



**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

Brunetta e Brunetta Engineering

Udine, 10 marzo 2006



CISM

distribuito da Dario Flaccovio Editore Codice: DF8835

Protezione sismica delle strutture

Tecnologie innovative - Ricerca - Applicazioni

A cura di Gaetano Russo - Stefano Sorace **AA.VV.**

Le tecnologie innovative di protezione sismica delle strutture, che da tempo costituiscono un argomento di punta della ricerca dell'ingegneria sismica, sono divenute oggetto di crescente interesse anche da parte della comunità tecnica e professionale. L'adozione di tali tecnologie pone, tuttavia, alcune nuove problematiche rispetto al progetto delle strutture antisismiche tradizionali, per risolvere le quali risulta necessaria una conoscenza di base dei principi di funzionamento e delle prestazioni offerte dai diversi tipi di dispositivi in commercio e dai sistemi di protezione che li includono.

Inoltre, come per qualsiasi percorso progettuale, devono essere acquisiti gli opportuni metodi di analisi, di modellazione, di dimensionamento e di verifica. Il volume raccoglie i testi delle lezioni tenute nel corso avanzato di formazione professionale "Tecnologie innovative di protezione sismica delle strutture", svoltosi a Udine nel 2006, che si è proposto di fornire contributi di risposta a tali esigenze, con riferimento a diverse tipologie di dispositivi e di tecniche di protezione, nonché ad un selezionato repertorio di applicazioni pratiche.

I testi sono stati predisposti dai relatori aggiornandone i contenuti agli sviluppi delle rispettive attività di studio e di ricerca svolte, sugli argomenti trattati, sino alla fine del 2008.

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

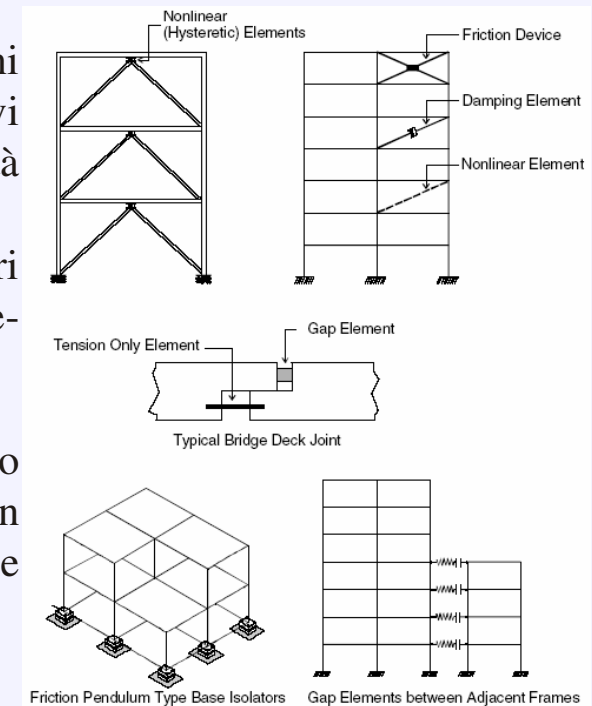
INTRODUZIONE

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

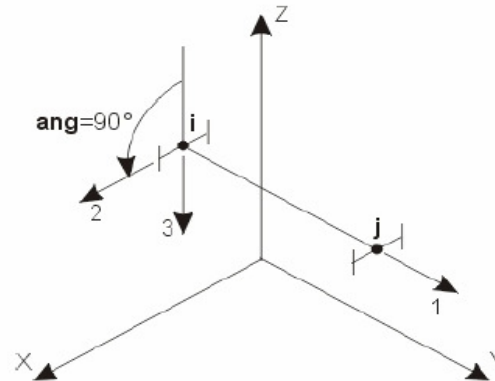
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

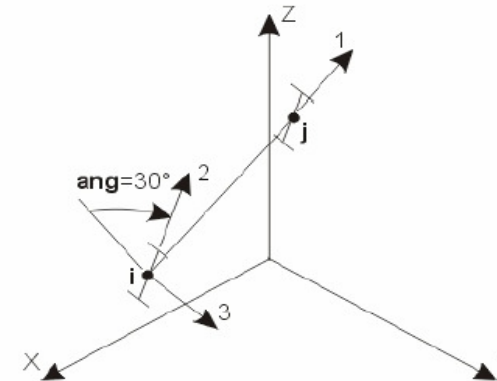
ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

LINK - PROPRIETA' GENERALI:

L'e
all':
elas
seri
seri
(ele
Isol

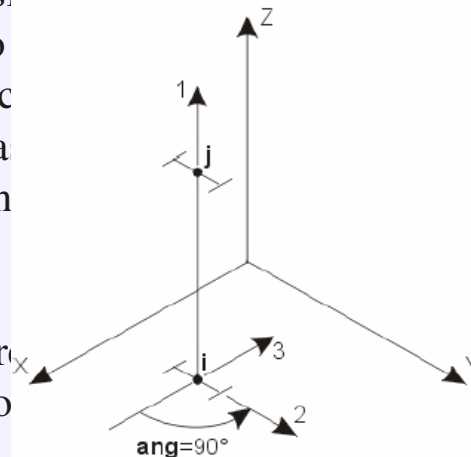


L'asse locale 1 è parallelo all'asse +Y
L'asse locale 2 è ruotato di 90° dal piano Z-1



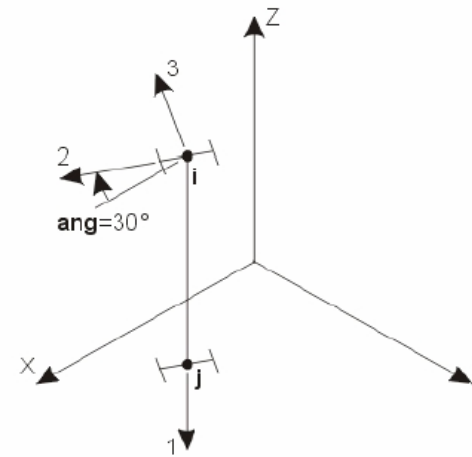
L'asse locale 1 non è parallelo agli assi X, Y o Z
L'asse locale 2 è ruotato di 30° dal piano Z-1

- E' ...
- Può coinc
- E' a
- Ogn



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

- Altr
- Uno



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

Sommato ai valori di smorzamento modale assegnati.

locali
ti ad
on in
on in
astic
ober

(anche
?).

effettivo
vertito nel
odal
rzamento
iene

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

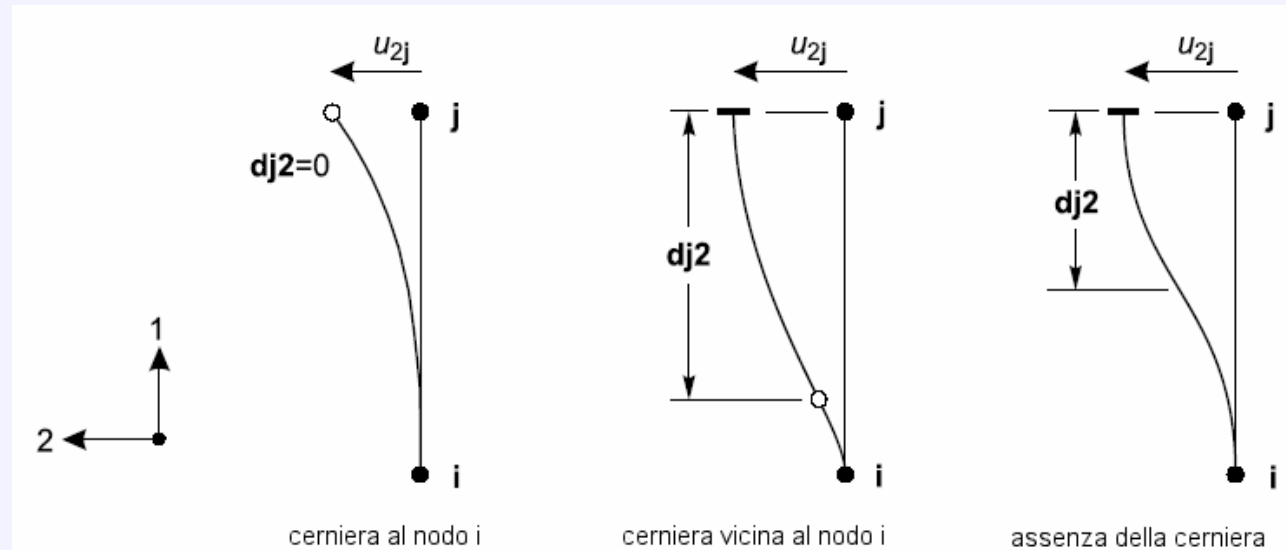
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

NLLINK - PROPRIETA' GENERALI:

Schematizzazione di un NLLINK lineare:



$$\begin{Bmatrix} P \\ V2 \\ V3 \\ T \\ M2 \\ M3 \end{Bmatrix}_j = \begin{bmatrix} k_{u1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & k_{u2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & k_{u3} & 0 & -dj3 k_{u3} & 0 \\ & & & k_{r1} & 0 & 0 \\ & sym. & & & k_{r2} + dj3^2 k_{u3} & 0 \\ & & & & & k_{r3} + dj2^2 k_{u2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u1 \\ u2 \\ u3 \\ r1 \\ -r2 \\ r3 \end{Bmatrix}_j \quad (1)$$

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

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

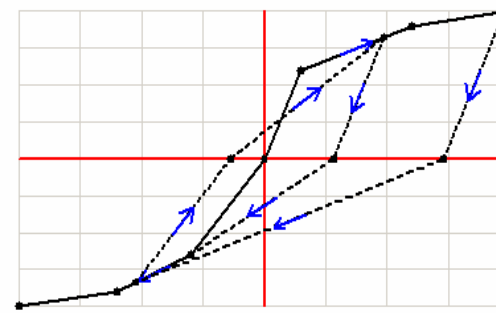
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

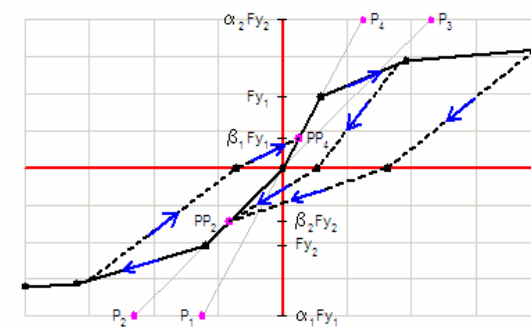
ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

MULTILINEAR PLASTIC:

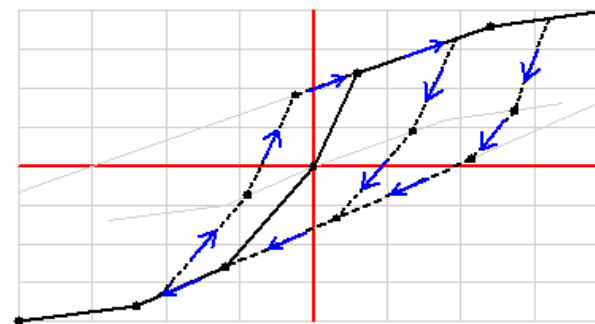
La relazione Forza-Deformazione è data da una curva **n-lineare elastica**. La curva n-lineare rappresenta rigidità costanti a tratti. La curva in fase di **scarico** deriva da quelle di carico secondo tre diversi modelli isteretici: **Takeda, Pivot** o ad **incrudimento cinematico**.



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

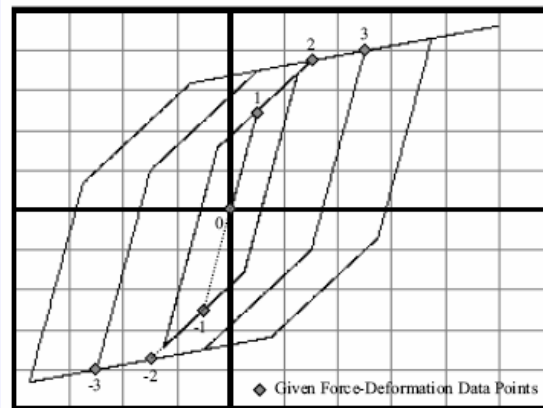
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

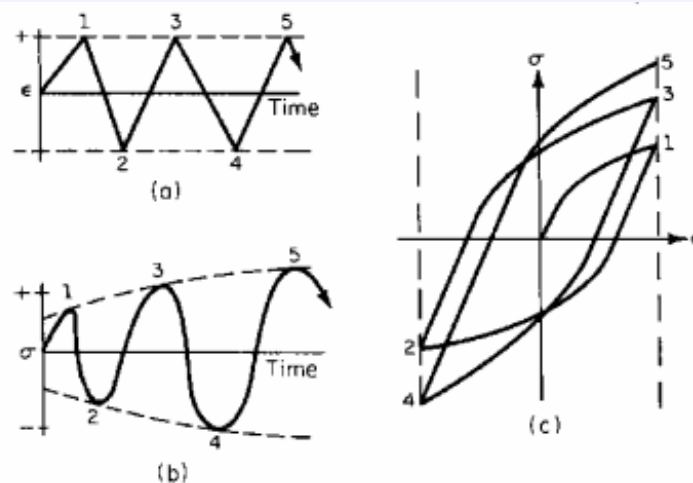
ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

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

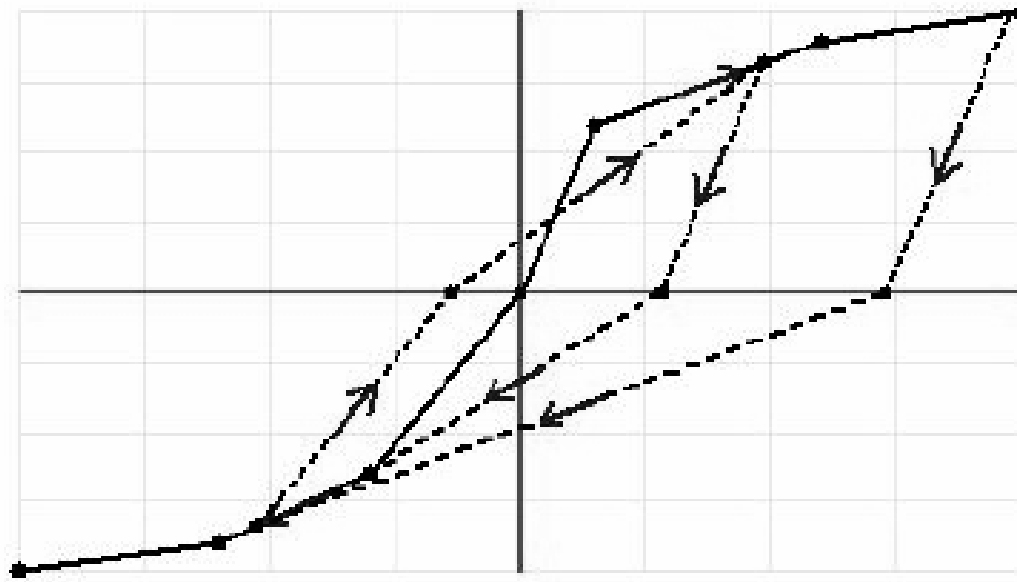
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

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

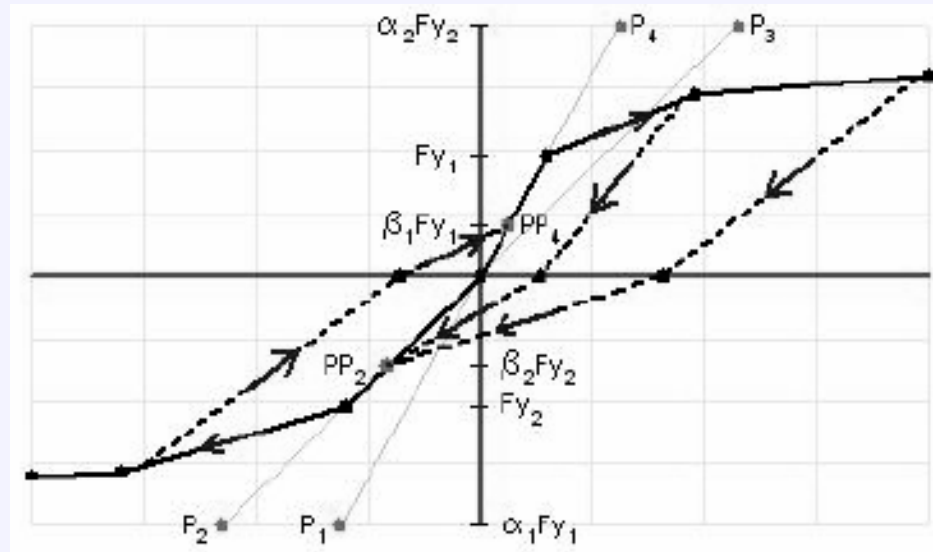
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

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

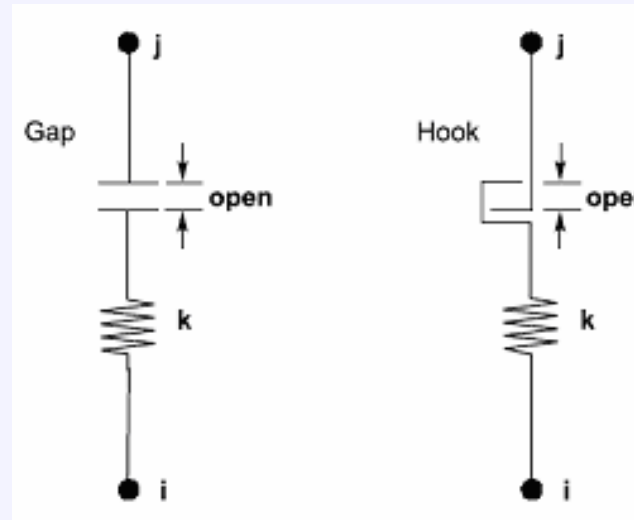
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

GAP/HOOK:

Sono elementi elastici non lineari caratterizzati da una rigidezza 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."

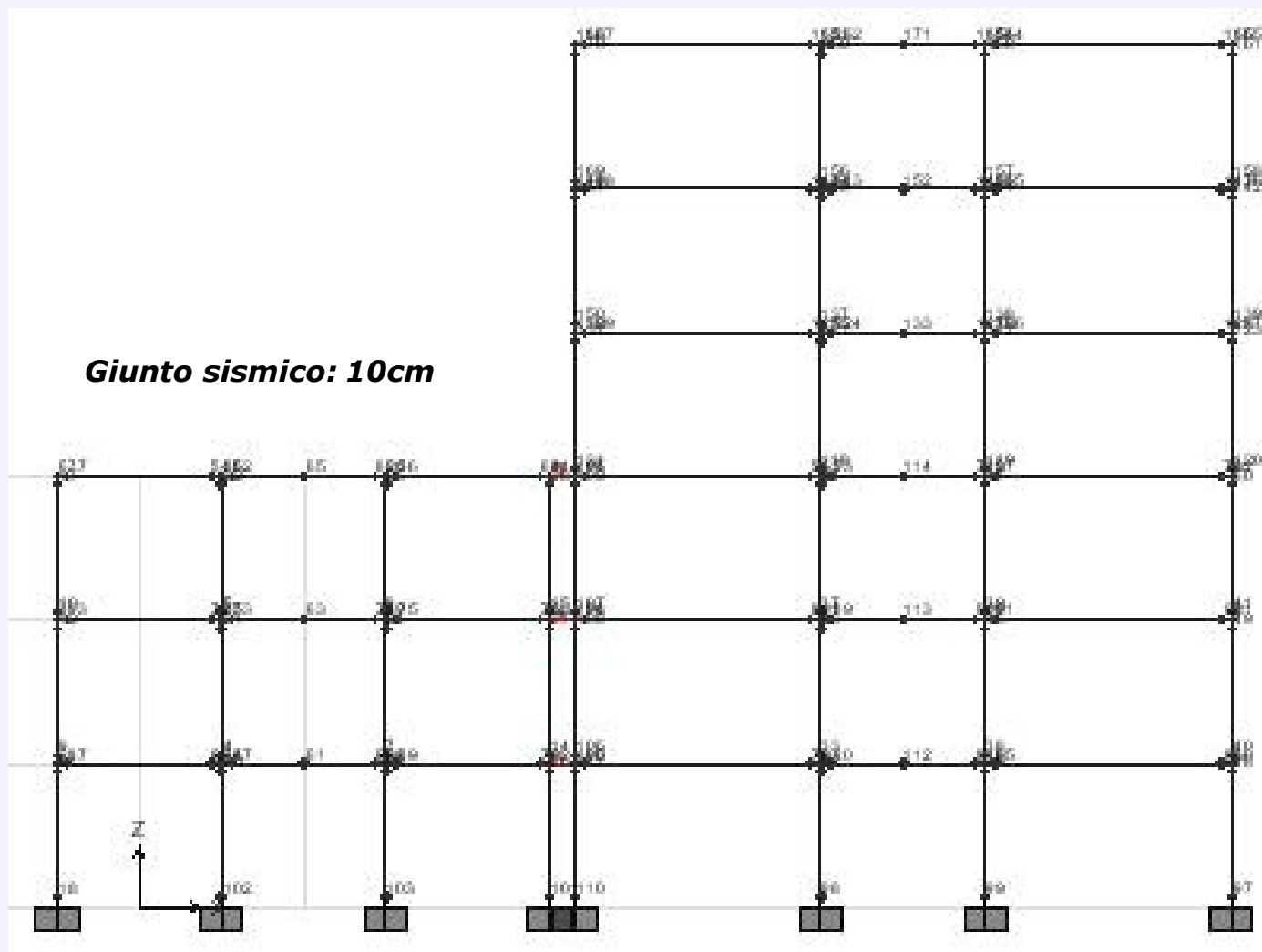
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO**

**ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI**

**ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO**

DINAMICA NON LINEARE: martellamenti strutturali



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

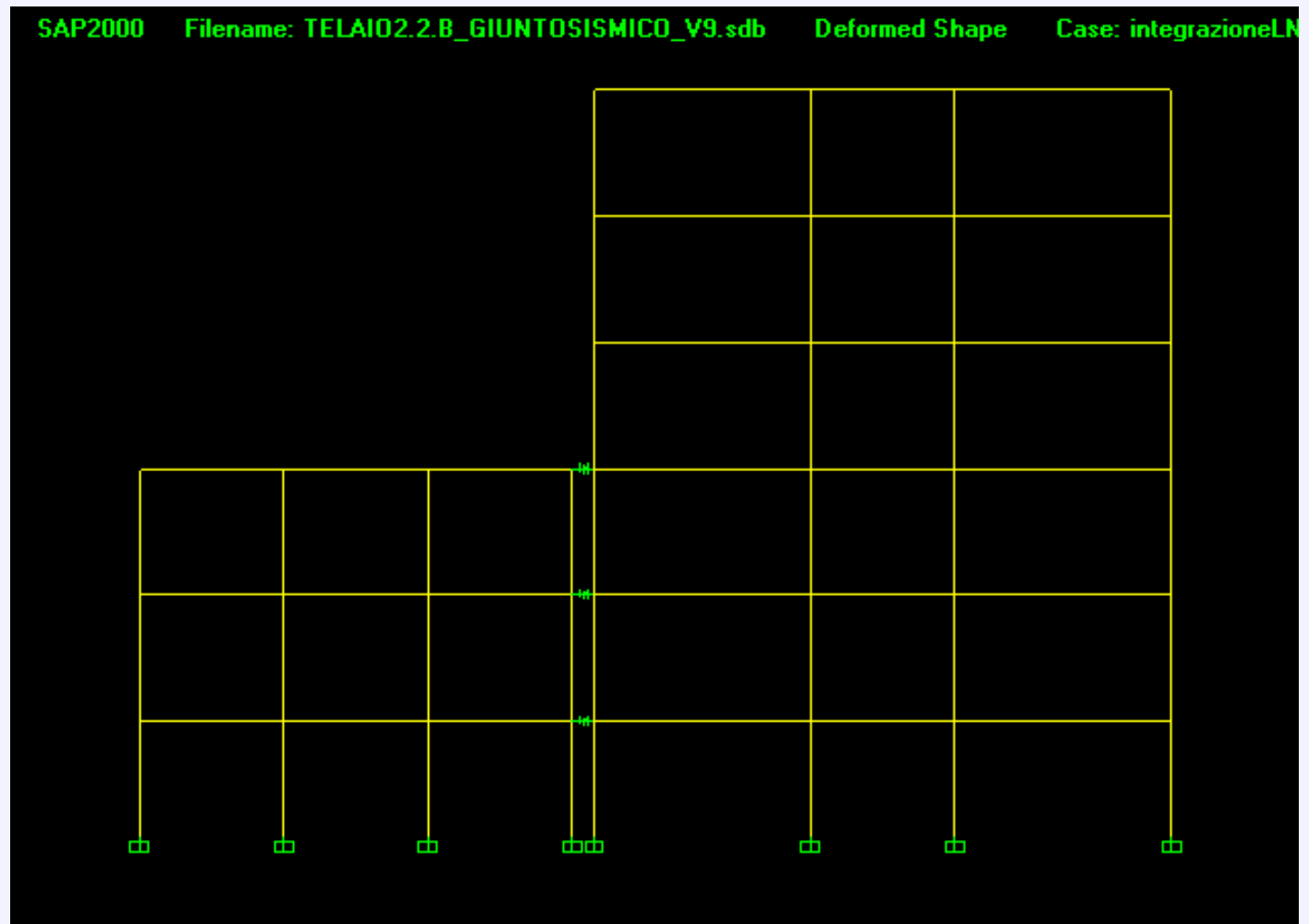
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**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."

