

fib/CNI International Seminar on
Precast Concrete in Seismic Regions
and International Perspectives
29 settembre 2022

“Utilizzo di dissipatori sismici per il miglioramento sismico di edifici industriali”



Paolo Riva

Dipartimento di Ingegneria
e Scienze Applicate

Università degli Studi di Bergamo

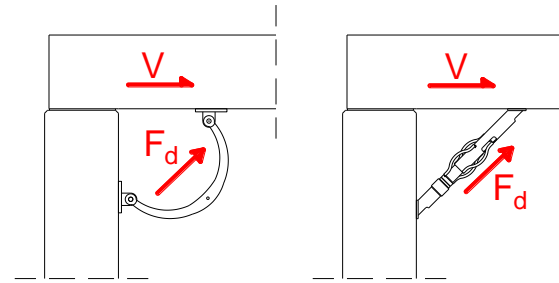
paolo.riva@unibg.it



DISSIPATORI SISMICI

- Descrizione dispositivi dissipativi non lineari

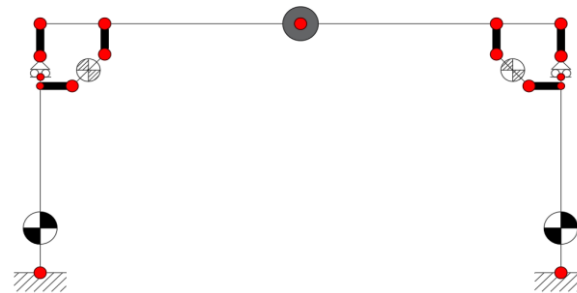
- *Dispositivo Biemme: Stabiliflex*
- *Dispositivo Edilmatic: Edil TP*



- Procedura di calcolo

- *Stima preliminare degli spostamenti attesi*
- *Criterio di dimensionamento*
- *Verifica con analisi statica e/o dinamica non lineare*
- *Modellazione a elementi finiti*

- Esempio di calcolo



DESCRIZIONE DISPOSITIVI:

Biemme S.r.l. (Stabilflex) & Edilmatic S.r.l. (Edil TP)

- Definizione delle caratteristiche principali (in accordo alla UNI EN 15129);
- Definizione della geometria;
- Modellazione FEM con software Abaqus.



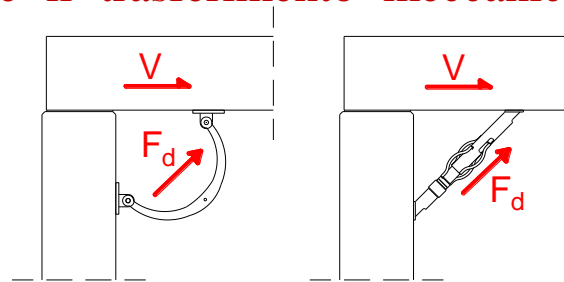
Descrizione dispositivi

La risposta sismica delle strutture prefabbricate non progettate per resistere ai carichi sismici può essere migliorata sfruttando la dissipazione energetica di appositi dispositivi di collegamento trave-pilastro.

Obiettivi principali:

- Permettere il trasferimento meccanico delle sollecitazioni sismiche tra trave e

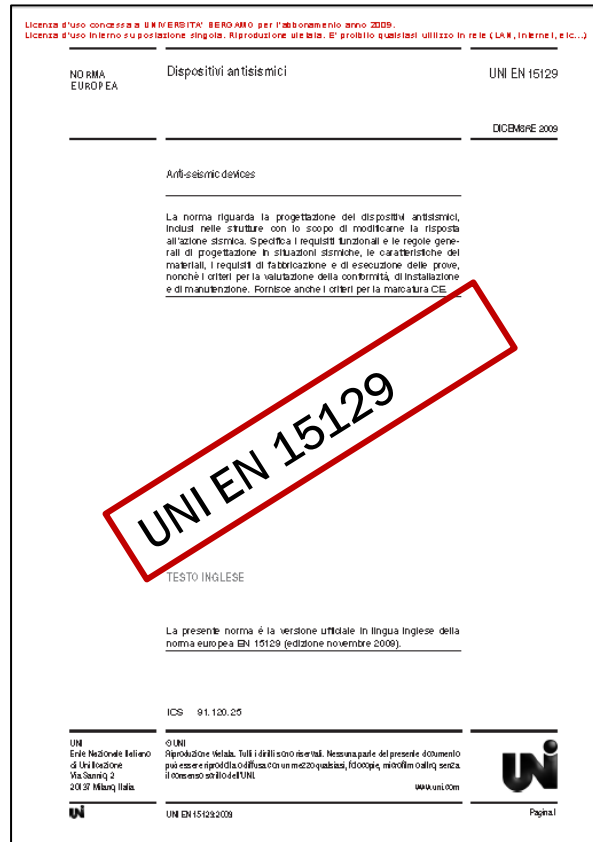
colonna;



- Consentire l'installazione in edifici esistenti;
- Incrementare la dissipazione di energia della struttura;
- Facilitare le operazioni di montaggio e sostituzione (anche in presenza di impianti).

Descrizione dispositivi

Definizione delle caratteristiche principali secondo la UNI EN 15129



Tab. 1

Description of the Device		Relevant Clause	Graphic Representation			Notes	
			Plan view	Elevation view			
				Direction x	Direction y		
Rigid Connection Devices (RCDs)	Permanent Connection Devices (PCDs)	Fixed	5.1				This type of device corresponds to type 8.1 (Restraint bearing) in Table 1 of EN 1337-1:2000 (*)
		Moveable	5.1				This type of device corresponds to type 8.2 (Guide bearing) in Table 1 of EN 1337-1:2000 (*)
	Fuse Restraints	Mechanical Fuse Restraints (MFRs)	5.2			-	
		Hydraulic Fuse Restraints (HFRs)	5.2			-	
	Temporary Connection Devices (TCDs)	5.3			-	This type of device is usually referred to as Shock Transmission Unit (STU)	
Displacement Dependent Devices (DDD)	Linear Devices (LDs)	6.1			-		
	Non linear Devices (NLDs)	6.2			-		
Viscosity Dependent Devices (VDD)	Fluid Viscous Dampers (FVDs)	7.1			-	This graphic representation applies also to two-shaft dampers	
	Fluid Spring Dampers (FSDs)	7.1			-		

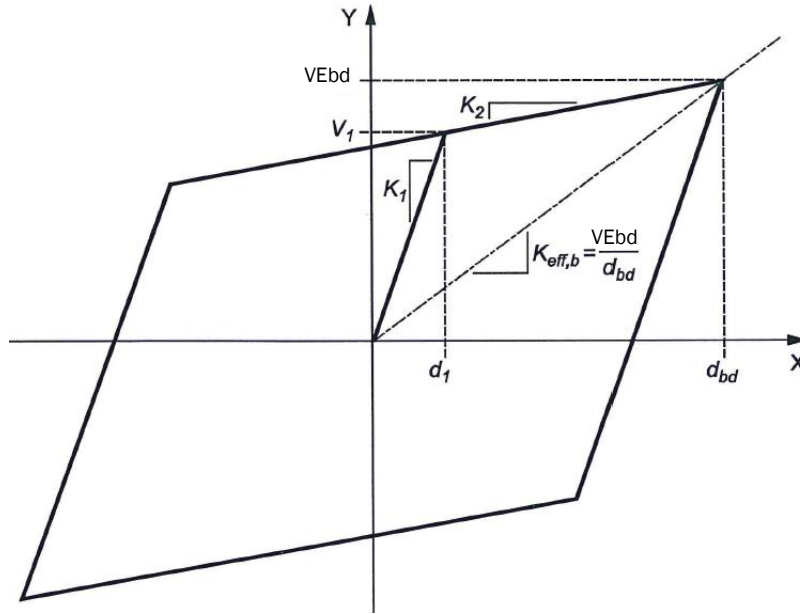
Displacement Dependent Devices (DDD)	Linear Devices (LDs)	6.1		
	Non linear Devices (NLDs)	6.2		

Essendo dispositivi isteretici si applica la Normativa UNI EN 15129

Descrizione dispositivi

Definizione delle caratteristiche principali secondo la UNI EN 15129

NLDs: Non Linear devices



Displacement Dependent Devices (DDDs)	Linear Devices (LDs)	6.1		
	Non linear Devices (NLDs)	6.2		

- Carico massimo raggiunto F_{\max}
- Spostamento di progetto d_{bd}
- Carico associato allo spostamento di progetto V_{Ebd}
- Rigidezza del 1° ramo (elastico) k_1

$$k_1 = \frac{\frac{V_{Ebd}}{5} - \frac{V_{Ebd}}{10}}{d\left(\frac{V_{Ebd}}{5}\right) - d\left(\frac{V_{Ebd}}{10}\right)}$$

- Rigidezza del 2° ramo (plastico) k_2

$$k_2 = \frac{V_{Ebd} - V(0.5d_{bd})}{0.5d_{bd}}$$

- Rigidezza efficace k_{effb}

$$k_{effb} = \frac{V_{Ebd}}{d_{bd}}$$

- Smorzamento efficace ξ_{effb}

$$\xi_{effb} = \frac{W(d_{bd})}{2\pi \cdot V_{Ebd} \cdot d_{bd}}$$

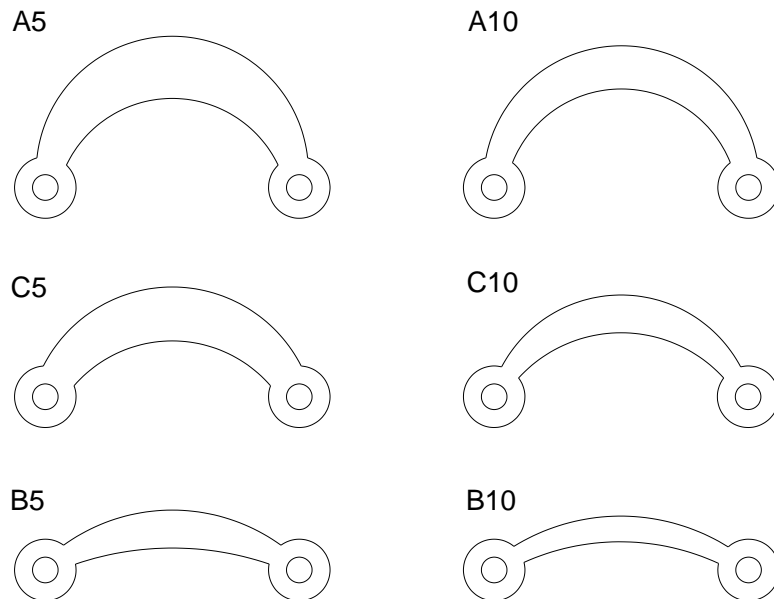
Descrizione dispositivi

Dispositivo STABILFLEX (Biemme S.r.l.)

a) Definizione della geometria ('crescent moon')

E' stata condotta una progettazione preliminare del dispositivo al fine di ottenere una plasticizzazione uniforme dell'elemento. Esso è stato discretizzato in n sezioni ed è stata condotta un'analisi statica a controllo di spostamento. Per ciascuna sezione sono state ricavate le sollecitazioni assiali e flettenti:

$$\frac{N_{Ed}}{A \cdot f_{yd}} + \frac{M_{Ed}}{W_{pl} \cdot f_{yd}} \cong 1$$

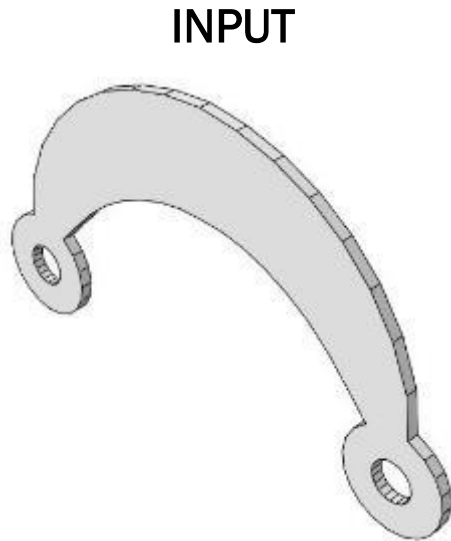


Il dispositivo è stato modellato in Abaqus per verificare l'assenza di fenomeni di instabilità presso-flesso-torsionali.

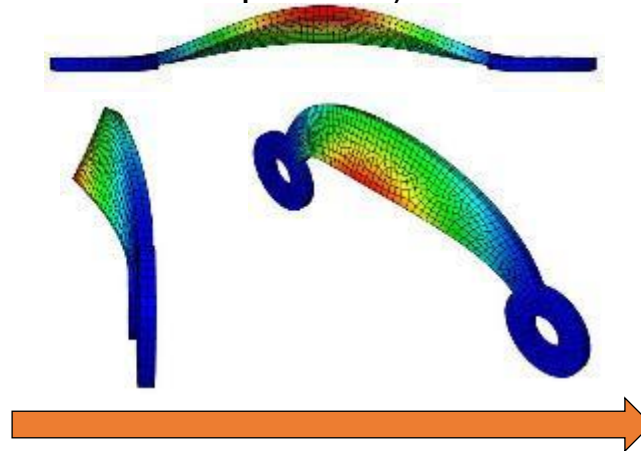
Questi confronti sono stati condotti al fine di definire una correlazione tra la variazione di curvatura del dispositivo e la forza massima sviluppata da quest'ultimo.

Descrizione dispositivi

b) Modellazione (software Abaqus CAE)



Studio di differenti geometrie e spessori



Legge Ramberg-Osgood

$$E_\varepsilon = \sigma + \alpha \left(\frac{|\sigma|}{\sigma_0} \right)^{n-1} \sigma$$

Dove:

ε : deformazione logaritmica

σ : sforzo di Cauchy

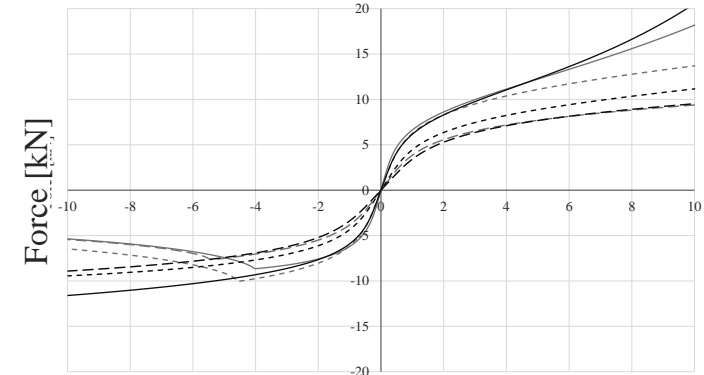
α : coefficiente di rendimento

n : parametro di incrudimento

OUTPUT

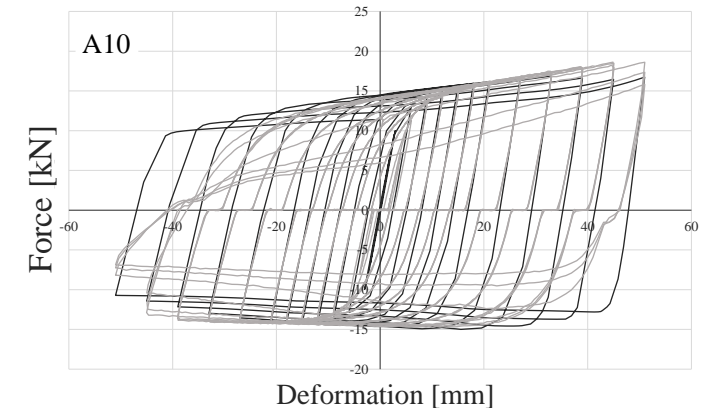
Analisi monotone

B5 C5 A5 B10 C10 A10



Analisi cicliche

Abaqus Experimental test



Descrizione dispositivi

c) Verifica dei principali parametri secondo la UNI EN 15129

(Prove effettuate in Laboratorio con la macchina di prova universal BRT)



video

PROVA CICLICA:

- 5 cicli a $0.25 \cdot d_{bd}$: 10 mm;
- 5 cicli a $0.50 \cdot d_{bd}$: 20 mm;
- 10 cicli a d_{bd} : 40 mm.

