



Centre International des Sciences Mécaniques
International Centre for Mechanical Sciences

Advanced Professional Training

***METODI NUMERICI
NELL'INGEGNERIA SISMICA***

*Corso coordinato da
Ing. Stefano Secchi
(ISIB – CNR Padova)*

***Metodi numerici nell'Ingegneria Sismica:
Presentazione del codice di calcolo
SAP2000 - PERFORM3d***

Brunetta e Brunetta Engineering Srl – Vicolo Chiuso, 4 – Pordenone

leonardo@brunetta2.it - www.brunetta2.it - Tel. 043428465

Ing. Massimo Brunetta - Ing. Leonardo Bandini

Udine, 7 dicembre 2006

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

LA STORIA

I primi software per l'analisi di strutture con il metodo agli elementi finiti hanno fatto la loro comparsa sul finire degli anni cinquanta. In particolare in quegli anni si distingueva il gruppo dell'università di **Berkeley** specializzato nelle strutture di tipo civile e capeggiato dai professori **Wilson e Bathe**. Questo gruppo ha dato origine alla serie dei primi programmi SAP. In particolare: **Sap**, **Solid Sap**, **Sap 3**, **Sap IV**, e i vari sviluppi successivi.

Da notare che il nome *SAP*, acronimo di *Structural Analysis Program*, in inglese significa anche saccente o saputello: in altre parole idiota sapiente. Con il nome stesso del programma si voleva ricordare che, per quanto potente, si tratta solo di uno strumento e che in realtà quello che conta è l'intelligenza dell'utilizzatore.

Fino ai primi anni ottanta l'analisi agli elementi finiti è rimasta appannaggio delle università e di alcune grosse organizzazioni capaci di sostenere gli alti costi in termine di Computer Time, tipici dell'epoca.

A partire dal 1984, con la comparsa sul mercato dei primi Personal Computer l'utilizzo di programmi agli elementi finiti si è aperto anche agli studi professionali. Questo utilizzo nei primi tempi un po' timido, si è progressivamente diffuso in misura sempre più prepotente, tanto che oggi è quasi impensabile affrontare la progettazione di una struttura civile senza l'ausilio di un programma **FEM**.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

LA STORIA

Il primo programma di analisi agli elementi finiti per uso civile utilizzabile su PC è stato **SAP80**, di ormai mitica memoria. Si trattava di un programma completamente riscritto dal **prof. Edward Wilson** in modo da far rientrare nelle limitatissime risorse dei PC di allora quello che precedentemente era un software pensato per computer “*mainframe*”. Di concerto con il sempre crescente sviluppo dell'hardware, **SAP80** si è a sua volta evoluto nelle versioni **SAP90** ed oggi **SAP2000**.

Essendosi create le condizioni per l'utilizzo commerciale di questi programmi, è nata a questo scopo nei primi anni ottanta la **CSI (Computer and Structure Inc.)**, una azienda privata di Berkeley facente capo ai professori **Wilson** e **Habibullah**. A SAP si sono affiancati, sempre ad opera della CSI altri programmi **FEM** di tipo dedicato ad alcune tipologie strutturali specifiche. Tra essi il notissimo programma **ETABS**, specializzato nell'analisi e la progettazione di edifici. Ricordiamo, tra molti esempi, le **Petronia Towers**, in Malesia, e qui a **Milano**, il recente progetto della torre per la **Regione Lombardia**, ad opera dello studio **Thornton Tomasetti** di New York.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

ANALISI LINEARE

Per tutti gli anni 80 e 90 le analisi eseguite da questi programmi erano di tipo essenzialmente **lineare**: in altre parole le forze esterne e la risposta della struttura si mantenevano in proporzione costante.

Questo tipo di analisi affronta e risolve correttamente il comportamento delle strutture in fase di esercizio. E' adatta allo scopo e fino ad oggi ha perfettamente soddisfatto le esigenze professionali degli ingeneri. Le strutture progettate con questo metodo sono davanti ai nostri occhi e hanno dato e continuano a dare ottima prova di sé.

Il limite di questo tipo di analisi tuttavia è che il metodo permette, sì, di produrre strutture corrette, ma non consente di effettuare alcuna valutazione di merito su di esse. Questo limite è avvertibile soprattutto nel caso di progettazione antisismica.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

ANALISI LINEARE

Per rendere la cosa più comprensibile ai non addetti ai lavori ricordiamo i passi attraverso cui si estrinseca una progettazione di tipo tradizionale:

1. In prima battuta e sulla base delle esigenze d'uso, architettoniche e ambientali, viene definita la geometria del manufatto.
2. Applicando la normativa (i vari codici o norme di calcolo definiti per legge), vengono poi definite le forze esterne (azioni) cui il manufatto deve essere in grado di resistere.
3. Il progettista, servendosi di buon senso ed esperienza, esegue un predimensionamento della struttura.
4. La struttura, con quelle dimensioni e con quelle forze esterne, viene modellata e sottoposta ad analisi con un programma FEM. Il risultato consiste in un dettagliato elenco delle forze interne (sollecitazioni) che interessano i vari elementi strutturali.
5. Queste sollecitazioni vengono a loro volta confrontate con la resistenza attribuita a ciascun elemento sulla base di varie disposizioni normative. Se il confronto (verifica) è positivo la progettazione è conclusa.
6. Nel caso alcuni elementi non soddisfino alla verifica di cui al punto 5, essi vengono rinforzati e la procedura riprende dal punto 4.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

ANALISI LINEARE

E' chiaro che un procedimento come quello appena descritto produce sicuramente una struttura adeguata, ma non necessariamente "la migliore possibile". La maggiore o minore bontà della stessa dipende unicamente dal buonsenso esercitato dal progettista in fase di predimensionamento (punto 3). Non dipende in alcun modo dagli strumenti stessi messi a disposizione dal software.

ANALISI NON LINEARE

Analisi non lineare significa spingere l'analisi della struttura in una fase nella quale la risposta non è più proporzionale alla sollecitazione. In pratica in una fase in cui la struttura è ormai danneggiata. Si tratta di una analisi estremamente complessa e onerosa dal punto di vista del calcolo e della comprensione dei risultati.

D'altra parte, soprattutto durante l'azione sismica, le strutture si trovano effettivamente a comportarsi in modo non lineare.

Anche se queste metodologie sono note già da tempo, è solo da pochissimi anni che l'evoluzione del software e capacità dei computer ne hanno reso possibile l'utilizzo professionale.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

PERFORMANCE ASSESSMENT

Grazie all'analisi non lineare il software per l'ingegneria strutturale è ora finalmente in grado di fornire all'ingegnere dei parametri di valutazione sull'effettiva qualità di una soluzione strutturale.

Performance assessment, appunto.

Per comportamento strutturale si intende qui essenzialmente il comportamento in una fase successiva al danneggiamento iniziale della struttura, e da qui fino al momento del collasso vero e proprio.

Se è vero che con l'analisi lineare era possibile garantire che tutte le strutture arrivassero a sopportare senza danni un certo livello di forze esterne, ora, con l'analisi non lineare, è possibile andare oltre e vedere che cosa succede a quelle medesime strutture quando quel livello di forze viene superato.

Si viene così a scoprire che alcune di queste strutture si comportano meglio di altre e resistono più a lungo prima di raggiungere il collasso. In altre parole è possibile valutare qualitativamente il loro comportamento.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

PERFORMANCE ASSESSMENT

Nel passato la progettazione consisteva essenzialmente nel calcolare le sollecitazioni di una struttura e nel verificare che esse non superassero i limiti stabiliti dalle norme. A questo scopo ci si serviva essenzialmente di una analisi di tipo lineare statico o dinamico. Gli effettivi spostamenti di una struttura sottoposta ad un evento sismico e quindi in realtà in campo non lineare, venivano solo dedotti in modo empirico.

Oggi ci si occupa non più solamente di sollecitazioni, ma anche delle effettive deformazioni e degli spostamenti laterali sostenuti da una struttura nel corso di un evento non lineare.

Per una valutazione dei risultati si stanno diffondendo i concetti di domanda, capacità e del loro rapporto: *Demand Capacity Ratio*. La domanda è costituita dalle sollecitazioni, dalle deformazioni e dagli spostamenti laterali di una struttura sottoposta ad azione sismica definita da normativa.

La capacità è costituita dalla adeguatezza della struttura a sopportare dette forze e deformazioni ed anch'essa deve essere definita dalla normativa.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

PERFORMANCE ASSESSMENT

Le attuali normative ci forniscono parametri precisi per quanto riguarda la valutazione della capacità di resistere alle forze: non si tratta di altro che della resistenza al limite ultimo di una sezione od altro elemento strutturale. Ci forniscono anche la capacità e cioè i limiti che non devono essere superati dagli spostamenti laterali. Poco ci dicono sulla capacità delle strutture a resistere alle deformazioni. In questo senso molto spazio è lasciato a future ricerche e evoluzioni. Questo almeno per quanto riguarda l'Italia.

Fortunatamente esistono estesi studi americani e precisamente i codici **FEMA** e **ATC** che permettono di definire in modo abbastanza preciso le capacità di deformazione di elementi strutturali sia in acciaio che in cemento armato. E' auspicabile che, quanto prima, le linee guida di questi codici vengano assimilate anche nei paesi europei.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

PERFORM 3D

La CSI è entrata nel campo della non linearità già dalla fine degli anni 90 con il metodo FNA (*Fast Nonlinear Analysis*) sviluppato da Wilson in modo estremamente innovativo e capace di consentire queste analisi complesse anche su PC.

In seguito si è passati all'analisi non lineare statica (*pushover*) e alla vera e propria analisi non lineare dinamica per integrazione diretta. Tutti questi metodi sono stati via via implementati sia nel programma **SAP2000** che in **ETABS**.

Da ultimo, e parliamo di pochi mesi fa, grazie all'associazione con **Graham Powell**, professore emerito dell'Università di Berkeley, è nato il programma **PERFORM 3D**. Si tratta di un programma espressamente dedicato alle nuove tecnologie e cioè al performance assessment di strutture civili nel campo dell'analisi statica e dinamica non lineare e sicuramente rappresenta la punta più avanzata della ricerca in questo settore. Nel corso dei prossimi mesi questo programma, oggi autonomo, verrà perfettamente integrato all'interno programmi SAP e ETABS di cui costituisce il naturale complemento evolutivo.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

PERFORM 3D

PERFORM 3D è dotato dei più sofisticati strumenti di modellazione strutturale non lineare in acciaio e c.a. per travi, pilastri e setti utilizzando sia i metodi FEMA e ATC che i più generali modelli a fibre. Include inoltre isolatori sismici dei tipi più svariati.

Fornisce metodi efficaci per valutare il comportamento (*performance*) della struttura sulla base del rapporto domanda/capacità di un gran numero di stati limite definiti in modo semplice e compatto direttamente dall'utente.

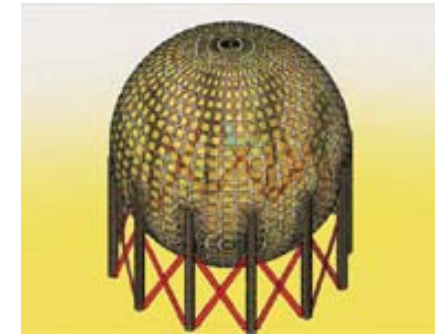
INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

CSI COMPUTERS & STRUCTURES, INC.



INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

ESEMPIO DI MODELLAZIONE:

F. M. MAZZOLANI AND V. PILUSO

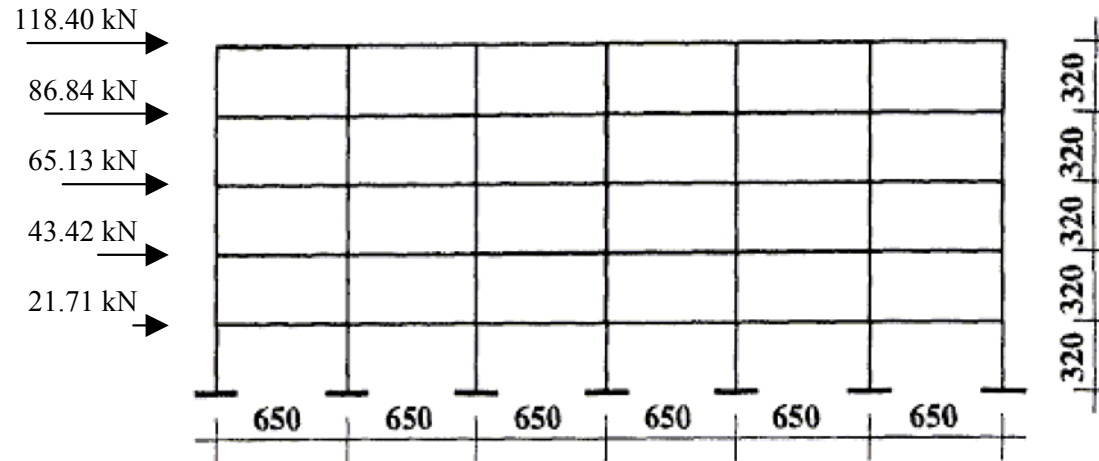


Figure 7. Structural scheme of the example frame (dimension in cm)

F. M. MAZZOLANI AND V. PILUSO

Table VIII. Design values of the column plastic moduli and corresponding sections chosen from standard HEB shapes

Storey	Internal columns		External columns	
	Z_{min} (cm ³)	Section	Z_{min} (cm ³)	Section
1	2682	HEB360	2702	HEB400
2	2182	HEB340	2182	HEB340
3	2142	HEB320	2142	HEB320
4	2062	HEB320	2062	HEB320
5	1362	HEB280	1362	HEB280

Carichi presenti nella struttura:

Gk: 15 kNm

Qk: 10 kNm

Oltre al peso proprio

Assemblaggio delle masse secondo destinazione d'uso abitazioni.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

SPETTRO: EC8 – 0.35g - A

$$0 \leq T \leq T_B: \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot \beta_0 - 1) \right] \quad [4.1] \quad \eta = \sqrt{T / (2 + \zeta)} \geq 0,7$$

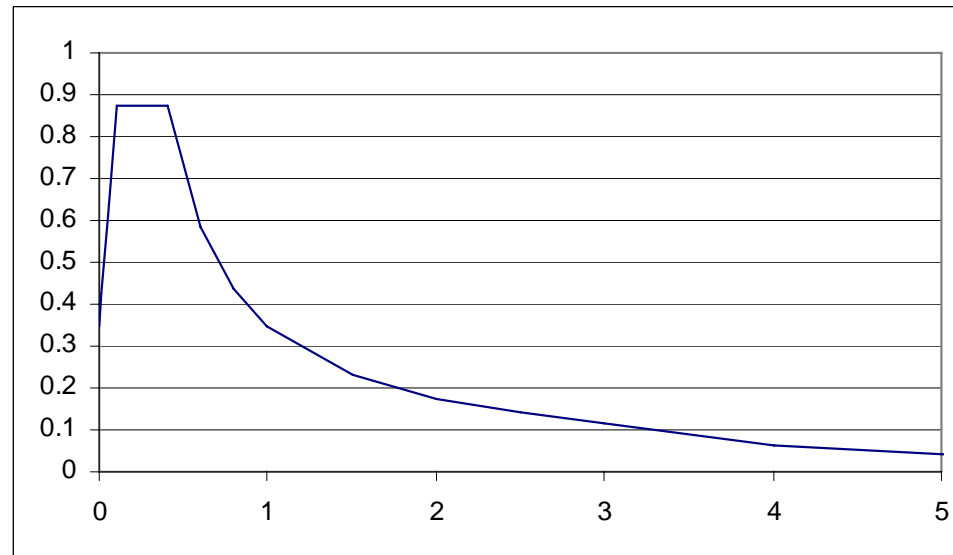
$$T_B \leq T \leq T_C: \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_0 \quad [4.2]$$

$$T_C \leq T \leq T_D: \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_0 \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right]^{k_1} \quad [4.3]$$

$$T_D \leq T: \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_0 \cdot \left[\frac{T_C}{T_D} \right]^{k_1} \cdot \left[\frac{T_D}{T} \right]^{k_2} \quad [4.4]$$

Classe sottosuolo	S	β_0	k_1	k_2	T_B [s]	T_C [s]	T_D [s]
A	1,0	2,5	1,0	2,0	0,10	0,40	3,0
B	1,0	2,5	1,0	2,0	0,15	0,60	3,0
C	0,9	2,5	1,0	2,0	0,20	0,80	3,0

* Questi valori sono stati definiti in modo che le ordinate dello spettro di risposta elastico avessero una uniforme probabilità di essere maggiorati, ad ogni periodo, pari al 50% (rischio uniforme dello spettro).



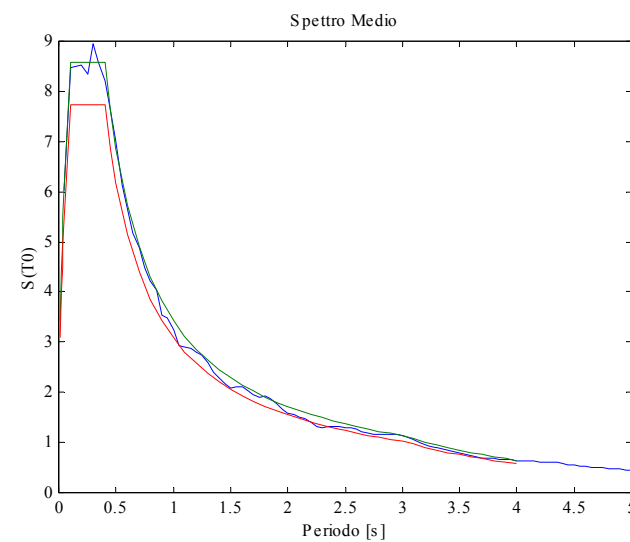
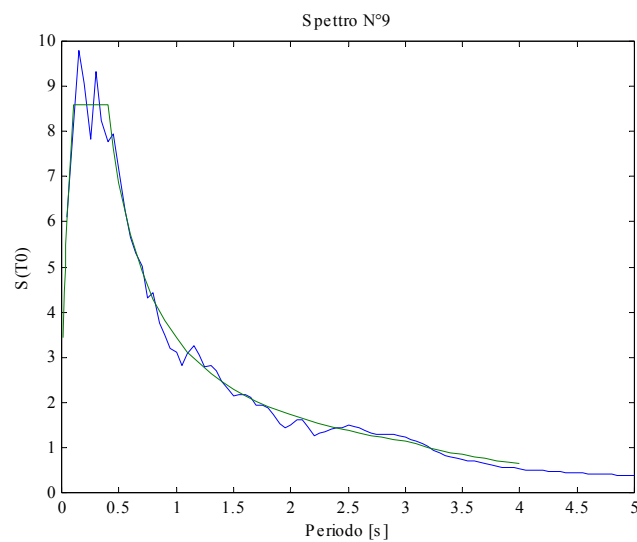
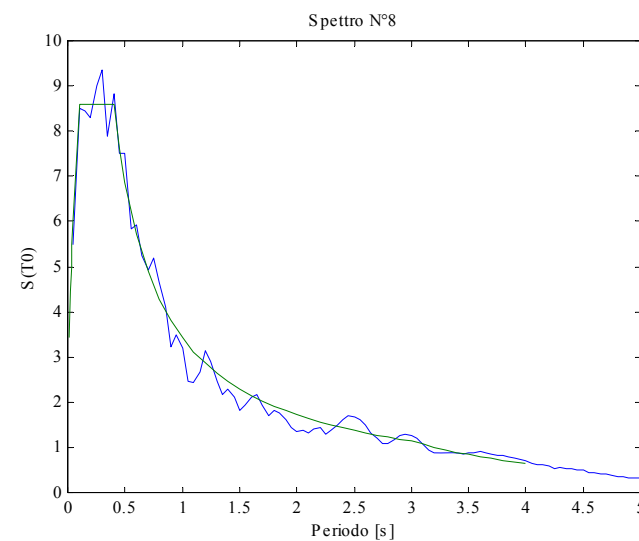
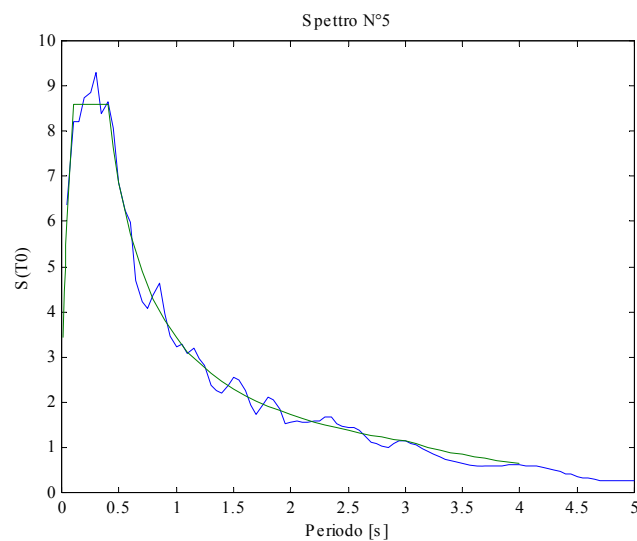
INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

ACC. SPETTRO COMPATIBILI: EC8 – 0.35g - A



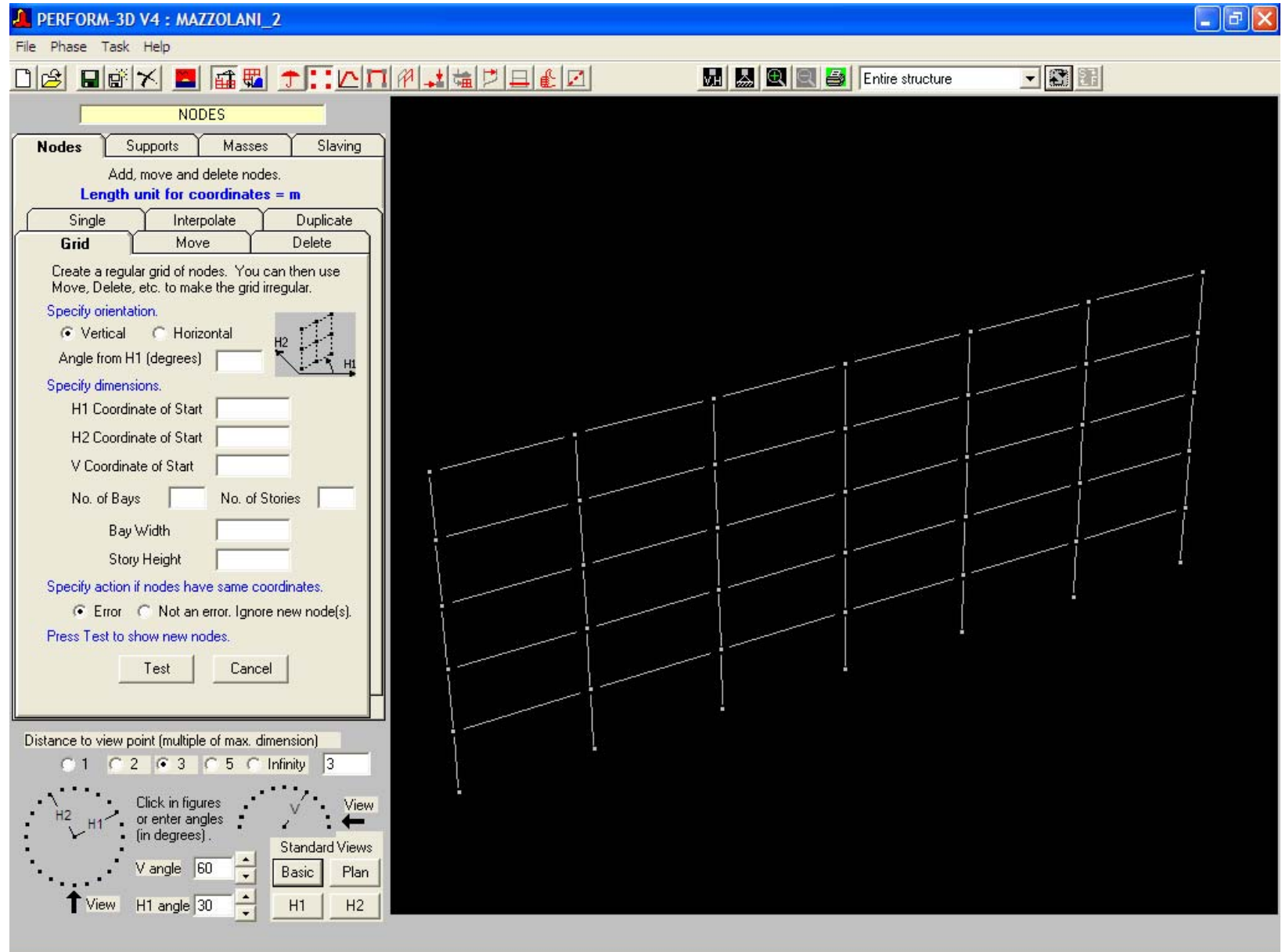
Raffronto tra gli spettro acc. generati e spettro di partenza

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE



Definizione della geometria: griglia, nodi, vincoli interni ed esterni, masse.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

COMPONENT PROPERTIES

Materials | Strength Sects | Compound

Inelastic | Elastic | Cross Sects.

Type: FEMA Beam, Steel Type

Name: TRAVI

Length Unit: m | Force Unit: kN

Status: Saved.

Graph | Save | Save As | Delete

Shape of Relationship: E-P-P | Trilinear

Use Cross Section: Yes | No

Symmetry: Yes | No

Deformation Capacities: Yes | No

Strength Loss: Yes | No

Cyclic Degradation: None | YULRX | YX+3

Upper/Lower Bounds: Yes | No

Section and Dimensions | Deformation Capacities | Cyclic Degradation | Upper/Lower Bounds

Elastic Stiffness | Basic F-D Relationship | Strength Loss

Cross Section

Type: Beam, Standard Steel Section

Name: TRAVI

Component strength, as a multiple of section strength: 1

Section Dimensions

B	0.16	D	0.33
TF	0.0115	TW	0.0075

File Name: EUROPEAN W. H. IP

Section ID: IPE330

Items in green are obtained from the Cross Section properties.

Graph: Specify deformations as multiples of DY. Y-axis: F (FR, FU). X-axis: D (DY, DL, DR, DX). Equation: $K_0 = 6EI/L$.

Definizione delle cerniere plastiche: Cerniere a Curvatura.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

The screenshot displays the PERFORM-3D V4 software interface for defining component properties. The window title is "PERFORM-3D V4 : MAZZOLANI_2". The main panel is titled "COMPONENT PROPERTIES" and is divided into several sections:

- Materials:** Includes tabs for "Inelastic", "Elastic", and "Compound". The "Inelastic" section is active, showing "Type" as "FEMA Beam, Steel Type" and "Name" as "TRAVI".
- Strength Sects:** Includes "Elastic" and "Cross Sects." tabs.
- Shape of Relationship:** Options include "E-P-P" (selected) and "Trilinear".
- Symmetry:** Option is "Yes" (selected).
- Strength Loss:** Option is "Yes" (selected).
- Upper/Lower Bounds:** Option is "No" (selected).
- Cyclic Degradation:** Options include "None", "YULRX", and "YX+3" (selected).
- Deformation Capacities:** A table for defining capacity values is shown below.

The graph on the right shows a typical plastic hinge model with a yield plateau. The x-axis represents displacement (ranging from -1.50E+01 to 1.50E+01) and the y-axis represents load. The graph shows a yield plateau at a positive displacement of approximately 2 units, followed by a strain-hardening region, and then a post-peak region with a negative slope. Vertical red lines indicate the levels of the capacity values defined in the table below.

Capacity values = D / DY		
Level	Pos. Capacity	Neg. Capacity
1	2	
2	7	
3	12	
4		
5		

Definizione delle cerniere plastiche: Cerniere a Curvatura.

TABLE: Element Forces - Frames

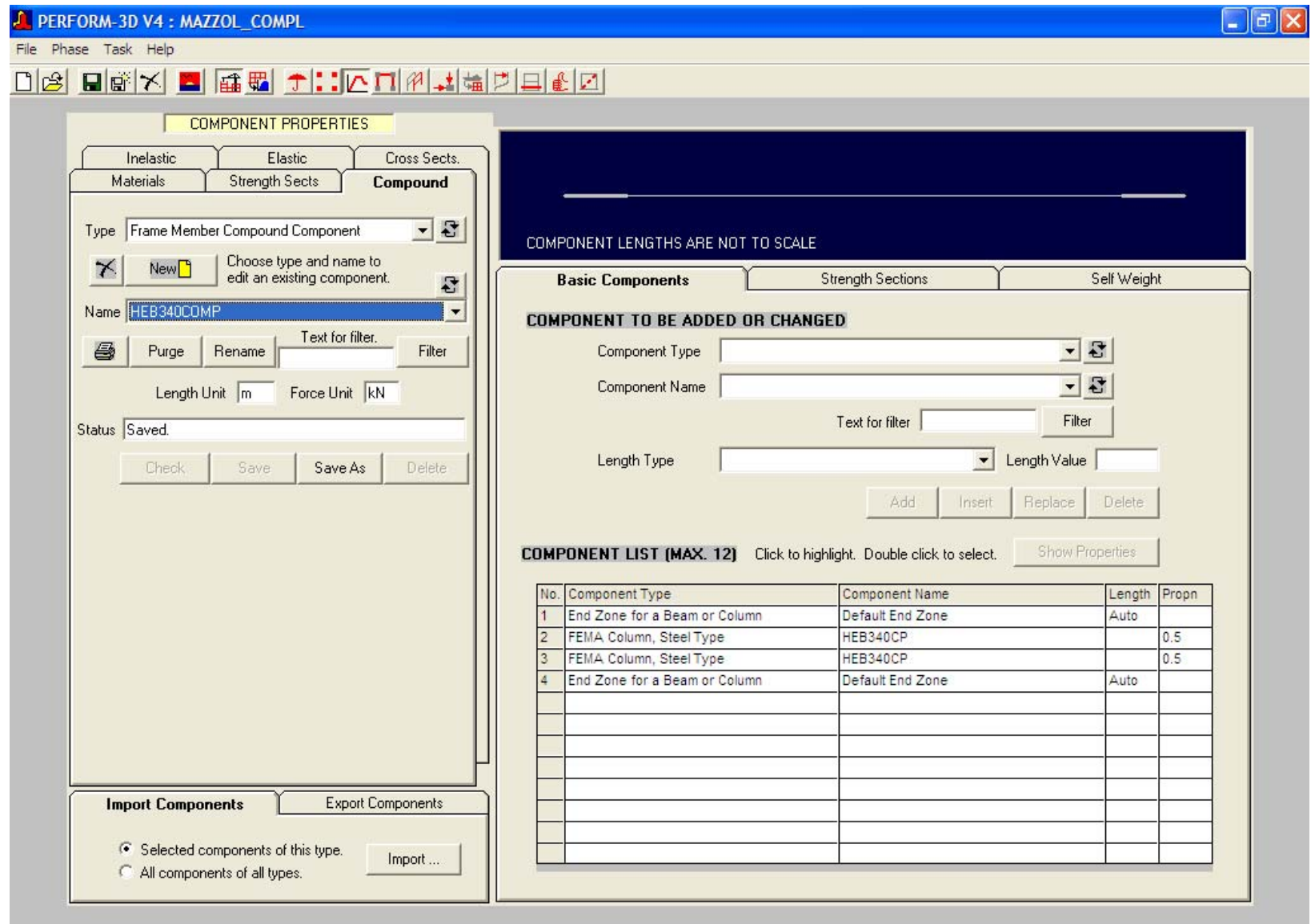
Frame	P	DesignSect	d*	A	Fy	I	Wpl	ρ	R	Mrd	θy	θu
Text	KN	Text	mm	mm2	N/mm2	mm4	mm3			KNm	rad	rad
1	-614.74	HE400-B	376	19800	275	5.77E+08	3232000	0.11	10.3	773	5.11E-03	5.26E-02
2	-489.773	HE340-B	318.5	17100	275	3.67E+08	2408000	0.10	10.4	584	6.07E-03	6.33E-02
3	-365.721	HE320-B	299.5	16100	275	3.08E+08	2149000	0.08	10.7	536	6.63E-03	7.12E-02
4	-241.658	HE320-B	299.5	16100	275	3.08E+08	2149000	0.05	11.2	555	6.86E-03	7.67E-02
5	-117.809	HE280-B	262	13100	275	1.93E+08	1534000	0.03	11.6	406	8.03E-03	9.29E-02
6	-1228.879	HE360-B	337.5	18100	275	4.32E+08	2683000	0.25	10.0	530	4.68E-03	4.67E-02
7	-983.155	HE340-B	318.5	17100	275	3.67E+08	2408000	0.21	9.5	506	5.25E-03	4.97E-02
8	-737.867	HE320-B	299.5	16100	275	3.08E+08	2149000	0.17	9.7	480	5.94E-03	5.77E-02
9	-493.209	HE320-B	299.5	16100	275	3.08E+08	2149000	0.11	10.3	517	6.39E-03	6.60E-02
10	-248.746	HE280-B	262	13100	275	1.93E+08	1534000	0.07	10.9	389	7.70E-03	8.43E-02
11	-1219.804	HE360-B	337.5	18100	275	4.32E+08	2683000	0.25	9.9	532	4.69E-03	4.67E-02
12	-975.215	HE340-B	318.5	17100	275	3.67E+08	2408000	0.21	9.5	507	5.27E-03	4.99E-02
13	-730.908	HE320-B	299.5	16100	275	3.08E+08	2149000	0.17	9.7	482	5.95E-03	5.79E-02
14	-486.998	HE320-B	299.5	16100	275	3.08E+08	2149000	0.11	10.3	518	6.40E-03	6.62E-02
15	-242.766	HE280-B	262	13100	275	1.93E+08	1534000	0.07	11.0	390	7.71E-03	8.46E-02
16	-1220.186	HE360-B	337.5	18100	275	4.32E+08	2683000	0.25	9.9	532	4.69E-03	4.67E-02
17	-975.577	HE340-B	318.5	17100	275	3.67E+08	2408000	0.21	9.5	507	5.27E-03	4.99E-02
18	-731.283	HE320-B	299.5	16100	275	3.08E+08	2149000	0.17	9.7	481	5.95E-03	5.79E-02
19	-487.372	HE320-B	299.5	16100	275	3.08E+08	2149000	0.11	10.3	518	6.40E-03	6.62E-02
20	-243.29	HE280-B	262	13100	275	1.93E+08	1534000	0.07	11.0	390	7.71E-03	8.46E-02
21	-1219.804	HE360-B	337.5	18100	275	4.32E+08	2683000	0.25	9.9	532	4.69E-03	4.67E-02
22	-975.215	HE340-B	318.5	17100	275	3.67E+08	2408000	0.21	9.5	507	5.27E-03	4.99E-02
23	-730.908	HE320-B	299.5	16100	275	3.08E+08	2149000	0.17	9.7	482	5.95E-03	5.79E-02
24	-486.998	HE320-B	299.5	16100	275	3.08E+08	2149000	0.11	10.3	518	6.40E-03	6.62E-02
25	-242.766	HE280-B	262	13100	275	1.93E+08	1534000	0.07	11.0	390	7.71E-03	8.46E-02
26	-1228.879	HE360-B	337.5	18100	275	4.32E+08	2683000	0.25	10.0	530	4.68E-03	4.67E-02
27	-983.155	HE340-B	318.5	17100	275	3.67E+08	2408000	0.21	9.5	506	5.25E-03	4.97E-02
28	-737.867	HE320-B	299.5	16100	275	3.08E+08	2149000	0.17	9.7	480	5.94E-03	5.77E-02
29	-493.209	HE320-B	299.5	16100	275	3.08E+08	2149000	0.11	10.3	517	6.39E-03	6.60E-02
30	-248.746	HE280-B	262	13100	275	1.93E+08	1534000	0.07	10.9	389	7.70E-03	8.43E-02
31	-614.74	HE400-B	376	19800	275	5.77E+08	3232000	0.11	10.3	773	5.11E-03	5.26E-02
32	-489.773	HE340-B	318.5	17100	275	3.67E+08	2408000	0.10	10.4	584	6.07E-03	6.33E-02
33	-365.721	HE320-B	299.5	16100	275	3.08E+08	2149000	0.08	10.7	536	6.63E-03	7.12E-02
34	-241.658	HE320-B	299.5	16100	275	3.08E+08	2149000	0.05	11.2	555	6.86E-03	7.67E-02
35	-117.809	HE280-B	262	13100	275	1.93E+08	1534000	0.03	11.6	406	8.03E-03	9.29E-02
36	7.915	IPE330	318.5	6260	275	1.18E+08	804000	0.00	12.3	222	5.85E-03	7.17E-02
37	0.441	IPE330	318.5	6260	275	1.18E+08	804000	0.00	12.2	221	5.82E-03	7.08E-02
38	1.933	IPE330	318.5	6260	275	1.18E+08	804000	0.00	12.2	221	5.82E-03	7.10E-02