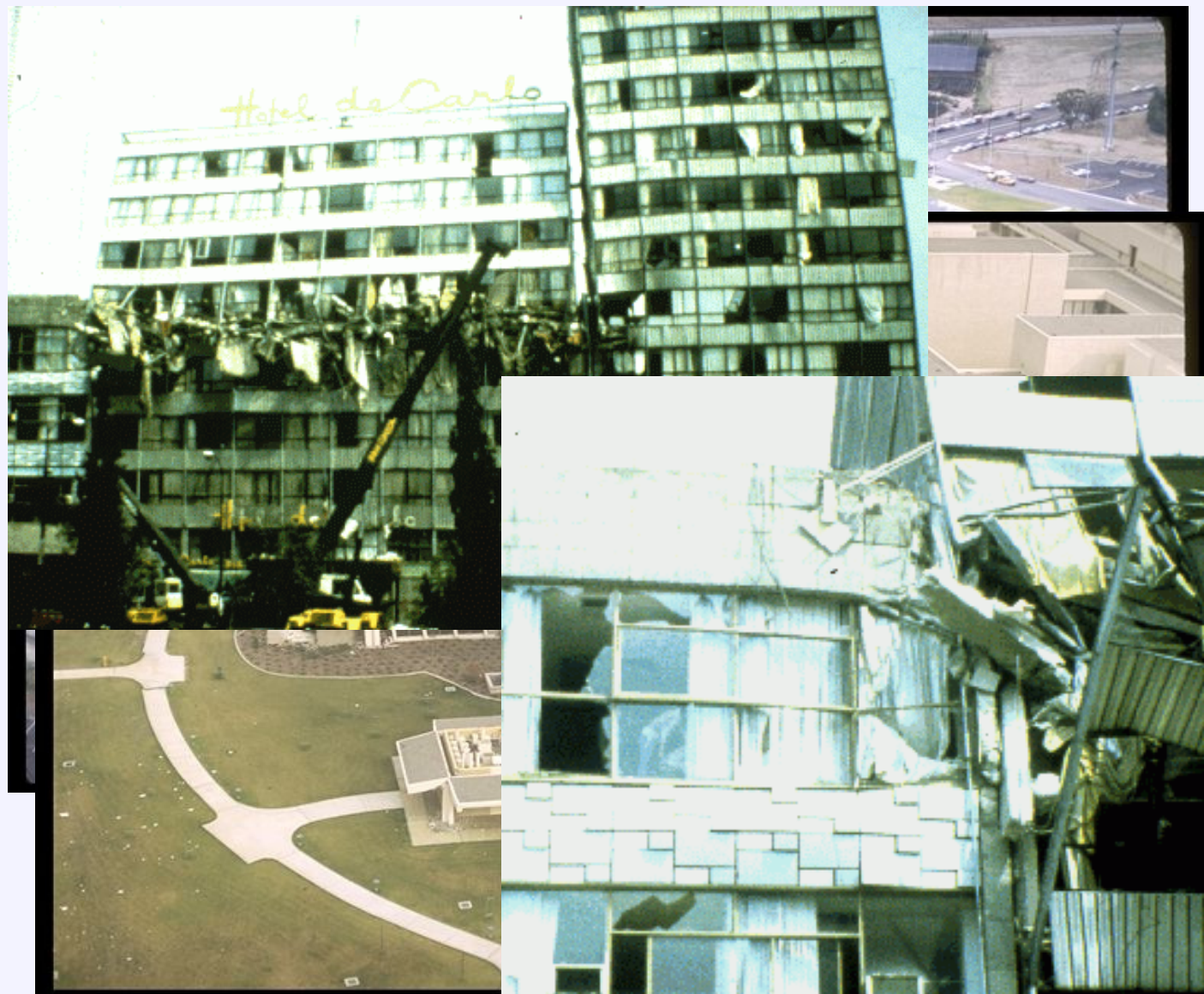
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**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."

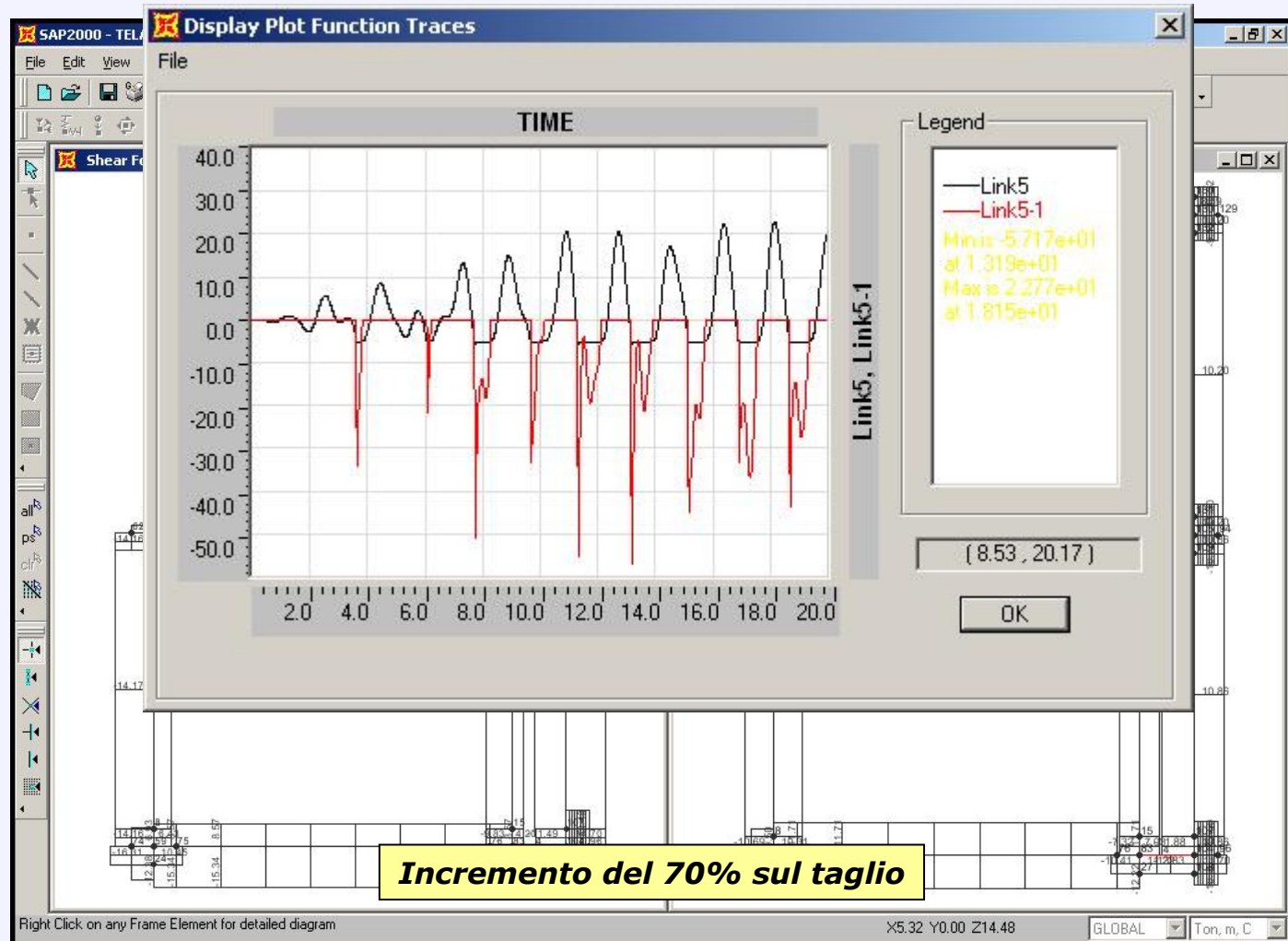
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

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."

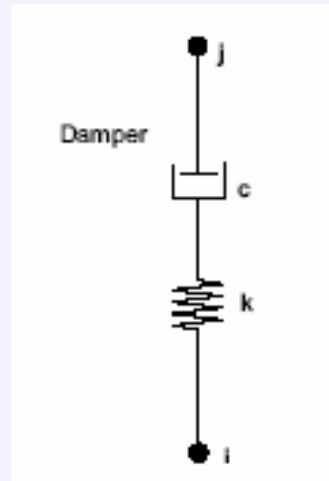
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

DAMPER



modello viscoelastico di Maxwell (Malvern, 1969)

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

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 la 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 rigidità 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 rigidità 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

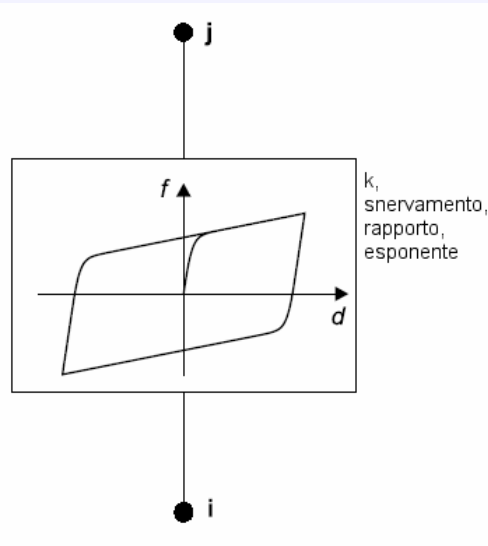
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

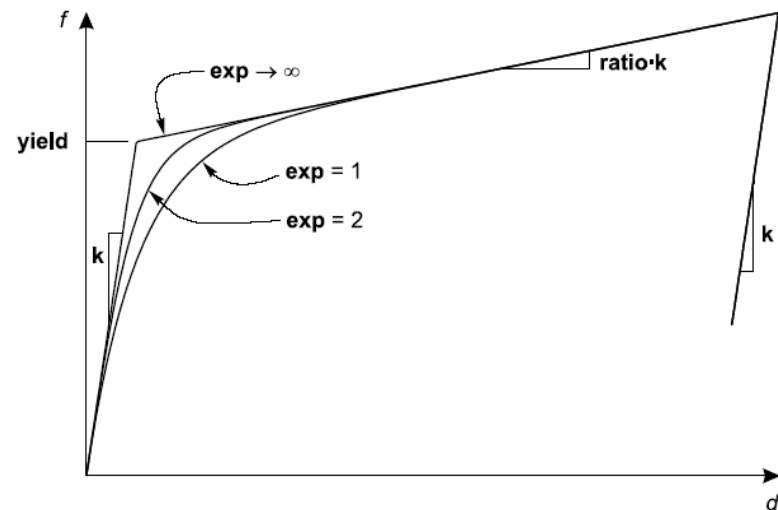
PLASTIC (WEN)

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 $|z| = 1$.



$$\dot{z} = \frac{k}{\text{yield}} \begin{cases} \dot{d} \cdot (1 - |z|^{\text{exp}}) & \Leftrightarrow \dot{d}z > 0 \\ \dot{d} & \end{cases} \quad (6)$$

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

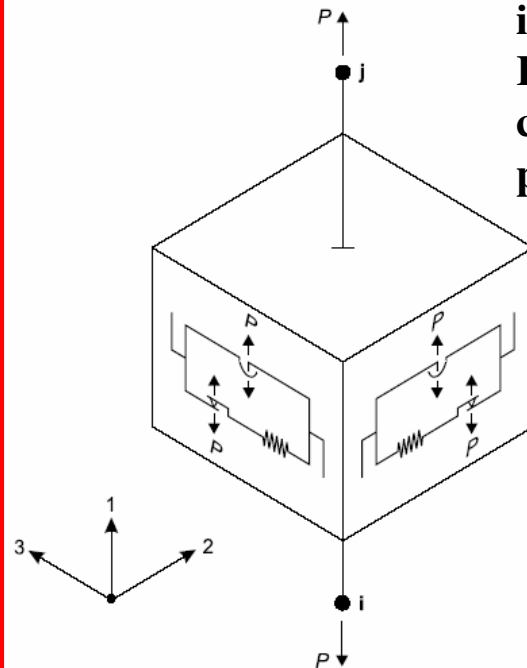
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

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).



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

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

$$f_{u2} = f_{u2f} + f_{u2p}$$

$$f_{u3} = f_{u3f} + f_{u3p}$$

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

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

$$f_{u2f} = -P \mu_2 z_2$$

$$f_{u3f} = -P \mu_3 z_3$$

$$\mu_2 = \text{fast2} - (\text{fast2} - \text{slow2}) e^{-r v}$$

$$\mu_3 = \text{fast3} - (\text{fast3} - \text{slow3}) e^{-r v}$$

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.

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

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:

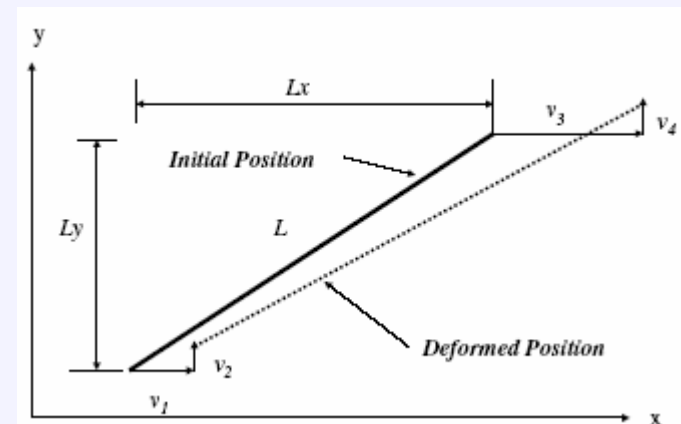
$$\dot{d}(t) = b\dot{u}(t) \quad (11)$$

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:

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

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

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_p 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.

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

3. Based on the deformation and velocity histories in nonlinear elements, calculate L nonlinear forces $f(t)^i$.

4. Calculate new modal force vector $\bar{F}(t)^i = F(t) - \mathbf{B}^T[f(t)^i - \mathbf{k}_e d(t)^i]$

5. Use piece-wise exact method to solve modal equations for next iteration.

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

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

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 nonlinearietà 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:

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

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 K , mass matrix M and damping matrix 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 $\bar{K} = K + b_1 M + b_4 C$

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

F. Specify initial conditions $u_0, \dot{u}_0, \ddot{u}_0$

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

A. Calculate effective load vector

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

B. Solve for node displacement vector at time t

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

C. Calculate node velocities and accelerations at time t

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

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

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.

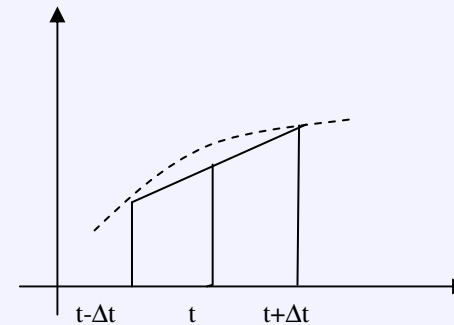
Altri metodi sono:

• **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 .

$$\Delta t' = \theta \Delta t \tag{35}$$

$$\begin{aligned} \ddot{u}_t &= \ddot{u}_{t-\Delta t} + \frac{1}{\theta} (\ddot{u}_{t'} - \ddot{u}_{t-\Delta t}) \\ \dot{u}_t &= \dot{u}_{t-\Delta t} + (1-\gamma)\Delta t \ddot{u}_{t-\Delta t} + \gamma \Delta t \ddot{u}_t \end{aligned} \tag{36}$$

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

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."

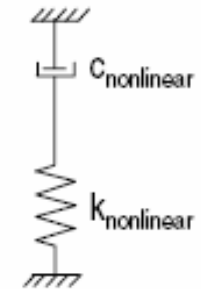
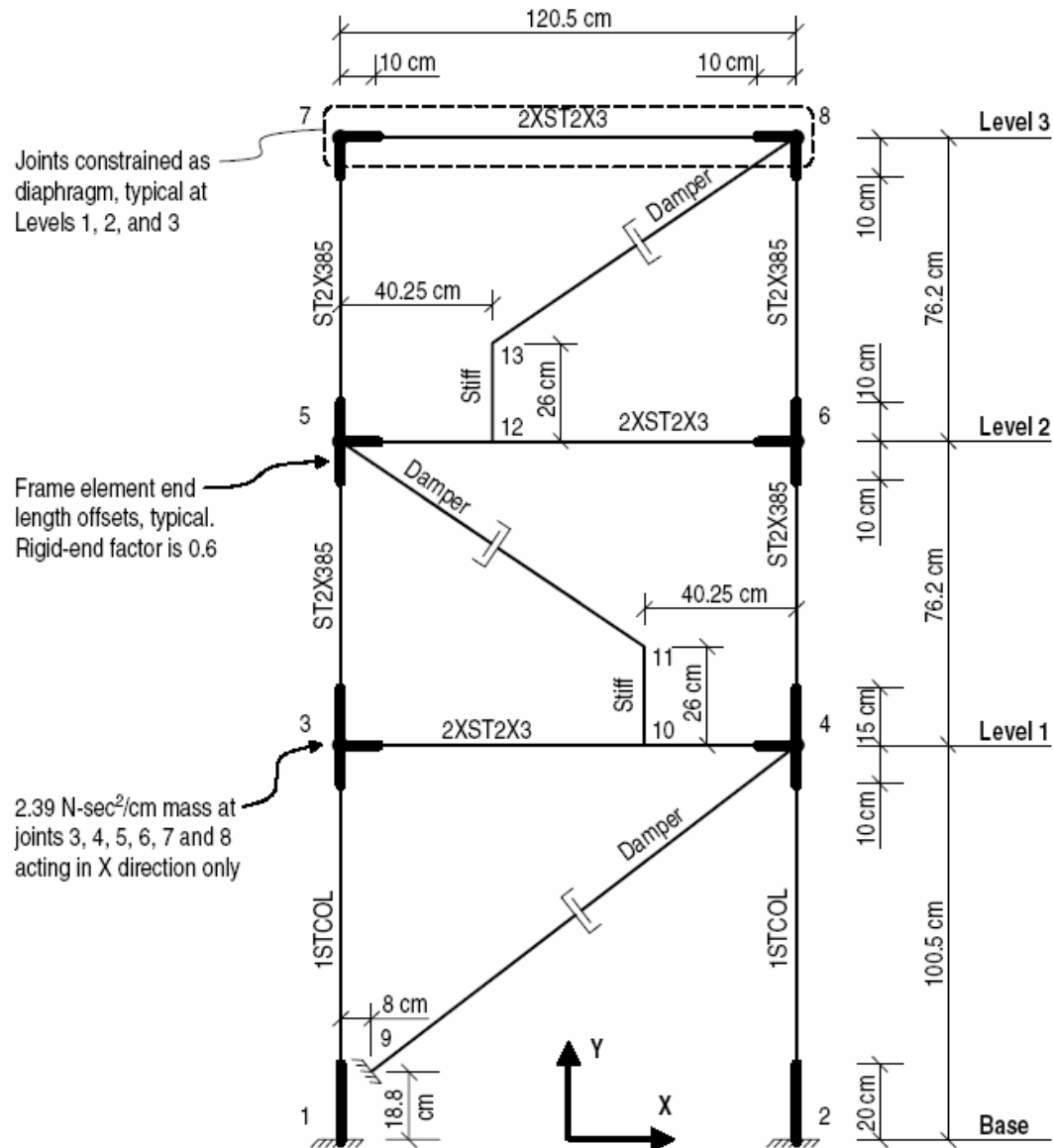
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

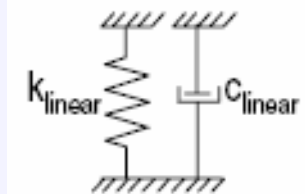
ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

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

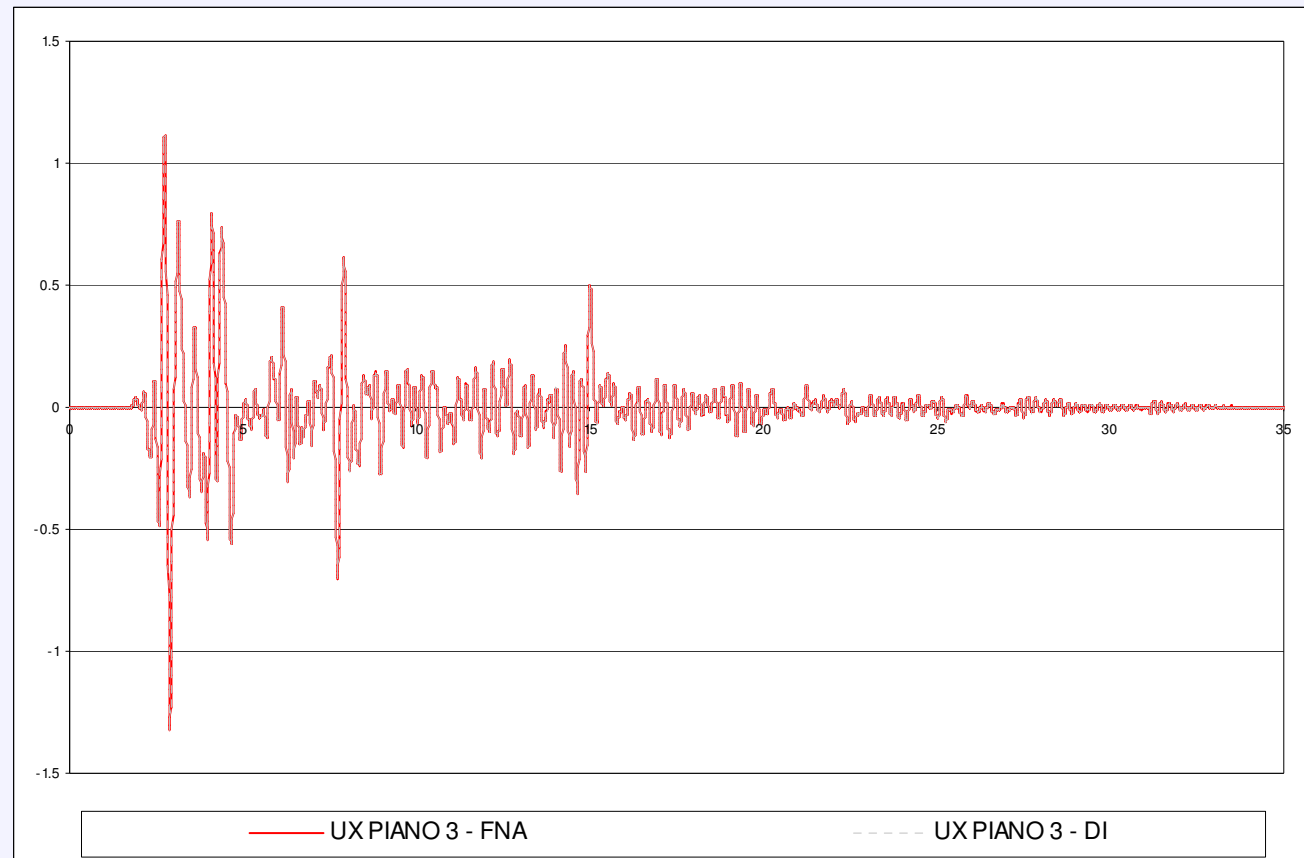
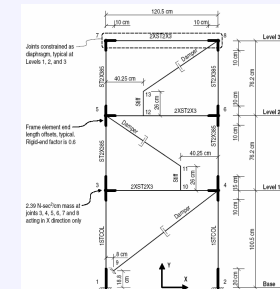
Confronto tra FNA e DI

**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

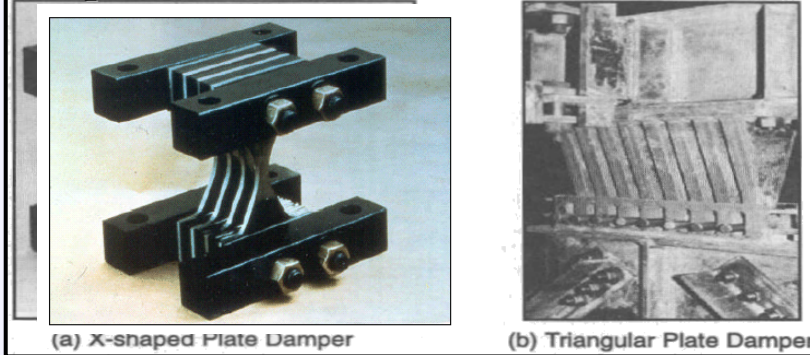
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

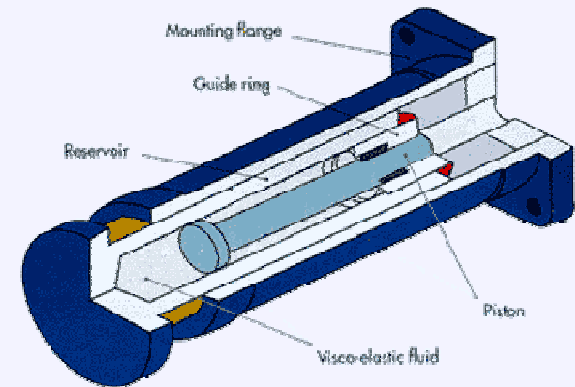
ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

