



9 aprile 2020

Applicazioni di Isolamento Sismico

Pierpaolo Cicchiello (pc@cicchiello.it)

Dir. Tecn. Cicchiello & Partners (C&P)

Ordine Ingegneri Monza e Brianza, Presidente 2018-'21

Ordine Ingegneri ed Architetti Canton Ticino (OTIA) 4300

American Society of Mechanical Engineers

American Institute of Steel Construction



Un po' di storia

Le prime strutture isolate

Il **William Clayton Building**, Wellington, completato nel **1981**, fu il primo edificio il cui sistema di isolamento includeva le **cinque caratteristiche** di un **isolamento sismico**:



1. capacità di **movimento orizzontale**
2. supporto **verticale**
3. capacità di **ricentraggio**
4. **contenimento spostamento differenziali** nella **porzione isolata**
5. **smorzamento**

- **10** edifici isolati costruiti **all'anno** (media) fino al **1995 Kobe, Japan, earthquake**
 - **150** edifici isolati costruiti **all'anno** (media) nel periodo 1995-2002
- China - **2008** Wenchuan earthquake
Italy - **2009** Abruzzo earthquake
New Zealand – **2011** Christchurch earthquake

Diffusione di strutture isolate nel mondo

Al 2012 (Martelli, A., Forni, M. & Clemente, P., 2012, '*Recent worldwide application of seismic isolation and energy dissipation and conditions for their correct use*', Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon):

1. Japan: 6.600 costruzioni isolate (4.000 residenze)
 2. China: 2.500 costruzioni isolate (1.750 residenze)
 3. Russian Federation: 550 tra costruzioni e ponti
 4. **Italia: 300 costruzioni isolate**
 5. USA: 200 costruzioni isolate
- South Korea
 - Taiwan
 - Armenia
 - Chile
 - New Zealand

Alcune strutture isolate nel mondo



San Francisco City Hall, retrofitted 1999



Salt Lake City and County Building, Utah, USA. The first building to be retrofitted using seismic isolation



Oakland City Hall, Oakland, USA, retrofitted 1995



Institute of Histology and Embryology of Mendoza (IHEM) laboratories, Mendoza, **Argentina, 2014** (Santiago Monteverdi CC SA)



Glendale City Hall, Glendale, USA. One of the isolators used to retrofit the original 1927 building

Alcune strutture isolate nel mondo



Military Hospital La Reina, Santiago, **Chile, 2007** (J.C. De La Llera)



Wellington Regional Hospital, New Zealand, 2008



Student residence, National Technological University, Mendoza Regional Faculty, Mendoza, **Argentina, 2007** (Tornello)



Mall of Cyprus - Shacolas Park Commercial Center - Nicosia - 2007, **Giuliani (REDESCO)**

Alcune strutture isolate in Italia



Angels of San Giuliano School, San Giuliano di Puglia, 2008



Castel di Sangro (FIP)



Progetto Case, L'Aquila, 2009



Centro regionale protezione civile Foligno 2005



Sesto Fiorentino (FI), BIS Ing. Marco Zanfini 7

Nuova filosofia nella progettazione antisismica

ZED Buildings

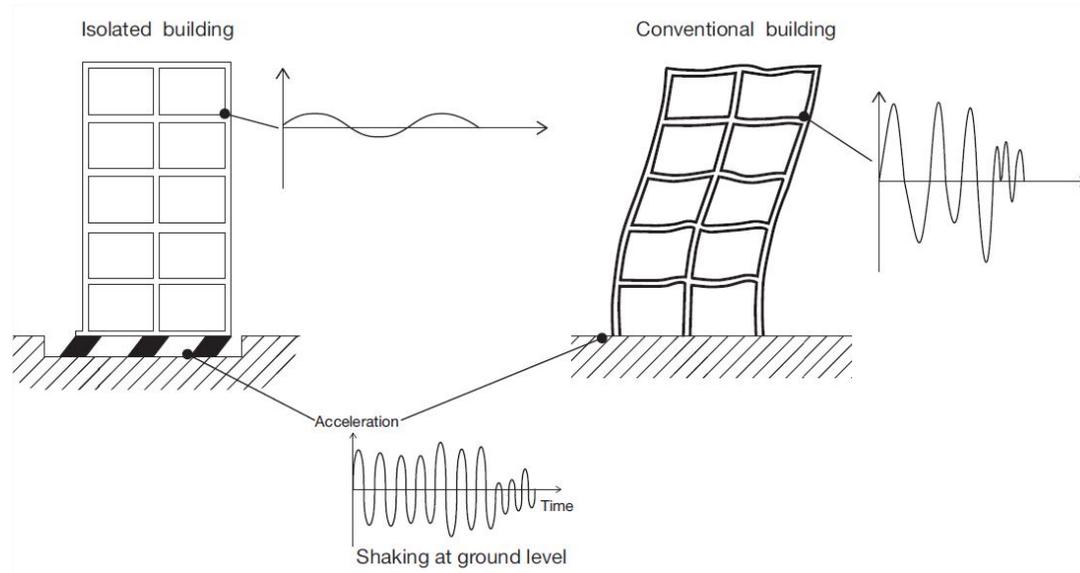
Considerata la natura sismica di tutto il nostro territorio, DEVE essere favorita una nuova filosofia nella progettazione antisismica, basata sul criterio di realizzare **Zero Earthquake-Damage Buildings (ZED Buildings)**: strutture capaci di sopportare le azioni sismiche di progetto **senza danni**, rimanendo sostanzialmente in campo elastico.

In **zone a bassa sismicità**, tale obiettivo può essere perseguito utilizzando **tecnologie tradizionali**, accettando un lieve incremento dei costi di costruzione.

In **zone ad alta sismicità** le tecniche tradizionali potrebbero comportare risultati non soddisfacenti in termini architettonici e/o economici; è auspicabile il ricorso alle **moderne tecnologie antisismiche**, quali l'**isolamento sismico** e la **dissipazione di energia**, che possono garantire:

- **adeguato livello di sicurezza**
- **accettabili tempi di costruzione e costi.**

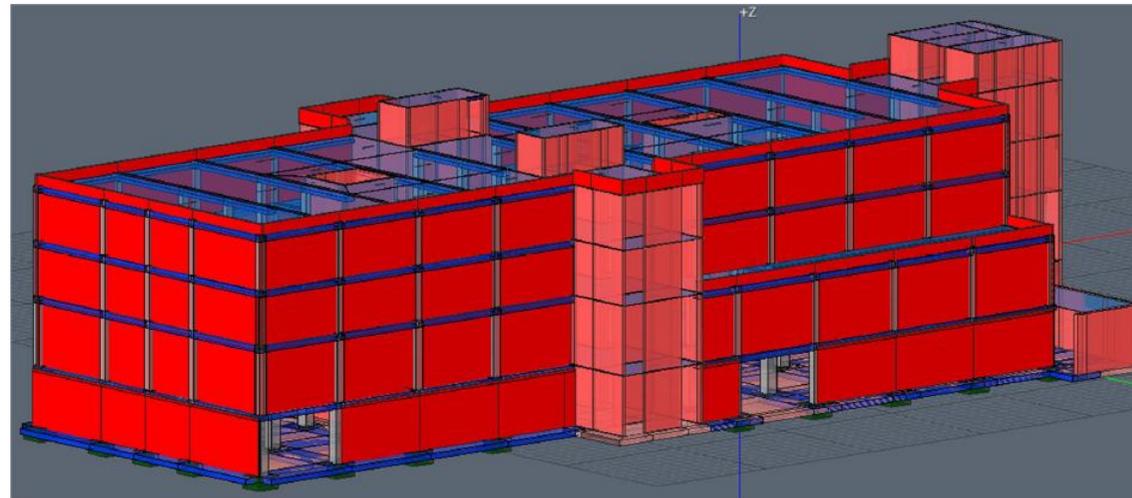
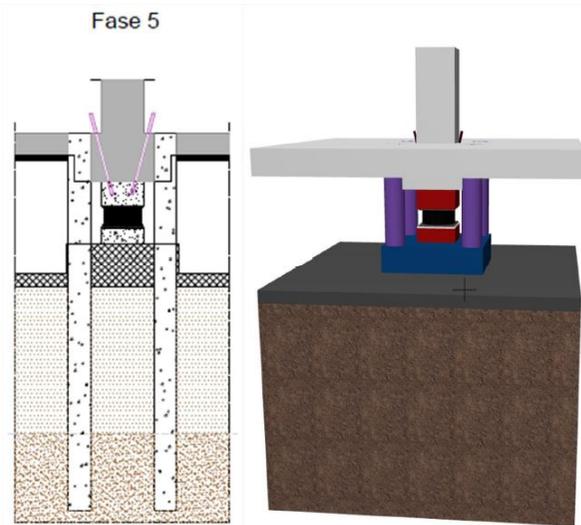
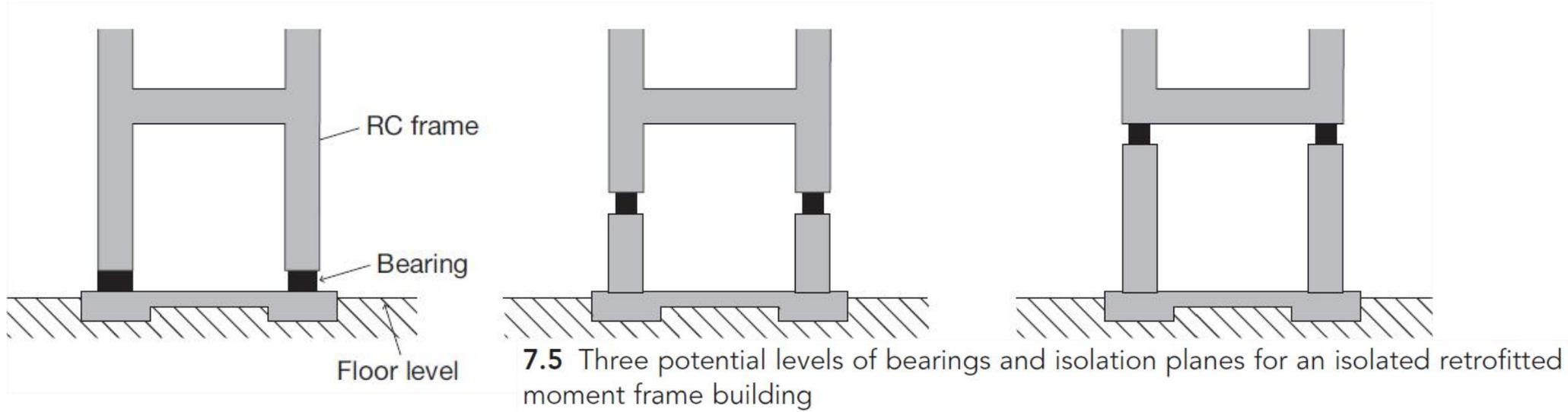
Principio di BASE dell' ISOLAMENTO SISMICO



La **capacità di movimento orizzontale** è il primo requisito per una struttura isolata. Ma ce ne sono altre quattro:

1. supporto verticale
2. ricentraggio
3. contenimento *interstory-drift*
4. smorzamento

Posizionamento del Piano di Isolamento Sismico



Innovation Prize 2019:
Cicchiello Pierpaolo

ESEMPI DI APPLICAZIONE

CONFRONTO TRA:

- a) PROGETTO DI UN EDIFICIO A BASE FISSA, **CD "B"** – (TELAIO DI RIFERIMENTO)
- b) Telaio di riferimento **isolato con dispositivi HDRB**
- c) Telaio di riferimento **isolato con dispositivi LRB**
- d) Telaio di riferimento isolato con dispositivi a **PENDOLO SCORREVOLE**

Perché il confronto con una struttura non isolata a bassa duttilità?

Dalle NTC 2018 (§ 7.10.2), in riferimento alle strutture isolate:

«La sovrastruttura e la sottostruttura si devono sostanzialmente mantenere in campo elastico. Per questo la struttura può essere progettata con riferimento ai particolari costruttivi richiesti per le costruzioni caratterizzate, allo SLV, da $a_g S \leq 0.075 g$ (ex zona 4)»

Dalle NTC 2018 (Introduzione Cap.7):

«Le costruzioni caratterizzate, allo SLV, da $a_g S \leq 0.075 g$, possono essere progettate e verificate come segue: (.....); qualora si scelga una progettazione per comportamento strutturale dissipativo "", quale definita nel § 7.2.2 , si possono impiegare, in classe di duttilità CD B "", valori unitari per i coefficienti γ_{Rd} di cui alla Tab . 7.2 .I; (...)»

Perché il confronto con una struttura non isolata a **bassa duttilità**?

In relazione alle indicazioni prima citate, per avere un confronto significativo tra:

- richieste di **resistenza** (in condizioni sismiche)
- richieste di **spostamento** (in condizioni sismiche)

per una struttura realizzata a base fissa o protetta mediante dispositivi antisismici, si è scelto di fare riferimento alla sola classe di duttilità CD "B".

1. Le soluzioni che saranno illustrate (paragonabili in termini di prescrizioni e costi per la cura dei particolari costruttivi della sovrastruttura) risulteranno effettivamente **confrontabili** dal **solo punto di vista** delle **prestazioni richieste alla struttura**.
2. Questa classe di duttilità bassa è anche finalizzata ad offrire un esempio più rappresentativo nell'ambito dell'**adeguamento sismico di strutture esistenti**.

NORMATIVA - Modellazione e analisi strutturale di edifici progettati con dispositivi antisismici

Condizioni per modellazione sistema isolamento con un sistema lineare equivalente (per analisi Statiche/Dinamiche) - NTC 2018 § 7.10.5.2 ; EC 8 - § 10.9.2

1. Realizzato con **appoggi elastomerici laminati**, o con **comportamento isteretico bilineare** se il sistema è costituito da tipologie di dispositivi elastoplastici;
2. **Rigidezza effettiva** del sistema di isolamento K_{eff} in corrispondenza allo **spostamento di progetto** ≥ 50 % rigidezza in corrispondenza del 20 % dello spostamento
3. **Smorzamento viscoso equivalente** ξ (%) ≤ 30 %
4. Variazione caratteristiche **Forza VS Spostamento** 10 % , per effetto di variazioni di frequenza/velocità di deformazione e di carico verticale (in un campo del ± 30 % dei rispettivi valori di progetto)
5. Incremento forza fra il 50 % e il 100 % dello spostamento di progetto pari almeno al 2.5 % del peso della struttura

NORMATIVA - Modellazione e analisi strutturale di edifici progettati con dispositivi antisismici

CONDIZIONI RELATIVE AI DISPOSITIVI

Condizioni per **progettazione e verifica del sistema di isolamento mediante ANALISI LINEARE STATICA** - NTC 2018 (§ 7.10.5.3.1) ; EC 8 (§ 10.9.3)

1. **Periodo T_{is} del sistema isolato** sia tale che $3T_f \leq T_{is} \leq 3.0$ secondi

con T_f **periodo fondamentale sovrastruttura con base fissa**, stimato con espressione semplificata - come $T_1 = C_1 \cdot H^{3/4}$, o attraverso modello FEM (quest'ultimo approccio, FEM, si adotta sempre per Edifici Esistenti sui quali sia stata condotta la Verifica di VULNERABILITA' SISMICA)

2. Rapporto $K_V / K_{eff} \geq 800$, con K_V rigidezza verticale, K_{eff} rigidezza orizz. sistema isolato

3. **$T_V \leq 0,1$ secondi**, con T_V , periodo verticale sistema isolato, calcolato come: $T_V = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{M}{K_V}}$