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE



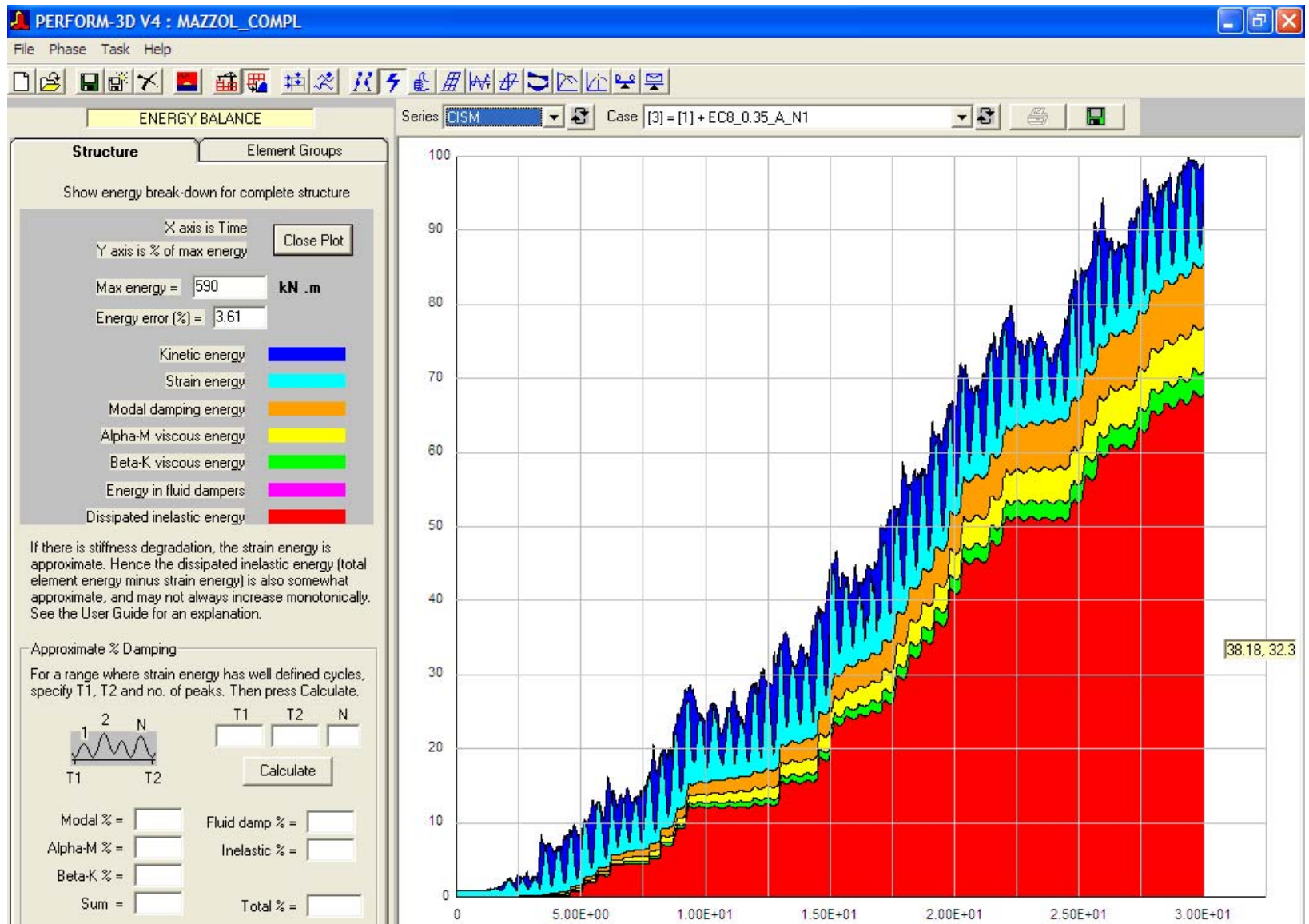
Definizione del compound: elemento di tipo FEMA.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE



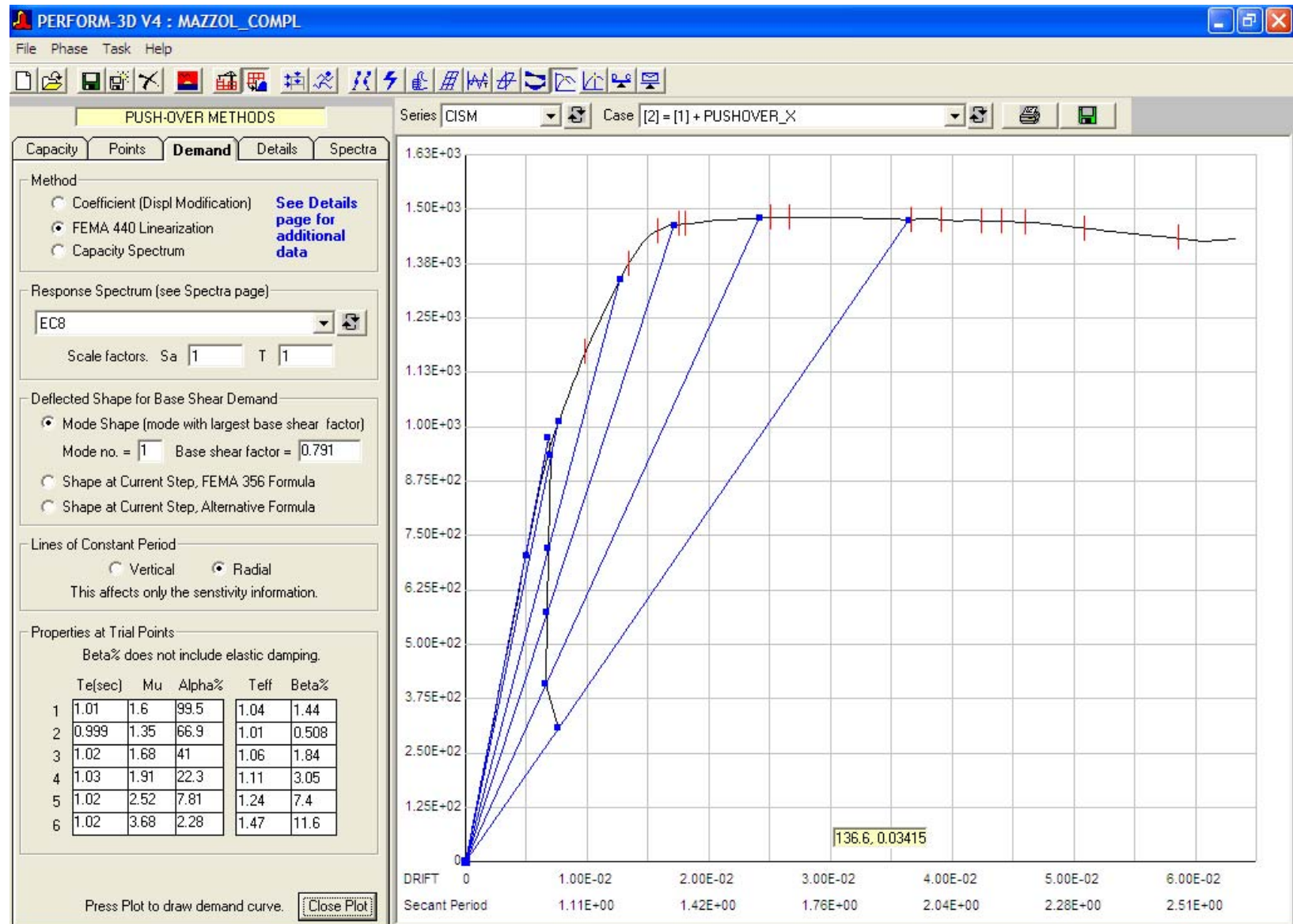
Bilancio energetico.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE



Ricerca del Target Displacement con il metodo della linearizzazione secondo FEMA440

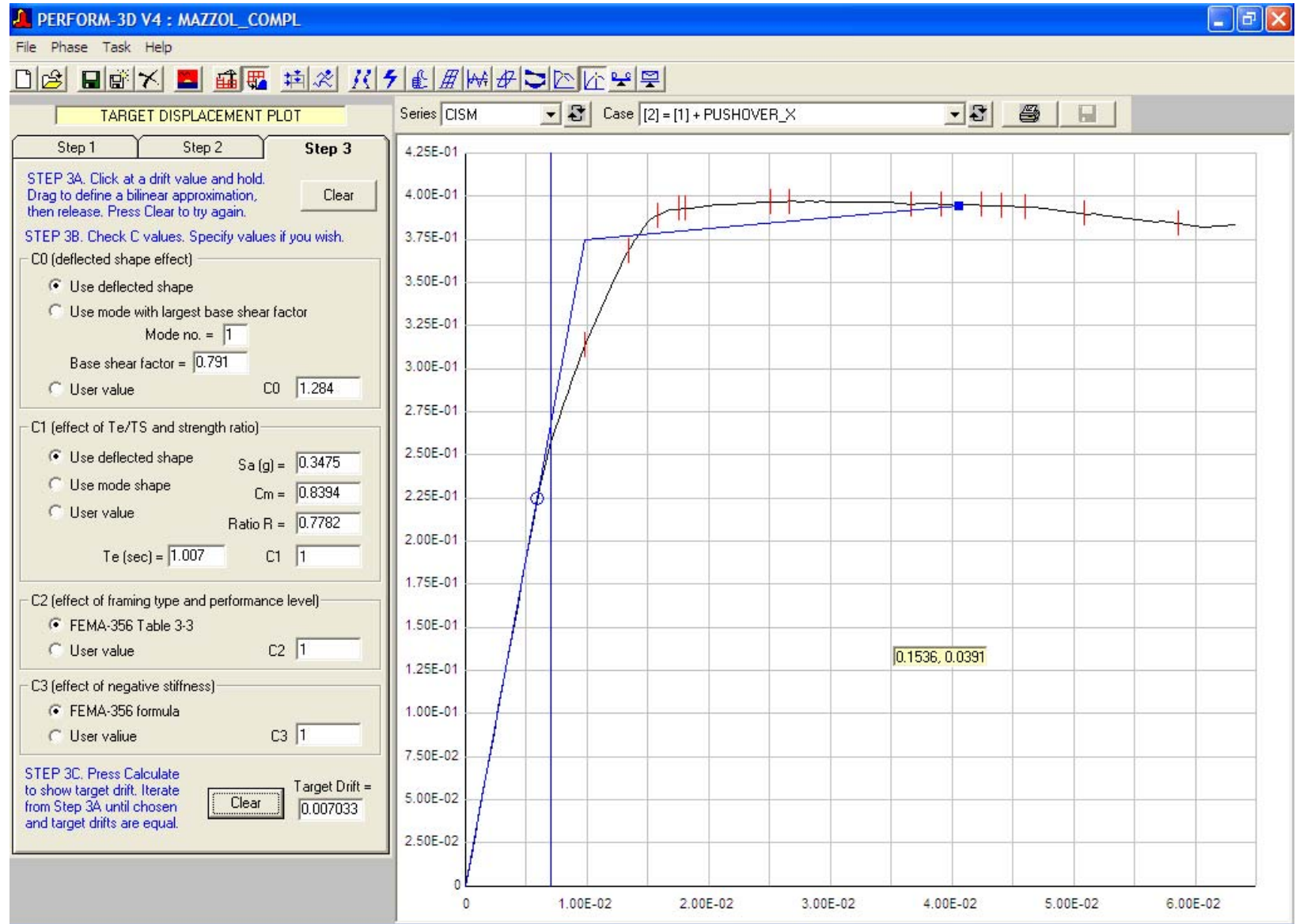
$$d = 0.07 \times 1600 = 11.2 \text{ cm.}$$

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE



Ricerca del Target Displacement con il metodo dell'oscillatore elastoplastico elementare. Procedura equivalente a quella presente nella OPCM3274.
 $d = 0.07 \times 1600 = 11.2 \text{ cm}$.

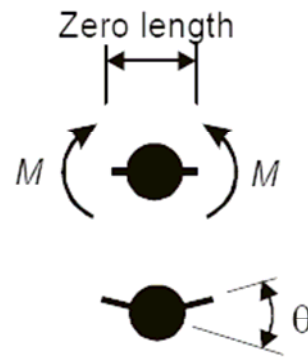
INTRODUZIONE

ESEMPIO

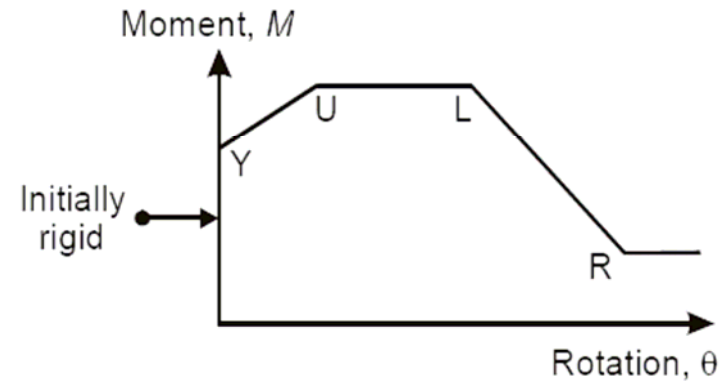
PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

CERNIERA A ROTAZIONE

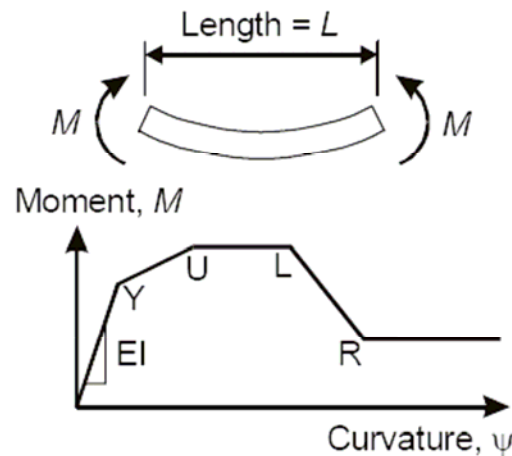


(a) Action and Deformation

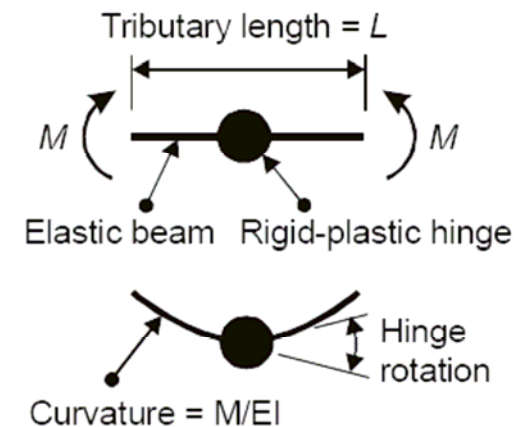


(b) Action-Deformation Relationship

CERNIERA A CURVATURA



(a) Actual Beam



(b) Hinge Equivalent

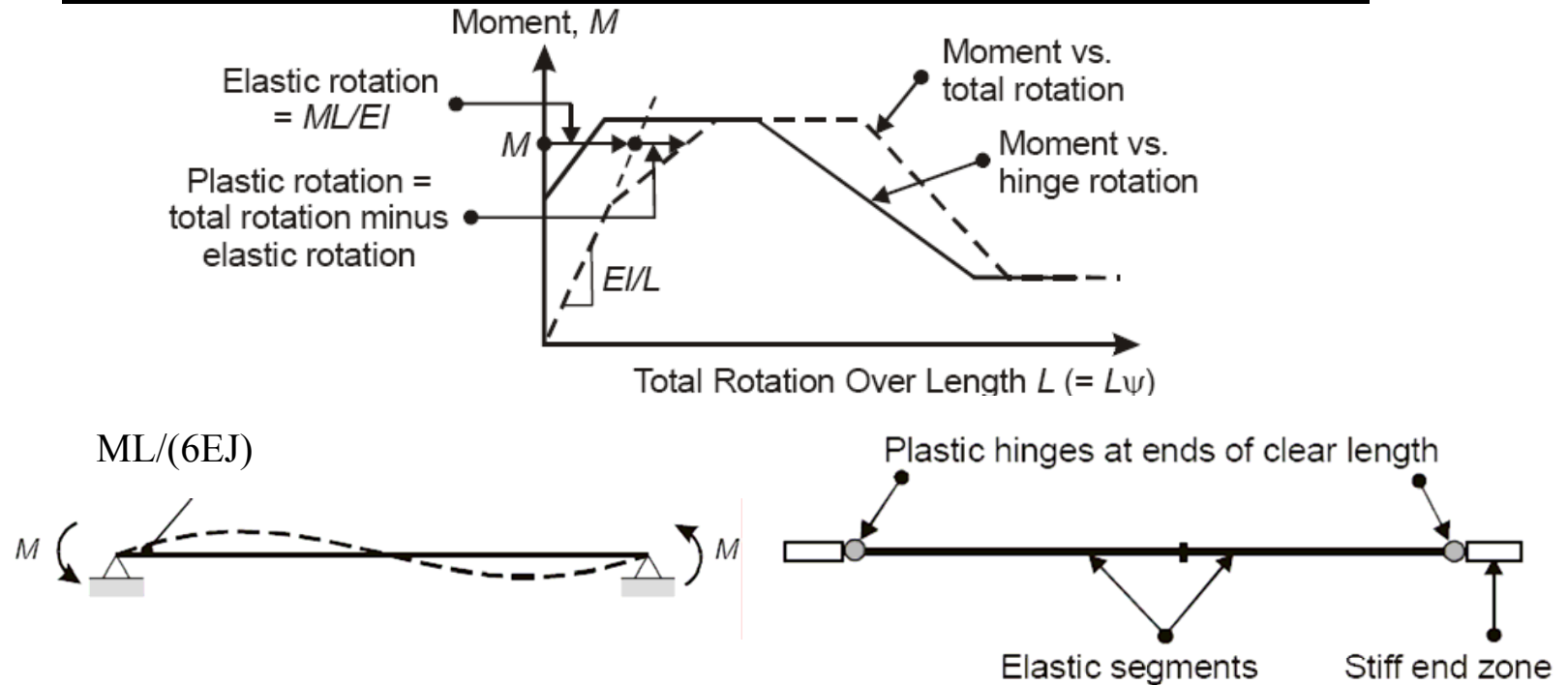
Il vantaggio della cerniera a curvatura è che le caratteristiche della cerniera sono indipendenti dalla lunghezza tributaria.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

RELAZIONE TRA CERNIERA A ROTAZIONE E A CURVATURA**Implementazione in Perform3d di una "FEMA Steel Beam"**

1. La componente EJ del tratto elastico sono gli stessi del valore specificato per il componente FEMA,
2. La cerniera all'estremità è una cerniera a curvatura,
3. Il valore della rigidezza iniziale della legge Momento-Curvatura è lo stesso del componente FEMA,
4. La lunghezza tributaria della cerniera è $1/3$ della lunghezza del componente FEMA ($1/6$ della lunghezza complessiva di un elemento simmetrico).

INTRODUZIONE

ESEMPIO

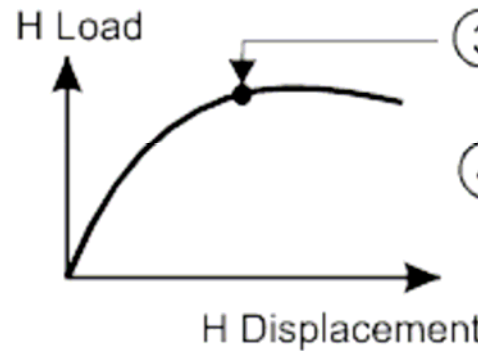
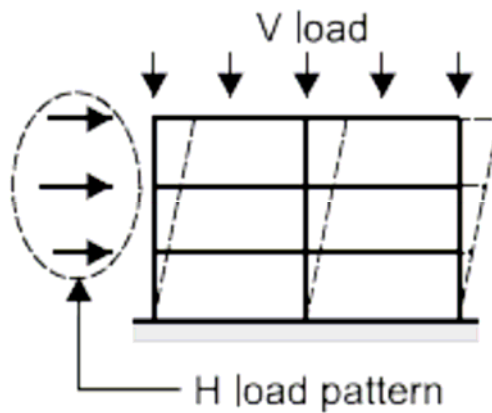
PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

PUSHOVER:

① Choose loads,

② Apply V load, Then add H load and calculate push-over curve,



③ Using a response spectrum calculate displacement demand,

④ At this displacement, assess performance of the structure.

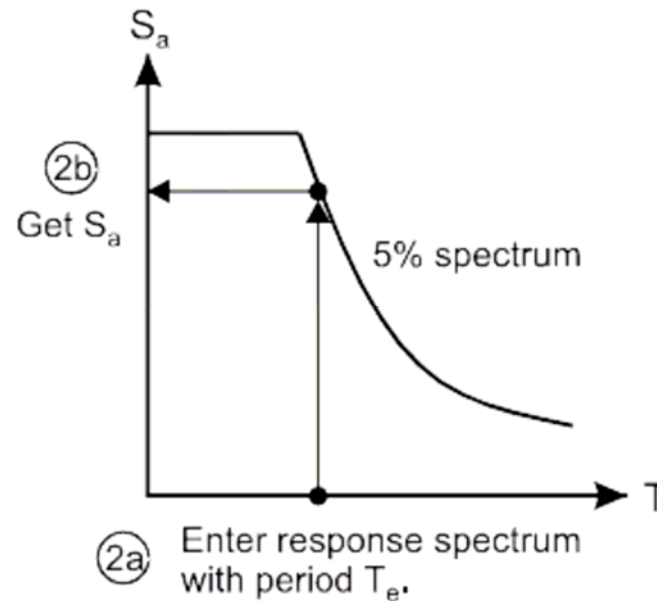
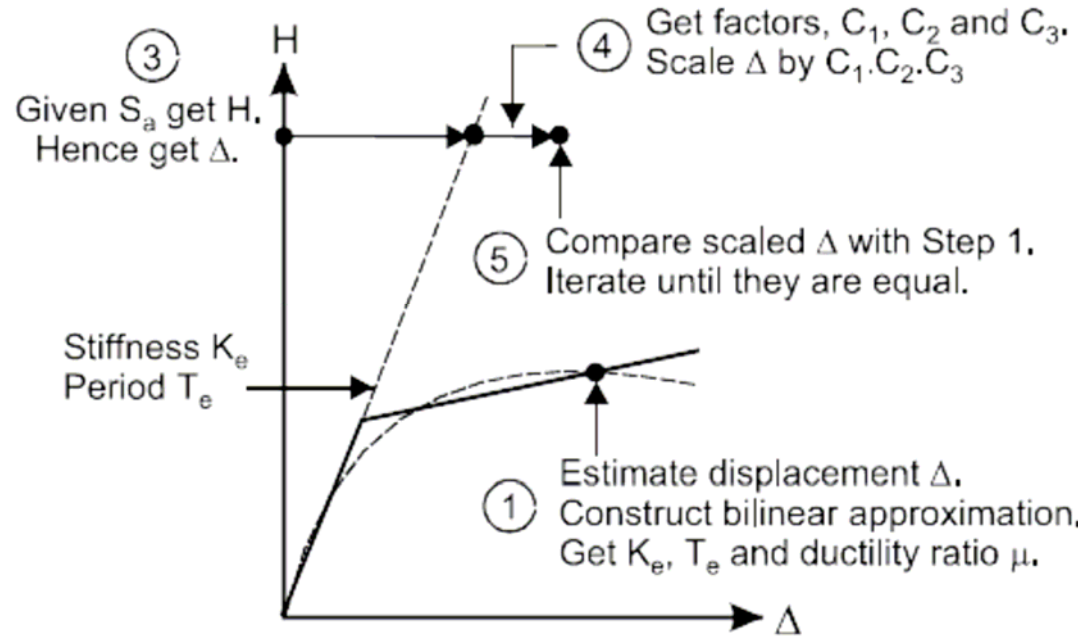
INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

FEMA356-FEMA440 Coefficient Methods



$$\delta_r = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g$$

3.3.3.3.2 Target Displacement

The target displacement, δ_T , at each floor level shall be calculated in accordance with Equation (3-15) and as specified in Section 3.3.3.3.1.

$$\delta_T = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (3-15)$$

where:

C_0 = Modification factor to relate spectral displacement of an equivalent SDOF system to the roof displacement of the building MDOF system calculated using one of the following procedures:

- The first modal participation factor at the level of the control node;
- The modal participation factor at the level of the control node calculated using a shape vector corresponding to the deflected shape of the building at the target displacement. This procedure shall be used if the adaptive load pattern defined in paragraph 2.2 of Section 3.3.3.2.3 is used; or
- The appropriate value from Table 3-2.

C_1 = Modification factor to relate expected maximum inelastic displacements to displacements calculated for linear elastic response:

$$= 1.0 \text{ for } T_e \geq T_S$$

$$= [1.0 + (R - 1)T_S/T_e]/R \text{ for } T_e < T_S$$

but not greater than the values given in Section 3.3.1.3 nor less than 1.0.

T_e = Effective fundamental period of the building in the direction under consideration, sec.

T_S = Characteristic period of the response spectrum, defined as the period associated with the transition from the constant acceleration segment of the spectrum to the constant velocity segment of the spectrum per Sections 1.6.1.5 and 1.6.2.1.

R = Ratio of elastic strength demand to calculated yield strength coefficient calculated by Equation (3-16).

C_2 = Modification factor to represent the effect of pinched hysteretic shape, stiffness degradation and strength deterioration on maximum displacement response. Values of C_2 for different framing systems and Structural Performance Levels shall be obtained from Table 3-3. Alternatively, use of $C_2 = 1.0$ shall be permitted for nonlinear procedures.

C_3 = Modification factor to represent increased displacements due to dynamic P- Δ effects. For buildings with positive post-yield stiffness, C_3 shall be set equal to 1.0. For buildings with negative post-yield stiffness, values of C_3 shall be calculated using Equation (3-17) but not to exceed the values set forth in Section 3.3.1.3.

S_a = Response spectrum acceleration, at the effective fundamental period and damping ratio of the building in the direction under consideration, g , as calculated in Sections 1.6.1.5 and 1.6.2.1.

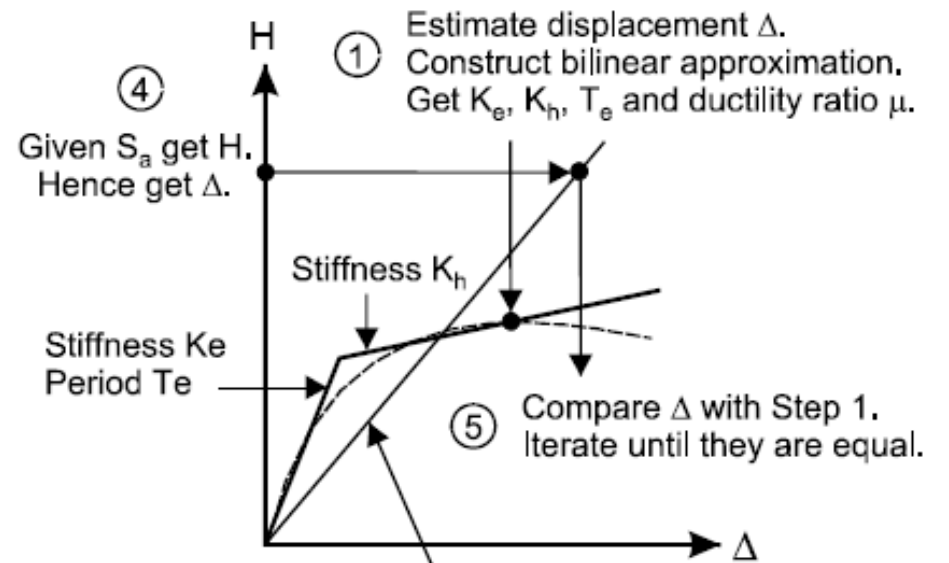
INTRODUZIONE

ESEMPIO

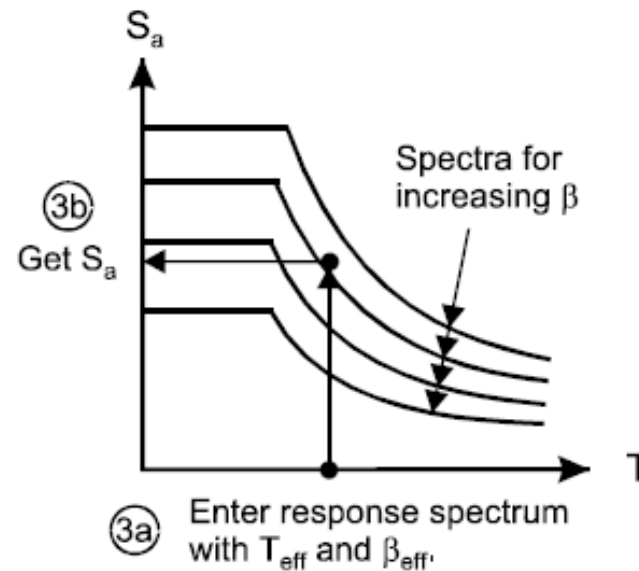
PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

FEMA 440 Linearization Method



② Given K_e , K_h , T_e and μ , get effective stiffness K_{eff} , period T_{eff} and damping ratio β_{eff} from formulas in FEMA 440.



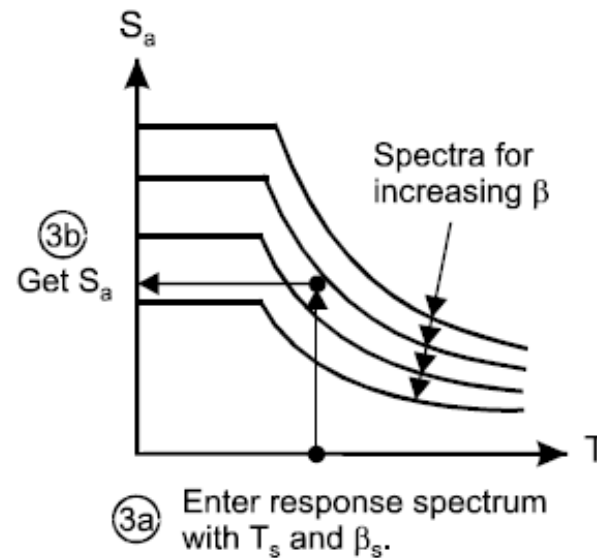
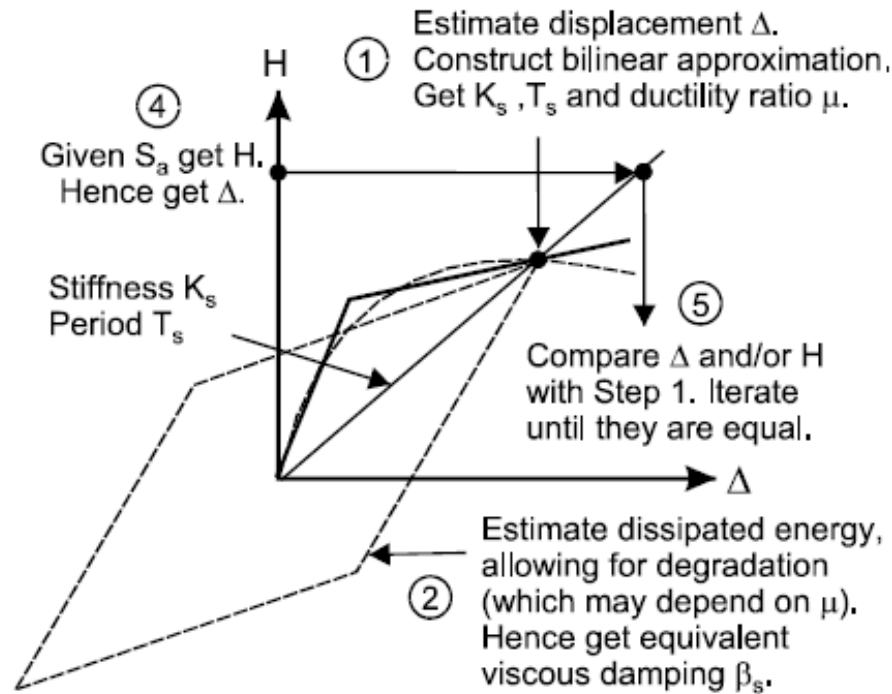
INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

ATC 40 Capacity Spectrum Method



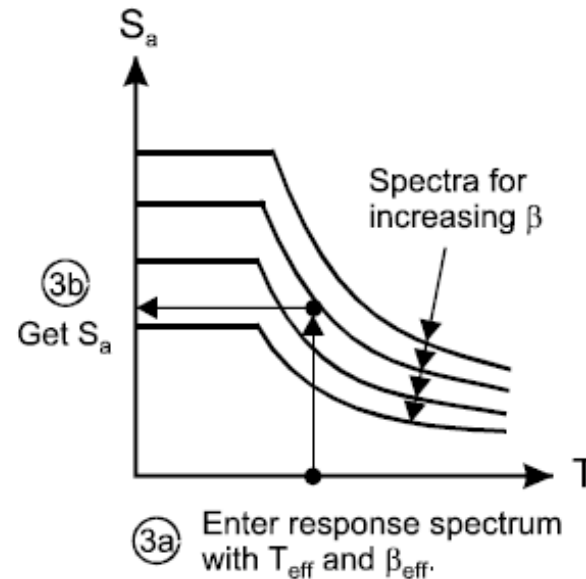
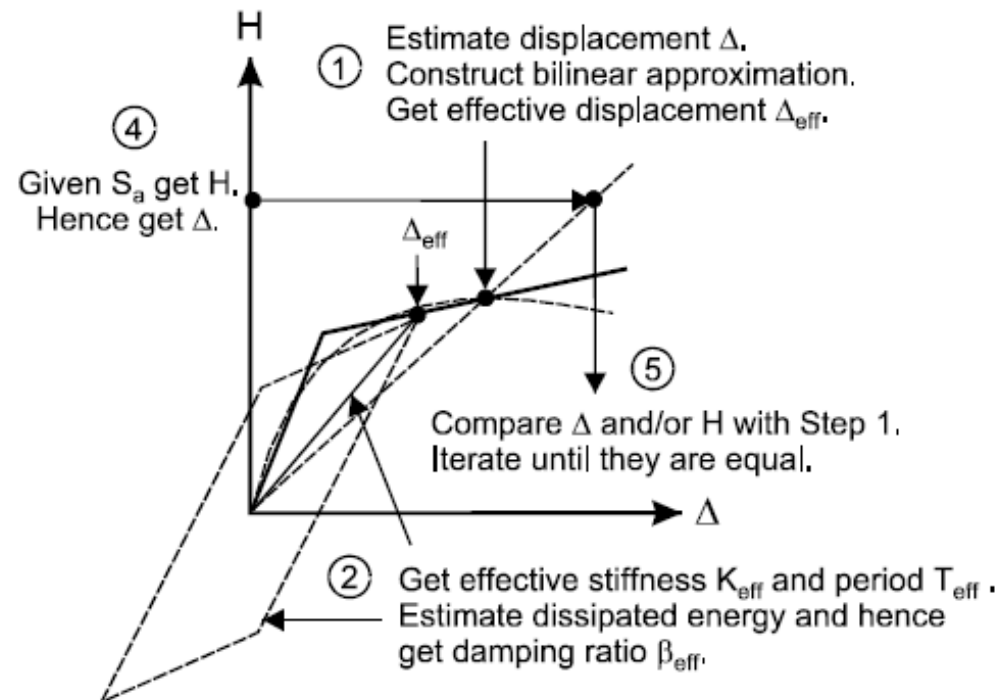
INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

ATC 40 Modified Capacity Spectrum Method



INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

Degradazione Ciclica

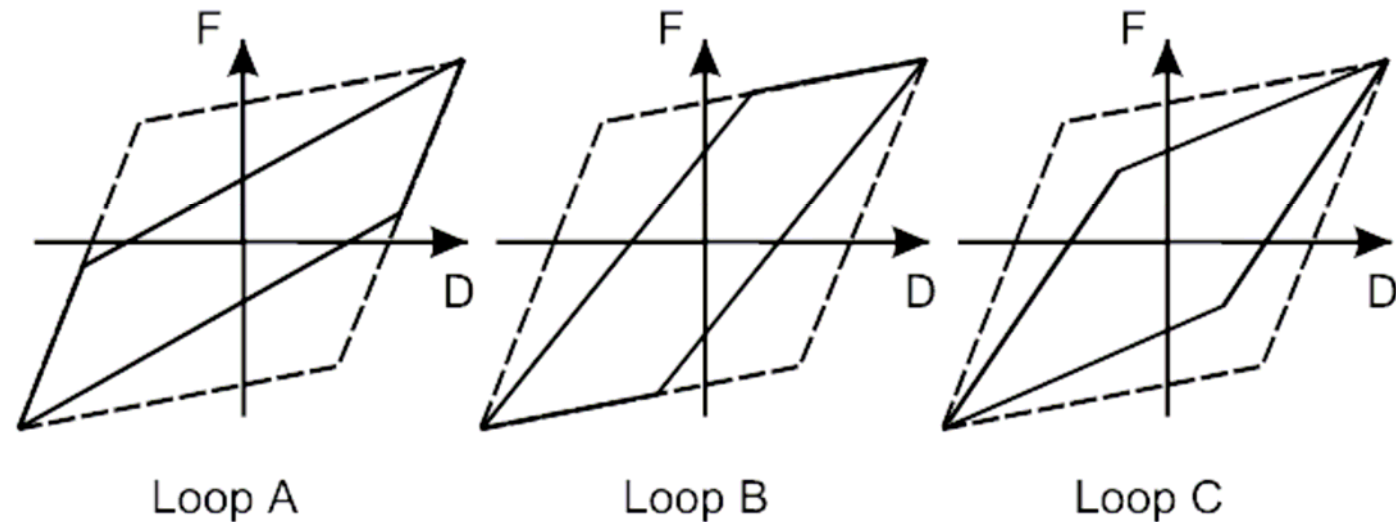


Figure 5.14 Loops with Same Energy Degradation

In PERFORM, the default option corresponds to Loop C. If you wish, you can specify an "unloading stiffness factor" that controls the loop shape. A value of zero for this factor (the default) corresponds to Loop C, a value of +1 corresponds to Loop A (maximum stiffness, smallest elastic range), and a value of -1 corresponds to Loop B (minimum stiffness, largest elastic range).

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

DINAMICA NON LINEARE

Per la dinamica non lineare si riportano gli appunti della lezione svolta da uno degli autori, Ing. L. Bandini, al corso CISM " *Tecnologie innovative di protezione sismica delle strutture*" – corso coordinato dal Prof. G.Russo e dal Prof. S.Sorace dell'Università degli studi di Udine. Tale documento, gli esempi trattati in esso (modelli ad elementi finiti realizzati con il codice di calcolo SAP2000) possono essere scaricati dall'indirizzo:

<http://www.leonardobandini.it> nella sezione "Didattica".



Centre International des Sciences Mécaniques
International Centre for Mechanical Sciences

Advanced Professional Training

***TECNOLOGIE INNOVATIVE DI PROTEZIONE
SISMICA DELLE STRUTTURE***

*Corso coordinato da
G. Russo, S. Sorace
Università di Udine*

***Metodi di modellazione agli elementi finiti di
sistemi di protezione sismica***

Ing. Leonardo Bandini

posta@leonardobandini.it - www.leonardobandini.it

Brunetta e Brunetta Engineering

Udine, 10 marzo 2006

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

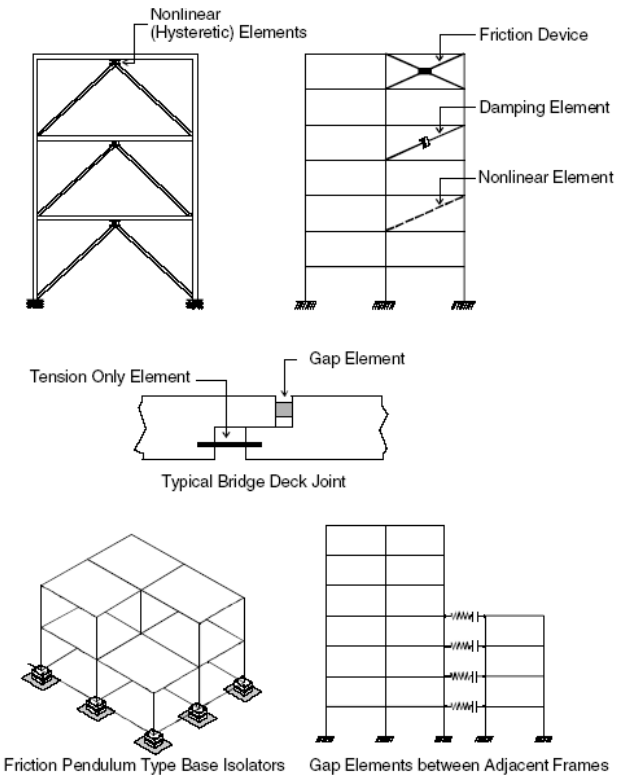
INTRODUZIONE

La risposta di strutture reali sottoposte ad azioni sismiche è spesso governata da significativi comportamenti non lineari (non linearità geometriche e di materiali).