DISPOSITIVI DI DISSIPAZIONE

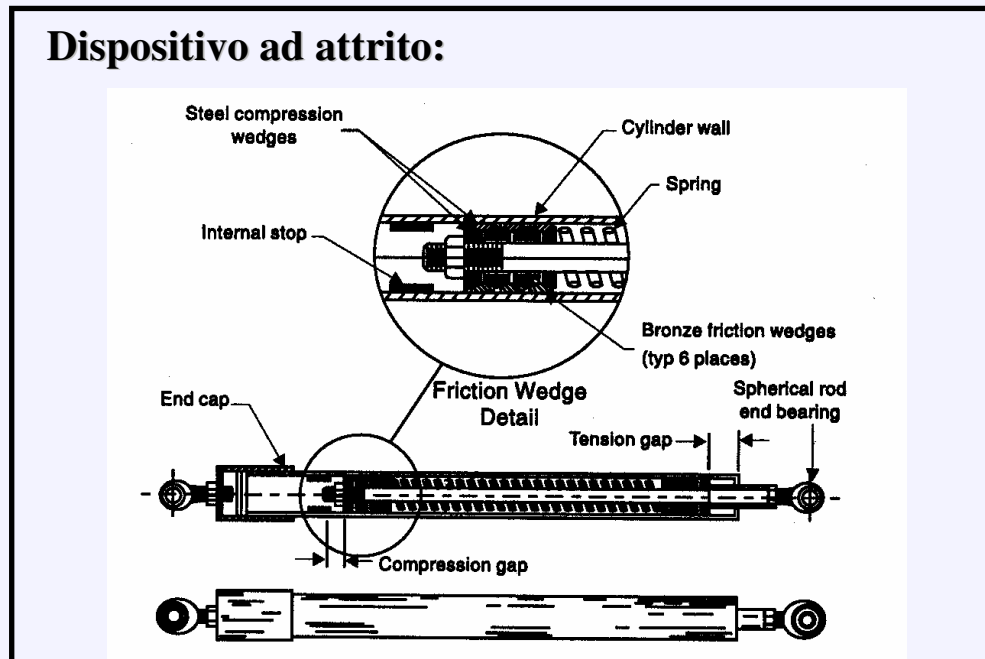
Dispositivo ADAS:



Dispositivo SFV:



Dispositivo ad attrito:



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

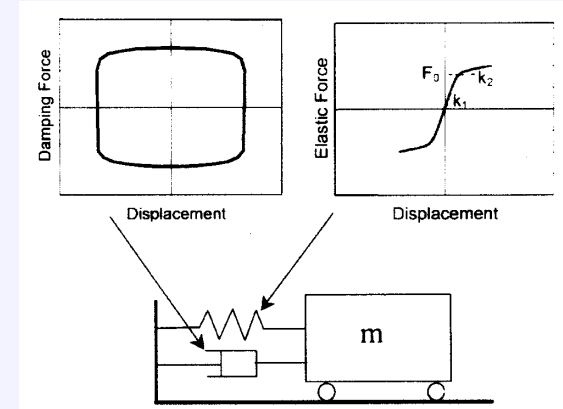
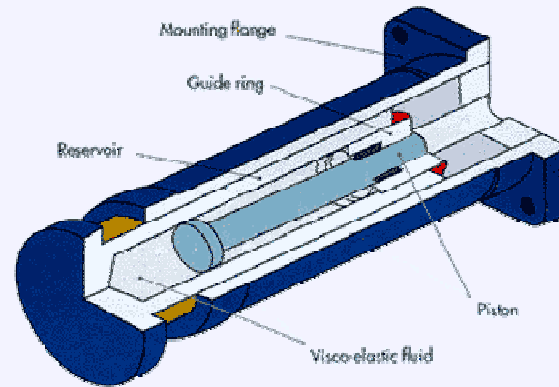
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

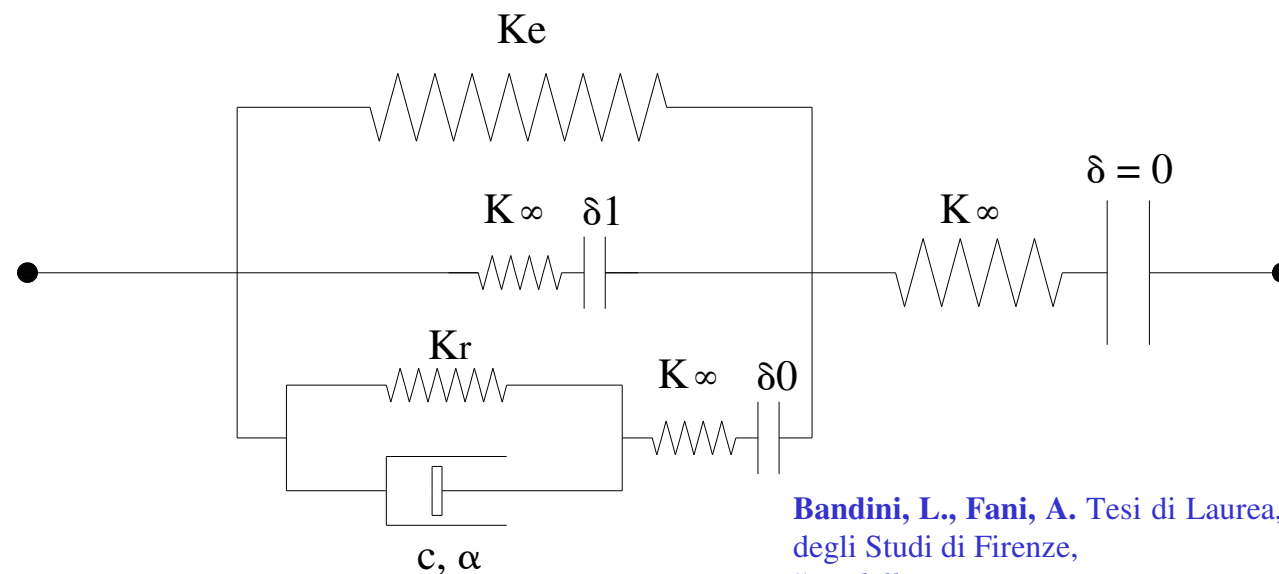
ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

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."

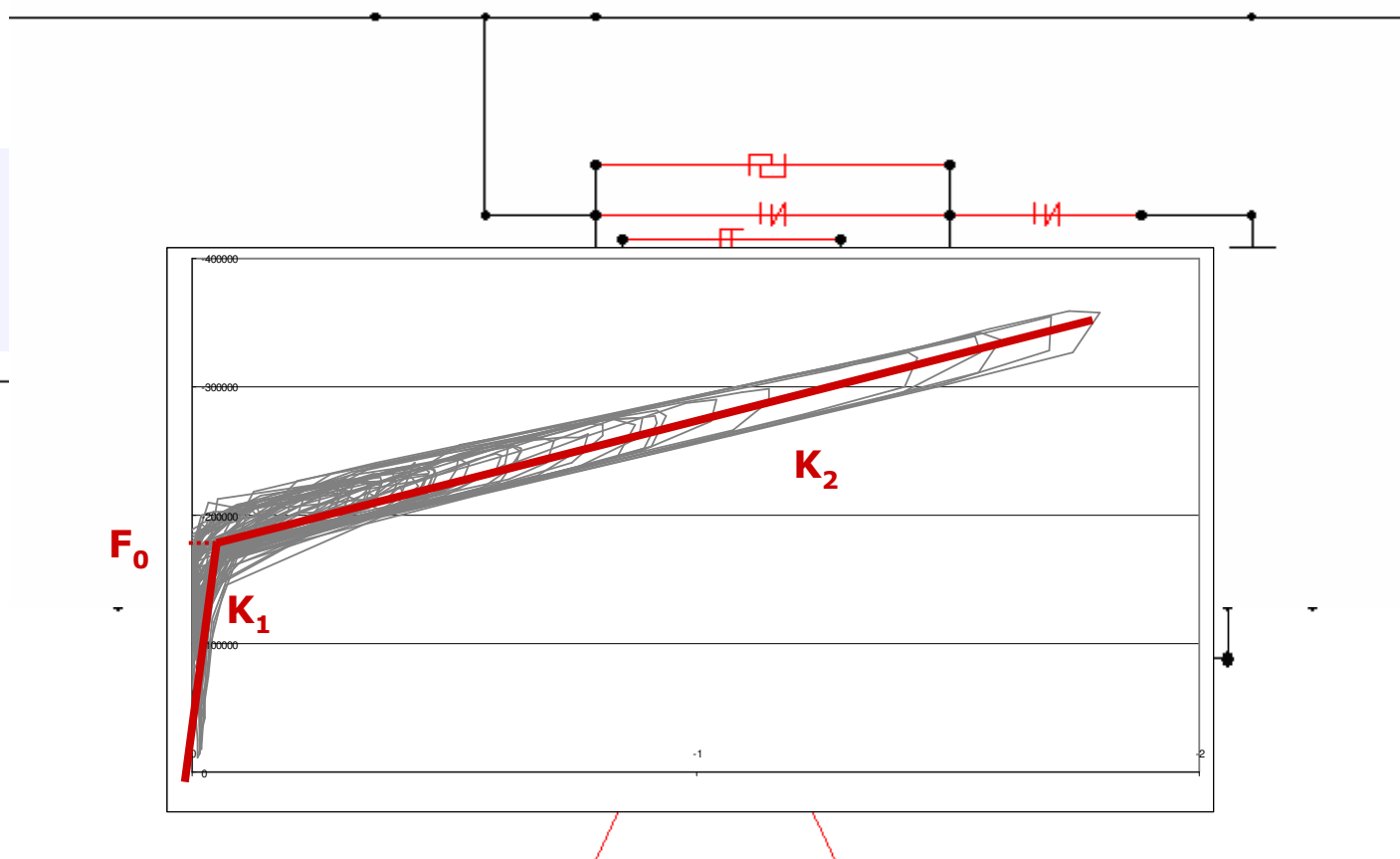
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**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."

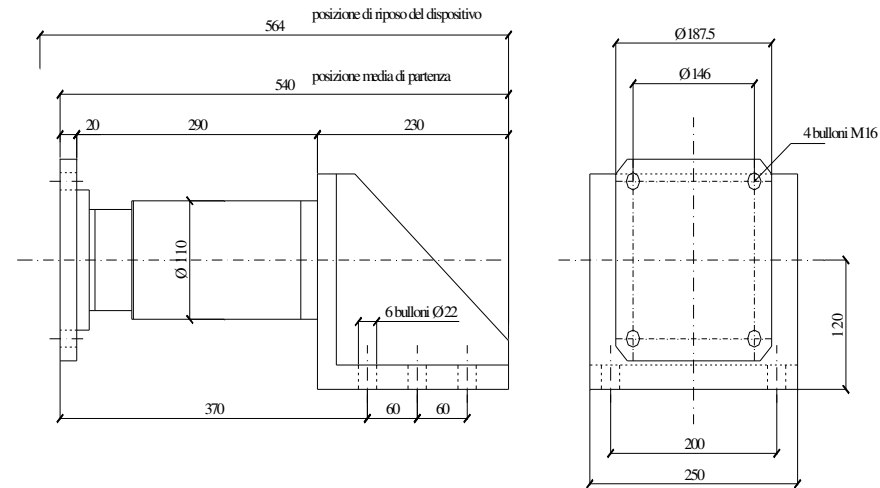
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO SILICONICO-FLUIDOVISCOSO

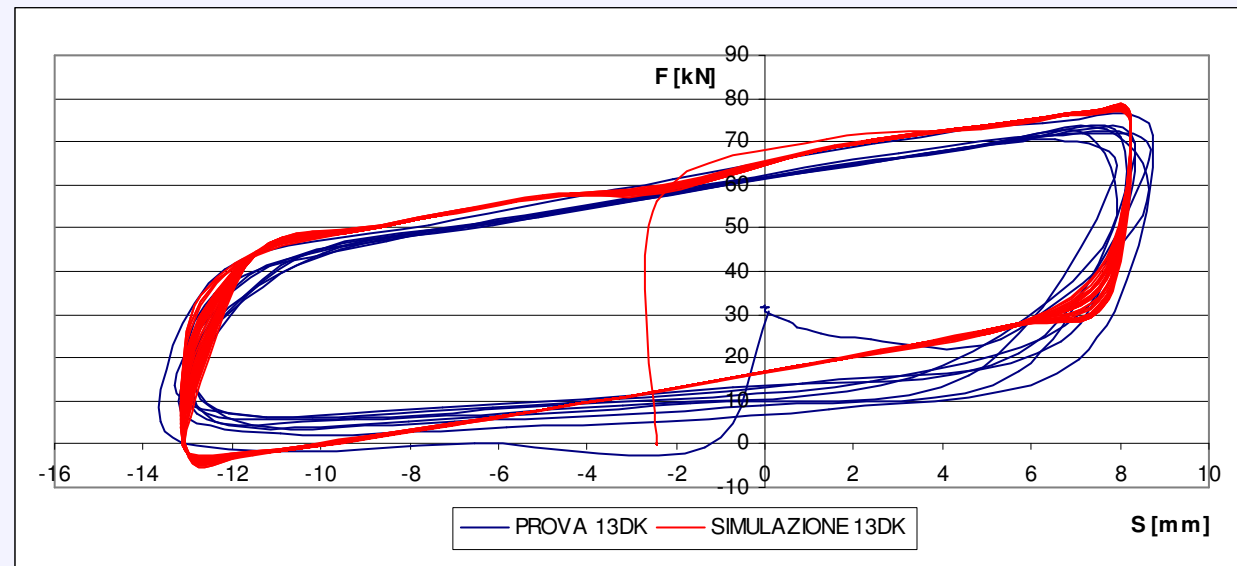


attuatore di tipo MTS 204.63 S/N 751 con caratteristiche di forza massima pari a 100 kN e di corsa pari a ± 120 mm

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."

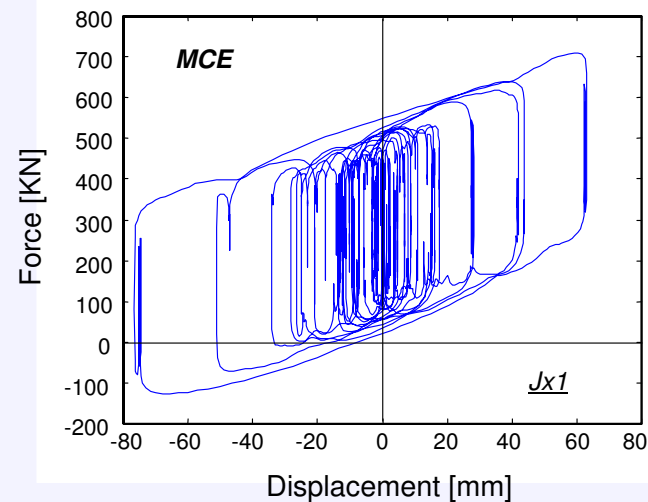
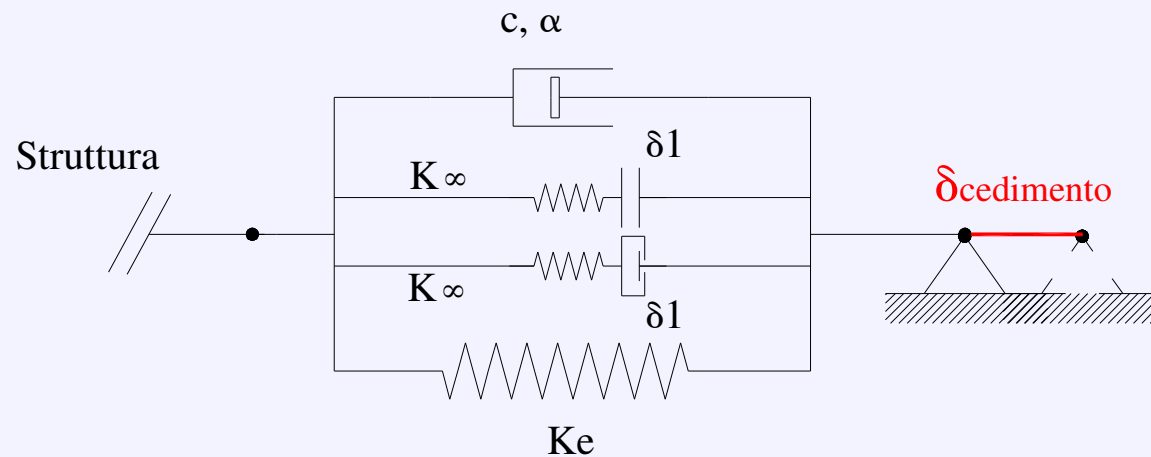
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

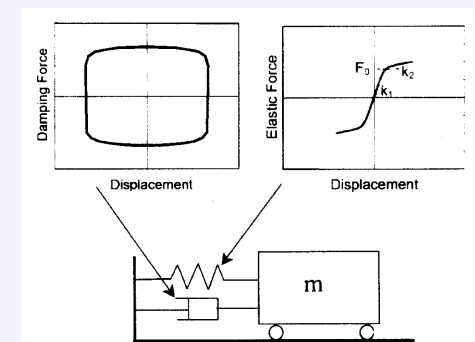
ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO SILICONICO-FLUIDOVISCOSO NUOVO SCHEMA



Precarico 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."

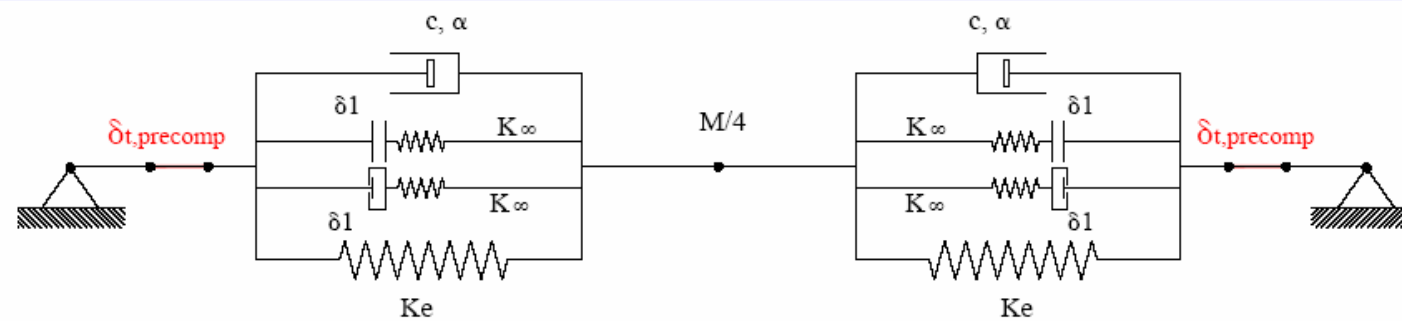
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

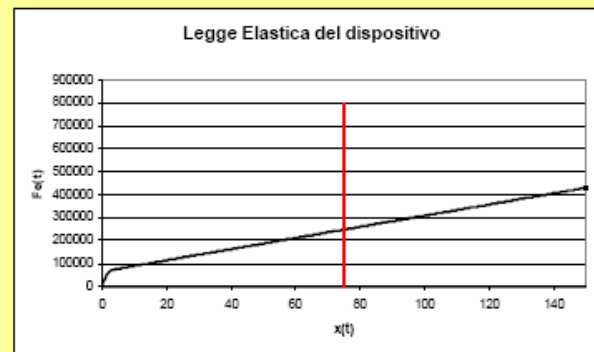
ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO SILICONICO-FLUIDOVISCOSO NUOVO SCHEMA



Caratteristiche	x(t)	Fe(t)
K1=	38525 N/mm	-150 -430583
K2=	2435 N/mm	-75 -247958
F0=	70000 N	-1.9185 -81542.8
X0=	1.918498 mm	0 0
Corsa=	150 mm	1.918498 81542.64
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."

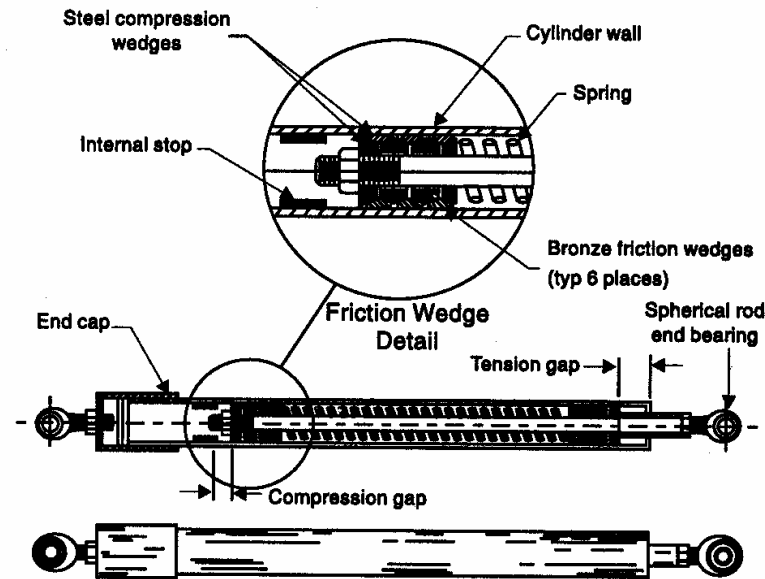
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

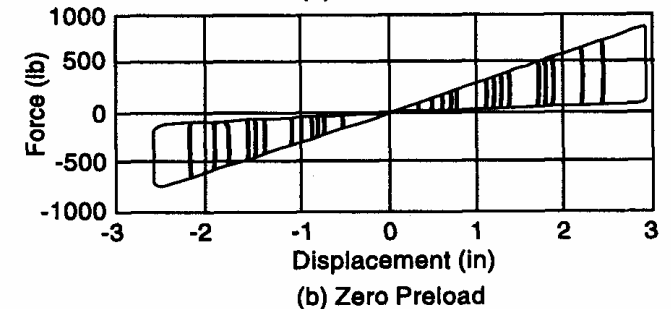
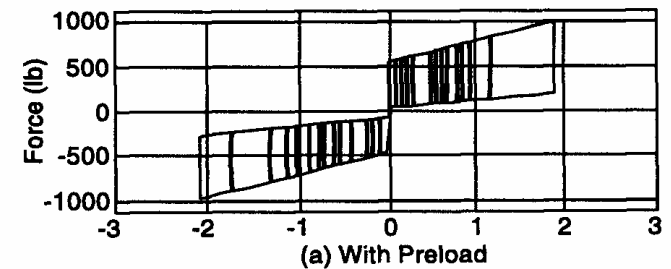
ASSEMBLAGGI DI NLLINK - DISPOSITIVO CON MOLLE AD ATTRITO PRECARICATE



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."

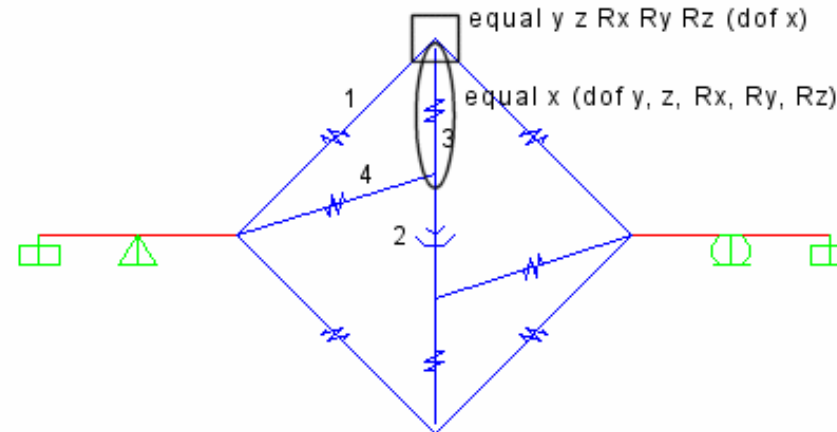
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

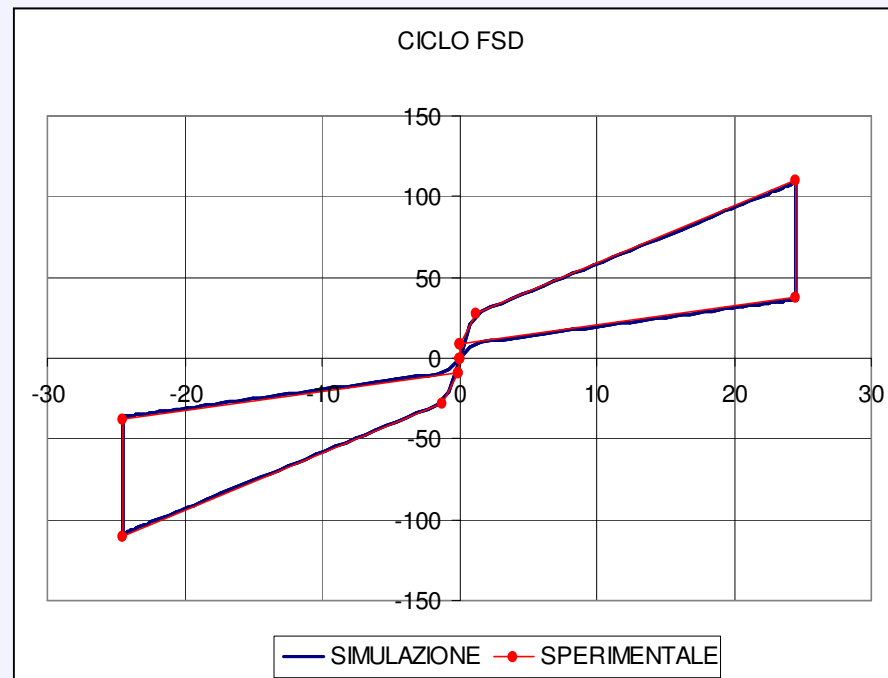
ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

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."