4. Nessun isolatore in trazione

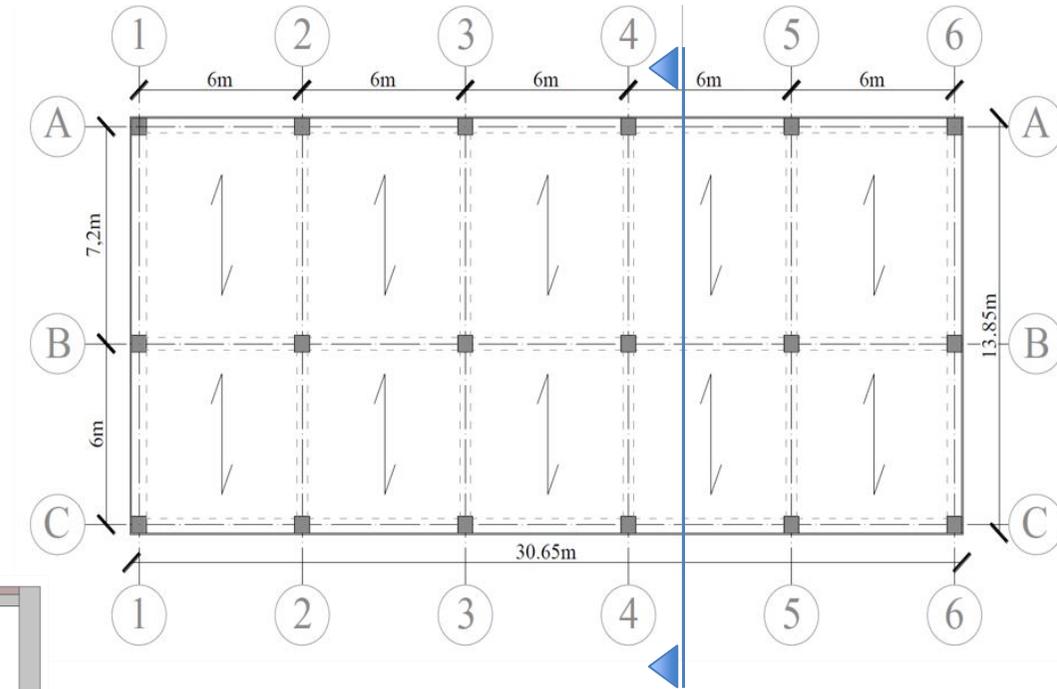
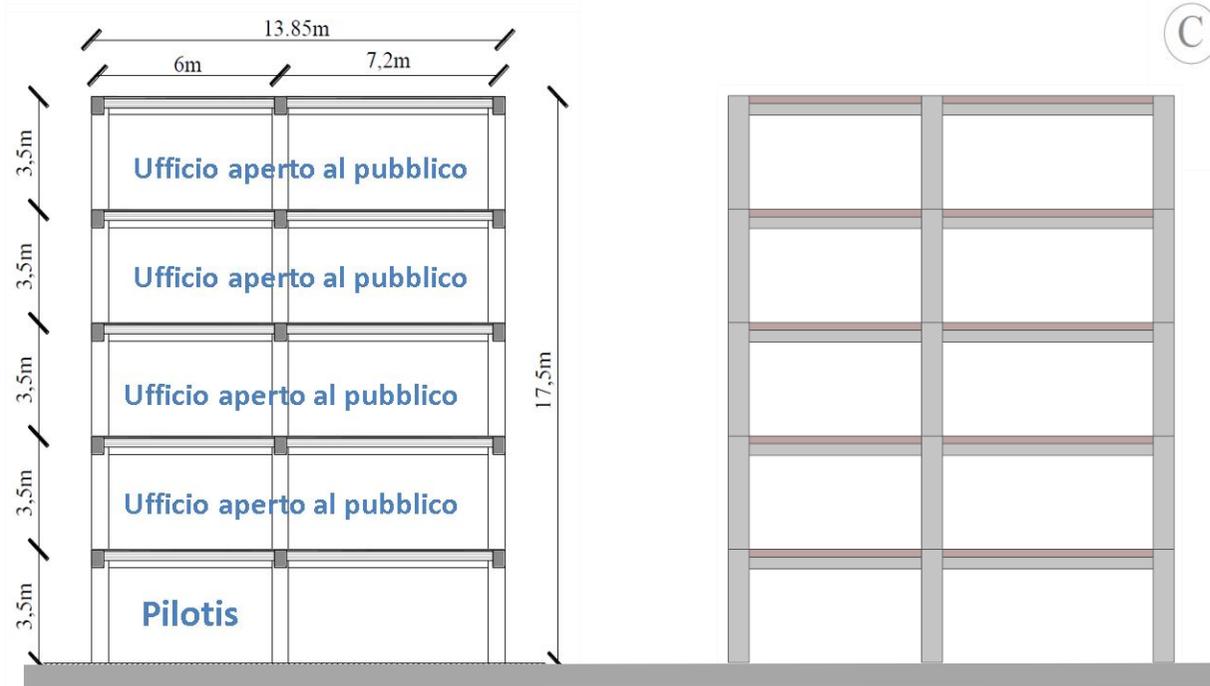
NORMATIVA - Modellazione e analisi strutturale di edifici progettati con dispositivi antisismici

CONDIZIONI RELATIVE ALL'EDIFICIO

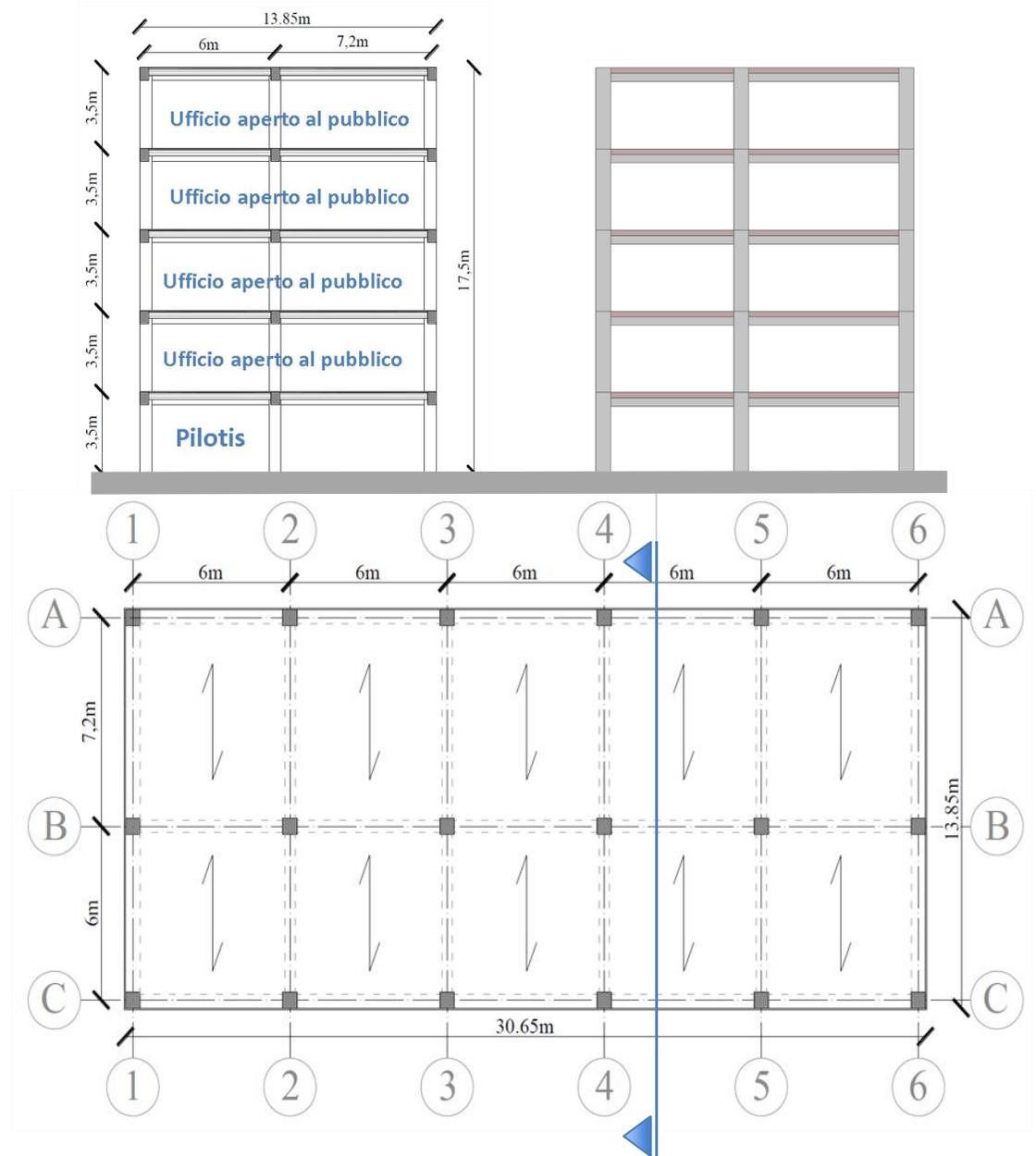
Condizioni per **progettazione e verifica del sistema di isolamento mediante ANALISI LINEARE STATICA** - NTC 2018 (§ 7.10.5.3.1) ; EC 8 (§ 10.9.3)

1. Geometria regolare, lato ≤ 50 metri
2. Altezza ≤ 20 metri
3. Numero di piani ≤ 5
4. **Sottostruttura** considerabile come **infinitamente rigida** (periodo proprio ≤ 0.05 secondi)
5. **Eccentricità** tra il **centro di massa** della **sovrastuttura** e il **centro di taglio** del **sistema di isolamento**, escludendo l'eccentricità accidentale, **minore del 3%** delle **dimensioni in pianta** dell'**edificio**

CARATTERISTICHE DELL'EDIFICIO



a) Progetto EDIFICIO A BASE FISSA



Caratteristiche edificio

Destinazione d'uso:	Categoria B2: Uffici aperti al pubblico
Vita nominale V_N:	100 anni
Coefficiente d'uso C_U:	1.5
Edificio regolare in pianta e in elevazione:	<ul style="list-style-type: none"> Pianta fabbricato: 13.85m x 30.65m Interasse allineamenti A-B-C: 7.2m , 6m Interasse allineamenti 1-2-3-4-5-6: 6m Altezza complessiva 17.5m: 5 orizzontamenti con 3.5m di interpiano
Strutture in elevazione (*):	<ul style="list-style-type: none"> Pilastrini in c.a. 65cm x 65cm Travi fuori-spessore in c.a. 40cm x 60cm Solai in latero-cemento
Organizzazione strutturale nei confronti delle azioni sismiche:	<ul style="list-style-type: none"> Telai tridimensionali costituiti da pilastrini e travi fuori-spessore in c.a. Solai considerati come diaframmi infinitamente rigidi

Localizzazione

Località	Avellino (Campania) – $a_g = 0.279g$
Categoria di sottosuolo	C
Categoria topografica	T1

(*): Dimensioni del telaio governate dalle verifiche allo SLD

a) EDIFICIO A BASE FISSA

Fattore di struttura:

- Struttura in c.a. a telaio, a più piani e più campate
- Classe di duttilità CD "B"
- Edificio regolare in altezza

$$q = q_0 \cdot K_R = 3.9$$

$$q_0 = 3.0 \cdot \alpha_u \cdot \alpha_1 = 3.9$$

$$K_R = 1$$

[NTC-18 Eq. 7.3.1]
 [NTC-18 Tab. 7.3.II]
 [NTC-18 Par. 7.3.I]

ANALISI DEI CARICHI			
Solaio Piano tipo (Cat. B)		Solaio Copertura accessibile (Cat. H2)	
<i>Azioni Permanenti $[G_1 + G_2]_{sol.}$</i>		<i>Azioni Permanenti $[G_1 + G_2]_{cop.}$</i>	
P.P. Solaio H=28+5cm	3.80 kN/m ²	P.P. Solaio H=28+5cm	3.80 kN/m ²
Massetto (s = 5cm)	1.00 kN/m ²	Pendenza (h = 10cm)	2.00 kN/m ²
Pavimento	0.40 kN/m ²	Pavimento	0.80 kN/m ²
Intonaco (s = 2cm)	0.40 kN/m ²	Intonaco (s = 2cm)	0.40 kN/m ²
Divisori interni	1.50 kN/m ²	TOT. $[G_1 + G_2]_{cop.}$	7.00 kN/m²
TOT. $[G_1 + G_2]_{sol.}$	7.10 kN/m²	<i>Azioni Variabili Q_k</i>	3.00 kN/m ²
<i>Azioni Variabili Q_k</i>	3.00 kN/m ²		
Tamponamenti esterni $[G_2]_{tamp.}$		Elementi strutturali telaio $[G_1]_{telaio}$	
Intonaco (2cm + 3 cm)	1.00 kN/m ² di parete	PP. Pilastri (65cm x 65cm)	10.56 kN/m
Semipieni (12 cm)	1.90 kN/m ² di parete	PP. Travi (40cm x 60cm)	6.00 kN/m
Forati (6cm)	0.70 kN/m ² di parete	Masse sismiche $G_1 + G_2 + \sum_j \psi_{2j} Q_{kj}$	
Coibente	0.40 kN/m ² di parete	Copertura	420 tonn
TOT. $[G_2]_{tamp.}$	4.00 kN/m² di parete	Piano tipo	566 tonn
$H_{netta\ tamp.} = 2.90m$ 30% di apertura	8.12 kN/m di parete	MASSA SISMICA TOTALE	2718 tonn

a) EDIFICIO A BASE FISSA

FASE 3. DETERMINAZIONE DELL'AZIONE DI PROGETTO

Stato Limite

Stato Limite considerato: **S.L.D.** info

Risposta sismica locale

Categoria di sottosuolo: **C** info $S_D = 1.500$ $C_D = 1.493$ info

Categoria topografica: **T1** info $h_{eff} = 0.000$ $S_T = 1.000$ info

(Risposta sito, coefficiente effetto topografico)

Compon. orizzontale

Spettro di progetto elastico (SLE) Smorzamento ξ (%): **5** $\eta = 1.000$ info

Spettro di progetto inelastico (SLI) Fattore q : **1.5** Regol. in altezza: **gl** info

Compon. verticale

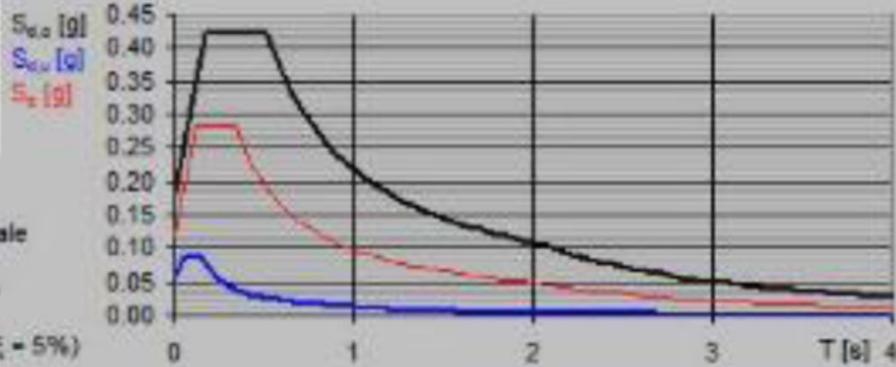
Spettro di progetto Fattore q : **1.5** $\eta = 0.067$ info

Elaborazioni

Grafici spettri di risposta →

Parametri e punti spettri di risposta →

Spettri di risposta



$S_{D,0}$ [g] $S_{D,v}$ [g] S_T [g]

— Spettro di progetto - componente orizzontale
— Spettro di progetto - componente verticale
— Spettro elastico di riferimento (Cat. A-T1, $\xi = 5\%$)

INTRO
FASE 1
FASE 2
FASE 3

a) EDIFICIO A BASE FISSA

FASE 3. DETERMINAZIONE DELL'AZIONE DI PROGETTO

Stato Limite
 Stato Limite considerato: **SLV** ▼ info

Risposta sismica locale
 Categoria di sottosuolo: **C** ▼ info $S_a =$ **1.282** $C_c =$ **1.434** ▼ info
 Categoria topografica: **T1** ▼ info $h/H =$ **0.000** $S_r =$ **1.000** ▼ info
(In quota info, Realizzato rilievo topografico)

Compon. orizzontale
 Spettro di progetto elastico (SLE) Smorzamento ξ (%): **5** $\eta =$ **1.000** ▼ info
 Spettro di progetto inelastico (SLU) Fattore q_d : **3.9** Regol. in altezza: **si** ▼ info

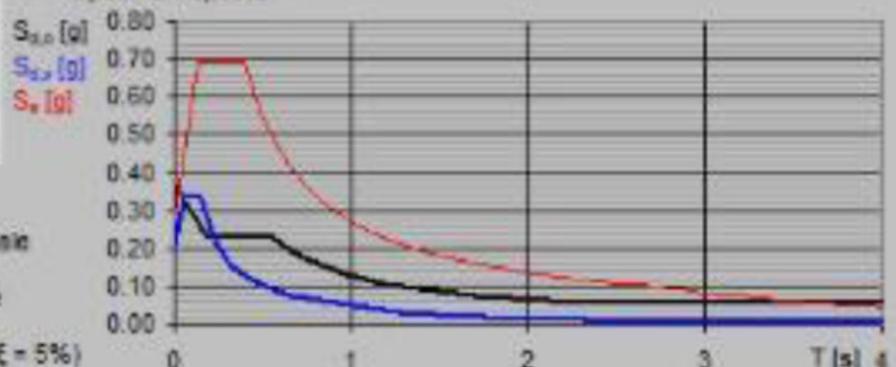
Compon. verticale
 Spettro di progetto Fattore q : **1.5** $\eta =$ **0.667** ▼ info