La maggior parte dei comportamenti non lineari sono dovuti a leggi costitutive (tensione-deformazione, forza-spostamento) non lineari.

Le strutture di norma hanno un limitato numero di zone o di membrature che hanno un comportamento non lineare durante una azione statica o dinamica:

- instabilità di un diagonale di controvento,
- vincoli monolateri,
- contatti tra parti differenti di strutture,
- escursione in campo plastico di una cerniera plastica,
- dispositivi di dissipazione supplementare di energia,
- dispositivi di isolamento sismico.



Wilson, E. (1995)
Static & Dynamic Analysis of Structures, a physical approach with emphasis on earthquake engineering. Fourth Edition.

NON LINEARITA' CONCENTRATE -> NLLINK: NON LINEAR LINK

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

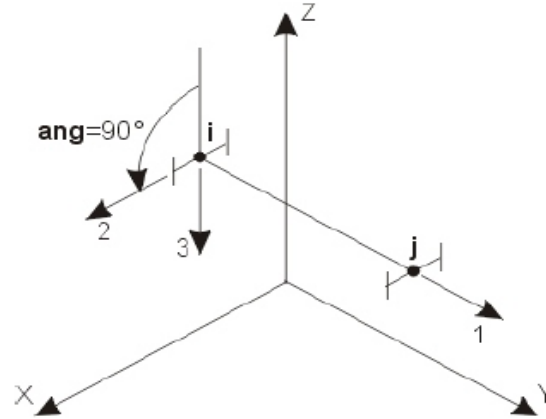
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

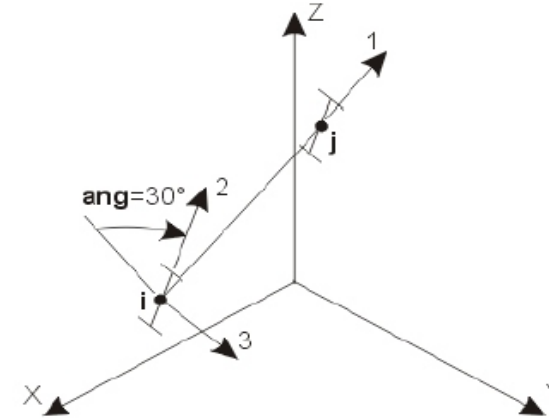
ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

LINK - PROPRIETA' GENERALI:

L'el
all'
elas
seri
seri
(ele
Isol



L'asse locale 1 è parallelo all'asse +Y
L'asse locale 2 è ruotato di 90° dal piano Z-1

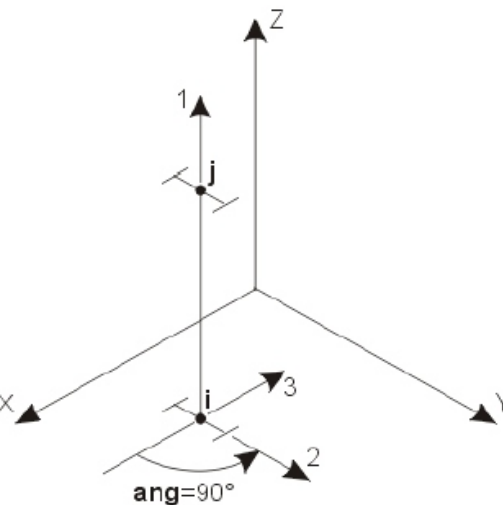


L'asse locale 1 non è parallelo agli assi X, Y o Z
L'asse locale 2 è ruotato di 30° dal piano Z-1

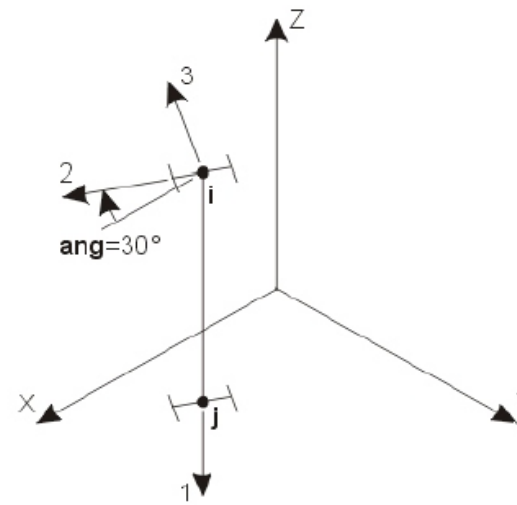
ocali
ti ad
on in
on in
astic
ber

- E' ...
- Può
- coinc
- E' a
- Ogn

- Altr
- Uno



L'asse locale 1 è parallelo all'asse +Z
L'asse locale 2 è ruotato di 90° dal piano X-1



L'asse locale 1 è parallelo all'asse -Z
L'asse locale 2 è ruotato di 30° dal piano X-1

(anche
i).

effettivo
vertito nel
odal
rramento
iene

SOMMATE AI VALORI DI SMOZZAMENTO MODALE
assegnati.

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

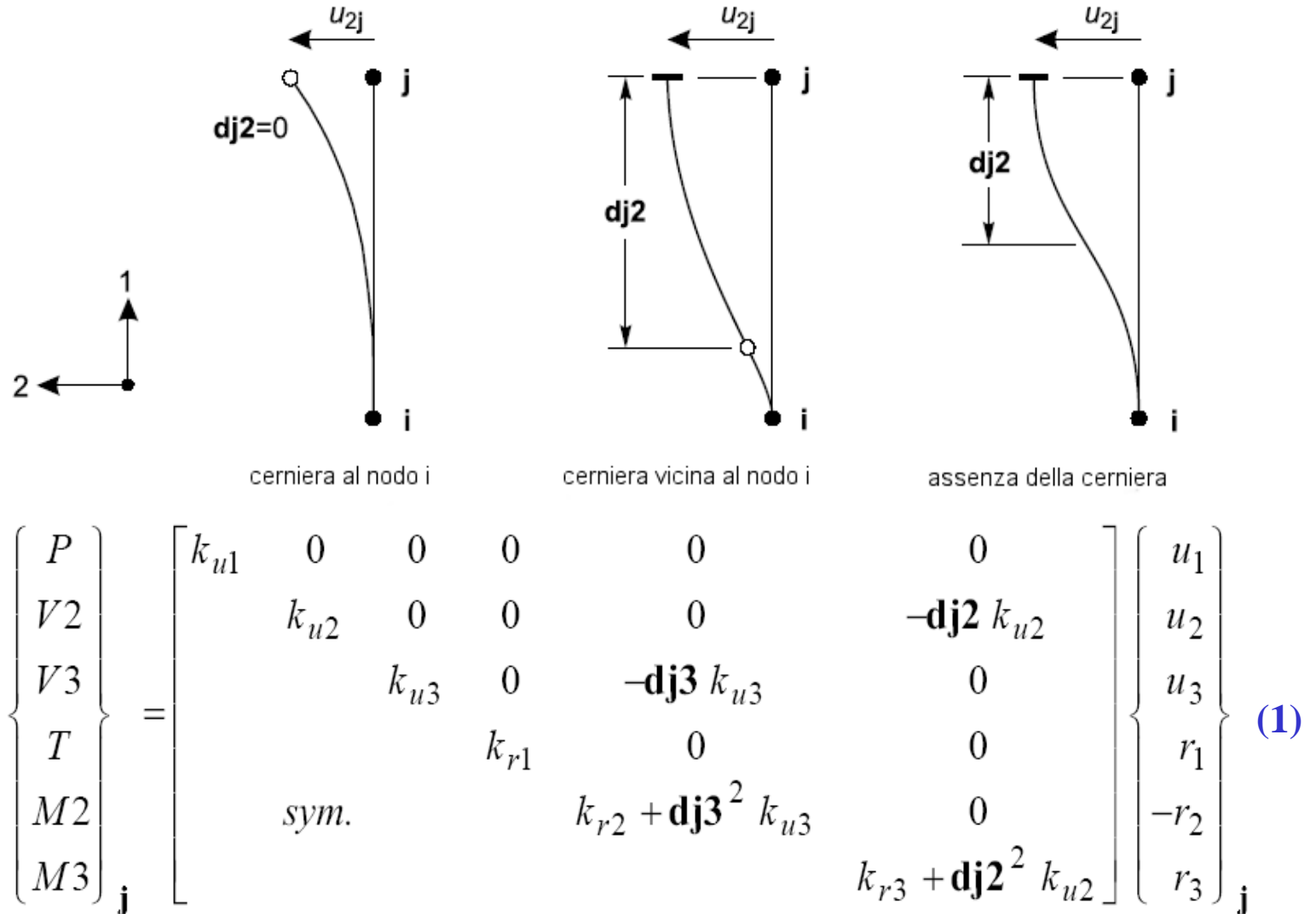
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

NLLINK - PROPRIETA' GENERALI:

Schematizzazione di un NLLINK lineare:



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

MULTILINEAR ELASTIC:

Il comportamento è **non lineare** "ma" **elastico**. Questo vuol dire che il l'elemento multilineare è un elemento elastico la cui curva è n-lineare e la stessa curva viene seguita in fase di carico e in fase di scarico senza avere isteresi.

Link/Support Directional Properties

Edit

Identification

Property Name: MLNEL_SF

Direction: U1

Type: MultiLinear Elastic

NonLinear: Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases

Effective Stiffness: 1000.

Effective Damping: 0.

Multi-Linear Force-Deformation Definition

	Displ	Force
1	-10.	-10000.
2	-1.	-5000.
3	0.	0.
4	1.	5000.
5	10.	10000.

Order Rows Delete Row Add Row 6

OK Cancel

Link/Support Directional Properties

Edit

Identification

Property Name: MLN2_HD

Direction: U1

Type: MultiLinear Elastic

NonLinear: Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases

Effective Stiffness: 1000.

Effective Damping: 0.

Multi-Linear Force-Deformation Definition

	Displ	Force
1	-5.	-10000.
2	-1.5	-1000.
3	0.	0.
4	1.5	1000.
5	5.	10000.

Order Rows Delete Row Add Row 6

OK Cancel

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

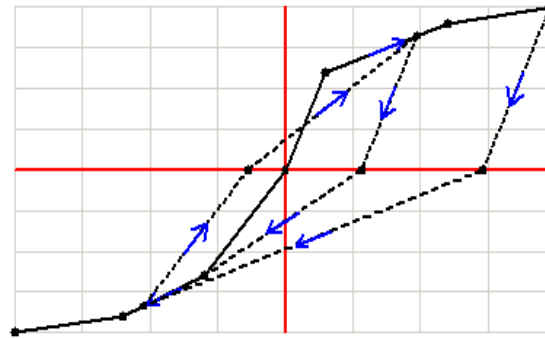
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

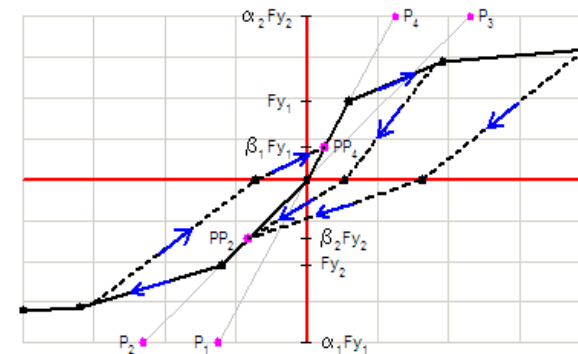
ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

MULTILINEAR PLASTIC:

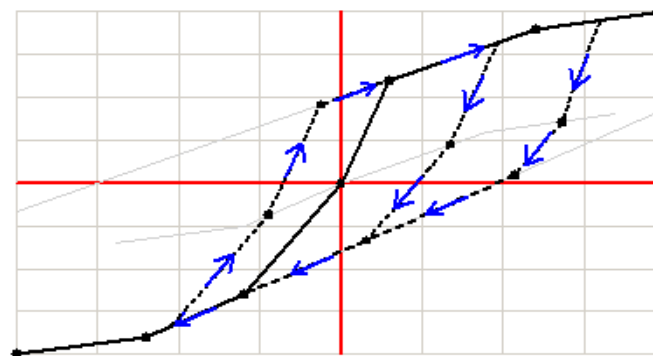
La relazione Forza-Deformazione è data da una curva **n-lineare elastica**. La curva n-lineare rappresenta rigidezze costanti a tratti. La curva in fase di **scarico** deriva da quelle di carico secondo tre diversi modelli isteretici: **Takeda, Pivot** o ad **incrudimento cinematico**.



isteresi secondo il modello
Takeda



isteresi secondo il modello Pivot



isteresi secondo un modello ad
incrudimento cinematico

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

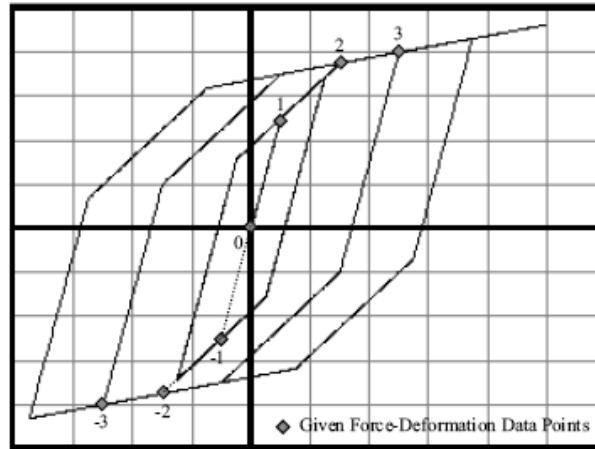
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

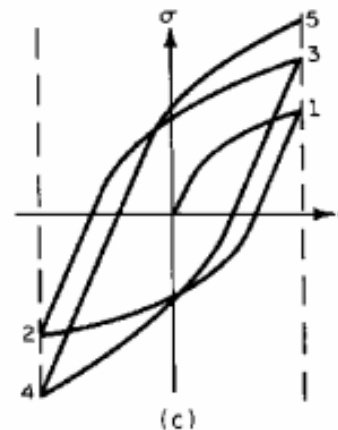
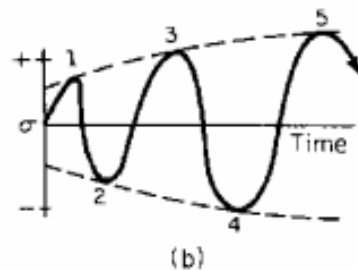
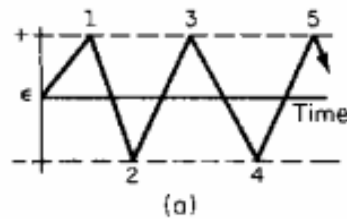
ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

MULTILINEAR PLASTIC - KINEMATIC:

- Un punto deve coincidere con l'origine (0,0).
- Almeno un punto deve essere a deformazione positiva/negativa
- Curve monotone positive/negative



1. Si inizia elasticamente (0)-(1)
2. La fase di carico continua nel secondo ramo (1)-(2) senza arrivare a (2)
3. Si scarica secondo una fase elastica derivata da (0)-(2)
4. Si segue la curva (-1)-(-3)



- a) Ciclo di carico (deformata-tempo)
- b) Risposta in stress
- c) Cicli isteretici

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

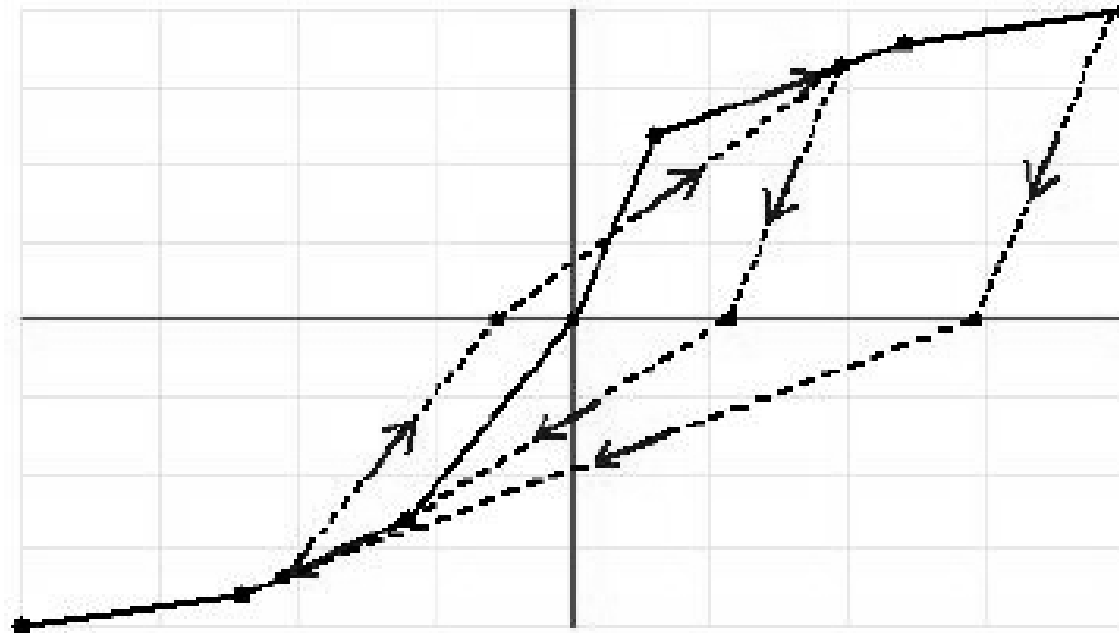
DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

MULTILINEAR PLASTIC - TAKEDA:

- Un punto deve coincidere con l'origine (0,0).
- Almeno un punto deve essere a deformazione positiva/negativa
- Curve monotone positive/negative



Il modello è molto simile a quello con hardening cinematico, ma si utilizza un modello di degrado basato sul modello TAKEDA. Quando si passa l'asse in fase di scarico, la curva segue una rigidezza secante.

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

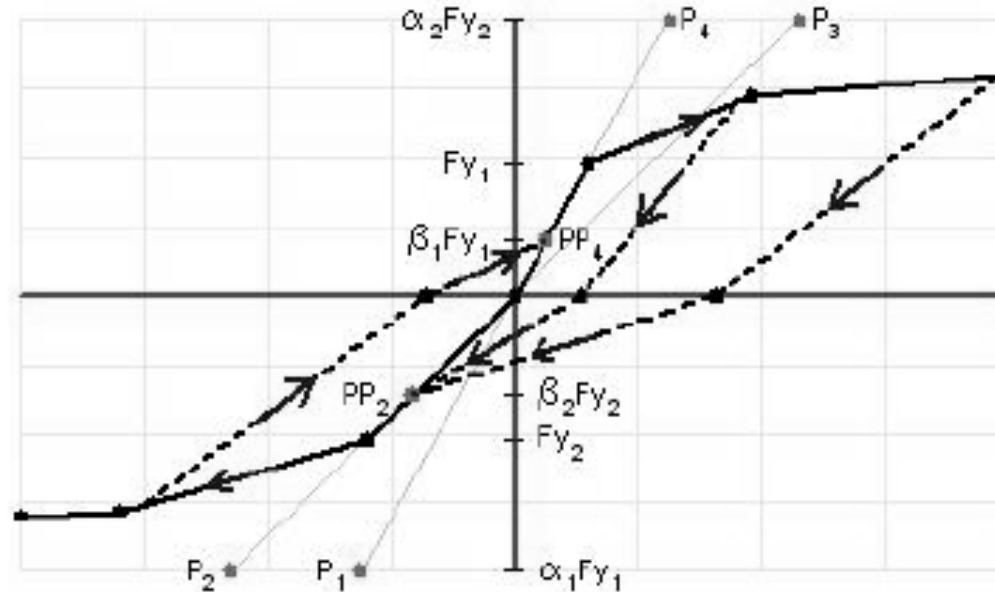
DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

MULTILINEAR PLASTIC - PIVOT:

E' simile al modello TAKEDA, ma ci sono parametri aggiuntivi per "governare" il degrado.



α_1 , con il quale posizionare il punto di pivot di scarico verso zero da una forza positiva

α_2 , con il quale posizionare il punto di pivot di scarico verso zero da una forza negativa

β_1 , con il quale posizionare il punto di pivot di inversione da zero verso una forza positiva

β_2 , con il quale posizionare il punto di pivot di inversione da zero verso una forza negativa

η , quantifica la degradazione della rigidezza elastica dopo lo snervamento.

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

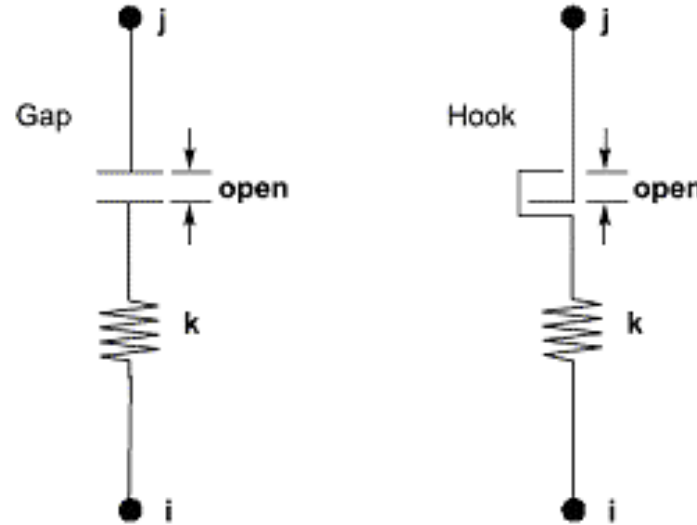
**DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO**

**ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI**

**ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO**

GAP/HOOK:

Sono elementi elastici non lineari caratterizzati da una rigidità elastica e da una apertura in compressione (gap) o in trazione (hook).



$$f = \begin{cases} k(d + open) & \Leftrightarrow d + open < 0 \\ 0 & \end{cases} \quad (2)$$

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

GAP/HOOK:

Si riporta di seguito l'algoritmo di un **Gap-Crush Element**:

1. Update Crush Deformation from Previously Converged Time Step:

$$y = d_{t-\Delta t} + d_0 + d_y$$

$$\text{if } y > d_c \text{ then } d_c = y$$

2. Calculate Elastic Deformation:

$$e_t^{(i)} = d_t^{(i)} + d_0 - d_c$$

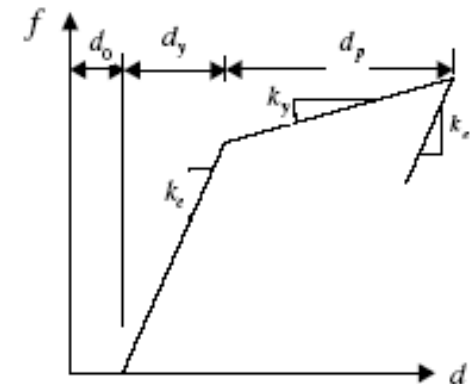
$$\text{if } e_t^{(i)} < -d_y \text{ then } e_t^{(i)} = -d_y$$

3. Calculate Iterative Force:

$$f_t^{(i)} = k_y(d_t^{(i)} + d_0) + (k_e - k_y)e_t^{(i)}$$

$$\text{if } f_t^{(i)} > 0 \text{ then } f_t^{(i)} = 0$$

Se viene usata una rigidità molto grande può essere difficoltosa la convergenza.. Per simulare l'impatto tra due porzioni di strutture, è buona norma non superare oltre due ordini di grandezza la rigidità degli elementi collegati al link.



Tension-Gap-Yield element

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

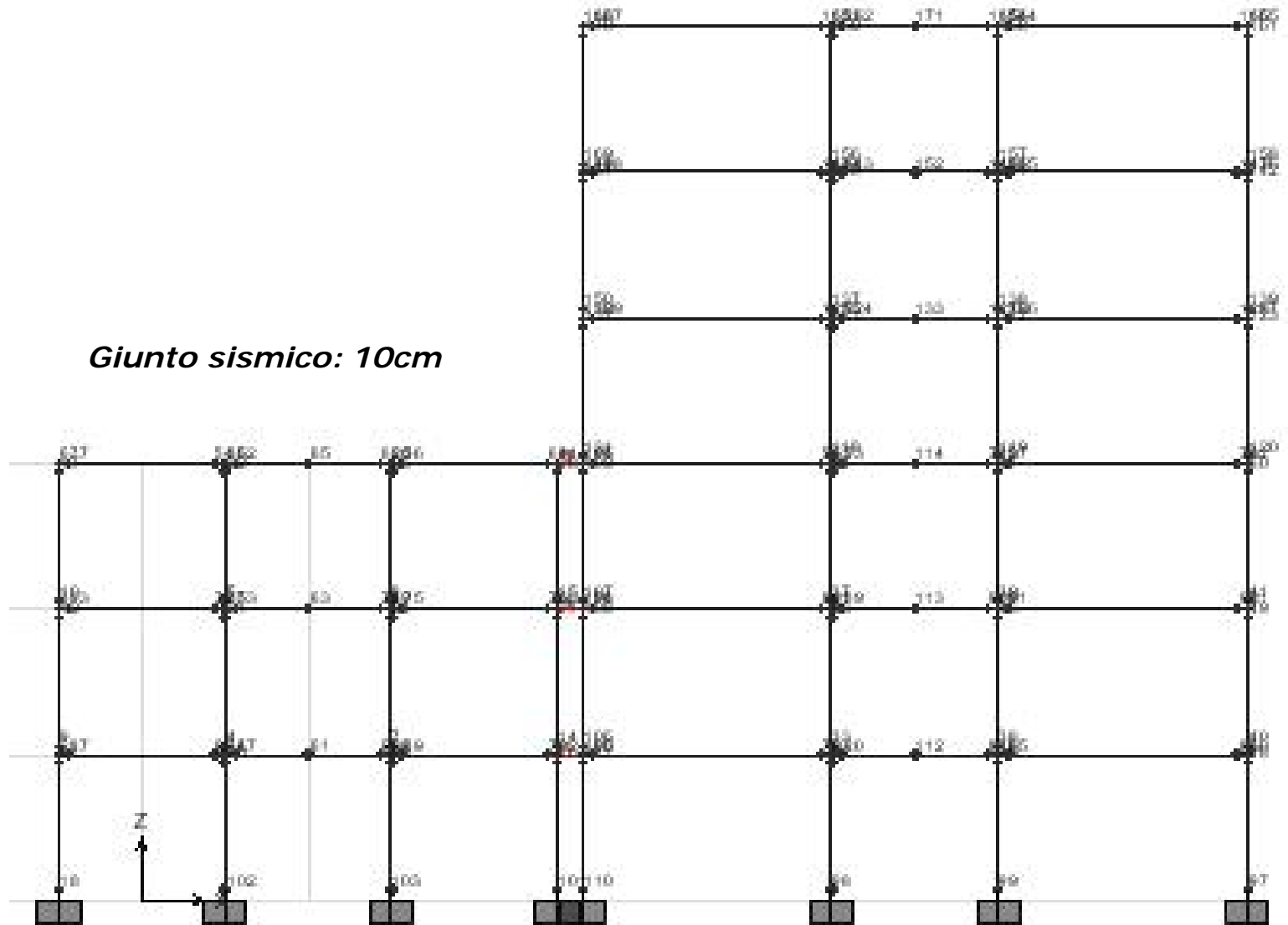
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

DINAMICA NON LINEARE: martellamenti strutturali



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

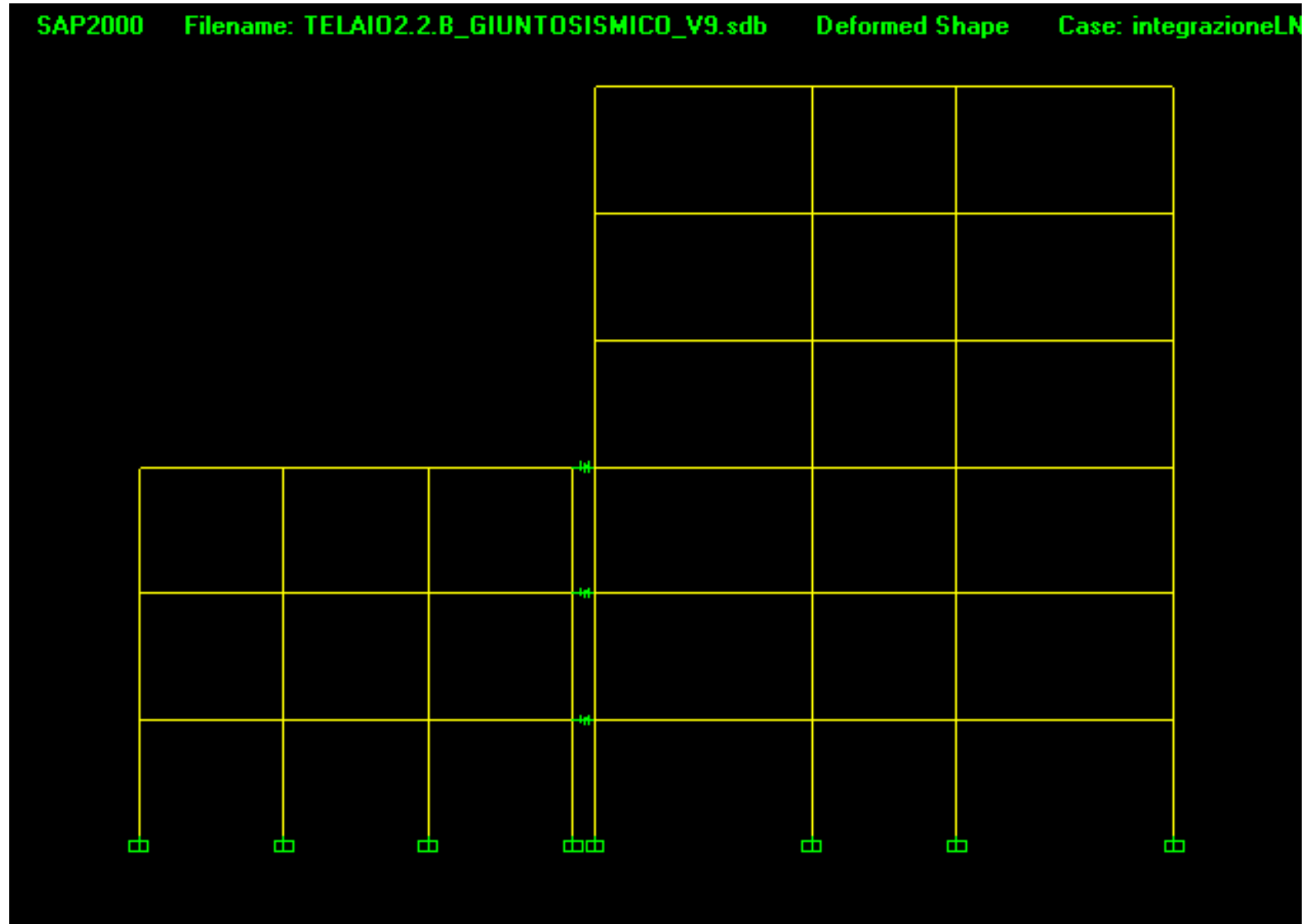
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

DINAMICA NON LINEARE: martellamenti strutturali



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

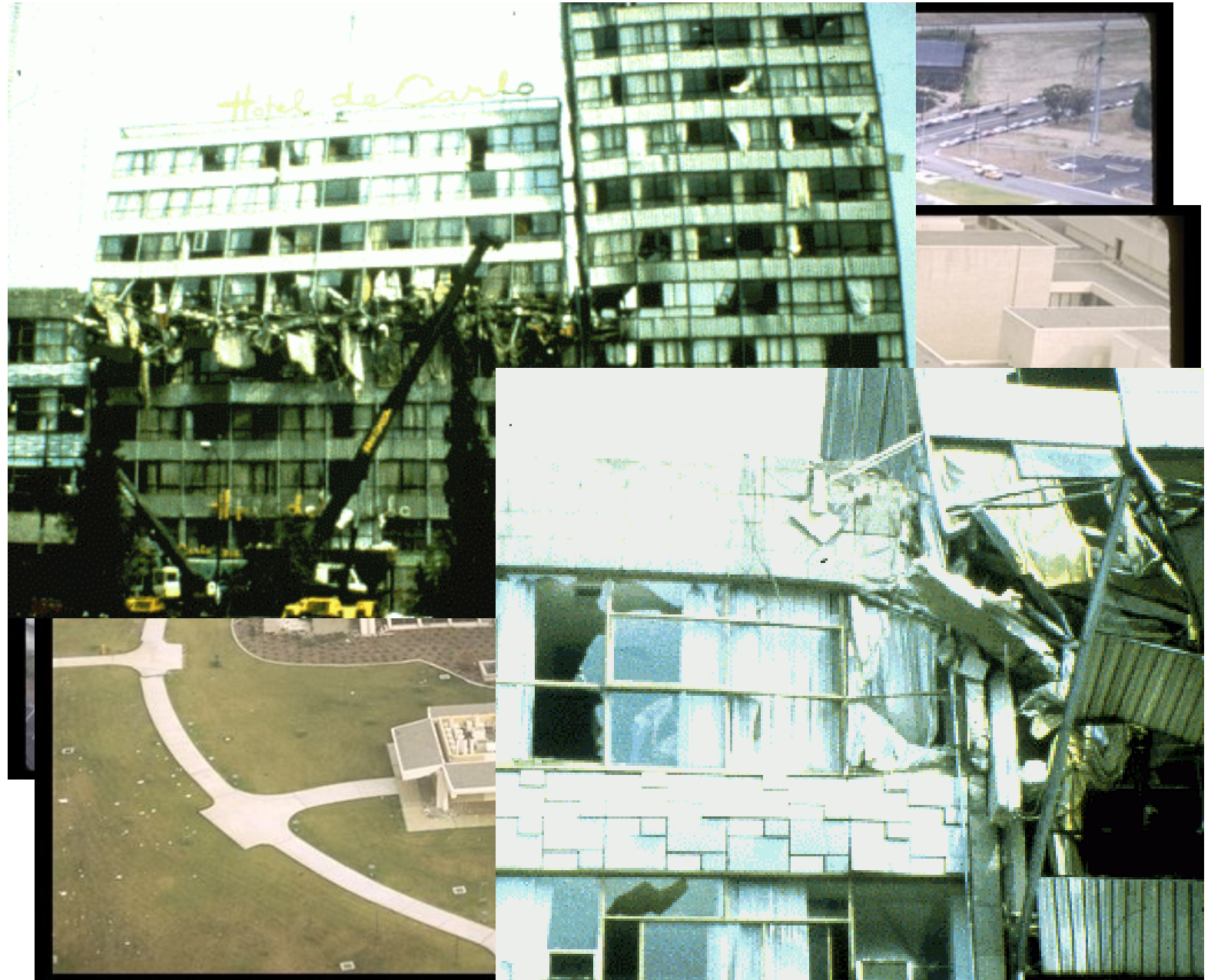
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO**

**ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI**

**ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO**

DINAMICA NON LINEARE: martellamenti strutturali



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

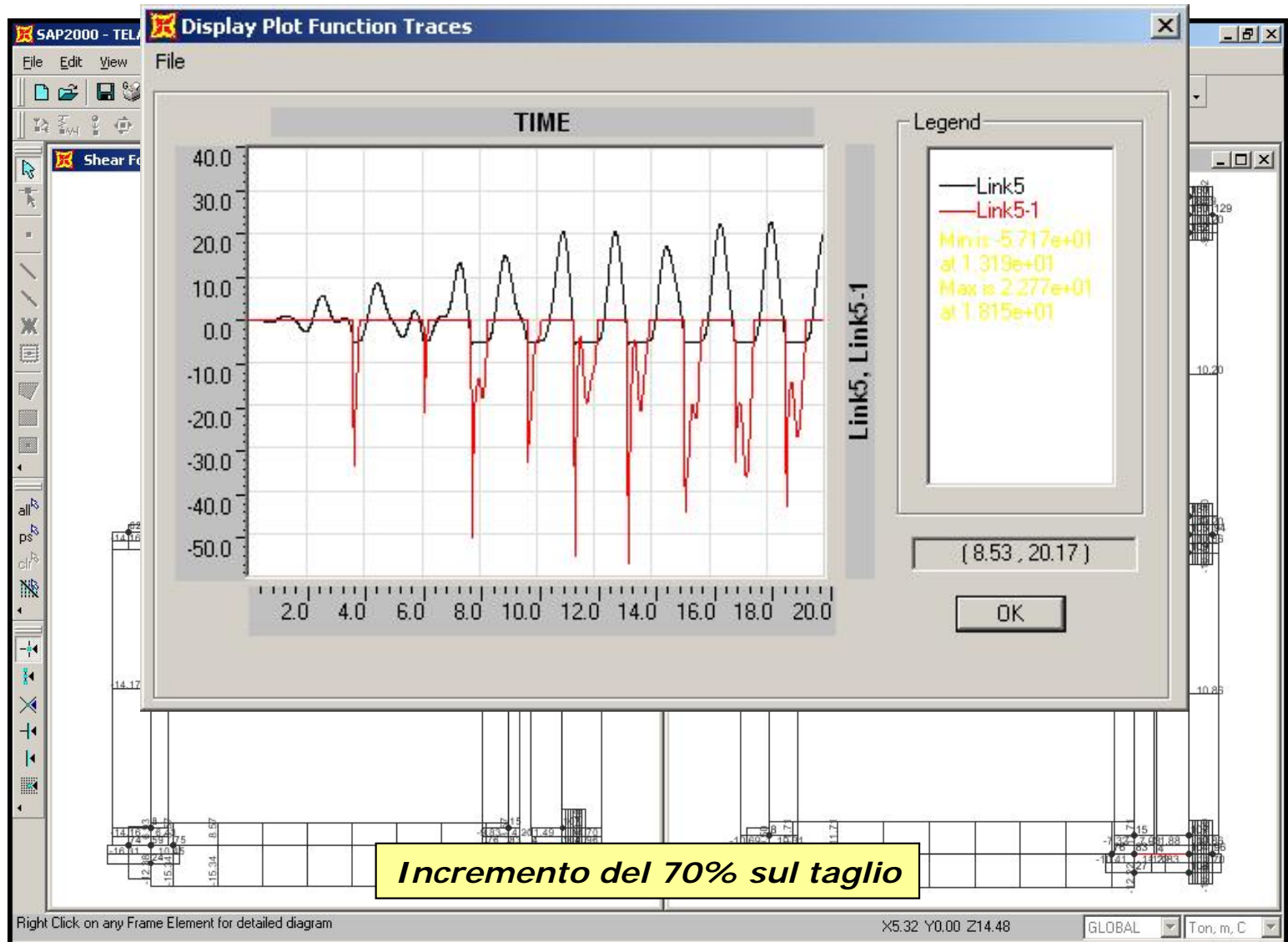
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

DINAMICA NON LINEARE: martellamento strutturale



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

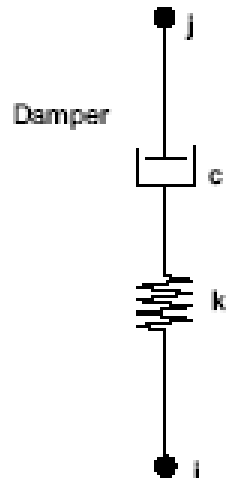
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

DAMPER



modello viscoelastico di Maxwell (Malvern, 1969)

$$f = kd_k = cd_c^{\text{c exp}} \quad (3)$$

dove \mathbf{K} è la costante elastica della molla, \mathbf{c} è il coefficiente di smorzamento, \mathbf{cexp} è l'esponente della velocità, il dk è la deformazione subita dalla molla elastica e dc è la velocità di deformazione.

$$d = d_k + d_c \quad (4)$$

La deformazione totale dell'elemento risulterà pertanto somma della deformazione della componente elastica e di quella viscosa.