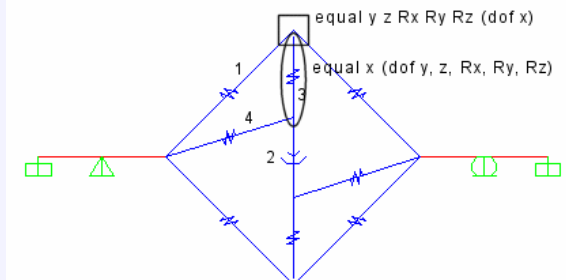
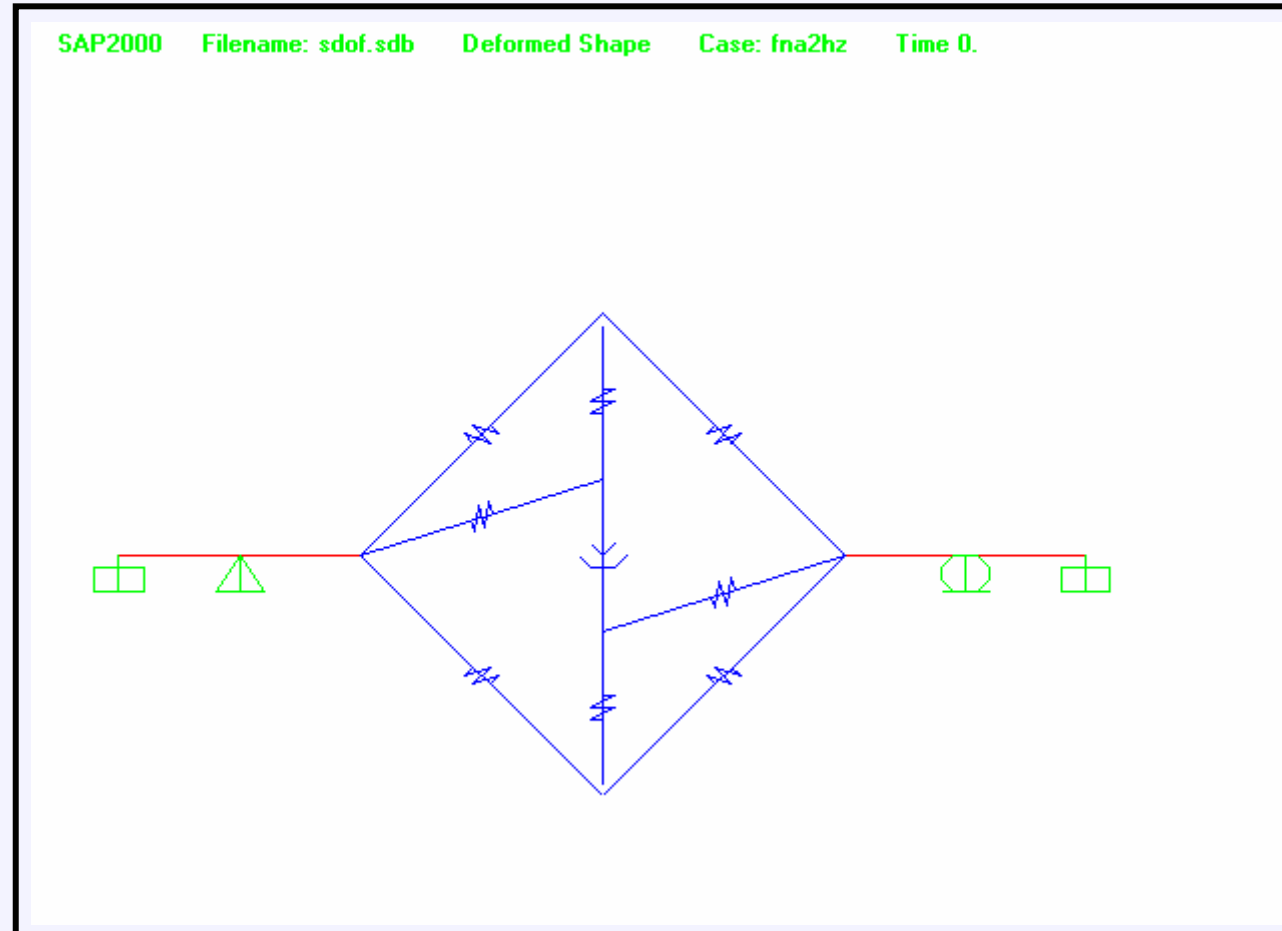
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**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."

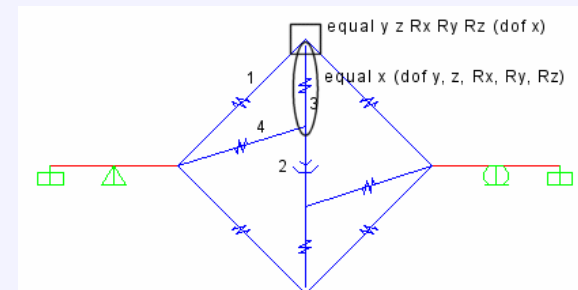
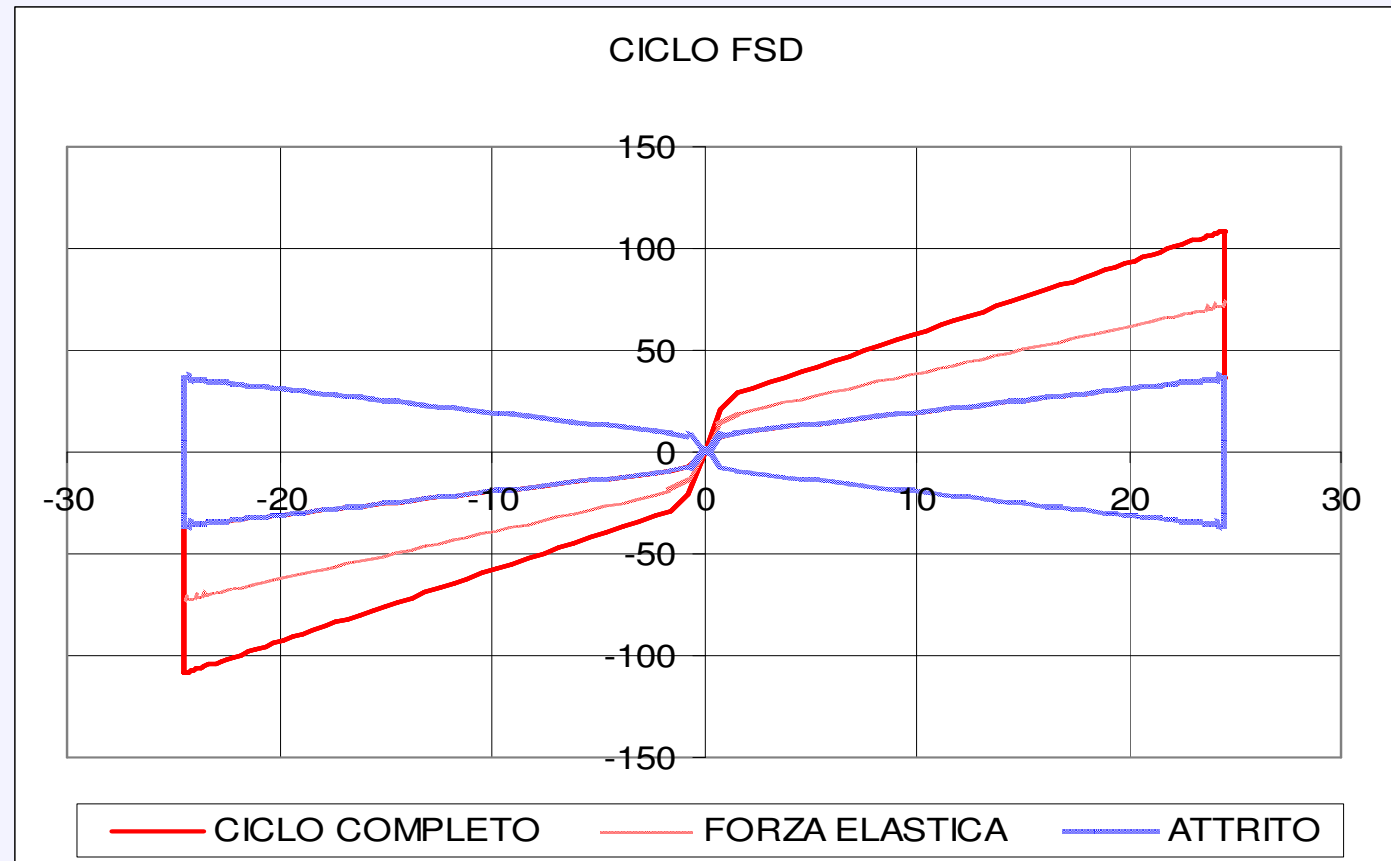
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**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

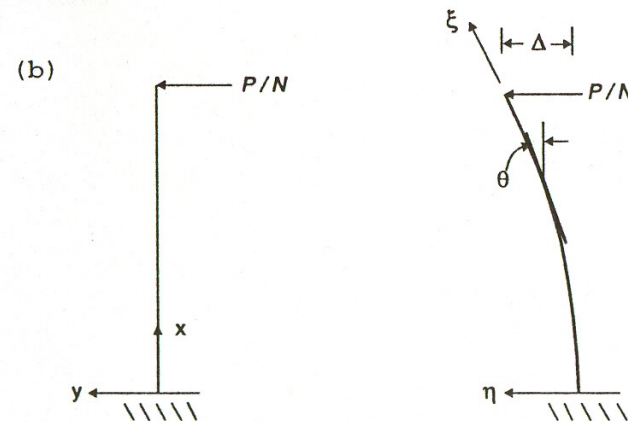
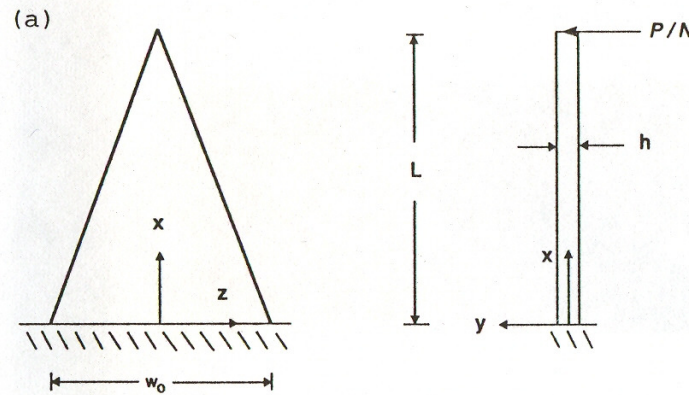
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

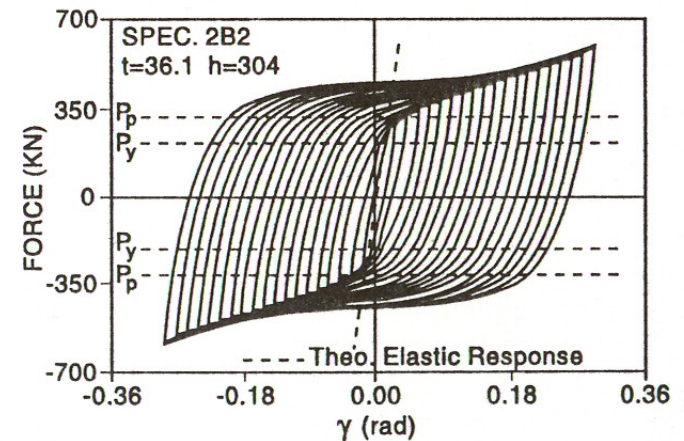
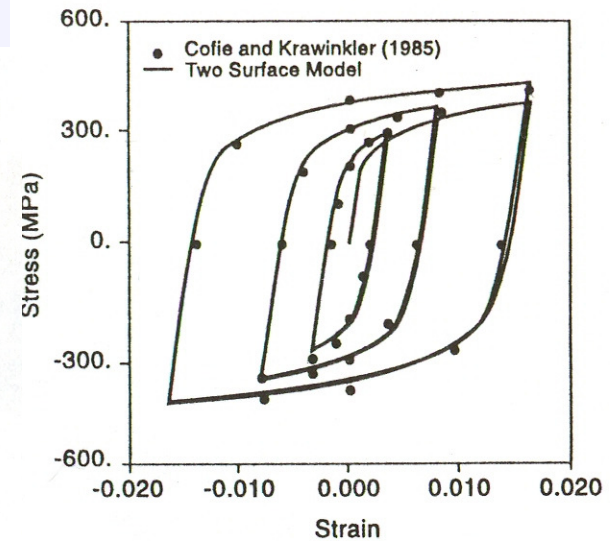
ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

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."

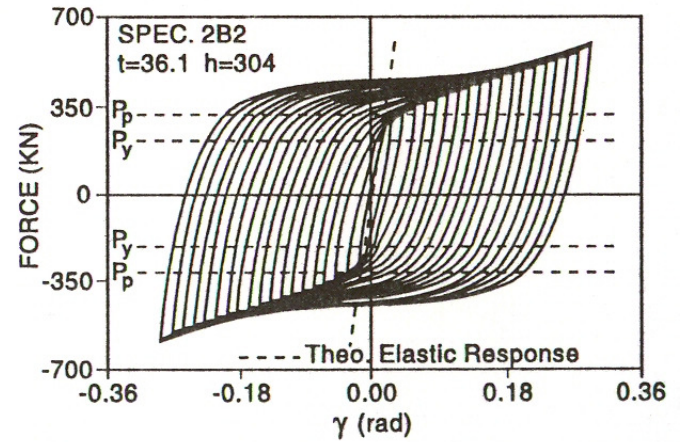
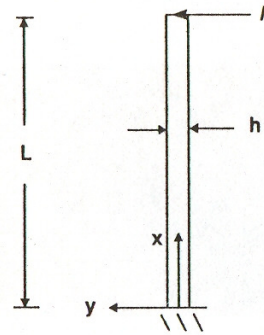
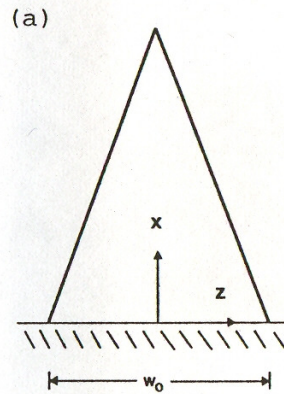
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

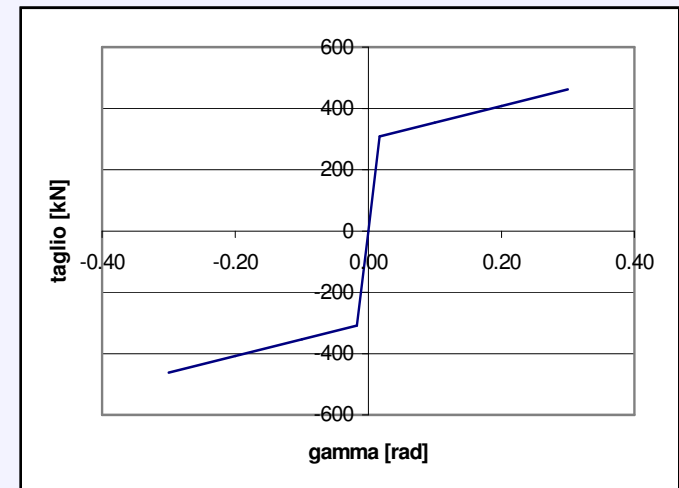
ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO ADAS



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

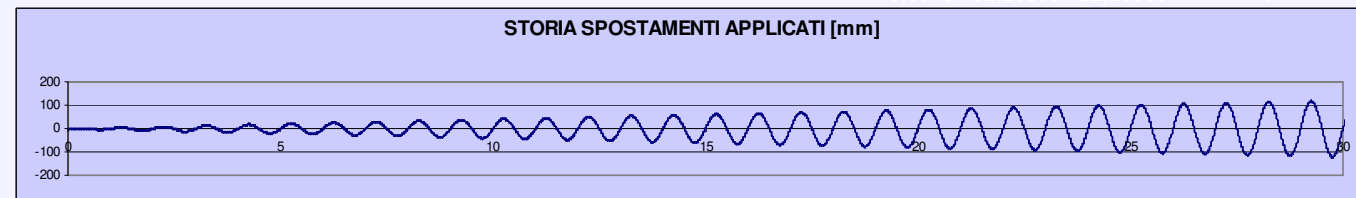
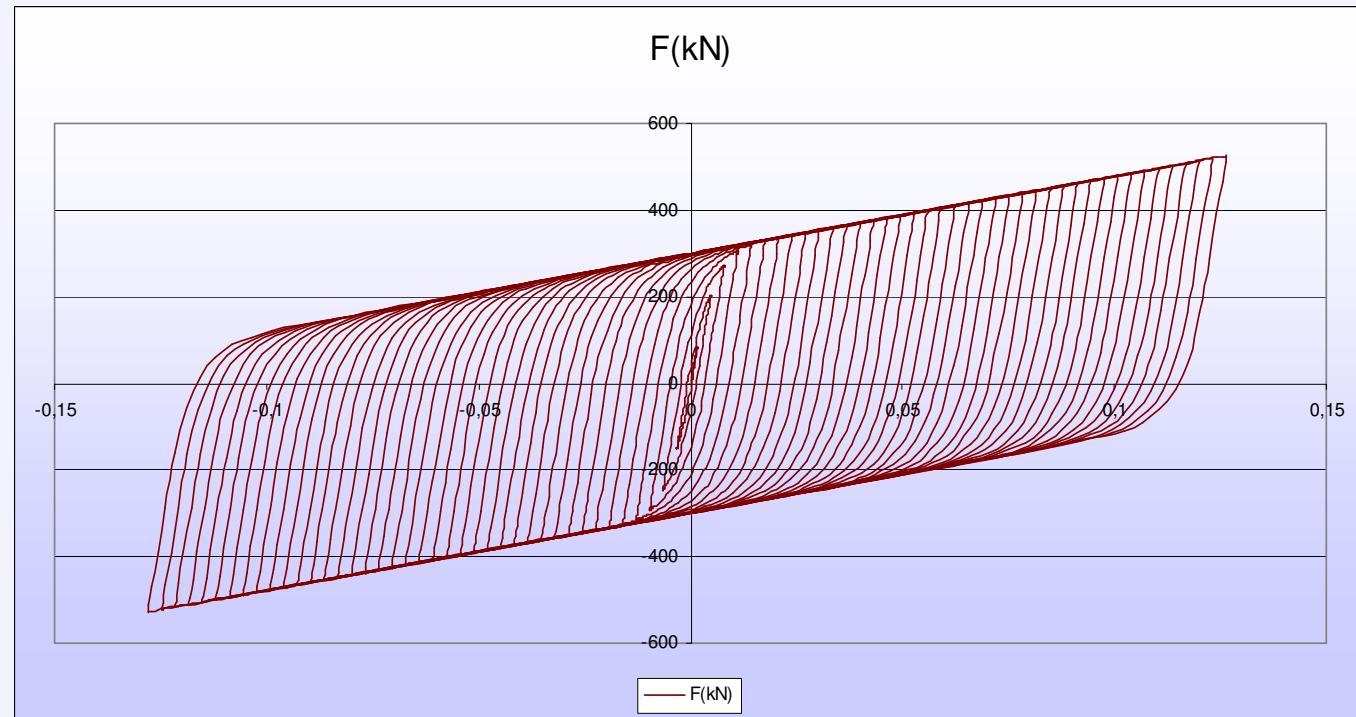
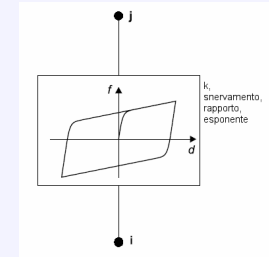
DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

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."

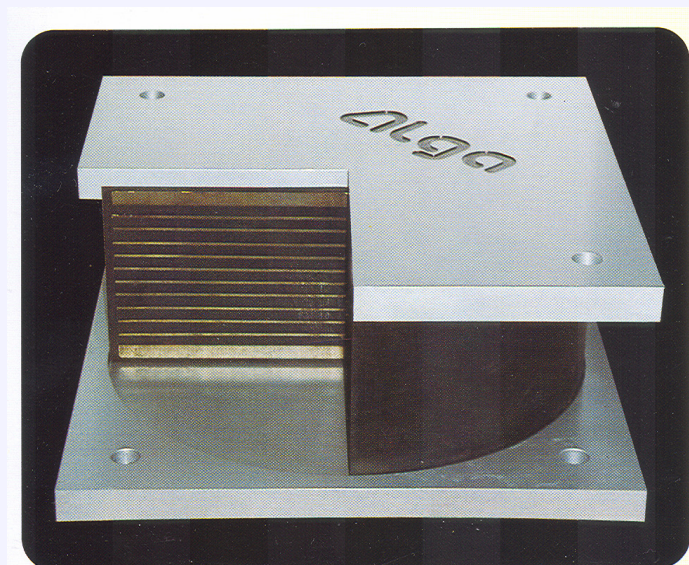
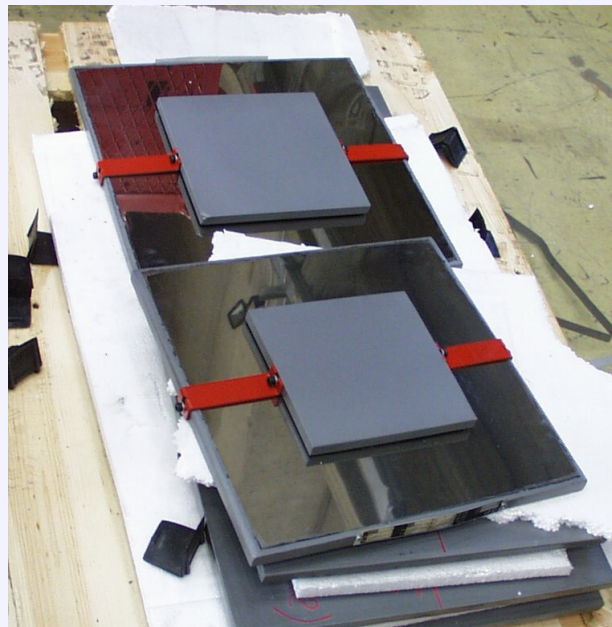
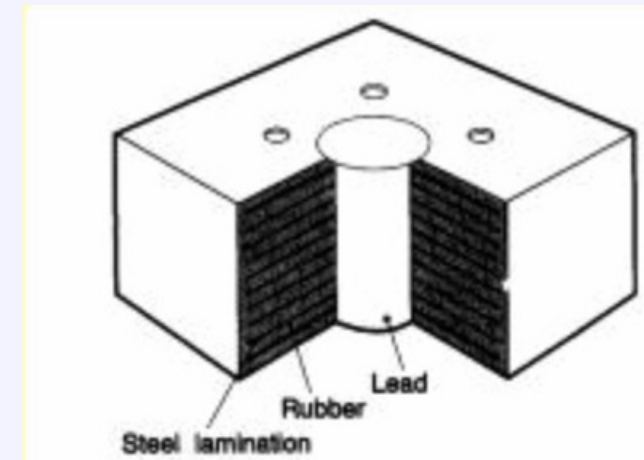
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO**

**ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI**

**ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO**

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO E LA DISSIPAZIONE



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

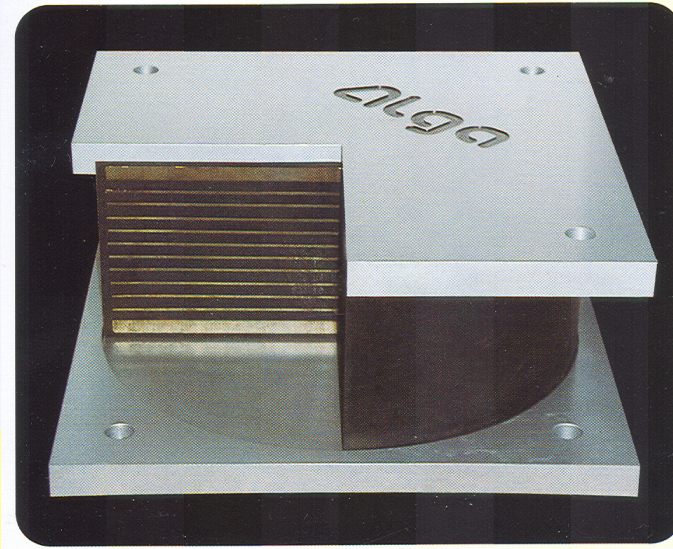
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO**

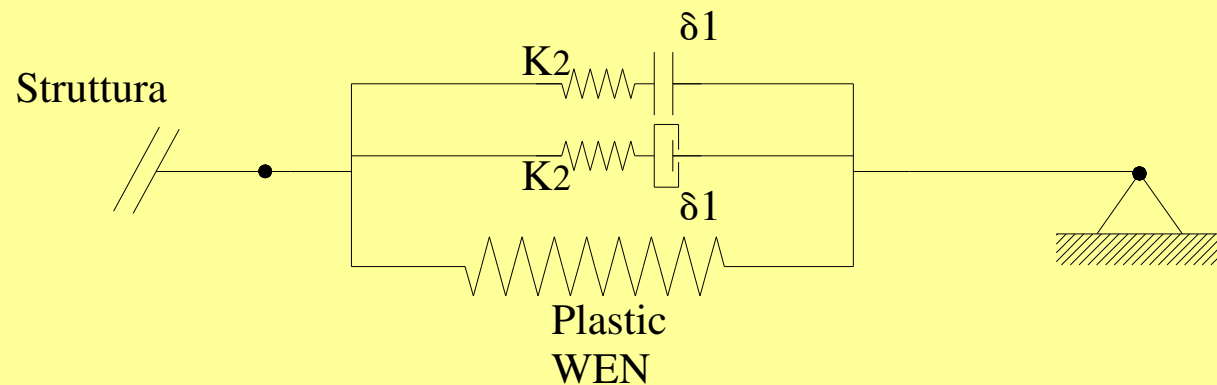
**ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI**

**ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO**

ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO ELASTOMERICO



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."