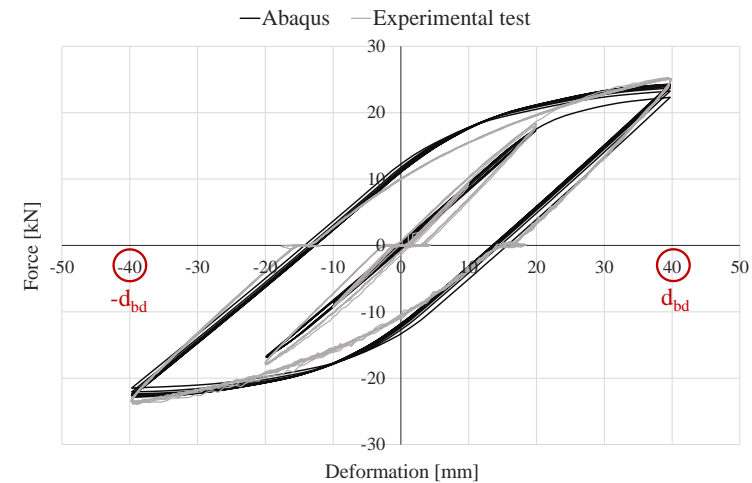
SOVRACCARICO:

$$d_{sovr} = d_{bd} \gamma_b \gamma_x = 40 \cdot 1.1 \cdot 1.5 = 66 \text{ mm}$$

Dove:

γ_b è definito 'Partial factor'

γ_x è definito 'Reliability factor'



Descrizione dispositivi

c) Verifica dei parametri principali secondo la UNI EN 15129

# CICLO		B4(1)					
		Ki [kN/mm]	15% $\Delta(K_i:K_3)$	Keff [kN/mm]	15% $\Delta(K_i:K_3)_{eff}$	ξ_{eff}	10% $\Delta(\xi_i:\xi_3)_{eff}$
3	1+	1,0772		0,56		19,46%	
	2+	0,2921					
	1-	0,9539		0,57		18,85%	
	2-	0,2827					
4	1+	1,0916	1,34%	0,61	7,72%	18,25%	6,21%
	2+	0,2882	-1,31%				
	1-	0,9405	-1,40%	0,57	1,01%	17,61%	6,57%
	2-	0,3136	10,90%				
5	1+	1,1658	8,22%	0,51	9,89%	19,17%	1,47%
	2+	0,3004	2,85%				
	1-	0,9423	-1,21%	0,58	1,70%	18,63%	1,17%
	2-	0,2873	1,61%				
6	1+	1,1222	4,17%	0,60	6,99%	18,64%	4,20%
	2+	0,2964	1,49%				
	1-	0,9486	-0,56%	0,49	14,65%	20,15%	6,88%
	2-	0,3130	10,69%				
7	1+	1,0858	0,80%	0,50	10,59%	19,05%	2,06%
	2+	0,2876	-1,52%				
	1-	0,9509	-0,31%	0,49	14,66%	18,90%	0,26%
	2-	0,2691	-4,84%				
8	1+	1,1618	7,85%	0,60	6,82%	18,41%	5,40%
	2+	0,3055	4,62%				
	1-	0,9408	-1,37%	0,58	0,59%	18,51%	1,80%
	2-	0,2695	-4,68%				
9	1+	1,1645	8,11%	0,60	6,67%	18,26%	6,15%
	2+	0,3037	3,99%				
	1-	0,9467	-0,75%	0,57	0,50%	19,01%	0,84%
	2-	0,3009	6,44%				
10	1+	1,1619	7,86%	0,60	6,88%	18,33%	5,77%
	2+	0,3064	4,91%				
	1-	1,0771	12,92%	0,57	0,47%	18,35%	2,66%
	2-	0,3224	14,04%				

3.1.17

energy dissipating device (EDD)

device which has a large energy dissipation capacity, i.e. which dissipates a large amount of the energy stored during the loading phase. After unloading it normally shows a large residual displacement. A device is classified as **EDD** if the equivalent viscous damping ξ is **greater than 15%**.

3.1.29

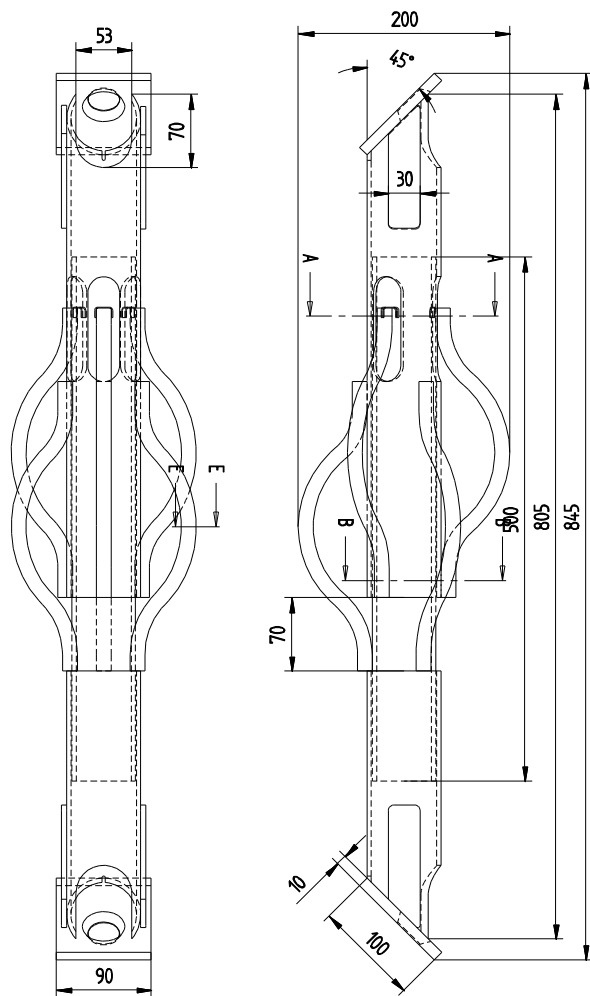
Non Linear Device (NLD)

anti-seismic device which is characterised by a non linear load-displacement relationship, with a stable behaviour under the required number of cycles and substantial independence from velocity. A device is classified as **non linear** if either ξ_{effb} is **greater than 15%** or the ratio $|K_{effb} - K_1|/K_1$ is **greater than 20%**, where ξ_{effb} and K_{effb} are evaluated at the 3rd cycle with maximum displacement equal to d_{bd} .

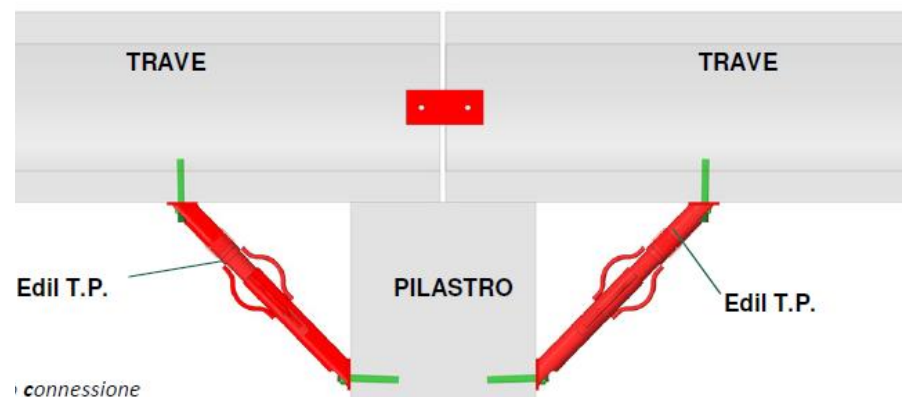
		DESIGN PARAMETERS
Design Displacement	d_{bd} [mm]	40.000
Displacement at yield	d_1 [mm]	18.600
Design first branch stiffness	k_1 [kN/mm]	1.003
Design second branch stiffness	k_2 [kN/mm]	0.268
Design effective stiffness	k_{eff} [kN/mm]	0.595
Design effective damping	ξ_{eff} [%]	18.91 >15%
Design axial load at d_{bd}	V_{Ebd} [kN]	23.853
$ k_{eff}-k_1 /k_1$ [%]		40.71 >20%

Descrizione dispositivi

Dispositivo EDIL TP (Edilmatic S.r.l.)



Il dispositivo è costituito da due tubi in acciaio con possibilità di scorrimento l'uno all'interno dell'altro e collegati da sei elementi curvilinei saldati che, deformandosi, consentono di dissipare energia, limitando le azioni trasmesse agli elementi strutturali e permettendo spostamenti relativi tra gli stessi.



La coppia di serraggio prescritta per la tassellatura dei dispositivi è pari a 150 Nm.

Descrizione dispositivi

Dispositivo EDIL TP (Edilmatic S.r.l.)

$\pm 0.25 \cdot d_{bd}$



$\pm 0.5 \cdot d_{bd}$



$\pm d_{bd}$



Fine prova



PROVA CICLICA:

- 5 cicli a $0.25 \cdot d_{bd}$: 3.125 mm;
- 5 cicli a $0.50 \cdot d_{bd}$: 6.25 mm;
- 10 cicli a d_{bd} : 12.5 mm.

Il campione ha effettuato tutta la storia di spostamento senza raggiungere la rottura, sviluppando un cinematismo ad arco a tre cerniere con deformazione degli archetti e formazione di due cerniere plastiche all'interfaccia con le saldature alle estremità degli stessi e di una cerniera plastica in mezzeria.

Non è stato osservato alcun danneggiamento né dei tubolari né delle estremità in corrispondenza del collegamento con gli afferraggi.

Non sono stati riscontrati problemi particolari per quanto riguarda i bulloni di collegamento.

Descrizione dispositivi

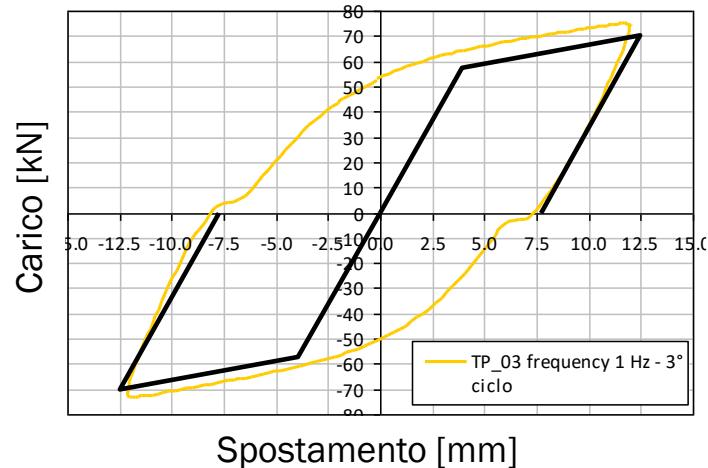
Dispositivo EDIL TP (Edilmatic S.r.l.)

3.1.17 Energy dissipating device (EDD)

device which has a large energy dissipation capacity, i.e. which dissipates a large amount of the energy stored during the loading phase. After unloading it normally shows a large residual displacement. A device is classified as **EDD** if the equivalent viscous damping ξ is **greater than 15%**.

3.1.29 Non Linear Device (NLD)

anti-seismic device which is characterised by a non linear load-displacement relationship, with a stable behaviour under the required number of cycles and substantial independence from velocity. A device is classified as **non linear** if either ξ_{effb} is **greater than 15%** or the ratio $|K_{\text{effb}} - K_1|/K_1$ is **greater than 20%**, where ξ_{effb} and K_{effb} are evaluated at the 3rd cycle with maximum displacement equal to d_{bd} .



		TRAZIONE			COMPRESSIONE		MEDIA T-C	
		Campioni		Media	Campioni		Media	
		T_TP_1	T_TP_2		C_TP_1	C_TP_2		
d_{bd}	[mm]	12.500	12.500	12.500	-12.500	-12.500	-12.500	12.500
V_{Ebd}	[kN]	70.496	70.525	70.511	-71.467	-71.445	-71.456	70.983
$V_{\text{Ebd}}/5$	[kN]	14.099	14.105	14.102	-14.293	-14.289	-14.291	14.197
$V_{\text{Ebd}}/10$	[kN]	7.050	7.053	7.051	-7.147	-7.144	-7.146	7.098
$d(V_{\text{Ebd}}/5)$	[mm]	1.229	1.230	1.230	-1.029	-1.036	-1.033	1.131
$d(V_{\text{Ebd}}/10)$	[mm]	0.615	0.615	0.615	-0.515	-0.515	-0.515	0.565
k_1	[kN/mm]	11.480	11.468	11.474	13.884	13.706	13.795	12.634
$0.5d_{\text{bd}}$	[mm]	6.250	6.250	6.250	-6.250	-6.250	-6.250	6.250
$V(0.5d_{\text{bd}})$	[kN]	61.719	62.092	61.905	-61.445	-61.684	-61.564	61.735
k_2	[kN/mm]	1.404	1.349	1.377	1.604	1.562	1.583	1.480
k_{eff}	[kN/mm]	5.640	5.642	5.641	5.717	5.716	5.716	5.679
ξ_{eff}	[%]	35.528	36.471	36.000	35.045	36.002	35.524	35.762
d_1	[mm]	5.255	5.303	5.279	-4.187	-4.276	-4.231	4.755
V_1	[kN]	60.321	60.814	60.567	-58.137	-58.601	-58.369	59.468
$ k_{\text{eff}} - k_1 /k_1$	[%]	50.872	50.802	50.837	58.822	58.297	58.561	55.054

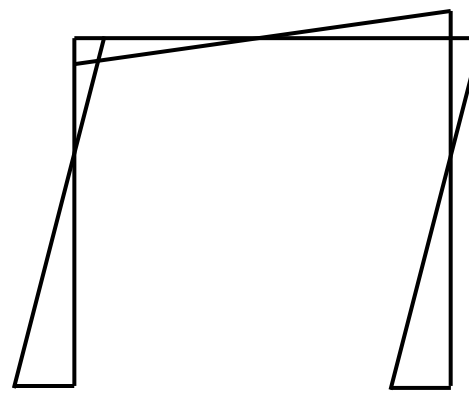
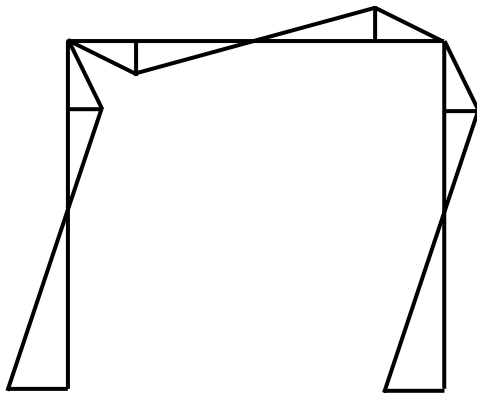
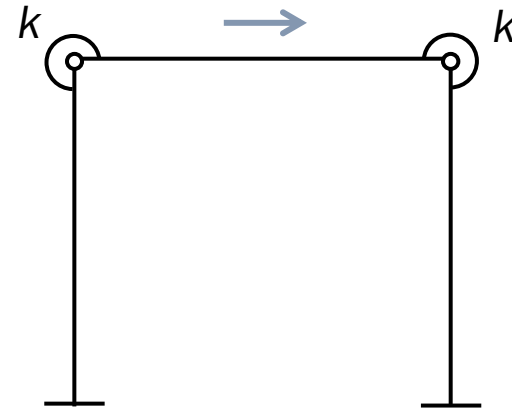
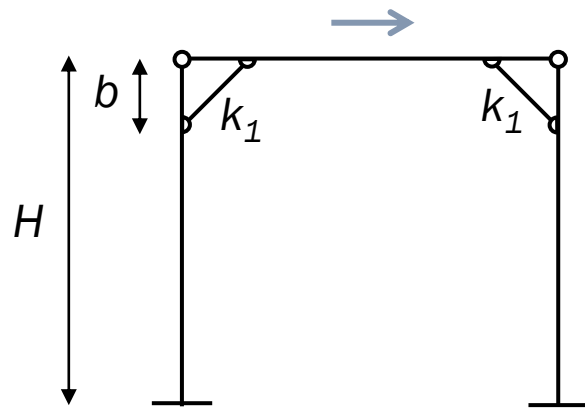
→ >15%
→ >20%