IMPORTANTE! Per uno smorzatore puro l'effetto della molla può essere reso trascurabile rendendolo sufficiente rigido. La rigidezza della componente elastica deve essere grande abbastanza da far risultare il periodo caratteristico del sistema molla-smorzatore dato da $\tau = c/k$ (quando l'esponente è 1) un ordine di grandezza minore della grandezza dei passi di carico. Passo di carico: intervallo di tempo nel quale il valore del carico cambia. La rigidezza non deve essere eccessivamente alta, altrimenti si incorre in errori numerici.

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

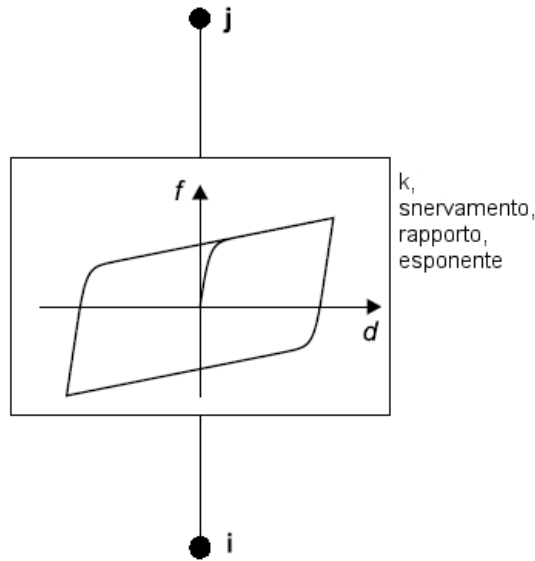
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

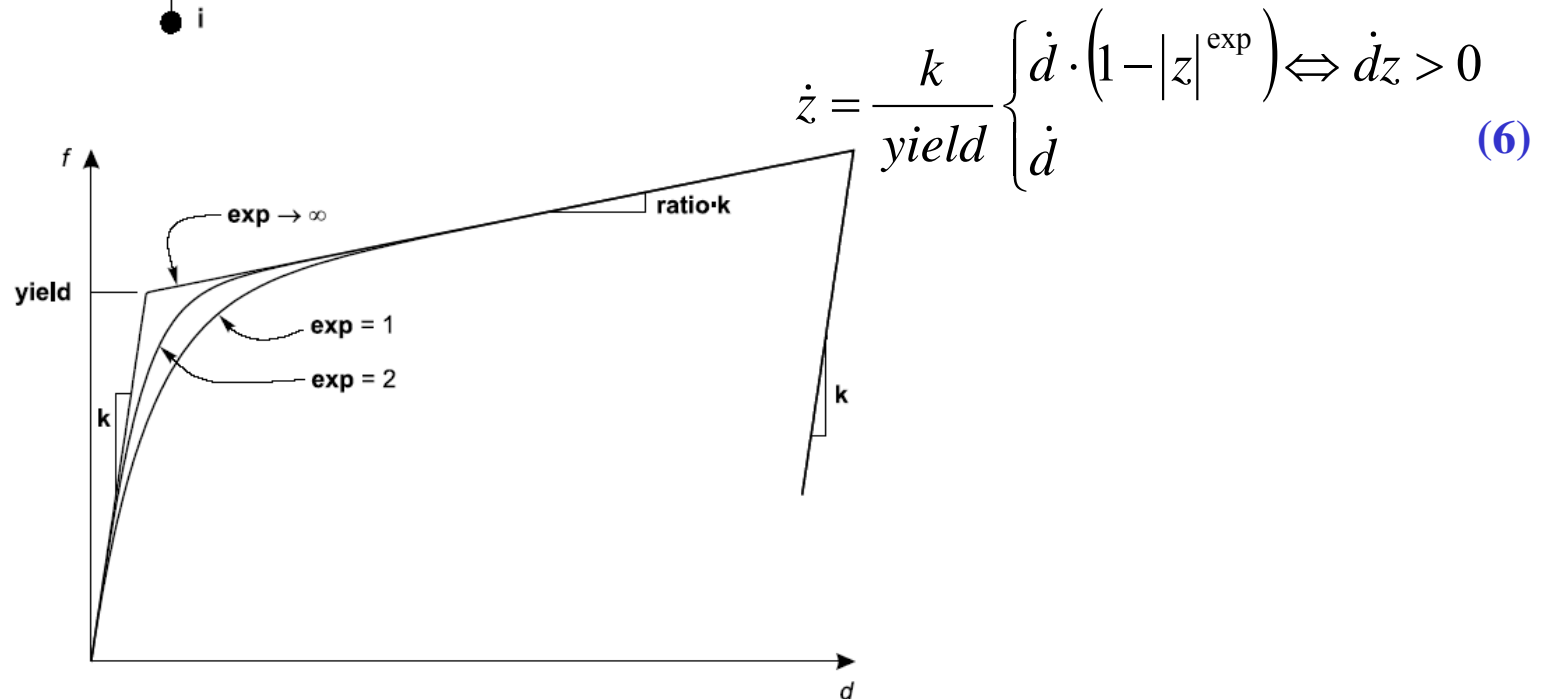
PLASTIC (WEN)

modello plastico basato su un comportamento isteretico proposto da Wen (1976)



$$f = \text{ratio } k d + (1 - \text{ratio}) \text{yield } z \quad (5)$$

dove **k** è la rigidezza della fase elastica, **yield** è la forza di snervamento, **ratio** è il rapporto tra il valore della rigidezza dopo lo snervamento e il valore di rigidezza della fase elastica, z è la variabile isteretica interna. $|z| \leq 1$ superficie di snervamento rappresentata da $|z| = 1$.



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

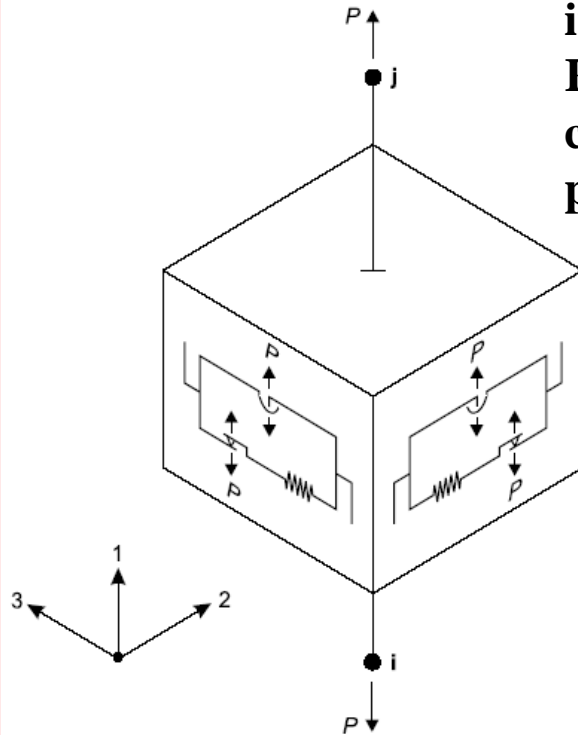
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

T/C FRICTION ISOLATOR

Park, Wen ed Ang (1986) e suggerito per analisi in occasione di isolamento alla base Nagarajaiah, Reinhorn e Constantinou (1991). Il comportamento del pendolo è come quello proposto da Zayas e da Low (1990).



$$P \equiv f_{u1} = \begin{cases} \mathbf{k1} d_{u1} & \text{if } d_{u1} < 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

Il Friction Isolator è dotato di un elemento gap nella direzione verticale per lavorare solo compresso.

$$f_{u2} = f_{u2f} + f_{u2p} \quad f_{u2p} = -P \frac{d_{u2}}{\text{radius2}}$$

$$f_{u3} = f_{u3f} + f_{u3p} \quad f_{u3p} = -P \frac{d_{u3}}{\text{radius3}}$$

$$f_{u2f} = -P \mu_2 z_2 \quad \mu_2 = \text{fast2} - (\text{fast2} - \text{slow2}) e^{-rv}$$

$$f_{u3f} = -P \mu_3 z_3 \quad \mu_3 = \text{fast3} - (\text{fast3} - \text{slow3}) e^{-rv}$$

Distacco (v=0)

Alta velocità

(8)

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

NLLINK - PROPRIETA' GENERALI:

E' possibile a volte essere tentati di specificare valori molto grandi per **K**, specialmente per DAMPER, GAP o HOOK. È importante NON farlo. Se si desidera limitare le deformazioni elastiche in una molla interna particolare, è solitamente sufficiente usare un valore **di K** che è $10^2 - 10^4$ volte più grande della rigidità degli elementi connessi. I più grandi valori di **K** possono causare le difficoltà numeriche durante la soluzione.

Se non si specificano le proprietà non lineari per un grado di libertà, quel grado di libertà è lineare usando la rigidità efficace, che può essere zero. Pertanto al fine di scongiurare LABILITA' è necessario vincolare in altro modo quel grado di libertà.

La massa e le inerzie rotazionali degli elementi NLLINK DEVONO essere impostate diverse da zero.

Ogni NLLINK è dotato di 6 DOF indipendenti.

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

Fast Non Linear Analysis

Il metodo **FNA** (Fast Nonlinear Analysis, Ibrahimbegovic and Wilson, 1989; Wilson, 1993) è un metodo di integrazione al passo.

Effetti inelastici della struttura siano applicati in punti discreti del modello.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) + \mathbf{R}(t)_{\text{NL}} = \mathbf{R}(t) \quad (9)$$

Dove \mathbf{K}_L è la matrice di rigidezza degli elementi lineari (tutti gli elementi escluso gli elementi denominati NLLINK); \mathbf{C} è la matrice di smorzamento; \mathbf{M} la matrice delle masse, \mathbf{r}_N il vettore delle forze dei gradi di libertà degli elementi non lineari; \mathbf{u} , $\dot{\mathbf{u}}$, $\ddot{\mathbf{u}}$ sono relativamente lo spostamento, la velocità e l'accelerazione relativa con il suolo; \mathbf{r} è il vettore delle forze applicate.

Affinché \mathbf{r}_N sia corretto è necessario definire correttamente l'analisi modale (svolta con l'algoritmo di Ritz), incrementando del numero di modi calcolati, e dotando gli NLLINK di massa diversa da zero su tutti i DOF attivi.

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

Fast Non Linear Analysis

Calcolo delle forze non lineari:

Od ogni passo di tempo la deformazione non lineare $d(t)$ di un elemento non lineare è calcolata attraverso l'equazione di trasformazione:

$$d(t) = bu(t) \quad (10)$$

derivando rispetto al tempo:

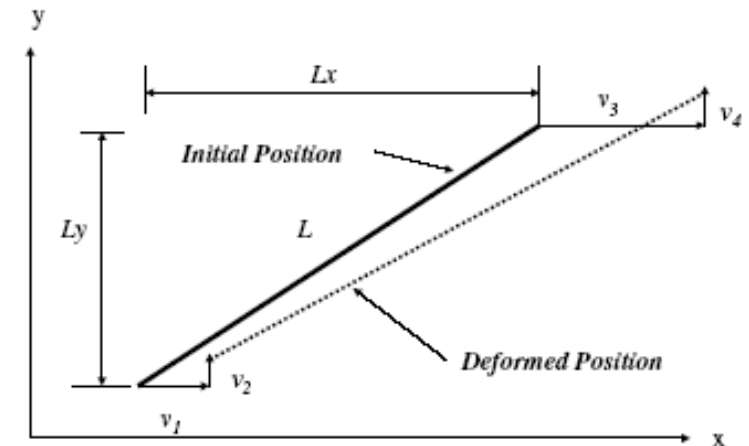
$$\dot{d}(t) = b\dot{u}(t) \quad (11)$$

Si noti che per piccoli spostamenti, la matrice di trasformazione b non è dipendente dal tempo.

Se le deformazioni $d(t)$ e le velocità di deformazione $\dot{d}(t)$ sono note ad ogni passo di tempo, le forze non lineari di un elemento non lineare possono essere calcolate *esattamente*.

Esempio con un unico elemento Truss:
 b in questo caso è un vettore

$$d = \begin{bmatrix} -\frac{L_x}{L} & -\frac{L_y}{L} & \frac{L_x}{L} & \frac{L_y}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix}$$



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

Fast Non Linear Analysis

Trasformazione in coordinate modali e disaccoppiamento delle equazioni di moto:

Il primo passo della risoluzione della equazione di moto (9) è quello di calcolare un gruppo di N vettori ortogonali di Ritz (Load-Dependent Ritz vectors), Φ , che soddisfano le seguenti equazioni:

$$\Phi^T M \Phi = I \quad (12)$$

$$\Phi^T K_L \Phi = \Omega^2 \quad (13)$$

Dove K_L è la matrice di rigidità degli elementi lineari (tutti gli elementi escluso gli elementi denominati NLLINK); I è la matrice di identità; M la matrice delle masse, Ω è la matrice diagonale degli autovalori.

$$u(t) = \Phi Y(t) \quad \dot{u}(t) = \Phi \dot{Y}(t) \quad \ddot{u}(t) = \Phi \ddot{Y}(t) \quad (14)$$

L'equazione di moto (9) riscritta come di seguito:

$$M \ddot{u}(t) + C \dot{u}(t) + (K + K_e) u(t) = R(t) - R(t)_{NL} + K_e u(t) \quad (15)$$

Moltiplicando ambo i membri per Φ^T si ha:

$$I \ddot{Y}(t) + \Lambda \dot{Y}(t) + \Omega^2 Y(t) = F(t) \quad (16)$$

Espressione matriciale di N-equazioni differenziali disaccoppiate.

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

Fast Non Linear Analysis

Vettori di forze modali:

$$\mathbf{F}(t) = \Phi^T \bar{\mathbf{R}}(t) = \Phi^T \mathbf{R}(t) - \Phi^T \mathbf{R}(t)_{NL} + \Phi^T \mathbf{K}_e \mathbf{u}(t) \quad (17)$$

Le deformate dell'elemento espresse nelle coordinate modali.

$$\mathbf{d}(t) = \mathbf{B} \mathbf{Y}(t) \quad \mathbf{B} = \mathbf{b} \Phi \quad (18)$$

$$\begin{aligned} d(t) &= bu(t) \\ u(t) &= \Phi Y(t) \end{aligned}$$

E' interessante notare che \mathbf{B} , matrice di dimensione $L \times N$ (L : dimensione del vettore delle deformate interne dell'elemento non lineare, N : numero di vettori di Ritz), non è funzione del tempo, quindi, è necessario calcolarla una sola volta prima dell'integrazione delle equazioni modali.

Ad ogni passo di tempo, prendendo le deformazioni degli elementi NLLINK, nota la legge costitutiva, possono essere valutate le forze interne $\mathbf{f}(t)$ dalle quali:

$$\mathbf{F}(t)_{NL} = \mathbf{B}^T \mathbf{f}(t) \quad (19)$$

$$\mathbf{F}(t)_e = \Phi^T \mathbf{K}_e \mathbf{u}(t) = \Phi^T \mathbf{b}^T \mathbf{k}_e \mathbf{b} u(t) = \mathbf{B}^T \mathbf{k}_e \mathbf{d}(t) \quad (20)$$

Dove la (19) rappresenta le forze modali non lineari e la (20) le forze modali associate alle componenti elastiche (effettive) degli NLLINK.

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

Fast Non Linear Analysis

I INITIAL CALCULATION - BEFORE STEP-BY-STEP SOLUTION

1. Calculate N Load Dependent Ritz vectors Φ for the structure without the nonlinear elements. These vectors have N_j displacement DOF.
2. Calculate the L by N \mathbf{B} matrix. Where L is the total number of DOF within all nonlinear elements.
3. Calculate integration constants A_1 --- for the piece-wise exact integration of the modal equations for each mode.

II NONLINEAR SOLUTION at times $\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t$ -----

1. Use Taylor series to estimate solution at time t .

$$Y(t) = Y(t - \Delta t) + \Delta t \dot{Y}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{Y}(t - \Delta t)$$

$$\dot{Y}(t) = \dot{Y}(t - \Delta t) + \Delta t \ddot{Y}(t - \Delta t)$$

2. For iteration i , calculate L nonlinear deformations and velocities.

$$\mathbf{d}(t)^j = \mathbf{B}Y(t)^j \quad \text{and} \quad \dot{\mathbf{d}}(t)^j = \mathbf{B}\dot{Y}(t)^j$$

3. Based on the deformation and velocity histories in nonlinear elements, calculate L nonlinear forces $\mathbf{f}(t)^j$.
4. Calculate new modal force vector $\bar{\mathbf{F}}(t)^j = \mathbf{F}(t) - \mathbf{B}^T[\mathbf{f}(t)^j - \mathbf{k}_e \mathbf{d}(t)^j]$
5. Use piece-wise exact method to solve modal equations for next iteration.

$$Y(t)^j, \dot{Y}(t)^j, \ddot{Y}(t)^j$$

6. Calculate error norm:
$$Err = \frac{\sum_{n=1}^N |\bar{f}(t)_n^j| - \sum_{n=1}^N |\bar{f}(t)_n^{j-1}|}{\sum_{n=1}^N |\bar{f}(t)_n^j|}$$

7. Check Convergence – where the tolerance, Tol , is specified.

If $Err > Tol$ go to step 2 with $i = i + 1$

If $Err < Tol$ go to step 1 with $t = t + \Delta t$

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

Fast Non Linear Analysis

Cenno all'algoritmo di Ritz:

Equazioni di equilibrio, sistema non smorzato, vibrazioni libere

$$\left[K - \omega_i^2 M \right] v_i = 0 \Rightarrow \bar{K}_i v_i = 0 \quad (21)$$

algoritmo di Ritz:

1. Triangolarizzazione della matrice (LDL^t)
2. vettore con numeri random vettore iniziale $V^{(0)}$
3. Iterazione $i = 1, 2, \dots$
4. Normalizzazione del vettore $V^{(i)} : V^{T(i)} M V^{(i)}$
5. Stima dell'autovalore $\lambda^{(i)} = V^{T(i)} R^{(i)}$
6. Check di convergenza $\lambda^{(i)}$ se converge allora i-esimo autovalore trovato
7. $i=i+1; R^{(i)} = \lambda^{(i-1)} M V^{(i-1)}$
8. Calcolo del nuovo vettore $LDL^T V^{(i)} = R^{(i)}$
9. Torna al punto 3

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

Fast Non Linear Analysis

Il metodo FNA è suggerito quando:

- si ha le sole non linearità concentrate negli NLLINK
- siano trascurabili effetti di 2° ordine (grandi spostamenti) o modifiche della rigidezza prodotte da effetti deformativi globali (hardening/softening),
- siano presenti nel modello numerosi elementi non lineari

Caratteristiche del metodo FNA:

- Ad ogni passo di integrazione la matrice delle rigidezze rimane costante.
- Le componenti non lineari sono trattate con un vettore di forze non lineari che dipende a sua volta dai vettori LDR (Load Dependend Ritz vector).
- Le equazioni modali disaccoppiate sono calcolate ad ogni passo di tempo.

WILSON: *"The Dynamic Analysis of a Structure with a Small Number of Nonlinear Elements is Almost as Fast as a Linear Analysis"*. *Static and Dynamic Analysis of Structures, Wilson (4th edition, 2004)*

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

Direct Integration

Il metodo DI è suggerito quando:

- si vuole utilizzare la non linearità del materiale
- sia stata definita la dipendenza dal tempo delle caratteristiche dei materiali
- non sia trascurabile l'effetto di 2° ordine
- non sia applicabile il metodo FNA.

I metodi utilizzabili per l'integrazione diretta sono:

- Newmark
- Wilson Theta
- Collocation
- Hilbert-Hughes-Taylor
- Chung-Hulbert

WILSON: "Direct Numerical Integration for Earthquake Loading is Very Slow". *Static and Dynamic Analysis of Structures, Wilson (4th edition, 2004)*

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

Direct Integration

Introduzione:

- Il metodo più generale per determinare la risposta dinamica di una struttura consiste nella integrazione diretta delle equazioni di equilibrio, ovvero, rispettare le equazioni di moto in un numero discreto di intervalli di tempo ($\Delta t, 2\Delta t, \dots, N\Delta t$).
- L'approccio generale può essere classificato in metodi di integrazione *Espliciti* o *Impliciti*.
- I metodi *Espliciti* utilizzano delle equazioni differenziali al tempo t per predire una soluzione al passo $t+\Delta t$. Sono *condizionatamente stabili* rispetto alla grandezza del del passo di tempo.
- I metodi *Impliciti* soddisfano delle equazioni differenziali al tempo t dopo che la soluzione è stata trovata al passo $t-\Delta t$, possono essere *condizionatamente o incondizionatamente stabili*.

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

Direct Integration

Il metodo di Newmark (1959)

Equazione differenziale al passo t :

$$M\ddot{u}_t + C\dot{u}_t + Ku_t = F_t \quad (22)$$

Sviluppo in serie di Taylor:

$$u_t = ST(u, n) = u_{t-\Delta t} + \Delta t \cdot \dot{u}_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t^2}{2} \cdot \ddot{u}_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t^3}{6} \cdot \dddot{u}_{t-\Delta t} + \dots \quad (23)$$

$$\dot{u}_t = ST(\dot{u}, n) \quad (24)$$

Newmark tronca lo sviluppo di serie nella forma:

$$u_t = Nw(u, \beta) = u_{t-\Delta t} + \Delta t \cdot \dot{u}_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t^2}{2} \cdot \ddot{u}_{t-\Delta t} + \beta \cdot \ddot{u}_{t-\Delta t} \quad (25)$$

$$\dot{u}_t = Nw(\dot{u}, \gamma) \quad (26)$$

Le equazioni (25) e (26) sono troncate con la derivata terza dello spostamento.

Se l'accelerazione è assunta lineare all'interno del passo di tempo la derivata terza dello spostamento può essere scritta:

$$\ddot{u} = \frac{\dot{u}_t - \dot{u}_{t-\Delta t}}{\Delta t} \quad (27)$$

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

Direct Integration

Il metodo di Newmark (1959)

Sostituendo l'espressione della derivata terza dello spostamento (27) nelle equazioni "troncate di Newmark (25) e (26) si ottiene:

$$\mathbf{u}_t = \mathbf{u}_{t-\Delta t} + \Delta t \dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \Delta t^2 \ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \beta \Delta t^2 \ddot{\mathbf{u}}_t \quad (28)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_t = \dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + (1 - \gamma) \Delta t \ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \gamma \Delta t \ddot{\mathbf{u}}_t \quad (29)$$

Newmark risolve le equazioni (28), (29) e (22) iterativamente per ogni passo di tempo e per ogni DOF della struttura. I termini delle accelerazioni, sono calcolati dalla (22) dividendo per la massa associata al DOF.

Stabilità del metodo di Newmark (per uno smorzamento nullo):

$$\gamma \geq 1/2; \beta \leq 1/2$$

$$\Delta t \leq \frac{1}{\omega_{\max} \sqrt{\gamma/2 - \beta}} \Rightarrow \frac{\Delta t}{T_{\min}} \leq \frac{1}{2\pi \sqrt{\gamma/2 - \beta}} \quad (30)$$

$$M\ddot{\mathbf{u}}_t + C\dot{\mathbf{u}}_t + K\mathbf{u}_t = \mathbf{F}_t$$

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

Direct Integration

Sinottico del metodo di Newmark (1959)

I. INITIAL CALCULATION

A. Form static stiffness matrix \mathbf{K} , mass matrix \mathbf{M} and damping matrix \mathbf{C}

B. Specify integration parameters β and γ

C. Calculate integration constants

$$b_1 = \frac{1}{\beta \Delta t^2} \quad b_2 = \frac{1}{\beta \Delta t} \quad b_3 = \beta - \frac{1}{2} \quad b_4 = \gamma \Delta t b_1$$

$$b_5 = 1 + \gamma \Delta t b_2 \quad b_6 = \Delta t (1 + \gamma b_3 - \gamma)$$

D. Form effective stiffness matrix $\bar{\mathbf{K}} = \mathbf{K} + b_1 \mathbf{M} + b_4 \mathbf{C}$

E. Triangularize effective stiffness matrix $\bar{\mathbf{K}} = \mathbf{LDL}^T$

F. Specify initial conditions $\mathbf{u}_0, \dot{\mathbf{u}}_0, \ddot{\mathbf{u}}_0$

II. FOR EACH TIME STEP $t = \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t \dots$

A. Calculate effective load vector

$$\bar{\mathbf{F}}_t = \mathbf{F}_t + \mathbf{M}(b_1 \mathbf{u}_{t-\Delta t} - b_2 \dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} - b_3 \ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t}) + \mathbf{C}(b_4 \mathbf{u}_{t-\Delta t} - b_5 \dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} - b_6 \ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t})$$

B. Solve for node displacement vector at time t

$$\mathbf{LDL}^T \mathbf{u}_t = \bar{\mathbf{F}}_t \quad \text{forward and back-substitution only}$$

C. Calculate node velocities and accelerations at time t

$$\dot{\mathbf{u}}_t = b_4 (\mathbf{u}_t - \mathbf{u}_{t-\Delta t}) + b_5 \dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + b_6 \ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t}$$

$$\ddot{\mathbf{u}}_t = b_1 (\mathbf{u}_t - \mathbf{u}_{t-\Delta t}) + b_2 \dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + b_3 \ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t}$$

D. Go to Step II.A with $t = t + \Delta t$

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

Direct Integration

Il metodo di Newmark rientra nei metodi a **passo singolo**, ovvero, si determinano le grandezze al passo i-esimo con quelle al passo i-1.

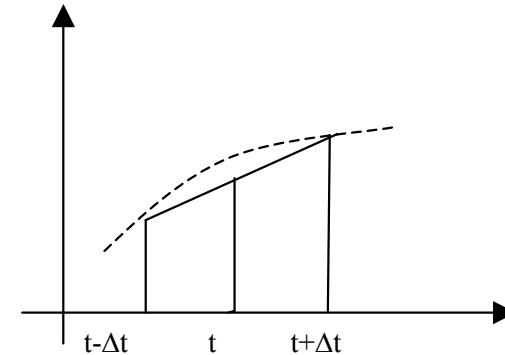
Altri metodi sono:

• **passo doppio**, ovvero si determinano le grandezze al passo i-esimo usando quelli determinati al passo i-2 e i-1

• **differenza centrata** dove:

$$\dot{u} = \frac{1}{2\Delta t} (u(t + \Delta t) - u(t - \Delta t)) \quad (31)$$

$$\ddot{u} = \frac{1}{2\Delta t} (\dot{u}(t + \Delta t) - \dot{u}(t - \Delta t)) \quad (32)$$



Il metodo delle accelerazioni medie:

Identico alla regola del trapezio.

$$u_{\tau} = u_{t-\Delta t} + \tau \dot{u}_{t-\Delta t} + \frac{\tau^2}{2} \ddot{u}_{t-\Delta t} + \frac{\tau^3}{6} \ddot{\ddot{u}}_{t-\Delta t} + \dots \quad (33)$$

$$\approx u_{t-\Delta t} + \tau \dot{u}_{t-\Delta t} + \frac{\tau^2}{2} \left(\frac{\ddot{u}_{t-\Delta t} + \ddot{u}_t}{2} \right)$$

$$\dot{u}_{\tau} = \dot{u}_{t-\Delta t} + \tau \left(\frac{\ddot{u}_{t-\Delta t} + \ddot{u}_t}{2} \right) \quad (34)$$

Se $\tau = \Delta t$ il metodo delle medie delle accelerazioni coincide con quello di Newmark se $\gamma=1/2$ e $\beta=1/4$

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

Direct Integration

Il metodo Wilson- θ (1973)

Il metodo di Newmark può essere reso incondizionatamente stabile introducendo un fattore θ .

$$\Delta t' = \theta \Delta t \quad (35)$$

$$\ddot{u}_t = \ddot{u}_{t-\Delta t} + \frac{1}{\theta} (\ddot{u}_{t'} - \ddot{u}_{t-\Delta t})$$

$$\dot{u}_t = \dot{u}_{t-\Delta t} + (1-\gamma)\Delta t \ddot{u}_{t-\Delta t} + \gamma \Delta t \ddot{u}_t \quad (36)$$

$$u_t = u_{t-\Delta t} + \Delta t \dot{u}_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t^2(1-2\beta)}{2} \ddot{u}_{t-\Delta t} + \beta \Delta t^2 \ddot{u}_t$$

γ	β	δ	$\Delta t/T_{\min}$	condizione
1/2	0	0	0.3183	eccellente per piccoli Δt instabile per grandi Δt
1/2	1/6	0	0.5513	molto buono per piccoli Δt instabile per grandi Δt
1/2	1/4	0	inf.	buono per piccoli Δt no dissipazione di energia
1/2	1/4	$\Delta t/\pi$	inf.	dissipazione di energia per grandi Δt

Nota: $C = \delta K$

Differenze Centrali

Accelerazione lineare

Accelerazione media

Accelerazione
media modificata

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

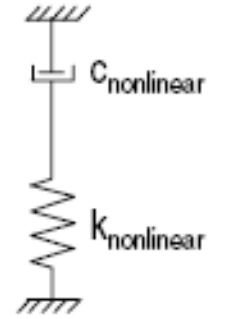
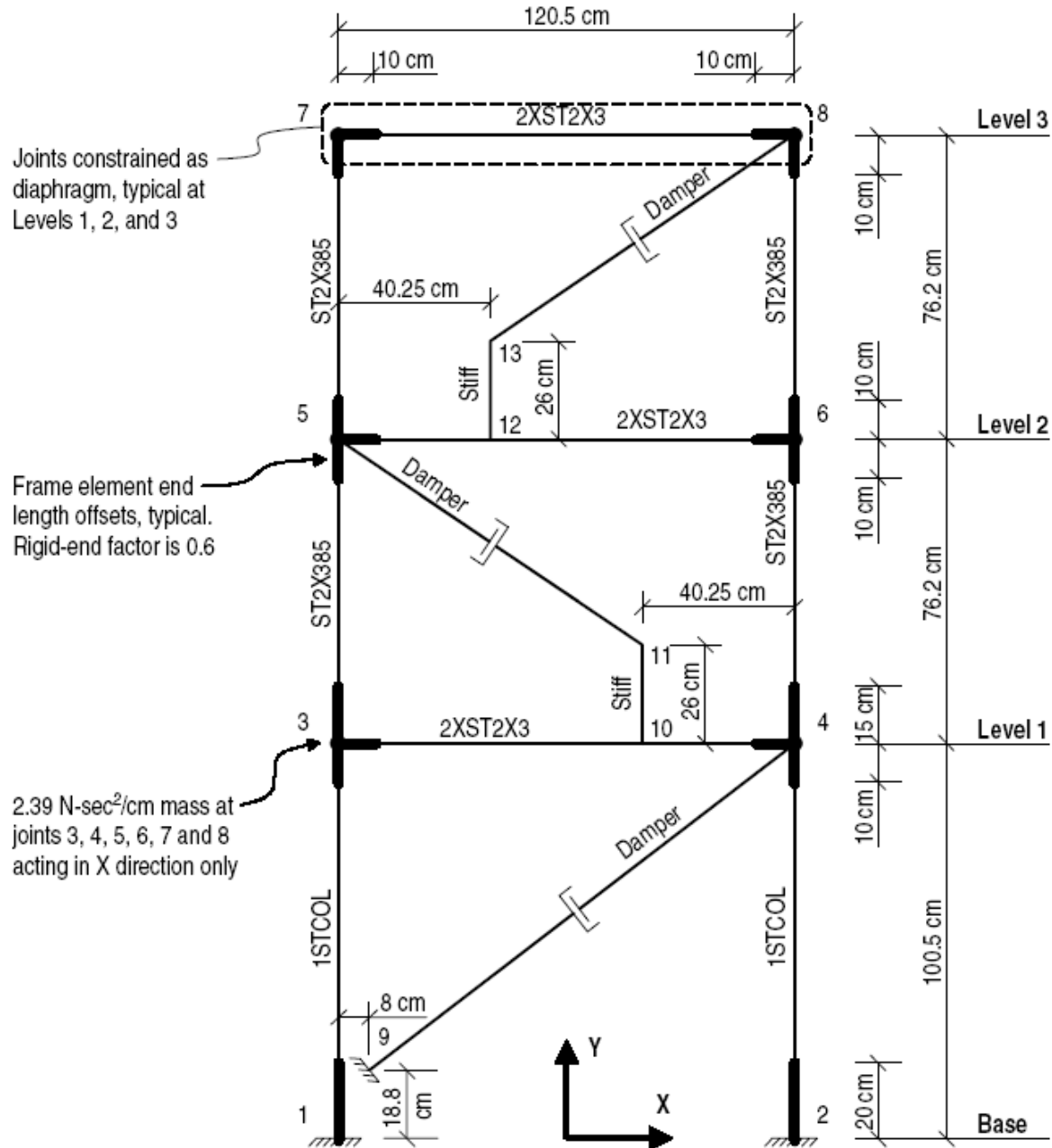
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

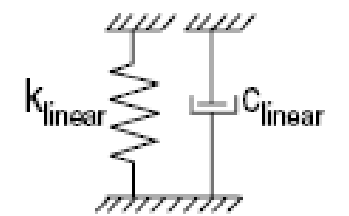
ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

Confronto tra FNA e DI



Damper Properties for Nonlinear Analyses



Damper Properties for Linear Analyses

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

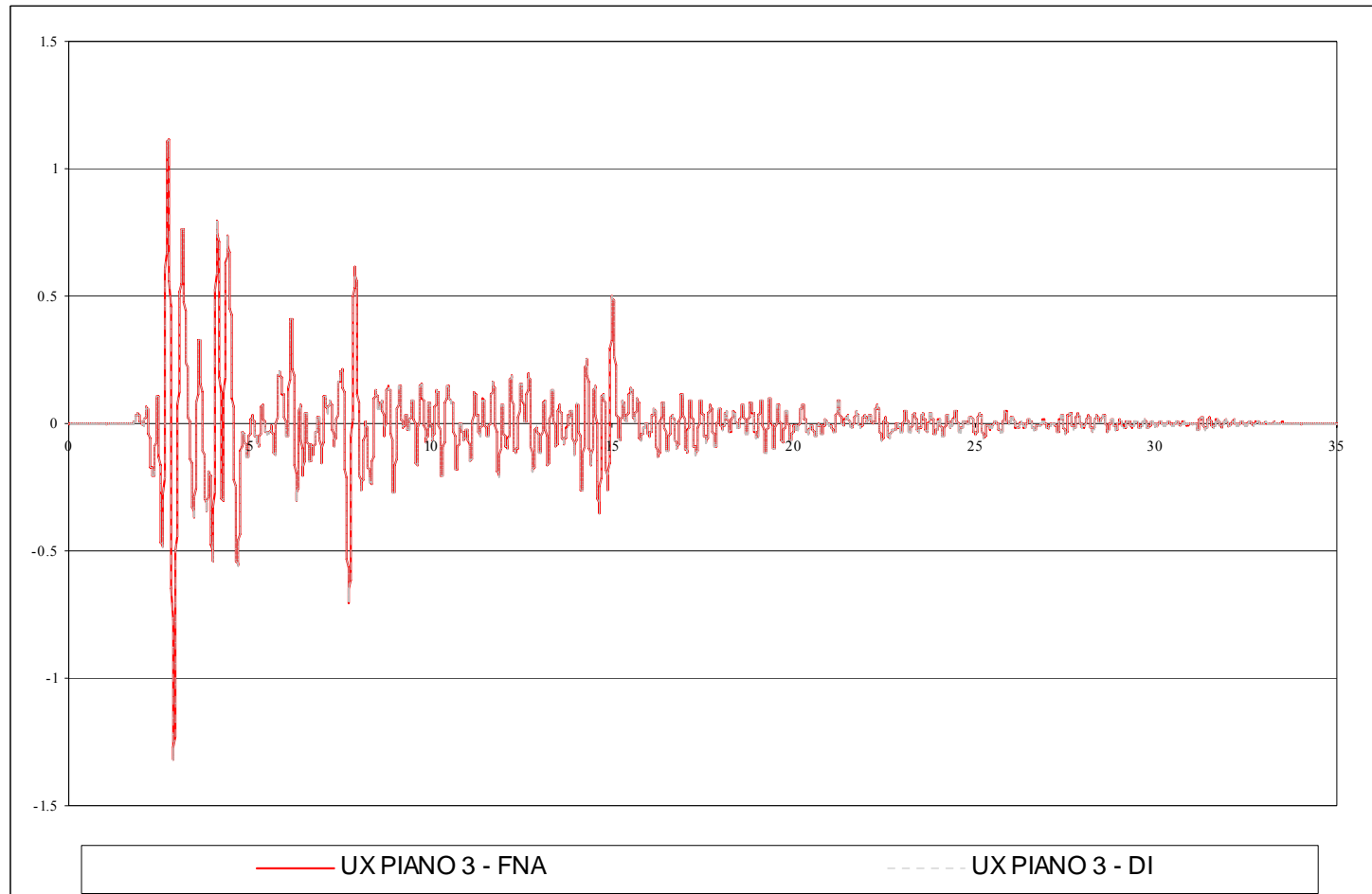
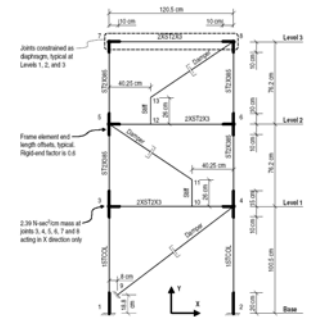
Confronto tra FNA e DI

Durata analisi:
DI: 16 min
FNA: 26 s

MAX SPOSTAMENTO PIANO 3:

-FNA 1.112 cm

-DI 1.111 cm



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

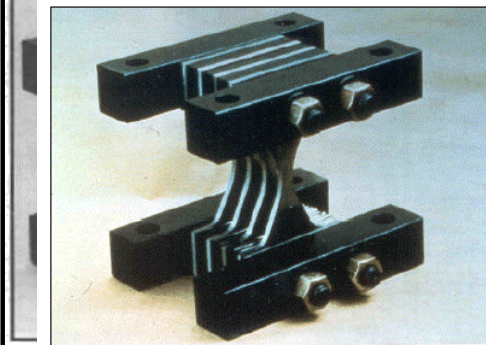
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

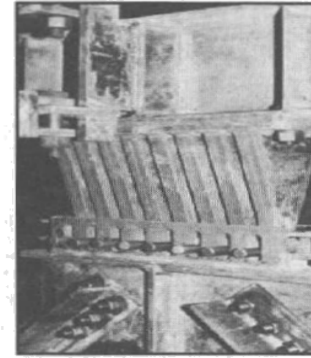
ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

DISPOSITIVI DI DISSIPAZIONE

Dispositivo ADAS:

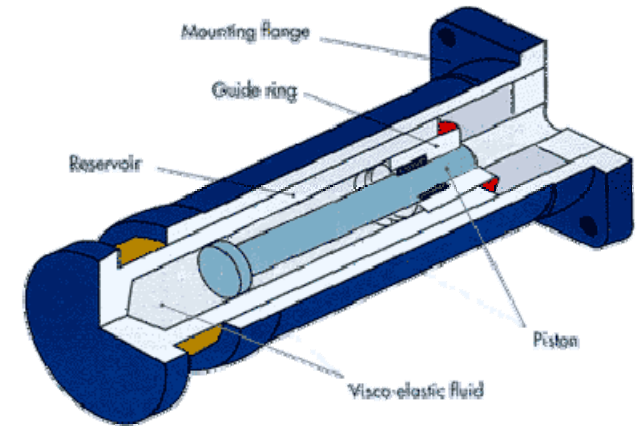


(a) X-shaped Plate Damper

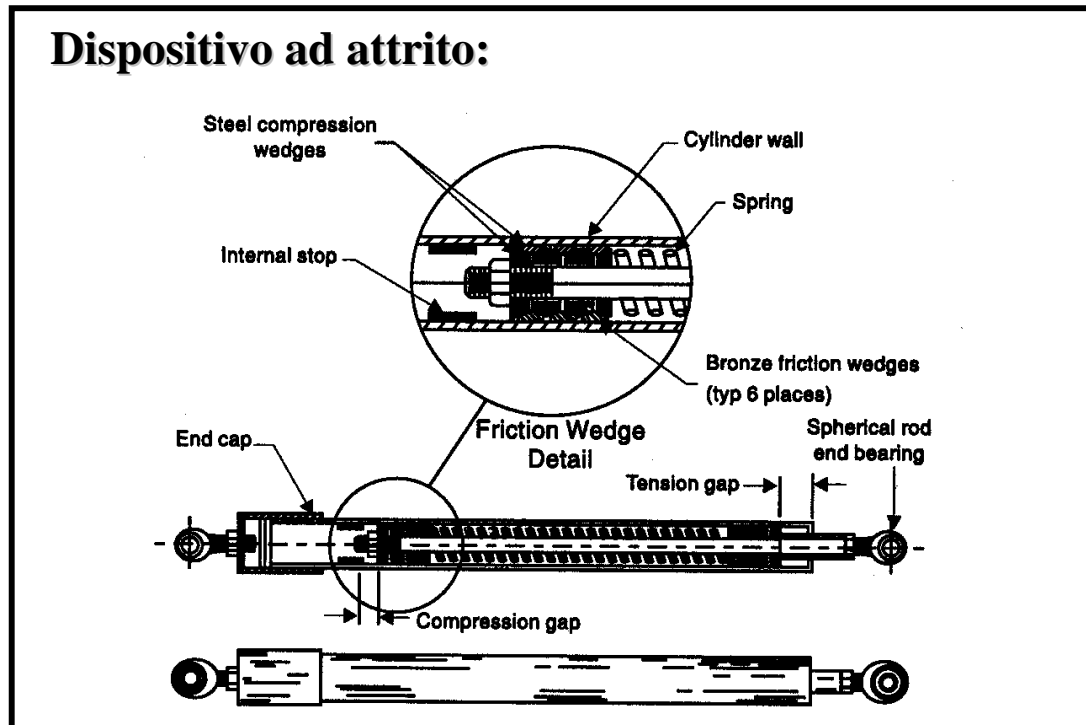


(b) Triangular Plate Damper

Dispositivo SFV:



Dispositivo ad attrito:



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

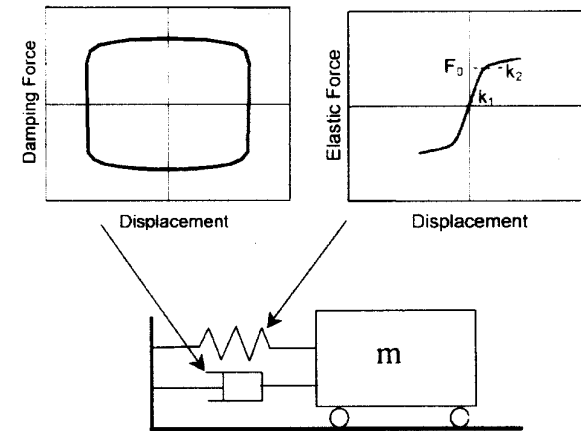
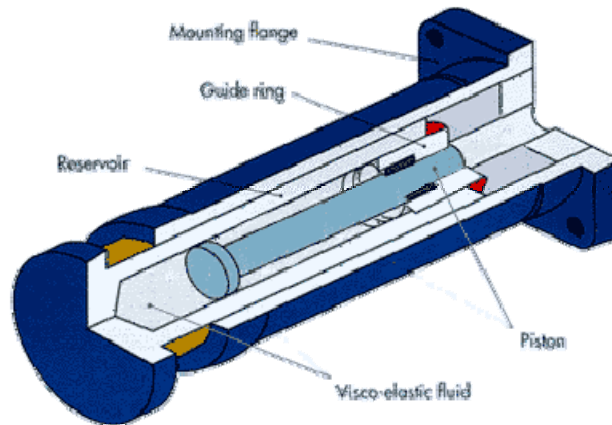
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

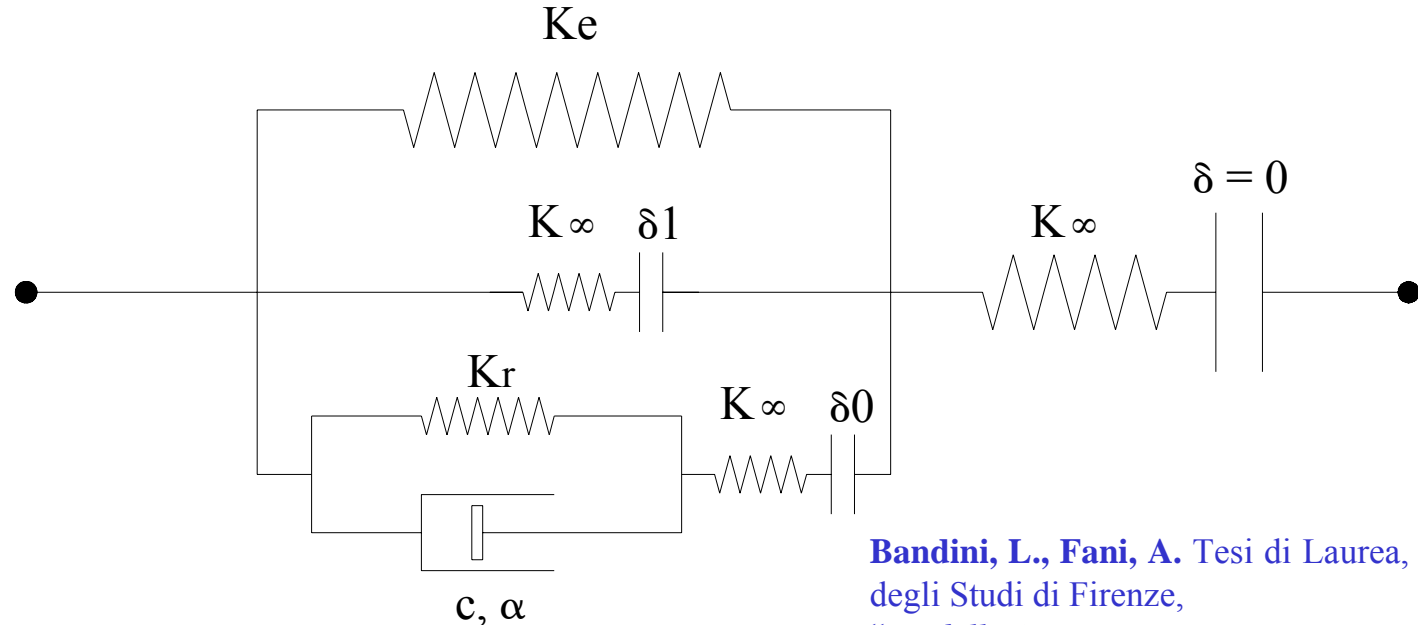
ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO SILICONICO-FLUIDOVISCOSO



Modello computazionale ideato:



Bandini, L., Fani, A. Tesi di Laurea, Università degli Studi di Firenze,
"Modellazione e progettazione ottimale di dispositivi ADAS e siliconici inclusi in controventi dissipative di strutture in acciaio".

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

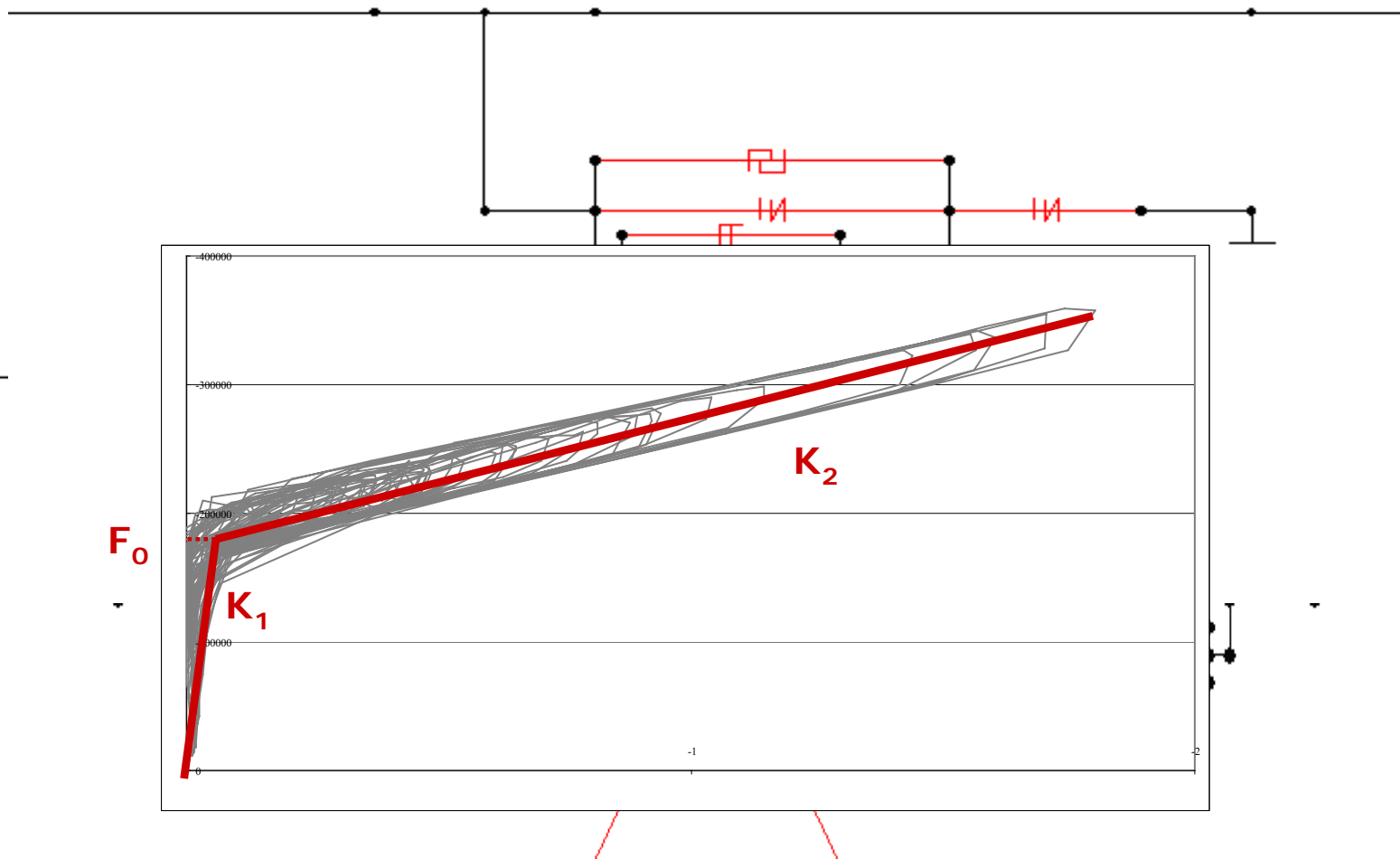
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO SILICONICO-FLUIDOVISCOSO



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

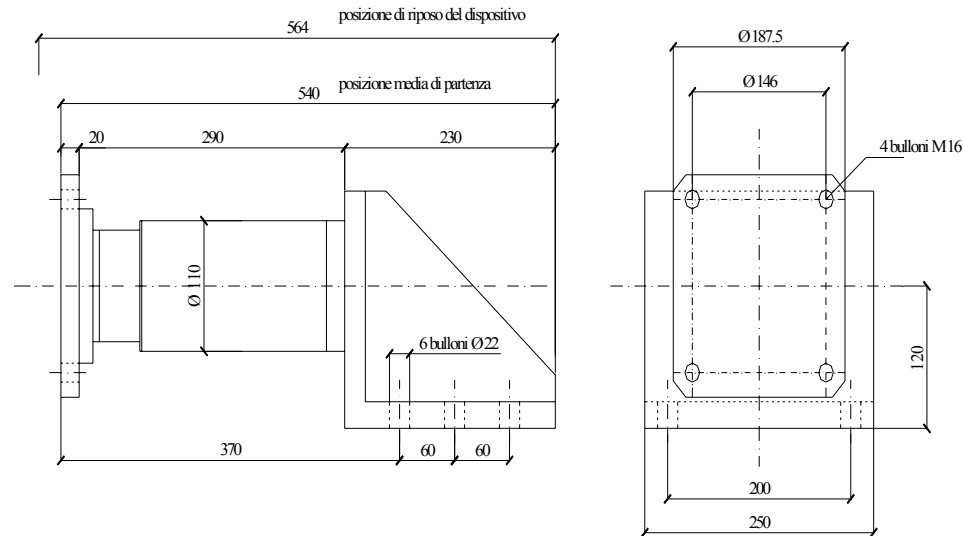
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO SILICONICO-FLUIDOVISCOSO

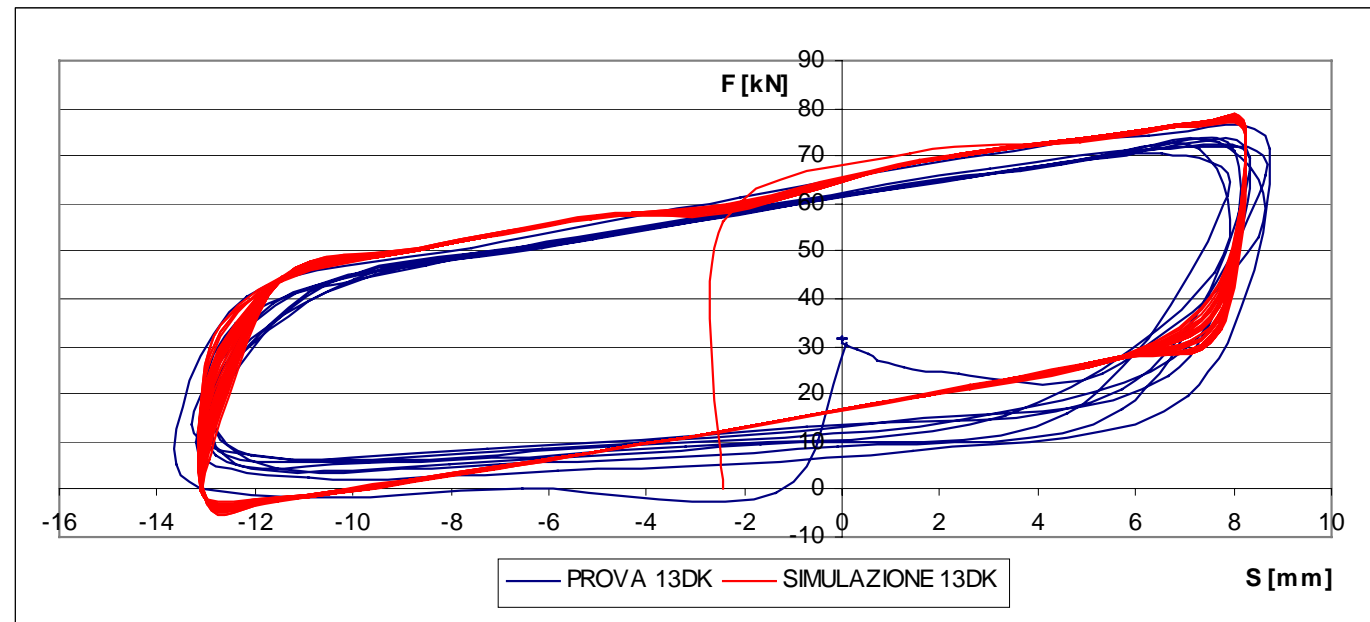


attuatore di tipo MTS 204.63 S/N 751 con caratteristiche di forza massima pari a 100 kN e di corsa pari a ± 120 mm

Forzante sinusoidale:

- Frequenza: 3,00 Hz
- Ampiezza: 10,70 mm
- Velocità: 197,6 mm/s

Terenzi, G., Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Roma, "Effetti dissipativi nell'isolamento sismico".



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

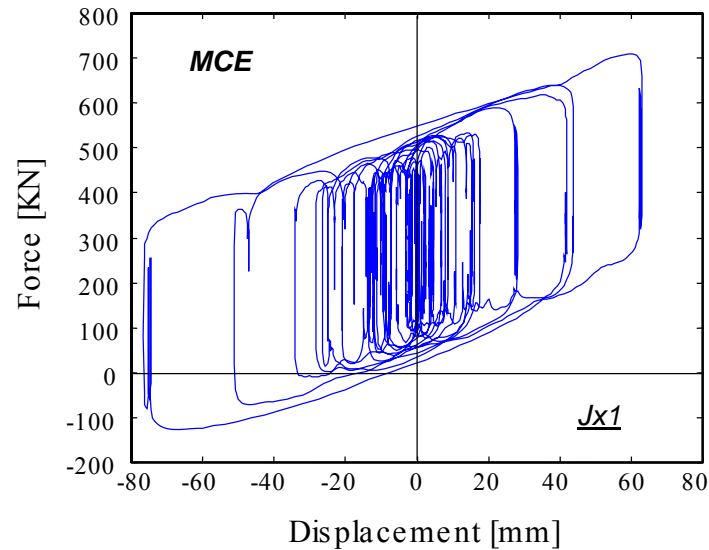
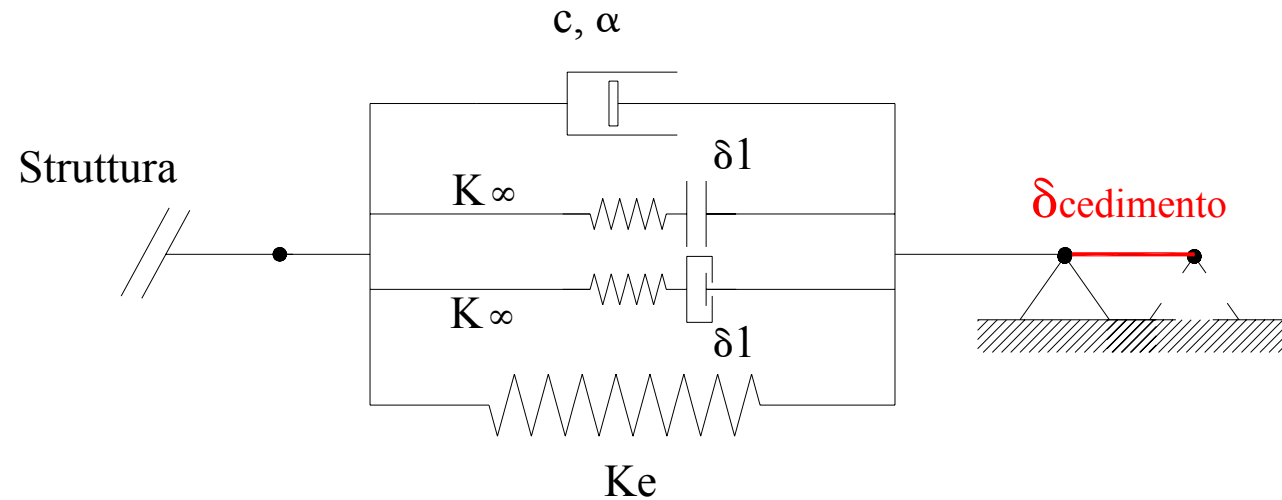
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

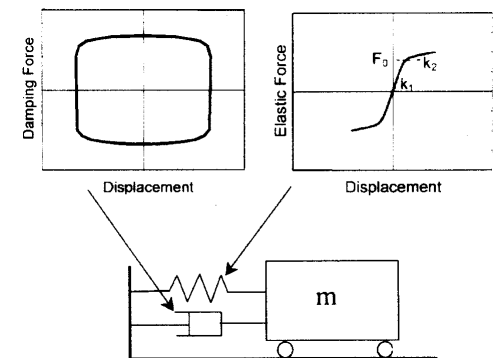
ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO SILICONICO-FLUIDOVISCOSO NUOVO SCHEMA



Pre carico prodotto da una variazione termica, o da un cedimento impresso del vincolo a terra.



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

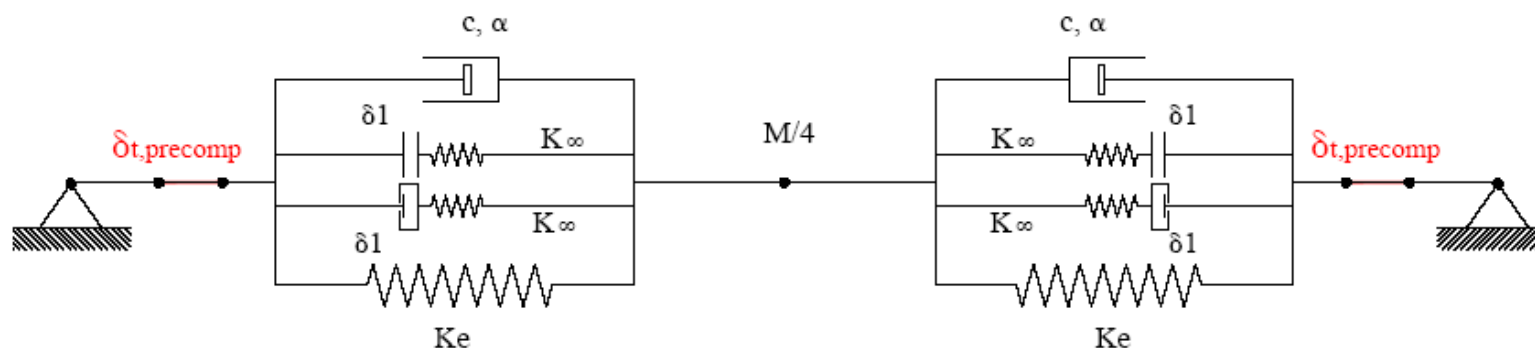
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

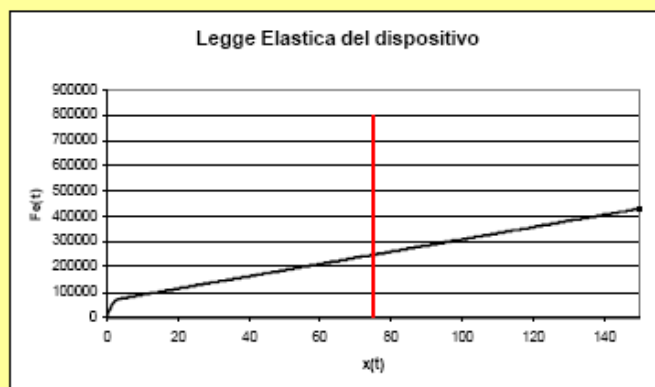
ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO SILICONICO-FLUIDOVISCOSO NUOVO SCHEMA



Caratteristiche		x(t)	Fe(t)
K1=	36525 N/mm	-150	-430583
K2=	2435 N/mm	-75	-247958
F0=	70000 N	-1.9165	-61542.8
X0=	1.916496 mm	0	0
Corsa=	150 mm	1.916496	61542.64
X0'=	75 mm	75	247958.3
R=	5	150	430583.3



Precompressione a riposo: 70 kN

Corsa 75 mm (a riposo 150 mm):

Hook, Gap

Fase elastica:

Multilinear elastic

$K_e = 2435 \text{ kN/m}$

K_{nl} definita bilineare

Fase viscosa:

Damper

$K_{el} = 0$

$K_{nl} = 100000 \text{ kN/m}$

$C = 58 \text{ kN(s/mm)}^\alpha$

$\alpha = 0.15$

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

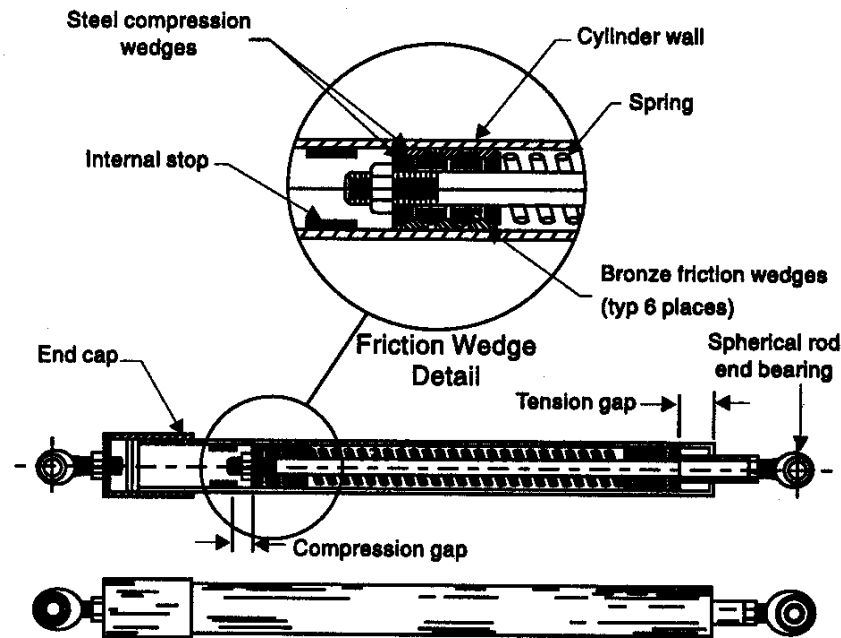
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

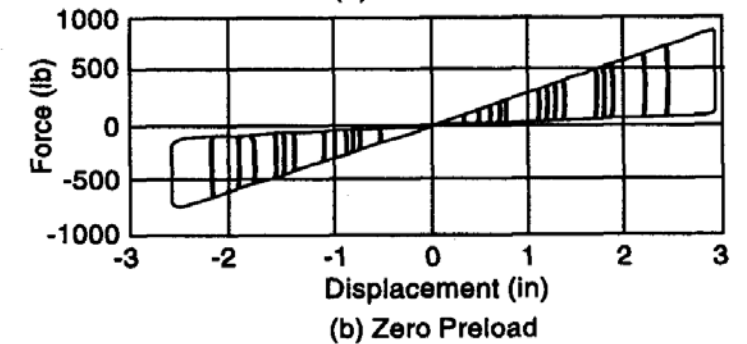
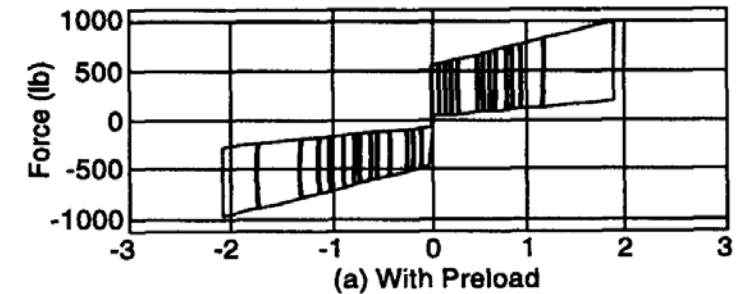
ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO CON MOLLE AD ATTRITO PRECARICATE



Di seguito verrà fatto riferimento ai cicli sperimentali ottenuti su un "Friction Spring Seismic Damper" riportati in "Performance Evaluation of Friction Spring Seismic Damper" di A. Filiatrault, R Tremblay, R. Kar

Filiatrault, A., Tremblay, R., Kar, R. (2000).

Performance Evaluation of Friction Spring Seismic Damper, Journal of Structural Engineering, Aprile 2000, n°491.



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

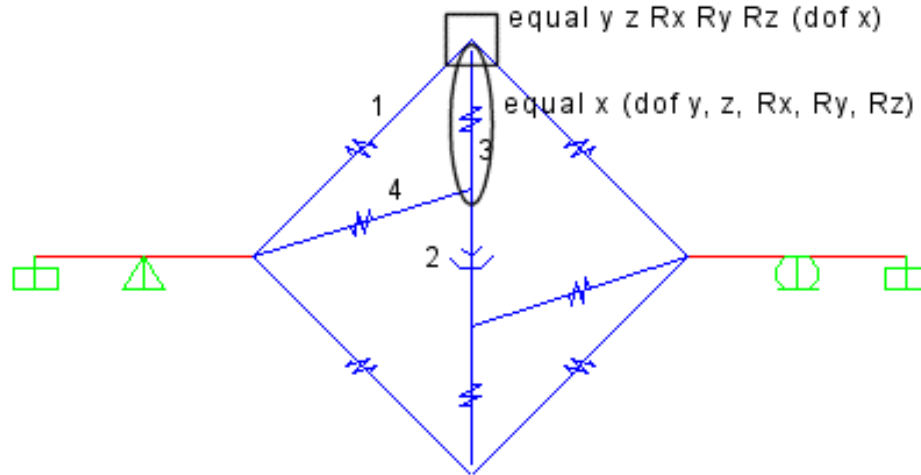
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

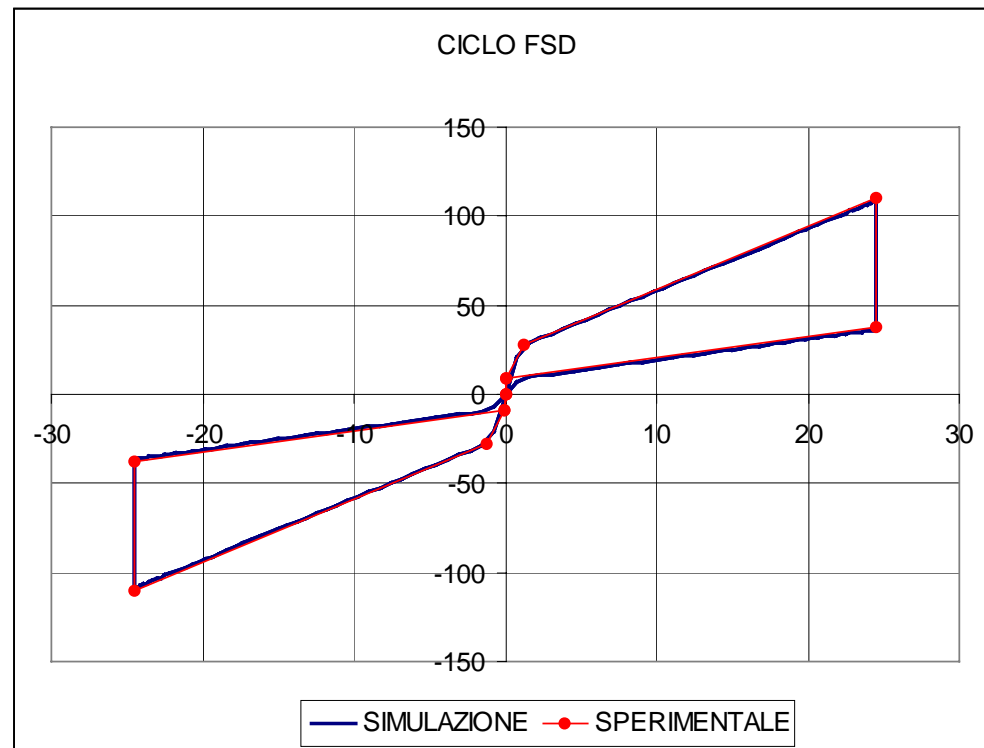
ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO CON MOLLE AD ATTRITO PRECARICATE



- 1: biella infinitamente rigida assialmente (inclinata a 45°)
- 2: elemento ad attrito - T/C
 - coefficiente slow: 0.5
 - coefficiente fast: 0.01
 - coefficiente r: 0 (indip. v)
 - superficie di scorrimento per l'effetto pendolare: piana
- 3: elemento multilineare con legge bilatera
- 4: beam infinitamente rigida



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

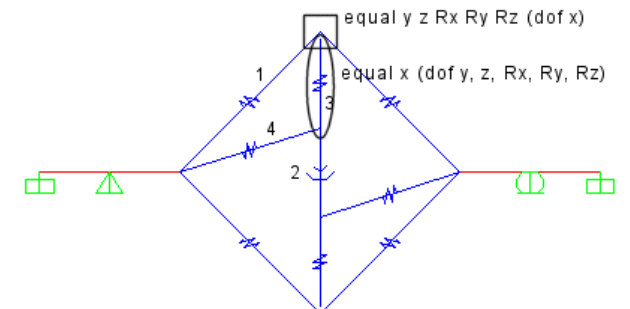
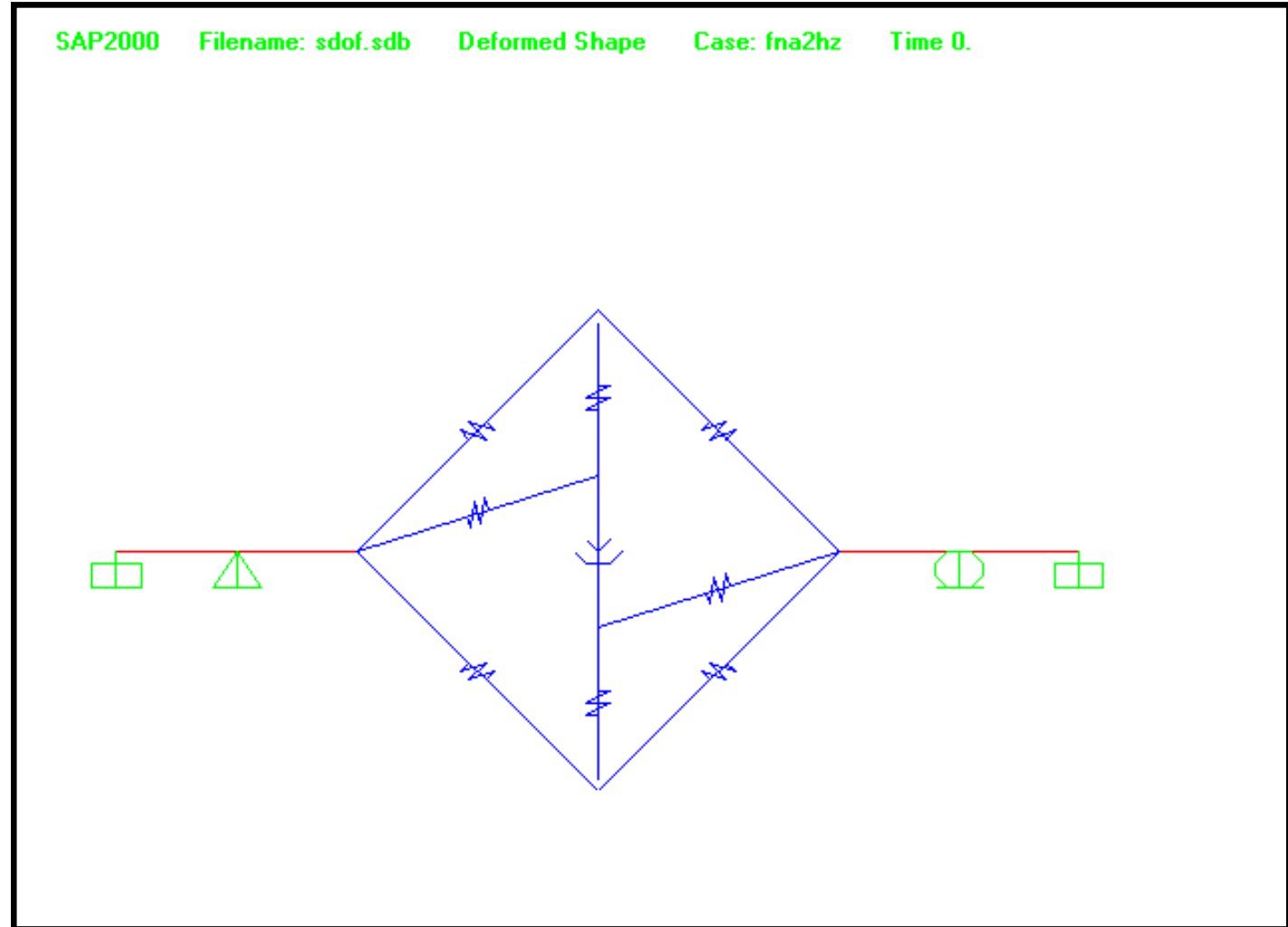
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO CON MOLLE AD ATTRITO PRECARICATE