Elaborazioni
 Grafici spettri di risposta ▶▶▶
 Parametri e punti spettri di risposta ▶▶▶

$S_{a,0}$ [g]

$S_{a,1}$ [g]

S_v [g]



— Spettro di progetto - componente orizzontale
— Spettro di progetto - componente verticale
— Spettro elastico di riferimento (Cat. A-T1, $\xi = 5\%$)

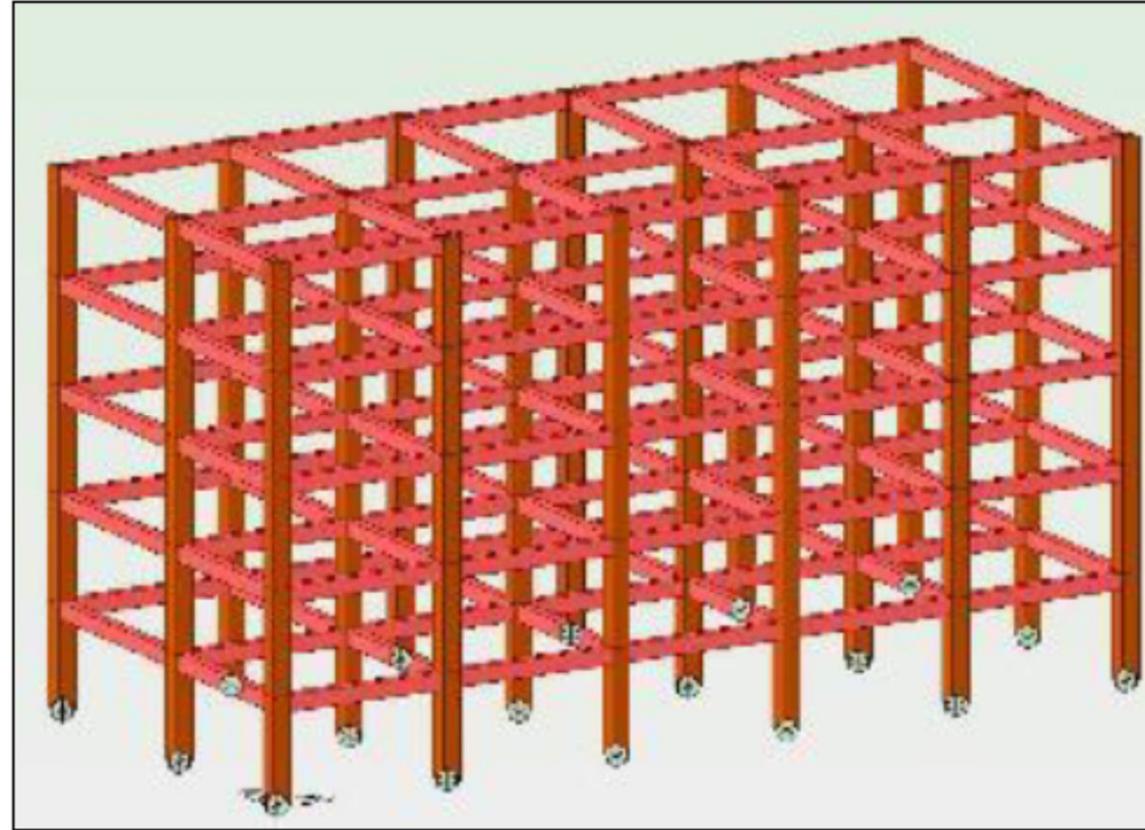
INTRO
FASE 1
FASE 2
FASE 3

a) EDIFICIO A BASE FISSA – ANALISI DINAMICA LINEARE

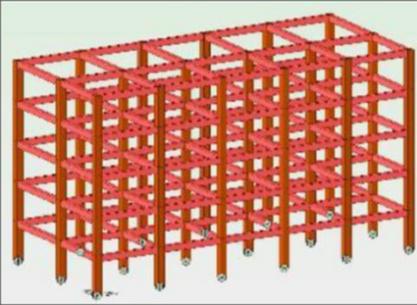
L'analisi dinamica lineare della struttura è stata eseguita utilizzando un modello ad elementi finiti tridimensionale dell'orditura principale del telaio dell'edificio.

Modello sviluppato con le seguenti ipotesi:

1. **Travi e pilastri:** elementi "beam" tridimensionali; per l'analisi allo SLV, la rigidezza del telaio è stata ridotta per tener conto della fessurazione (70% per i pilastri; 50% per le travi);
2. **Impalcati:** infinitamente rigidi nel piano;
3. **Massa di piano:** distribuita, attribuendo al baricentro delle masse un'eccentricità accidentale (assunta costante per entità e direzione su tutti gli orizzontamenti) pari al 5% della dimensione dell'edificio misurata perpendicolarmente alla direzione di applicazione dell'azione sismica [NTC-18, § 7.2.6];
4. **Vincoli:** incastro perfetto dei pilastri in fondazione.

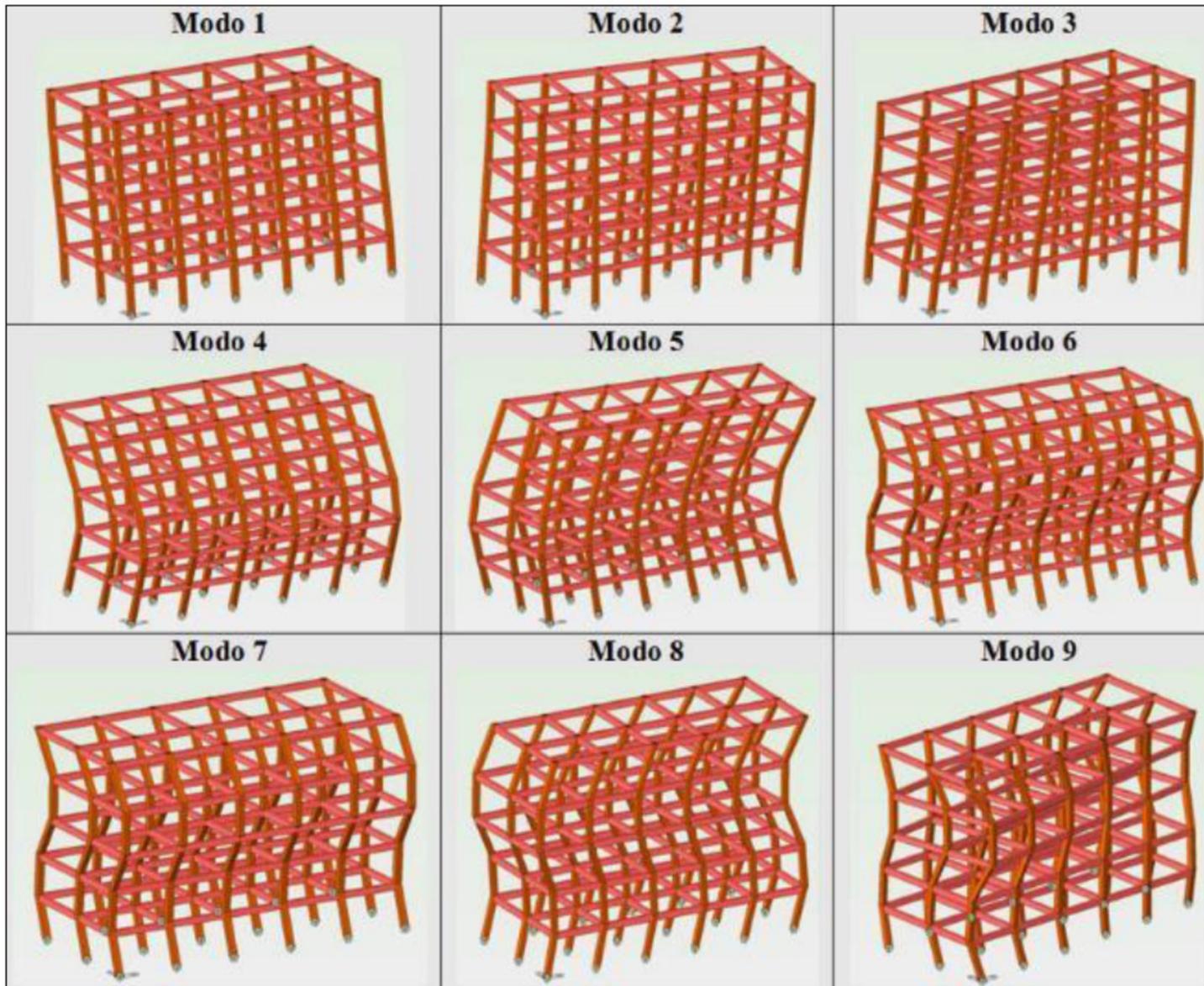


a) EDIFICIO A BASE FISSA – RISULTATI ANALISI DINAMICA LINEARE

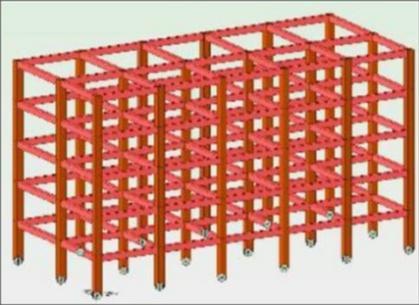


Modi di vibrare propri della struttura (SLD: rigidezza flessionale al 100%)								
Modo	Frequenza f [Hz]	Periodo T [s]	Trasl. in X		Trasl. in Y		Rot. in Z	
			Mass %	Sum %	Mass %	Sum %	Mass %	Sum %
1	1.3451	0.7435	0	0	80.4704	80.2674	0	0
2	1.487	0.6725	47.1542	47.1542	0	80.2674	34.0772	34.0772
3	1.5092	0.6626	34.3686	81.5228	0	80.2674	46.7664	80.8436
4	4.4566	0.2244	0	81.5228	11.4825	91.8136	0	80.8436
5	4.8399	0.2066	9.7049	91.2277	0	91.8136	1.3331	82.1766
6	4.9494	0.202	1.2997	92.5274	0	91.8136	9.9435	92.1202
7	8.5598	0.1168	0	92.5274	4.8477	96.7285	0	92.1202
8	9.0191	0.1109	4.3915	96.9189	0	96.7285	0.1669	92.2871
9	9.3725	0.1067	0.1592	97.0781	0	96.7285	4.5873	96.8744
Modi di vibrare propri della struttura (SLV: rigidezza flessionale ridotta)								
Modo	Frequenza f [Hz]	Periodo T [s]	Trasl. in X		Trasl. in Y		Rot. in Z	
			Mass %	Sum %	Mass %	Sum %	Mass %	Sum %
1	1.0159	0.9843	0	0	79.4729	79.2387	0	0
2	1.1238	0.8898	40.4827	40.4827	0	79.2387	39.6888	39.6888
3	1.1404	0.8768	40.0612	80.5439	0	79.2387	40.1175	79.8063
4	3.446	0.2902	0	80.5439	11.8843	91.2244	0	79.8063
5	3.7413	0.2673	9.9713	90.5151	0	91.2244	1.4389	81.2452
6	3.8246	0.2615	1.396	91.9112	0	91.2244	10.2647	91.5099
7	6.8468	0.1461	0	91.9112	5.159	96.4518	0	91.5099
8	7.1991	0.1389	4.699	96.6102	0	96.4518	0.1669	91.6767
9	7.4897	0.1335	0.1594	96.7696	0	96.4518	4.9008	96.5776

a) EDIFICIO A BASE FISSA – Primi Modi di Vibrare



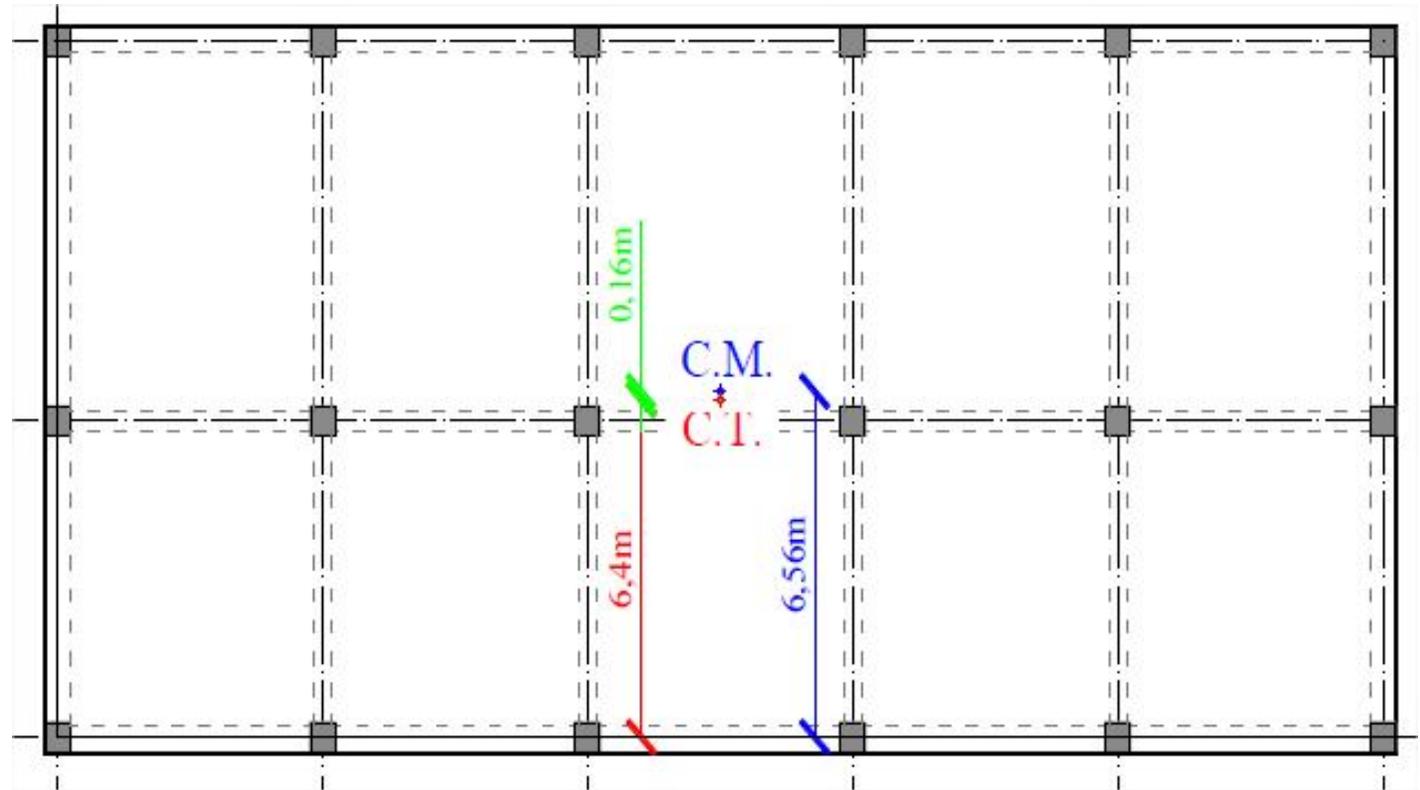
a) EDIFICIO A BASE FISSA – RISULTATI ANALISI DINAMICA LINEARE

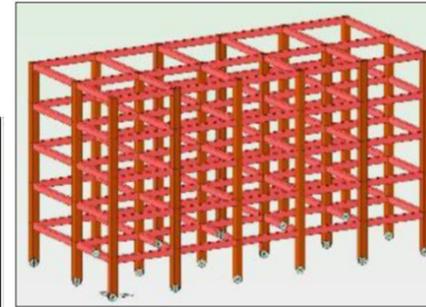


Centro di massa		Centro di taglio		Eccentricità	
$X_{C.M.}$	$Y_{C.M.}$	$X_{C.T.}$	$Y_{C.T.}$	e_x	e_y
15.00	6.56	15.00	6.40	0.00	0.16

I modi di vibrare sono:

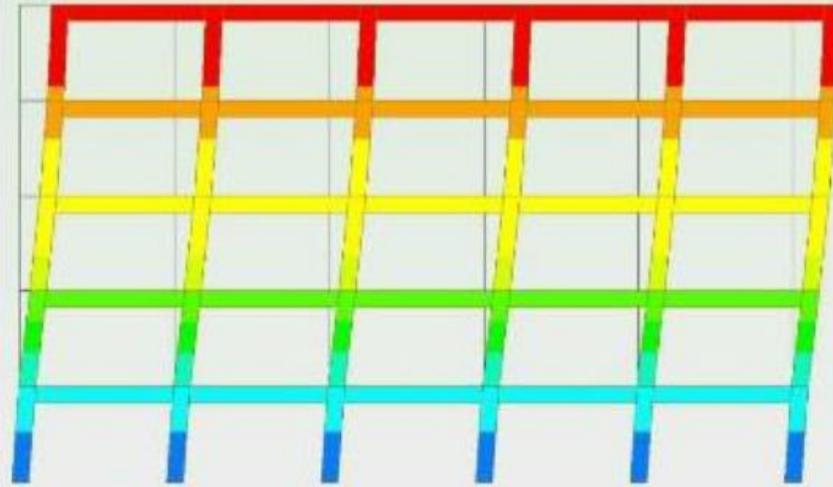
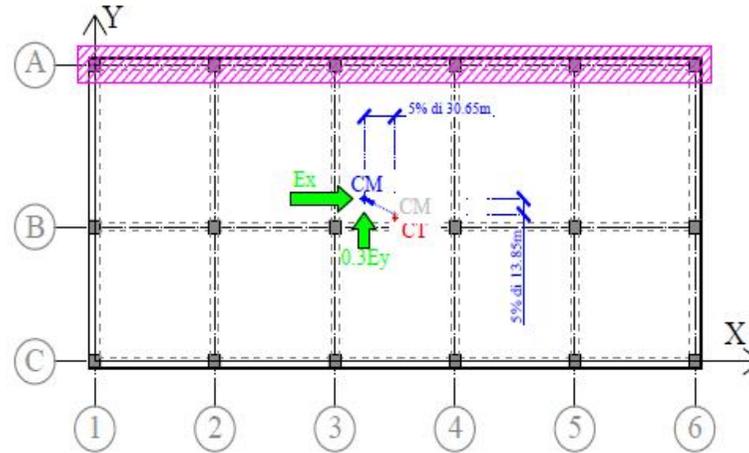
- Puramente traslatori per una perturbazione in direzione Y
- Roto-traslatori per una perturbazione in direzione X



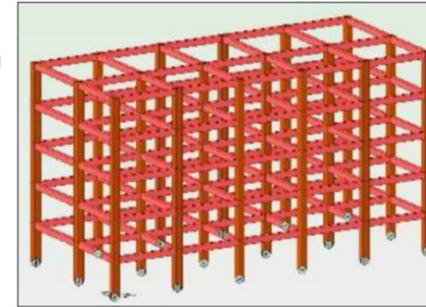


a) EDIFICIO A BASE FISSA – VERIFICA DEFORMABILITA' ALLO SLD

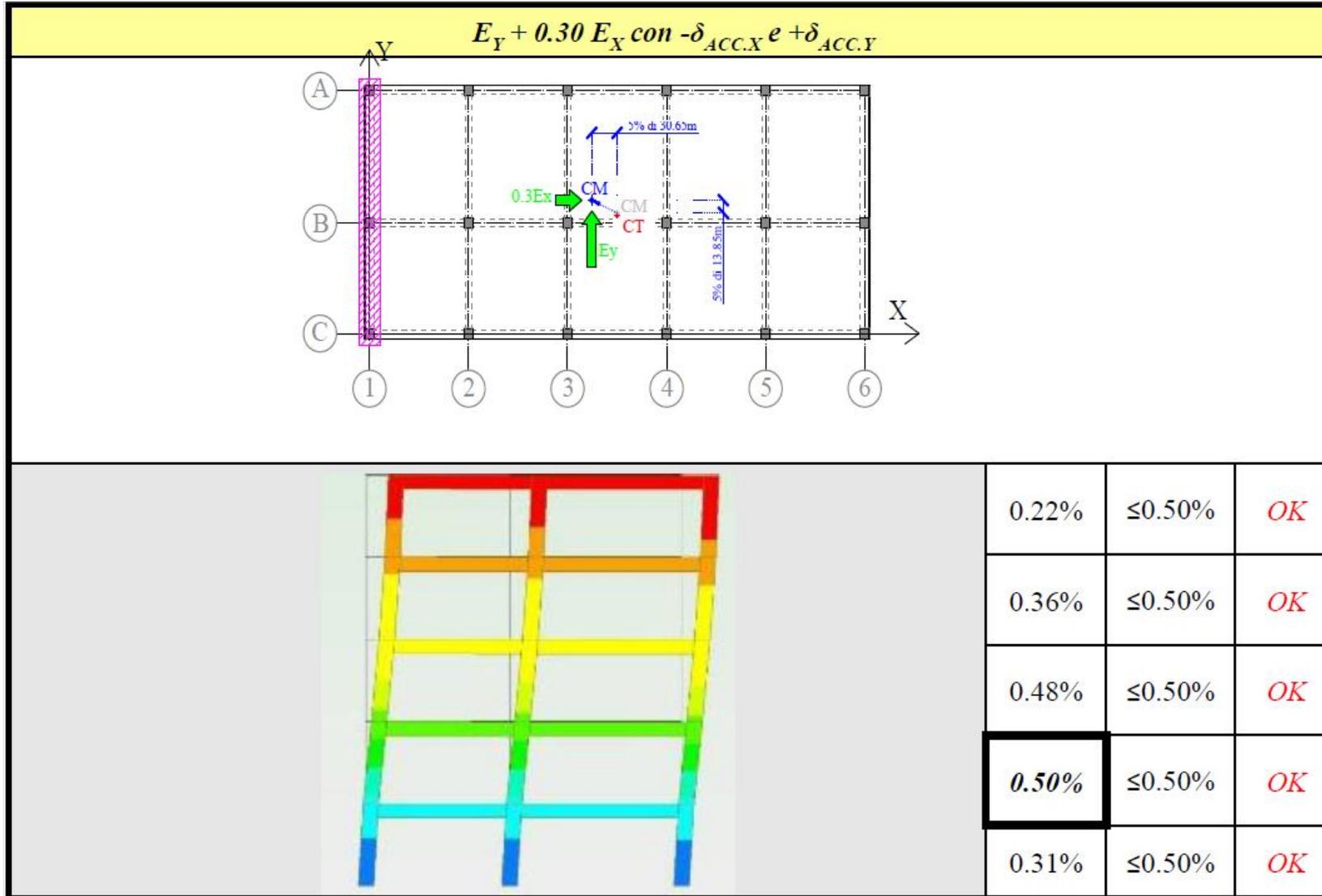
$$E_X + 0.30 E_Y \text{ con } -\delta_{ACC.X} e + \delta_{ACC.Y}$$



0.15%	≤0.50%	OK
0.27%	≤0.50%	OK
0.37%	≤0.50%	OK
0.40%	≤0.50%	OK
0.25%	≤0.50%	OK



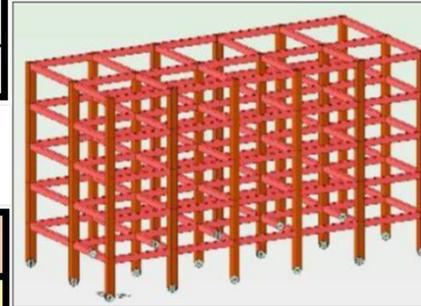
a) EDIFICIO A BASE FISSA – VERIFICA DEFORMABILITA' ALLO SLD



a) EDIFICIO A BASE FISSA

Verifica di deformabilità torsionale

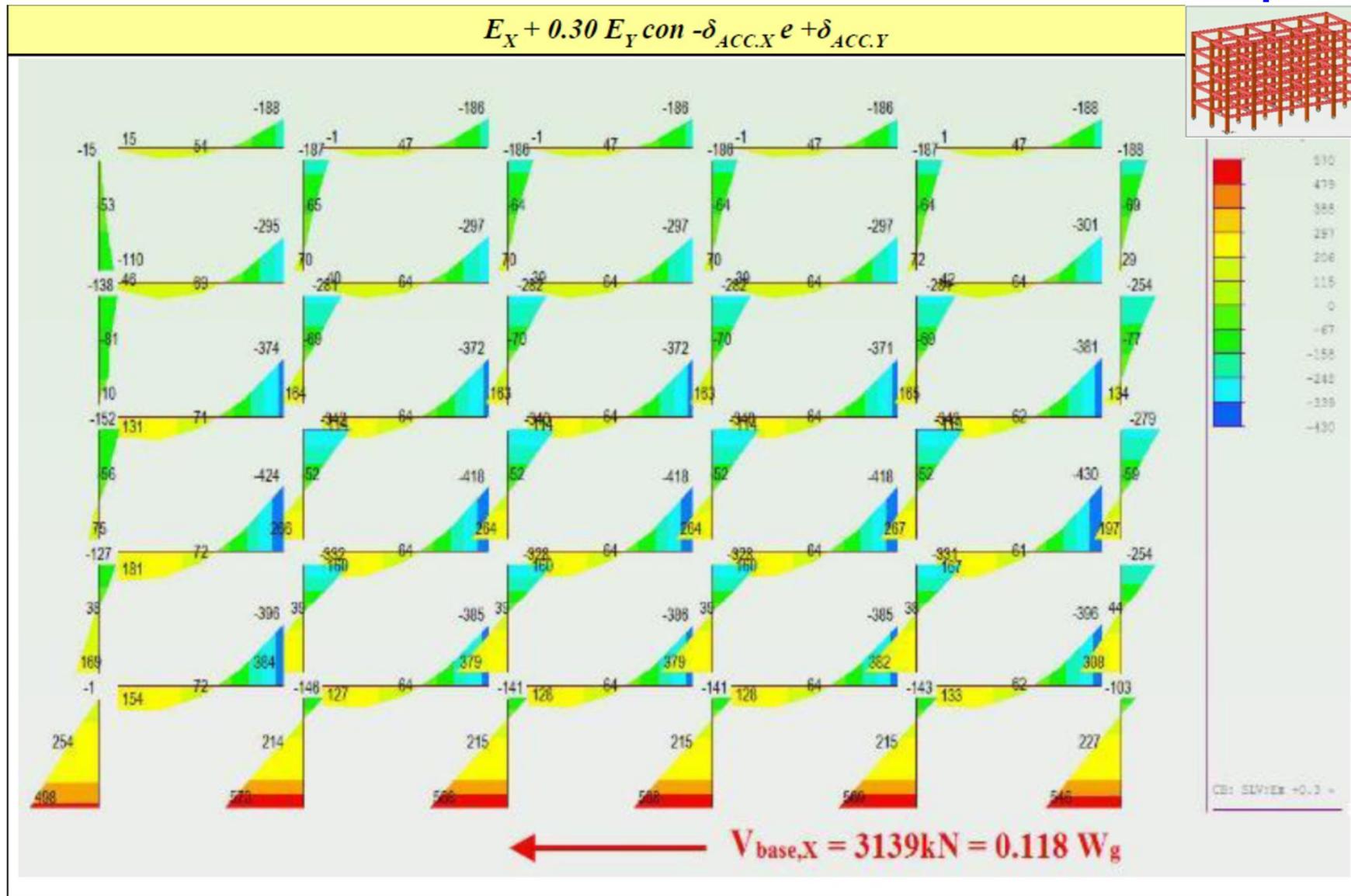
Piano	Rigidezza torsionale [kNm]	Rigidezza flessionale X [kNm]	Rigidezza flessionale Y [kNm]	r_x [m]	r_y [m]	I_s [m]	r/I_s [m]	Deformabilità torsionale
4F	26499835	241280	185570	10.48	11.95	9.71	1.08	NO
3F	28480947	253958	200785	10.59	11.91	9.71	1.09	NO
2F	32862933	286502	233634	10.71	11.86	9.71	1.11	NO
1F	63153682	529607	454330	10.92	11.79	9.71	1.13	NO



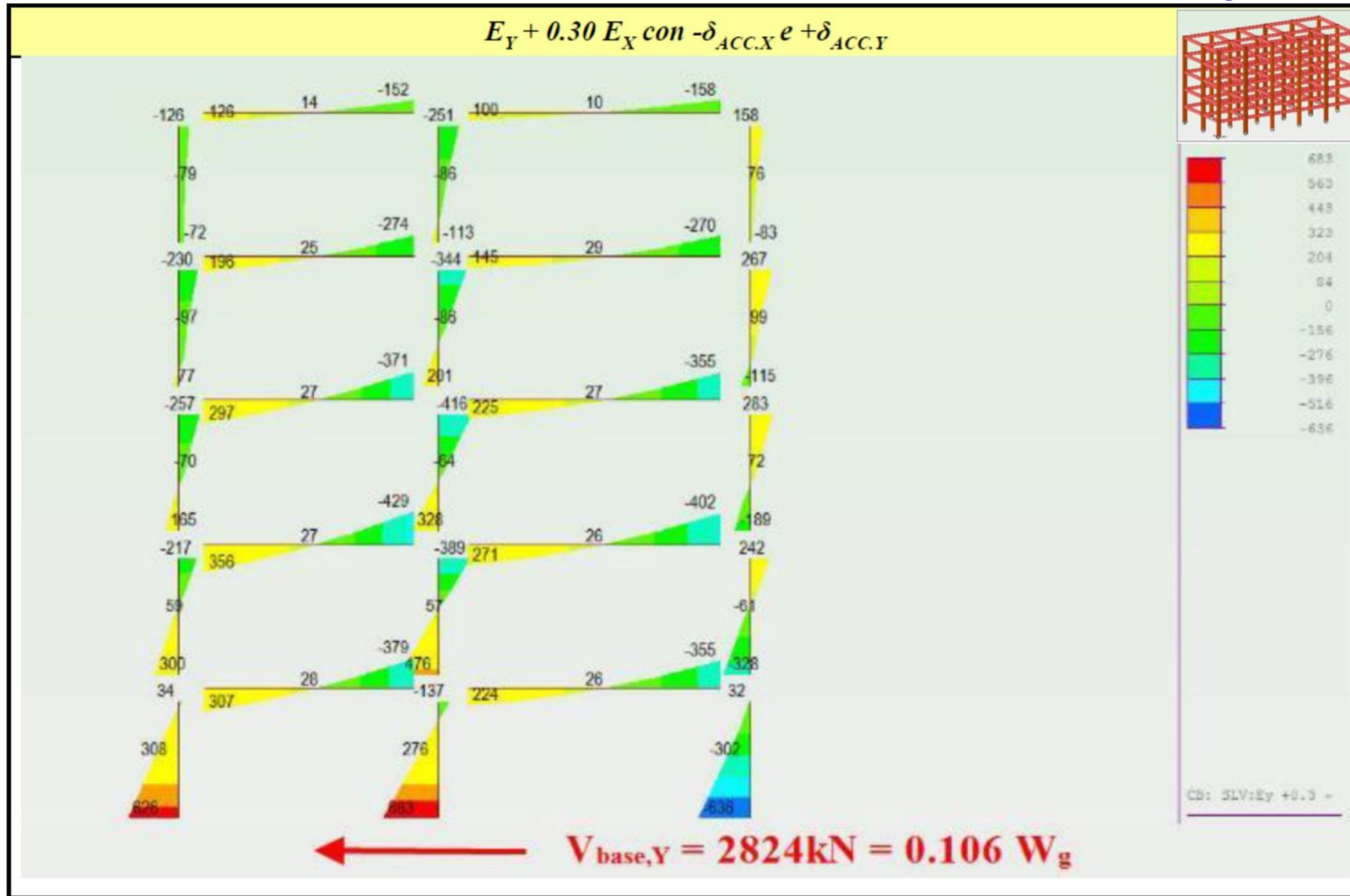
Verifica P-Δ allo SLV

Sisma	Piano	h [mm]	P [kN]	V [kN]	d_r da analisi [mm]	$d_r^* = d_r \cdot q$ [mm]	θ	Limite accettato	$1/(1-\theta)$
Ex	Cop.	3500	4452	931	4.50	17.61	0.024	0.2	1.00
	4F	3500	10002	1796	7.26	28.39	0.045	0.2	1.00
	3F	3500	15553	2447	9.50	37.14	0.067	0.2	1.00
	2F	3500	21103	2906	10.04	39.20	0.081	0.2	1.00
	1F	3500	26653	3139	5.88	22.96	0.056	0.2	1.00
Ey	Cop.	3500	4452	884	5.66	22.10	0.031	0.2	1.00
	4F	3500	10002	1639	8.53	33.31	0.058	0.2	1.00
	3F	3500	15553	2199	10.78	42.11	0.085	0.2	1.00
	2F	3500	21103	2605	11.01	43.01	0.099	0.2	1.00
	1F	3500	26653	2824	6.14	23.97	0.065	0.2	1.00

a) EDIFICIO A BASE FISSA - SOLLECITAZIONI ALLO SLV (M_f – Telaio A)



a) EDIFICIO A BASE FISSA - SOLLECITAZIONI ALLO SLV (M_f – Telaio 1)