(secondo la UNI EN 15129)

PROCEDURA DI CALCOLO:

- (a) Criterio di dimensionamento per edifici esistenti
- (b) Studio preliminare degli spostamenti attesi
- (c) Verifica
 - Analisi statica non lineare (Capacity Spectrum)*
 - Analisi dinamica non lineare (Time History)*
- (d) Modellazione a elementi finiti
 - Analisi nel piano*
 - Analisi nel piano ortogonale*

Dimensionamento

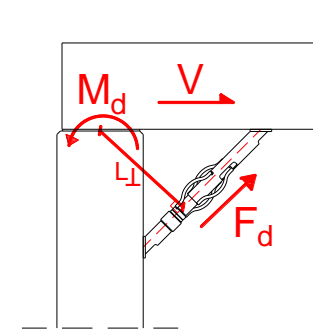


$$b \ll H$$

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

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

$$F_d = V \cdot \sqrt{2}$$



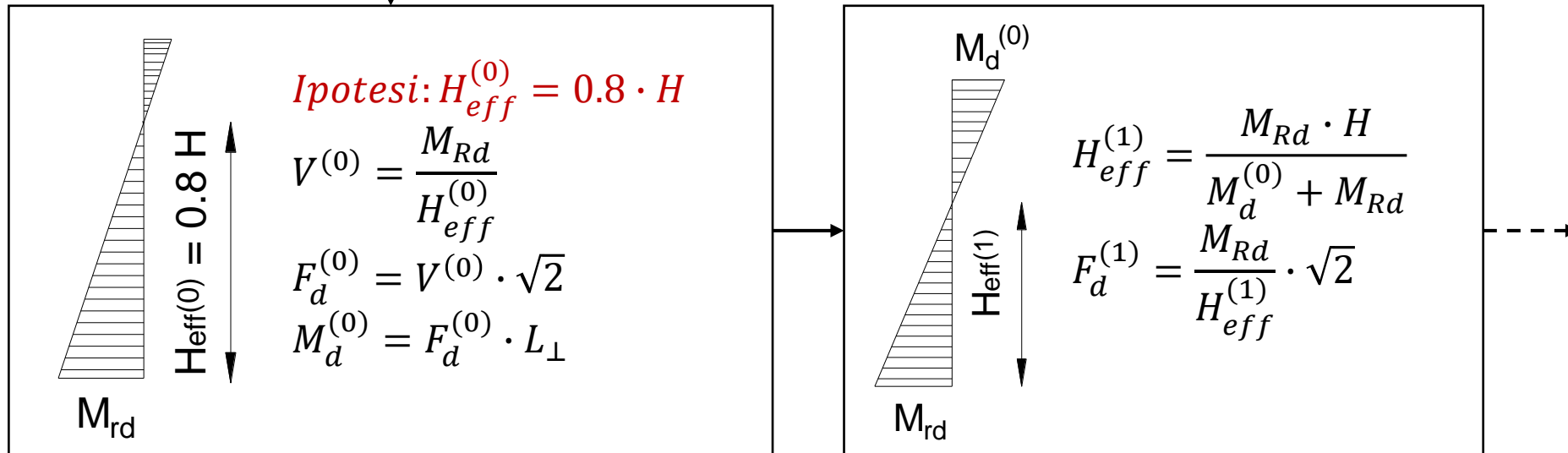
Dimensionamento

Definizione

- Geometria del pilastro;
- Azione sollecitante N_{ed} sul pilastro;
- Caratteristiche medie dei materiali;
- Fattore di confidenza (FC).

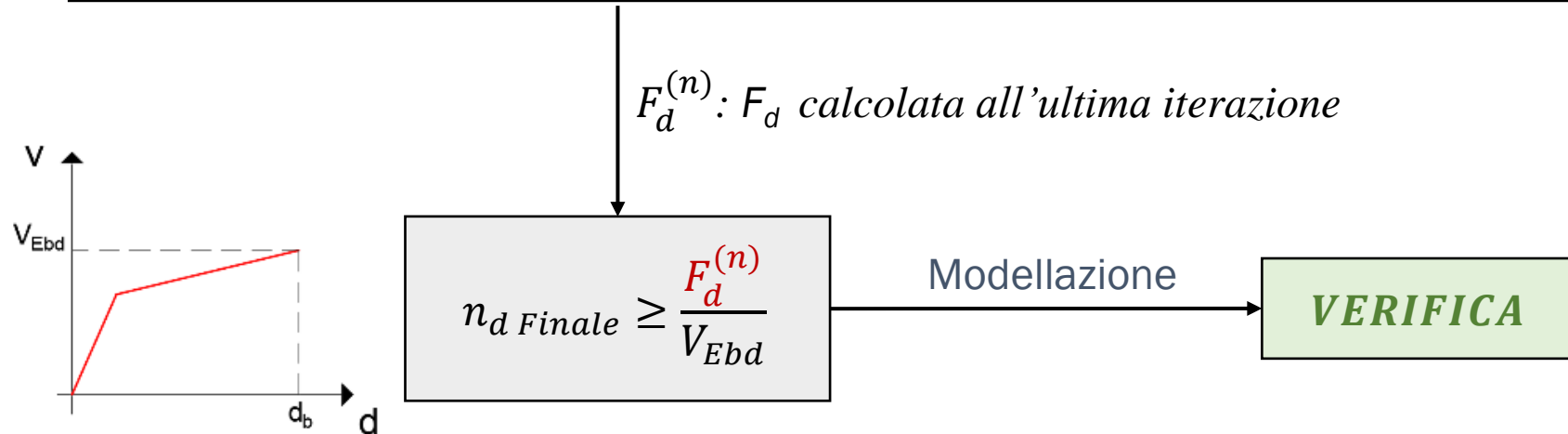
M_{Rd} pilastro

Pilastro

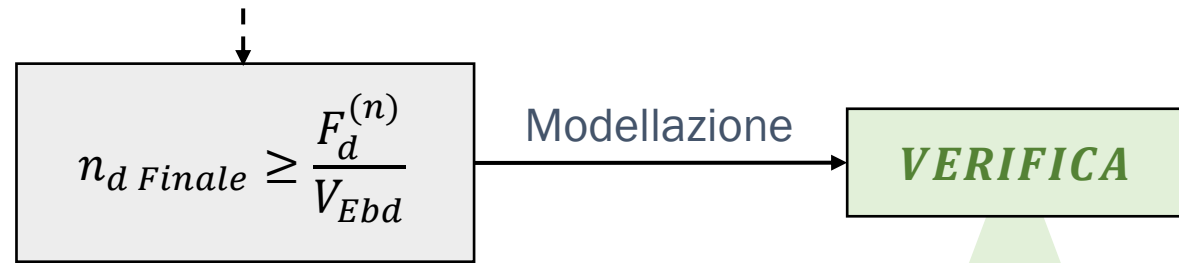


Dimensionamento

Se $F_d^{(0)}$ e $F_d^{(1)}$ sono associati allo stesso numero di dispositivi (calcolato come il rapporto tra $F_d^{(i)}$ e V_{Ebd} al passo i) 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.



Dimensionamento



b) Verifica con analisi a elementi finiti

Possono essere utilizzati due metodi di verifica:

1. Analisi statica non lineare: Capacity Spectrum

Questo metodo di verifica descritto nella Circolare 21/01/2019, n.7 C.S.LL.PP., considerando lo spettro da normativa a stato limite di salvaguardia della vita, 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.

2. Analisi dinamica non lineare: Time History

È possibile utilizzare analisi dinamiche non lineari, di tipo Time History, al fine di verificare le nuove prestazioni della struttura al seguito dell'inserimento dei dispositivi di collegamento trave-pilastro. Nello specifico possono essere considerati set di accelerogrammi spettro-compatibili per il sito in esame.

Dimensionamento

Stima preliminare degli spostamenti attesi

STRUTTURA ESISTENTE

Inserimento dispositivi trave-pilastro

Calcolo della rigidezza totale del sistema post-intervento

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

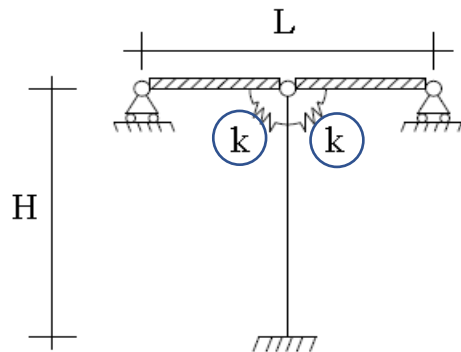
Dove

m^* : massa totale della struttura

k^* : rigidezza post-intervento

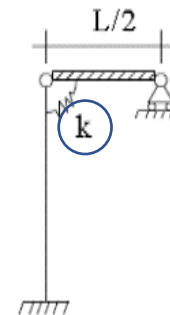
Calcolo k^* :

$$k^* = k_A \cdot n_{\text{Pilastri centrali}} + k_B \cdot n_{\text{Pilastri laterali}}$$



$$k_A = \frac{6EI_c}{H^3} \frac{EI_c + 2kH}{2EI_c + kH}$$

$$\Delta_y^{A\text{-column}} = \left(\frac{\phi_y^{\text{column}}}{3} - \frac{M_y^{\text{conn}}}{3EI_c} \right) H^2$$



$$k_B = \frac{12EI_c}{H^3} \frac{EI_c + kH}{4EI_c + kH}$$

$$\Delta_y^{B\text{-column}} = \left(\frac{\phi_y^{\text{column}}}{3} - \frac{M_y^{\text{conn}}}{6EI_c} \right) H^2$$

Dimensionamento

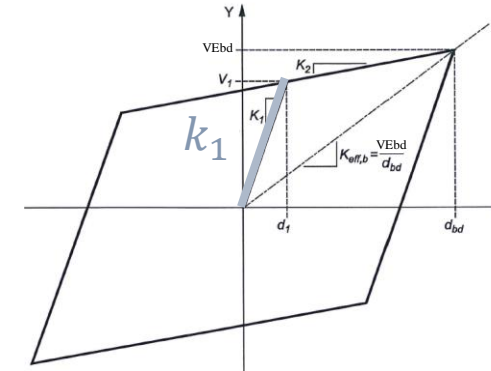
$$k = n_d^* \cdot k_1 \cdot (L_{\perp})^2 \quad \text{rigidezza rotazionale}$$

Dove

k_1 : rigidezza elastica del singolo dispositivo;

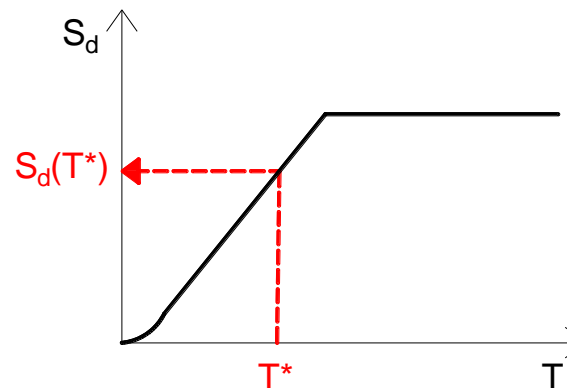
L_{\perp} : distanza tra il collegamento del dispositivo e il punto di rotazione;

n_d^* : numero di dispositivi da utilizzare per il collegamento trave pilastro.



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

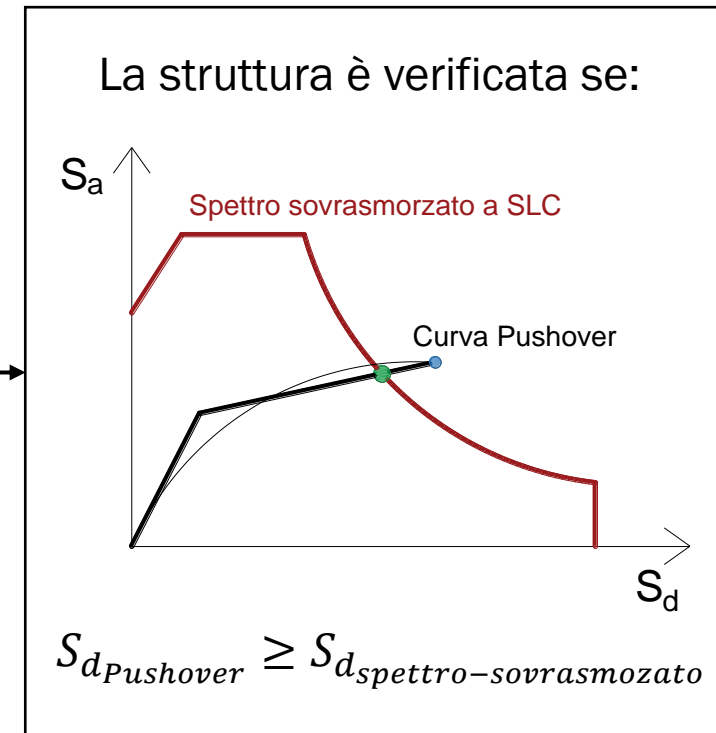
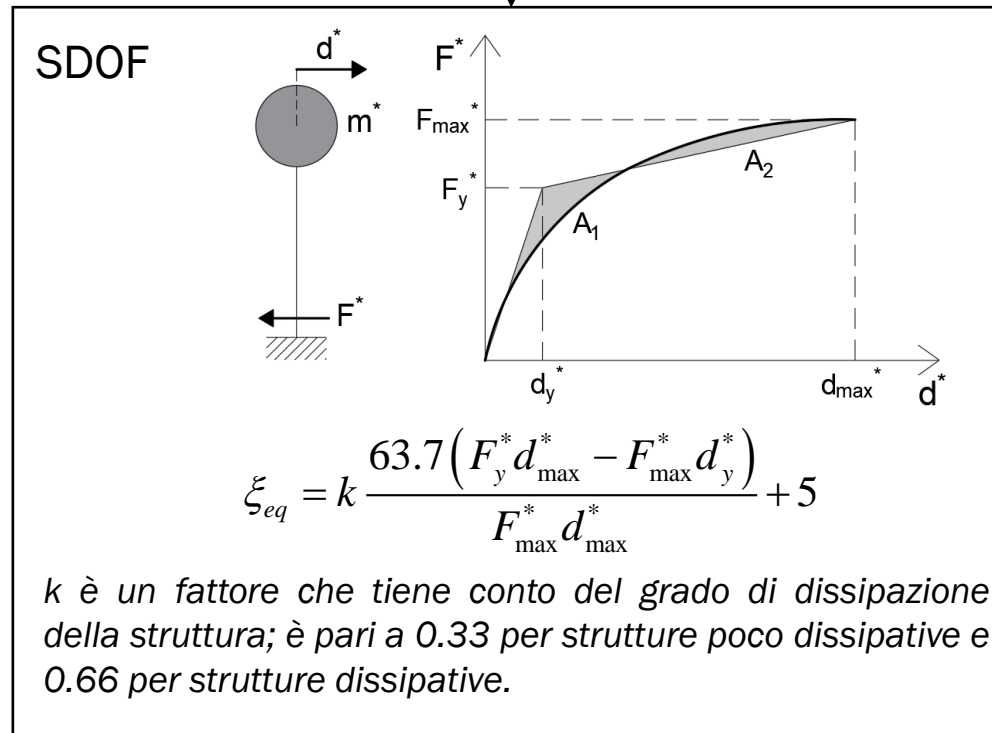
Spettri elastici in spostamento a SLV e SLC



Verifiche

Analisi statica non lineare: Capacity Spectrum

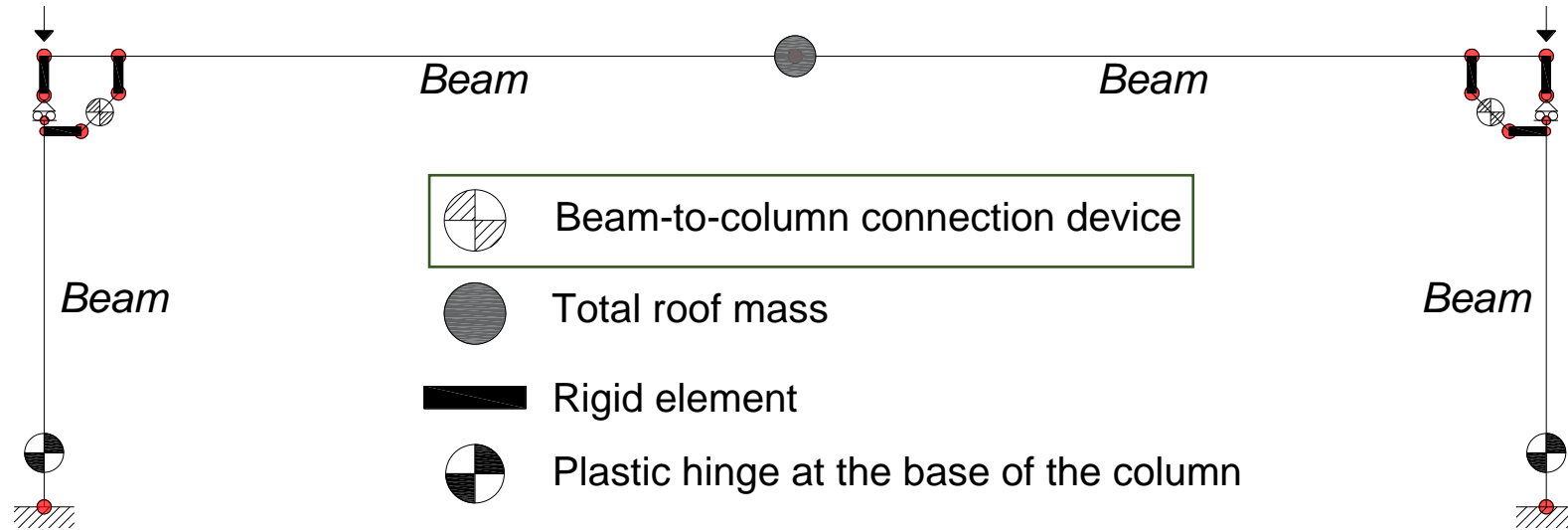
L'analisi non lineare statica consente di determinare la curva di capacità della struttura, espressa dalla relazione F^*-d^* , in cui F^* è il taglio alla base e d^* lo spostamento di un punto di controllo. A tal fine si associa al sistema strutturale reale un sistema strutturale equivalente a un grado di libertà.



