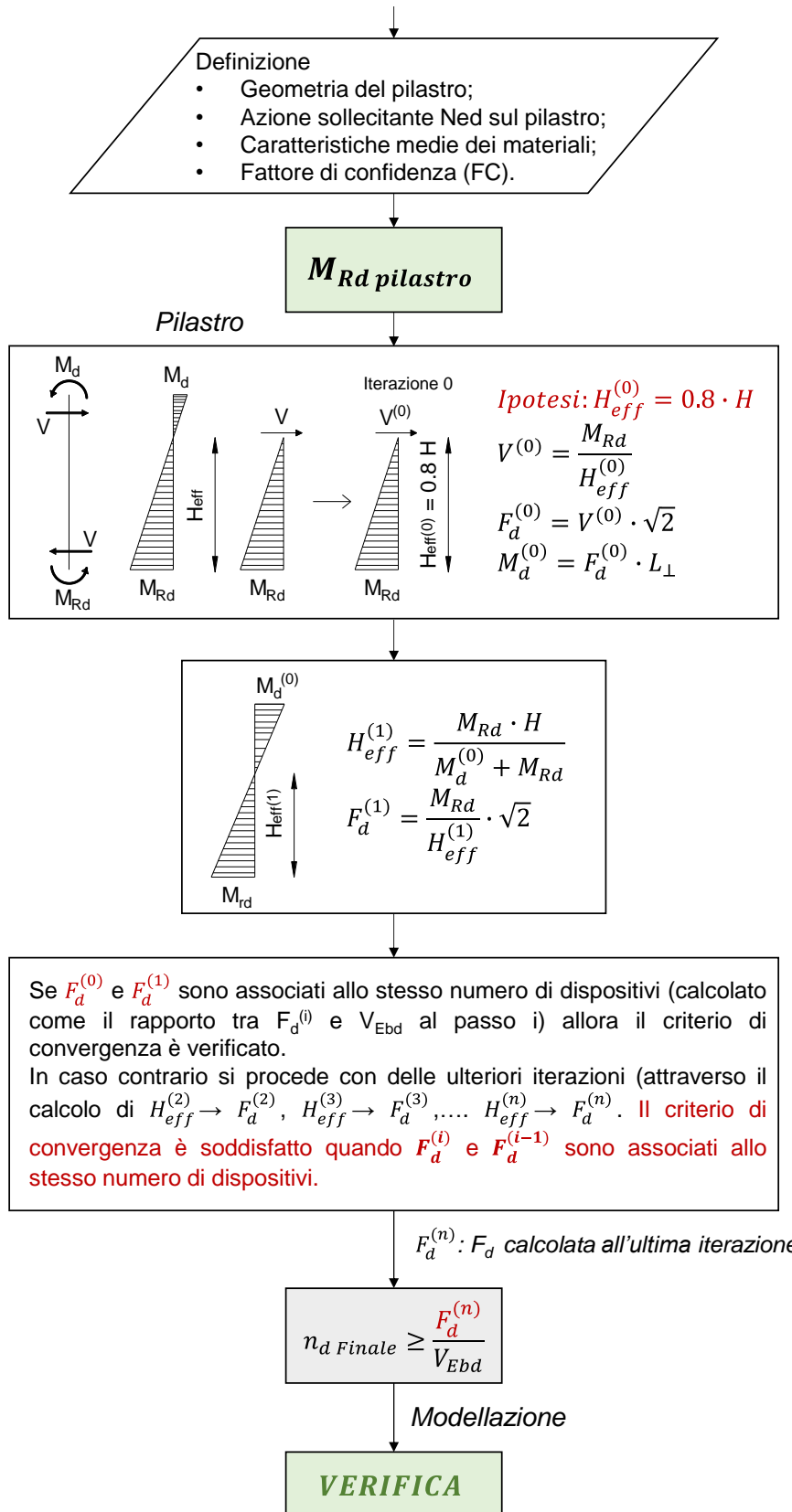


Figura 14. Procedura di calcolo per la definizione del numero di dispositivi dissipativi n_d .

2.2 Verifica preliminare elastica degli spostamenti attesi

2.2.1 Calcolo del periodo proprio della struttura

Per la stima degli spostamenti attesi a valle dell'inserimento dei dispositivi, si calcola dapprima il periodo proprio della struttura. Considerando l'edificio oggetto di intervento è possibile calcolare, in prima approssimazione, il periodo proprio fondamentale associato alla struttura grazie alla seguente formulazione relativa a un sistema a un grado di libertà equivalente:

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^*}{k^*}}$$

Dove m^* rappresenta la massa in sommità alla struttura, pari alla massa della copertura e della quota parte dei pannelli di chiusura, nonché di metà massa dei pilastri, mentre k^* rappresenta la rigidezza equivalente della struttura ottenuta a partire dalle seguenti formulazioni:

Per pilastri centrali

Nel caso di pilastri interni, cioè dei pilastri centrali rispetto alla sagoma dell'edificio considerato, ipotizzando l'inserimento dello stesso numero di dispositivi da entrambi i lati del pilastro al fine di ottenere un comportamento globale il più possibile simmetrico, è possibile utilizzare la seguente espressione per il calcolo della rigidezza.

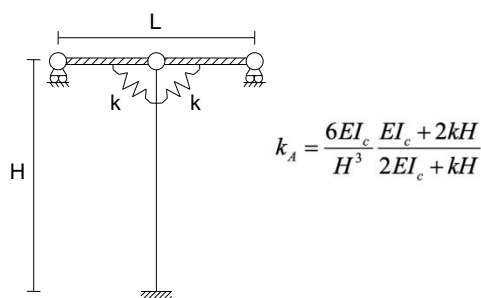


Figura 15. Calcolo della rigidezza k_A nel caso di pilastro centrale.

Dove E è il modulo di elasticità del calcestruzzo, I_c è il momento di inerzia del pilastro e k è la rigidezza rotazionale dei dispositivi di collegamento trave-pilastro come precedentemente definito nel paragrafo 2

$$k = n_d^* k_1 \cdot (L_1)^2$$

Il termine $E \cdot I_c$ rappresenta la rigidezza della sezione fessurata, che allo SLV può essere ridotta, ad esempio del 50%, per tener conto della fessurazione).

Per pilastri laterali

Nel caso di pilastri di estremità, cioè laterali, ipotizzando la presenza di dispositivi di connessione trave-pilastro solo da un lato, la formula per il calcolo della rigidezza del pilastro diventa:

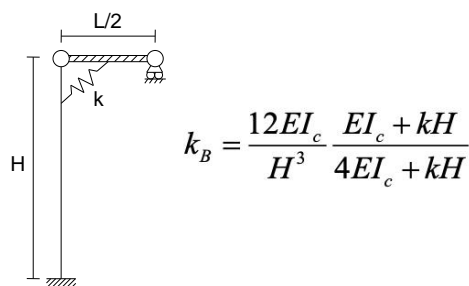


Figura 16. Calcolo della rigidezza k_B nel caso di pilastro laterale.

Dove i simboli hanno il medesimo significato della situazione relativa ai pilastri centrali.

In funzione del numero di pilastri interni e di estremità presenti nell'edificio oggetto di intervento è quindi possibile determinare la rigidezza k^* associata al sistema.

$$k^* = k_A \cdot n_{\text{Pilastri_centrali}} + k_B \cdot n_{\text{Pilastri_lateral}}^{\circ}$$

Conoscendo m^* e k^* è possibile stimare il periodo proprio della struttura T^* .

A questo punto è possibile definire gli spostamenti attesi in funzione del periodo proprio della struttura considerando l'aggiunta di dispositivi dissipativi di collegamento trave-pilastro.

In funzione del periodo T^* associato alla struttura è possibile ricavare, dallo spettro di spostamento elastico da Normativa a SLV e SLC, il valore di spostamento corrispondente $S_d(T^*) = S_a(T^*) \left(\frac{T^*}{2\pi}\right)^2$.

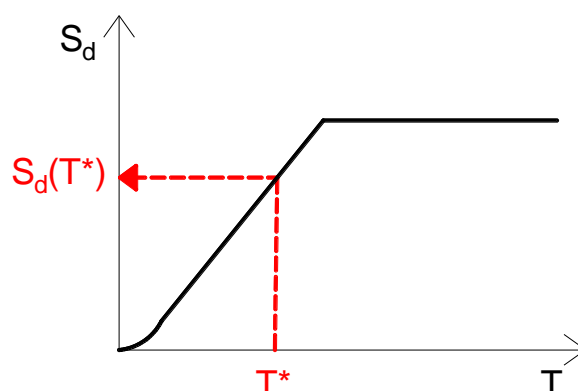


Figura 17. Spettro di spostamento elastico S_d (q pari a 1).

2.3 Verifica del comportamento strutturale con dispositivi dissipativi

La validazione della progettazione avviene tramite analisi FEM. La struttura oggetto di intervento viene modellata inserendo il legame isteretico associato a ciascun dispositivo trave-pilastro.

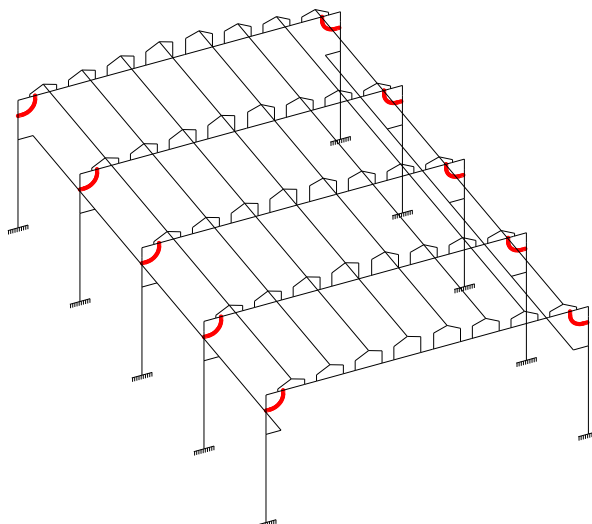


Figura 18. Esempio di modellazione di un edificio prefabbricato industriale con dispositivi di connessione trave-pilastro.

Per quanto riguarda la definizione del comportamento isteretico del dispositivo di connessione trave-pilastro, questo può essere modellato con legame bilineare elasto-plastico oppure con modello non-lineare ad esempio di tipo Bouc-Wen. Nella figura seguente è proposta una schematizzazione dei due comportamenti isteretici.

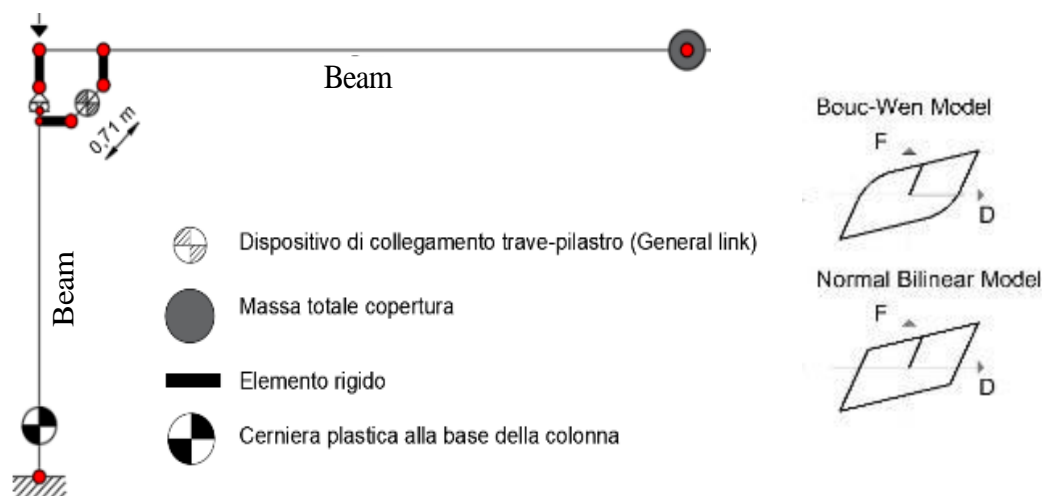


Figura 19. Modelli isteretici atti a simulare il comportamento forza-spostamento del dispositivo.

Nelle tabelle seguenti sono riportati i principali parametri utili per la modellazione di ciascun dispositivo Mezzaluna M1 con legame bilineare elasto-plastico (Tabella 4) e con legame Bouc-Wen (Tabella 5).

Tabella 4. Legame bilineare elasto-plastico per il dispositivo Mezzaluna M1.

Legame Bilineare Elasto-Plastico	
F [kN]	D [mm]
18.6	18.6
23.9	40.0

Tabella 5. Legame Bouc-Wen per il dispositivo Mezzaluna M1.