ESEMPI DI APPLICAZIONE

CONFRONTO TRA:

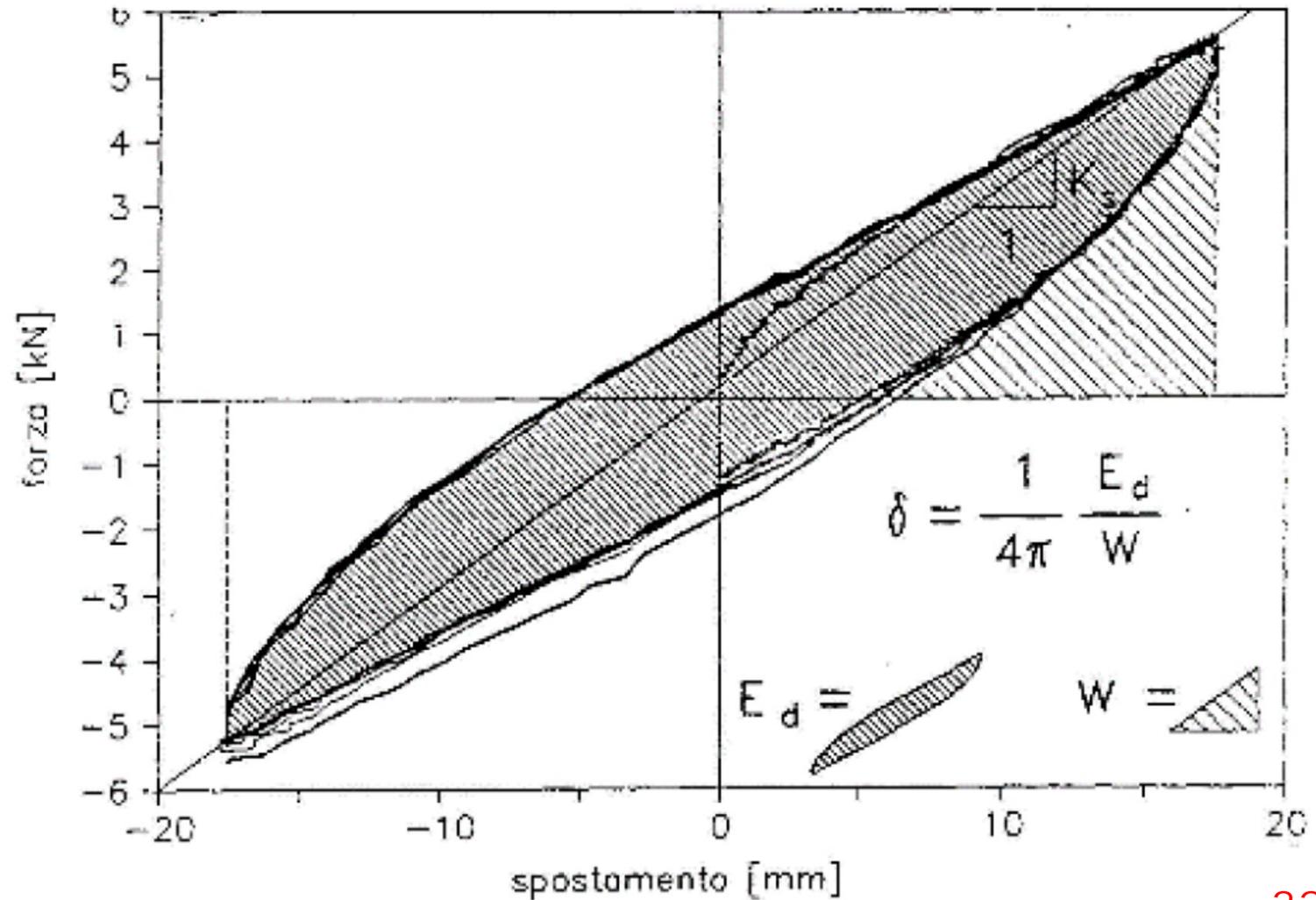
a) PROGETTO DI UN EDIFICIO A BASE FISSA, **CD "B"** – (TELAIO DI RIFERIMENTO)

b) Telaio di riferimento **isolato con dispositivi HDRB**

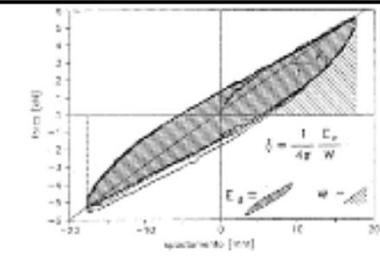
b) Edificio con isolatori HDRB (High Dissipation Rubber Bearing)

Legame isteretico

Gli HDRB sono dispositivi di isolamento in grado di dissipare, a seconda della mescola della gomma utilizzata, fino a $\xi(\%) = 10\%$



b) SCELTA degli isolatori HDRB: DATI DI PROGETTO

<p>Periodo della struttura isolata:</p> <p><i>Scelta del progettista</i></p> <p><i>(entro il limite $3T_f \leq T \leq 3.0$ secondi, se si progetta mediante analisi statica lineare)</i></p>	<p>In questa sede, pur facendo utilizzo di analisi dinamiche lineari, ci si attiene al limite prescritto per le analisi statiche:</p> <div style="border: 2px solid blue; padding: 5px; display: inline-block;"> $3T_f = 3 \cdot C_1 \cdot H^{3/4} = 1.92 \text{ secondi} \leq \underline{T=2.8s} \leq 3.0 \text{ secondi}$ </div>
<p>Caratteristiche meccaniche della gomma:</p> <p><i>Funzione degli isolatori scelti dal progettista; tali caratteristiche variano a seconda della mescola della gomma utilizzata</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> •Modulo di elasticità tangenziale G=0.4 MPa •Modulo di compressibilità volumetrica E_b=2000MPa •Smorzamento viscoso equivalente: $\xi(\%) = \frac{E_d}{4\pi \cdot W} = 10\%$ 
<p>Stato limite considerato:</p> <p><i>I dispositivi antisismici si progettano allo SLC [NTC-18, Par. 7.10.6.2.2] (probabilità 2% in 50 anni, periodo di ritorno 2475 anni)</i></p>	

b) SCELTA degli isolatori HDRB: DATI DI PROGETTO

Periodo della struttura isolata:

Scelta del progettista

(entro il limite $3T_f \leq T \leq 3.0$ secondi, se si progetta mediante analisi statica lineare)

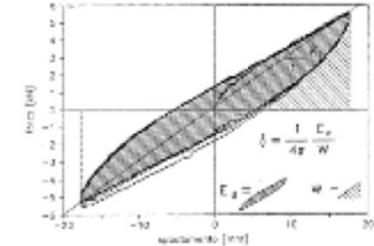
In questa sede, pur facendo utilizzo di analisi dinamiche lineari, ci si attiene al limite prescritto per le analisi statiche:

$$3T_f = 3 \cdot C_1 \cdot H^{3/4} = 1.92 \text{ secondi} \leq \underline{T=2.8s} \leq 3.0 \text{ secondi}$$

Caratteristiche meccaniche della gomma:

Funzione degli isolatori scelti dal progettista; tali caratteristiche variano a seconda della mescola della gomma utilizzata

- Modulo di elasticità tangenziale $G=0.4 \text{ MPa}$
- Modulo di compressibilità volumetrica $E_b=2000 \text{ MPa}$
- Smorzamento viscoso equivalente: $\xi(\%) = \frac{E_d}{4\pi \cdot W} = 10\%$



Stato limite considerato:

I dispositivi antisismici si progettano allo SLC [NTC-18, Par. 7.10.6.2.2] (probabilità 2% in 50 anni, periodo di ritorno 2475 anni)



b) TELAIO CON HDRB: PROCEDURA PROGETTAZIONE

1. si approssima il sistema isolato come un oscillatore semplice di massa pari alla massa totale dell'edificio **$M=2718 \text{ tonn}$** ; quindi si stima la **rigidezza a traslazione $K_{H,TOT}$** richiesta al sistema di isolamento:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{M}{K_{H,TOT}}} \Rightarrow K_{H,TOT} = M \cdot \frac{4\pi^2}{T^2} = 2718 \text{ tonn} \cdot \frac{4\pi^2}{(2.8\text{s})^2} = 13686 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

NB. Se l'eccentricità tra CdM e CdT è maggiore del 3% della dimensione in pianta trasversale alla direzione del sisma, tale rigidezza va spartita in maniera differenziale tra gli appoggi al fine di ridurre/annullare l'eccentricità

ESEMPIO:

Anche se nel nostro caso l'eccentricità è $\leq 3\%$, si impone C.T. \equiv C.M. Sapendo che C.M. \equiv (15.00m ; 6.56m); si può per esempio imporre agli allineamenti A, B e C che:

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_{C.T.} = \frac{\sum_i K_{H,i} \cdot y_i}{\sum_i K_{H,i}} = \frac{K_{H,A} \cdot 13.2\text{m} + K_{H,B} \cdot 6\text{m} + K_{H,C} \cdot 0\text{m}}{13686 \frac{\text{kN}}{\text{m}}} = 6.56\text{m} \\ K_{H,A} + K_{H,B} + K_{H,C} = 13686 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ K_{H,B} = K_{H,C} \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} K_{H,A} = 4777 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ K_{H,B} = 4455 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ K_{H,C} = 4455 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} K_{H,A,i} = 796 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ K_{H,B/C,i} = 742 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \end{array} \right.$$

b) TELAIO CON HDRB: PROCEDURA PROGETTAZIONE

2. Si calcola lo **spostamento orizzontale di progetto** per il C.T. del sistema S.D.O.F. definito

$$S_{De,SLC}(T) = \frac{S_{e,SLC}(T)}{\omega^2} = S_{e,SLC}(T) \cdot \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 = 0.167g \cdot \left(\frac{2.8s}{2\pi}\right)^2 = 0.325m$$

3. Si stima la **richiesta di spostamento** per gli **isolatori più esterni**, con effetti torsionali più rilevanti (eccentricità accidentale). In via semplificata si può utilizzare il fattore amplificativo δ

$$\delta = 1 + 0.6 \cdot \frac{x}{L_e} = 1.3 \quad \Rightarrow \quad d_{bd} = 1.3 \cdot 0.325m = 0.423m$$

b) TELAIO CON HDRB: PROCEDURA PROGETTAZIONE

4. Una delle verifiche di deformazione degli isolatori richiede che la **deformazione a taglio** associata al **solo spostamento orizzontale di progetto** d_{bd} sia inferiore a 2.5; invertendo tale relazione di verifica si può imporre che (T_q = spessore totale della sola gomma)

$$\varepsilon_{q,E} = \frac{d_{bd}}{T_q} \leq 2.5 \quad \Rightarrow \quad T_q \geq \frac{d_{bd}}{2.5} = \frac{423mm}{2.5} = 169mm$$

Scegliamo quindi uno spessore totale dell'elastomero pari a:

$$T_q = 175mm \quad \left\{ \begin{array}{l} t_r = 7mm \\ n_r = 25 \quad \text{strati} \end{array} \right.$$

b) TELAIO CON HDRB: PROCEDURA PROGETTAZIONE

5. Definiamo la **sezione degli isolatori** (in questo esempio avranno geometria circolare)

$$K_{H,A,i} = \frac{G \cdot A_{A,i}}{T_q} = 796 \frac{kN}{m} \Rightarrow A_{A,i} = \frac{K_{H,A,i} \cdot T_q}{G} = \frac{796 \frac{kN}{m} \cdot 175mm}{0.4 \frac{N}{mm^2}} = 348250mm^2 \Rightarrow D_{A,i} = 665mm$$

$$K_{H,B/C,i} = \frac{G \cdot A_{B/C,i}}{T_q} = 742 \frac{kN}{m} \Rightarrow A_{A,i} = \frac{K_{H,B/C,i} \cdot T_q}{G} = \frac{742 \frac{kN}{m} \cdot 175mm}{0.4 \frac{N}{mm^2}} = 324625mm^2 \Rightarrow D_{B/C,i} = 645mm$$

In alternativa è possibile, fissato il diametro D per tutti gli isolatori, imporre agli allineamenti A e B/C altezze **T_q differenti.**

b) TELAIO CON HDRB: PROCEDURA PROGETTAZIONE

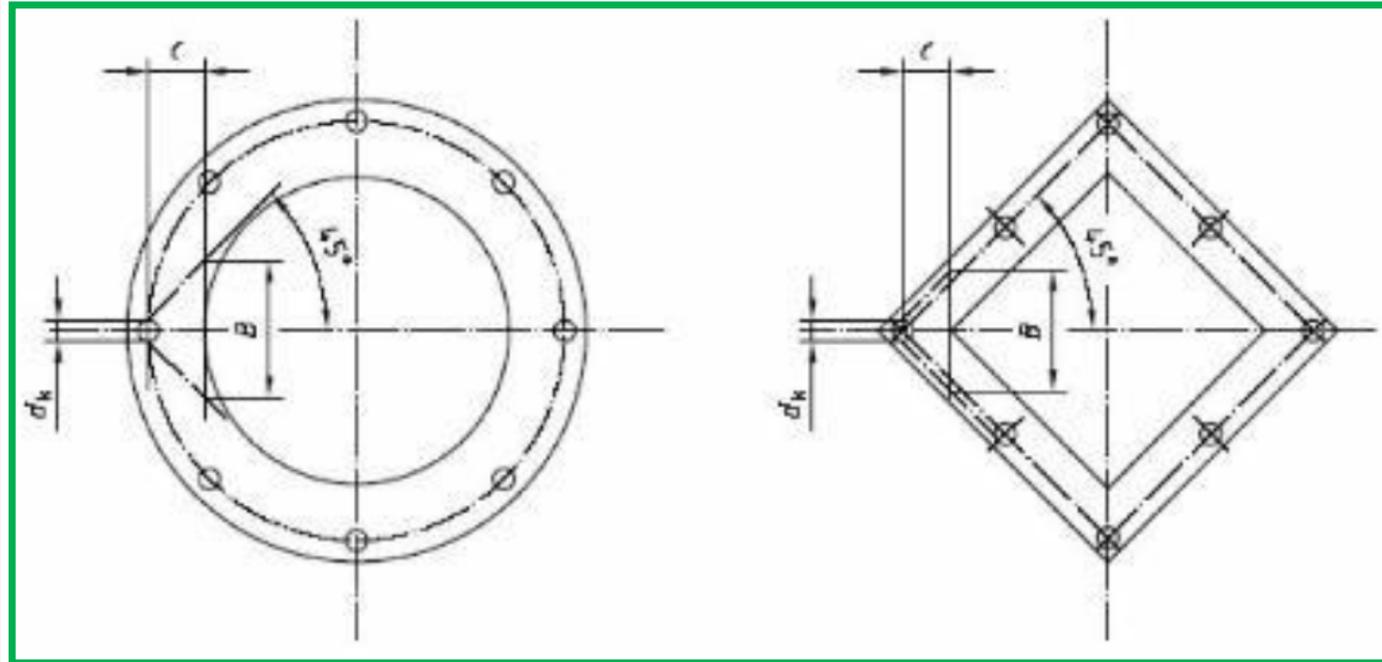
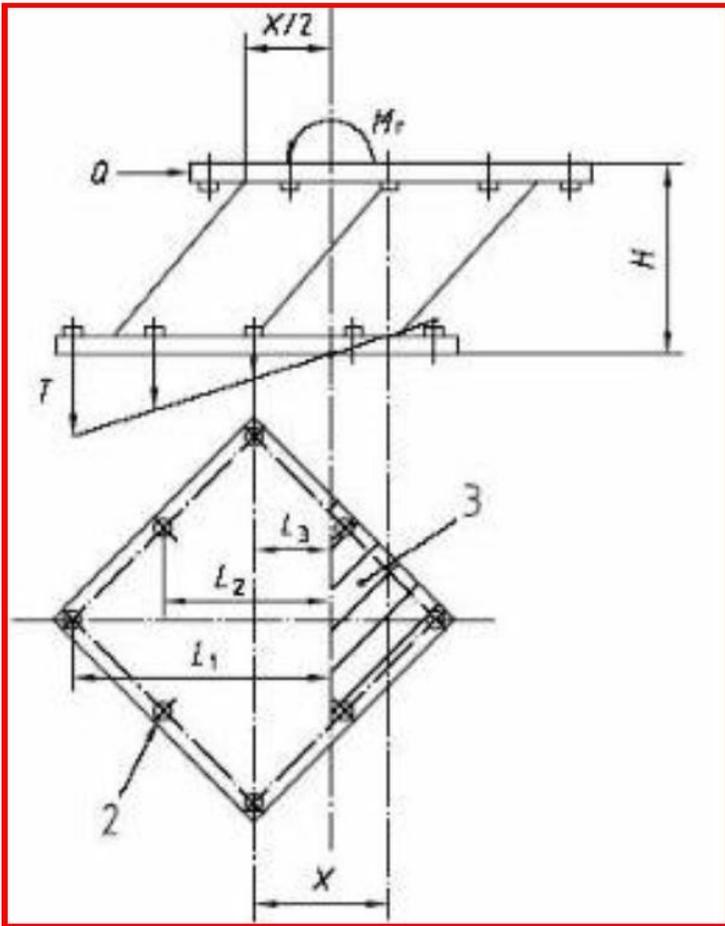
6. Definiamo lo **spessore dei lamierini d'acciaio interni** [EN 1337 3:2005, **Eq 5.3.3.5**]

$$t_s = \frac{K_p \cdot N_{Ed,max} \cdot (t_{r,1} + t_{r,2}) \cdot K_h \cdot \gamma_m}{A_r \cdot f_y} \geq 2mm \Rightarrow \begin{cases} t_{s,A} = 0.46mm \\ t_{s,B/C} = 0.49mm \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} t_s = 3mm \\ n_s = n_r - 1 = 24 \text{strati} \end{cases}$$