Verifiche

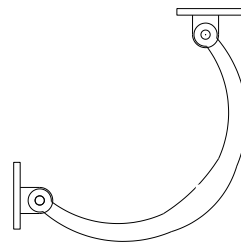
Modellazione a elementi finiti

1. Analisi nel piano:

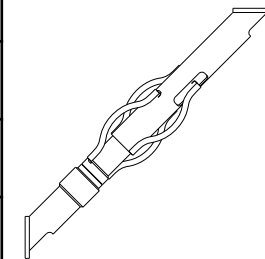


Esempi

Dispositivo Stabilflex Legame bilineare elasto-plastico	
F [kN]	D [mm]
18.6	18.6
23.85	40.0



Dispositivo Edil TP Legame bilineare elasto-plastico	
F [kN]	D [mm]
57.5	3.94
70.0	12.5

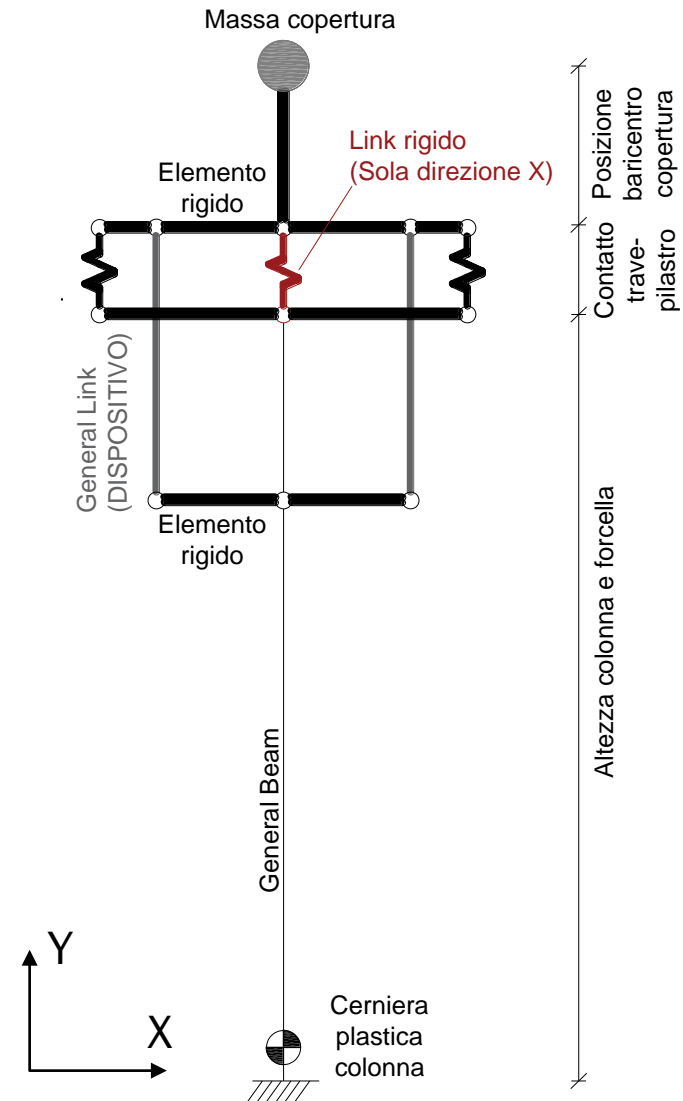


Verifiche

Modellazione a elementi finiti

2. Analisi nel piano ortogonale:

- La colonna è implementata come elemento beam incastrato alla base;
- Viene inserita la cerniera plastica alla base della colonna 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 nella direzione del fuori piano, mentre è consentita la rotazione;
- I dispositivi di collegamento trave-pilastro sono modellati come general link;
- Il contatto tra la trave e il pilastro è modellato attraverso l'inserimento di due link con comportamento SLIP bilinear/compression.



ESEMPIO DI CALCOLO:

CASO STUDIO STABILFLEX E CASO STUDIO EDIL TP

- (a) Criterio di dimensionamento per edifici esistenti
- (b) Stima degli spostamenti attesi a seguito dell'inserimento dei dispositivi

- (c) Verifica

Analisi statica non lineare (Capacity Spectrum)

Analisi dinamica non lineare (Time History)

- (d) Modellazione a elementi finiti

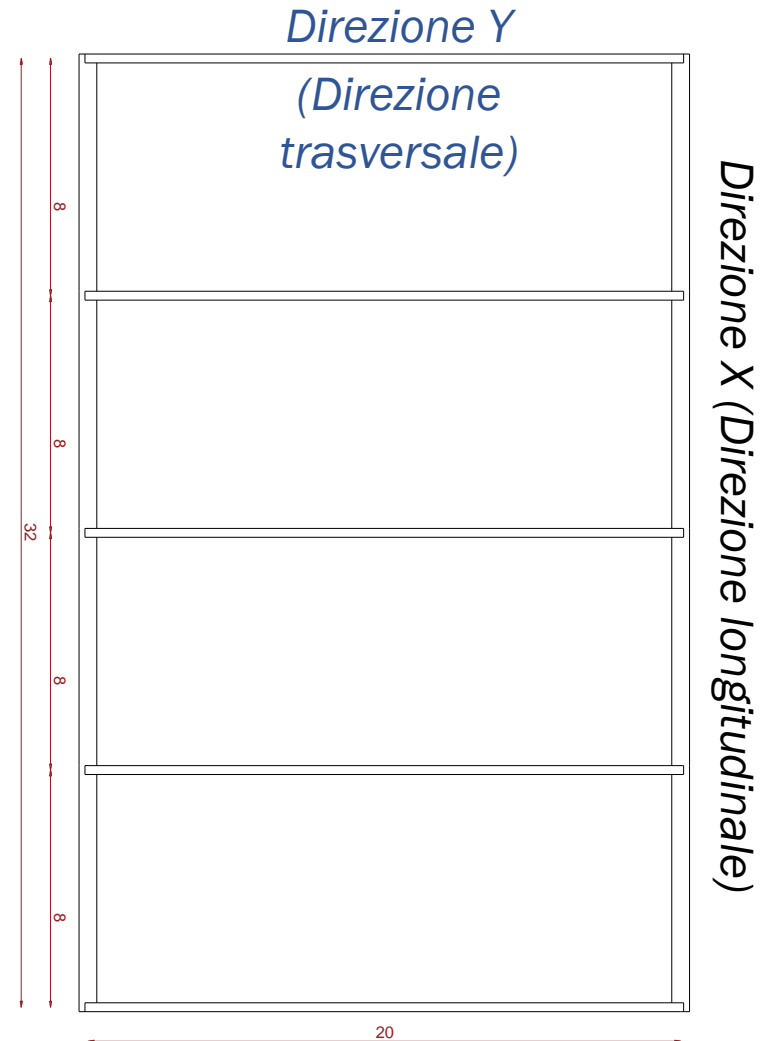
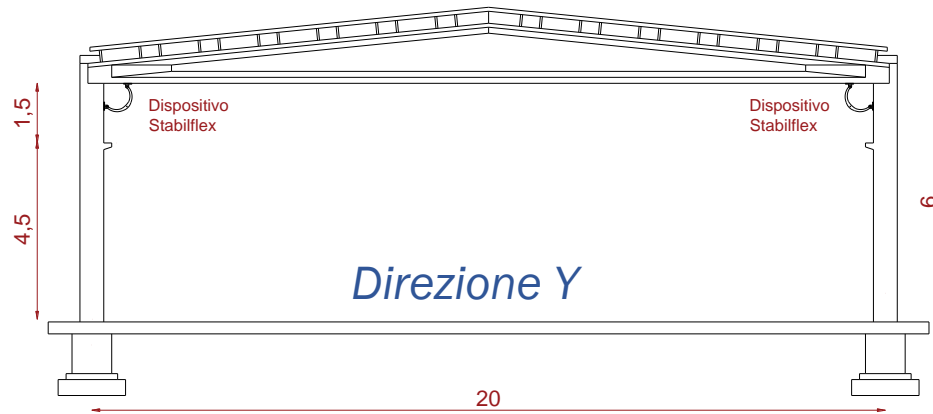
Analisi nel piano

Analisi nel piano ortogonale



Esempio di calcolo

Caso studio STABILFLEX



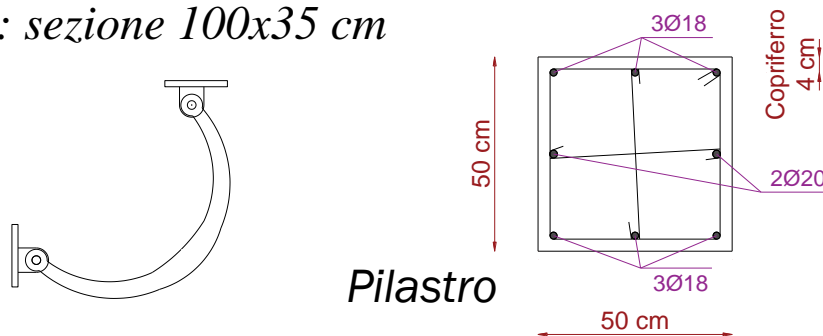
L'Aquila, T1, C.

Calcestruzzo C45/55

Acciaio FeB44K

Pilastri: sezione 50x50 cm, ρ_s 0.8%

Travi: sezione 100x35 cm



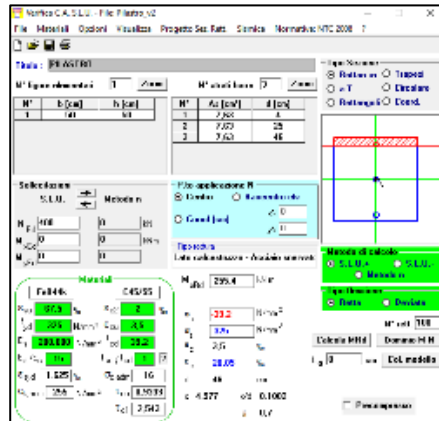
Esempio di calcolo

Definizione delle caratteristiche meccaniche medie dei materiali

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 assume un fattore di confidenza (FC) pari a 1.20, corrispondente al livello di conoscenza LC2.

VcaStu Prof. Gelfi



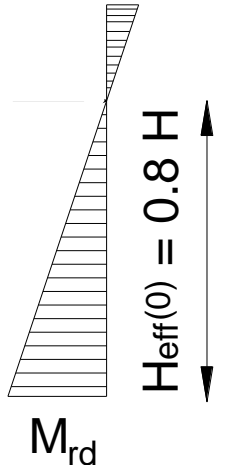
fcd [MPa]	37.5	Resistenza di calcolo a compressione (cls)
fyd [MPa]	367	Resistenza di calcolo a trazione (acciaio)

$$M_{Rd \text{ pilastro}} = 293.3 \text{ kNm}$$

Esempio di calcolo

Definizione del numero di dispositivi richiesti

Si ipotizza un valore di $H_{eff}^{(0)}$ pari all'80% dell'altezza totale H .



$H_{eff}^{(0)} = 0.8 \cdot H = 4.8m$

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

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

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

Da cui

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

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

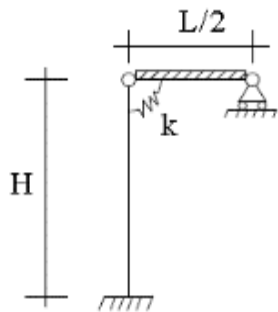
Siccome $F_d^{(0)}$ e $F_d^{(1)}$ sono associati allo stesso numero di dispositivi (calcolato come il rapporto tra F_d e V_{Ebd}) allora il criterio di convergenza è verificato. Sono quindi stati inseriti quattro dispositivi di collegamento in ciascun giunto, cioè una forza totale di 95.6kN, con uno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

Esempio di calcolo

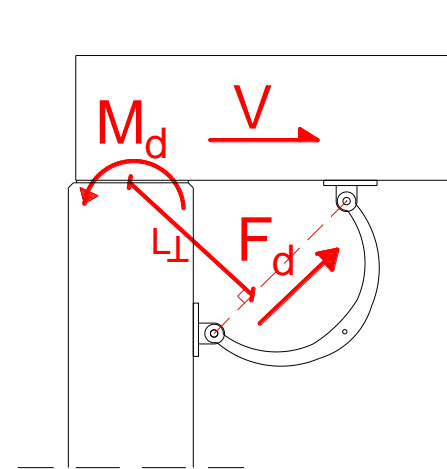
Calcolo periodo proprio della struttura:

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

Quindi:



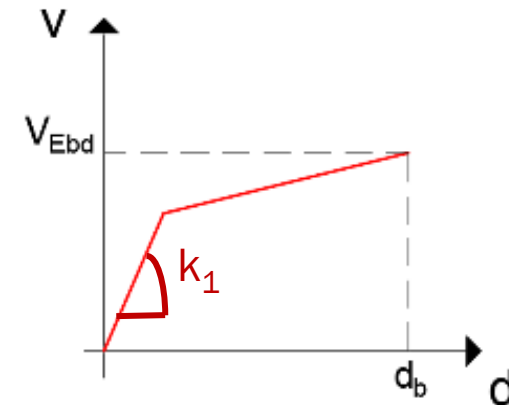
$$k_B = \frac{12EI_c}{H^3} \frac{EI_c + kH}{4EI_c + kH}$$



k è la rigidezza rotazionale dei dispositivi. Si considerano quattro dispositivi per ogni nodo (n_d^* pari a 4).