Legame Bouc-Wen					
k [kN/mm]	Fy [kN]	r	s	a	b
1	18.6	0.2475	2.0	0.5	0.5

In Figura 19 la connessione trave-pilastro è stata modellata, in prima approssimazione, trascurando l'attrito tra trave e pilastro. Nello specifico la connessione è stata modellata attraverso un vincolo relativo di carrello.

2.3.1 Verifica nel piano del dispositivo

Conclusa la modellazione si procede alla verifica del collegamento trave-pilastro nel piano del collegamento e, successivamente, nel piano ortogonale.

Per la verifica nel piano vengono analizzati due metodi: il primo con analisi statica non lineare ("Pushover") e il secondo con analisi dinamica non lineare ("Time History").

2.3.1.1 Analisi non lineare statica – Metodo B: Capacity Spectrum

Questo primo metodo di verifica descritto nella Circolare 21/01/2019, 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), considerando lo spettro da normativa a stato limite di prevenzione al collasso, essendo una verifica in termini di spostamento di una struttura con dissipatori, consente di valutare lo smorzamento aggiuntivo associato all'inserimento dei dispositivi e da questo ottenere uno spettro elastico sovra-smorzato da confrontare con quanto ottenuto dalla bi-linearizzazione della curva di Pushover.

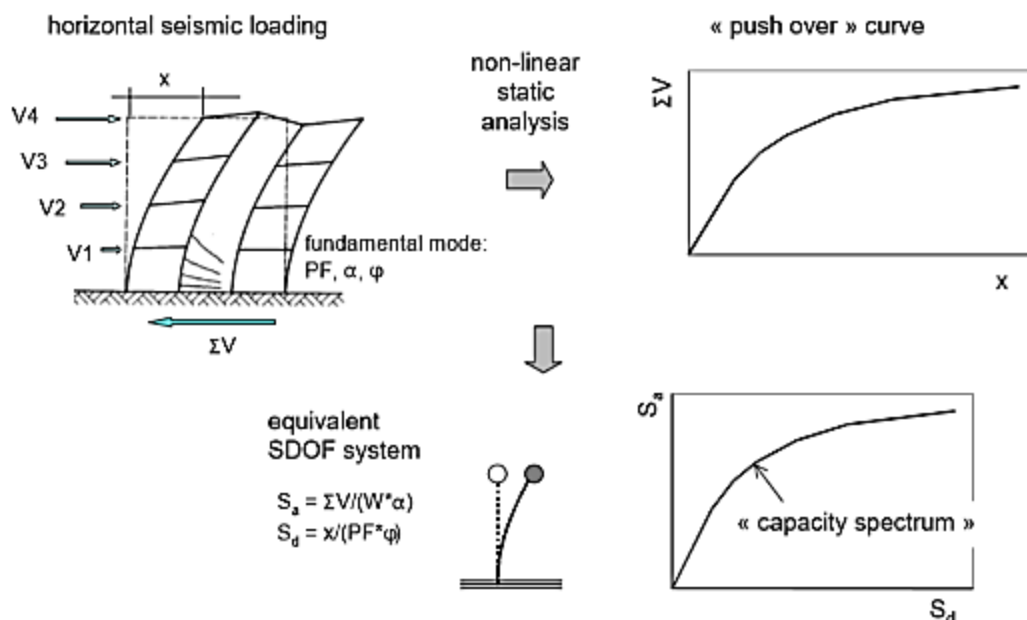


Figura 20. Creazione della curva di Pushover e definizione del Capacity Spectrum per un sistema a un grado di libertà equivalente.

L'analisi non lineare statica consente di determinare la curva di capacità della struttura, espressa dalla relazione $F^* \cdot d^*$, in cui F^* è il taglio alla base e d^* lo spostamento di un punto di controllo, che per gli

edifici è in genere rappresentato dal centro di massa dell'ultimo orizzontamento. Il confronto tra la curva di capacità e la domanda di spostamento consente di determinare il livello di prestazione raggiunto. A tal fine si associa al sistema strutturale reale un sistema strutturale equivalente a un grado di libertà. Viene quindi eseguita l'analisi pushover che permette di ottenere una curva di capacità in termini di forza F^* e spostamento d^* . Successivamente si procede a bi-linearizzare la curva di Pushover come indicato dalla suddetta Circolare.

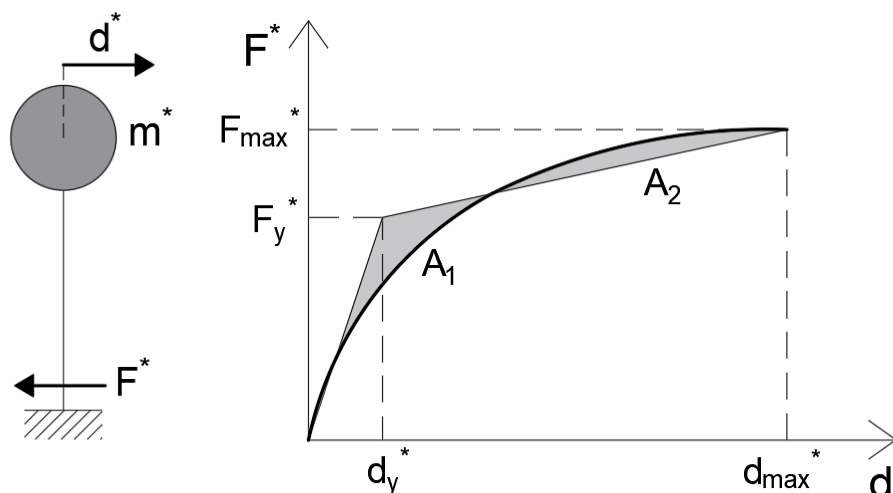


Figura 21. Bi-linearizzazione equivalente della curva di Pushover.

A partire dalla curva bi-linearizzata, si calcola lo smorzamento viscoso equivalente associato, espresso in percentuale attraverso la seguente espressione:

$$\xi_{eq} = k \frac{63.7 (F_y^* d_{max}^* - F_{max}^* d_y^*)}{F_{max}^* d_{max}^*} + 5$$

Dove il coefficiente k tiene conto delle capacità dissipative della struttura e in particolare delle caratteristiche del ciclo di isteresi; esso è pari a 0.33 per strutture poco dissipative e 0.66 per strutture dissipative. Nel caso in esame si assume $k=0.33$, valore che sarà poi validato dall'esempio applicativo, essendo lo spostamento al limite elastico dei dispositivi pari a 18.6 mm.

Grazie al coefficiente ξ_{eq} così calcolato si ottiene lo spettro sovra-smorzato utilizzando la seguente espressione fornita dalle NTC:

$$S_a^{sovrasmorzato} = \frac{S_a}{\eta}$$

Dove:

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi_{eq}}} \geq 0.55$$

La struttura è verificata se è soddisfatta la seguente relazione (in termini di spostamento a SLC):

$$S_{d_{pushover}} \geq S_{d_{spettro-sovrasmorzato}}$$

Il valore di S_d (espresso in metri) viene definito in funzione di S_a attraverso la seguente relazione:

$$S_d = S_a \cdot \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2$$

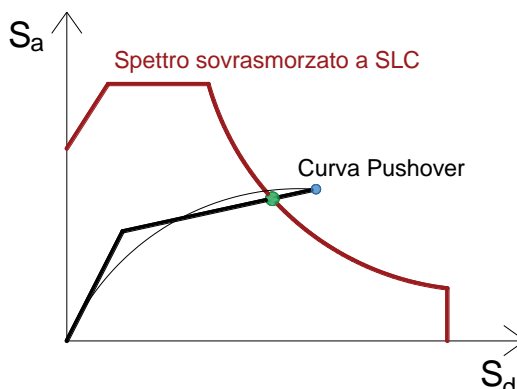


Figura 22. Individuazione del punto di prestazione all'interno del piano ADRS (in verde è indicato il punto di prestazione).

2.3.1.2 Analisi Dinamica Non Lineare

Questo secondo metodo di verifica si basa sull'utilizzo di analisi dinamiche non lineari, di tipo Time History, al fine di verificare le nuove prestazioni della struttura in seguito all'inserimento dei dispositivi di collegamento trave-pilastro. Nello specifico possono essere considerati set di accelerogrammi spettro-compatibili per il sito in esame.

2.3.2 Verifica nel fuori piano del dispositivo

Per l'analisi a Elementi Finiti del possibile ribaltamento della trave nel piano ortogonale è possibile seguire la modellazione proposta nell'immagine seguente, esplicativa del singolo collegamento trave-pilastro. Nella modellazione devono essere inclusi gli effetti geometrici del secondo ordine, cioè gli effetti P-delta.

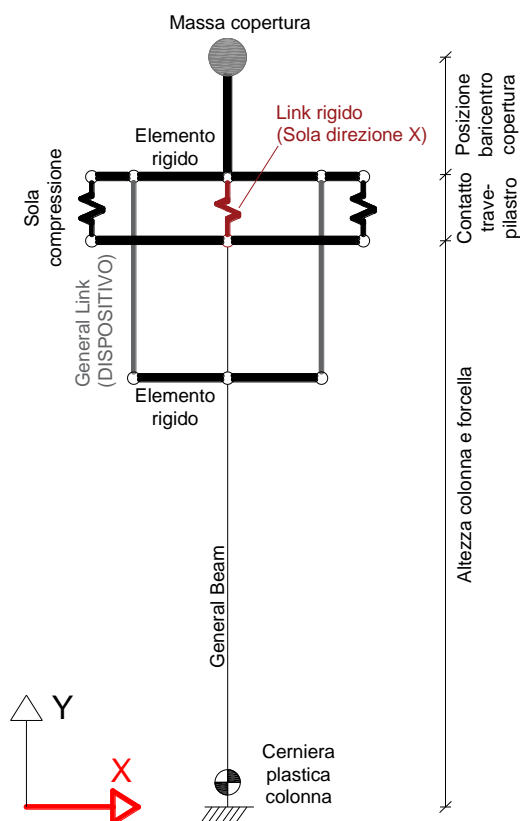


Figura 23. Esempio di modellazione per l'analisi del ribaltamento nel piano ortogonale (sisma in direzione X).

Il pilastro è modellato come elemento beam incastrato alla base. La cerniera plastica alla base della colonna è inserita in termini di momento-rotazione. Il contatto tra la trave e il pilastro è modellato con un link rigido finalizzato a impedire i soli scorrimenti orizzontali in direzione X (cioè impedire gli spostamenti in direzione parallela rispetto alla direzione di applicazione della forzante sismica così da considerare implicitamente il vincolo allo scorrimento fornito dalle forcelle), mentre è consentita la rotazione. I dispositivi di collegamento trave-pilastro sono modellati come general link a cui è stato attribuito il comportamento isteretico in termini di forza-spostamento; questi sono collegati all'asse del pilastro per mezzo di elementi rigidi in modo da inserirli nella loro posizione corretta. Il contatto tra la trave e il pilastro è modellato attraverso l'inserimento di due link con comportamento di sola compressione (ad esempio SLIP bilinear/compression).

La trave è modellata come un elemento rigido nel fuori-piano con massa traslazionale associata alla porzione di copertura analizzata posta in corrispondenza della quota del baricentro della copertura. Ai fini della modellazione sono dapprima applicati i carichi associati alla copertura e il peso proprio del pilastro e successivamente, partendo da questa condizione, sono condotte analisi dinamiche non lineari, di tipo Time History. L'analisi è eseguita in regime di grandi spostamenti.

Ai fini della verifica al ribaltamento, si può comunque procedere in modo conservativo valutando il taglio necessario all'innescio del ribaltamento prima e dopo l'inserimento dei dispositivi di collegamento trave-pilastro. In Figura 24 è schematicamente rappresentata la situazione indeformata iniziale.

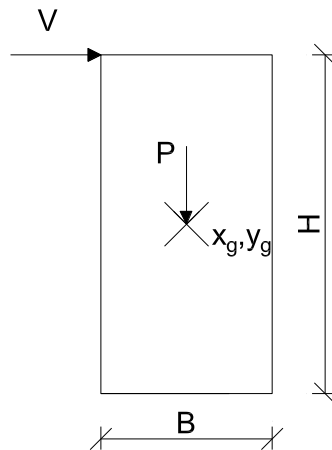


Figura 24. Analisi del ribaltamento (situazione iniziale indeformata).

Dove B indica la larghezza dell'appoggio tra trave e pilastro e (x_g, y_g) le coordinate del baricentro della trave. Il punto di applicazione della forza ribaltante V si trova nel baricentro della copertura a una quota H rispetto all'appoggio della trave.