- K_p è un fattore di correzione della distribuzione di sforzi pari a $K_p = 1.3$
- $N_{Ed,max}$ è l'azione verticale massima $\rightarrow N_{Ed,max} = 2100kN$ (per i pilastri B2 e B5)
- $t_{r,1}$ e $t_{r,2}$ sono rispettivamente gli spessori della gomma sui due lati del lamierino $\rightarrow t_{r,1/2} = t_r = 7mm$
- K_h fattore correttivo pari a 1 se l'elastomero non ha fori, altrimenti pari a 2 $\rightarrow K_h = 1$
- γ_m fattore di sicurezza legato alle prescrizioni nazionali, genericamente considerato pari a $\gamma_m = 1$
- A_r è la superficie piana ridotta a causa delle azioni non sismiche; genericamente si assume pari all'area dei lamierini d'acciaio interni, il cui diametro è pari a $D' = D - 10 \text{ mm}$
- tensione di snervamento dell'acciaio utilizzato: $f_y = 245 \text{ MPa}$ [ISO 22762-3:2007 ; Tabella 11]

b) TELAIO CON HDRB: PROCEDURA PROGETTAZIONE

7. Determiniamo **diametro dei bulloni d'ancoraggio** e **spessore piastre d'acciaio esterne**



b) TELAIO CON HDRB: SCELTA ISOLATORI DA CATALOGO

In questo esempio gli isolatori sono stati progettati e dimensionati *ad hoc*. Nella pratica progettuale invece, vanno scelti gli isolatori a "catalogo" più prossimi alle esigenze di progetto, previste in fase di predimensionamento. in termini di:

1. rigidezza orizzontale
2. spostamento orizzontale
3. carico verticale massimo

Proprietà isolatori HDRB (*)			
EN 13129:2009			
Caratteristica	Sigla	Allin. "A"	Allin. "B/C"
Modulo di elasticità tangenziale	G [N/mm ²]		0.4
Modulo di compressibilità volumetrica	E_b [N/mm ²]		2000
Smorzamento viscoso equivalente	ξ [%]		10
Diametro isolatore	D [mm]	665	645
Area	A [mm ²]	347322	326745
Diametro piastre di rinforzo	$D^* = D - 10\text{mm}$ [mm]	655	635
Area effettiva	$A_r = A^*$ [mm ²]	336955	316692
Spessore strati gomma	t_g [mm]		7
Numero strati gomma	n_g		25
Spessore totale elastomero	T_a [mm]		175
Spessore piastre interne	t_s [mm]		3
Numero piastre interne	$n_s = n_g - 1$		24
Spessore piastre esterne	t_e [mm]		30
Spessore piastre vulcanizzate	t_v [mm]		30
Altezza totale isolatore	H [mm]		367
Fattore di forma	$S = \frac{D^*}{4t_g}$	23.39	22.68
Modulo di Young apparente degli strati di gomma	$E_c^* = 3G \cdot (1 + 2 \cdot S^2)$ [N/mm ²]	1314	1235
Modulo di Young apparente corretto (solo se $S > 8$)	$E_c = \left[\frac{1}{E_c^*} + \frac{1}{E_b} \right]^{-1}$ [N/mm ²]	793	763
Rigidità verticale	$K_v = \frac{A^*}{\sum_i \frac{t_{g,i}}{E_{c,i}}}$ [kN/mm]	1573	1380
Rigidità orizzontale	$K_H = \frac{G \cdot A}{T_a}$ [kN/mm]	0.793	0.746
Rigidità rotazionale	$K_\varphi = \frac{G \cdot \pi \cdot D^{*4}}{512 \cdot n_g \cdot t_g^3}$ [kNm/rad]	22602	18746

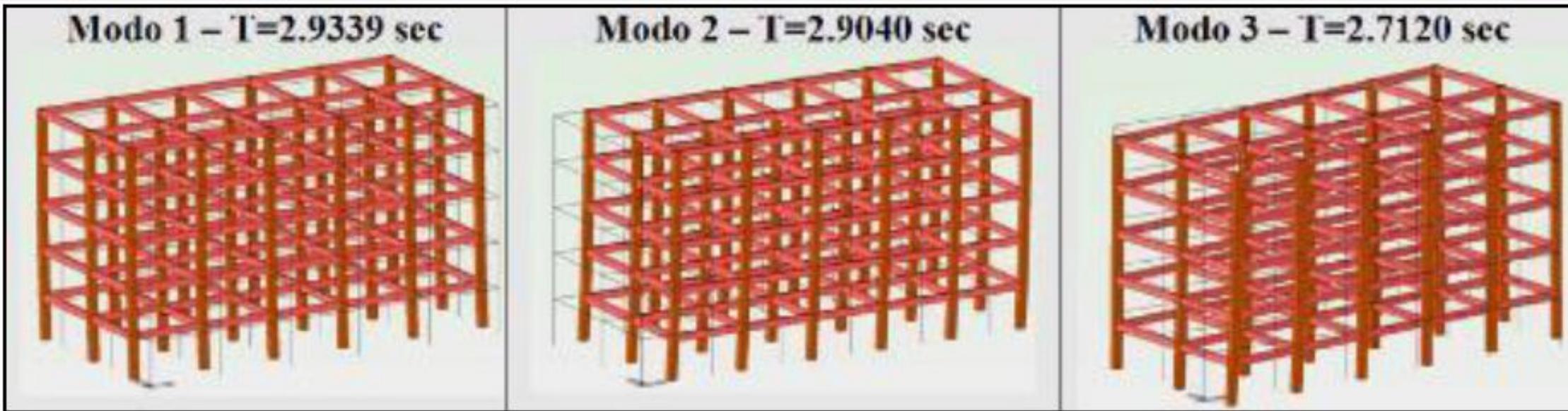
Caratteristiche lineari equivalenti degli isolatori

b) TELAIO CON HDRB: VERIFICA ISOLATORI allo SLC

Nel medesimo modello numerico avremo:

1. **vincoli** di incastro alla **base** sostituiti con **molle lineari** caratterizzate dalle **rigidezze lineari** degli **isolatori elastomerici**;
2. **elementi strutturali** a **rigidezza flessionale piena** (**la struttura rimane elastica!**)

b) TELAIO CON HDRB: VERIFICA ISOLATORI allo SLC



Modi di vibrare propri della struttura

Modo	Frequenza f [Hz]	Periodo T [s]	Trasl. in X		Trasl. in Y		Rot. in Z (*)	
			Mass %	Sum %	Mass %	Sum %	Mass %	Sum %
1	0.3408	2.9339	0	0	99.9088	99.9088	0	0
2	0.3443	2.9040	99.9165	99.9165	0	99.9088	0.0299	0.0299
3	0.3676	2.7120	0.0300	99.9465	0	99.9088	99.8943	99.9242

(*) Il modo di vibrare rotazionale attorno all'asse verticale non determina sollecitazioni sulla struttura se il centro di massa e il centro di taglio dell'edificio coincidono.

b) TELAI CON HDRB: VERIFICA ISOLATORI allo SLC

ISOLATORE A1 – COMB: E_Y + 0.30 E_X (con -δ_{ACC,X} e +δ_{ACC,Y})		
Sollecitazioni da analisi dinamica lineare allo SLC ξ(%) = 10%		
Grandezza	Sigla	Valore
Spostamento orizzontale	d_{bd} [mm]	382
Carico verticale in cond. Statiche SLU	N_{sd} [kN]	1502
Carico verticale in cond. Sismiche SLC	N_{Ed} [kN]	1390
Rotazione attorno all'asse X in cond. sismiche	$\alpha_{X,d}$ [rad]	0.007
Rotazione attorno all'asse Y in cond. sismiche	$\alpha_{Y,d}$ [rad]	0.003
Verifiche EN 15129:2009		
1) Verifica di instabilità in condizioni statiche SLU		
Grandezza	Sigla	Valore
Carico critico $P_{CR} = \frac{\lambda \cdot G \cdot A_r \cdot D' \cdot S}{T_q}$ (con $\lambda=1.1$)	P_{cr} [kN]	12979
VERIFICA: $N_{sd} < P_{CR}$		OK
2) Verifica di instabilità in condizioni sismiche SLC		
VERIFICA: $1 - \frac{2 \cdot N_{Ed,max}}{P_{cr}} \geq 0.7\delta \quad \text{se} \quad \frac{P_{cr}}{4} \leq N_{Ed,max} \leq \frac{P_{cr}}{2} \quad \text{con} \quad \delta = \frac{d_{bd}}{D'}$ $\delta \leq 0.7 \quad \text{se} \quad N_{Ed,max} < \frac{P_{cr}}{4}$		OK

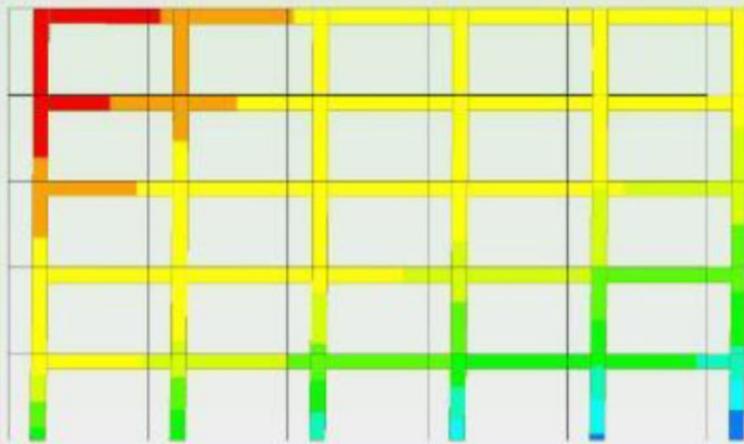
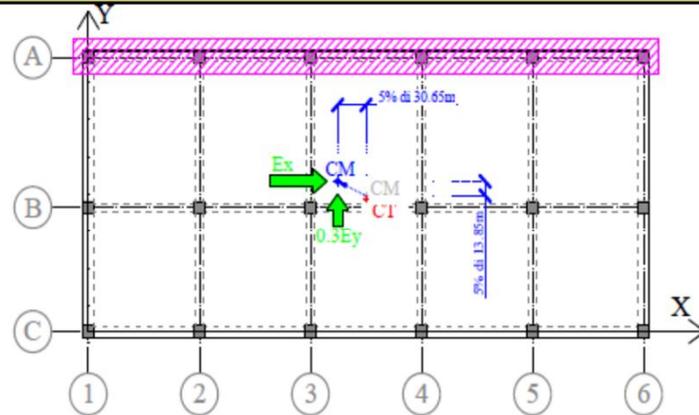
b) TELAIO CON HDRB: VERIFICA ISOLATORI allo SLC

3) Verifica di deformazione a taglio in condizioni sismiche SLC		
<p><i>Deformazione a taglio dovuta al solo carico verticale</i></p> $\varepsilon_{c,E} = \frac{6 \cdot S \cdot N_{Ed,max}}{A_r \cdot E'_c} \quad \text{se } S \leq 8$ $\varepsilon_{c,E} = \frac{\varepsilon_{c,E}(E'_c = E_c) + 3 \cdot \varepsilon_{c,E}}{4} \quad \text{se } S > 8$	$\varepsilon_{c,E}$	0.513
<p><i>Deformazione a taglio dovuta allo spostamento orizzontale</i></p> $\varepsilon_{q,E} = \frac{d_{bd}}{T_q}$	$\varepsilon_{q,E}$	2.183
<p><i>Deformazione a taglio dovuta alle rotazioni $\alpha_{x,d}$ e $\alpha_{y,d}$</i></p> $\varepsilon_{\alpha,E} = \frac{(D'^2 \cdot \alpha_{x,d} + D'^2 \cdot \alpha_{y,d}) \cdot t_r}{2 \cdot n_r \cdot t_r^3}$	$\varepsilon_{\alpha,E}$	1.751
<p>VERIFICHE:</p> $\varepsilon_{q,E} \leq 2.5$ $\varepsilon_{t,d} = K_L \cdot (\varepsilon_{c,E} + \varepsilon_{q,E} + \varepsilon_{\alpha,E}) \leq 7$ <p><i>con K_L pari a 1 oppure a 1.5 se richiesto dal progettista</i></p>		OK

b) TELAIO CON HDRB: VERIFICA DEFORMABILITA' allo SLD

Verifica di deformabilità allo SLD (con $\xi(\%) = 10\%$)

$E_x + 0.30 E_y$ con $-\delta_{ACC.X}$ e $+\delta_{ACC.Y}$



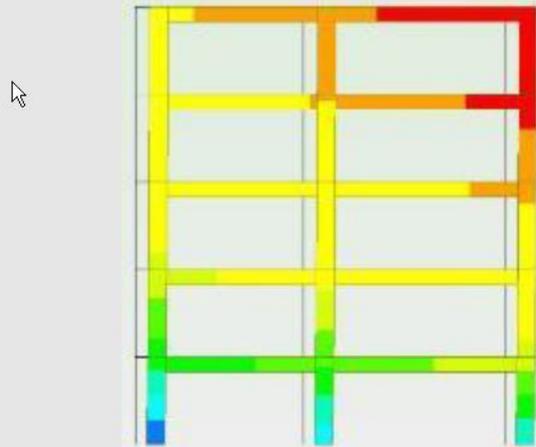
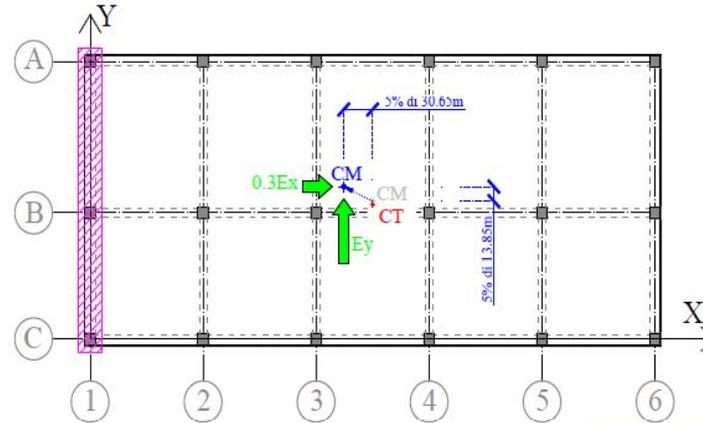
	HDRB	Incastro
	0.018%	0.15% (x 8.3)
	0.034%	0.27% (x 7.9)
	0.053%	0.37% (x 6.9)
	0.078%	0.40% (x 5.1)
	0.161%	0.25% (x 1.5)