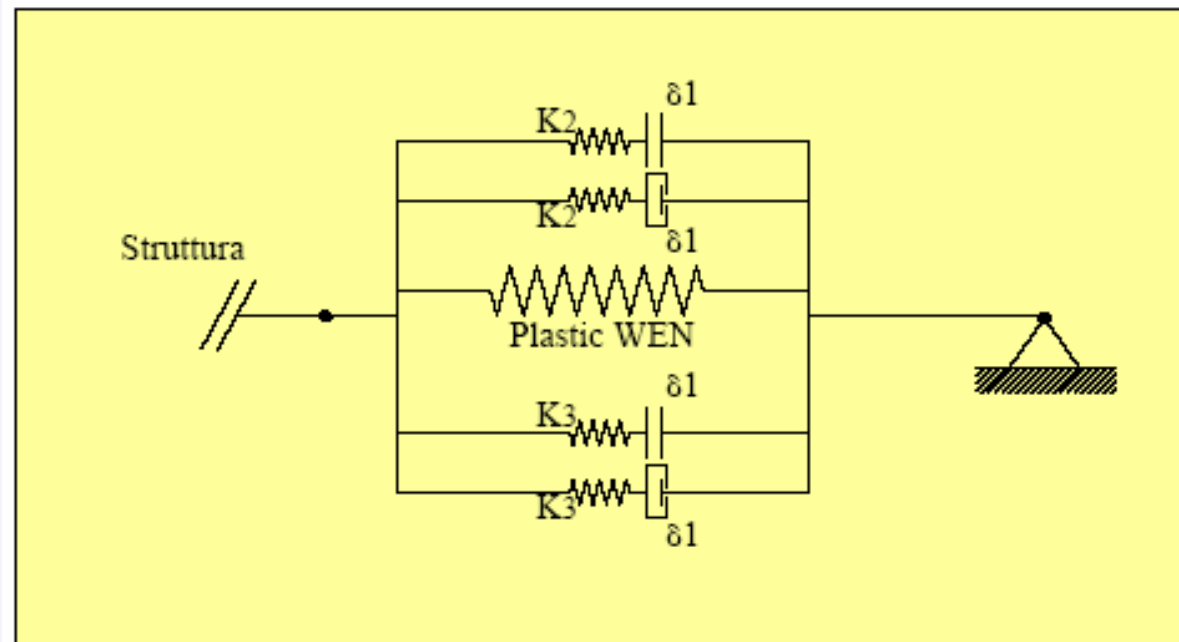
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO ELASTOMERICO



Identificazione del dispositivo [HDS.A500]

-rigidezza secante: $K_H[0-100] = 0.61 \text{ kN/mm}$

-rigidezza primo tratto: $K[20] = 1.3672 \text{ kN/mm}$

-snervamento: $Q_{20} = 35 \text{ kN}$

-rigidezza secondo tratto: $K[20-100] = 0.4207 \text{ kN/mm}$

-rapporto $K[20-100]/K[20] = 0.3077$

-rigidezza terzo ramo: $K[100-150] = 0.618 \text{ kN/mm}$

-rigidezza quarto ramo: $K[150-gmax] = 3.199 \text{ kN/mm}$

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

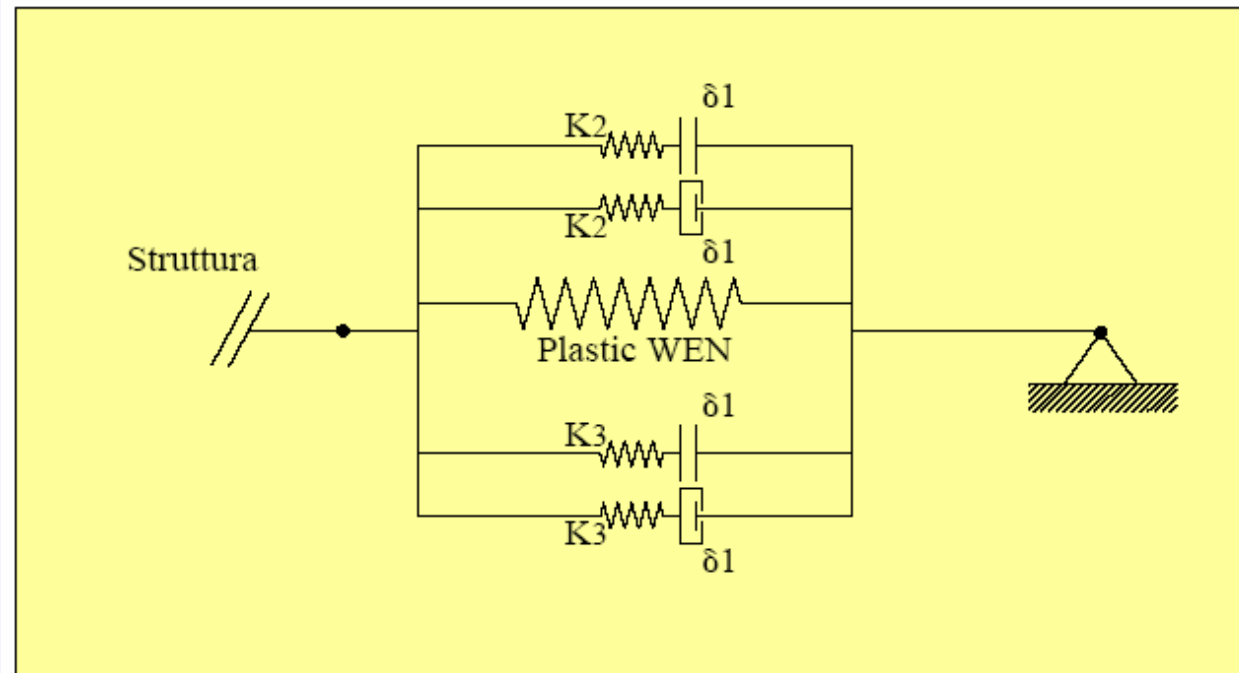
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

**DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO**

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO ELASTOMERICO



Plastic Wen:

-rigidezza secante: $\underline{K_H[0-100]} = 0.61 \text{ kN/mm}$

-rigidezza primo tratto: $\underline{K[20]} = 1.3672 \text{ kN/mm}$

-snervamento: $\underline{Q20} = 35 \text{ kN}$

-rigidezza secondo tratto: $\underline{K[20-100]} = 0.4207 \text{ kN/mm}$

-rapporto $\underline{K[20-100]/K[20]} = 0.3077$

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

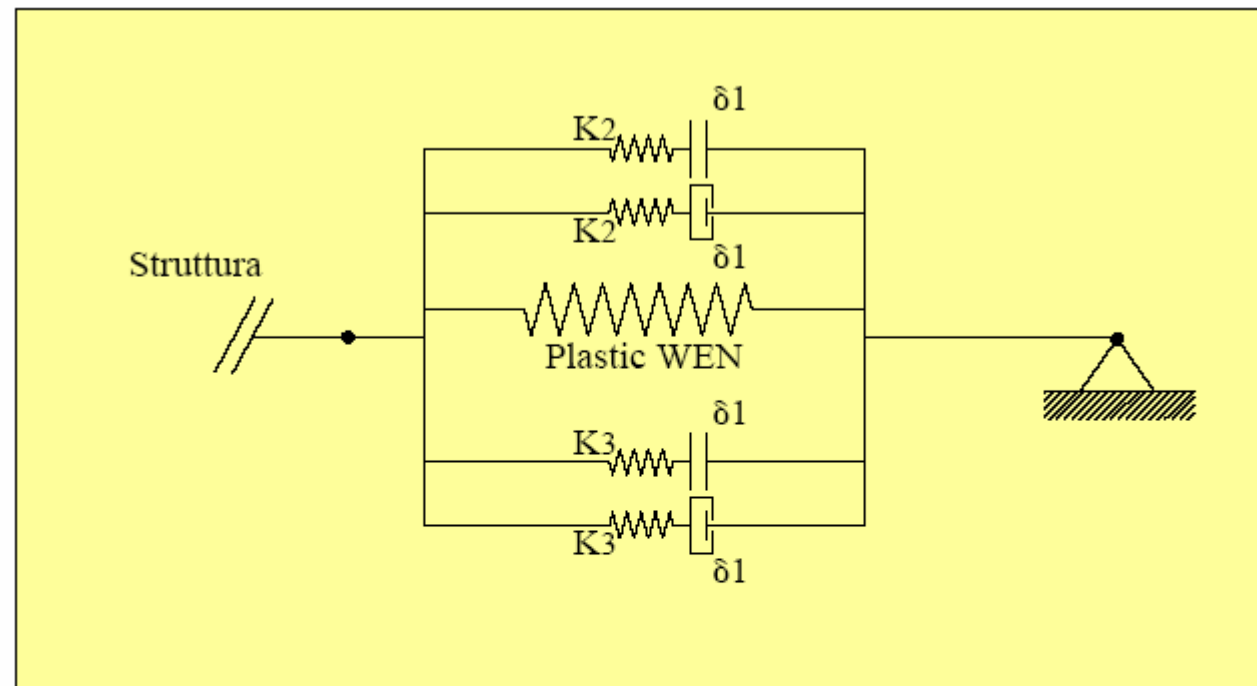
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO ELASTOMERICO



GAP/HOOK terzo ramo:

-rigidezza terzo ramo: $K[100-150] = 0.618 \text{ kN/mm}$

-apertura gap/hook: 128 mm

-rigidezza lineare: nulla

-rigidezza fase nl: $K[100-150] - K[20-100] = 0.2 \text{ kN/mm}$

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

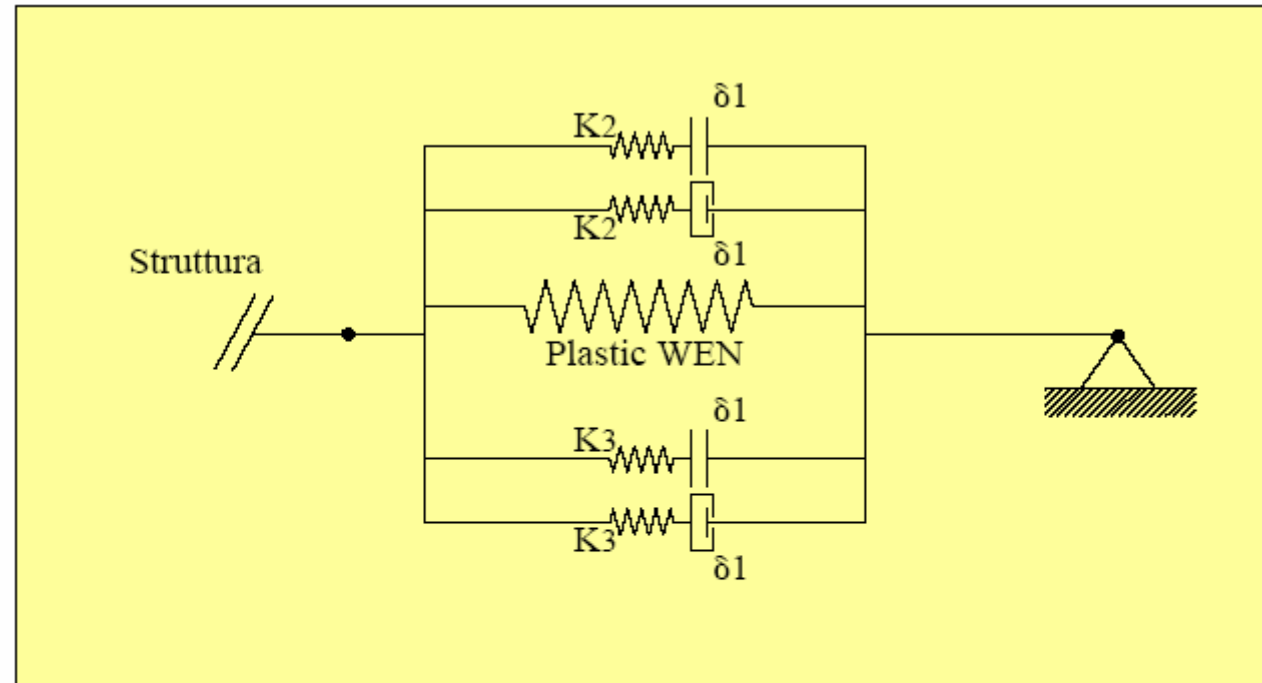
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO

ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO ELASTOMERICO



GAP/HOOK quarto ramo:

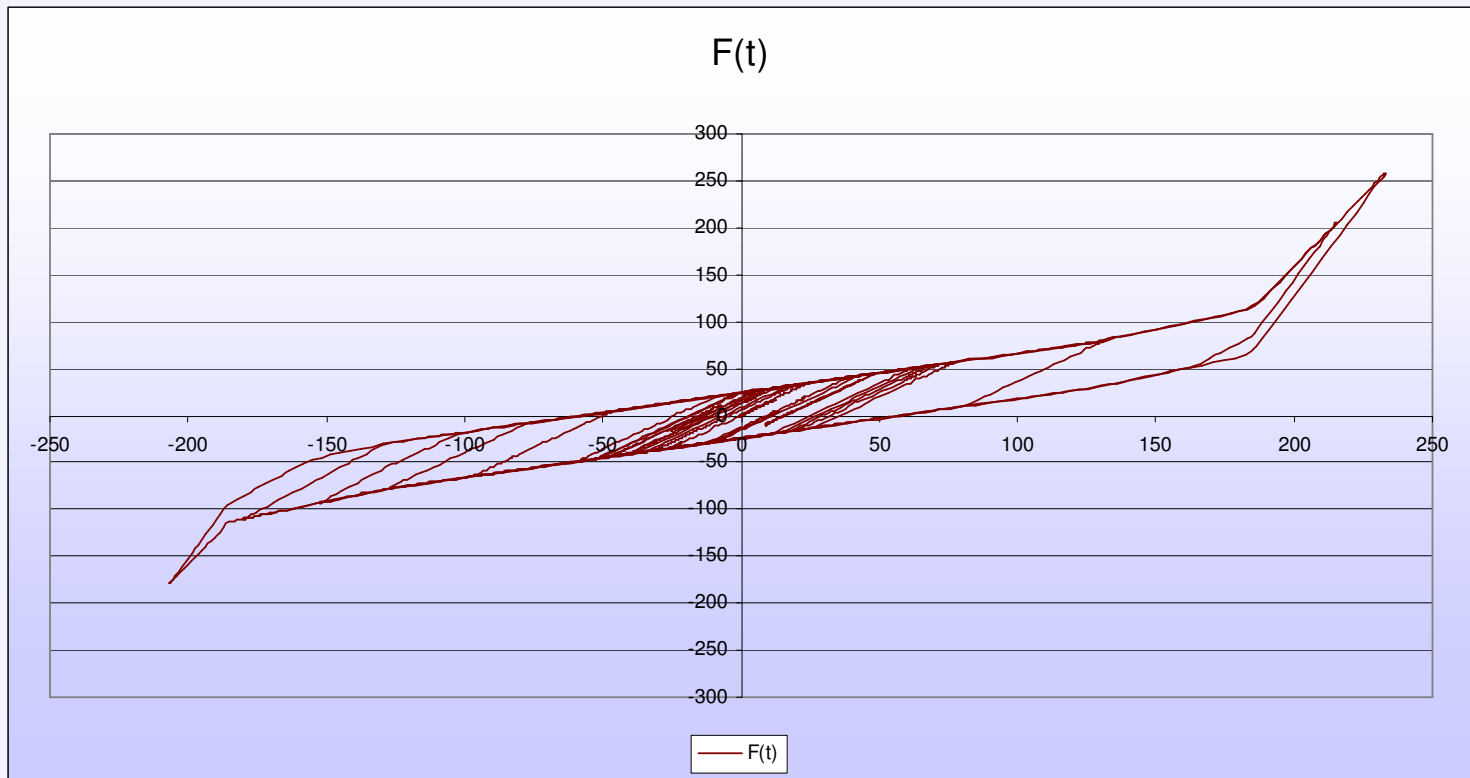
-rigidezza terzo ramo: $K[150-g_{max}] = 3.199 \text{ kN/mm}$

-apertura gap/hook: 185 mm

-rigidezza lineare: nulla

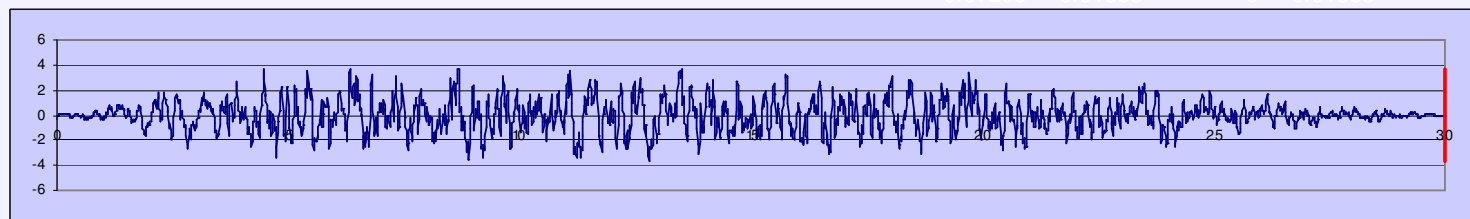
-rigidezza fase nl: $K[150-g_{max}] - K[100-150] - K[20-100] = 2.58 \text{ kN/mm}$

ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO ELASTOMERICO



x0 0
32.5 258.4216

$T_{max} =$	30
$N_{iter} =$	3001
Scala =	20
T = 30.00	
Totale	
Incrementale	



-0.91205 -0.91663 0 -0.91663

-1.02155 -1.39666 0 -1.39666

Risposta di un dispositivo elastomerico con fase iperelastica

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

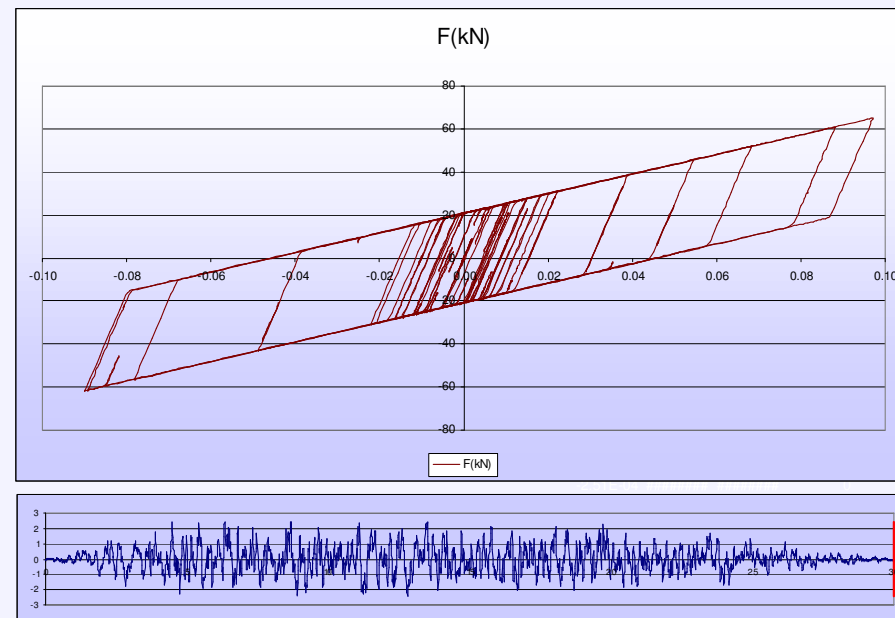
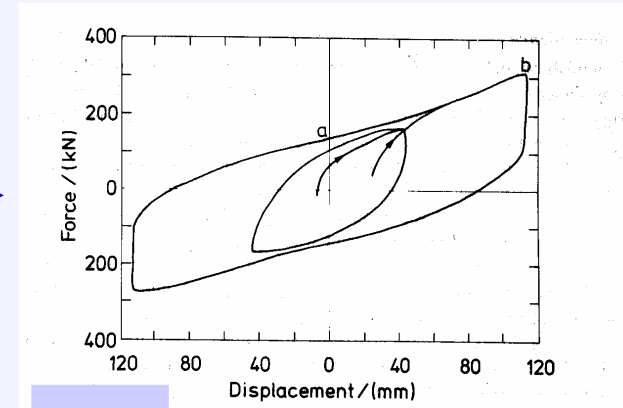
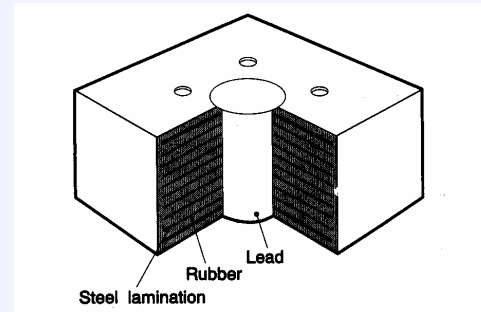
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

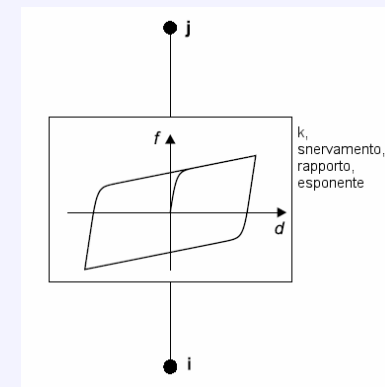
ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO ELASTOMERICO CON NUCLEO IN PIOMBO



Elemento Plastic-WEN



$$\begin{aligned} K1 &= 4555 \text{ N/mm} \\ K2 &= 455.5 \text{ N/mm} \\ Fy &= 23100 \text{ N} \\ Exp &= 20 \end{aligned}$$

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

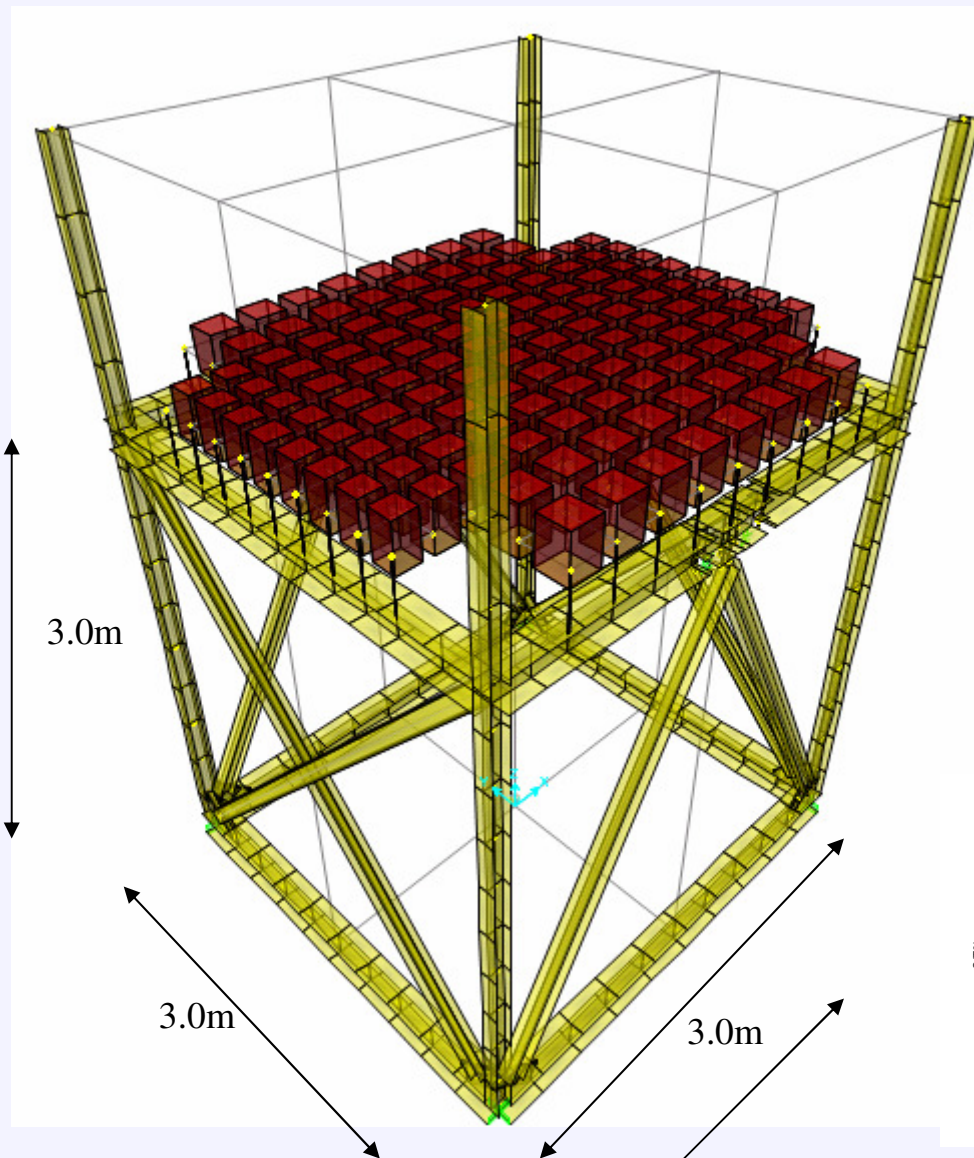
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**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.