Inizialmente, ipotizzando l'assenza dei dispositivi di collegamento, si procede alla valutazione del taglio associato all'innesco del ribaltamento secondo equilibrio:

$$P \cdot \frac{B}{2} = V \cdot H$$

Da cui:

$$V = \frac{P \cdot B}{2H}$$

Successivamente si procede alla valutazione del ribaltamento nel piano ortogonale a seguito dell'introduzione dei dispositivi di collegamento.

1) Presenza di un unico dispositivo posizionato in mezzeria all'appoggio trave-pilastro:

In questo primo caso si considera la presenza di un unico dispositivo di collegamento trave-pilastro posizionato al centro della trave. La situazione è quindi la seguente, dove B_{disp} rappresenta la posizione del dispositivo di collegamento:

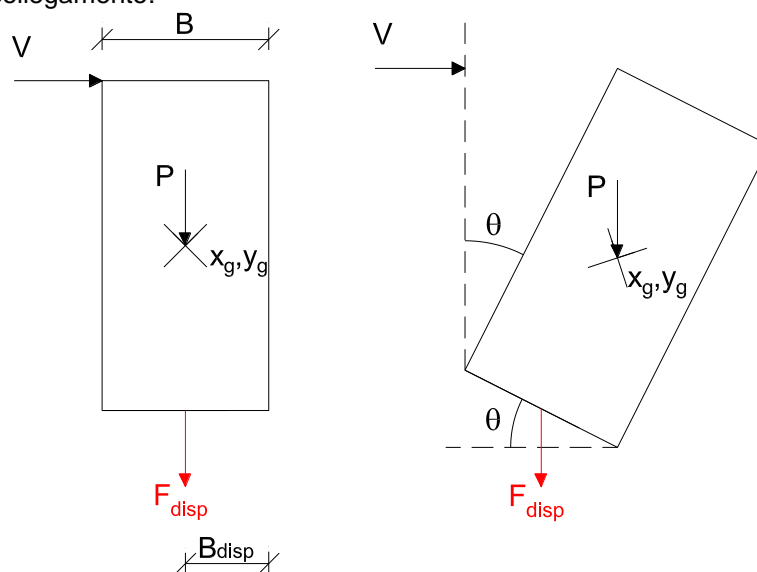


Figura 25. Analisi del ribaltamento nel piano ortogonale nel caso di dispositivo posizionato nella mezzzeria dell'appoggio trave-pilastro.

2) Presenza di più dispositivi posizionati all'estremità dell'appoggio trave-pilastro:

In questo secondo caso è stata ipotizzata la presenza di più dispositivi. La distanza tra i due dispositivi è definita B_{disp} , mentre F_{disp} è la forza di ciascun dispositivo.

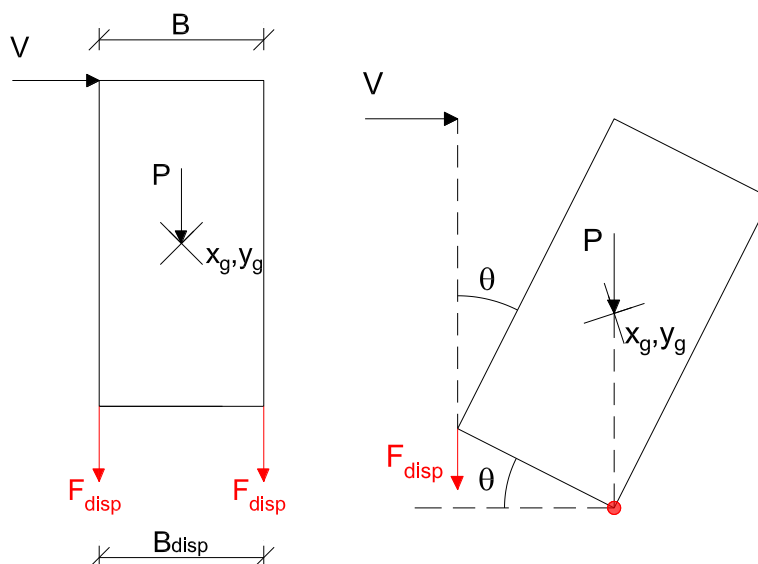


Figura 26. Analisi del ribaltamento nel piano ortogonale nel caso di dispositivi posizionati a ciascuna estremità dell'appoggio trave-pilastro.

Si consideri la situazione limite in cui l'angolo di apertura θ è tale per cui il carico P si trova direttamente sullo spigolo e i dispositivi sono nella condizione snervata. In questa situazione, incrementando la rotazione, si raggiunge il collasso. La valutazione viene fatta trascurando il contributo del dispositivo compresso in quanto associato a uno spostamento minimo. L'equilibrio si ottiene dalla presente equazione:

$$\sum F_{disp-i} \cdot (B_{disp-i} \cdot \cos \vartheta) - V (H \cdot \cos \vartheta + B \cdot \sin \vartheta) = 0$$

Da cui:

$$V = \sum F_{disp-i} \cdot \frac{B_{disp-i} \cdot \cos \vartheta}{H \cdot \cos \vartheta + B \cdot \sin \vartheta}$$

Dove F_{disp-i} è ricavata dal legame costituito dai dispositivi dissipativi in funzione dello spostamento effettivamente raggiunto. Così facendo è possibile definire il contributo offerto dai dispositivi al fine di evitare il ribaltamento nel piano ortogonale.

3. ESEMPIO DI CALCOLO

Per chiarire i criteri di progettazione sopra descritti è stato sviluppato un esempio di applicazione della procedura prendendo a riferimento un caso studio. Nello specifico è stato considerato un edificio industriale prefabbricato di dimensioni in pianta (20mx32m), con interasse tra i pilastri pari a 8m e altezza totale pari a 6m.

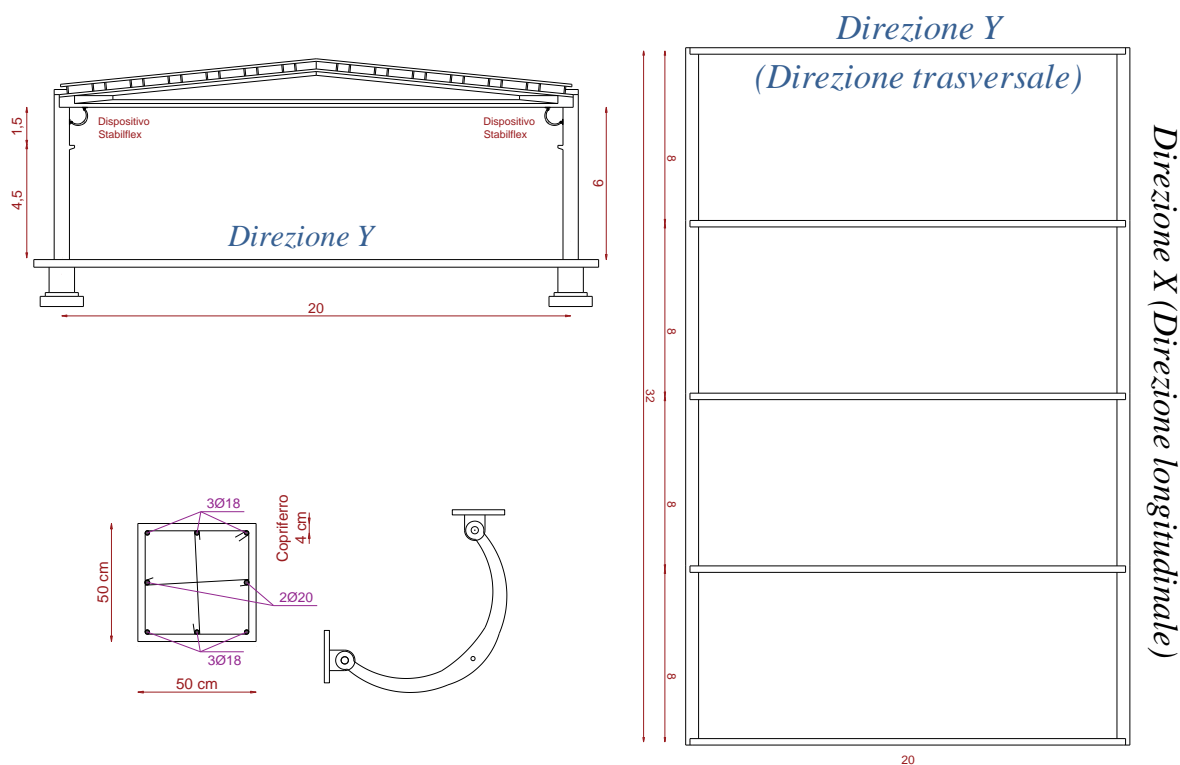


Figura 27. Caratteristiche geometriche del caso studio.

I pilastri hanno dimensioni in pianta pari a (50cmx50cm) e sono realizzati in calcestruzzo armato di classe C45/55 e acciaio FeB44K. Essendo un edificio esistente è stata ipotizzata una percentuale di armatura dei pilastri pari allo 0.8%. La massa della struttura m^* , rappresentata dalla somma della massa della copertura e di quota parte della massa associata ai pannelli perimetrali e ai pilastri, è pari a 500t. L'edificio considerato è ubicato in una zona ad alta sismicità (L'Aquila), su terreno pianeggiante di classe topografica T1 e categoria stratigrafica C.

3.1 Scelta del numero di dispositivi

Dapprima sono definite le caratteristiche meccaniche medie dei materiali ipotizzando un livello di conoscenza della struttura LC2, tipico degli edifici industriali di tipo prefabbricato, a cui è associato un fattore di conoscenza FC pari a 1.2. Essendo il calcestruzzo di classe C45/55 e l'acciaio di tipo FeB44K, le caratteristiche meccaniche da considerare sono pari a:

f_{cd} [MPa]	37.5	Resistenza di calcolo a compressione (cls)
f_{yd} [MPa]	367	Resistenza di calcolo a trazione (acciaio)

Come prima iterazione si ipotizza un valore di H_{eff} pari all'80% dell'altezza totale H. H_{eff} è quindi pari a 4.8 m.

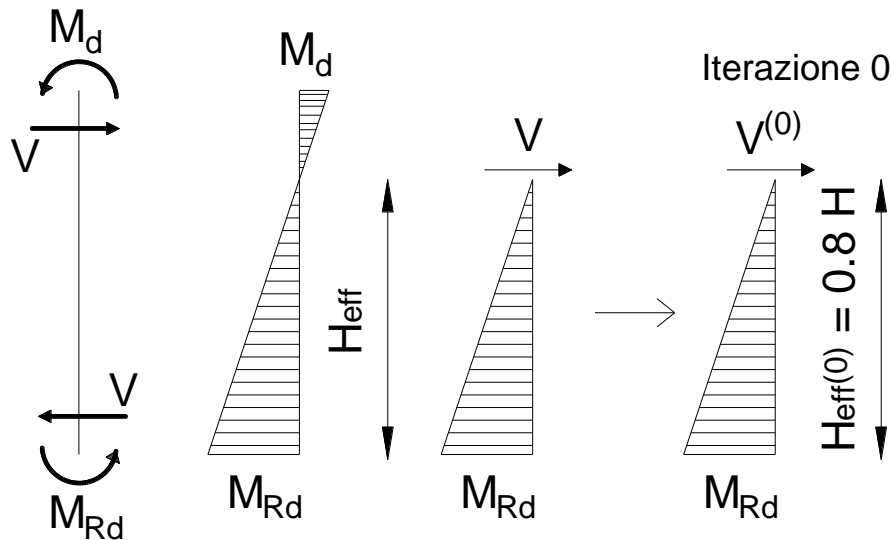


Figura 28. Schema semplificato per la distribuzione del momento flettente (primo tentativo).

Utilizzando un software per l'analisi delle sezioni in C.A. (ad esempio il software VcaSlu del Prof. Piero Gelfi) e inserendo le caratteristiche geometriche, meccaniche e le sollecitazioni gravanti sul pilastro è possibile ottenere il valore del momento resistente M_{Rd} alla base. Esso risulta pari a 293.3 kNm. Si può quindi procedere con la procedura iterativa.

$$V^{(0)} = \frac{M_{Rd}}{H_{eff}^{(0)}} = 61.1 \text{ kN}$$

La capacità dei dispositivi è definita nel modo seguente (dispositivi messi in opera con inclinazione a 45°):

$$F_d^{(0)} = V^{(0)} \cdot \sqrt{2} = 86.4 \text{ kN}$$

In funzione delle caratteristiche geometriche del dispositivo è possibile definire la lunghezza L_{\perp} , pari a 65 cm, necessaria per la definizione del momento associato ai dispositivi di collegamento.