RIDUZIONE di DRIFT compresa tra: 35% ÷ 88 %

b) TELAIO CON HDRB: VERIFICA DEFORMABILITA' allo SLD

Verifica di deformabilità allo SLD (con $\xi(\%) = 10\%$)

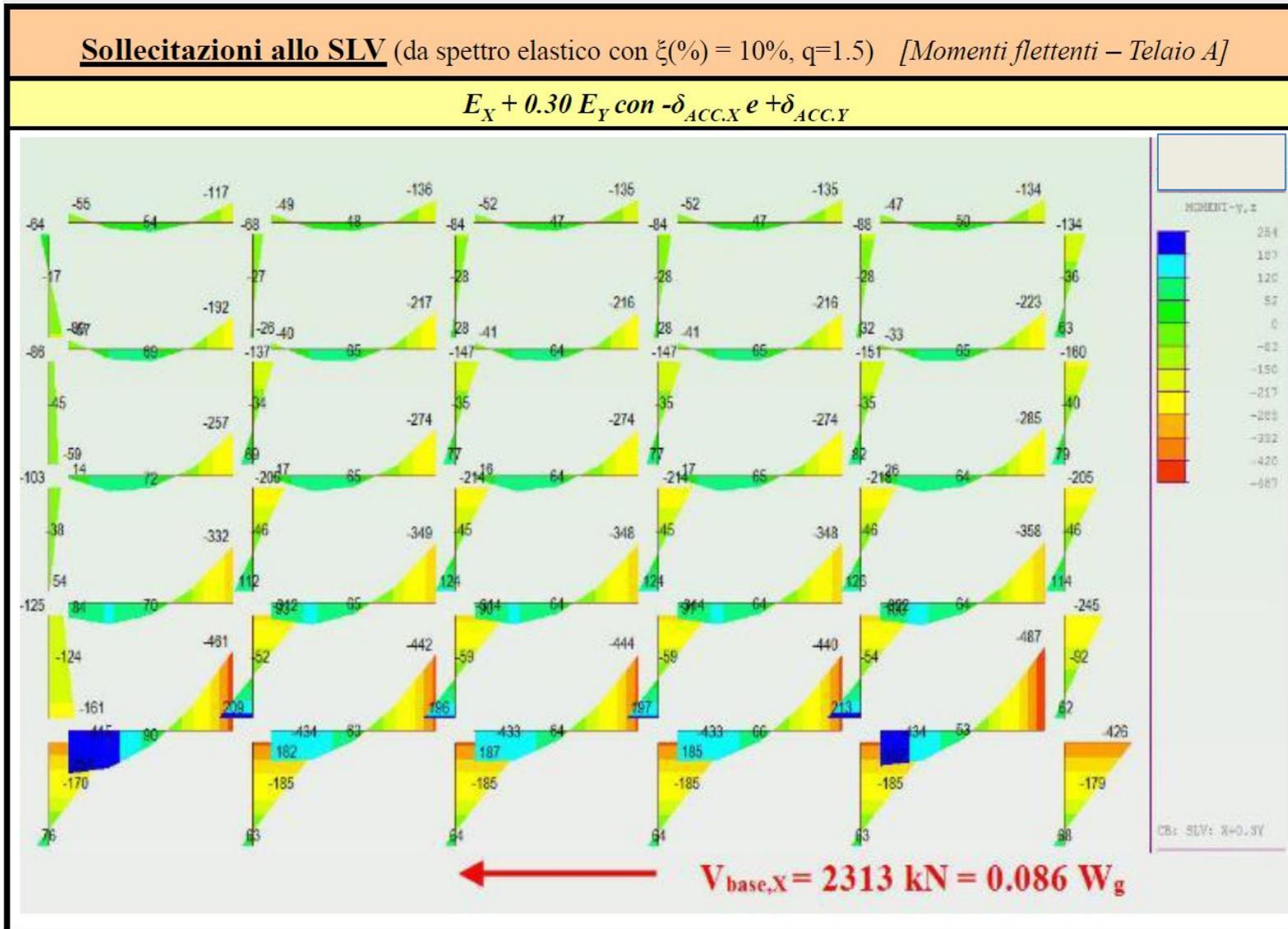
$E_Y + 0.30 E_X$ con $-\delta_{ACC.X}$ e $+\delta_{ACC.Y}$



	HDRB	Incastro
	0.031%	0.22% (x 7.1)
	0.052%	0.36% (x 6.9)
	0.077%	0.48% (x 6.2)
	0.110%	0.50% (x 4.5)
	0.181%	0.31% (x 1.7)

RIDUZIONE di DRIFT compresa tra: 41% ÷ 86 %

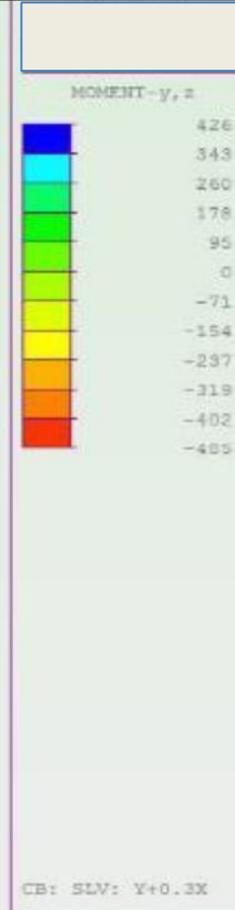
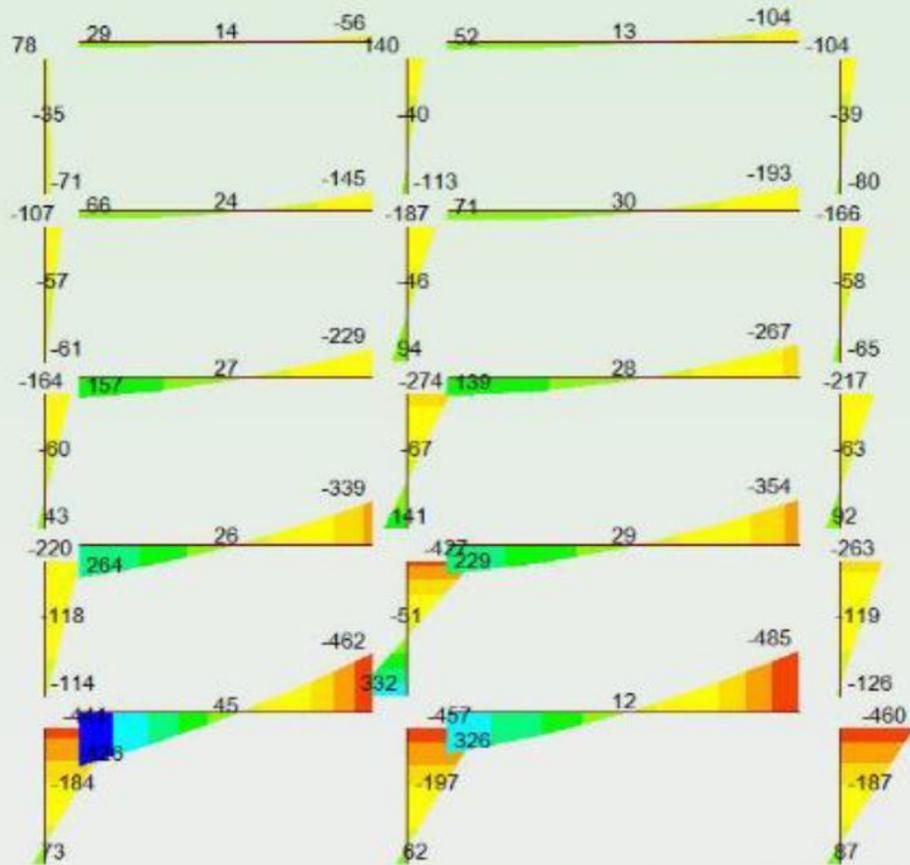
b) TELAIO CON HDRB: SOLLECITAZIONI allo SLV



b) TELAIO CON HDRB: SOLLECITAZIONI allo SLV

Sollecitazioni allo SLV (da spettro elastico con $\xi(\%) = 10\%$, $q=1.5$) [Momenti flettenti – Telaio 1]

$$E_Y + 0.30 E_X \text{ con } -\delta_{ACC,X} e + \delta_{ACC,Y}$$



$\leftarrow V_{base,Y} = 2265kN = 0.085 W_{0g}$

b) TELAIO CON HDRB: DEFORMAZIONI E TAGLI

Deformazioni e taglio ai piani allo SLV											
Sisma	Piano	h [mm]	P [kN]	NO ISOLAMENTO			ISOLAMENTO HDRB			CONFRONTO	
				V [kN]	d _r da analisi [mm]	d _r [*] = d _r · q [mm]	V [kN]	d _r da analisi [mm]	d _r [*] = d _r · q [mm]	$\frac{d_{r,HDRB}^*}{d_{r,NO_ISOL.}^*}$	$\frac{V_{HDRB}}{V_{NO_ISOL.}}$
Ex	Cop.	3500	4452	931	4.50	17.61	372	1.28	1.92	0.11	0.40
	4F	3500	10002	1796	7.26	28.39	869	2.37	3.56	0.13	0.48
	3F	3500	15553	2447	9.50	37.14	1361	3.69	5.53	0.15	0.56
	2F	3500	21103	2906	10.04	39.20	1844	5.46	8.19	0.20	0.63
	1F	3500	26653	3139	5.88	22.96	2313	10.65	15.98	0.70	0.74
Ey	Cop.	3500	4452	884	5.66	22.10	367	2.08	3.12	0.14	0.41
	4F	3500	10002	1639	8.53	33.31	858	3.55	5.33	0.16	0.52
	3F	3500	15553	2199	10.78	42.11	1340	5.34	8.01	0.19	0.61
	2F	3500	21103	2605	11.01	43.01	1812	7.66	11.49	0.27	0.69
	1F	3500	26653	2824	6.14	23.97	2265	12.36	18.54	0.77	0.80

1) I valori di taglio e deformazione risultano molto ridotti, particolarmente ai piani alti.

2) Per strutture ISOLATE Non va applicato il CapacityDesign e non vanno condotte verifiche di duttilità.

ESEMPI DI APPLICAZIONE

CONFRONTO TRA:

a) PROGETTO DI UN EDIFICIO A BASE FISSA, **CD "B"** – (TELAIO DI RIFERIMENTO)

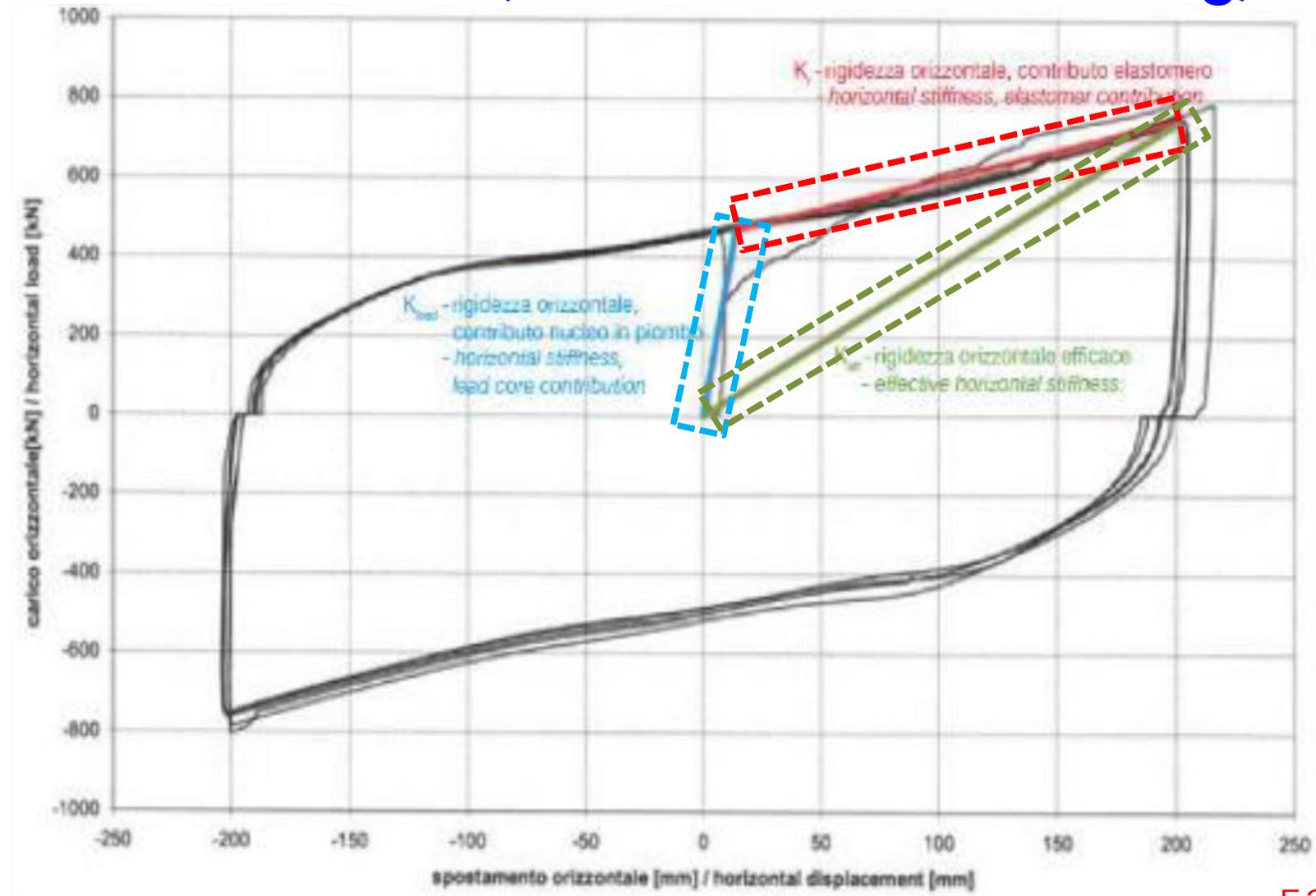
b) Telaio di riferimento **isolato con dispositivi HDRB**

c) Telaio di riferimento isolato con dispositivi LRB

c) Edificio con isolatori LRB (Lead Rubber Bearing)

Legame isteretico sperimentale

Dispositivo di isolamento più dissipativo del sistema HDRB, fino a ξ (%) = 30%

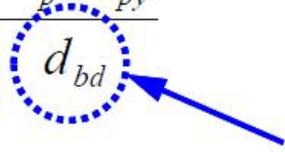


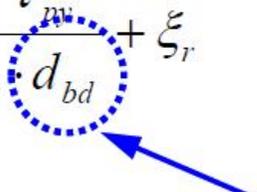
c) Isolatori LRB (Lead Rubber Bearing)

Gli LRB hanno un **comportamento non lineare**, combinazione del:

- comportamento pressoché lineare della gomma
- comportamento elasto-plastico del nucleo in piombo.

Rigidità orizzontale $K_{H,i}$ e smorzamento viscoso efficace ξ sono funzione dello spostamento effettivamente raggiunto (d_{bd}):

$$K_{H,i}(d_{bd}) = \frac{G \cdot A'}{T_q} + \frac{A_p \cdot \tau_{py}}{d_{bd}}$$


$$\xi(d_{bd}) = \frac{E_d}{4\pi \cdot W} = \frac{E_{d,p} + E_{d,r}}{4\pi \cdot W} \approx \frac{4 \cdot A_p \cdot \tau_{py} \cdot d_{bd}}{4\pi \cdot \frac{K_{H,i} \cdot d_{bd}^2}{2}} + \xi_r = \frac{2 \cdot A_p \cdot \tau_{py}}{\pi \cdot K_{H,i} \cdot d_{bd}} + \xi_r$$


- A' è la sezione dell'isolatore, al netto della sezione del nucleo in piombo;
- T_q è lo spessore totale della sola gomma;
- $(A_p \cdot \tau_{py})$ è il taglio di snervamento del nucleo in piombo ($\tau_{py} = 10 \text{MPa}$);
- ξ_r è lo smorzamento viscoso equivalente della gomma.