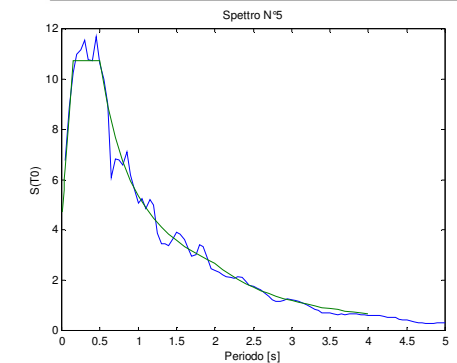
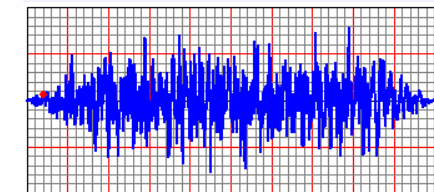
Htot: 4.50m

Himp: 3.0m

Massa totale: 824 kgs²/m

**Accelerogramma Zona 1
terreno B**

**spettrocompatibile
OPCM3274**



Direzione protetta da controventi dissipativi

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

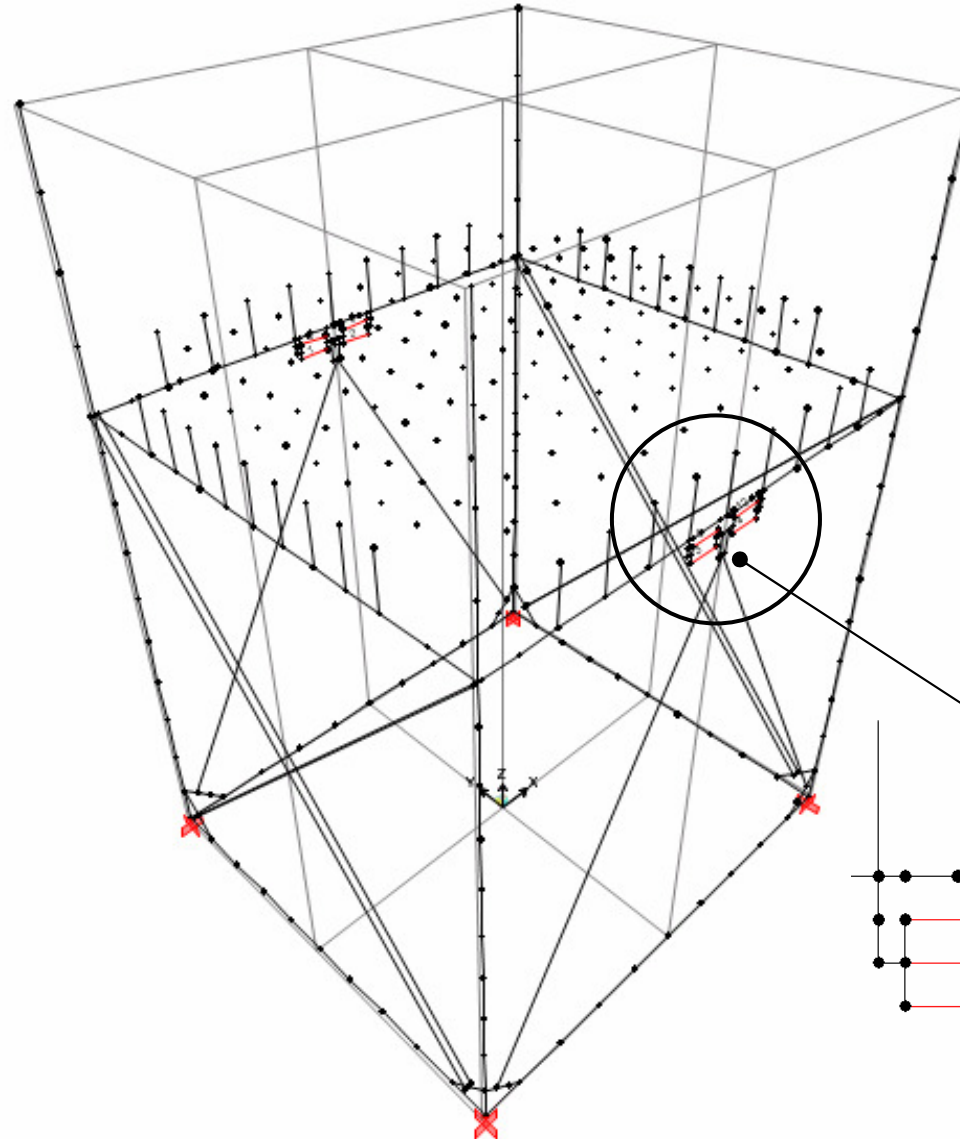
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO**

**ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI**

**ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO**

ESEMPIO APPLICATIVO: (telaio PROGETTO Neforee)



Dispositivi JARRET tipo BC1BN

corsa = 25 mm

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

$$\alpha = 0.2$$

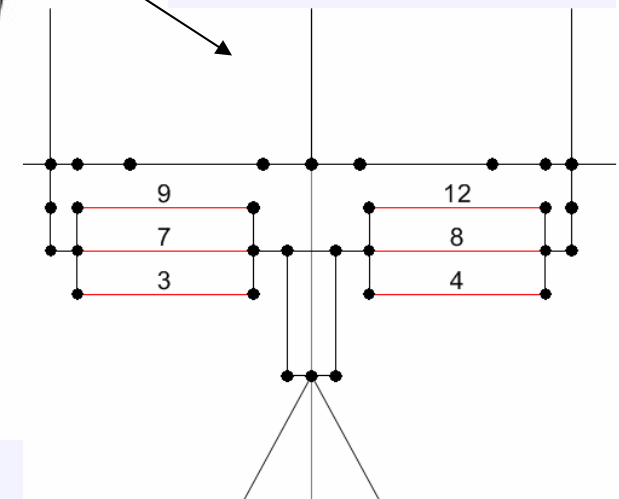
$$K = 0.52 \text{ KN/mm}$$

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

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."

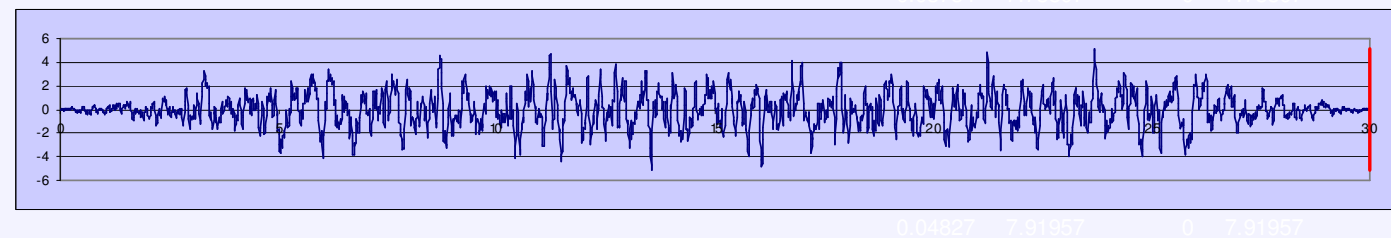
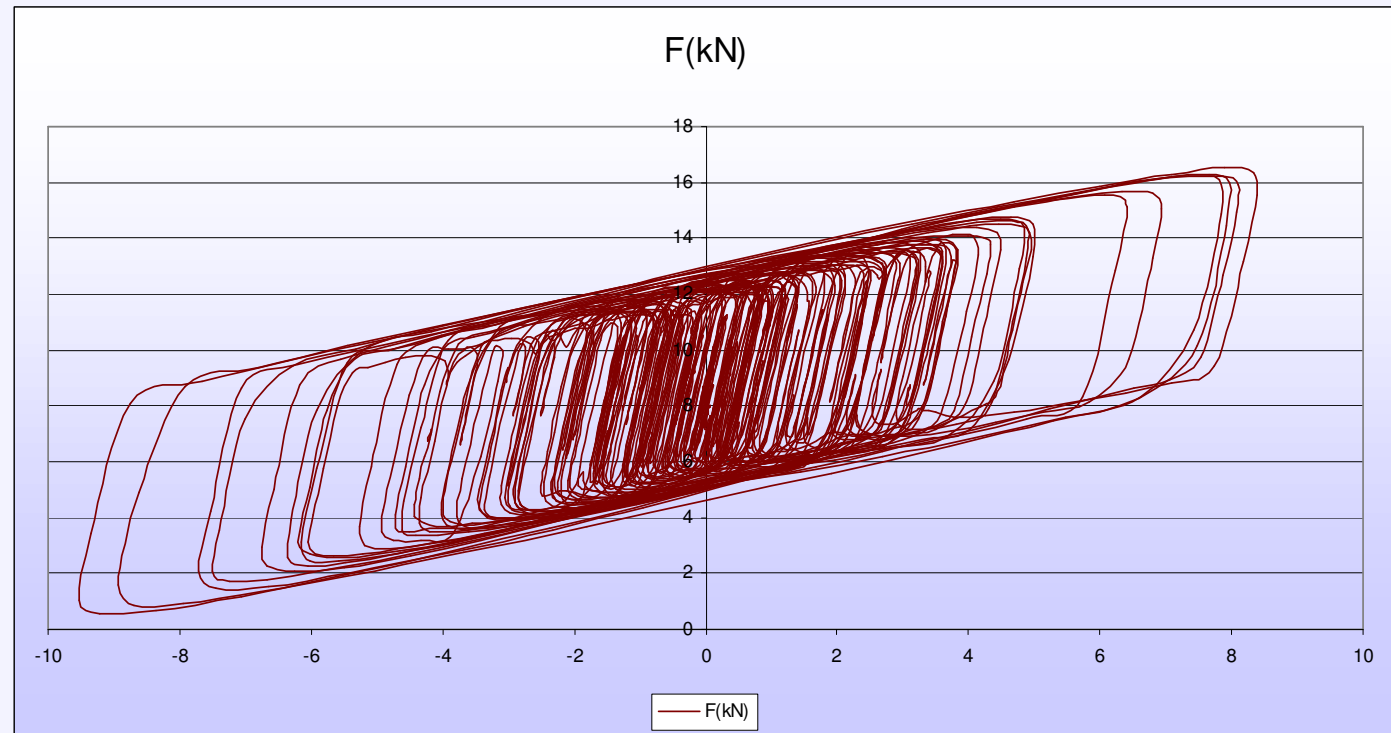
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**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."

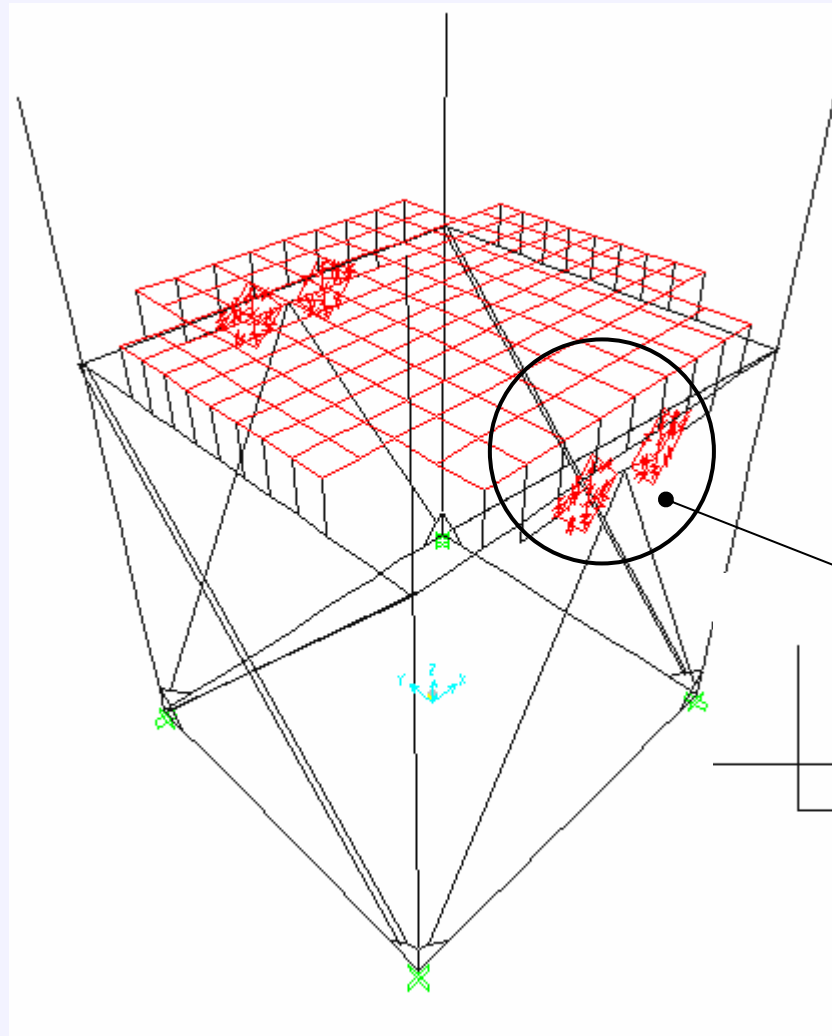
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO**

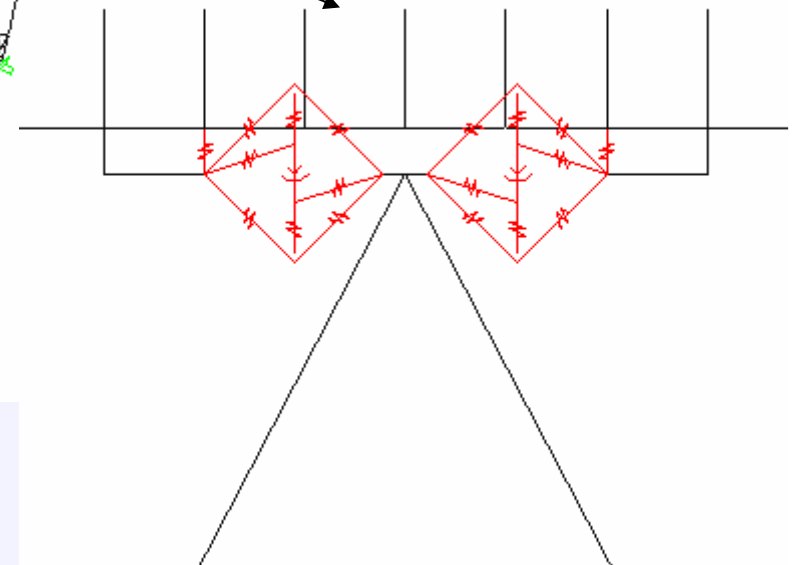
**ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI**

**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."

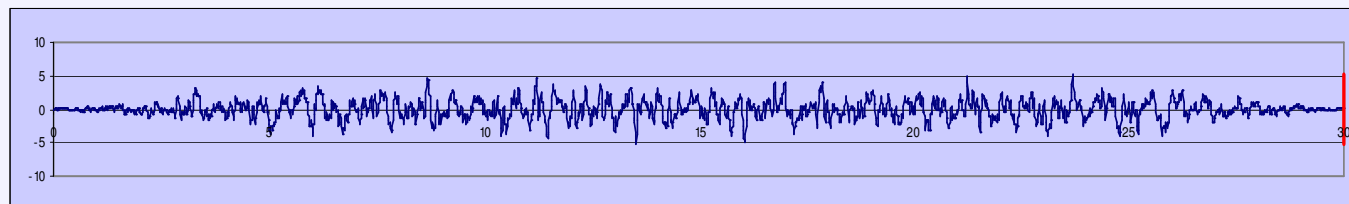
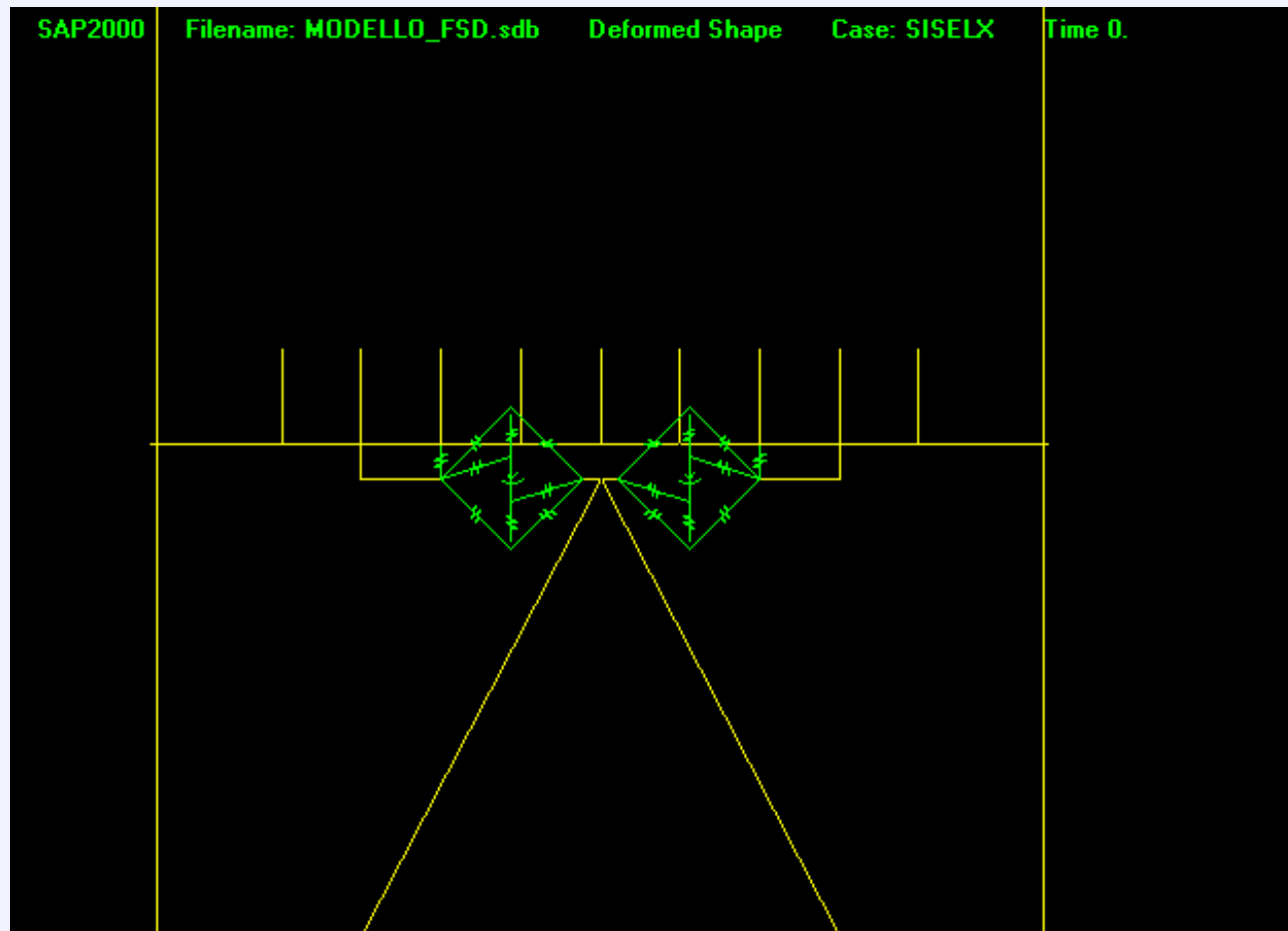
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**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."

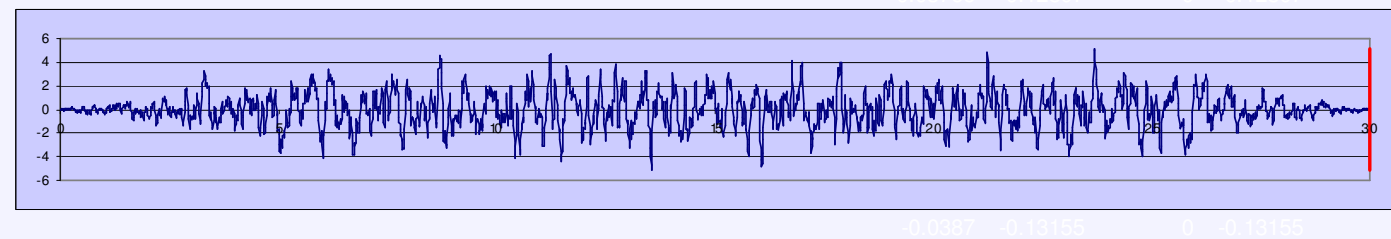
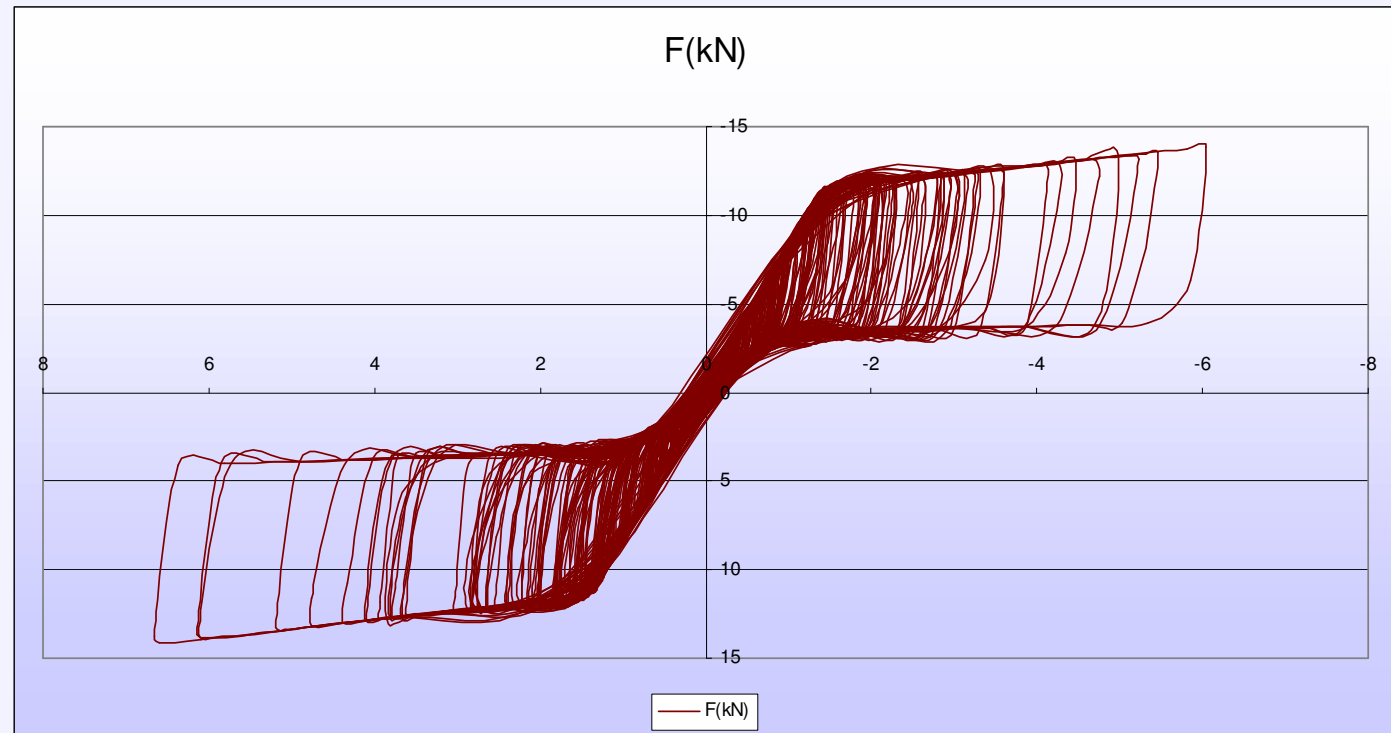
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**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."