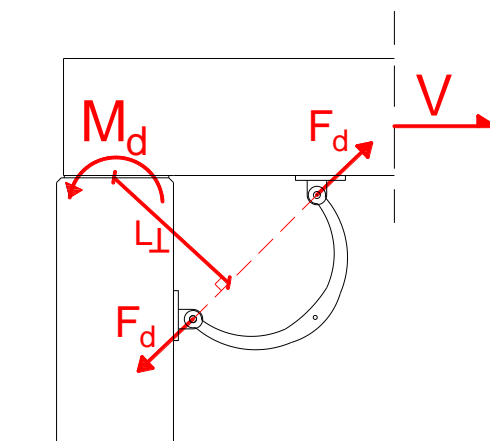


Figura 29. Definizione di L_{\perp} necessaria per il calcolo del momento associato al dispositivo.

Il momento associato al dispositivo è quindi pari a:

$$M_d^{(0)} = F_d^{(0)} \cdot L_{\perp} = 56.2 \text{ kNm}$$

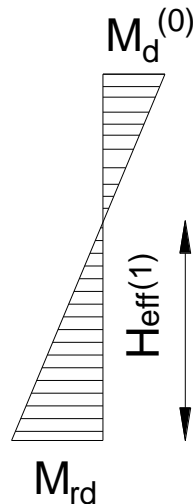


Figura 30. Schema semplificato per la distribuzione del momento flettente (iterazioni successive).

Da questo è possibile definire un nuovo valore di H_{eff} pari a:

$$H_{eff}^{(1)} = \frac{M_{Rd} \cdot H}{M_d^{(0)} + M_{Rd}} = 5.04m$$

La forza richiesta nel singolo collegamento è quindi pari a:

$$F_d^{(1)} = \frac{M_{Rd}}{H_{eff}^{(1)}} \cdot \sqrt{2} = 82.3kN$$

Siccome $F_d^{(0)}$ e $F_d^{(1)}$ sono associati allo stesso numero di dispositivi (calcolato come il rapporto tra F_d e V_{Ebd}) allora il criterio di convergenza è verificato. Sono quindi stati inseriti **quattro dispositivi di collegamento in ciascun giunto**, cioè una forza totale di 95.6kN, con uno spostamento di progetto del singolo dispositivo pari a 40mm.

Per il caso in esame è stato considerato un livello di confidenza LC2 ed è stato trascurato l'attrito trave-pilastro.

3.2 Calcolo del periodo proprio della struttura e stima degli spostamenti attesi a seguito dell'inserimento dei dispositivi

Il periodo della struttura è stimato attraverso la seguente espressione:

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^*}{k^*}}$$

La massa m^* è pari a 500t, mentre la rigidezza globale k^* è calcolata nel modo seguente:

$$k^* = k_B \cdot n_{\text{Pilastri laterali}}^{\circ} = \frac{12EI_c}{H^3} \frac{EI_c + kH}{4EI_c + kH} \cdot 10 = 14153.66 \frac{kN}{m}$$

La rigidezza rotazionale k associata ai dispositivi di collegamento trave pilastro è valutata con la seguente espressione:

$$k = n_d^* \cdot k_1 \cdot (L_{\perp})^2 = 4 \cdot 1 \frac{kN}{mm} \cdot (650mm)^2 = 1690kNm$$

Sulla base di quanto ottenuto dalla procedura di dimensionamento (definita nel paragrafo 3.1) è stata considerata la presenza di quattro dispositivi atti al collegamento trave-pilastro per la definizione della rigidezza rotazionale k (n_d^* pari a 4). L'altezza H è pari a 6 m, il modulo di elasticità E_c , essendo il calcestruzzo di classe C45/55, è pari a 36283 MPa e il momento d'inerzia I_c è pari a $5.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$. La rigidezza E_{cI_c} è stata abbattuta del 50% per tener conto della fessurazione del cls ed è quindi pari a $9.45 \cdot 10^{13} \text{ Nmm}^4$.

Sulla base di queste considerazioni il periodo della struttura T^* è pari a 1.18 s. Entrando nello spettro di spostamento elastico, cioè con fattore di struttura pari a 1, con il valore di periodo T^* si ottiene un valore di spostamento $S_d(T^*)$ pari a:

Tabella 6. Spostamento massimo atteso a seguito dell'inserimento dei dispositivi.

	SLV	SLC
$S_d(T^*)$ [m]	0.125	0.153

3.3 Criteri generali di modellazione

Per la valutazione del comportamento nel piano è stato modellato un portale di lunghezza pari a 20 m e altezza totale 6 m, rappresentativo di una campata del caso studio. È stata definita la cerniera plastica alla base del pilastro in termini di momento-rotazione. Per la definizione della cerniera plastica sono stati utilizzati i valori medi dei materiali. La cerniera plastica alla base del pilastro è stata modellata utilizzando un legame di tipo Modified Takeda.

Tabella 7. Cerniera plastica alla base del pilastro modellata con legame Modified Takeda.

Modified takeda	
Momento [kNm]	Rotazione [rad/m]
220.8	0.004996
247.4	0.005941
293.3	0.060184

In ogni giunto trave-pilastro sono stati inseriti quattro dispositivi di collegamento modellati come general link di tipo spring, con rigidezza totale pari a 4 kN/mm e legame isteretico definito nel modo seguente:

Tabella 8. Legame elasto-plastico di tipo bilineare per ciascun dispositivo di connessione.

Legame elasto-plastico di tipo bilineare	
F [kN]	D [mm]
18.6	18.6
23.9	40.0

La connessione esistente tra trave e pilastro è stata modellata con un vincolo di tipo carrello.



Figura 31. Modello a elementi finiti per l'analisi pushover (con dettaglio dei nodi).

La massa in testa al singolo portale è pari a 100 kN/g, cioè un carico verticale associato alla copertura su ciascuna connessione trave-pilastro pari a 490.5 kN.

3.4 Verifica nel piano – Analisi statica non lineare (Capacity Spectrum)

È stata quindi condotta un'analisi statica non lineare, di tipo Pushover, applicando una forza orizzontale in sommità e imponendo uno spostamento massimo in testa al sistema (compatibile con la deformazione di progetto dei dispositivi d_{bd} pari a 4 cm a SLC).

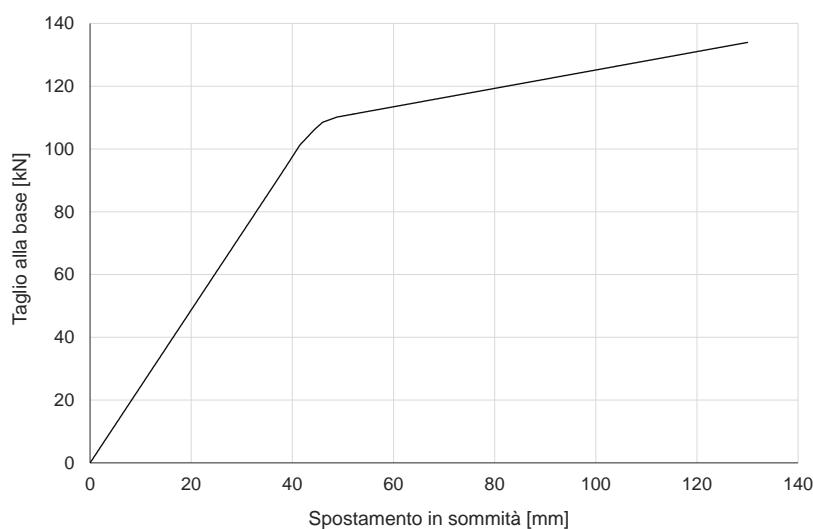


Figura 32. Curva di capacità ottenuta con analisi statica non lineare.

L'analisi statica non lineare condotta ha evidenziato una deformazione assiale del dispositivo di collegamento pari a 40 mm (cioè pari allo spostamento di progetto), a fronte di uno spostamento massimo della trave di 130 mm.

È stata successivamente condotta una bi-linearizzazione della curva di capacità ottenuta da analisi Pushover, sostituendo alla curva di capacità una curva bilineare equivalente, in termini energetici, ottenuta adottando un primo tratto con pendenza pari alla rigidità iniziale della struttura e identificando la forza F_y^* e la pendenza del tratto $F_y^* \cdot d_{max}^*$ tramite l'imposizione dell'uguaglianza dell'area sottesa dalle due curve (come mostrato in Figura 21).

Lo spostamento massimo della curva bi-linearizzata corrisponde a una deformazione dei dispositivi trave-pilastro di 4 cm (spostamento di progetto dei dispositivi).

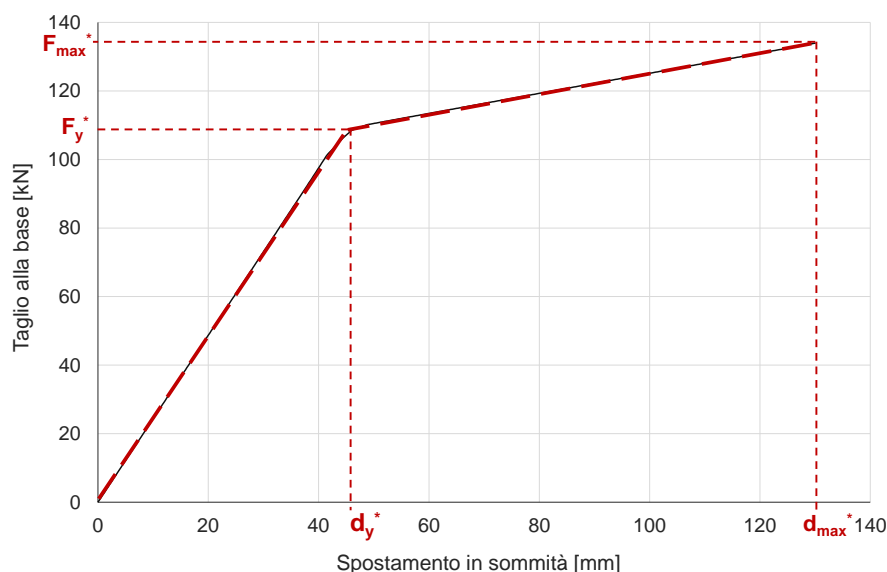


Figura 33. Procedimento di bi-linearizzazione della curva di capacità.

Partendo dalla curva bi-linearizzata così ottenuta è stato possibile calcolare lo smorzamento viscoso equivalente associato, espresso in percentuale, attraverso la seguente espressione:

$$\xi_{eq} = k \frac{63.7(F_y^* d_{max}^* - F_{max}^* d_y^*)}{F_{max}^* d_{max}^*} + 5 = 14.7\%$$

Dove il coefficiente k tiene conto delle capacità dissipative della struttura e in particolare delle caratteristiche del ciclo di isteresi. Si assume $k=0.33$ in quanto lo spostamento al limite di snervamento del singolo dispositivo è pari a 18.6 mm.

Gli altri parametri sono stati definiti sulla base della curva bi-linearizzata (Figura 33) e sono pari a:

Tabella 9. Punti principali della curva di capacità bi-linearizzata.

F_y^*	109 kN
d_y^*	46 mm
F_{max}^*	134 kN
d_{max}^*	130 mm

Sulla base dello smorzamento viscoso equivalente ξ_{eq} è possibile calcolare il fattore di riduzione η (espressione 3.2.4 presente nelle NTC) da applicare allo spettro elastico a SLC:

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi_{eq}}} = 0.71$$

Si ottiene quindi lo spettro di domanda sovra-smorzato a stato limite di prevenzione al collasso (SLC):

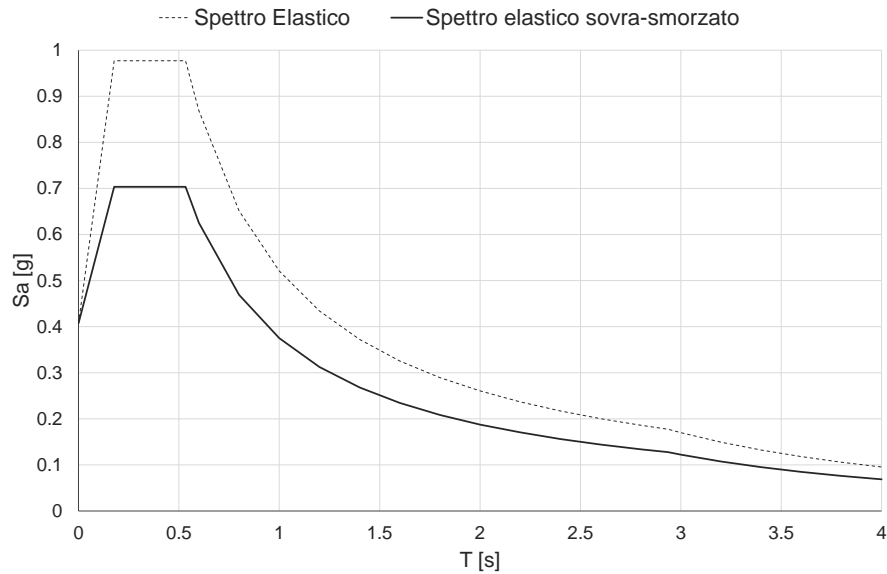


Figura 34. Spettro di domanda (linea tratteggiata) e spettro di domanda sovra-smorzato (linea piena).