È necessario un percorso progettuale ITERATIVO

Si può fare comunque uso di una **modellazione lineare equivalente** purché valgano le **condizioni illustrate** per gli isolatori HDRB

b) TELAIO CON LRB: DEFORMAZIONI E TAGLI

Sisma	Piano	h [mm]	P [kN]	NO ISOLAMENTO			ISOLAMENTO HDRB ISOLAMENTO LRB			CONFRONTO	
				V [kN]	d _r da analisi [mm]	d _r * = d _r ·q [mm]	V [kN]	d _r da analisi [mm]	d _r * = d _r ·q [mm]	$\frac{d_{r,ISOL.}^*}{d_{r,NO_ISOL.}^*}$	$\frac{V_{ISOL.}}{V_{NO_ISOL.}}$
Ex	Cop.	3500	4452	931	4.50	17.61	372 260	1.28 0.93	1.92 1.40	0.11 0.08	0.40 0.27
	4F	3500	10002	1796	7.26	28.39	869 608	2.37 1.70	3.56 2.55	0.13 0.09	0.48 0.34
	3F	3500	15553	2447	9.50	37.14	1361 952	3.69 2.65	5.53 3.98	0.15 0.11	0.56 0.39
	2F	3500	21103	2906	10.04	39.20	1844 1290	5.46 4.02	8.19 6.03	0.20 0.16	0.63 0.44
	1F	3500	26653	3139	5.88	22.96	2313 1617	10.65 8.69	15.98 13.03	0.70 0.56	0.74 0.52

I valori di taglio e deformazione risultano di molto inferiori, sia rispetto al telaio a base fissa che rispetto alla soluzione HDRB.

L'entità di spostamento allo SLV, malgrado porti gli isolatori LRB ad essere leggermente più rigidi e meno dissipativi rispetto allo SLC, è comunque tale da renderli molto più dissipativi dei dispositivi HDRB.

c) TELAIO CON LRB: DEFORMAZIONI E TAGLI

Sisma	Piano	h [mm]	P [kN]	NO ISOLAMENTO			ISOLAMENTO HDRB ISOLAMENTO LRB			CONFRONTO	
				V [kN]	d _r da analisi [mm]	d _r * = d _r ·q [mm]	V [kN]	d _r da analisi [mm]	d _r * = d _r ·q [mm]	$\frac{d_{r,ISOL.}^*}{d_{r,NO_ISOL.}^*}$	$\frac{V_{ISOL.}}{V_{NO_ISOL.}}$
Ey	Cop.	3500	4452	884	5.66	22.10	367 256	2.08 1.55	3.12 2.33	0.14 0.11	0.41 0.29
	4F	3500	10002	1639	8.53	33.31	858 598	3.55 2.59	5.33 3.89	0.16 0.12	0.52 0.37
	3F	3500	15553	2199	10.78	42.11	1340 934	5.34 3.89	8.01 5.84	0.19 0.14	0.61 0.43
	2F	3500	21103	2605	11.01	43.01	1812 1262	7.66 5.71	11.49 8.57	0.27 0.20	0.69 0.48
	1F	3500	26653	2824	6.14	23.97	2265 1577	12.36 9.86	18.54 14.79	0.77 0.62	0.80 0.56

I valori di taglio e deformazione risultano di molto inferiori, sia rispetto al telaio a base fissa che rispetto alla soluzione HDRB.

L'entità di spostamento allo SLV, malgrado porti gli isolatori LRB ad essere leggermente più rigidi e meno dissipativi rispetto allo SLC, è comunque tale da renderli molto più dissipativi dei dispositivi HDRB.

ESEMPI DI APPLICAZIONE

CONFRONTO TRA:

a) PROGETTO DI UN EDIFICIO A BASE FISSA, **CD "B"** – (TELAIO DI RIFERIMENTO)

b) Telaio di riferimento **isolato con dispositivi HDRB**

c) Telaio di riferimento **isolato con dispositivi LRB**

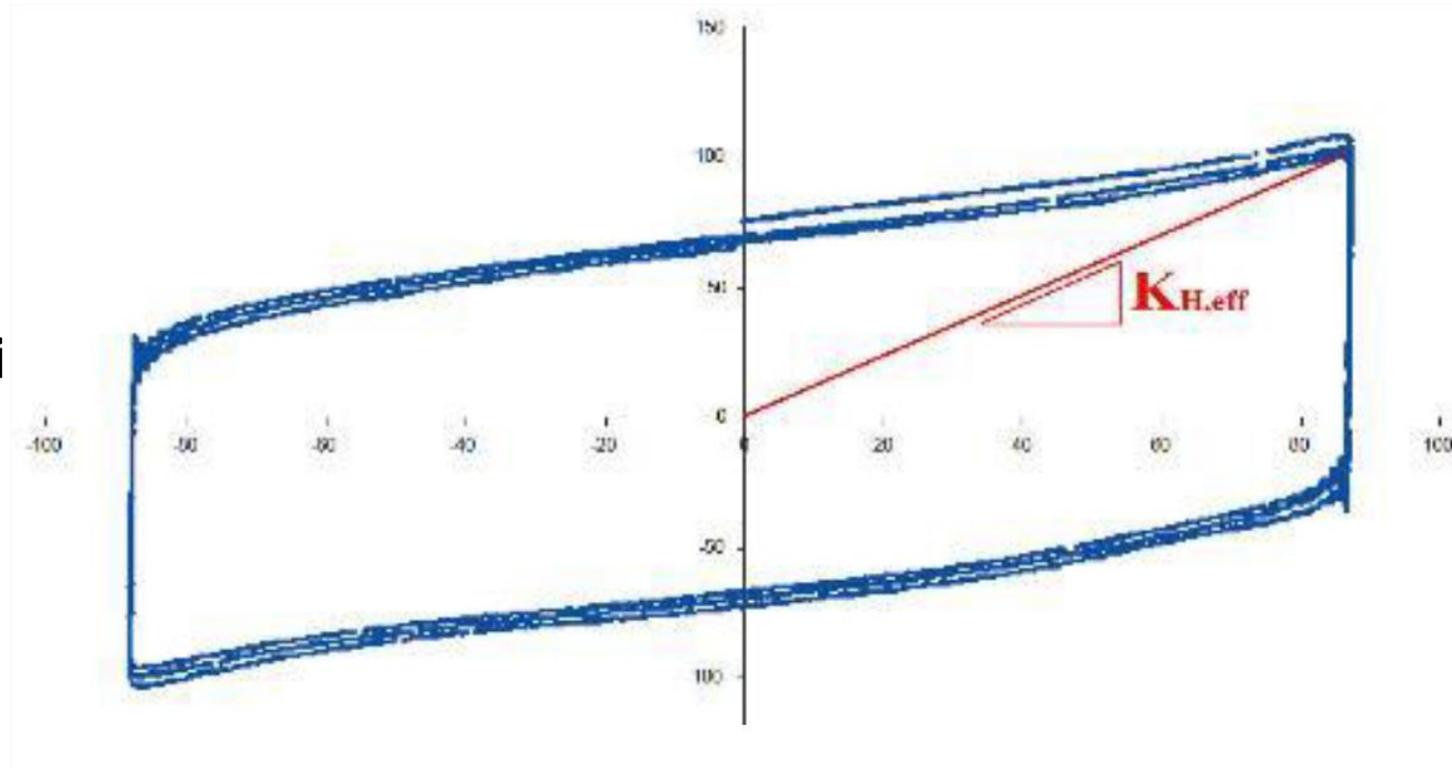
d) Telaio di riferimento isolato con dispositivi a **PENDOLO SCORREVOLE**

d) TELAIO CON FP

Legame isteretico sperimentale

Dissipazione di energia elevata, grazie all'attrito tra le superfici di scorrimento.

Come i dispositivi LRB possono fornire fino ξ (%) \approx **30%**



d) TELAIO CON FP

I dispositivi a pendolo scorrevole hanno un comportamento non lineare dovuto all'attrito tra le superfici di scorrimento.

- Rigidezza orizzontale $K_{H,i}$
- Periodo proprio T_{eff}
- smorzamento viscoso efficace ξ_{eff}

sono funzione dello spostamento da analisi raggiunto (d_{bd})

NB

La rigidezza di ogni isolatore è proporzionale al carico verticale (e quindi alla massa) d'influenza su di esso agente. Da questo deriva che:

IL CENTRO DELLE MASSE COINCIDERA' SEMPRE CON QUELLO DELLE RIGIDENZE

V è la forza orizzontale trasmessa dall'isolatore;

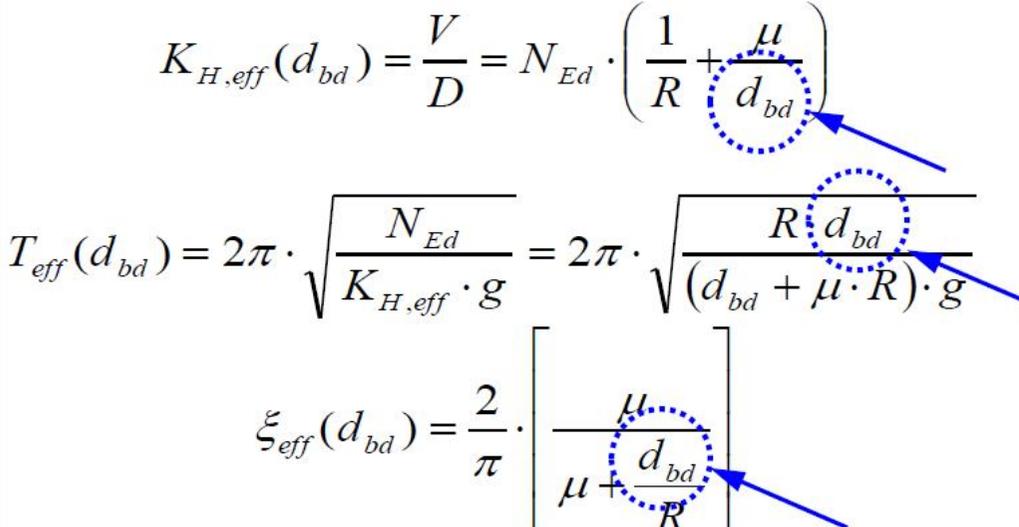
N_{Ed} è la forza verticale agente sull'isolatore in condizione sismica;

R è il raggio di curvatura della/e superfici di scorrimento;

μ è il coefficiente d'attrito dinamico, funzione dei materiali di scorrimento

$$K_{H,eff}(d_{bd}) = \frac{V}{D} = N_{Ed} \cdot \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{d_{bd}} \right)$$

$$T_{eff}(d_{bd}) = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{N_{Ed}}{K_{H,eff} \cdot g}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{R \cdot d_{bd}}{(d_{bd} + \mu \cdot R) \cdot g}}$$

$$\xi_{eff}(d_{bd}) = \frac{2}{\pi} \cdot \left[\frac{\mu}{\mu + \frac{d_{bd}}{R}} \right]$$


d) TELAIO CON FP

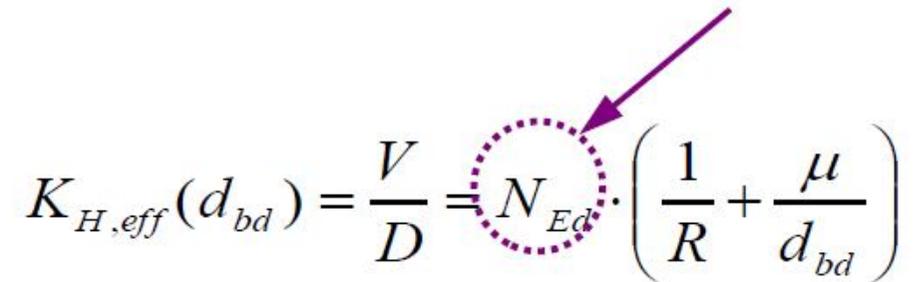
I dispositivi a pendolo scorrevole hanno un comportamento non lineare dovuto all'attrito tra le superfici di scorrimento.

Rigidezza orizzontale $K_{H,i}$, periodo proprio T_{eff} E smorzamento viscoso efficace ξ_{eff} sono funzione dello spostamento da analisi effettivamente raggiunto (d_{bd})

NB

la rigidezza di ogni isolatore è proporzionale al carico verticale (e quindi alla massa) d'influenza su di esso agente

IL CENTRO DELLE MASSE COINCIDERA' SEMPRE CON QUELLO DELLE RIGIDEZZE

$$K_{H,eff}(d_{bd}) = \frac{V}{D} = N_{Ed} \cdot \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{d_{bd}} \right)$$


$$T_{eff}(d_{bd}) = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{N_{Ed}}{K_{H,eff} \cdot g}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{R \cdot d_{bd}}{(d_{bd} + \mu \cdot R) \cdot g}}$$

$$\xi_{eff}(d_{bd}) = \frac{2}{\pi} \cdot \left[\frac{\mu}{\mu + \frac{d_{bd}}{R}} \right]$$

È necessario un percorso progettuale ITERATIVO

Si può fare comunque uso di una **modellazione lineare equivalente** purché valgano le **condizioni illustrate** per **HDRB** e **LRB** **59**

d) TELAIO CON FP

Sisma	Piano	h [mm]	P [kN]	NO ISOLAMENTO			HDRB LRB PENDOLO			CONFRONTO	
				V [kN]	d _r da analisi [mm]	dr* = dr·q [mm]	V [kN]	d _r da analisi [mm]	d _r * = d _r ·q [mm]	$\frac{d^*_{r,ISOL.}}{d^*_{r,NO_ISOL.}}$	$\frac{V_{ISOL.}}{V_{NO_ISOL.}}$
Ex	Cop.	3500	4452	931	4.50	17.61	372 260 329	1.28 0.93 1.11	1.92 1.40 1.66	0.11 0.08 0.09	0.40 0.27 0.36
	4F	3500	10002	1796	7.26	28.39	869 608 769	2.37 1.70 2.06	3.56 2.55 3.09	0.13 0.09 0.11	0.48 0.34 0.43
	3F	3500	15553	2447	9.50	37.14	1361 952 1203	3.69 2.65 3.43	5.53 3.98 5.15	0.15 0.11 0.14	0.56 0.39 0.49
	2F	3500	21103	2906	10.04	39.20	1844 1290 1630	5.46 4.02 6.18	8.19 6.03 9.27	0.20 0.16 0.23	0.63 0.44 0.56
	1F	3500	26653	3139	5.88	22.96	2313 1617 2043	10.65 8.69 15.07	15.98 13.03 22.61	0.70 0.56 0.98	0.74 0.52 0.65

La richiesta di spostamento interpiano allo SLV è intermedia rispetto a quella associata agli altri due sistemi, tranne che ai primi piani dove la rigidità rotazionale nulla del piede dei pilastri determina, per tagli comparabili, spostamenti maggiori.

d) TELAIO CON FP

Sisma	Piano	h [mm]	P [kN]	NO ISOLAMENTO			HDRB LRB PENDOLO			CONFRONTO	
				V [kN]	d _r da analisi [mm]	d _r * = d _r ·q [mm]	V [kN]	d _r da analisi [mm]	d _r * = d _r ·q [mm]	$\frac{d_{r,ISOL.}^*}{d_{r,NO_ISOL.}^*}$	$\frac{V_{ISOL.}}{V_{NO_ISOL.}}$
Ey	Cop.	3500	4452	884	5.66	22.10	367	2.08	3.12	0.14	0.41
							256	1.55	2.33	0.11	0.29
							325	1.80	2.70	0.12	0.37
	4F	3500	10002	1639	8.53	33.31	858	3.55	5.33	0.16	0.52
							598	2.59	3.89	0.12	0.37
							759	3.01	4.52	0.14	0.46
	3F	3500	15553	2199	10.78	42.11	1340	5.34	8.01	0.19	0.61
							934	3.89	5.82	0.14	0.43
							1186	4.77	7.16	0.17	0.54
	2F	3500	21103	2605	11.01	43.01	1812	7.66	11.49	0.27	0.69
1262							5.71	8.57	0.20	0.48	
						1601	8.08	12.12	0.28	0.62	
1F	3500	26653	26653	6.14	23.97	2265	12.36	18.54	0.77	0.80	
						1577	9.86	14.79	0.62	0.56	
						2001	17.04	25.56	1.07	0.70	

La richiesta di spostamento interpiano allo SLV è intermedia rispetto a quella associata agli altri due sistemi, tranne che ai primi piani dove la rigidità rotazionale nulla del piede dei pilastri determina, per tagli comparabili, spostamenti maggiori.