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

k_1 è la rigidezza del primo ramo (elastico) pari a 1kN/mm



Esempio di calcolo

$$k^* = k_B \cdot n_{\text{pilastri laterali}} = k_B \cdot 10 = 14130.8 \text{ kN/m}$$

Il periodo proprio della struttura è quindi pari a: $T^* = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m^*}{k^*}} = 1.2\text{s}$

Dove

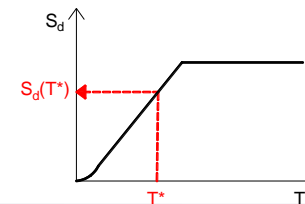
- m^* rappresenta la somma della massa della copertura e di quota parte della massa associata ai pannelli perimetrali e ai pilastri. Essa è circa pari a 500t;
- E_c rappresenta il modulo di elasticità del calcestruzzo ed è pari a 36283MPa;
- I_c rappresenta il momento di inerzia ed è pari a $5.2 \cdot 10^{-3} \text{m}^4$.

La rigidezza $E_c I_c$ è stata abbattuta del 50% per tener conto della fessurazione del cls:

$$E_c I_c = 9.45 \cdot 10^{13} \text{ Nmm}^4$$

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:*

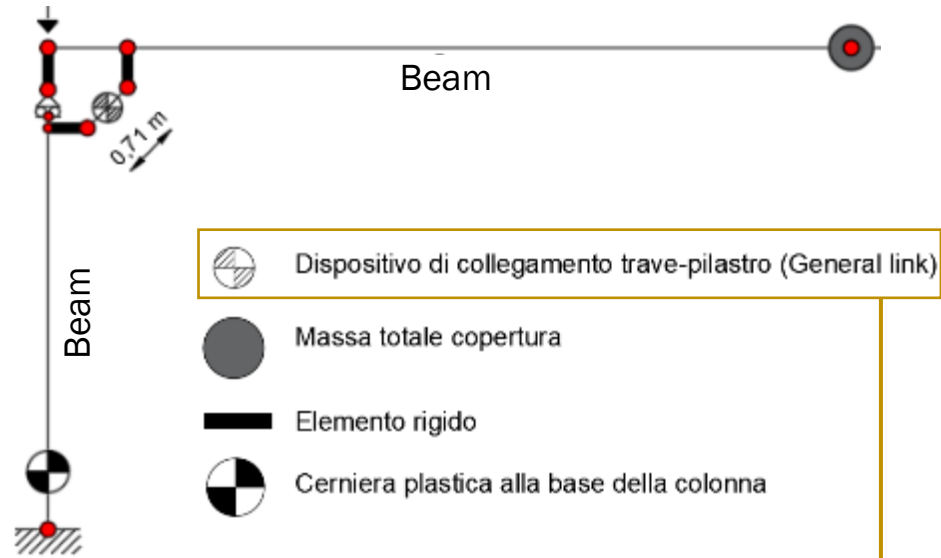
	SLV	SLC
$S_d(T^*)$ [m]	0.126	0.155



Esempio di calcolo

Modellazione a elementi finiti

1. Analisi nel piano:



La cerniera plastica alla base del pilastro è stata modellata utilizzando un legame di tipo 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 4 dispositivi di collegamento utilizzando general link di tipo spring, con rigidezza totale pari a 4 kN/mm.

Ciascun dispositivo dissipativo

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

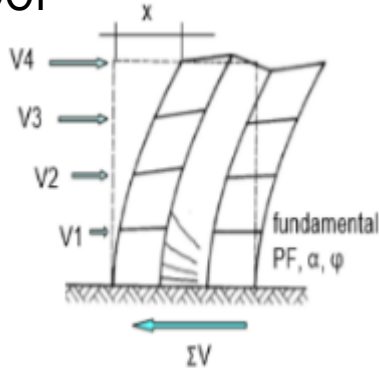
Legame Bouc-Wen					
k [kN/mm]	Fy [kN]	r	s	a	b
1	18.6	0.247	2.0	0.5	0.5
		5			

Esempio di calcolo

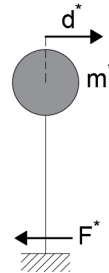
Verifica

1. Analisi statica non lineare (Capacity Spectrum):

MDOF

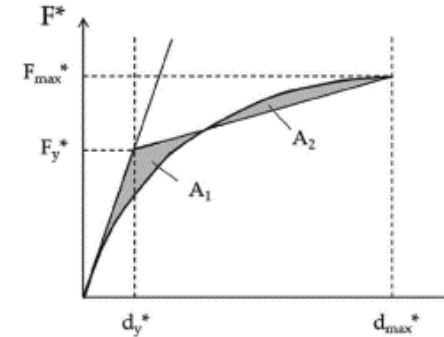


SDOF equivalente



Analisi
Pushover

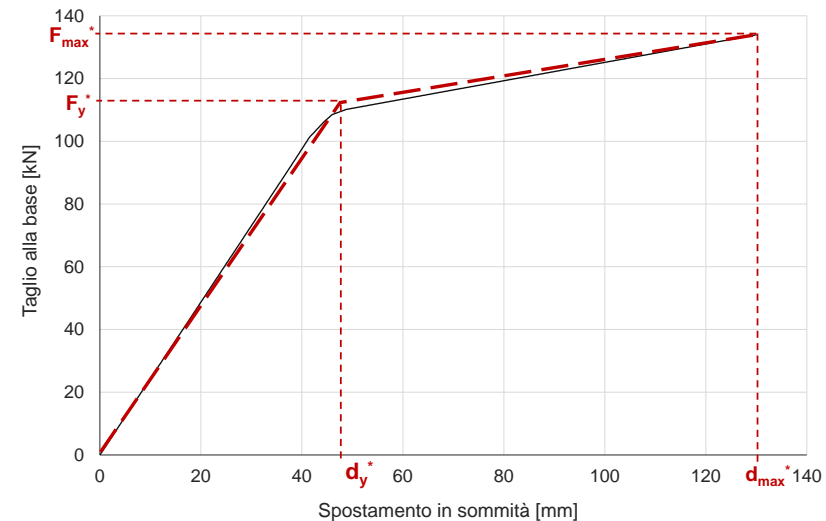
Spettro di capacità



Spostamento massimo associato a d_{bd} dispositivo

$$\xi_{eq} = k \frac{63.7 (F_y^* d_{max}^* - F_{max}^* d_y^*)}{F_{max}^* d_{max}^*} + 5 = 14.75\%$$

Si assume $k=0.33$ in quanto si ritiene la struttura poco dissipativa essendo lo spostamento al limite di snervamento pari a 18.6 mm.



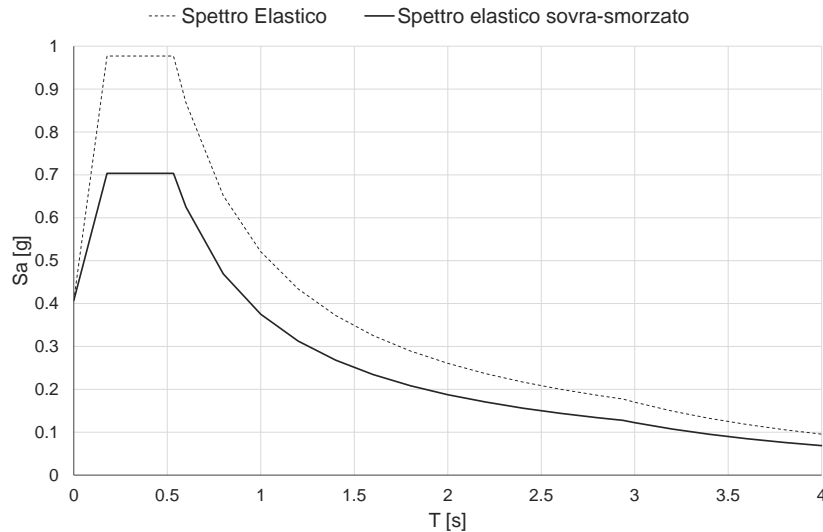
Esempio di calcolo

Verifica

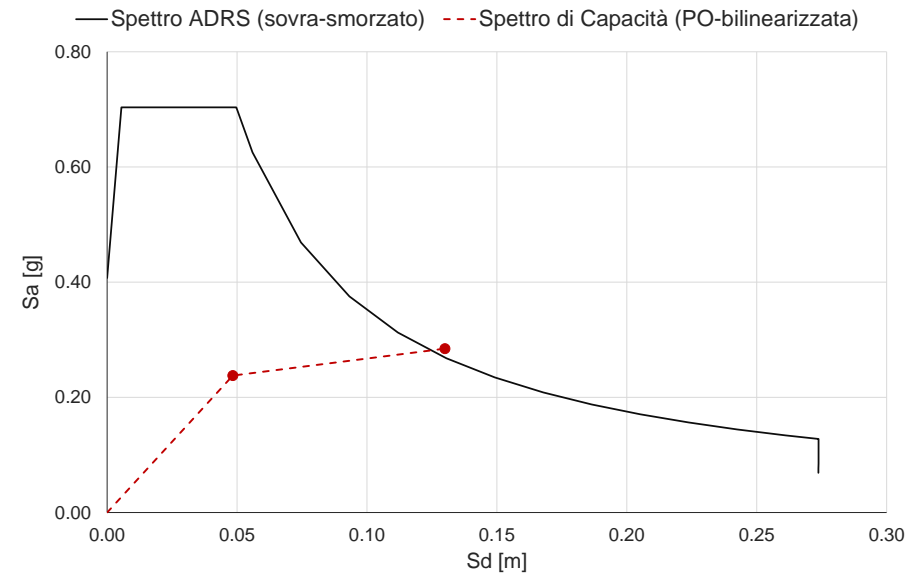
1. Analisi statica non lineare (Capacity Spectrum):

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

Viene quindi ottenuto lo spettro di domanda sovra-smorzato



Verifica fatta in termini di spostamento



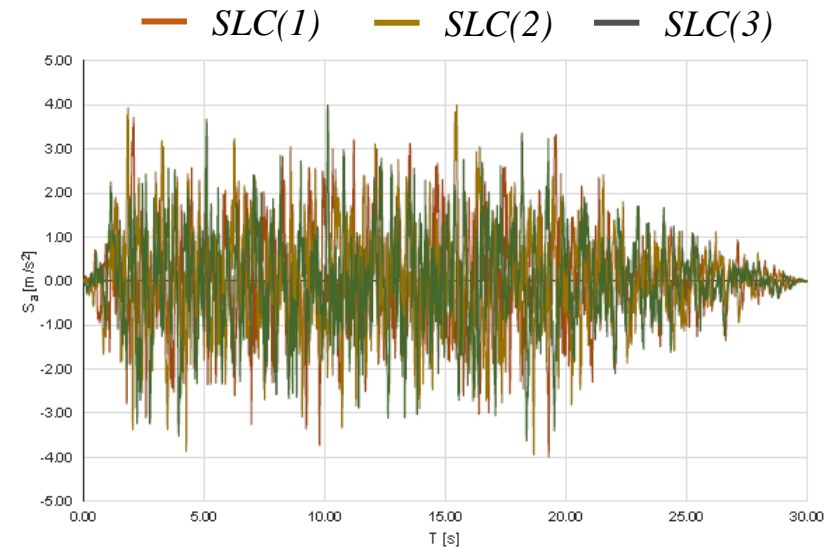
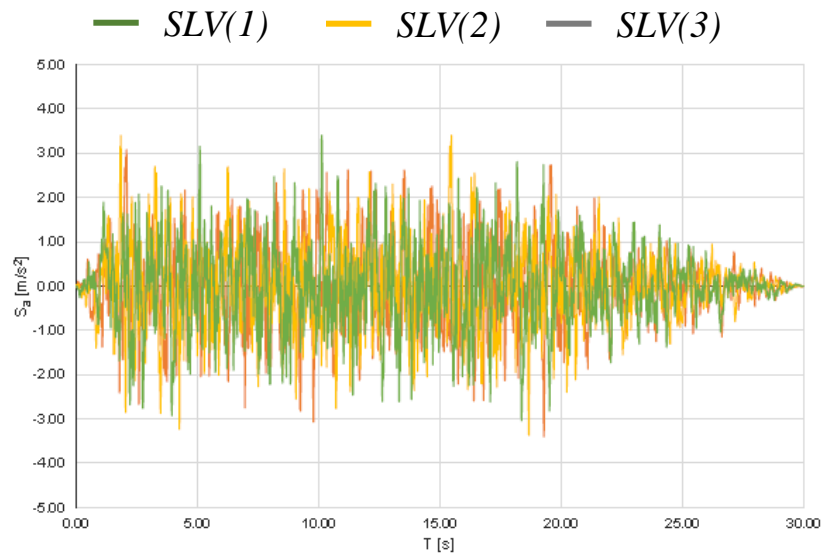
Capacità $S_{d_{pushover}} \geq S_{d_{spettro-sovrasmozato}}$ Domanda

Esempio di calcolo

Verifica

2. Analisi dinamica non lineare

La validazione tramite analisi time history è scorporata in due fasi: la prima prevede la verifica del dispositivo nel piano, mentre la seconda la valutazione del comportamento in direzione ortogonale al piano. Per entrambe le validazioni sono stati utilizzati due set composti da tre accelerogrammi spettro-compatibili a stato limite di salvaguardia della vita e a stato limite di prevenzione al collasso.

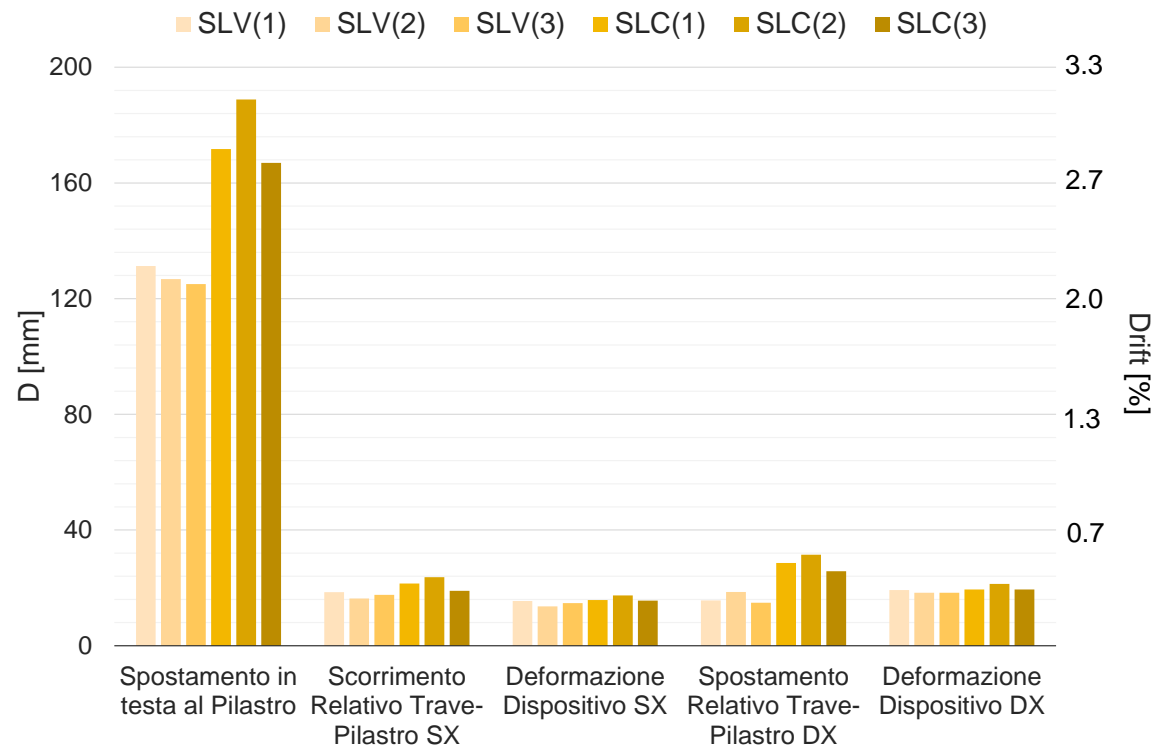


Esempio di calcolo

Verifica

2a. Analisi dinamica non lineare **nel piano**

Per il calcolo dello smorzamento è stato utilizzato il criterio 'Mass & Stiffness Proportional'. Sono quindi stati implementati i periodi T_1 e T_2 , rispettivamente pari a 2.0 e 0.3 s, e fattore di smorzamento ξ pari al 3%.



Sono qui 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.