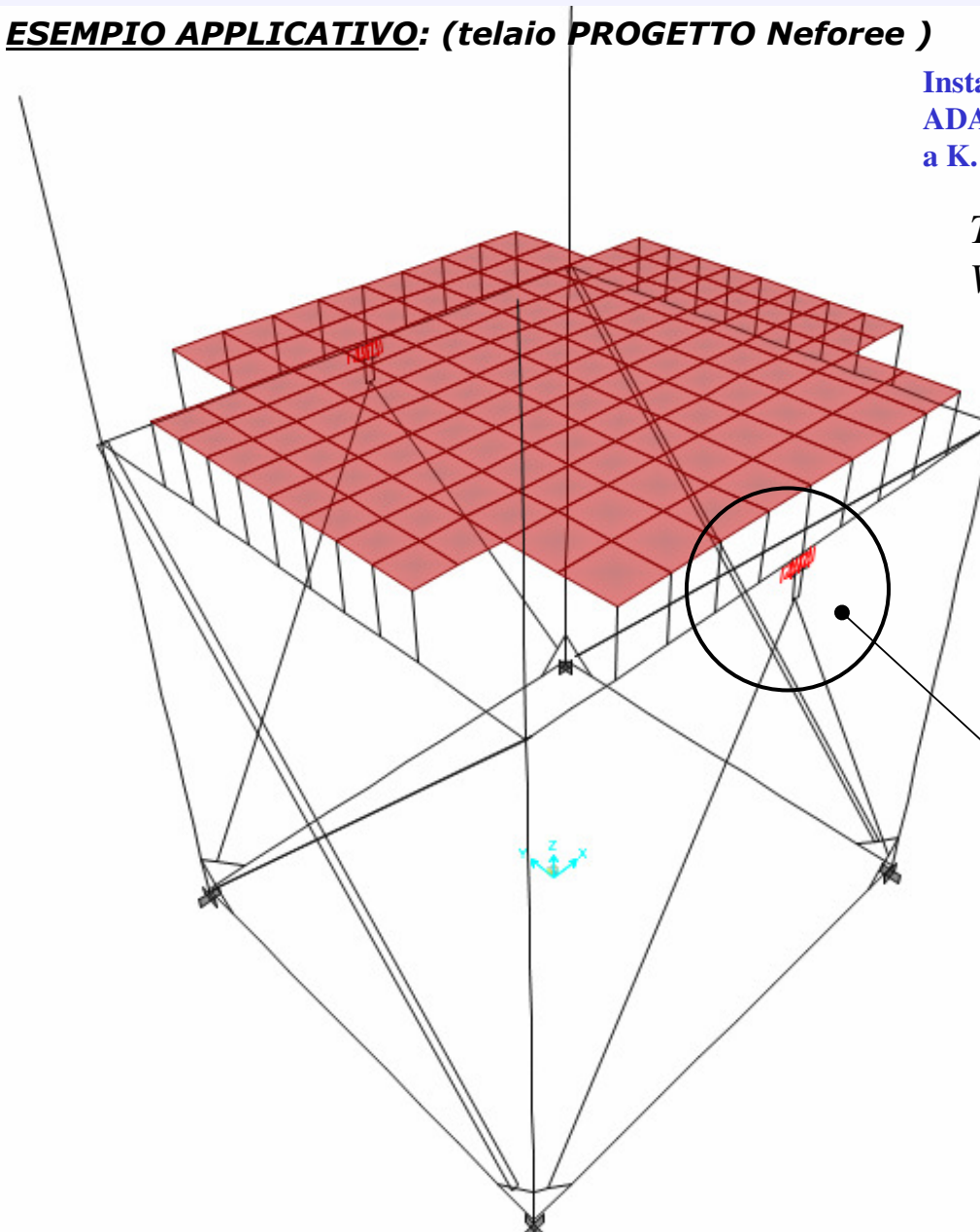
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO**

**ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI**

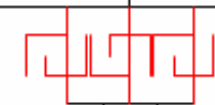
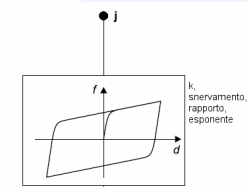
**ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO**

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

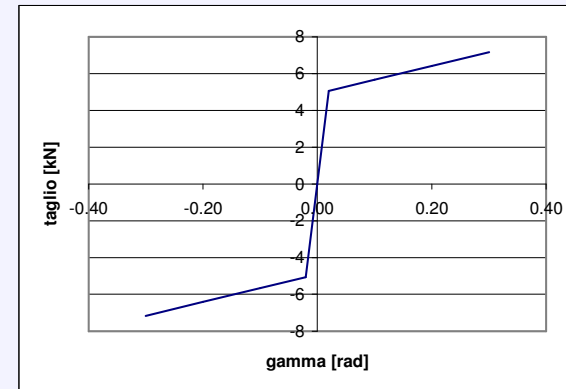
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

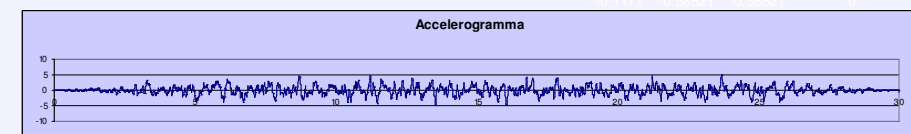
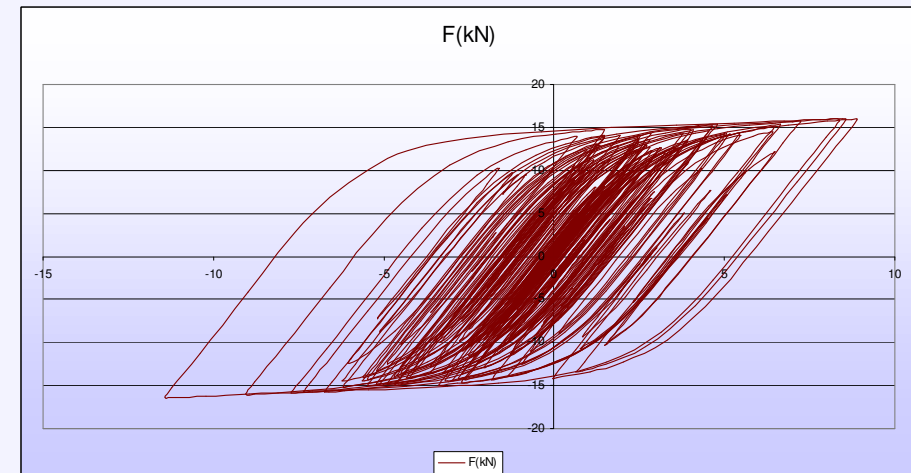
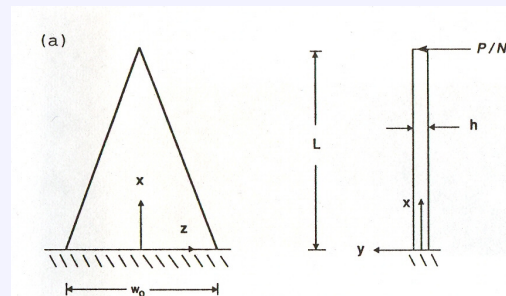
ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

ESEMPIO APPLICATIVO: (telaio PROGETTO Neforee)

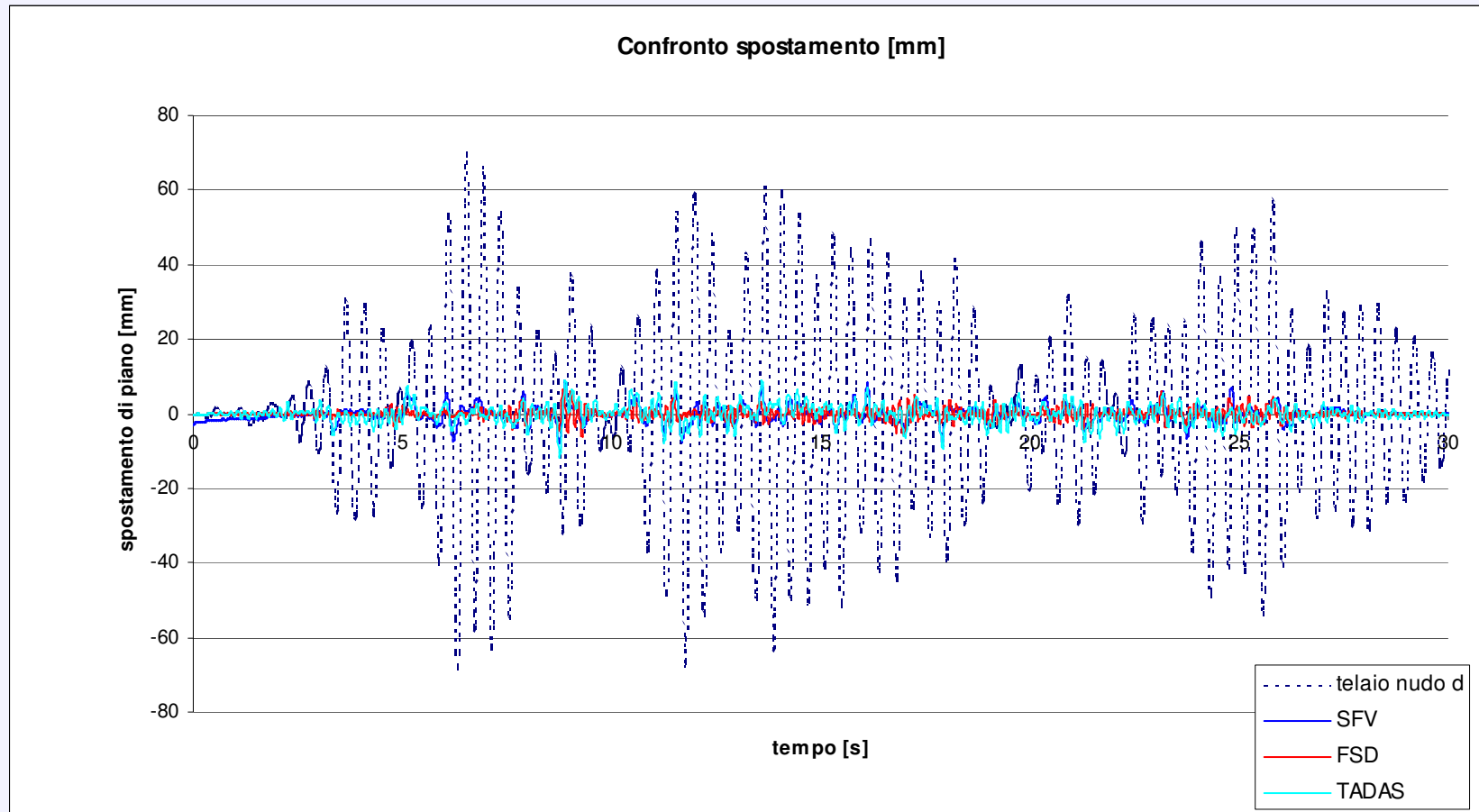
N	1	γ	Δ [mm]	F [kN]
E	200000 N/mm ²	-0.30	-45.00	-7.160625
w0	50 mm	-0.20	-30.00	-6.410625
L	150 mm	-0.10	-15.00	-5.660625
h	15 mm	-0.02	-3.04	-5.0625
σ_y	270 N/mm ²	0.00	0.00	0
k1=P/(D)	1666.667 N/mm	0.02	3.04	5.0625
beta	0.03	0.10	15.00	5.660625
k2	50 N/mm	0.20	30.00	6.410625
Pu	5062.5 N	0.30	45.00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



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

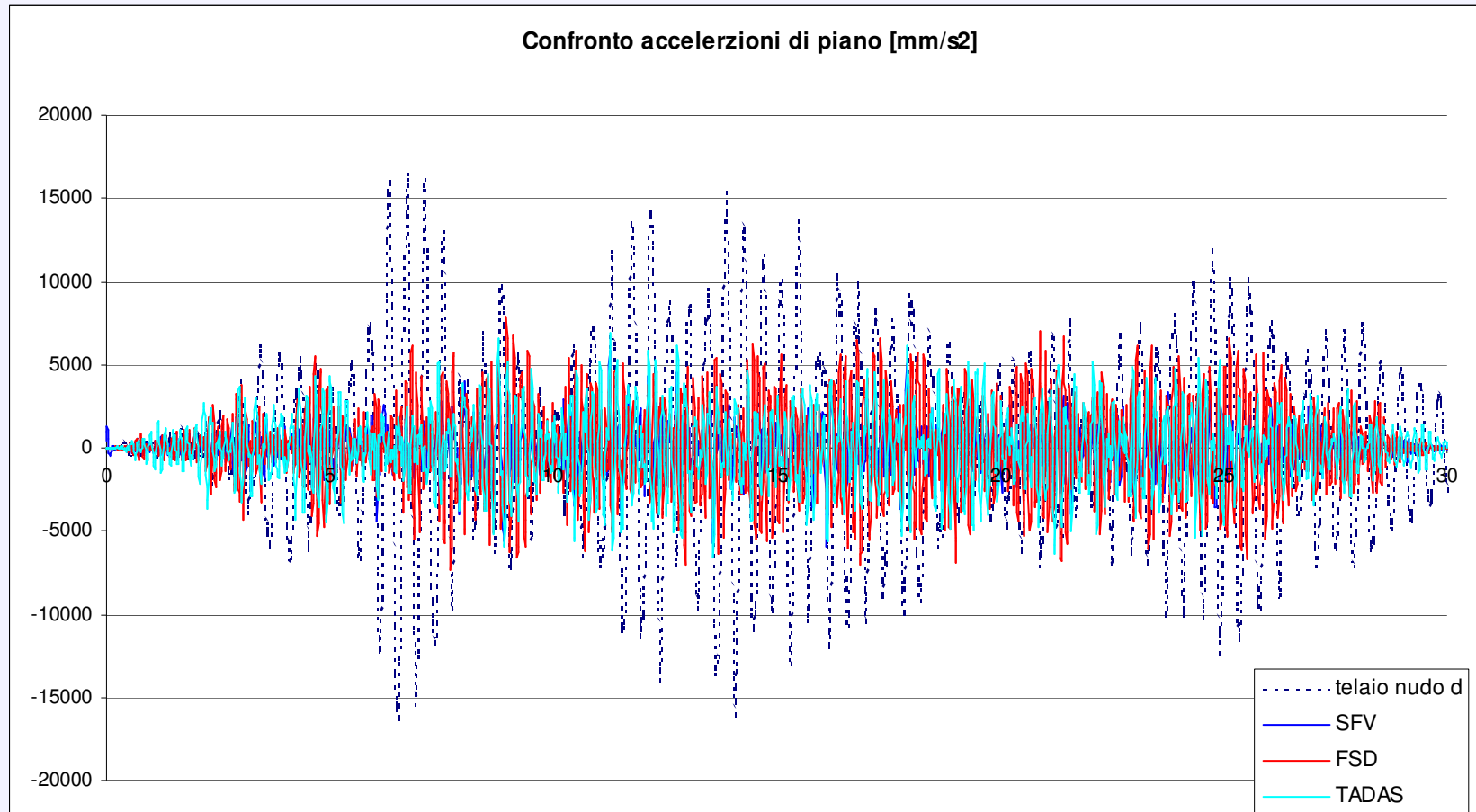


ESEMPIO APPLICATIVO: (telaio PROGETTO Neforee)



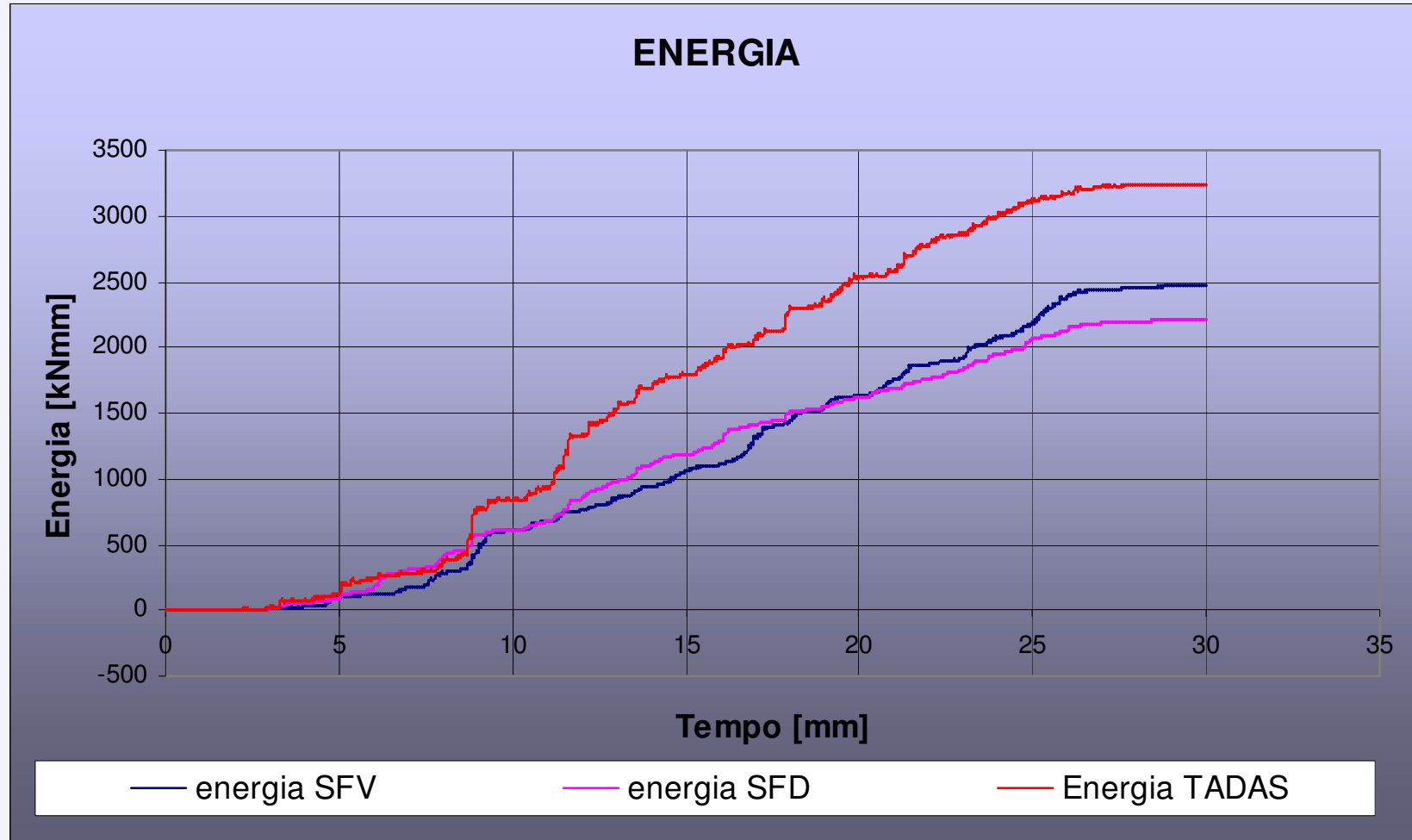
	d[mm]	a[mm/s ²]
telaio nudo	70.6	16518
contr. SFV	9.0	5982
contr. FSD	6.7	7906
contr. TADAS	11.7	6878

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."

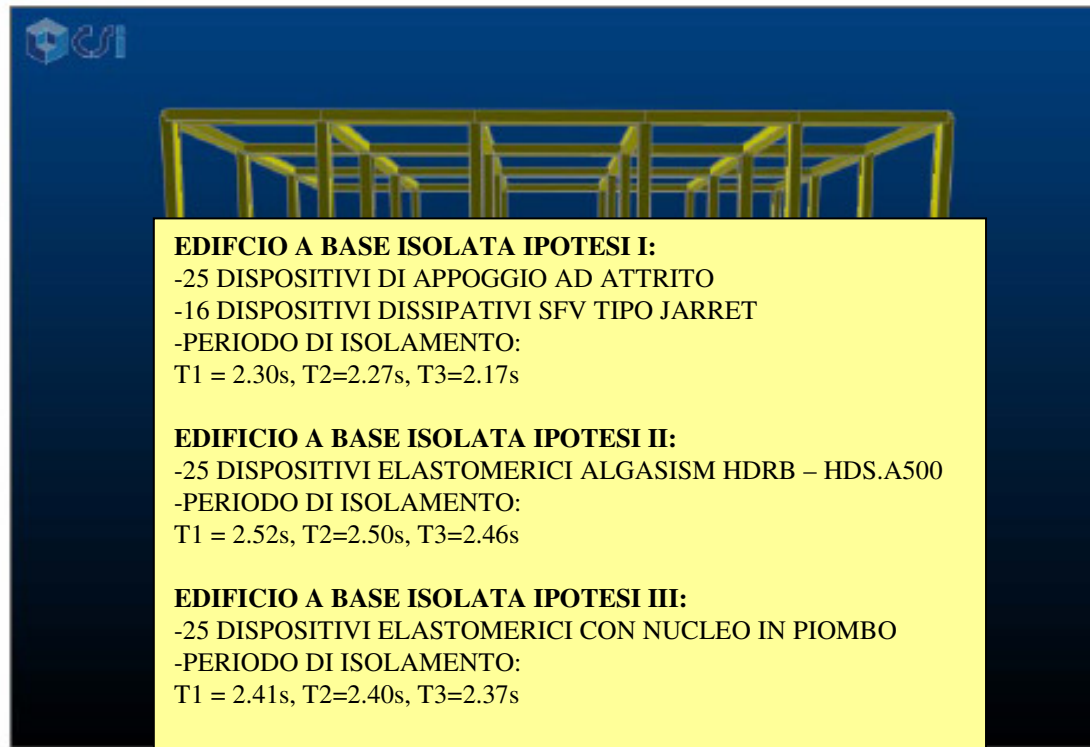
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**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."

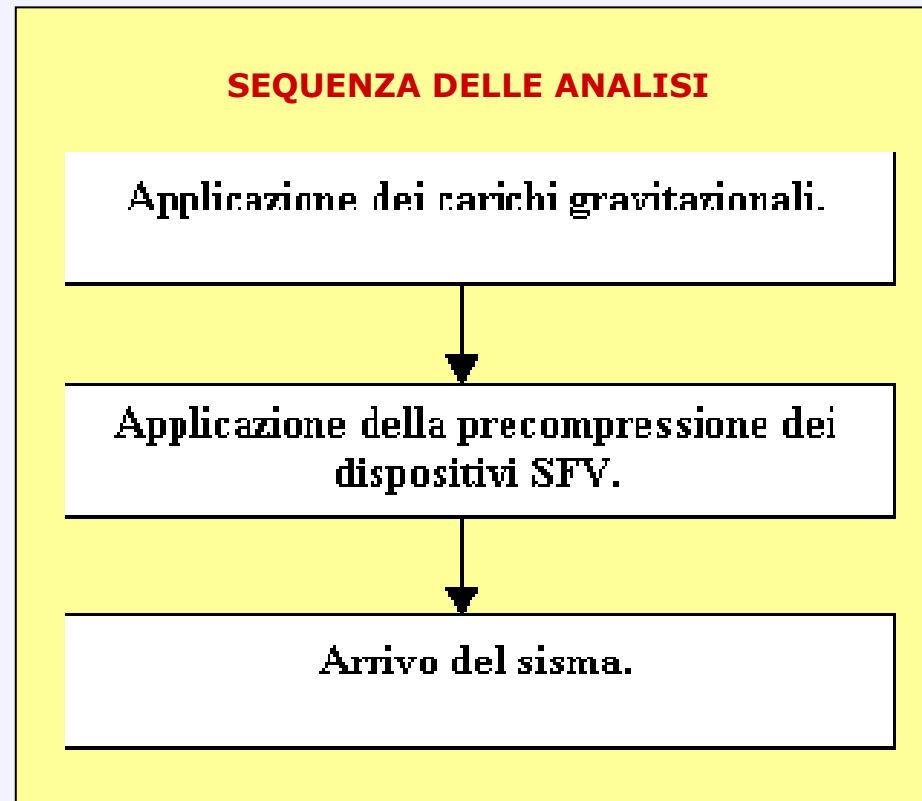
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

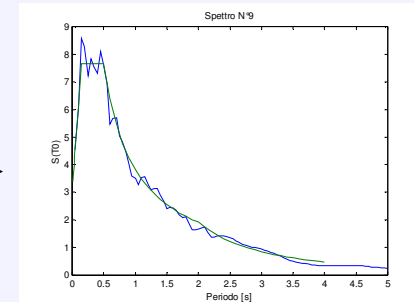
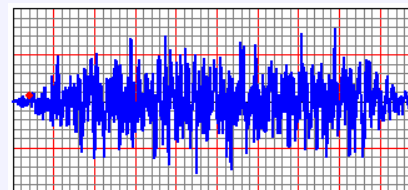
ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

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**

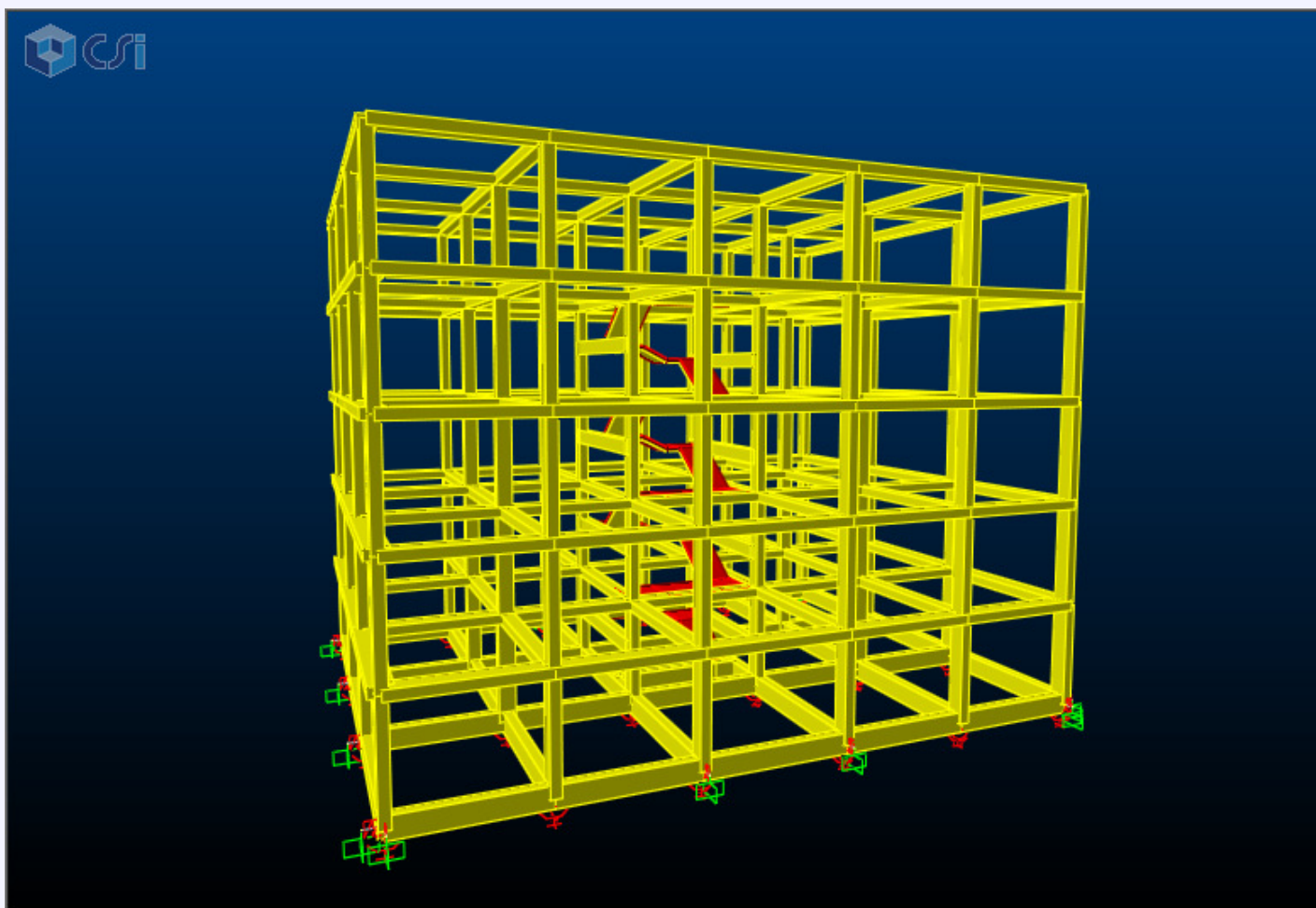
**DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO**