In funzione dello spettro sovra-smorzato è possibile definire lo spettro ADRS tramite la seguente espressione:

$$S_d = S_a \cdot \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2$$

È quindi possibile passare dallo spettro di pseudo-accelerazione allo spettro ADRS, in cui sulle ascisse ci sono i valori degli spostamenti S_d (espressi in metri) e sulle ordinate i valori delle pseudo-accelerazioni S_a (esprese in g). Per concludere la curva di capacità bi-linearizzata viene convertita nello spettro di capacità dividendo il taglio alla base per la massa di riferimento. Lo spettro di capacità così ottenuto viene confrontato con la curva ADRS.

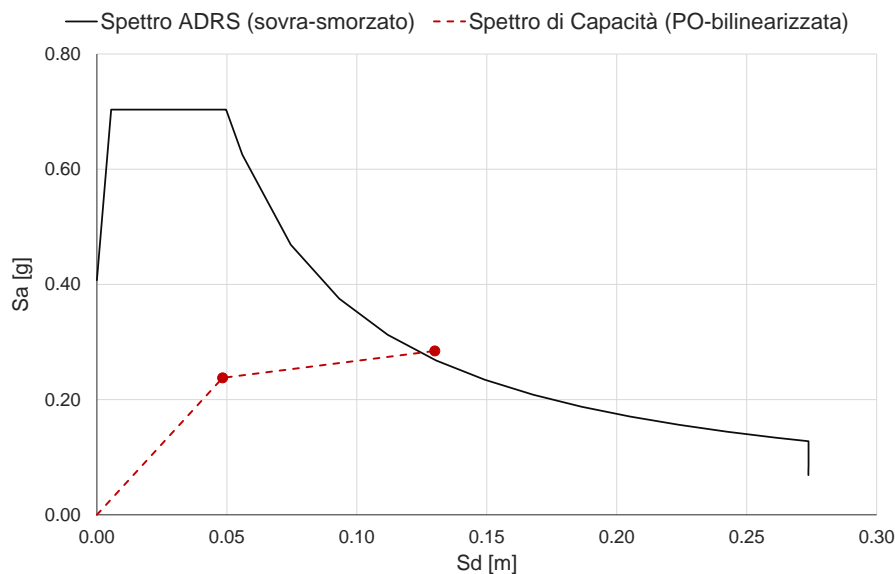


Figura 35. Confronto tra spettro di capacità (ottenuto dalla curva di Pushover bi-linearizzata) e spettro ADRS per la definizione del punto di prestazione.

La procedura mostra, come riportato in Figura 35, che il dimensionamento effettuato risulta verificato in quanto il punto finale dello spettro di capacità, corrispondente allo spostamento di progetto del dispositivo fissato pari a 40 mm, si trova a destra rispetto al punto di intersezione fra questo e lo spettro sovra-smorzato ADRS.

3.5 Verifica nel piano – Analisi dinamica non lineare (Time History)

Per questa verifica sono stati utilizzati due set composti da tre accelerogrammi spettro-compatibili a stato limite di salvaguardia della vita (SLV) e a stato limite di prevenzione al collasso (SLC). Vengono di seguito presentati gli accelerogrammi utilizzati, generati con il software SIMQKE_GR, di lunghezza complessiva pari a 30 s.

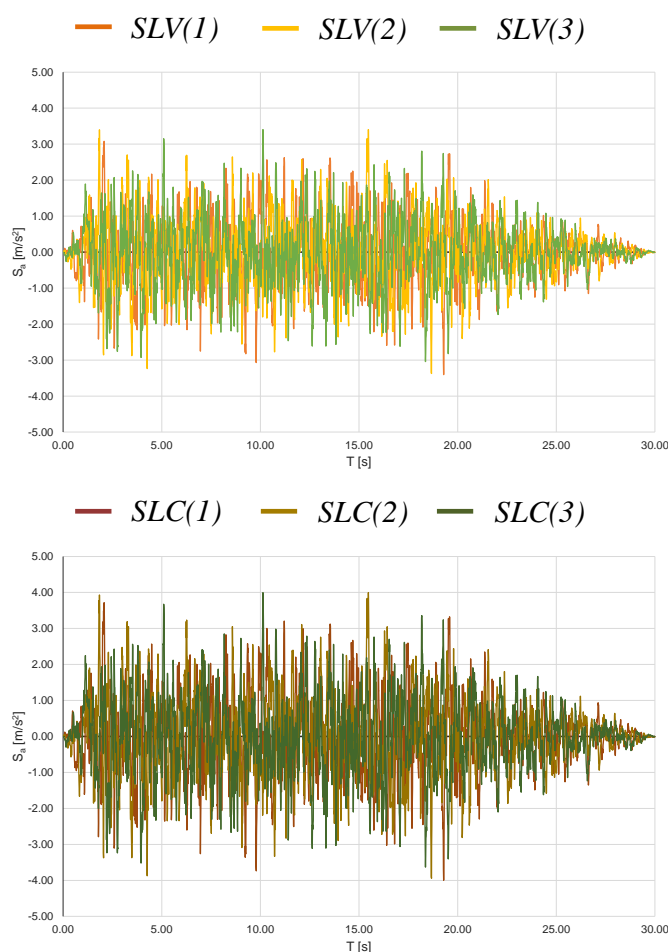


Figura 36. Set degli accelerogrammi spettro-compatibili considerati.

È stata inizialmente condotta l'analisi degli spostamenti nel piano. È stato quindi realizzato il modello a elementi finiti del portale e sono stati inseriti i dispositivi di connessione come general link con legame di tipo elasto-plastico di tipo bilineare. Per lo smorzamento è stato utilizzato il criterio di Rayleigh fissando il fattore di smorzamento ξ pari al 3% periodi T_1 e T_2 , rispettivamente pari a 2.0 e 0.3 s. Lo schema del modello implementato e sottoposto ad analisi dinamica non lineare è rappresentato nella figura seguente.

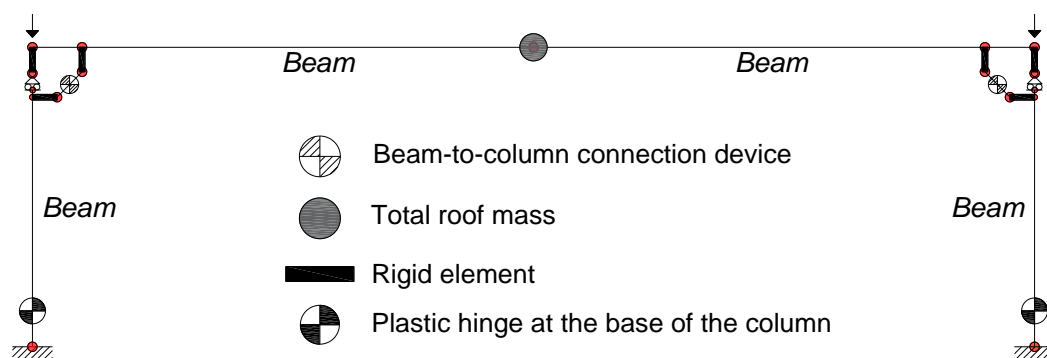


Figura 37. Modello a elementi finiti per le analisi dinamiche non lineari.

Per la modellazione dei dispositivi è stato utilizzato un legame elasto-plastico con i coefficienti descritti precedentemente. In alternativa, è possibile modellare i dispositivi di collegamento trave-pilastro utilizzando un legame di tipo Bouc-Wen. Vengono di seguito presentati i parametri principali del legame Bouc-Wen per il caso in esame.

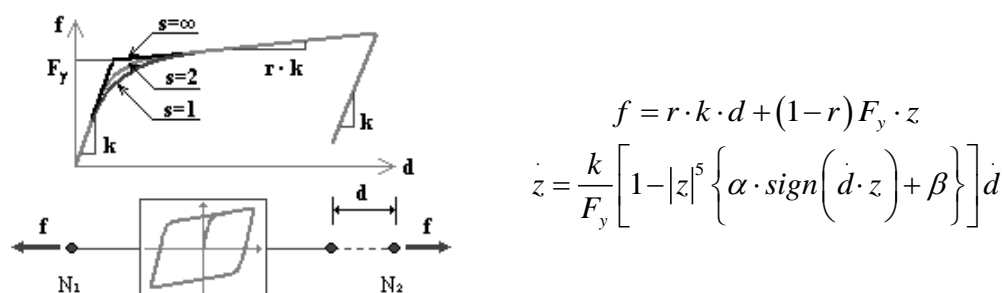


Figura 38. Legame isteretico di tipo Bouc-Wen.

Dove:

Tabella 10. Parametri principali per il legame isteretico di tipo Bouc-Wen.

Parametro	Valore	Descrizione
k [kN/mm]	1.0	Rigidezza iniziale prima dello snervamento.
Fy [kN]	18.6	Forza a snervamento.
r	0.2475	Rapporto di rigidezza post-snervamento.
s	2.0	Parametro che definisce la forma della curva isteretica nei pressi della regione di transizione della forza di spostamento.
a	0.5	Parametro che definisce la forma del ciclo isteretico.
b	0.5	Parametro che definisce la forma del ciclo isteretico.

Sono di seguito presentati i risultati ottenuti in termini di spostamento in testa al pilastro, scorrimento relativo all'interfaccia trave-pilastro e deformazione assiale dei dispositivi di collegamento trave-pilastro nelle due connessioni. Si osserva che la deformazione dei dispositivi (rispettivamente nella connessione di destra e in quella di sinistra del telaio) è sempre inferiore al limite imposto di 40mm.

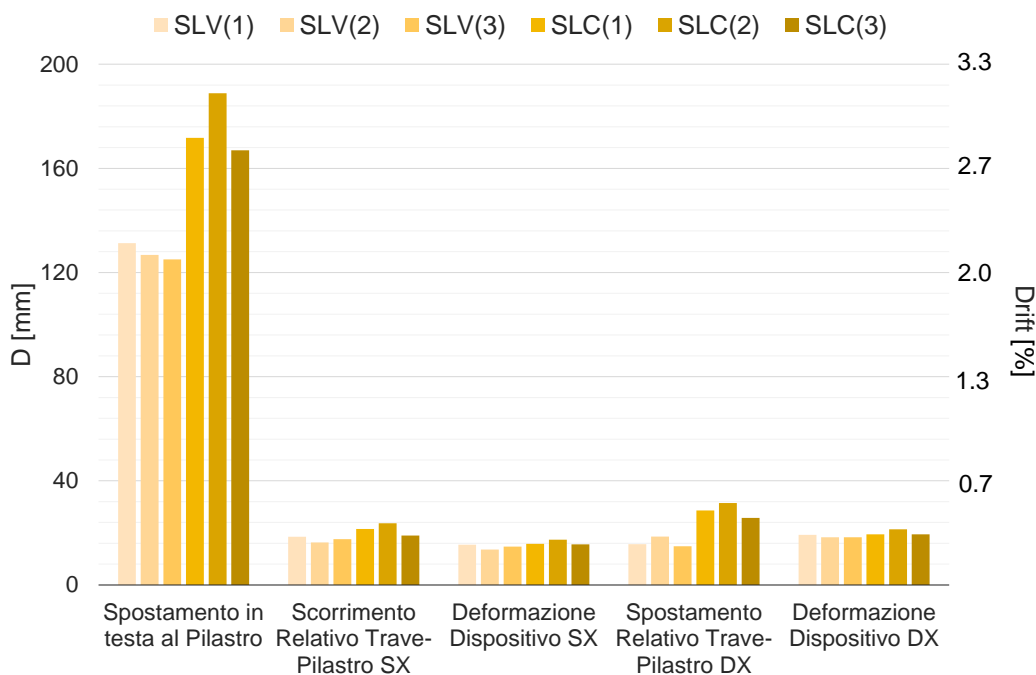


Figura 39. Risultati dell'analisi dinamica non lineare nel piano del portale.

3.6 Valutazione del taglio associato all'innescò del ribaltamento

In questa sezione è stato valutato il taglio associato all'innescò del ribaltamento della trave nel piano ortogonale in funzione dell'angolo di inclinazione ϑ . È stato dapprima calcolato il valore di taglio limite nel caso di assenza dei dispositivi di collegamento e, successivamente, l'incremento che i dispositivi forniscono alla connessione trave-pilastro.