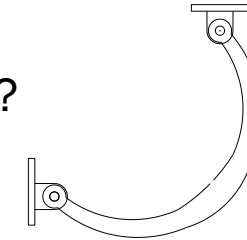
Esempio di calcolo

Confronto del momento alla base:

M_{\max} [kNm]	Analisi dinamica non lineare			Capacity spectrum
	SLV (1)	SLV (2)	SLV (3)	
	274.65	262.7	262.5	251.1

Questo sistema di connessione è efficace nella dissipazione di energia?

Si raggiunge il M_{Rd} (293.3kNm) alla base del pilastro?



M_{\max} / M_{Rd}	Analisi dinamica non lineare			Capacity spectrum
	SLV (1)	SLV (2)	SLV (3)	
	0.936	0.896	0.895	0.856

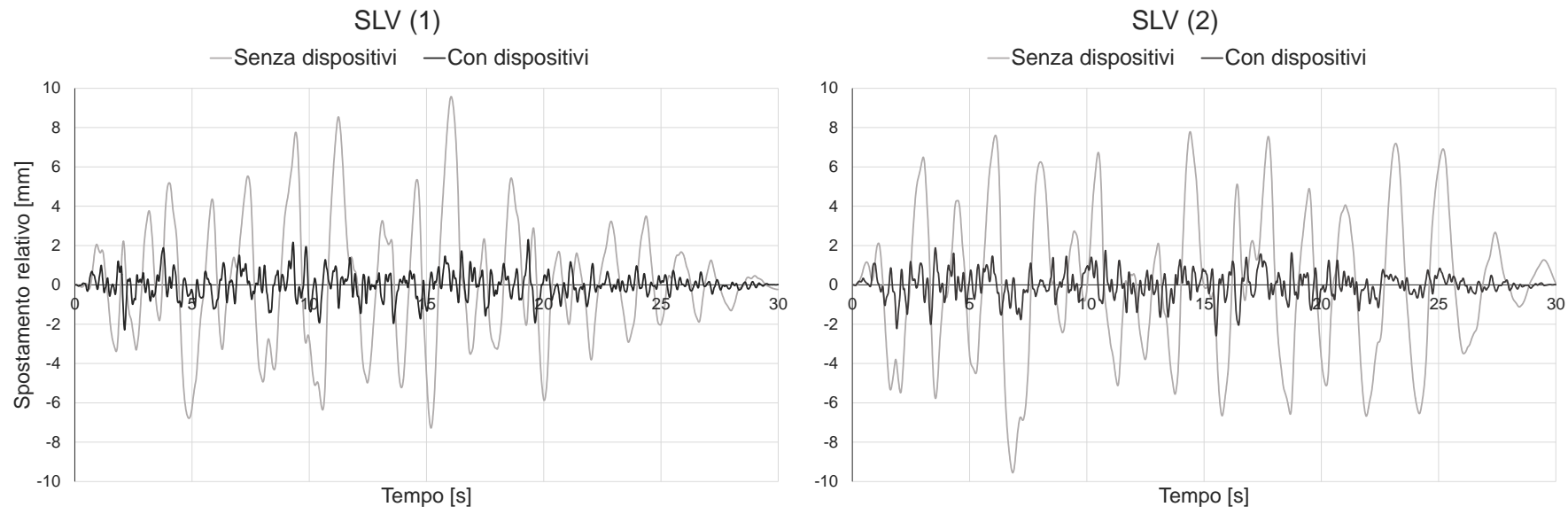
Essendo i rapporti $\frac{M}{M_{Rd}} < 1$, il sistema è efficace per la dissipazione di energia e non si sviluppa alcuna cerniera plastica alla base del pilastro.

Esempio di calcolo

Verifica

2b. Analisi dinamica non lineare **in direzione ortogonale al piano**

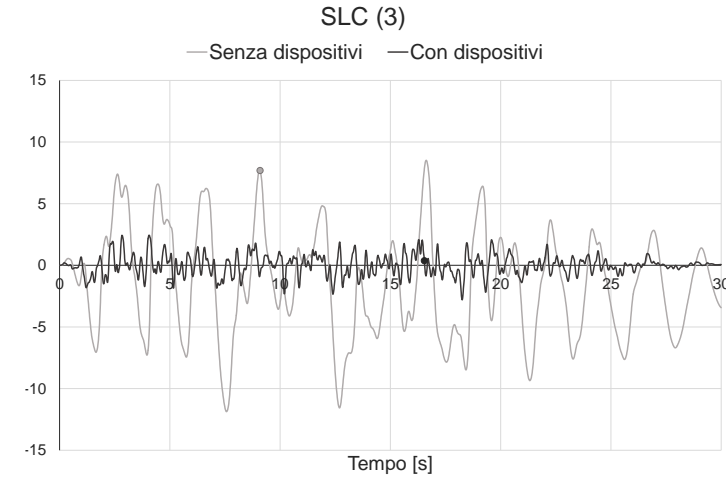
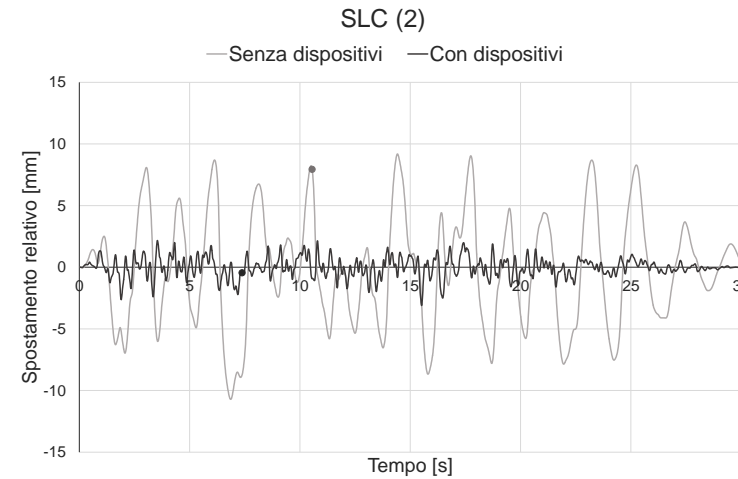
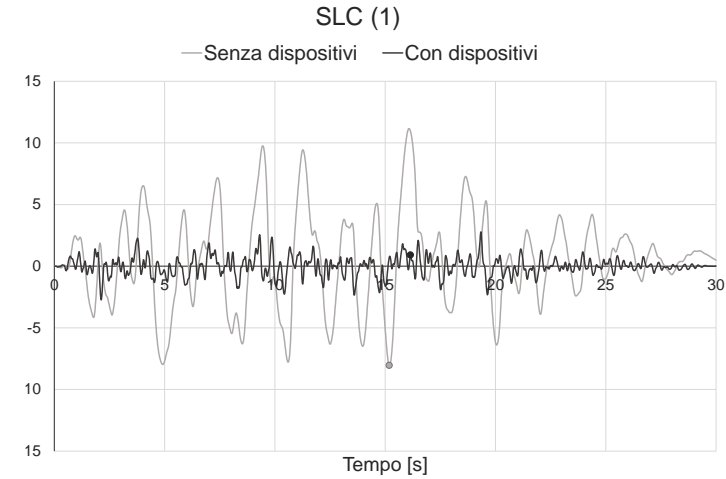
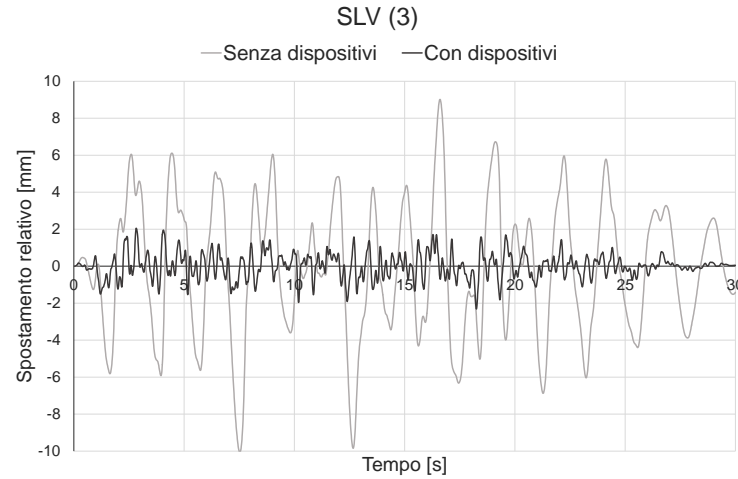
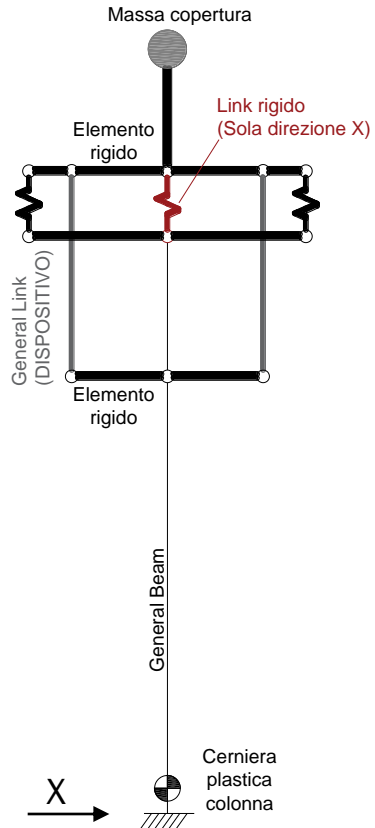
Sono state condotte analisi in direzione ortogonale al piano al fine di valutare il contributo che i dispositivi trave-pilastro riescono a offrire al fine di evitare il ribaltamento della trave. Per studiare tale comportamento è stato preso a riferimento il singolo pilastro con i relativi dispositivi di connessione trave-pilastro e la massa della copertura associata.



Esempio di calcolo

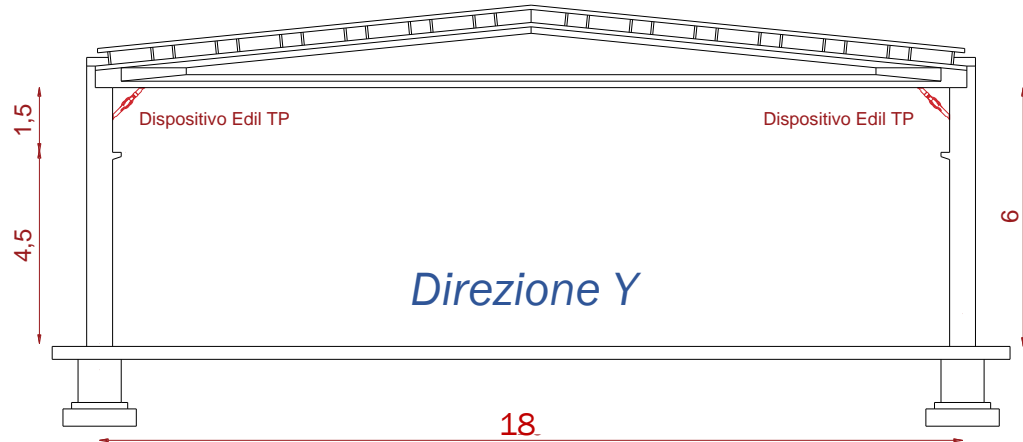
Verifica

2b. Analisi dinamica non lineare in direzione ortogonale al piano



Esempio di calcolo

Caso studio EDIL TP



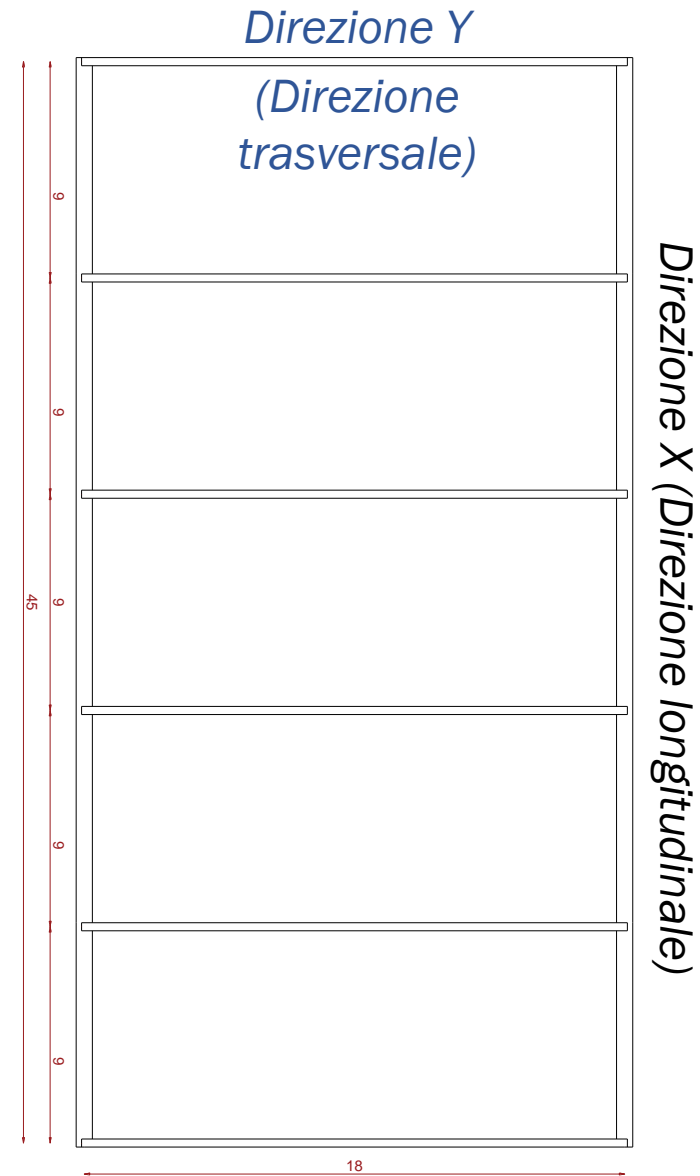
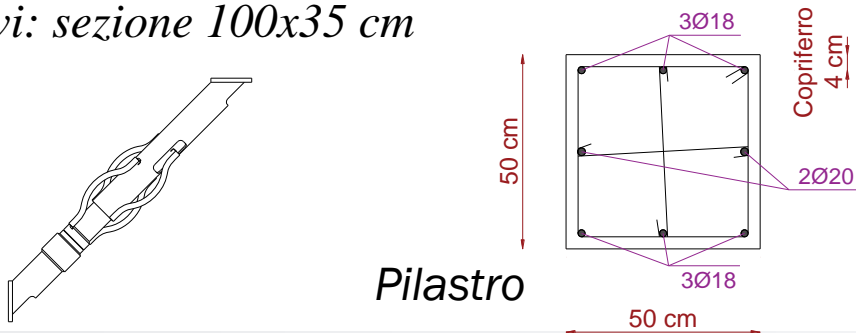
L'Aquila, T1, C.

Calcestruzzo C50/60

Acciaio FeB44K

Pilastri: sezione 50x50 cm, ρ_s 0.8%

Travi: sezione 100x35 cm



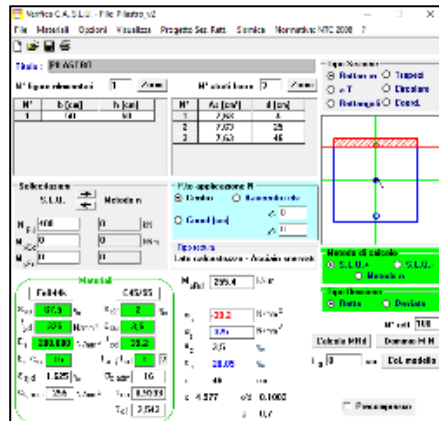
Esempio di calcolo

Definizione delle caratteristiche meccaniche medie dei materiali

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 assume un fattore di confidenza (FC) pari a 1.20, corrispondente al livello di conoscenza LC2.