**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**

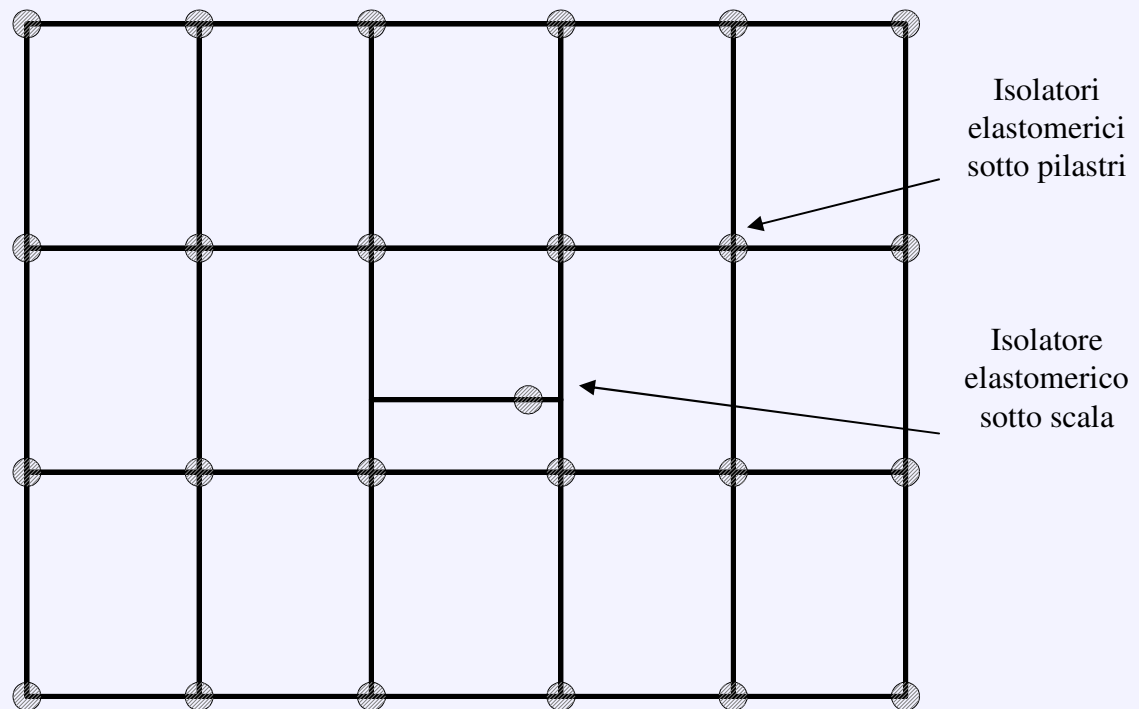
**DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO**

**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)

IPOTESI II: 25 DISPOSITIVI ELASTOMERICI



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

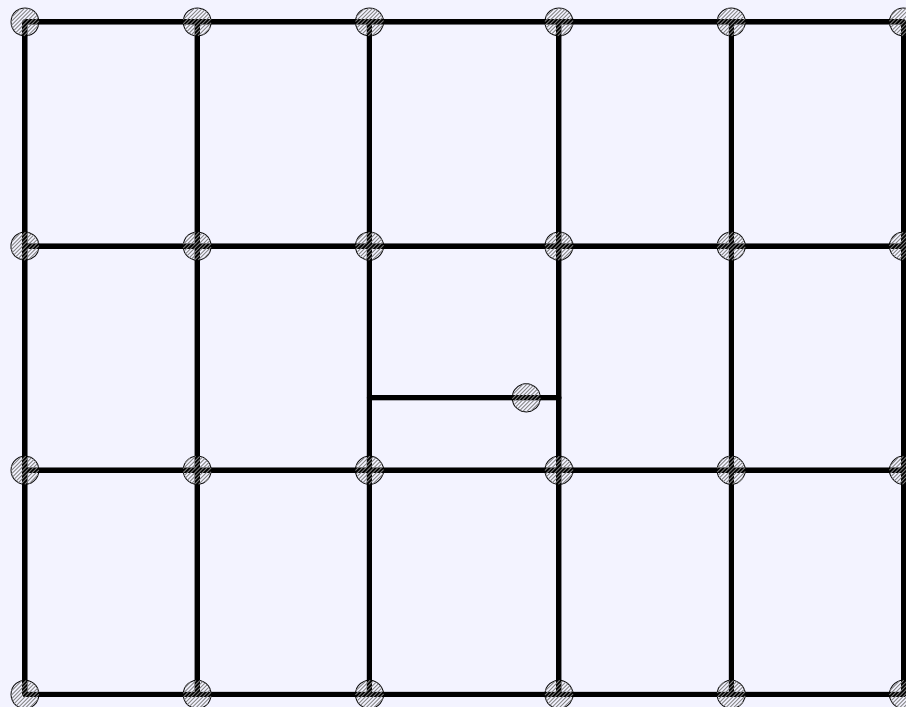
**DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO**

**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."

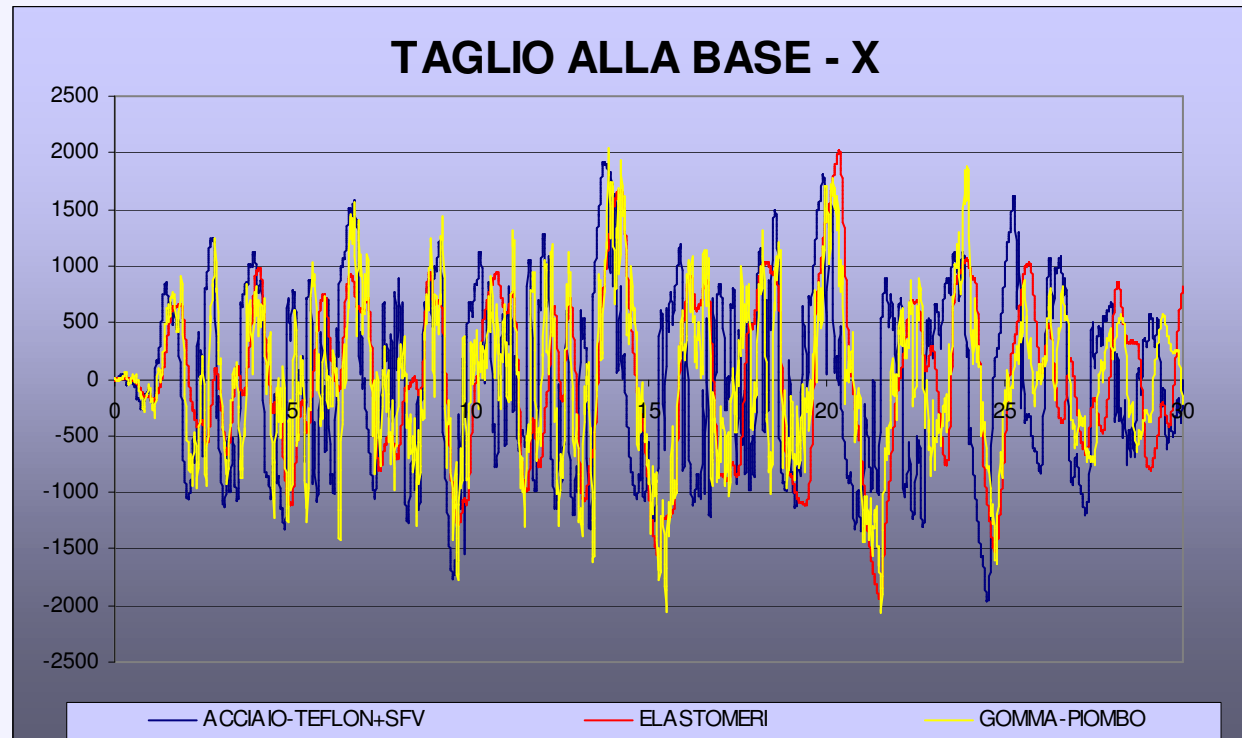
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

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."

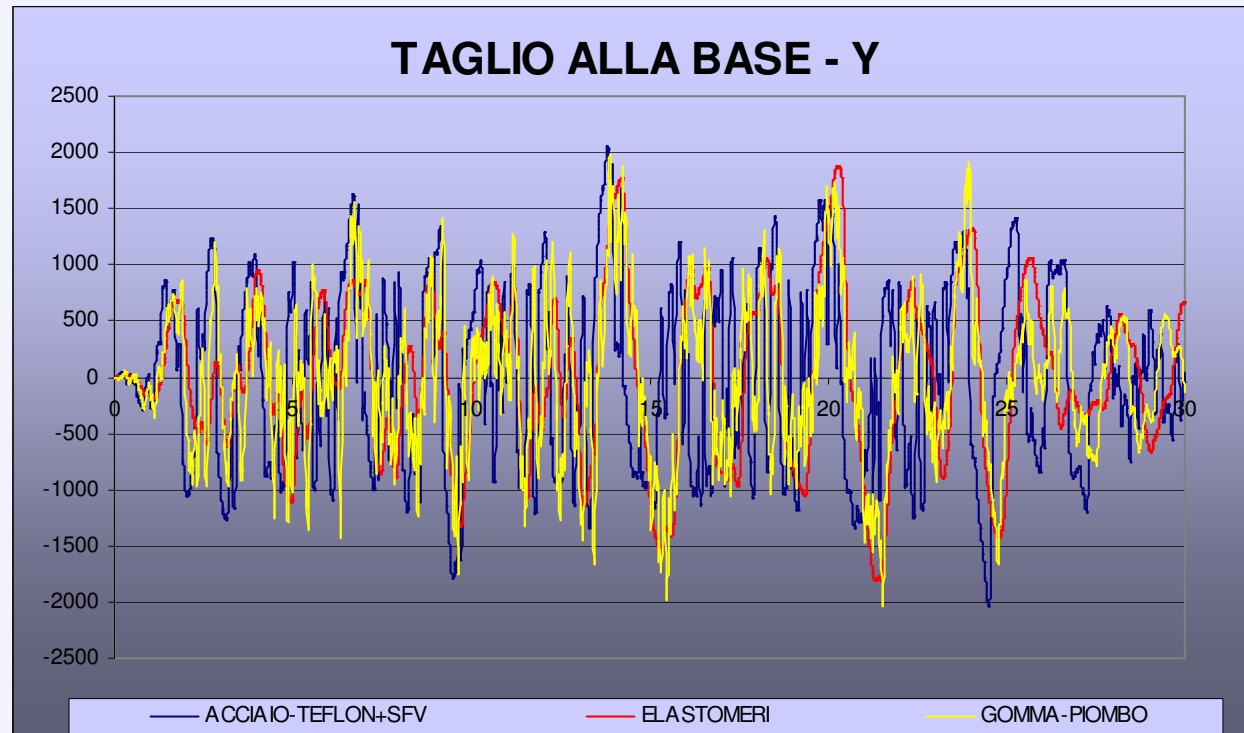
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**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."

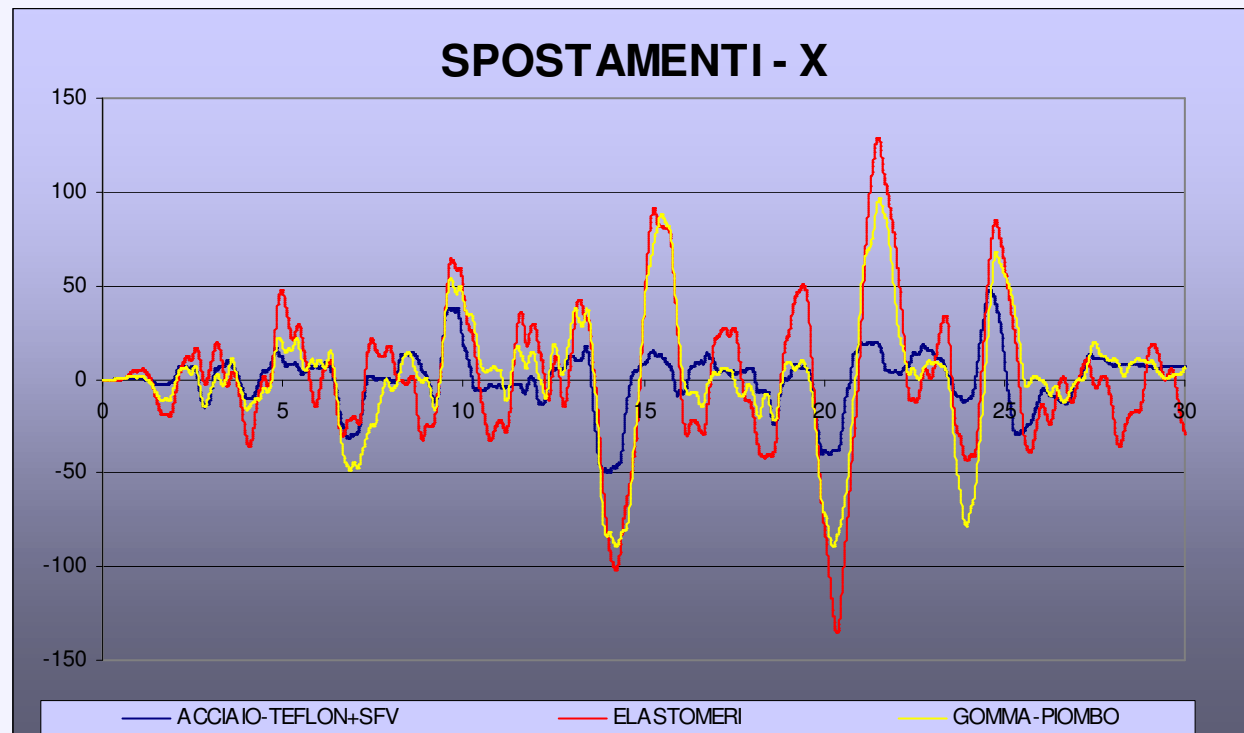
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

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."

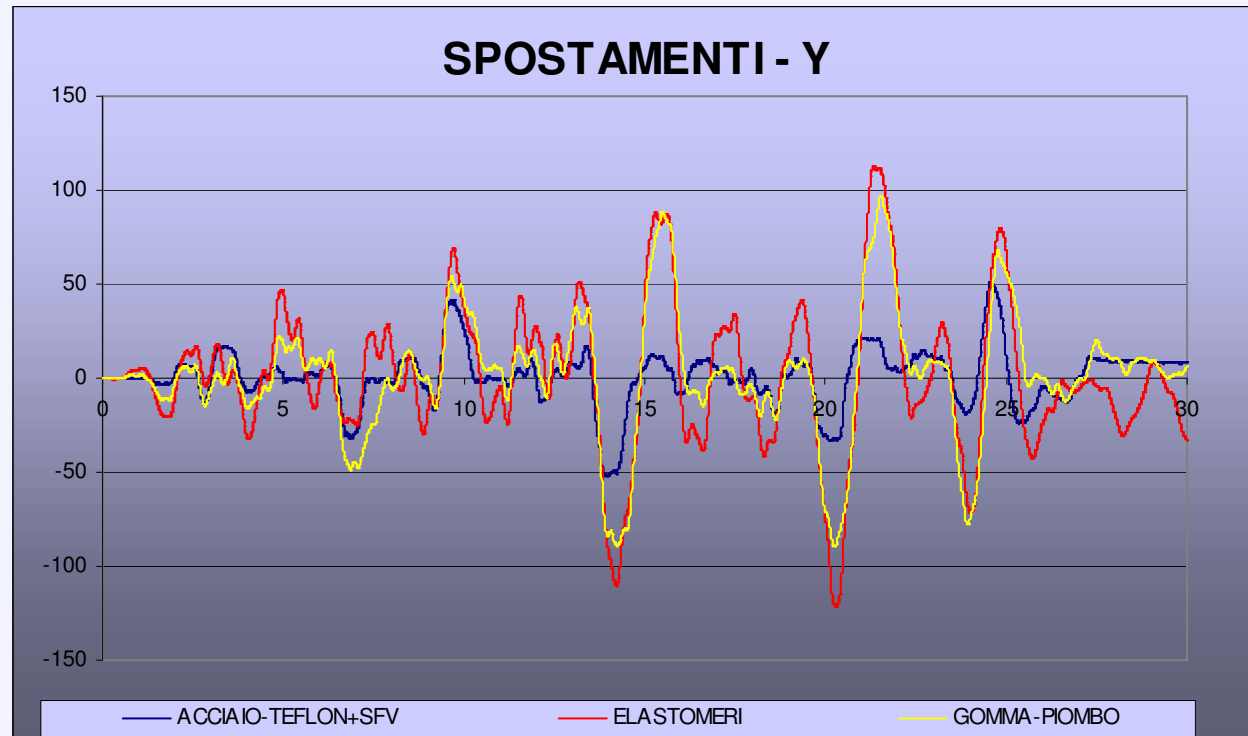
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**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**

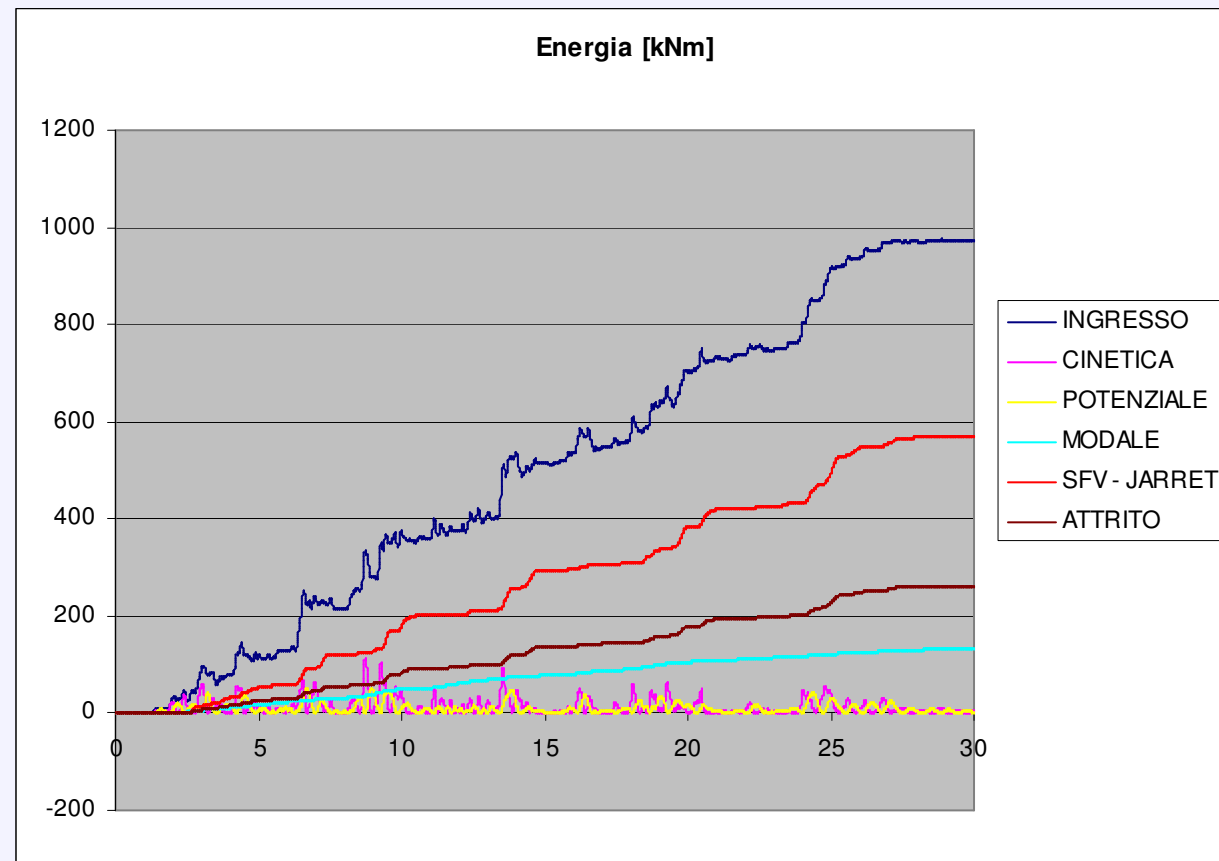
**DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO**

**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**

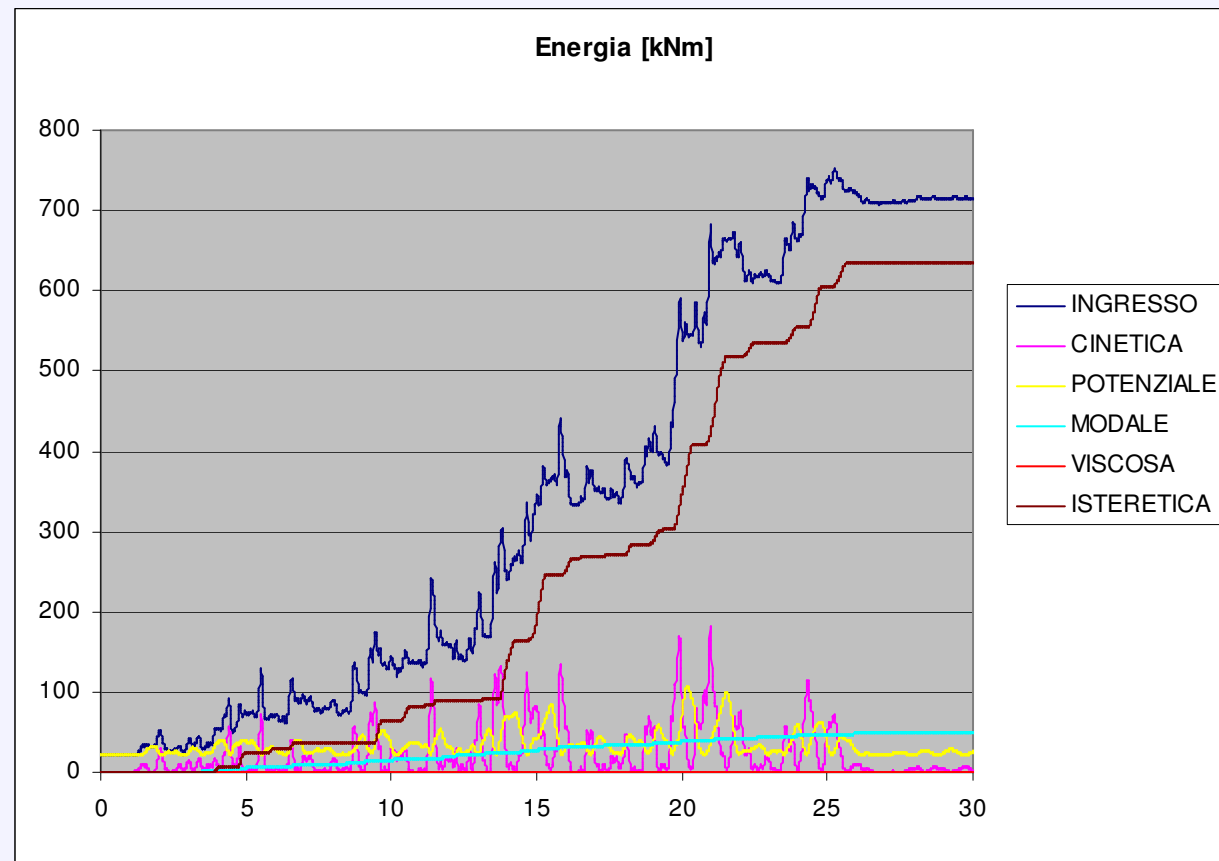
**DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO**

**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

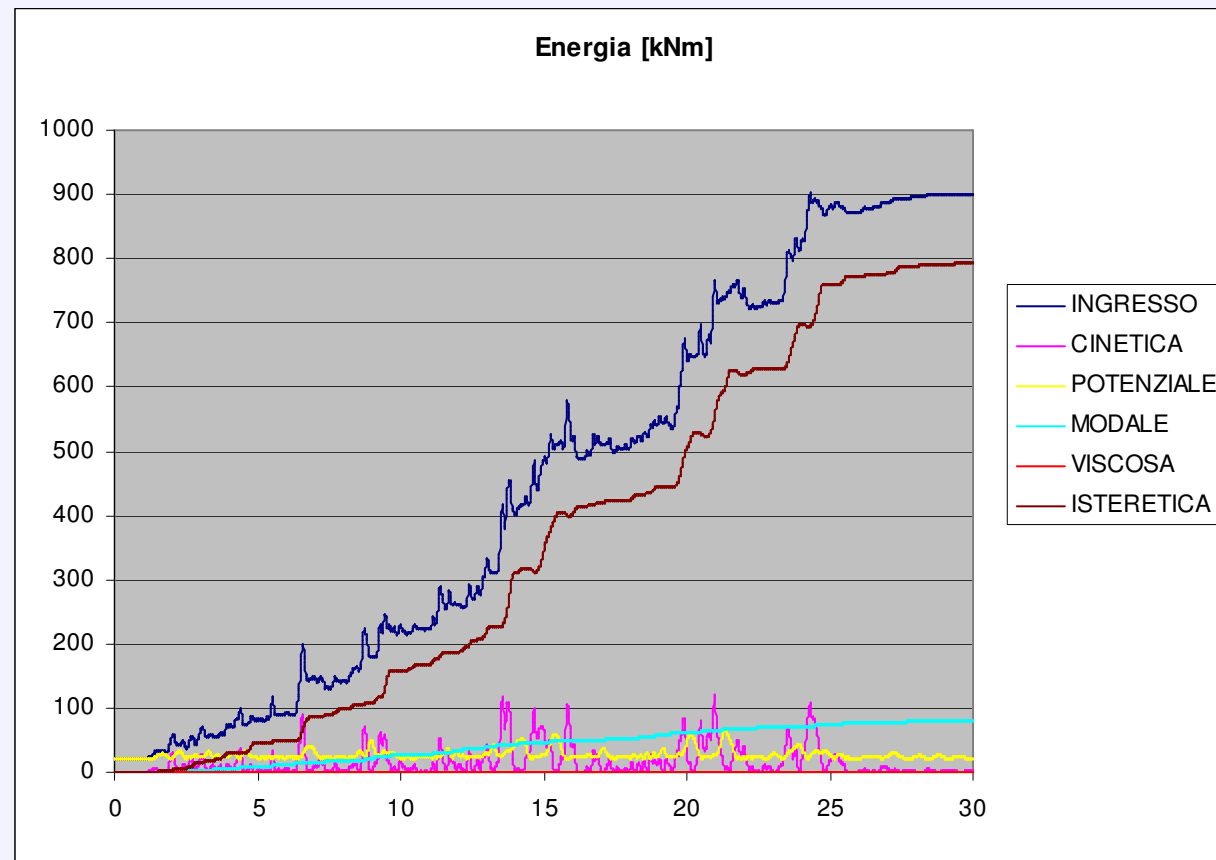
DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

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





**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

Brunetta e Brunetta Engineering

Udine, 10 marzo 2006