Partendo dal caso senza dispositivi:

$$V = \frac{P \cdot B}{2H} = 85.8 \text{ kN}$$

Dove l'altezza media della trave H è stata assunta pari a 1 m, la base della trave B pari a 35 cm e il carico P , tenendo conto delle considerazioni fatte precedentemente, pari a 490.5 kN. Si osserva quindi che non si ha innescò di ribaltamento per il caso in esame.

I dispositivi, oltre a fornire una rigidità rotazionale aggiuntiva, forniscono un contributo stabilizzante residuo pari a:

$$V = \frac{\sum_{i=1}^{n^{\circ} \text{ disp}} (F_{disp}^i \cdot B_{disp}^i \cdot \cos \vartheta)}{H \cdot \cos \vartheta + B \cdot \sin \vartheta} \cong \frac{(10 \text{ kN} \cdot 0.325 \text{ m} + 7 \text{ kN} \cdot 0.225 \text{ m} + 4 \text{ kN} \cdot 0.125 \text{ m}) \cdot \cos 19}{1 \text{ m} \cdot \cos 19 + 0.35 \text{ m} \cdot \sin 19} \cong 4 \text{ kN}$$

Questo contributo è una riserva per il ribaltamento della trave.

3.7 Verifica nel piano ortogonale – Analisi del ribaltamento fuori piano

Infine, sono state condotte a titolo d'esempio le analisi nel piano ortogonale al fine di valutare il contributo che i dispositivi trave-pilastro riescono a offrire al fine di evitare il ribaltamento della trave. Per studiare

tale comportamento è stato preso a riferimento il singolo pilastro con i relativi dispositivi di connessione trave-pilastro e la massa della copertura associata. Nella figura seguente è schematicamente mostrata la modellazione implementata all'interno del software a elementi finiti la cui spiegazione è stata precedentemente riportata.

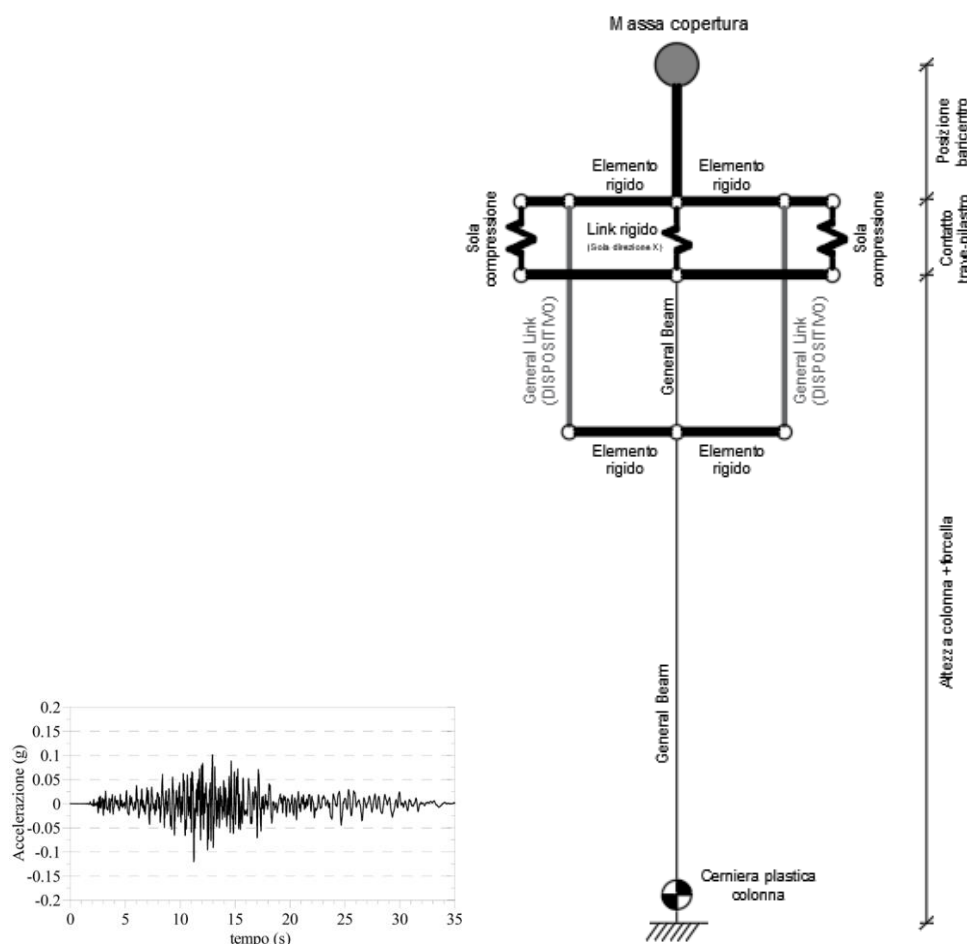


Figura 40. Modellazione della colonna e dei dispositivi di connessione trave-pilastro per le analisi nel piano ortogonale.

Ai fini della modellazione sono stati dapprima applicati i carichi associati alla copertura e il peso proprio del pilastro e successivamente, partendo da questa condizione, sono state condotte delle analisi dinamiche non lineari, di tipo Time History, prendendo a riferimento il set di accelerogrammi spettro-compatibili precedentemente definiti. L'analisi è stata eseguita in regime di grandi spostamenti. I risultati sono presentati in termini di spostamento e si riferiscono allo scorrimento relativo tra il baricentro della copertura e la sommità del pilastro.

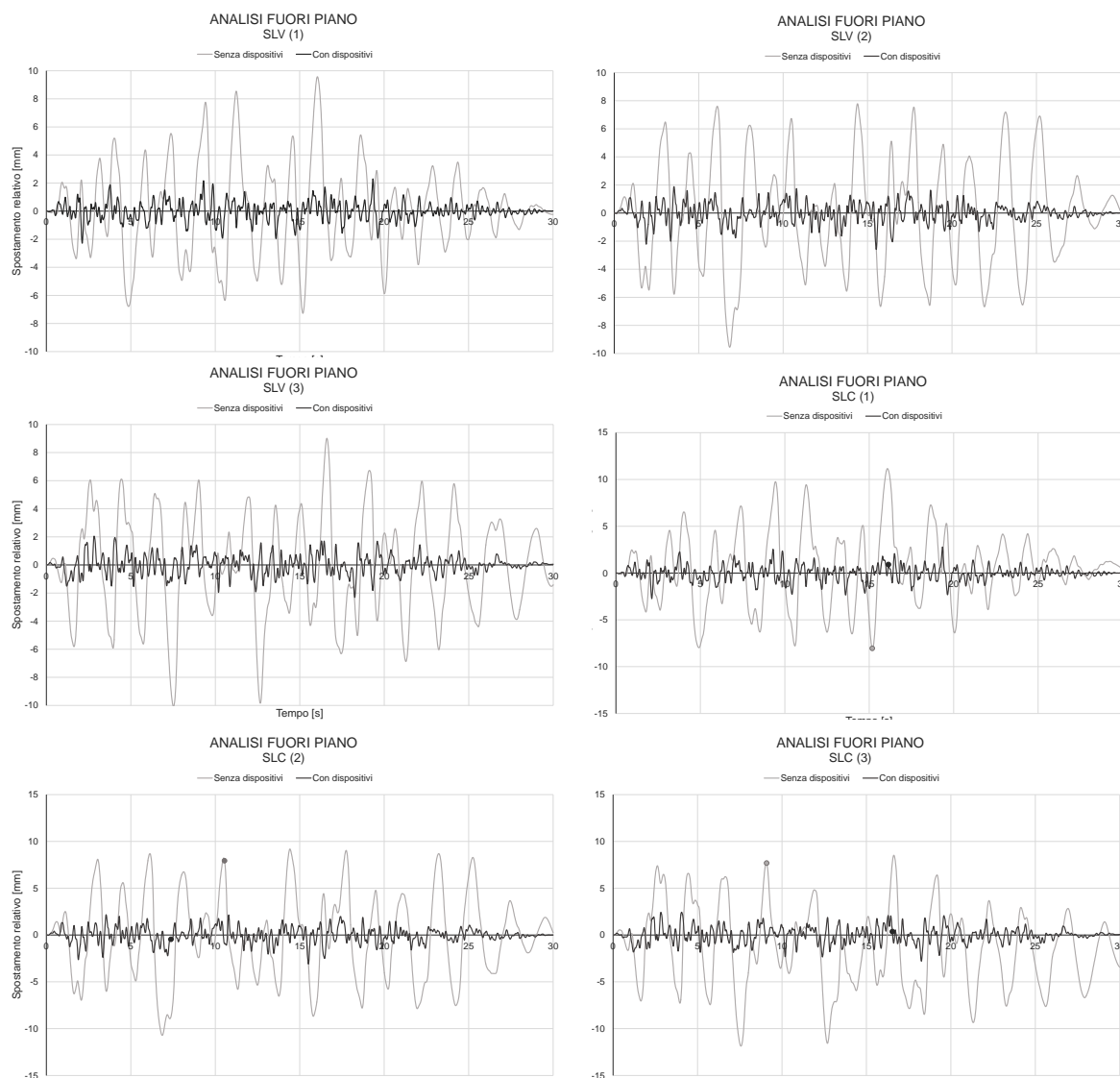


Figura 41. Risultati dell'analisi nel fuori piano in termini di spostamento relativo tra la sommità della sommità della trave e pilastro.

Le analisi dinamiche non lineari condotte, oltre a evidenziare il non ribaltamento della trave nel fuori piano, mostrano un abbattimento degli spostamenti relativi tra sommità della trave e pilastro dopo l'inserimento dei dispositivi di connessione trave-pilastro.

3.8 Ulteriori considerazioni

3.8.1 Presenza di attrito nel collegamento trave-colonna

Nella validazione precedente non è stato considerato il contributo dell'attrito tra trave e colonna.

Obiettivo di questo paragrafo è invece quello di valutare come cambia la risposta del sistema considerando il contributo dell'attrito tra trave e pilastro dovuto alla presenza di neoprene, con coefficiente di attrito μ pari a 0.13 e fattore di sicurezza dovuto alle incertezze pari a 1.5. Questo si traduce in un coefficiente di attrito ridotto pari all'incirca al 8.7%.

In questo caso, cioè in presenza di attrito nella connessione tra trave e colonna, il modello a elementi finiti viene modificato inserendo un collegamento attritivo di tipo elasto-plastico tra trave e colonna. Nel caso di utilizzo del software a elementi finiti Midas Gen questo collegamento può essere realizzato inserendo un elemento di tipo spring con legame di tipo elasto-plastico con forza pari a F_{μ} (Figura 42) e rigidezza (in direzione X) elevata.

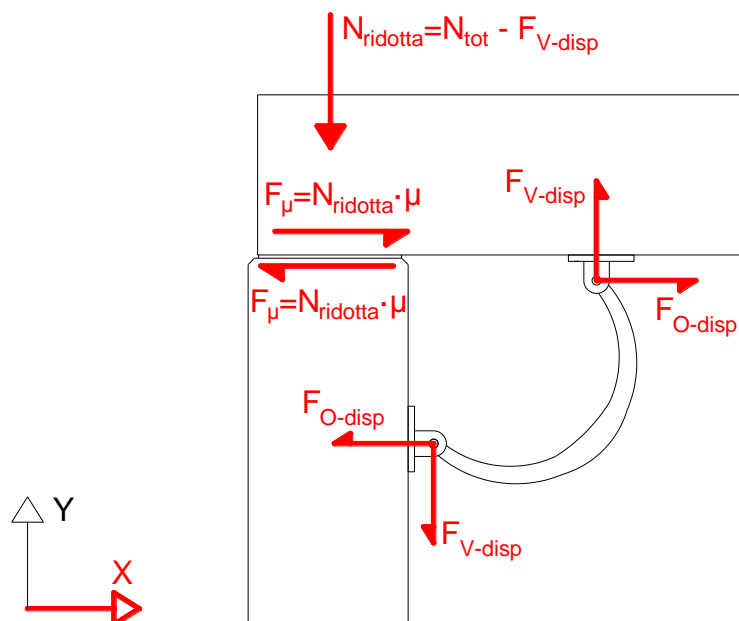


Figura 42. Schema semplificato della distribuzione delle forze nella connessione in presenza di attrito.

Dove $N_{ridotta}$ rappresenta il carico verticale gravante sulla singola colonna depurato della componente verticale dei dispositivi F_{V-disp} , mentre F_{O-disp} è la componente orizzontale associata ai dispositivi. Per il caso studio in esame $N_{ridotta}$ è pari a:

$$N_{ridotta} = N_{tot} - F_{V-disp} = N_{tot} - n_d \cdot (V_{Edb} / \sqrt{2}) = 490.5 - 4 \cdot (23.9 / \sqrt{2}) = 422.9 \text{ kN}$$

Dove V_{Edb} è il carico associato allo spostamento di progetto del singolo dispositivo.