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

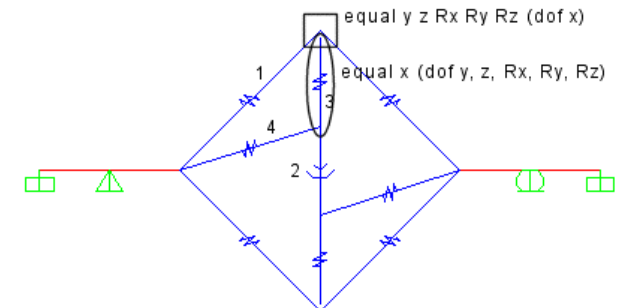
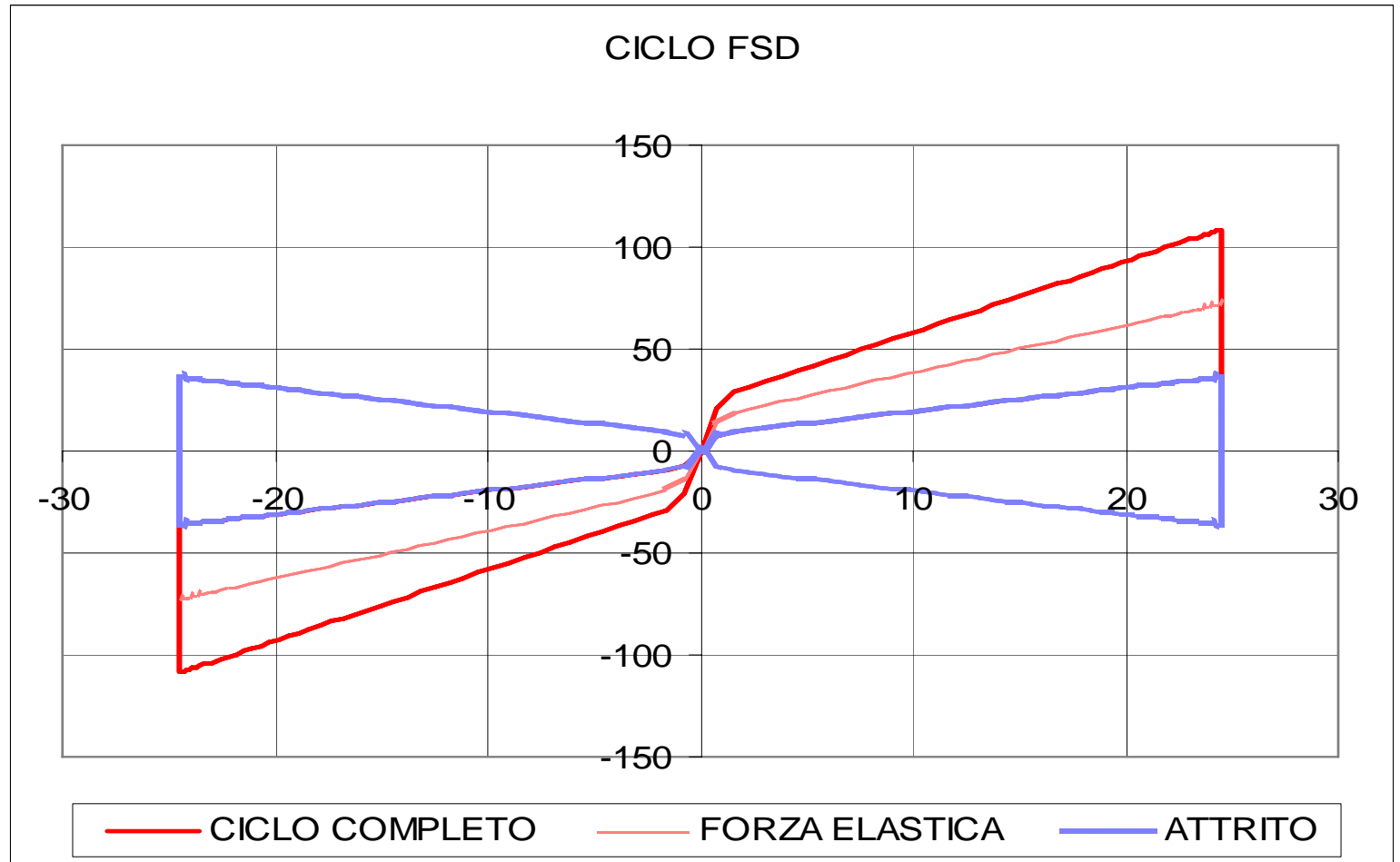
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO CON MOLLE AD ATTRITO PRECARICATE



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

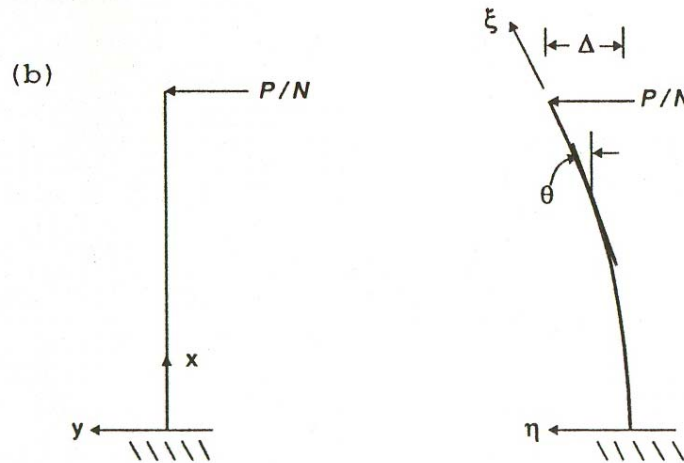
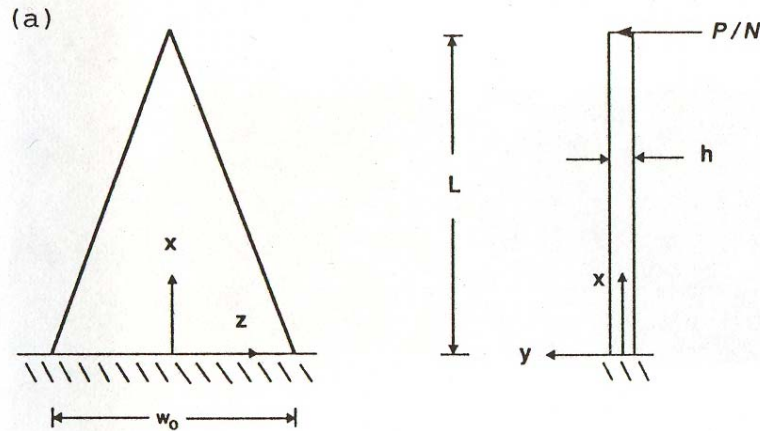
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

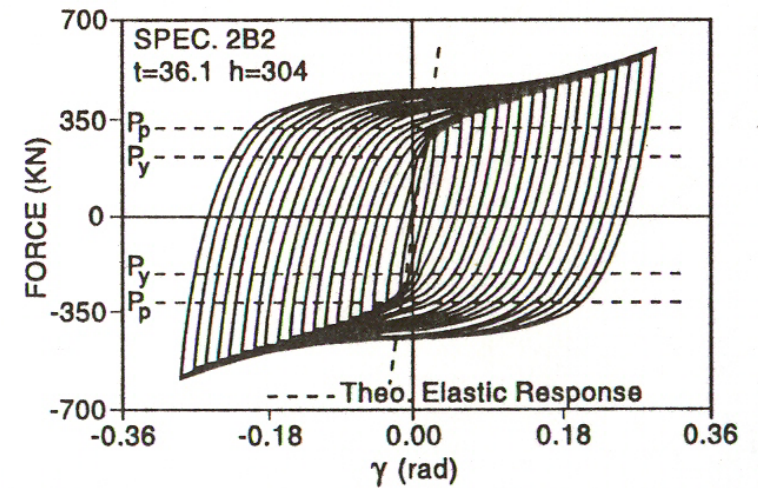
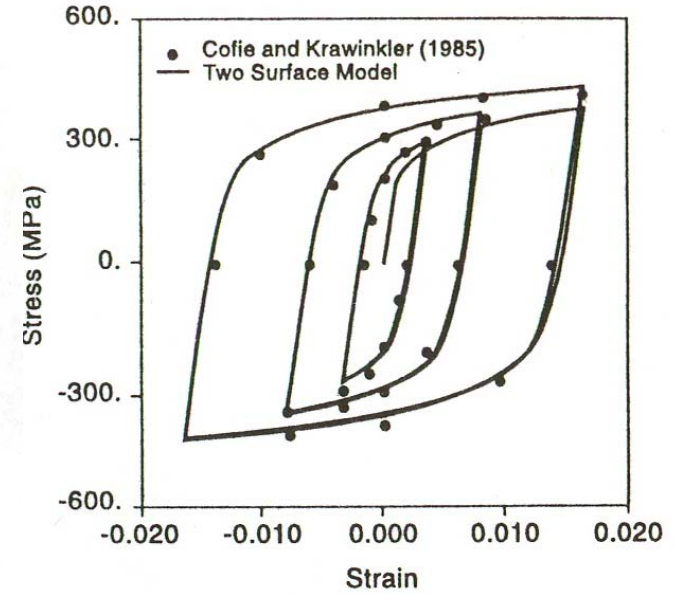
ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO ADAS

Soong, T.T., Dargush, G.F. (1997).
Passive Energy Dissipation Systems in structural Engineering, 35-81.



Acciaio tipo ASTM A36:



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

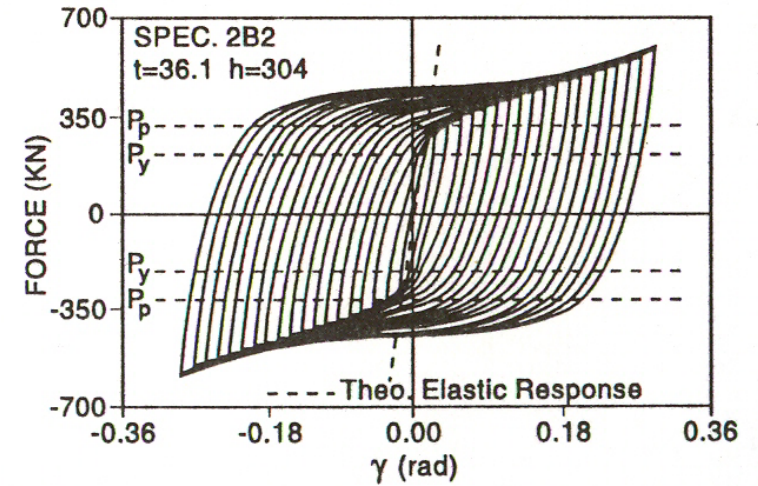
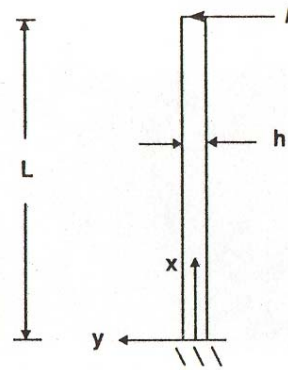
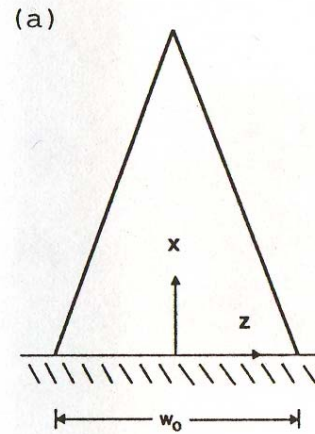
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO ADAS

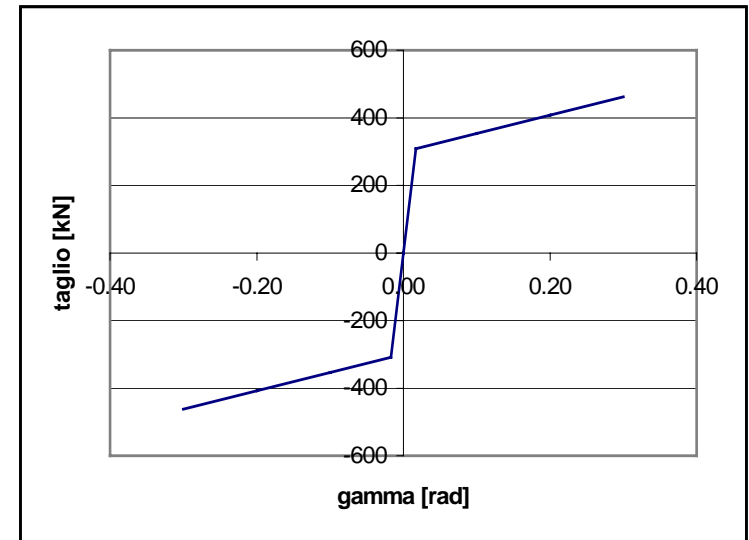


N	8		
E	200000 N/mm ²		
w0	133.3 mm	gamma	Delta [mm] F [kN]
L	304 mm	-0.30	-91.20 -462.181
h	36.1 mm	-0.20	-60.80 -407.8942
sigma_y	270 N/mm ²	-0.10	-30.40 -353.6073
k1=P/(D)	59525.05 N/mm	-0.02	-5.18 -308.5778
beta	0.03	0.00	0.00 0
k2	1785.751 N/mm	0.02	5.18 308.5778
Pu	308577.8 N	0.10	30.40 353.6073
Du	5.184 mm	0.20	60.80 407.8942
		0.30	91.20 462.181

$$k_1 = P / D = \frac{E \cdot \omega_0 \cdot h^3}{6L^3} \cdot N$$

$$k_2 = \beta \cdot k_1$$

$$P_u = \frac{N \sigma_y \cdot \omega_0 \cdot h^2}{4L}$$



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

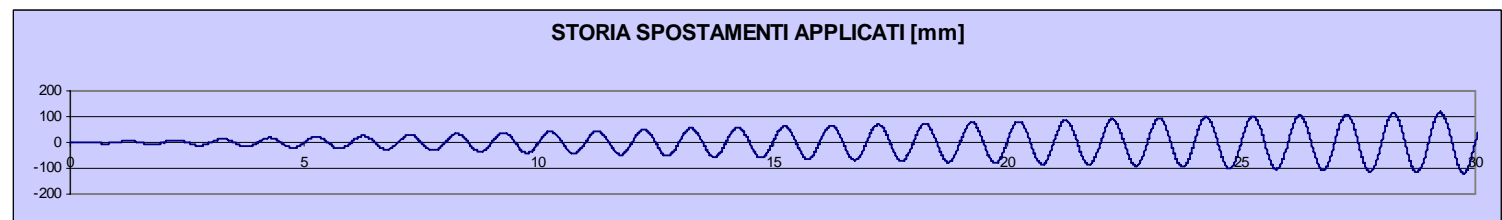
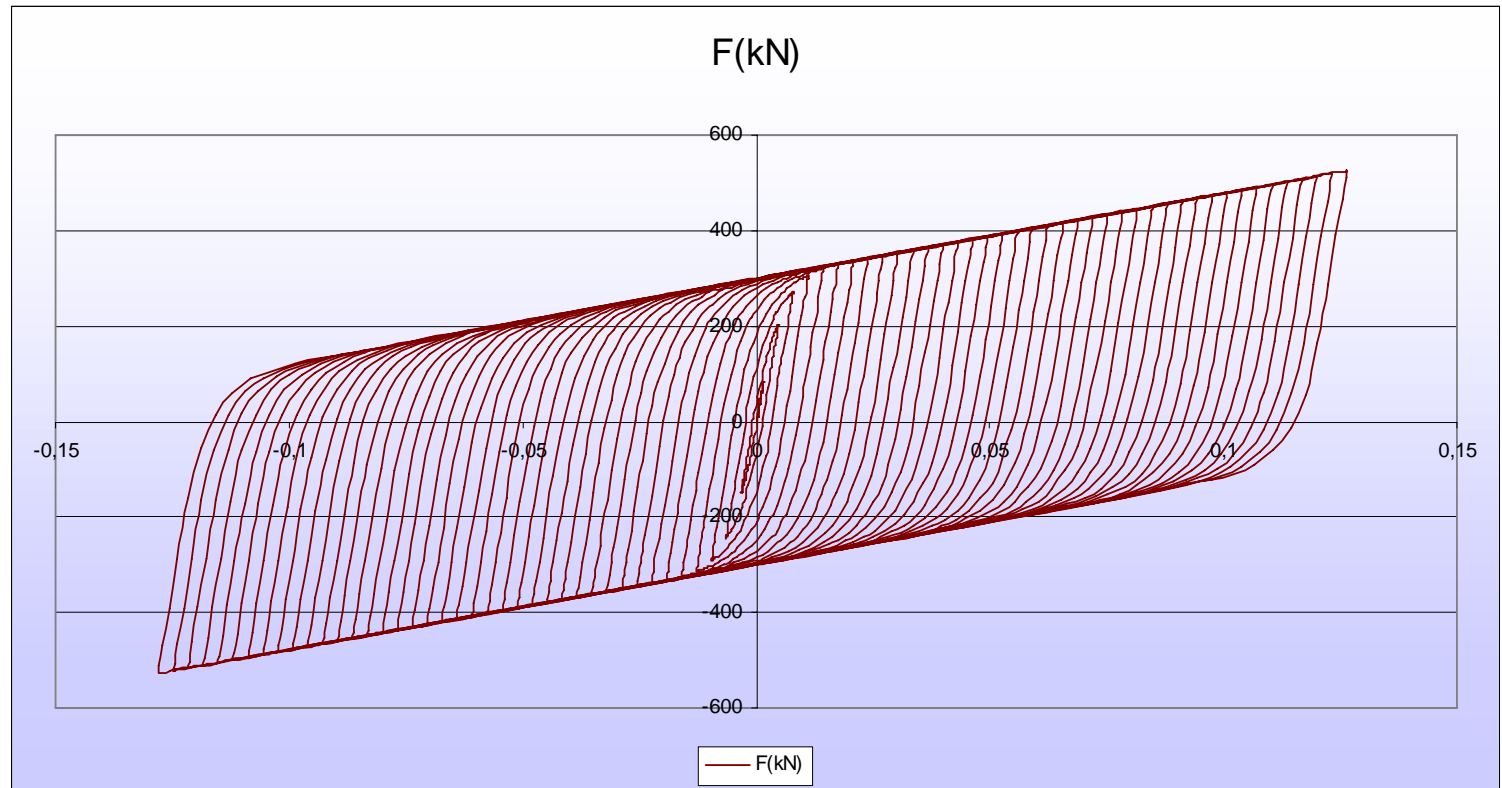
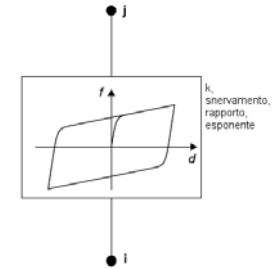
DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO ADAS

Elemento Plastic-WEN



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

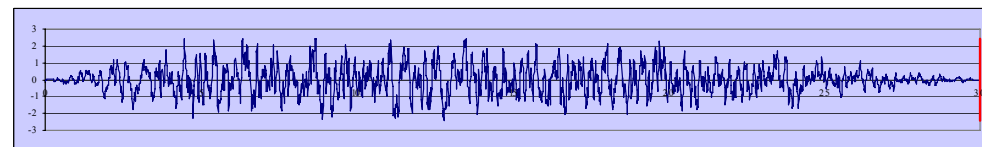
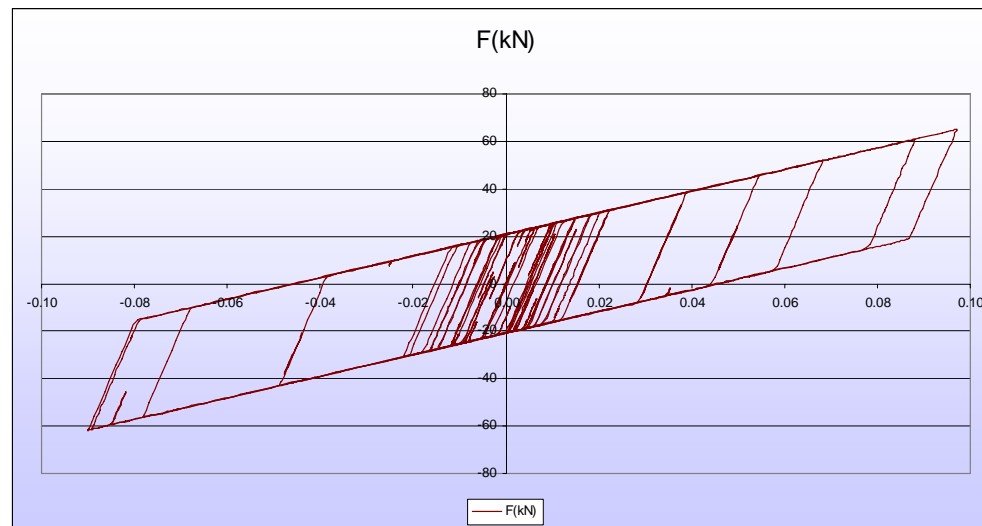
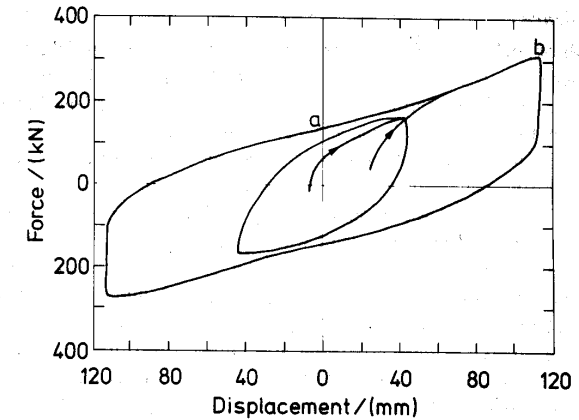
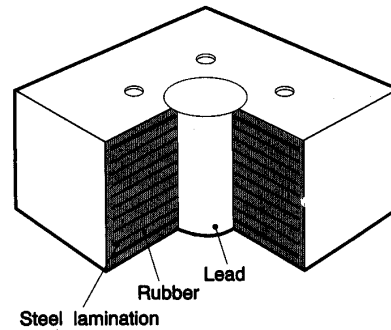
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

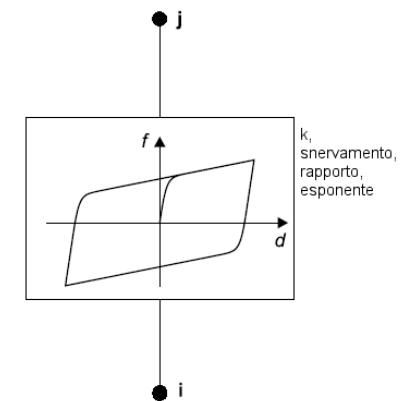
ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO ELASTOMERICO CON NUCLEO IN PIOMBO



Elemento Plastic-WEN



$$K1 = 4555 \text{ N/mm}$$

$$K2 = 455.5 \text{ N/mm}$$

$$Fy = 23100 \text{ N}$$

$$Exp = 20$$

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

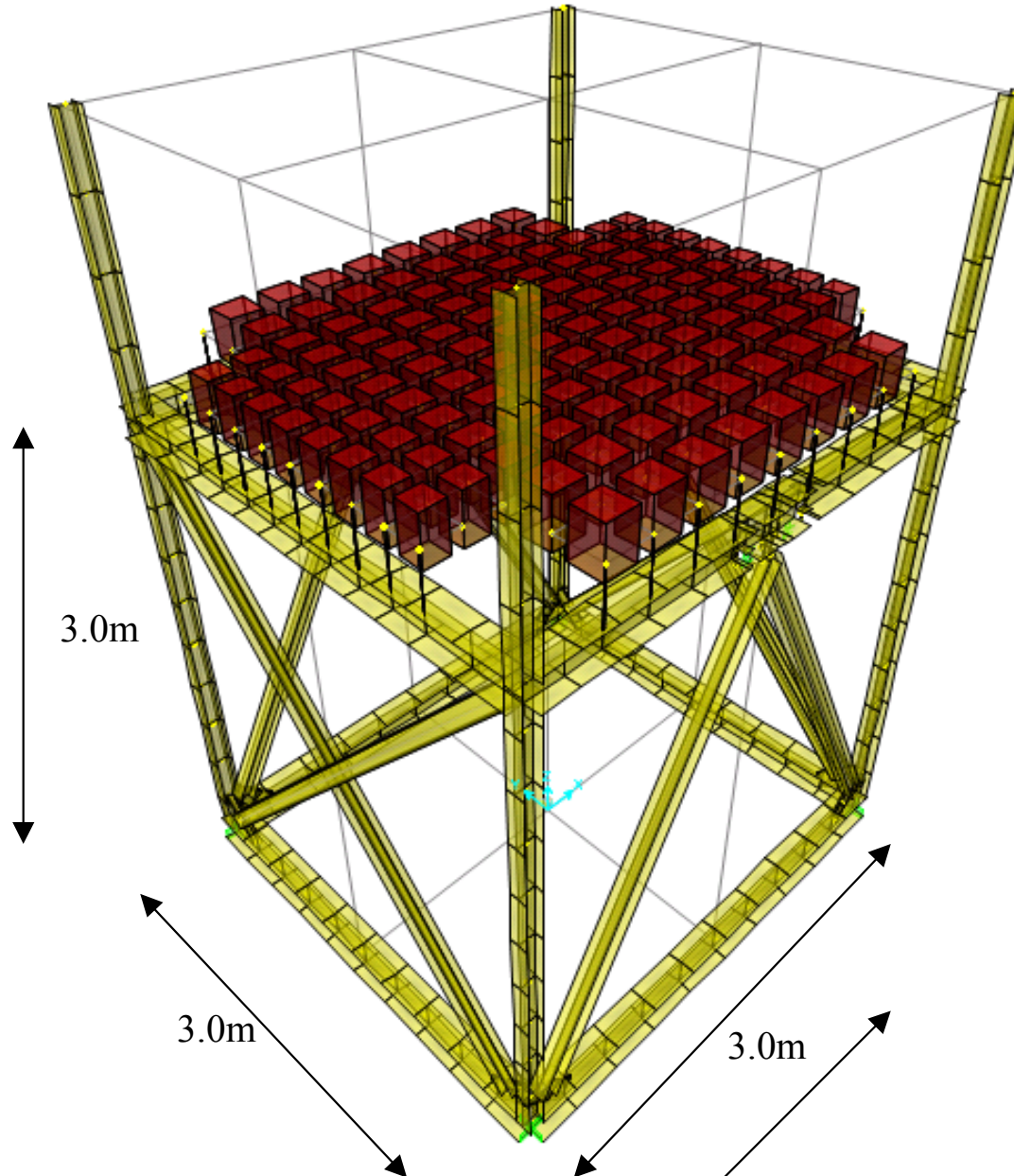
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ESEMPIO APPLICATIVO: (telaio PROGETTO Neforee)



Massa disposta lumped sui nodi degli elementi bidimensionali utilizzati per modellare l'impalcato.

Htot: 4.50m

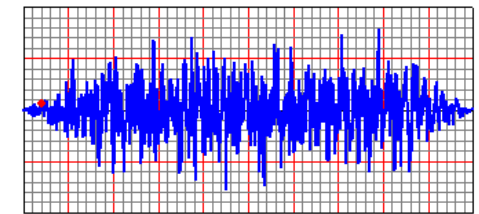
Himp: 3.0m

Massa totale: 824 kgs²/m

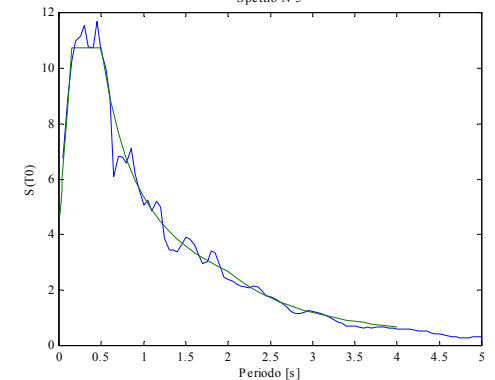
**Accelerogramma Zona 1
terreno B**

spetrocompatibile

OPCM3274



Spettro N°5



Direzione protetta da controventi dissipativi

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

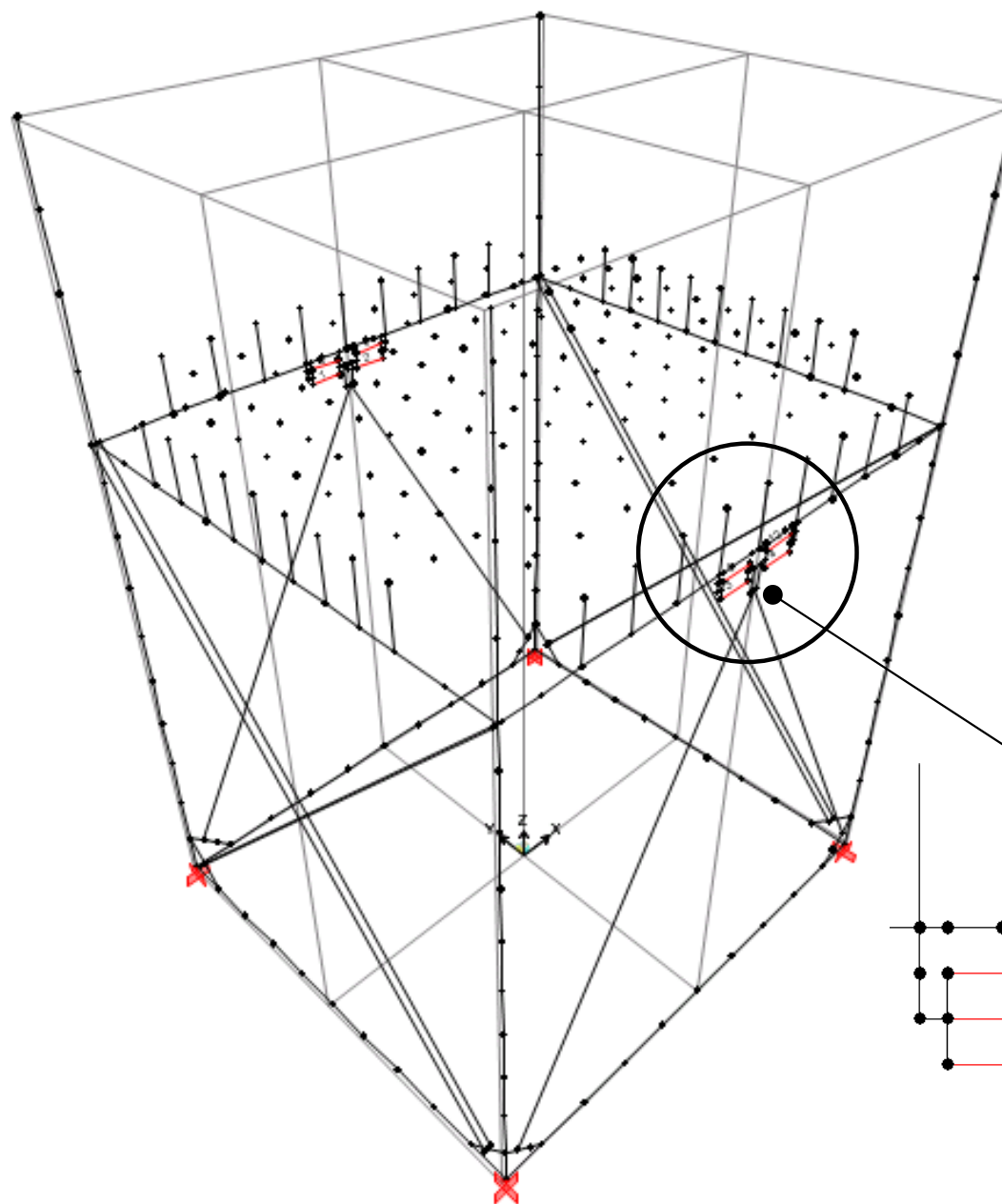
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ESEMPIO APPLICATIVO: (telaio PROGETTO Neforee)



Dispositivi JARRET tipo BC1BN

corsa = 25 mm

$C = 279 \text{ Kg/(s/cm)}^\alpha = 1.76 \text{ KN/(s/mm)}^\alpha$

$\alpha = 0.2$

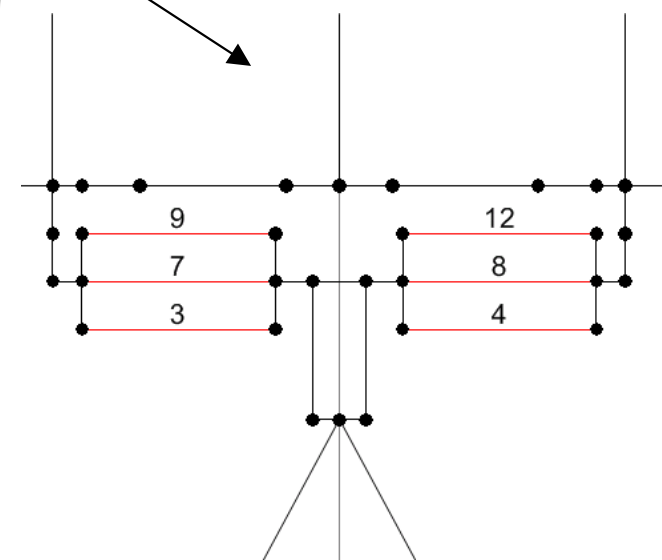
$K = 0.52 \text{ KN/mm}$

$F_0 = 280 \text{ Kg} = 2.8 \text{ KN.}$

9, 12 sono elementi elastici
multilineari

3, 4 sono elementi
"Damper" definiti come non
lineari

7, 8 sono elementi "GAP"
con la funzione di fine
corsa



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

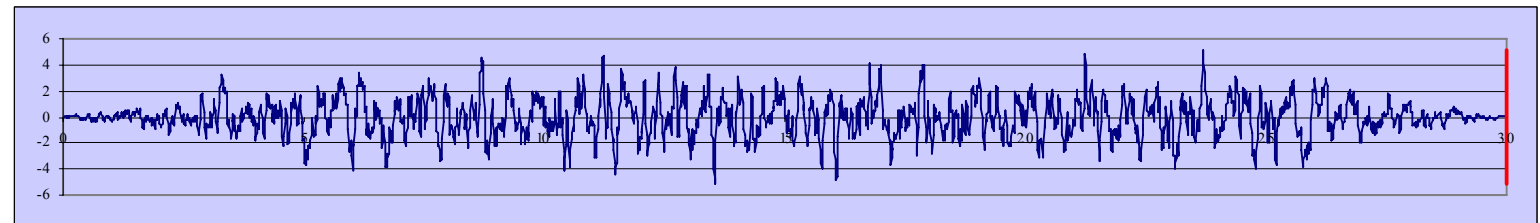
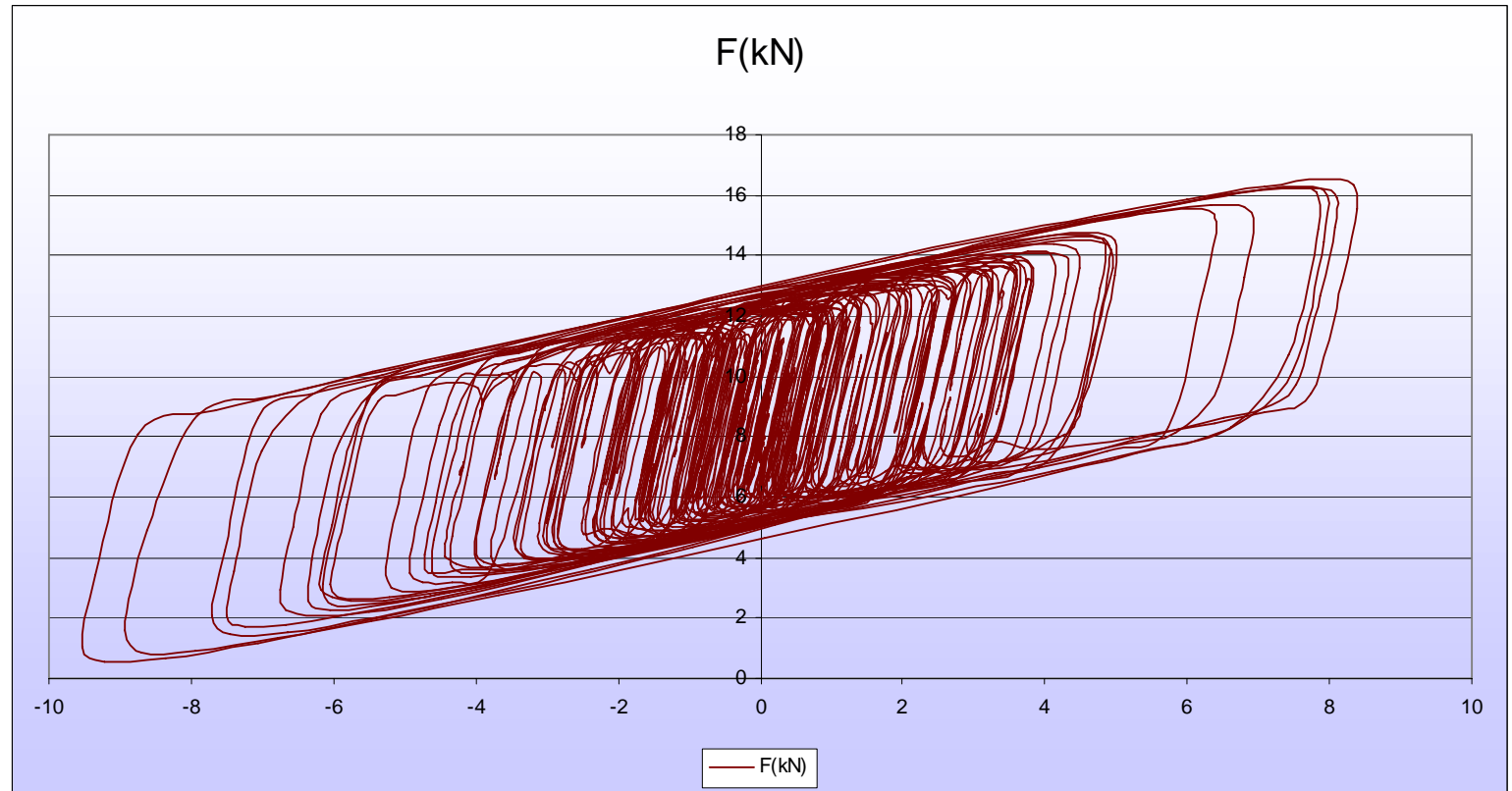
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ESEMPIO APPLICATIVO: (telaio PROGETTO Neforee)



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

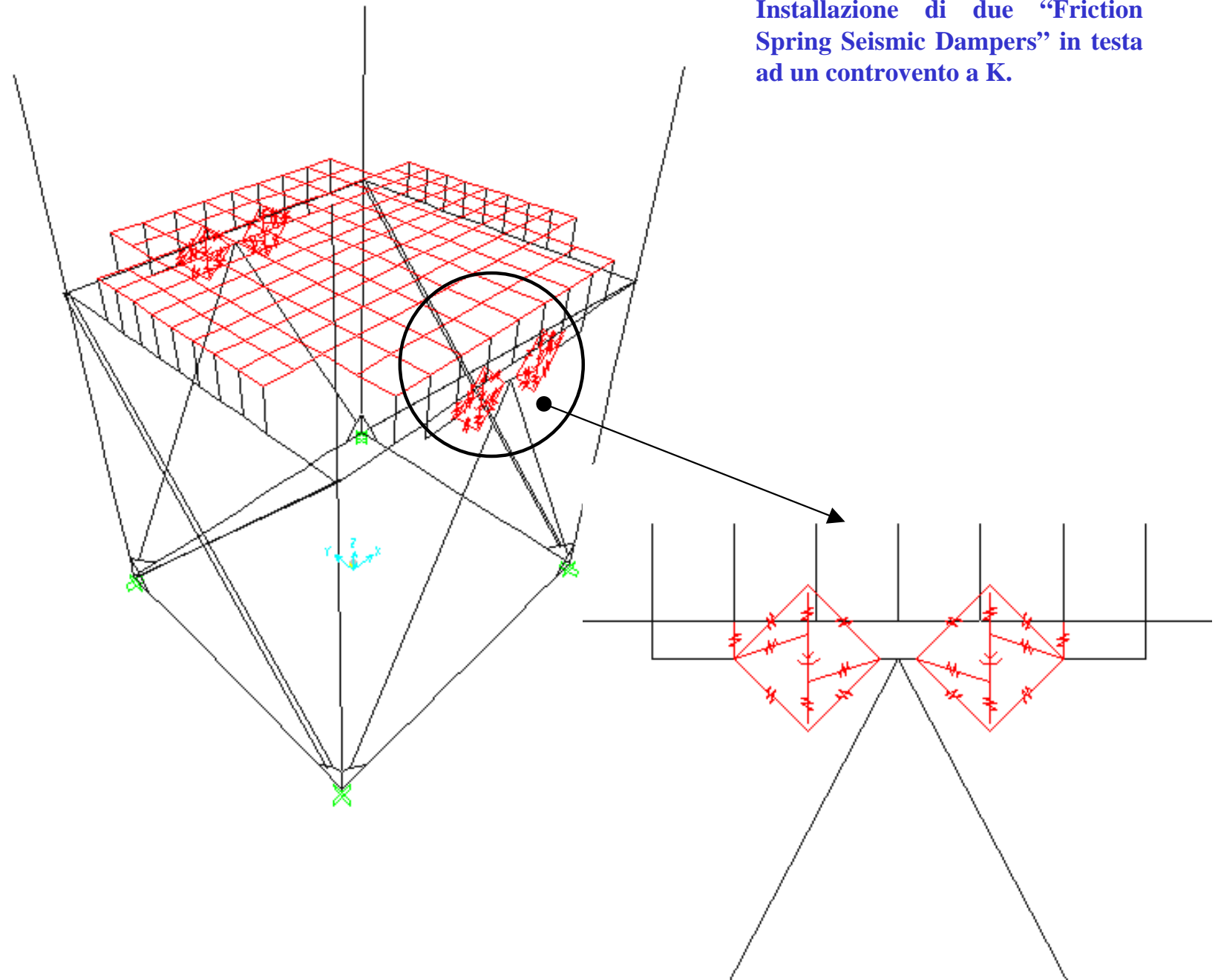
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ESEMPIO APPLICATIVO: (telaio PROGETTO Neforee)



Installazione di due "Friction Spring Seismic Dampers" in testa ad un controvento a K.