VcaStu Prof. Gelfi



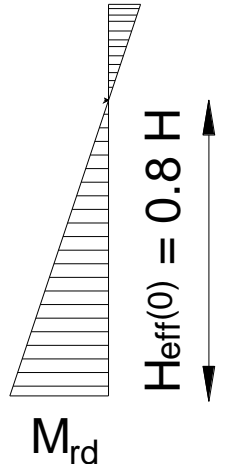
fcd [MPa]	41.7	Resistenza di calcolo a compressione (cls)
fyd [MPa]	367	Resistenza di calcolo a trazione (acciaio)

$$M_{Rd \text{ pilastro}} = 295.4 \text{ kNm}$$

Esempio di calcolo

Definizione del numero di dispositivi richiesti

Si ipotizza un valore di $H_{eff}^{(0)}$ pari all'80% dell'altezza totale H .



$H_{eff}^{(0)} = 0.8 \cdot H = 4.8m$

$V^{(0)} = \frac{M_{Rd}}{H_{eff}^{(0)}} = 61.5kN$

$F_d^{(0)} = V^{(0)} \cdot \sqrt{2} = 87.1kN$

$M_d^{(0)} = F_d^{(0)} \cdot L_{\perp} = 48.7kNm$

Da cui

$$H_{eff}^{(1)} = \frac{M_{Rd} \cdot H}{M_d^{(0)} + M_{Rd}} = 5.15m$$
$$F_d^{(1)} = \frac{M_{Rd}}{H_{eff}^{(1)}} \cdot \sqrt{2} = 81.12kN$$

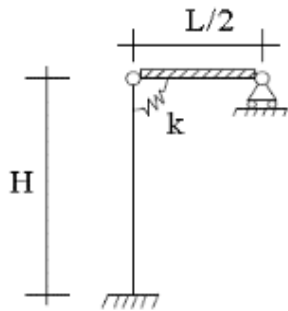
Siccome $F_d^{(0)}$ e $F_d^{(1)}$ sono associati allo stesso numero di dispositivi (calcolato come il rapporto tra F_d e V_{Ebd}) allora il criterio di convergenza è verificato. Sono quindi stati inseriti due dispositivi di collegamento in ciascun giunto, cioè una forza totale di 140kN, con uno spostamento di progetto del singolo dispositivo pari a 12.5mm.

Esempio di calcolo

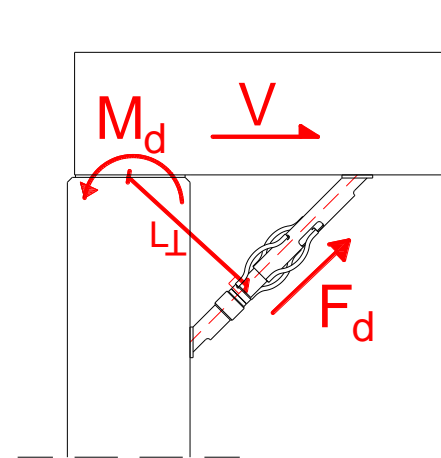
Calcolo periodo proprio della struttura:

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

Quindi:



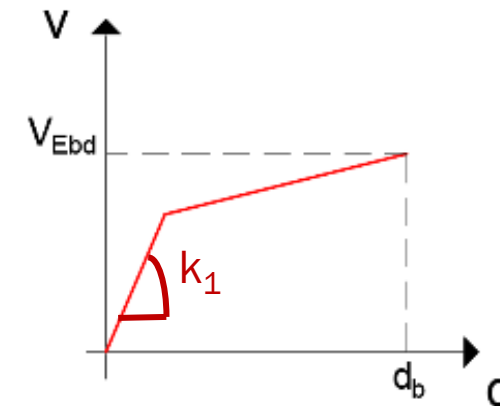
$$k_B = \frac{12EI_c}{H^3} \frac{EI_c + kH}{4EI_c + kH}$$



k è la rigidezza rotazionale del singolo. Si considerano due dispositivi per ogni nodo (n_d^* pari a 2).

$$k = n_d^* \cdot k_1 \cdot (L_{\perp})^2 = 2 \cdot \frac{14.6 \text{ kN}}{\text{mm}} \cdot (560 \text{ mm})^2 = 9.157,1 \text{ kNm}$$

k_1 è la rigidezza del primo ramo (elastico) pari a 14.6 kN/mm



Esempio di calcolo

$$k^* = k_B \cdot n_{\text{Pilastri laterali}} = k_B \cdot 12 = 23399.9 \text{ kN/m}$$

Il periodo proprio della struttura è quindi pari a: $T^* = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m^*}{k^*}} = 1.0\text{s}$

Dove

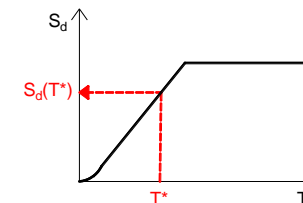
- m^* rappresenta la somma della massa della copertura e di quota parte della massa associata ai pannelli perimetrali e ai pilastri. Essa è circa pari a 600t;
- E_c rappresenta il modulo di elasticità del calcestruzzo ed è pari a 40GPa;
- I_c rappresenta il momento di inerzia ed è pari a $5.2 \cdot 10^{-3} \text{m}^4$.

La rigidezza $E_c I_c$ è stata abbattuta del 50% per tener conto della fessurazione del cls:

$$E_c I_c = 1.04 \cdot 10^{14} \text{ Nmm}^4$$

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:*

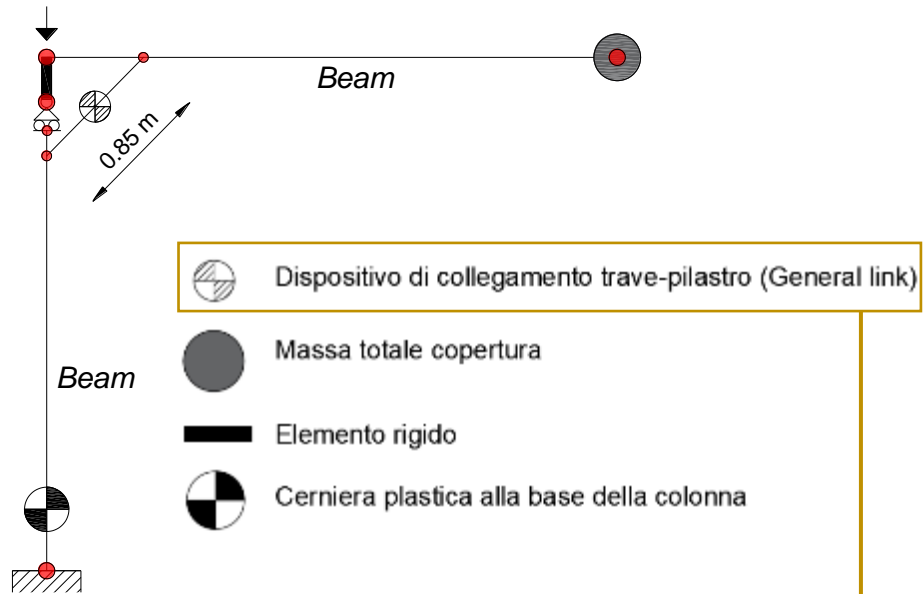
	SLV	SLC
$S_d(T^*)$ [m]	0.105	0.130



Esempio di calcolo

Modellazione a elementi finiti

1. Analisi nel piano:



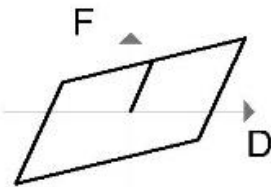
La cerniera plastica alla base del pilastro è stata modellata utilizzando un legame di tipo Modified Takeda.

Modified takeda	
Momento [kNm]	Rotazione [rad/m]
240.5	0.005582
256.1	0.005866
295.4	0.064848

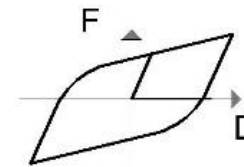
In ogni giunto trave-pilastro sono stati inseriti 2 dispositivi di collegamento utilizzando general link di tipo spring, con rigidezza totale pari a 29.2 kN/mm.

Ciascun dispositivo dissipativo

Legame Bilineare Elasto-Plastico	
F [kN]	D [mm]
57.6	3.94
70.0	12.5



Legame Bouc-Wen				
k [kN/mm]	Fy [kN]	s	a	b
14.6	57.6	2.0	0.5	0.5

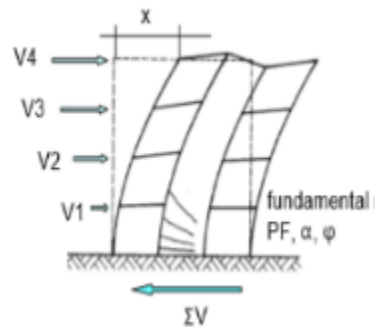


Esempio di calcolo

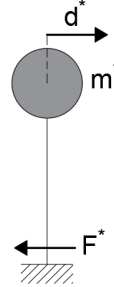
Verifica

1. Analisi statica non lineare (Capacity Spectrum):

MDOF

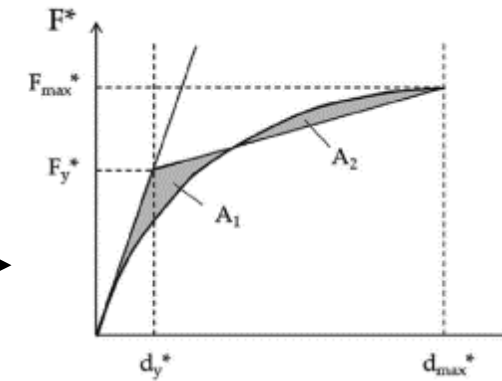


SDOF equivalente



Analisi
Pushover

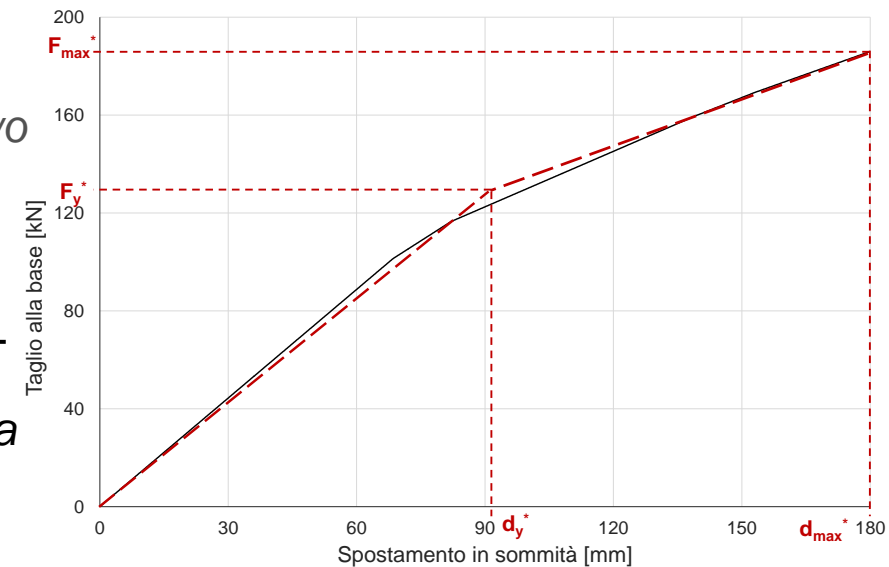
Spettro di capacità



Spostamento massimo associato a d_{bd} dispositivo

$$\xi_{eq} = k \frac{63.7 (F_y^* d_{max}^* - F_{max}^* d_y^*)}{F_{max}^* d_{max}^*} + 5 = 13.12\%$$

Si assume $k=0.66$ in quanto si ritiene la struttura dissipativa essendo lo spostamento al limite di snervamento pari a 3.94 mm.



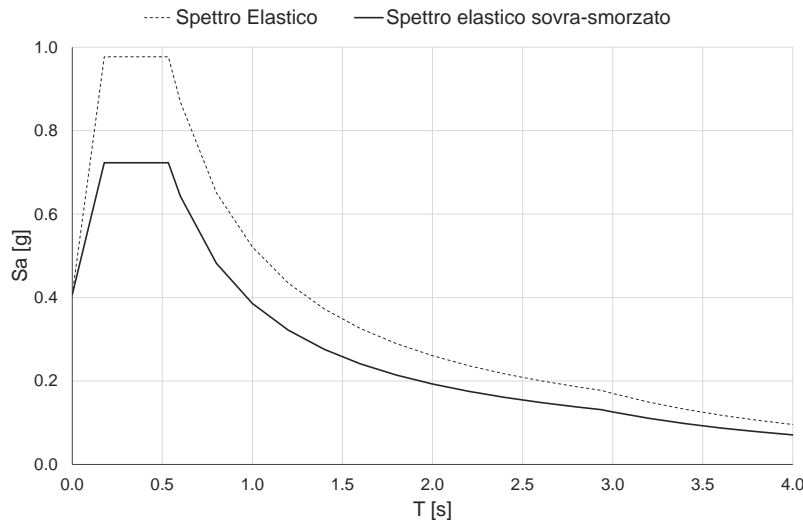
Esempio di calcolo

Verifica

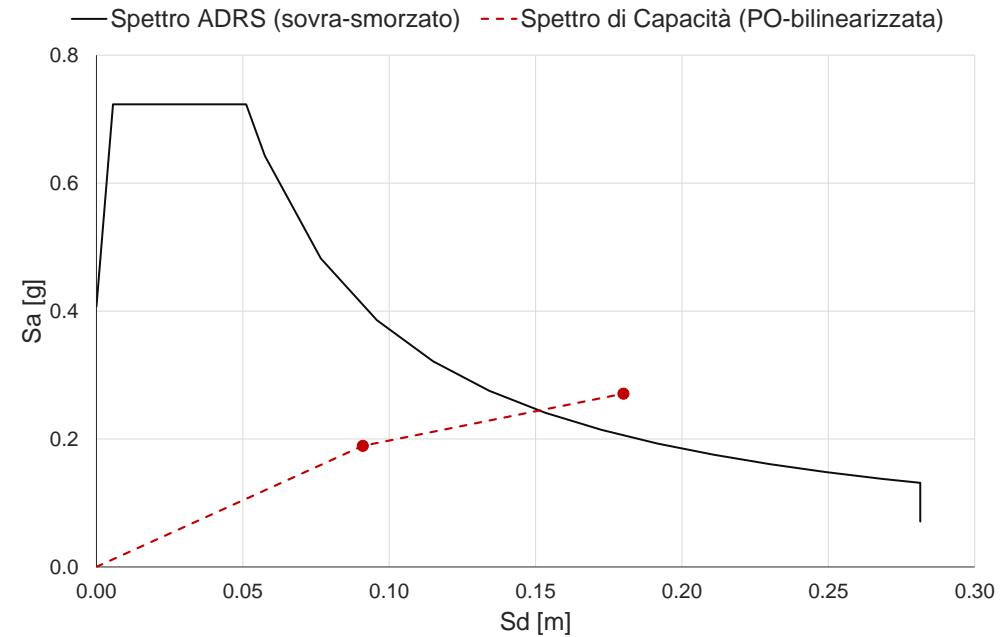
1. Analisi statica non lineare (Capacity Spectrum):