Se per il caso in esame si considera la presenza di attrito, con coefficiente di attrito ridotto pari a 0.087, sfruttando la relazione sopra riportata, si ottiene F_{μ} pari a 36.8kN. Nelle analisi non si considera la componente verticale del moto.

In Figura 43 è riportata la verifica a capacity spectrum nel caso di inserimento di quattro dispositivi di connessione trave-colonna e presenza di comportamento attritivo. La verifica, come previsto, risulta ampiamente soddisfatta (da confrontare con quanto ottenuto in Figura 35 nel caso di assenza di attrito) in quanto la presenza di attrito fornisce una risorsa aggiuntiva.

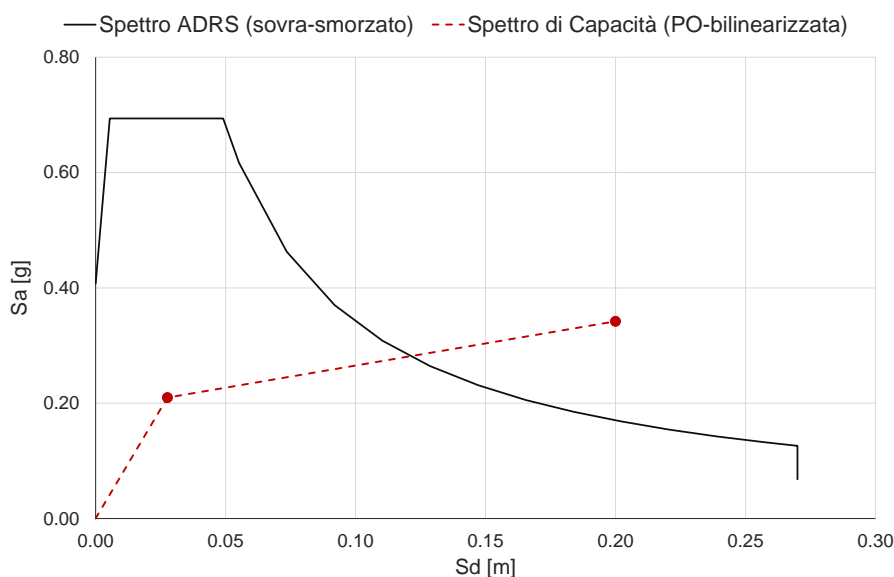


Figura 43. Capacity spectrum nel caso di collegamento attritivo e inserimento di quattro dispositivi.

La presenza del collegamento attritivo tra trave e colonna garantisce un'ulteriore fonte di dissipazione energetica alla struttura, prima unicamente affidata ai dispositivi di collegamento trave-colonna (Mezzaluna M1). Sono state infine condotte le analisi dinamiche non lineari nel caso di collegamento attritivo di tipo elasto-plastico prendendo a riferimento gli stessi accelerogrammi spettro compatibili utilizzati in precedenza, tre a SLV e tre a SLC. I risultati sono riportati in Figura 44.

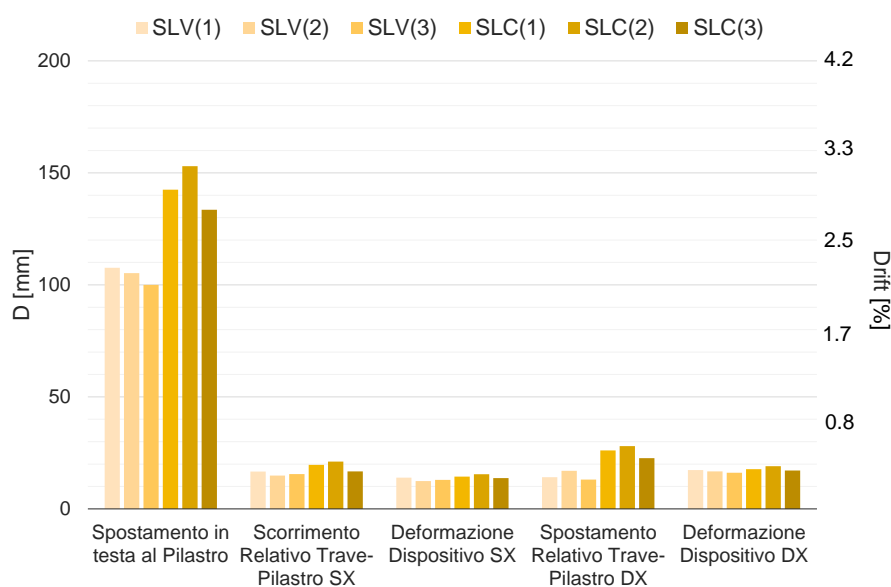


Figura 44. Analisi dinamiche non lineari nel caso di collegamento attritivo.

In questo caso i risultati mostrano una deformazione dei dispositivi inferiore al valore di progetto d_{bd} pari a 4cm. Ciò è coerente con quanto precedentemente mostrato in Figura 43. Rispetto a quanto ottenuto in assenza di attrito (Figura 39), si verifica una riduzione media degli spostamenti attesi in testa al pilastro del 18.3% a SLV e del 18.7% a SLC e degli scorrimenti relativi nelle connessioni trave-pilastro di circa il 10.1% a SLV e del 10.5% a SLC.

3.8.2 Diminuzione del numero di dispositivi rispetto a quanto ottenuto dalla procedura di progetto

L'esempio descritto ha visto l'inserimento di quattro dispositivi Mezzaluna M1 in ciascuna connessione trave-pilastro. In alternativa, nel caso la presenza di impianti impedisse o rendesse difficoltoso l'inserimento di tali dispositivi, potrebbero essere utilizzati in sostituzione dei dispositivi di dimensioni ridotte, come il Dissipatore 190.

L'inserimento di quattro dispositivi Mezzaluna M1 in ciascuna connessione trave-pilastro, sulla base dei risultati ottenuti dalle analisi statiche e dinamiche non lineari, ha permesso di ottenere un valido sistema di ritegno e dissipazione energetica per la struttura.

Per verificare la consistenza della procedura di progetto descritta è stato ritenuto opportuno rieseguire le verifiche statiche e dinamiche non lineari diminuendo il numero di dispositivi utilizzati, cioè passando da quattro (come ottenuto dalla procedura di progetto) a tre in ciascuna connessione.

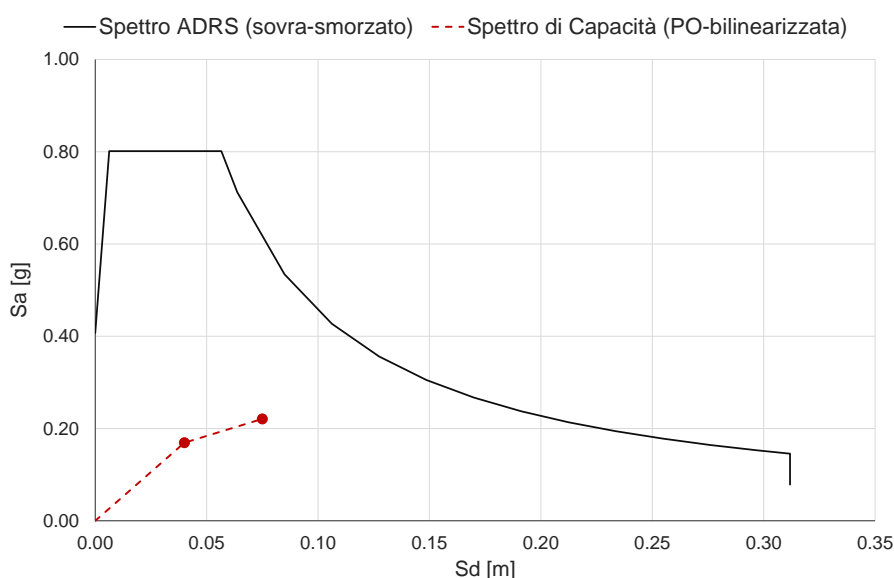


Figura 45. Capacity spectrum nell'ipotesi di inserimento di soli tre dispositivi in ciascuna connessione.

Come si evince in Figura 45, la verifica in termini di spostamento, effettuata attraverso il capacity spectrum, in questo caso non risulta soddisfatta. Essa mostra un calo significativo della curva di capacità linearizzata associata alla struttura in quanto si verifica una riduzione dello spostamento totale in testa alla trave necessario per raggiungere lo spostamento di progetto dei dispositivi (d_{bd} pari a 4 cm).

Le analisi dinamiche non lineari sono state condotte prendendo a riferimento gli stessi accelerogrammi spettro compatibili utilizzati in precedenza, tre a SLV e tre a SLC.

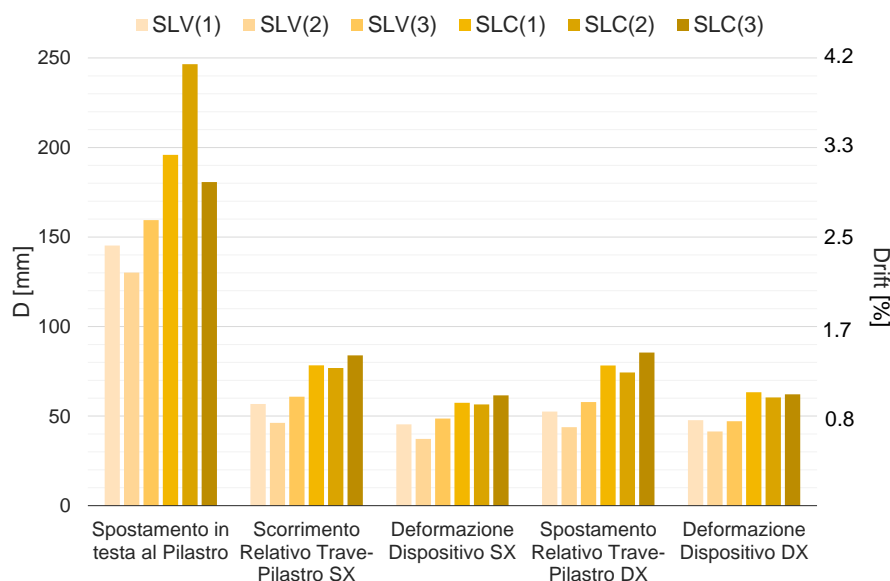


Figura 46. Analisi Time History nell'ipotesi di inserimento di soli tre dispositivi in ciascuna connessione.

Le analisi dinamiche non lineari mostrano un significativo aumento degli spostamenti attesi in testa alla struttura e un aumento delle deformazioni associate ai dispositivi di collegamento, con un superamento del valore limite per SLC.

Questi risultati confermano la robustezza del metodo di progettazione nella definizione del numero minimo di dispositivi di collegamento trave-pilastro necessari.

3.8.3 Abbattimento dei valori del sisma all'80% (Circolare 21/01/2019 n.7, cap. 8.4.3)

Per concludere, è stata condotta un'ulteriore campagna di analisi, sempre nell'ipotesi di utilizzare tre dispositivi anziché quattro, considerando un abbattimento dei valori del sisma all'80% come previsto dal capitolo 8.4.3 della Circolare del 21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP. in cui viene specificato:

Negli interventi di adeguamento delle costruzioni nei confronti delle azioni sismiche è richiesto, generalmente, il raggiungimento del valore unitario del parametro ζ_E ; nel caso di semplici variazioni di classe e/o destinazione d'uso che comportino incrementi dei carichi verticali in fondazione superiori al 10% (caso c) del § 8.4.3 delle NTC è ammesso un valore minimo di ζ_E pari a 0,8. È assimilabile a tale situazione anche l'adeguamento sismico deciso dal proprietario a seguito di inadeguatezza riscontrata attraverso la valutazione di sicurezza di cui al § 8.3 delle NTC, ma non ricadente nei casi a), b) o d).

I casi a), b) o d) sono descritti all'interno del capitolo 8.4.3 del decreto del 17 gennaio 2018 dell'Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni:

- a) sopraelevare la costruzione;*
- b) ampliare la costruzione mediante opere ad essa strutturalmente connesse e tali da alterarne significativamente la risposta;*
- c) apportare variazioni di destinazione d'uso che comportino incrementi dei carichi globali verticali in fondazione superiori al 10%, valutati secondo la combinazione caratteristica di cui alla equazione 2.5.2 del § 2.5.3, includendo i soli carichi gravitazionali. Resta comunque fermo l'obbligo di procedere alla verifica locale delle singole parti e/o elementi della struttura, anche se interessano porzioni limitate della costruzione;*
- d) effettuare interventi strutturali volti a trasformare la costruzione mediante un insieme sistematico di opere che portino ad un sistema strutturale diverso dal precedente; nel caso degli edifici, effettuare interventi strutturali che trasformano il sistema strutturale mediante l'impiego di nuovi elementi verticali portanti su cui grava almeno il 50% dei carichi gravitazionali complessivi riferiti ai singoli piani.*

Nella stessa viene inoltre fornita una definizione del termine adeguamento:

Interventi atti ad aumentare la sicurezza strutturale preesistente, conseguendo i livelli di sicurezza fissati al § 8.4.3.