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

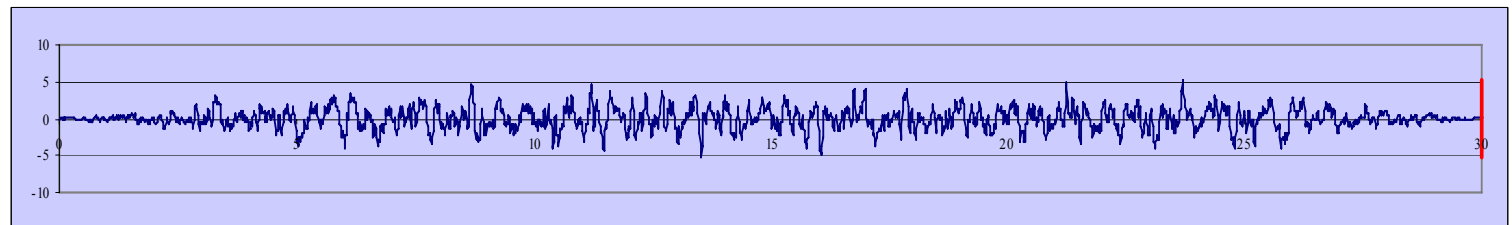
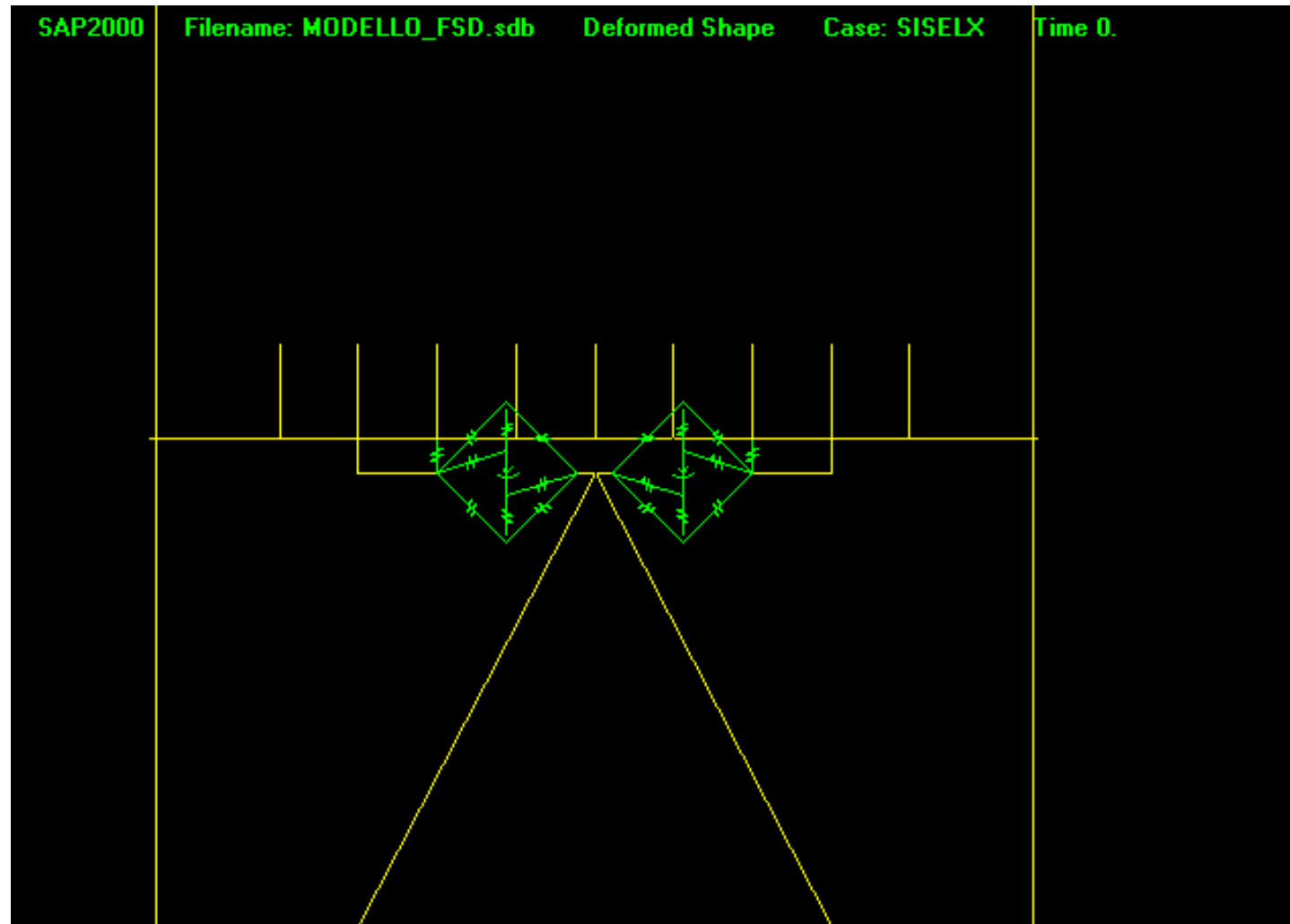
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ESEMPIO APPLICATIVO: (telaio PROGETTO Neforee)



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

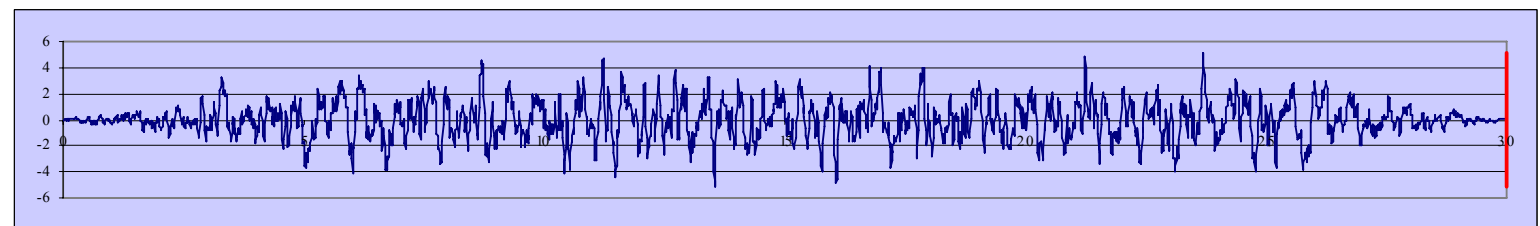
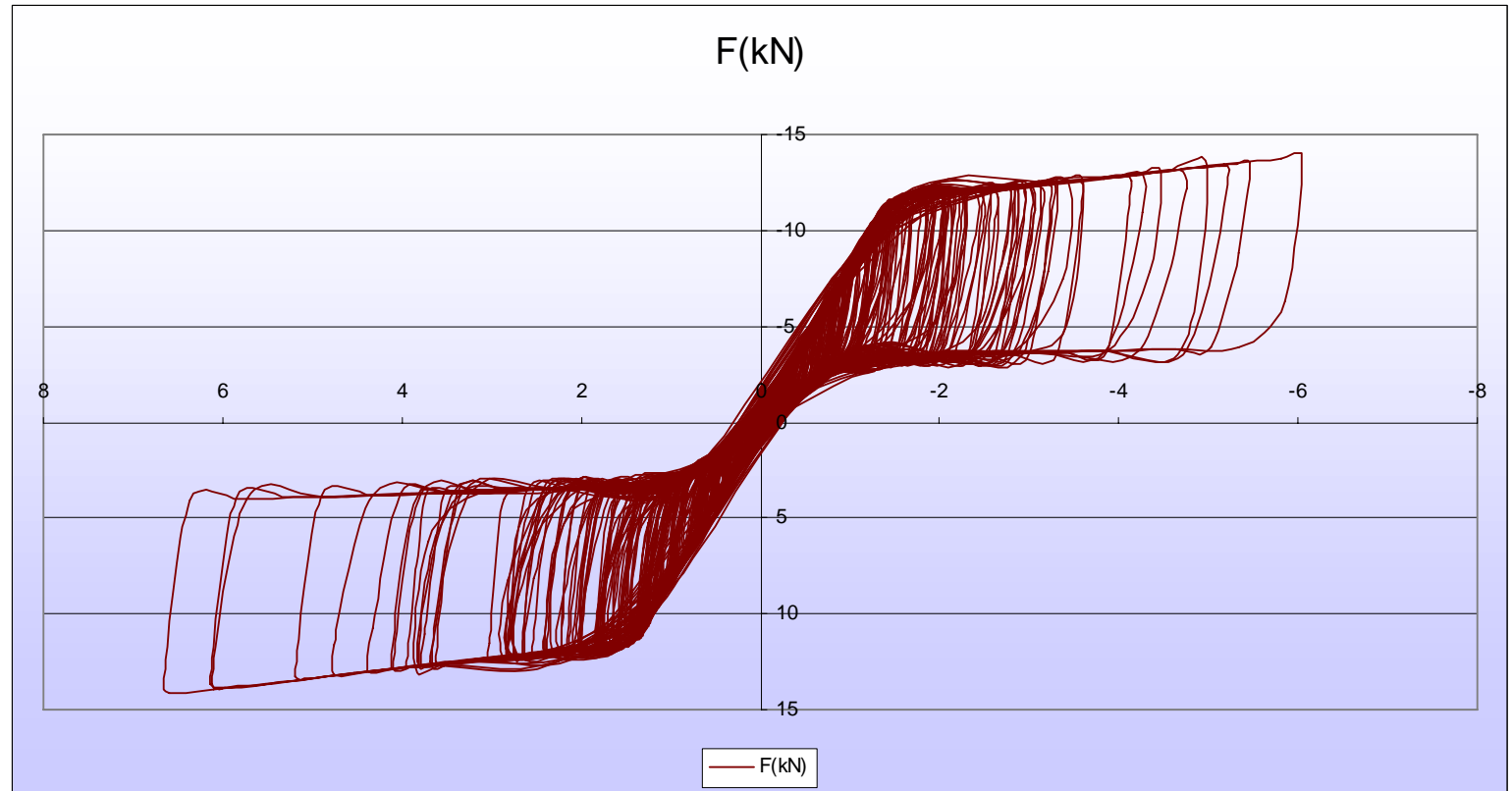
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ESEMPIO APPLICATIVO: (telaio PROGETTO Neforee)



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

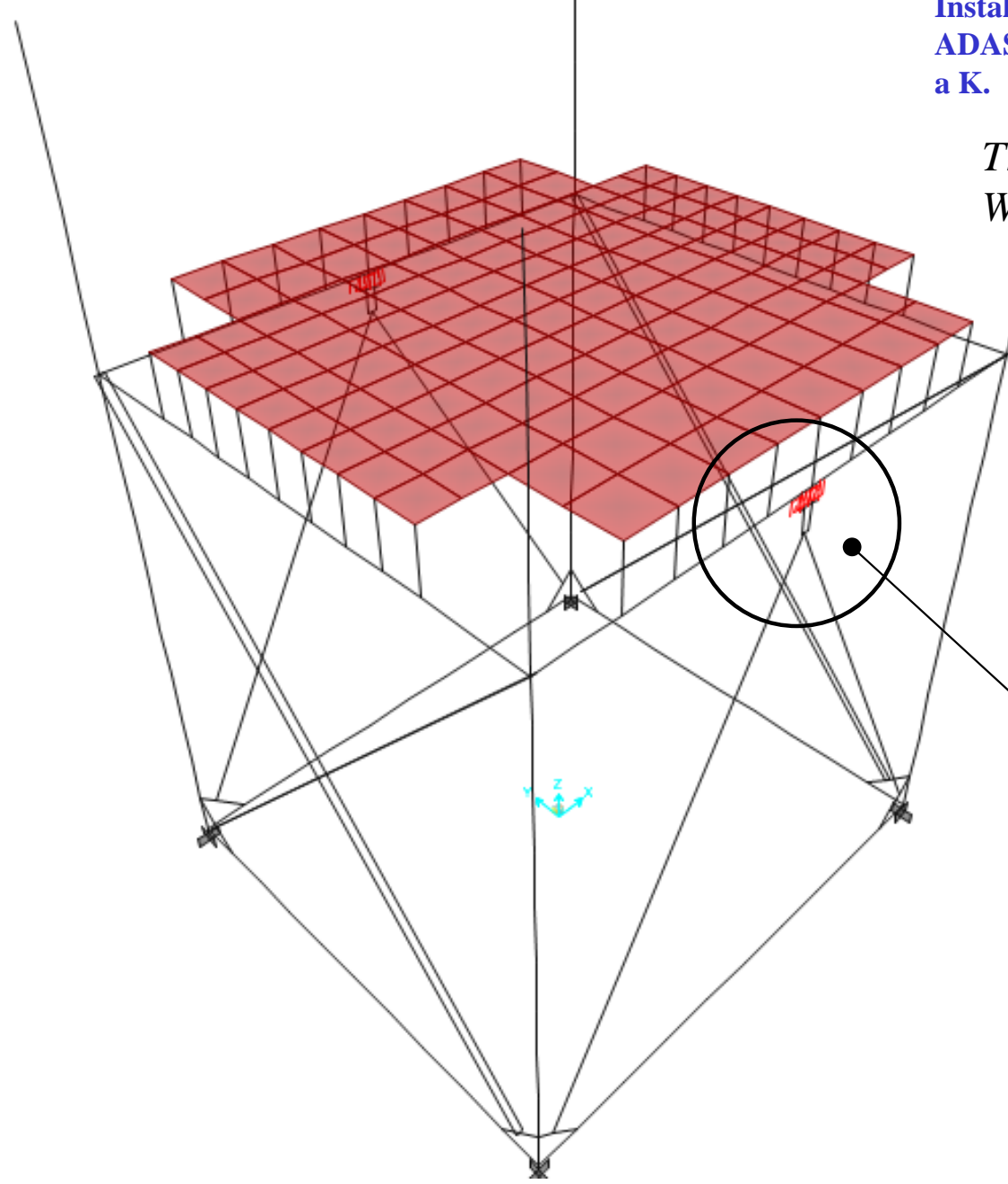
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

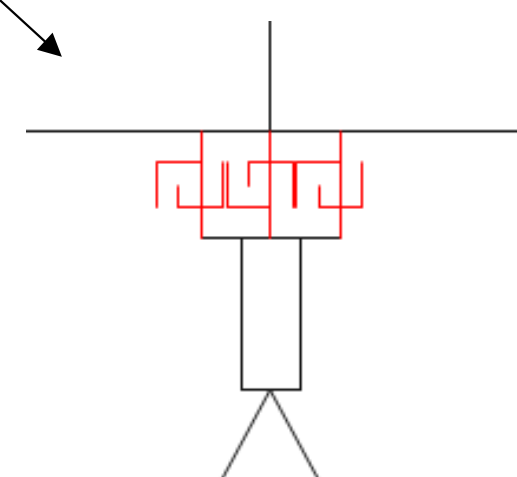
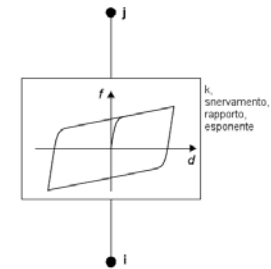
ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ESEMPIO APPLICATIVO: (telaio PROGETTO Neforee)



Installazione di due "Triangular ADAS" in testa ad un controvento a K.

Tre Elementi Plastic-WEN per controvento



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

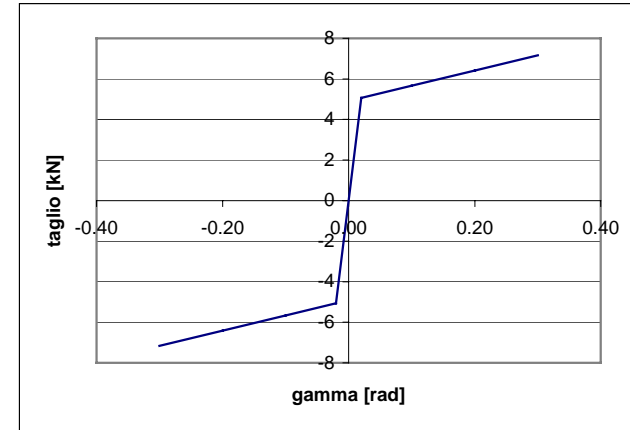
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

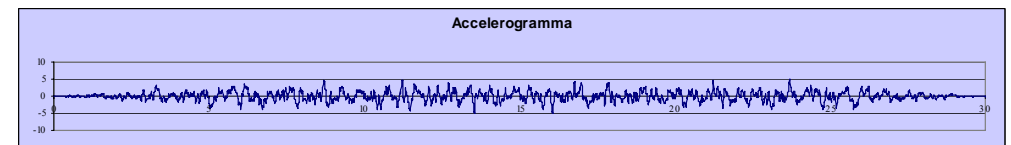
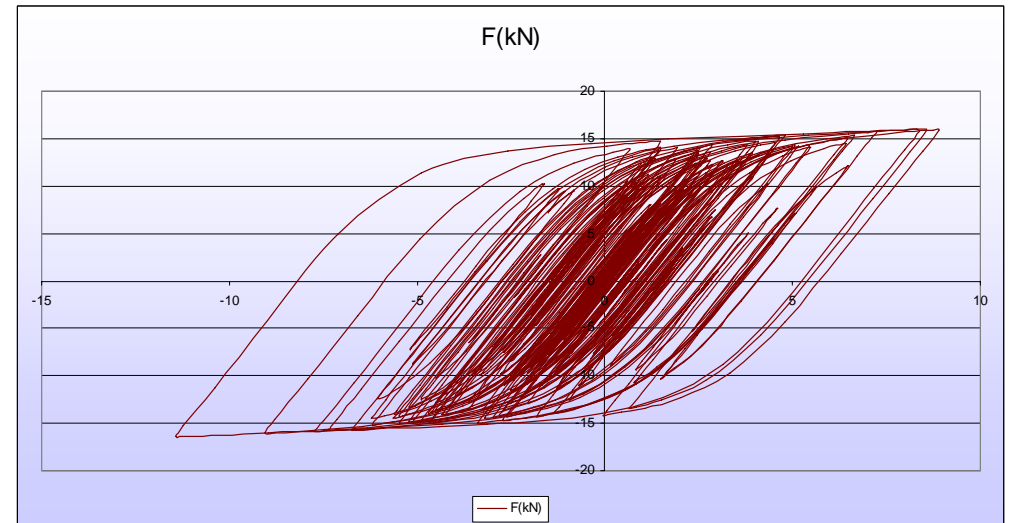
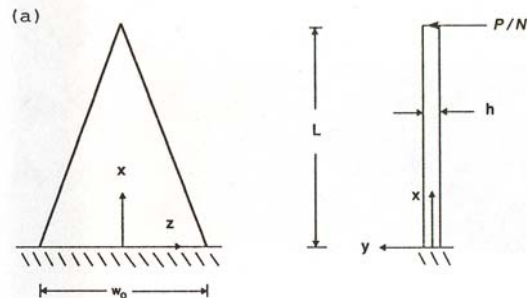
ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

ESEMPIO APPLICATIVO: (telaio PROGETTO Neforee)

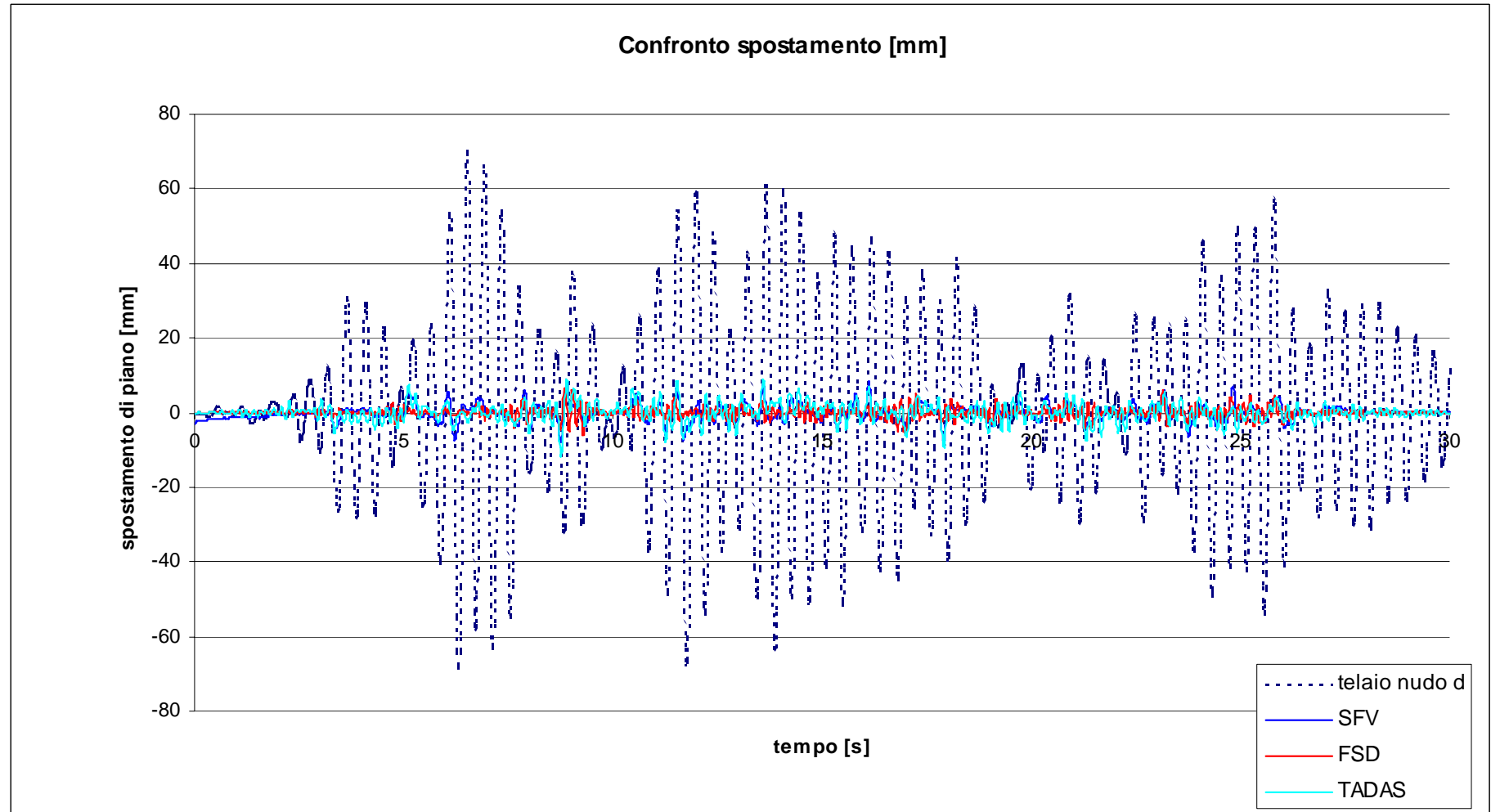
N	1	γ	Δ [mm]	F [kN]
E	200000 N/mm ²	-0.30	-45.00	-7.160625
w0	50 mm	-0.20	-30.00	-6.410625
L	150 mm	-0.10	-15.00	-5.660625
h	15 mm	-0.02	-3.04	-5.0625
σ_y	270 N/mm ²	0.00	0.00	0
k1=P/(D)	1666.667 N/mm	0.02	3.04	5.0625
beta	0.03	0.10	15.00	5.660625
k2	50 N/mm	0.20	30.00	6.410625
Pu	5062.5 N	0.30	45.00	7.160625
Du	3.0375 mm			



Installazione di due "Triangular ADAS" in testa ad un controvento a K.

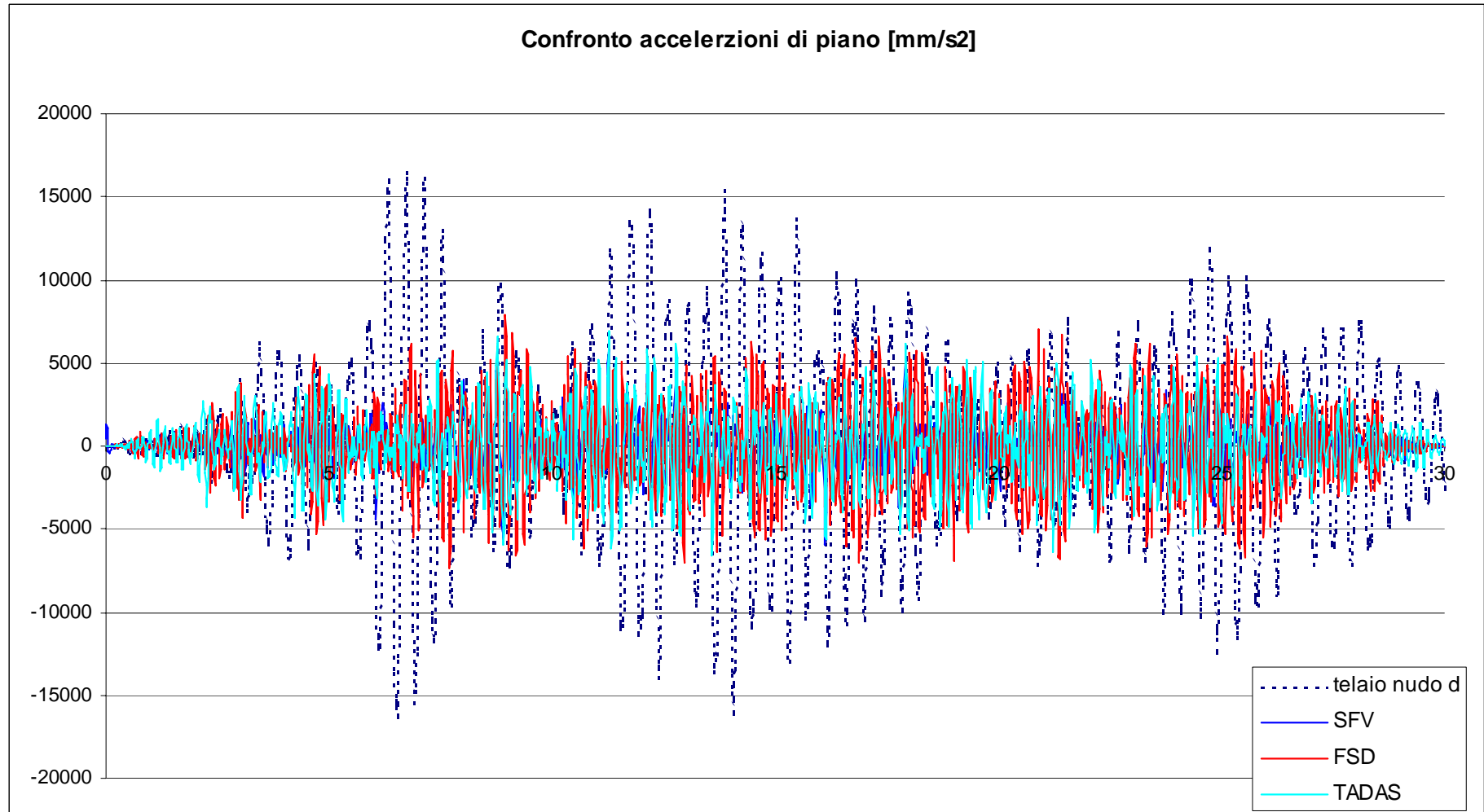


ESEMPIO APPLICATIVO: (telaio PROGETTO Neforee)



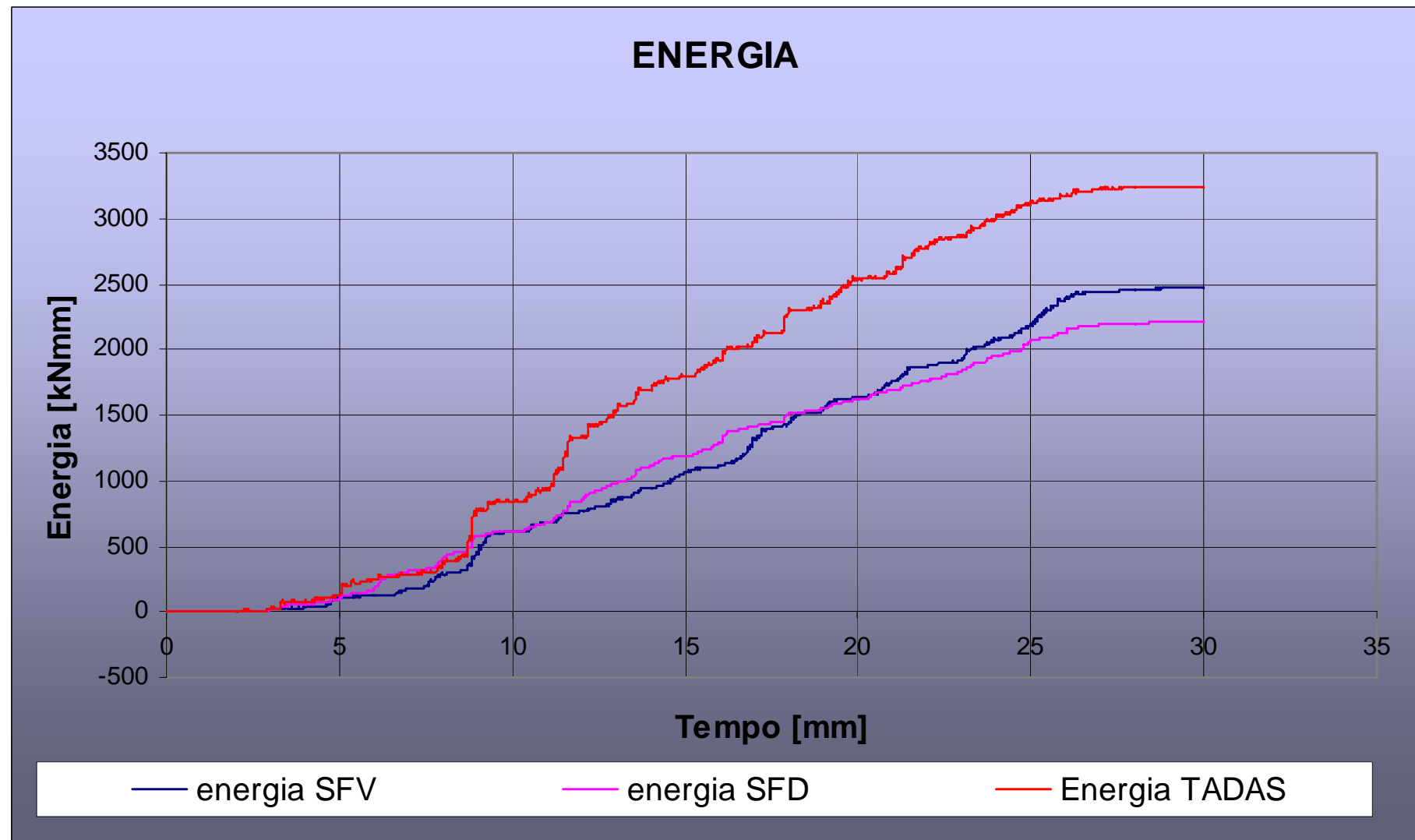
	d[mm]	a[mm/s ²]
telaio nudo	70.6	16518
contr. SFV	9.0	5982
contr. FSD	6.7	7906
contr. TADAS	11.7	6878

ESEMPIO APPLICATIVO: (telaio PROGETTO Neforee)



	d[mm]	a[mm/s ²]
telaio nudo	70.6	16518
contr. SFV	9.0	5982
contr. FSD	6.7	7906
contr. TADAS	11.7	6878

ESEMPIO APPLICATIVO: (telaio PROGETTO Neforee)



	d[mm]	a[mm/s ²]
telaio nudo	70.6	16518
contr. SFV	9.0	5982
contr. FSD	6.7	7906
contr. TADAS	11.7	6878

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

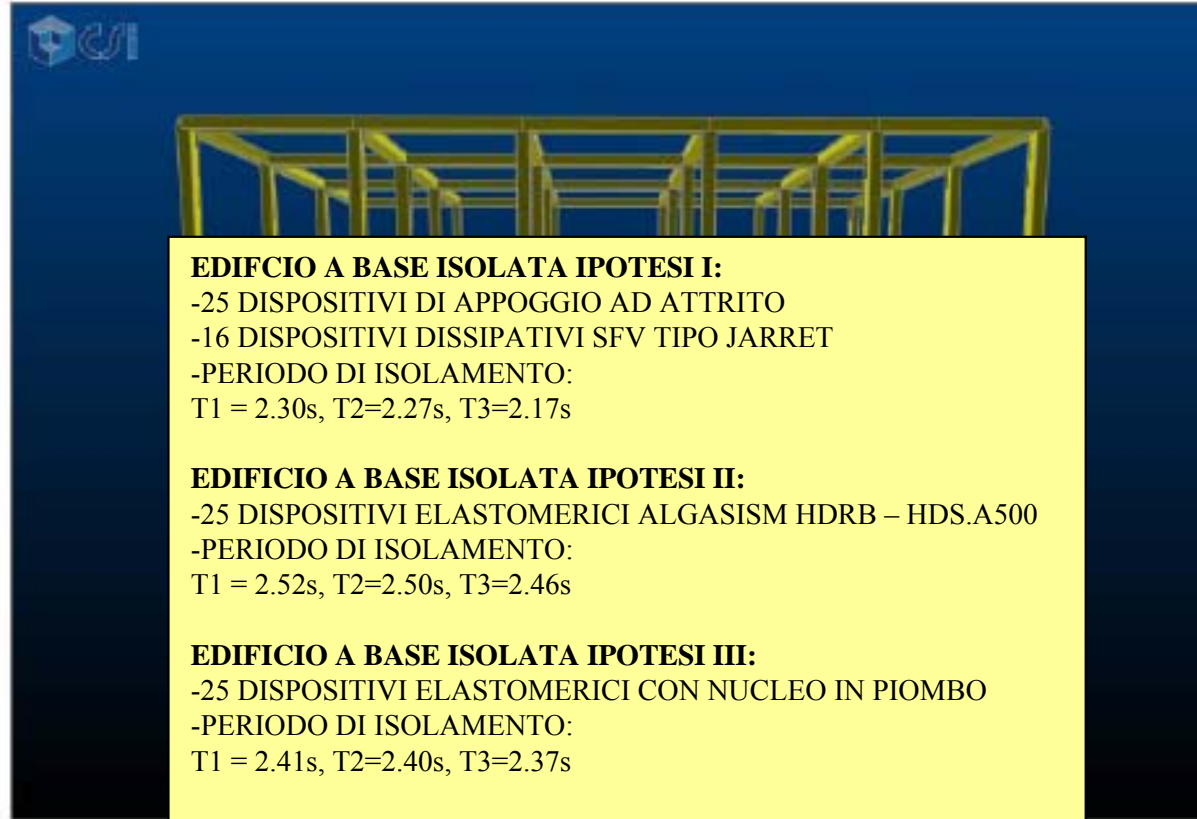
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ESEMPIO APPLICATIVO: (esempio sviluppato in occasione del corso di Formazione post-laurea "Esperto in tecnologie avanzate di protezione sismica degli edifici" - Coord. prof. Stefano Sorace)



EDIFICIO A BASE ISOLATA IPOTESI I:

- 25 DISPOSITIVI DI APPOGGIO AD ATTRITO
- 16 DISPOSITIVI DISSIPATIVI SFV TIPO JARRET
- PERIODO DI ISOLAMENTO:
T1 = 2.30s, T2=2.27s, T3=2.17s

EDIFICIO A BASE ISOLATA IPOTESI II:

- 25 DISPOSITIVI ELASTOMERICI ALGASISM HDRB – HDS.A500
- PERIODO DI ISOLAMENTO:
T1 = 2.52s, T2=2.50s, T3=2.46s

EDIFICIO A BASE ISOLATA IPOTESI III:

- 25 DISPOSITIVI ELASTOMERICI CON NUCLEO IN PIOMBO
- PERIODO DI ISOLAMENTO:
T1 = 2.41s, T2=2.40s, T3=2.37s

EDIFICIO:

- MASSA TOTALE: 1962.28 kNs²/m
- PRIMO PERIODO A BASE FISSA: 1.26s

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

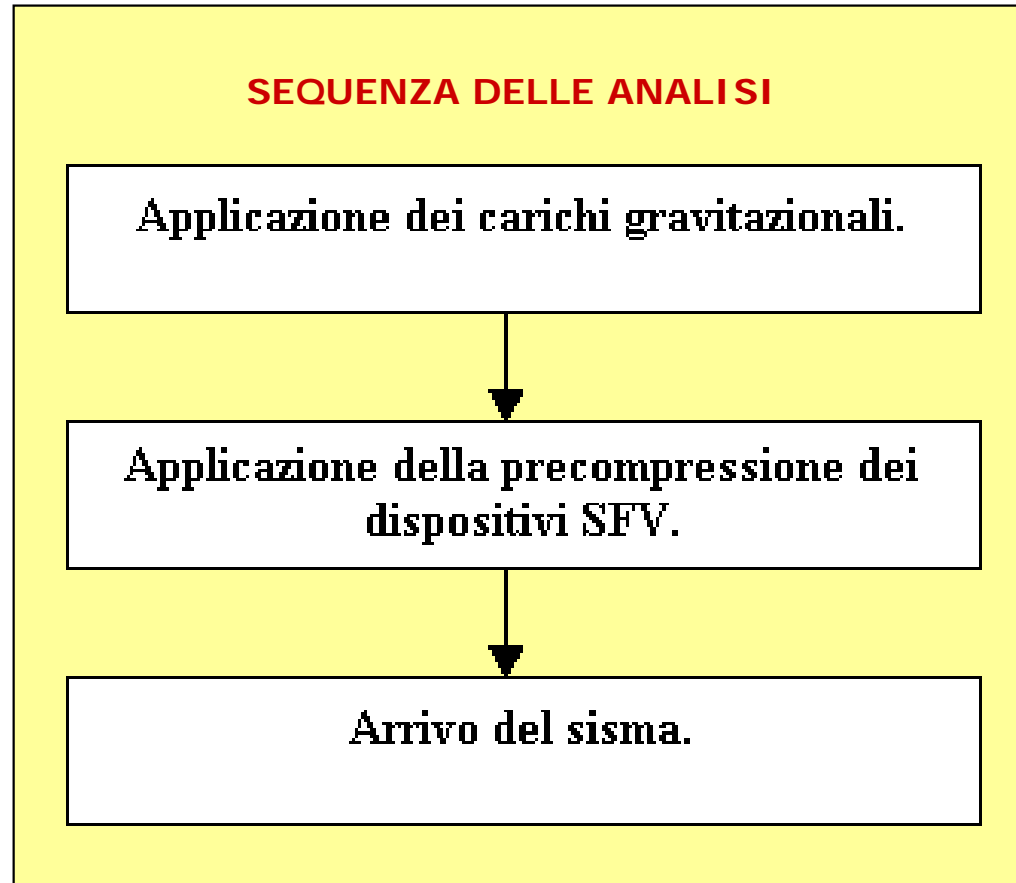
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

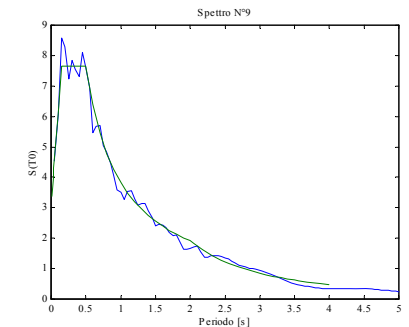
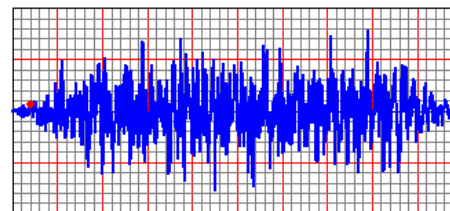
ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ESEMPIO APPLICATIVO: (esempio sviluppato in occasione del corso di Formazione post-laurea "Esperto in tecnologie avanzate di protezione sismica degli edifici" - Coord. prof. Stefano Sorace)



Accelerogramma
ZONA2 terreno B
spetrocompatibil
e OPCM3274



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

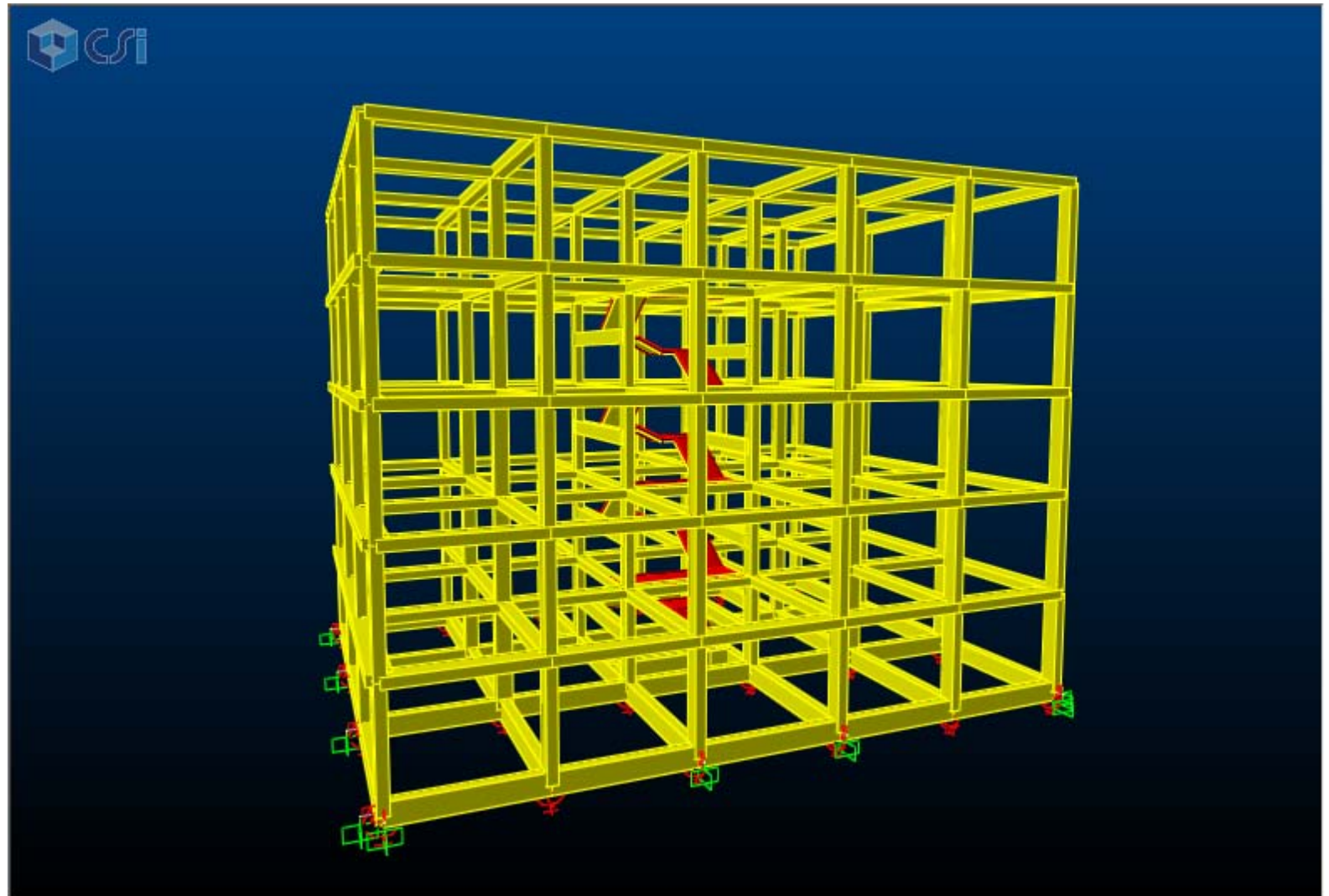
DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ESEMPIO APPLICATIVO: (esempio sviluppato in occasione del corso di Formazione post-laurea "Esperto in tecnologie avanzate di protezione sismica degli edifici" - Coord. prof. Stefano Sorace)

IPOTESI I: DISPOSITIVI PTFE+SFV



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

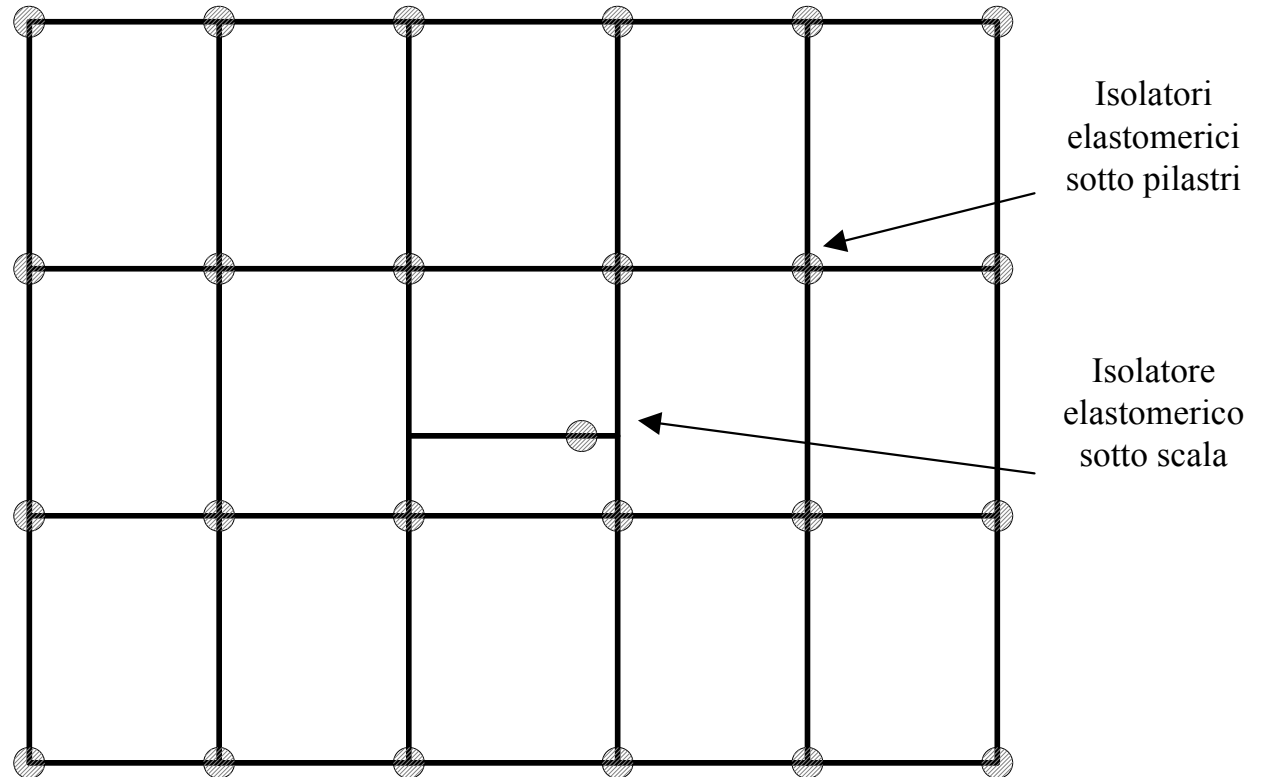
DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

**ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO**

ESEMPIO APPLICATIVO: (esempio sviluppato in occasione del corso di Formazione post-laurea "Esperto in tecnologie avanzate di protezione sismica degli edifici" - Coord. prof. Stefano Sorace)

IPOSTESI II: 25 DISPOSITIVI ELASTOMERICI



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

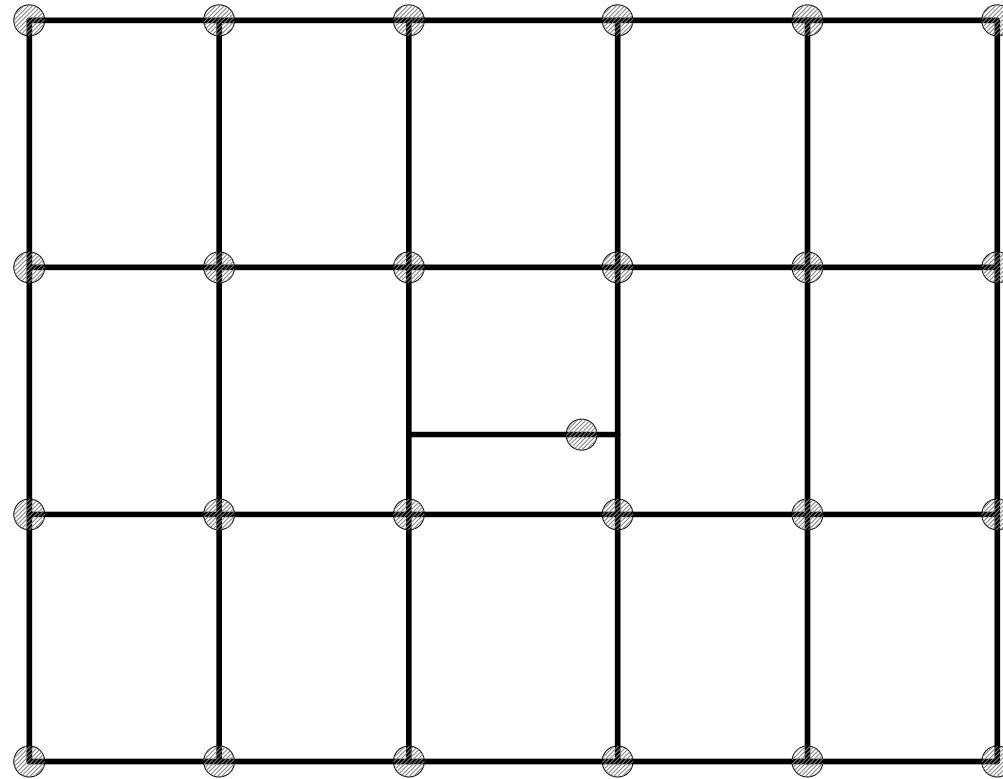
DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ESEMPIO APPLICATIVO: (esempio sviluppato in occasione del corso di Formazione post-laurea "Esperto in tecnologie avanzate di protezione sismica degli edifici" - Coord. prof. Stefano Sorace)

IPOTESI III: 25 DISPOSITIVI GOMMA-PIOMBO



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

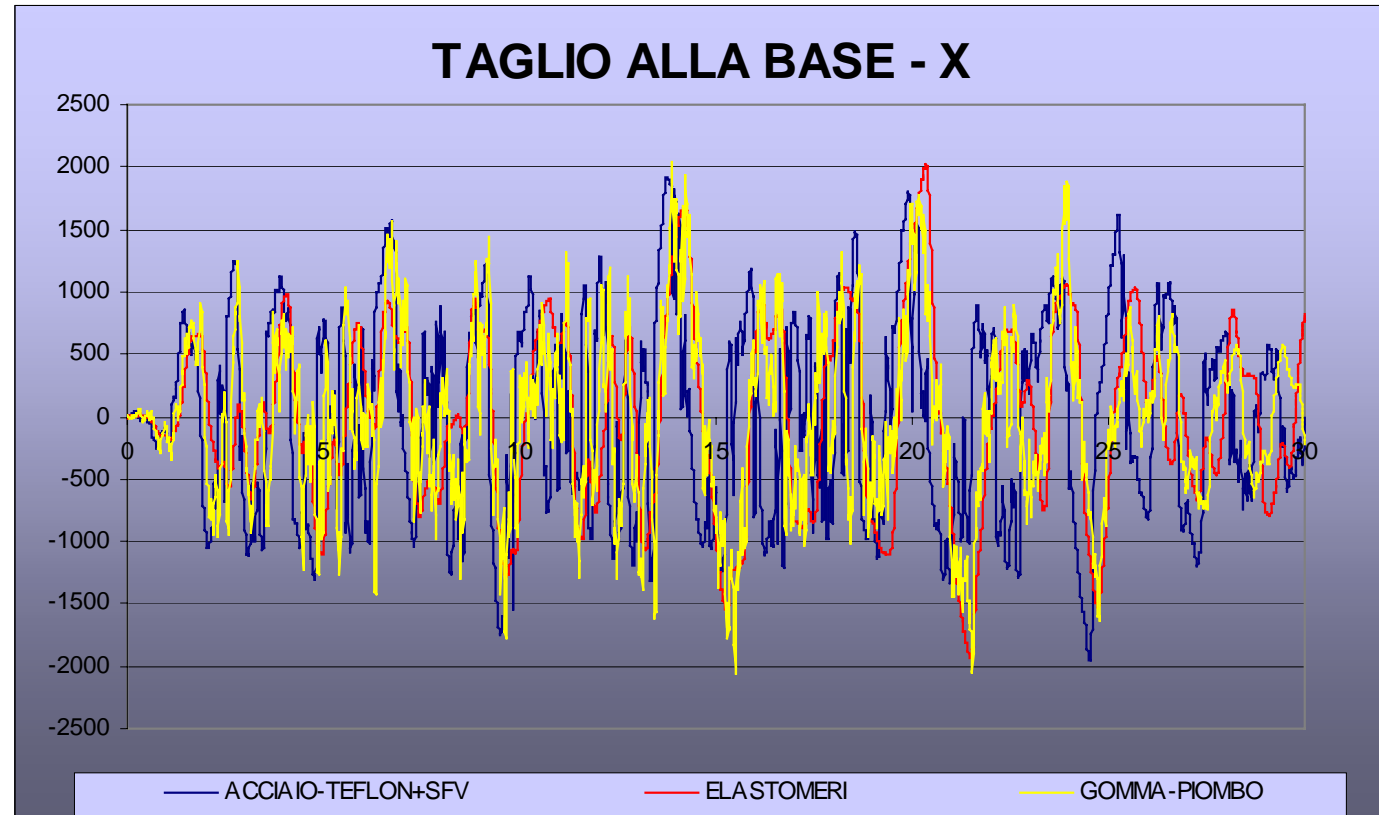
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ESEMPIO APPLICATIVO: (esempio sviluppato in occasione del corso di Formazione post-laurea "Esperto in tecnologie avanzate di protezione sismica degli edifici" - Coord. prof. Stefano Sorace)



Sisma nella direzione x – valore del tagliante in kN da abbattere dividendo per il fattore di struttura $q = 1.5$

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

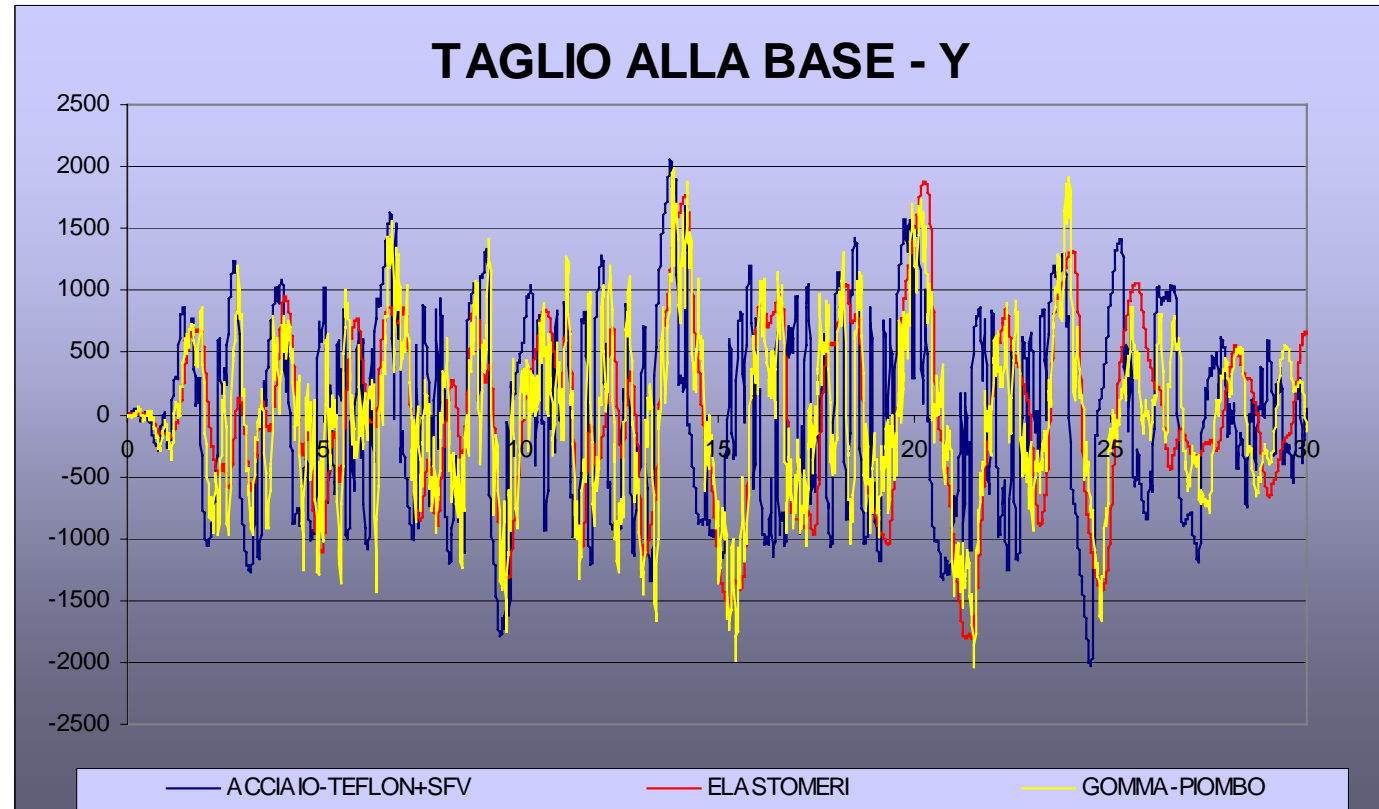
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ESEMPIO APPLICATIVO: (esempio sviluppato in occasione del corso di Formazione post-laurea "Esperto in tecnologie avanzate di protezione sismica degli edifici" - Coord. prof. Stefano Sorace)



Sisma nella direzione y – valore del tagliante in kN da abbattere dividendo per il fattore di struttura $q = 1.5$

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

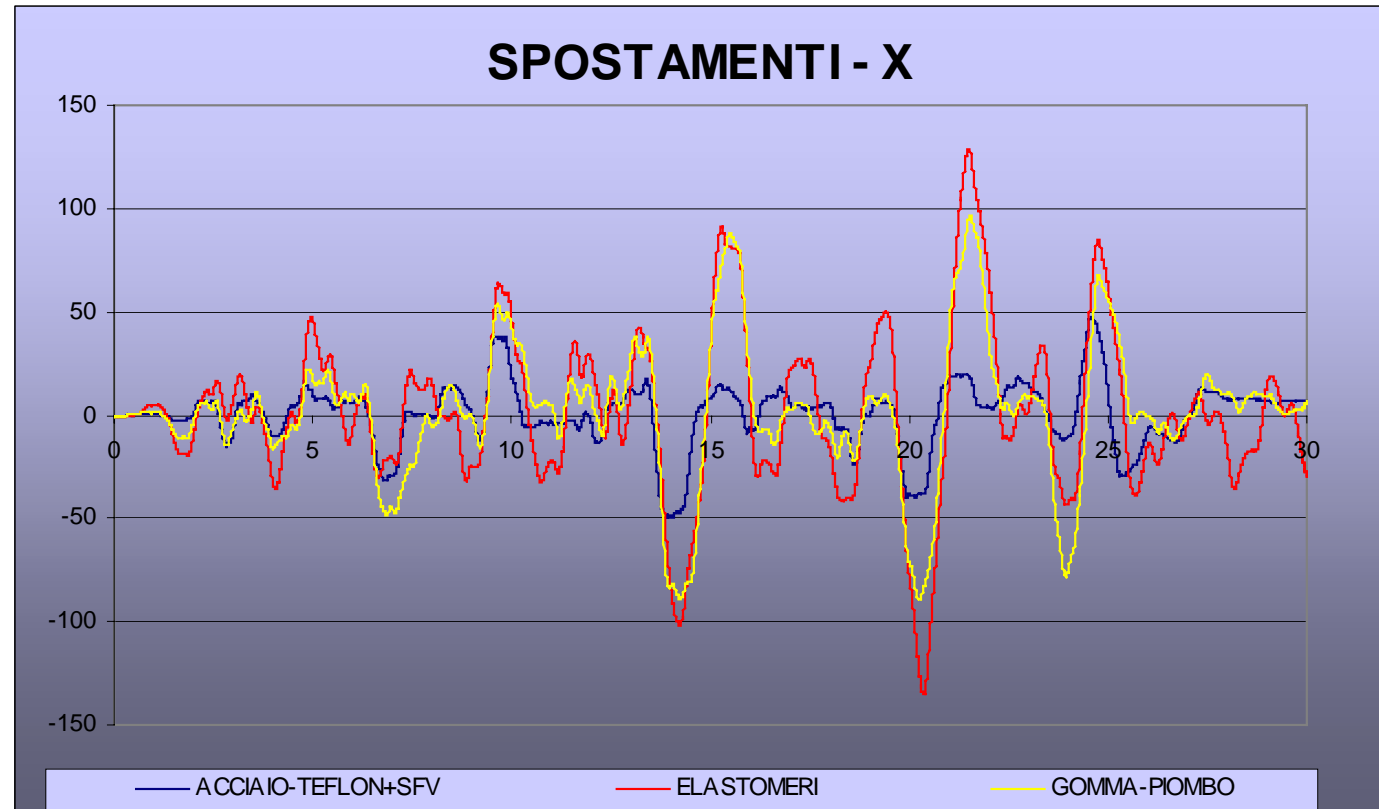
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ESEMPIO APPLICATIVO: (esempio sviluppato in occasione del corso di Formazione post-laurea "Esperto in tecnologie avanzate di protezione sismica degli edifici" - Coord. prof. Stefano Sorace)



Sisma nella direzione x – spostamenti in mm calcolati allo SLU

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

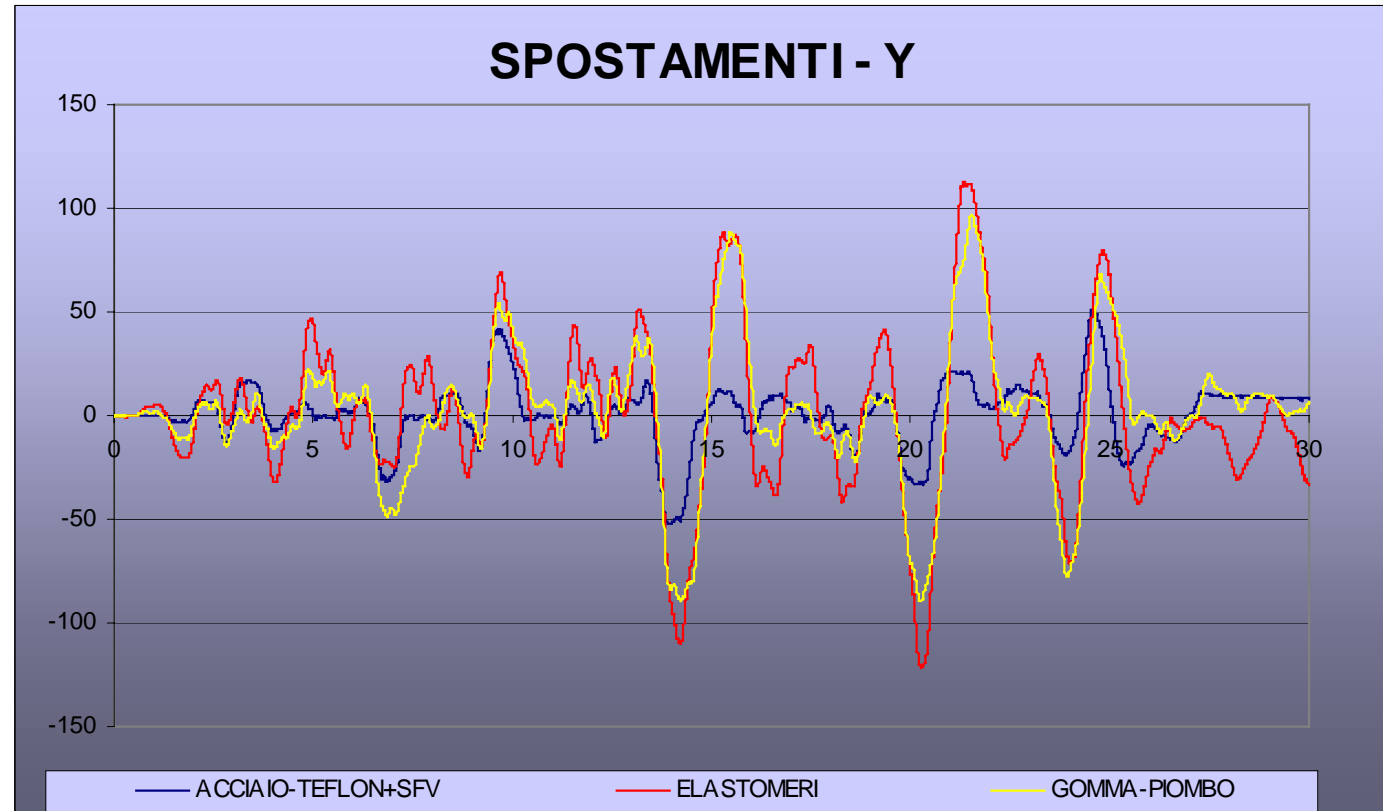
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ESEMPIO APPLICATIVO: (esempio sviluppato in occasione del corso di Formazione post-laurea "Esperto in tecnologie avanzate di protezione sismica degli edifici" - Coord. prof. Stefano Sorace)



Sisma nella direzione y – spostamenti in mm calcolati allo SLU

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ESEMPIO APPLICATIVO: (esempio sviluppato in occasione del corso di Formazione post-laurea "Esperto in tecnologie avanzate di protezione sismica degli edifici" - Coord. prof. Stefano Sorace)

BILANCIO ENERGETICO

$$E_k + E_\xi + E_s + E_h = E_i$$

E_k = energia cinetica

E_ξ = energia dissipata per viscosità

E_s = energia potenziale

E_h = energia dissipata per isteresi

E_i = energia d'ingresso.

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

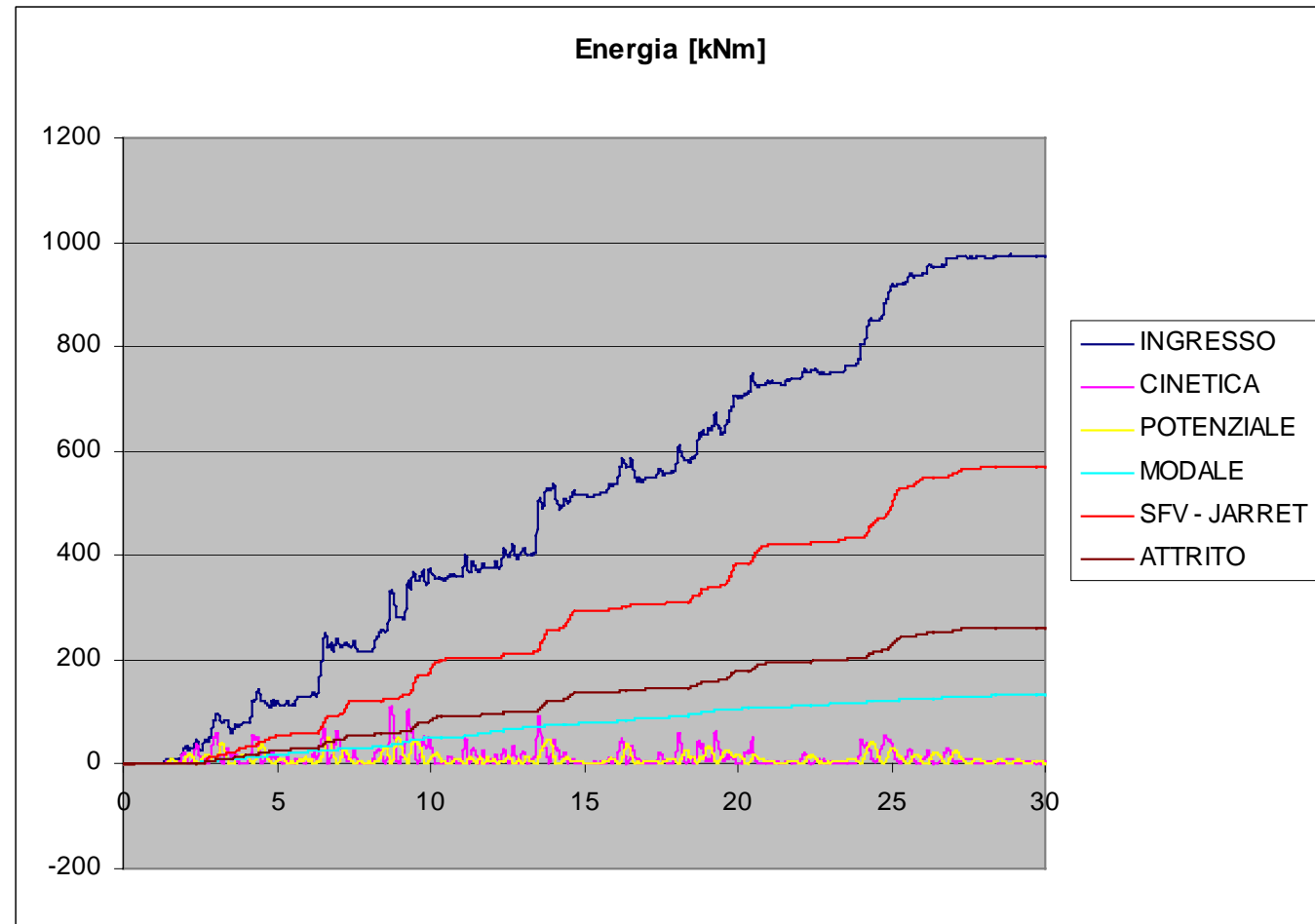
DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ESEMPIO APPLICATIVO: (esempio sviluppato in occasione del corso di Formazione post-laurea "Esperto in tecnologie avanzate di protezione sismica degli edifici" - Coord. prof. Stefano Sorace)

BILANCIO ENERGETICO - ISOLAMENTO IPOTESI I



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

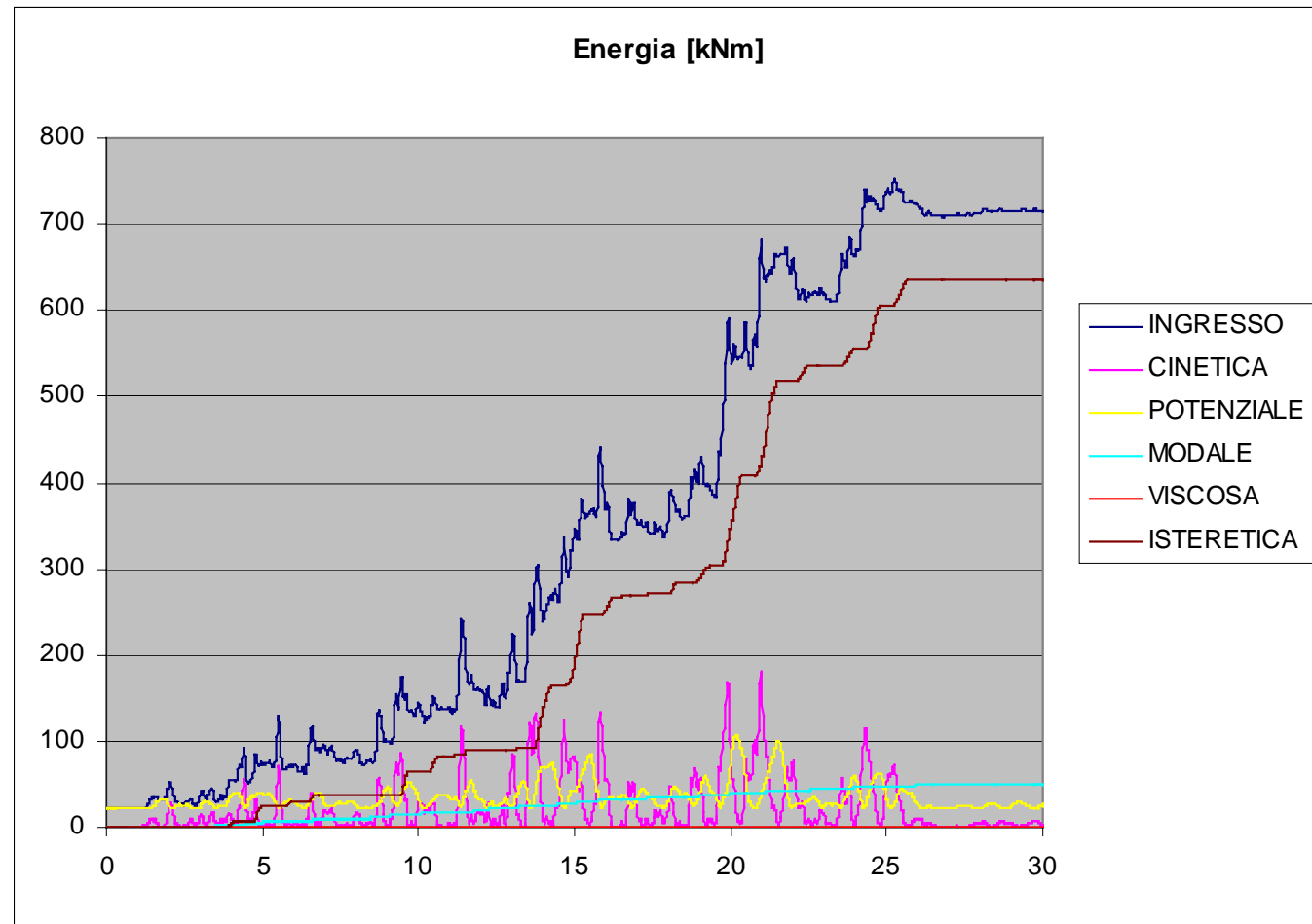
DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ESEMPIO APPLICATIVO: (esempio sviluppato in occasione del corso di Formazione post-laurea "Esperto in tecnologie avanzate di protezione sismica degli edifici" - Coord. prof. Stefano Sorace)

BILANCIO ENERGETICO - ISOLAMENTO IPOTESI II



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ESEMPIO APPLICATIVO: (esempio sviluppato in occasione del corso di Formazione post-laurea "Esperto in tecnologie avanzate di protezione sismica degli edifici" - Coord. prof. Stefano Sorace)

BILANCIO ENERGETICO - ISOLAMENTO IPOTESI III