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi_{eq}}} = 0.74$$

Viene quindi ottenuto lo spettro di domanda sovra-smorzato a SLC



Verifica fatta in termini di spostamento



Capacità
Domanda

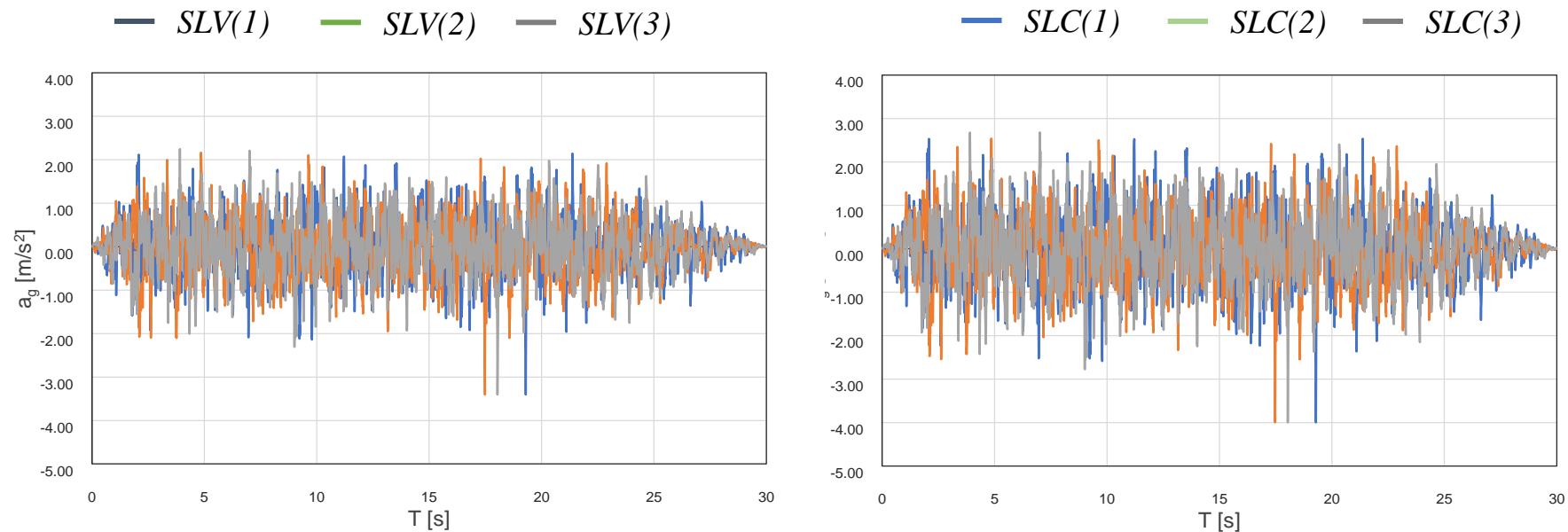
$$S_{d_{pushover}} \geq S_{d_{spettro-ovrasmozato}}$$

Esempio di calcolo

Verifica

2. Analisi dinamica non lineare

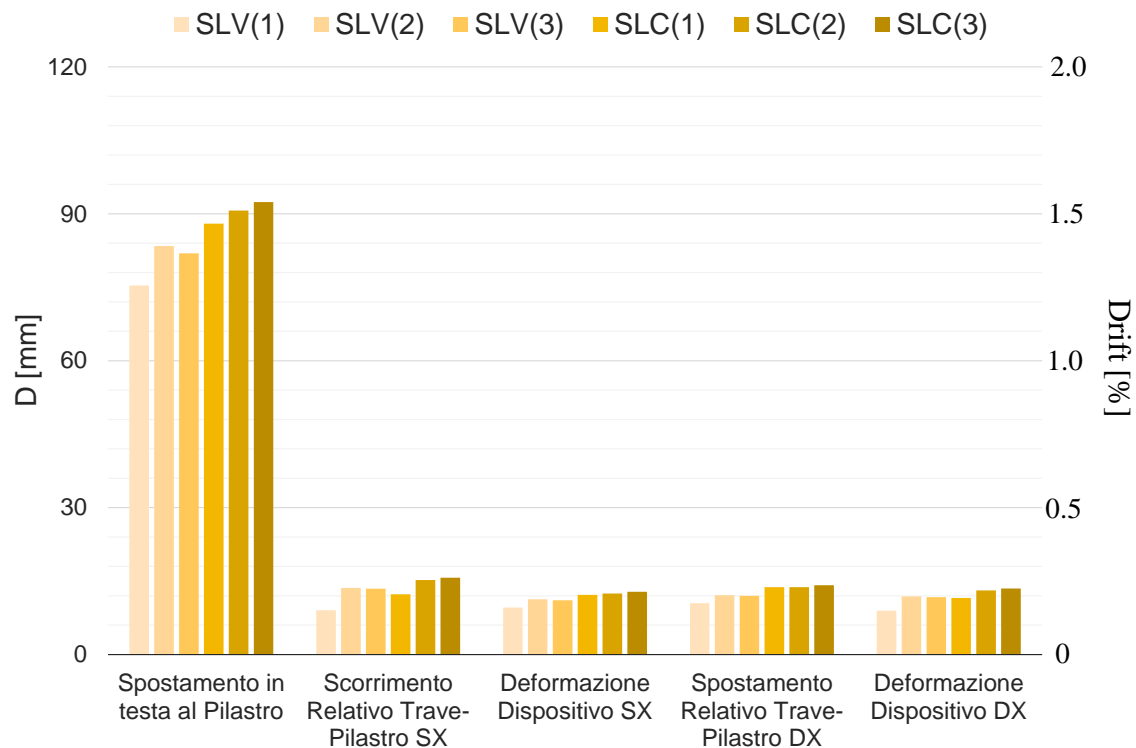
La validazione tramite analisi time history è scorporata in due fasi: la prima prevede la verifica del dispositivo nel piano, mentre la seconda la valutazione del comportamento in direzione ortogonale al piano. Per entrambe le validazioni sono stati utilizzati due set composti da tre accelerogrammi spettro-compatibili a stato limite di salvaguardia della vita e a stato limite di prevenzione al collasso.



Verifica Esempio di calcolo

2a. Analisi dinamica non lineare **nel piano**

Per il calcolo dello smorzamento è stato utilizzato il criterio 'Mass e Stiffness Proportional'. Sono quindi stati implementati i periodi T_1 e T_2 , rispettivamente pari a 2.0 e 0.3 s, e fattore di smorzamento ξ pari al 3%.



Sono qui 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.

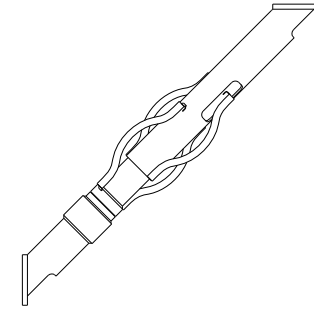
Esempio di calcolo

Confronto del momento alla base:

M_{\max} [kNm]	Analisi dinamica non lineare			Capacity spectrum
	SLV (1)	SLV (2)	SLV (3)	
	262.9	274.7	268.8	257.7

Questo sistema di connessione è efficace nella dissipazione di energia?

Si raggiunge il M_{Rd} (295.4kNm) alla base del pilastro?



M_{\max}/M_{Rd}	Analisi dinamica non lineare			Capacity spectrum
	SLV (1)	SLV (2)	SLV (3)	
	0.89	0.93	0.91	0.87

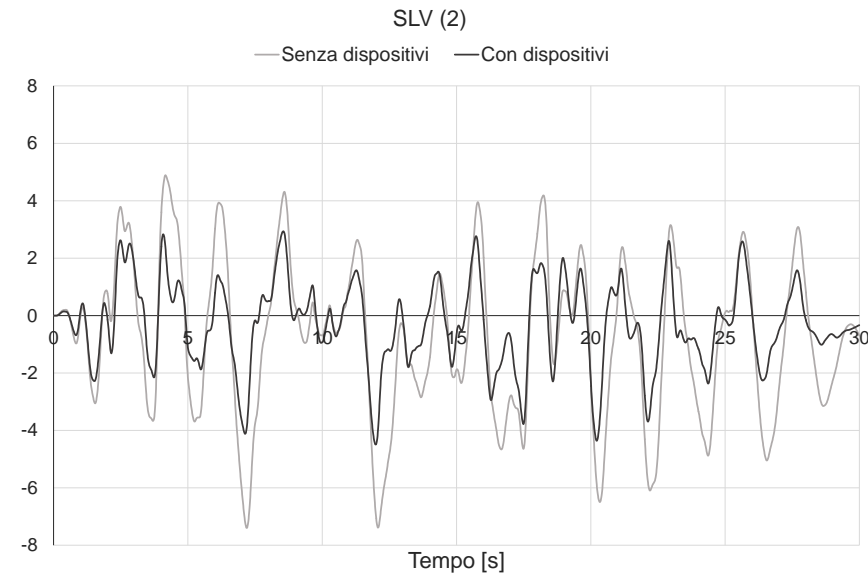
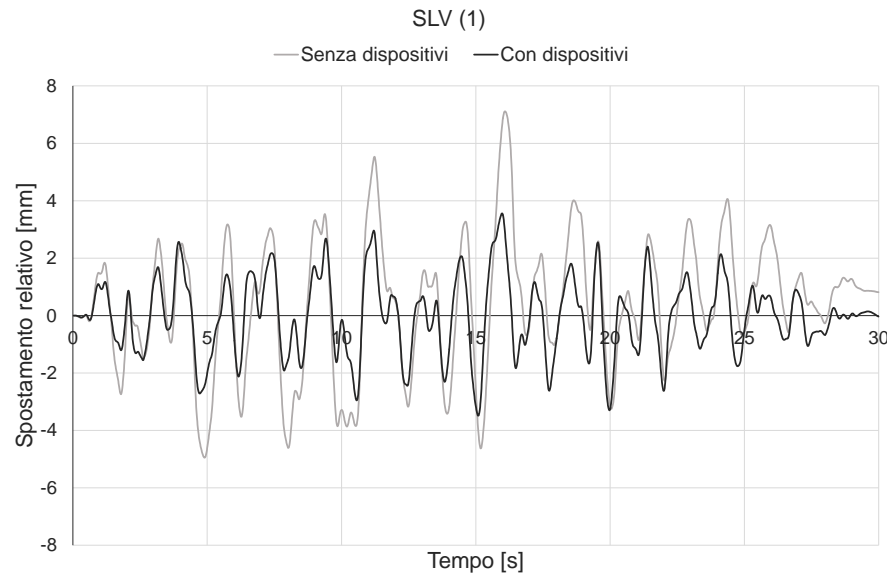
Essendo i rapporti $\frac{M}{M_{Rd}} < 1$, il sistema è efficace per la dissipazione di energia e non si sviluppa alcuna cerniera plastica alla base del pilastro.

Esempio di calcolo

Verifica

2b. Analisi dinamica non lineare **in direzione ortogonale al piano**

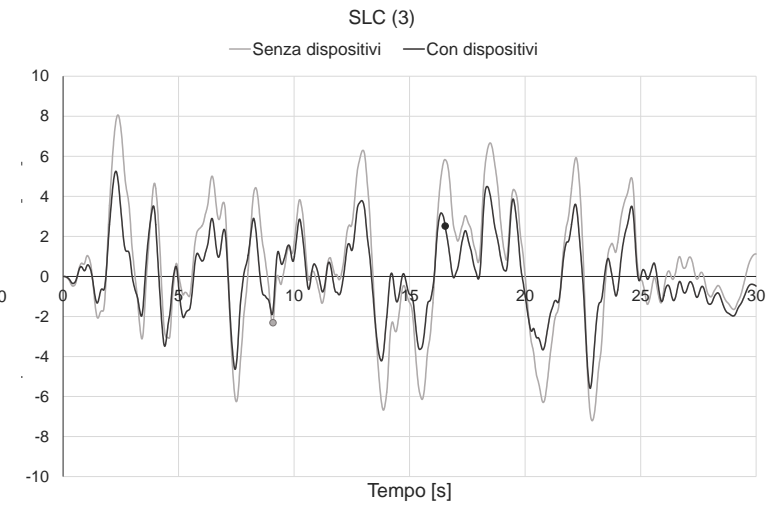
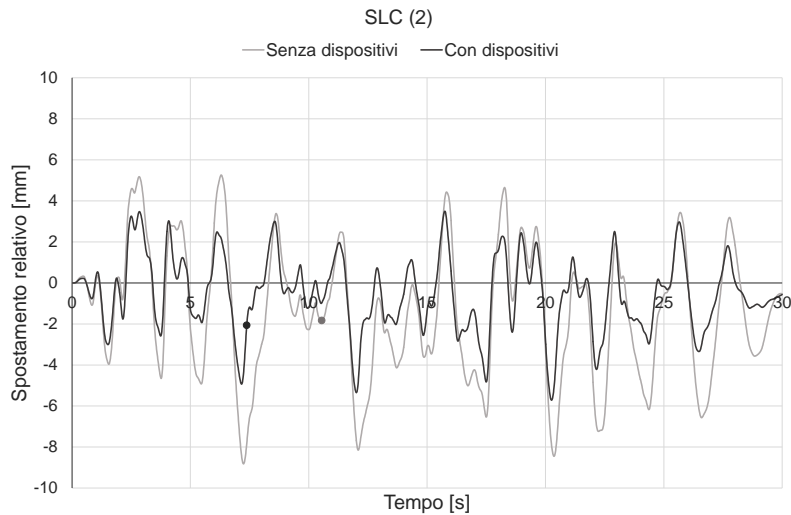
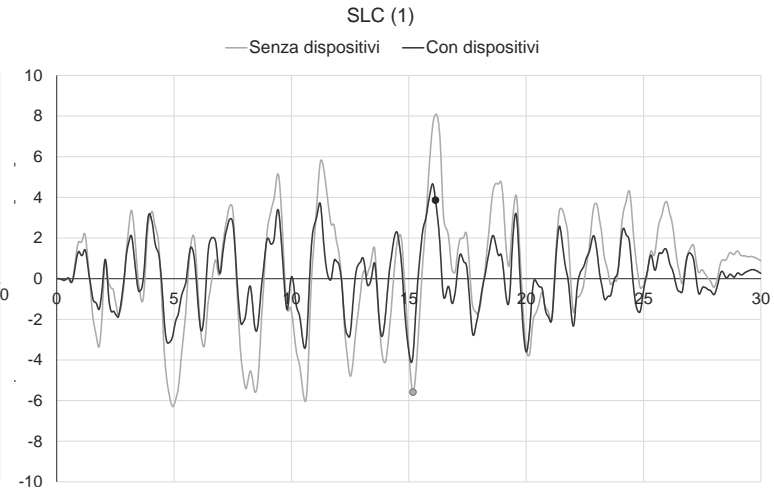
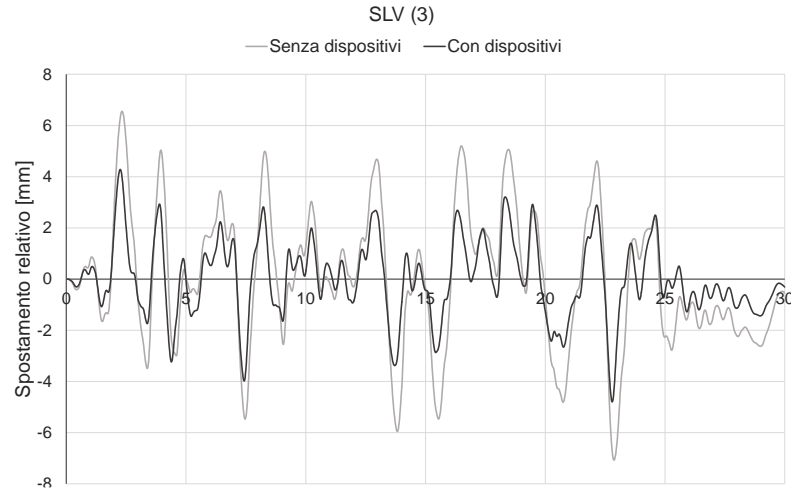
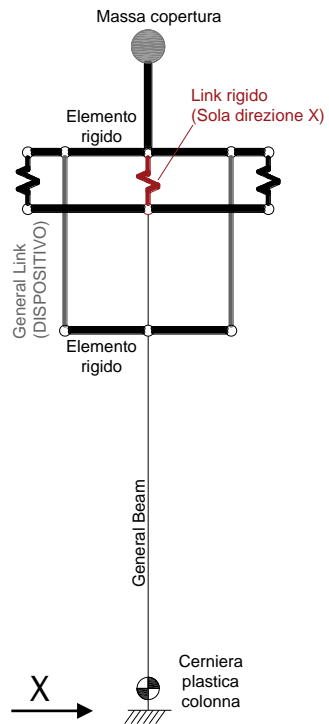
Sono state condotte analisi in direzione ortogonale al piano al fine di valutare il contributo che i dispositivi trave-pilastro riescono a offrire al fine di evitare il ribaltamento della trave. Per studiare tale comportamento è stato preso a riferimento il singolo pilastro con i relativi dispositivi di connessione trave-pilastro e la massa della copertura associata.



Esempio di calcolo

Verifica

2b. Analisi dinamica non lineare in direzione ortogonale al piano



GRAZIE DELL'ATTENZIONE