Sulla base di queste considerazioni sono state ripetute le analisi con i tre dispositivi con gli accelerogrammi spettro compatibili ridotti all'80%.

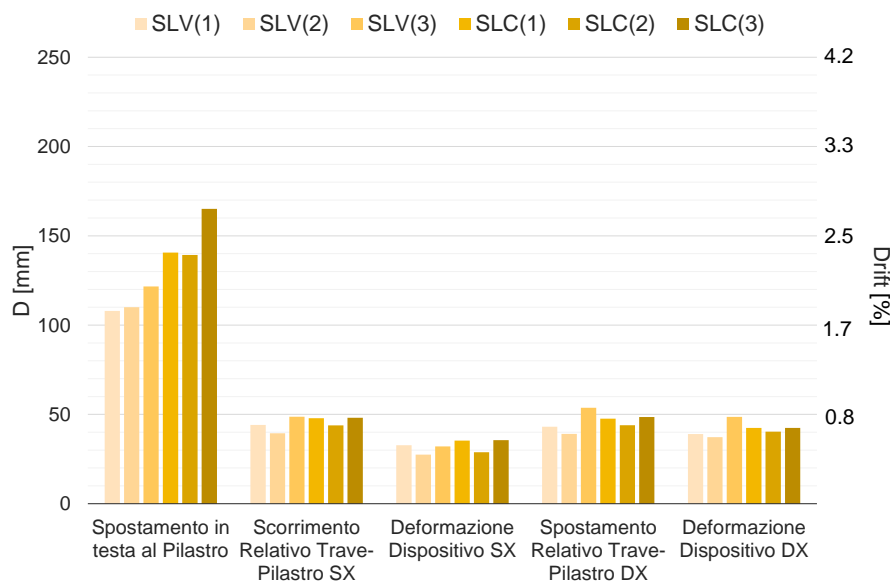


Figura 47. Analisi Time History nell'ipotesi di inserimento di soli tre dispositivi in ciascuna connessione e accelerogrammi spettro compatibili ridotti all'80%.

In questo caso i risultati mostrano una minore deformazione dei dispositivi che supera di poco il valore di progetto d_{bd} pari a 4cm. Ciò è coerente, come mostrato nell'immagine seguente (Figura 48), con la valutazione secondo Capacity Spectrum la quale, pur adottando uno spettro ridotto all'80%, non risulta invece verificata.

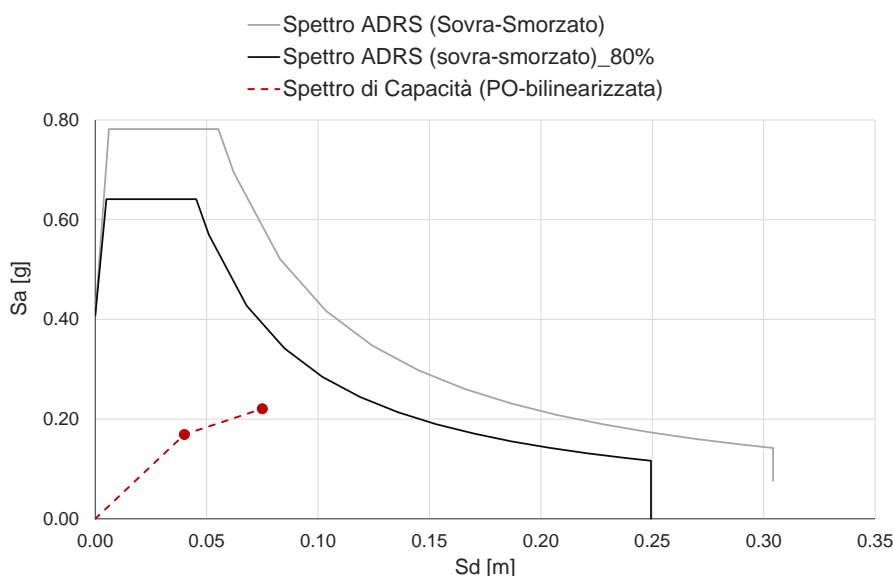


Figura 48. Capacity spectrum nell'ipotesi di inserimento di soli tre dispositivi in ciascuna connessione e spettro sovra-smorzato ridotto all'80%.

APPENDICE 1: Inserimento in nuove costruzioni

Per l'inserimento dei dispositivi di collegamento nelle nuove costruzioni, viene dapprima calcolato il valore di rigidità elastica iniziale, definito come $k^*_{\text{elastica-iniziale}}$, e successivamente, considerando le caratteristiche sismiche della zona in esame, viene effettuata una verifica in termini di deformazioni tramite uno spettro elastico di risposta (cioè con fattore di struttura q pari ad uno).

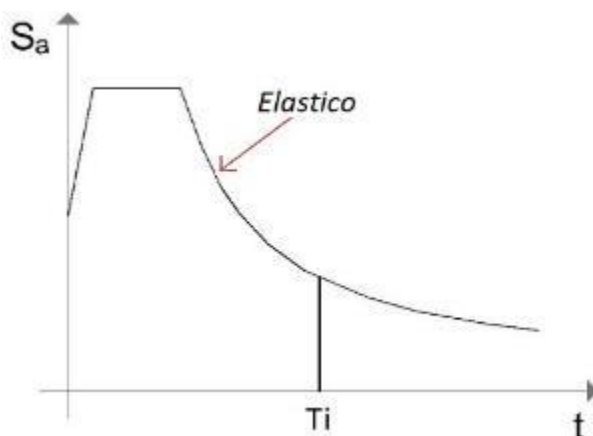


Figura 49. Spettro elastico di risposta.

È quindi possibile valutare la deformazione associata al dispositivo Δ_{disp} e, procedendo per iterazioni in funzione della rigidità secante del dispositivo, ricavare la forza associata F_{disp} tramite un'analisi a spettro di risposta.

APPENDICE 2: Soluzione nel caso di ingombro impianti

Nel caso la presenza di impianti in prossimità dei giunti trave-pilastro impedisca o renda difficile l'inserimento dei dispositivi Mezzaluna M1, cioè con ampiezza da foro a foro pari a 72 cm, è possibile utilizzare una geometria di dispositivi ridotta (Dissipatore 190).

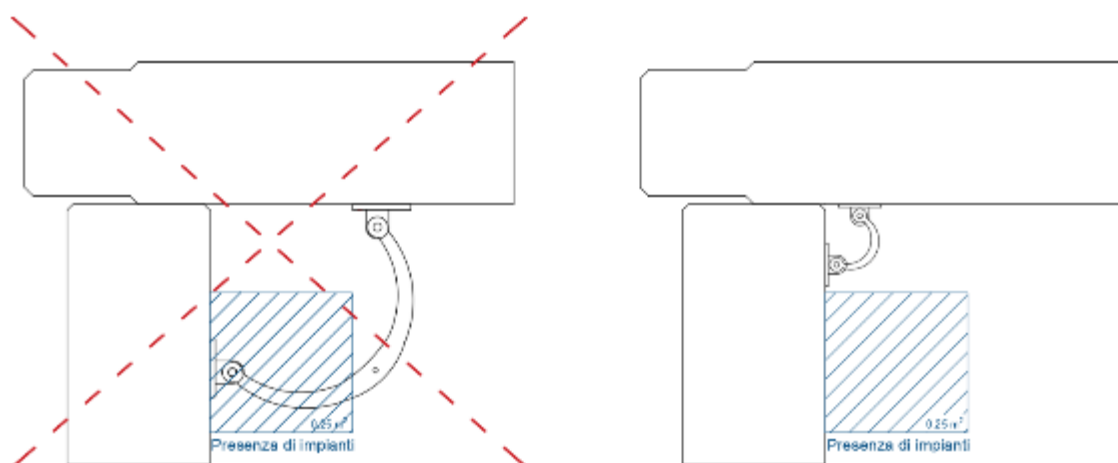


Figura 50. Ingombro nella connessione trave-pilastro dovuto alla presenza degli impianti.

Questa seconda categoria di dispositivi, di dimensioni ridotte rispetto ai primi, presenta le seguenti caratteristiche:

Larghezza da foro a foro: 19.0 cm;

Spessore: 1.0 cm;
 Rigidezza elastica iniziale: 1.75 kN/mm;
 Forza di progetto a trazione (e compressione): 8.44 kN;
 Spostamento di progetto: 1.0 cm;
 Classe acciaio: S355 ($f_{yk}=355\text{MPa}$).

Tabella 11. Riepilogo dei risultati medi riferiti al terzo ciclo ottenuti da prove cicliche condotte sui Dispositivi Piccoli (Dissipatori 190).

	Parametri di progetto	
	Spostamento di progetto	d_{bd} [mm]
Spostamento associato allo snervamento	d_1 [mm]	3.60
Rigidezza di progetto del primo ramo	k_1 [kN/mm]	1.75
Rigidezza di progetto del secondo ramo	k_2 [kN/mm]	0.39
Rigidezza di progetto effettiva	k_{eff} [kN/mm]	0.868
Smorzamento di progetto effettivo	ξ_{eff} [%]	17.5
Carico assiale di progetto a d_{bd}	V_{Ebd} [kN]	8.40

A parità di forza, l'impiego di un dispositivo Mezzaluna M1 (V_{Ebd-i} pari a 23.9 kN) equivale all'inserimento di tre dispositivi Dissipatore 190 ($V_{Ebd-totale}$ pari a 25.3 kN).

L'impiego dei dispositivi piccoli in sostituzione di quelli grandi contribuisce a diminuire gli ingombri (soprattutto nell'eventualità siano presenti degli impianti in prossimità dei giunti trave-colonna) e favorisce un aumento della rigidezza (significativa per le valutazioni nel piano ortogonale).

APPENDICE 3: Sostituzione dei dispositivi in caso di terremoto

A seguito di un terremoto potrebbe essere opportuno comparare l'accelerogramma associato all'evento sismico con gli spettri utilizzati nel processo di dimensionamento del dispositivo di collegamento trave-pilastro. Se i valori spettrali di accelerazione registrati sono prossimi, o inferiori, ai valori ottenuti con spettro di risposta a stato limite di danno, i dispositivi sono da considerarsi ancora in campo elastico e quindi non necessitano di sostituzione. Nel caso in cui, invece, i valori spettrali di accelerazione fossero compatibili con i dati a stato limite di salvaguardia della vita, sarà cura del progettista verificare lo stato dei dispositivi tramite ispezione e, in caso di plasticizzazione degli stessi, procedere alla loro sostituzione.

DISCLAIMER

Questo Manuale d'uso è protetto dal copyright di Biemme srl. Di conseguenza, nessuna delle sue parti potrà essere riprodotta, conservata in un sistema di archiviazione o trasmessa senza il permesso scritto di Biemme srl. Riproduzioni non autorizzate, in tutto o in parte, saranno considerate violazioni al copyright di Biemme srl, che si attiverà per perseguire ogni tipo di infrazione.

Tutti i contenuti in questo Manuale d'uso (ad esempio illustrazioni, testi, specifiche e dati) sono basati sulle ultime informazioni disponibili ed è stato verificato attentamente che gli stessi fossero accurati al momento della stampa. Poiché lo scopo di Biemme srl è dare ai propri clienti i prodotti più aggiornati e all'avanguardia, la stessa potrà operare delle modifiche tecniche e miglioramenti nel tempo. Biemme srl potrà di conseguenza modificare le informazioni contenute in questo Manuale senza preavviso.

Biemme srl ha utilizzato tutte le cautele necessarie per assicurare che questo Manuale contenga informazioni accurate ed è stato pubblicato con il presupposto che la stessa non sia responsabile per le conseguenze di qualsiasi azione compiuta dagli utilizzatori sulla base di informazioni (incluse informazioni omesse e/o errate) in questo contenute. Biemme srl nega ogni responsabilità relativa a qualsiasi rappresentazione errata relativa alle informazioni contenute in questo Manuale ed inoltre espressamente disconosce ogni responsabilità, in relazione a qualsiasi richiesta di risarcimento, perdita, danni diretti e consequenziali e qualsiasi altra richiesta, portata avanti da terzi (siano essi lettori di questo manuale oppure no) basata sull'uso, in tutto o in parte, di qualsiasi contenuto o prodotto all'interno di questo Manuale.

Qualora verificaste che alcune caratteristiche tecniche o estetiche del Vostro prodotto differiscono da quelle inserite in questo Manuale, vi chiediamo di contattare il nostro ufficio tecnico.