

Bologna 24 Ottobre Sala Madrigale

Bolognafiere / Ingresso Via Michelino

Seminario
di calcolo automatico

SAP2000/ETABS

Nuovi sviluppi per il calcolo strutturale e strumenti avanzati di analisi sismica

Relatori:
Ing. Leonardo Bandini
Ing. Massimo Brunetta

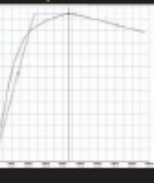
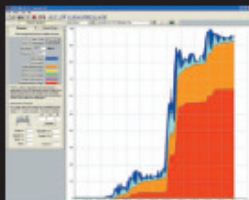
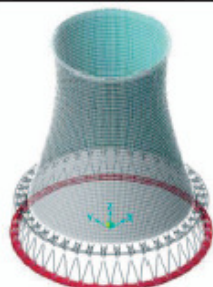
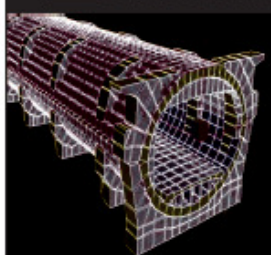
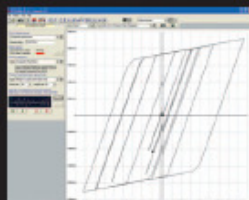
Computers and Structures Inc
e Brunetta e Brunetta Engineering Srl
vi invitano cordialmente ad un seminario
di una giornata sull'uso del software CSI.

Il seminario mira ad illustrare gli strumenti
più recenti introdotti nei programmi
SAP2000 e ETABS, con particolare attenzione
alle tematiche sulla analisi sismica non lineare.

Brunetta e Brunetta
Engineering Srl



2007 SAIE



CSI

Computers
and Structures Inc.

Sessione 1: ore 10:00 - 13:00

Analisi non lineare

- Performance assessment
- Componenti ed elementi
- Leggi costitutive
- Cerniere a rotazione e a curvatura
- Controllo di forza e controllo di spostamento
- Rapporto domanda capacità
- **Concetto di Stati Limite**
- Coefficienti d'uso
- Esempio di analisi statica non lineare
- Esempio di analisi dinamica non lineare
- Comparazione dei risultati

Isolamento sismico e dissipazione

- Tipologie di dispositivi
- Modellazione numerica dei dispositivi
- Modellazione di strutture isolate, esempi
- Modellazione di strutture protette con dispositivi di dissipazione supplementare di energia, esempi

Pausa pranzo

Sessione 2: ore 14:30 - 18:00

Analisi e progetto di edifici

- Modellazione ad oggetti di edifici
- Mesh automatica
- **Concetto di Line Constraint**
- Diaframmi rigidi, semi rigidi o flessibili
- **Ottimizzazione della struttura:**
 - per resistenza*
 - per deformazione*
 - per spostamento laterale*
- Metodo dei lavori virtuali
- Solette in c.a. con elementi shell a strati

Modellazione di ponti

- Uso del Modellatore automatico
- Layout rapido di post-tensione
- Perdite da viscosità, ritiro, rilassamento, scorrimento degli ancoraggi, accorciamento elastico, attrito
- Costruzione per ponti: aggiungere e rimuovere oggetti, appoggi e carichi in sequenze arbitrarie
- Considerazioni sugli effetti dipendenti dal tempo

Domande e risposte

Partecipazione gratuita; è gradita la prenotazione per contattarci:
Brunetta e Brunetta Engineering Srl
Vicolo Chiuso 4
33170 Pordenone
Tel. 0434 28465 / Fax 0434 28466
E-mail: posta@brunetta2.it
<http://www.brunetta2.it>

Bologna SAIE 2007 Programma





SAIE07 INTERNATIONAL
BUILDING
EXHIBITION
BOLOGNA: 24 - 28 OTTOBRE
ORARI D'APERTURA: FERIALE 9.00-19.00 DOMENICA 9.00-17.30

***Nuovi sviluppi per il calcolo strutturale
e strumenti avanzati di protezione sismica***

SAP2000 – ETABS – PERFORM3d

Ing. Leonardo Bandini - Ing. Massimo Brunetta

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

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

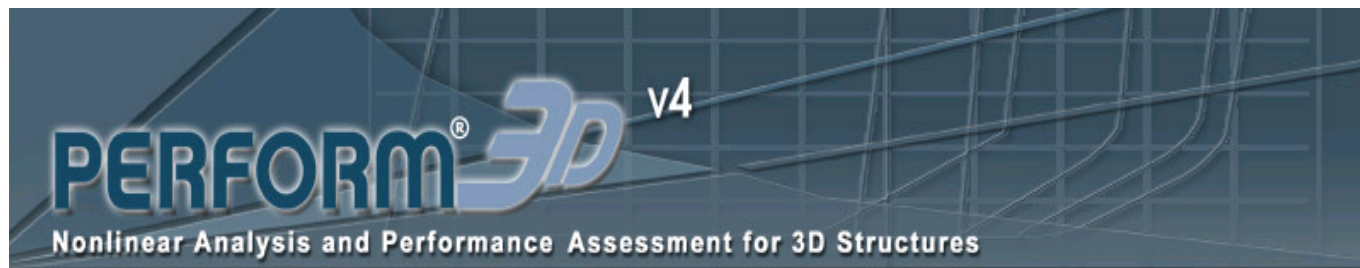
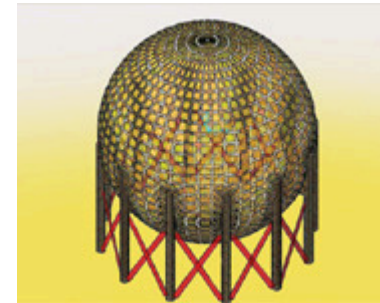
INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

CSI COMPUTERS & STRUCTURES, INC.



INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

- ASPETTI IMPORTANTI SUL COMPORTAMENTO NON LINEARE
- PROGETTAZIONE SECONDO RESISTENZA *vs* PROGETTAZIONE SECONDO DEFORMAZIONE
(*strength-based vs deformation-based design*)
- PROGETTAZIONE SECONDO PRESTAZIONE
(*performance based design*)
- GERARCHIA DELLA RESISTENZE
(*capacity design*)
- TECNICHE DI MODELLAZIONE NON LINEARE
- STATI LIMITE E RAPPORTO DOMANDA/CAPACITA'
- ANALISI DINAMICA NONLINEARE *vs* ANALISI PUSHOVER

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

ASPETTI IMPORTANTI SUL COMPORTAMENTO NON LINEARE

- L'analisi non lineare rappresenta uno strumento di progettazione:
 - non deve essere pensato per ottenere il comportamento “esatto” della struttura;
 - deve rappresentare un utile strumento di progettazione;
- Ci sono due tipi di non linearità:
 - non linearità geometrica: effetti causati dal cambiamento della forma della struttura per effetto deformativo, effetti P- Δ ed effetti di grandi spostamenti.
 - non linearità del materiale: snervamento, fessurazione, scorrimento, frattura. Di norma causati da un comportamento inelastico.
La non linearità del materiale è di norma più complicata da studiare e verrà di seguito approfondita.

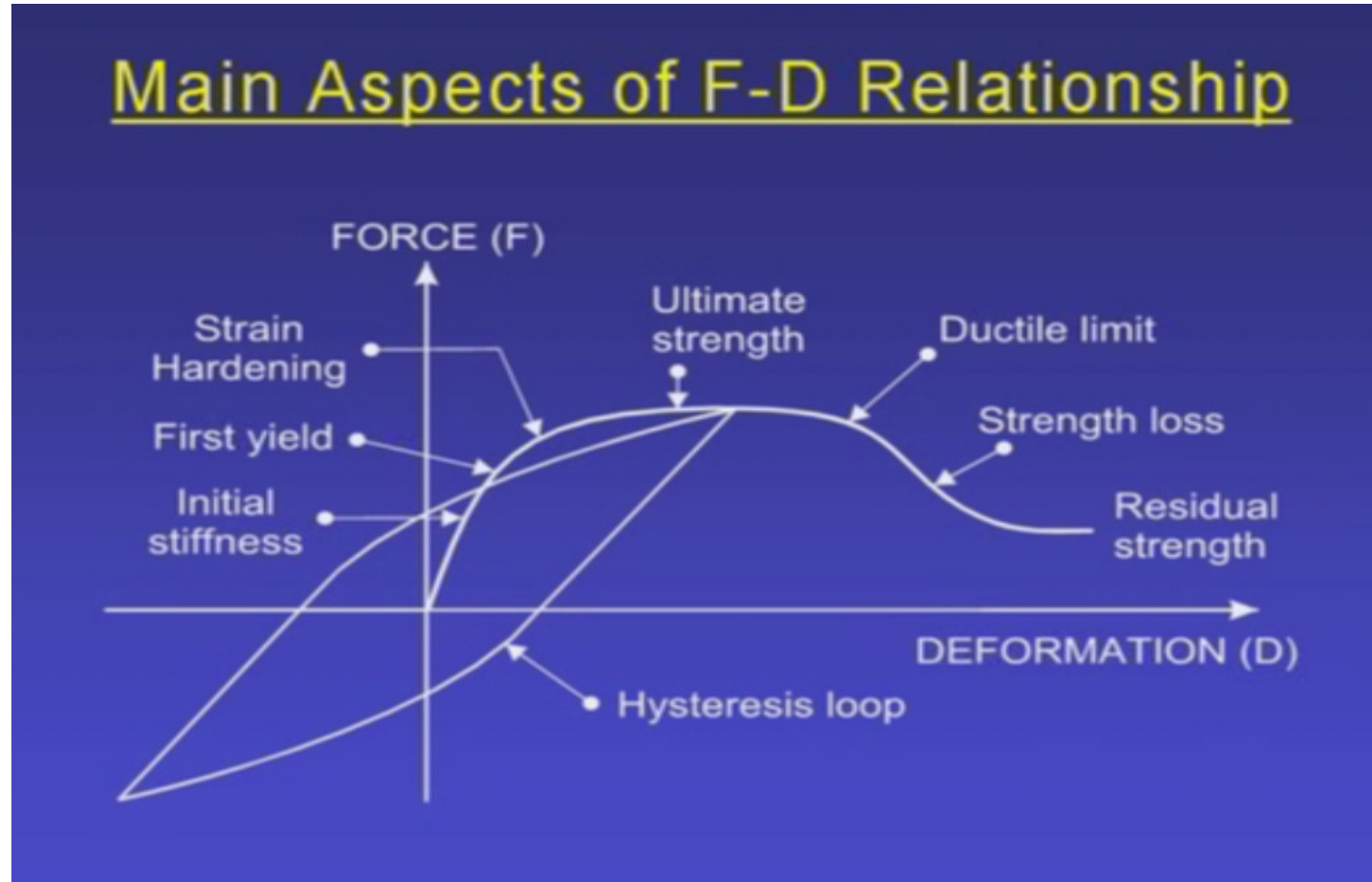
INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

ASPETTI IMPORTANTI SUL COMPORTAMENTO NON LINEARE



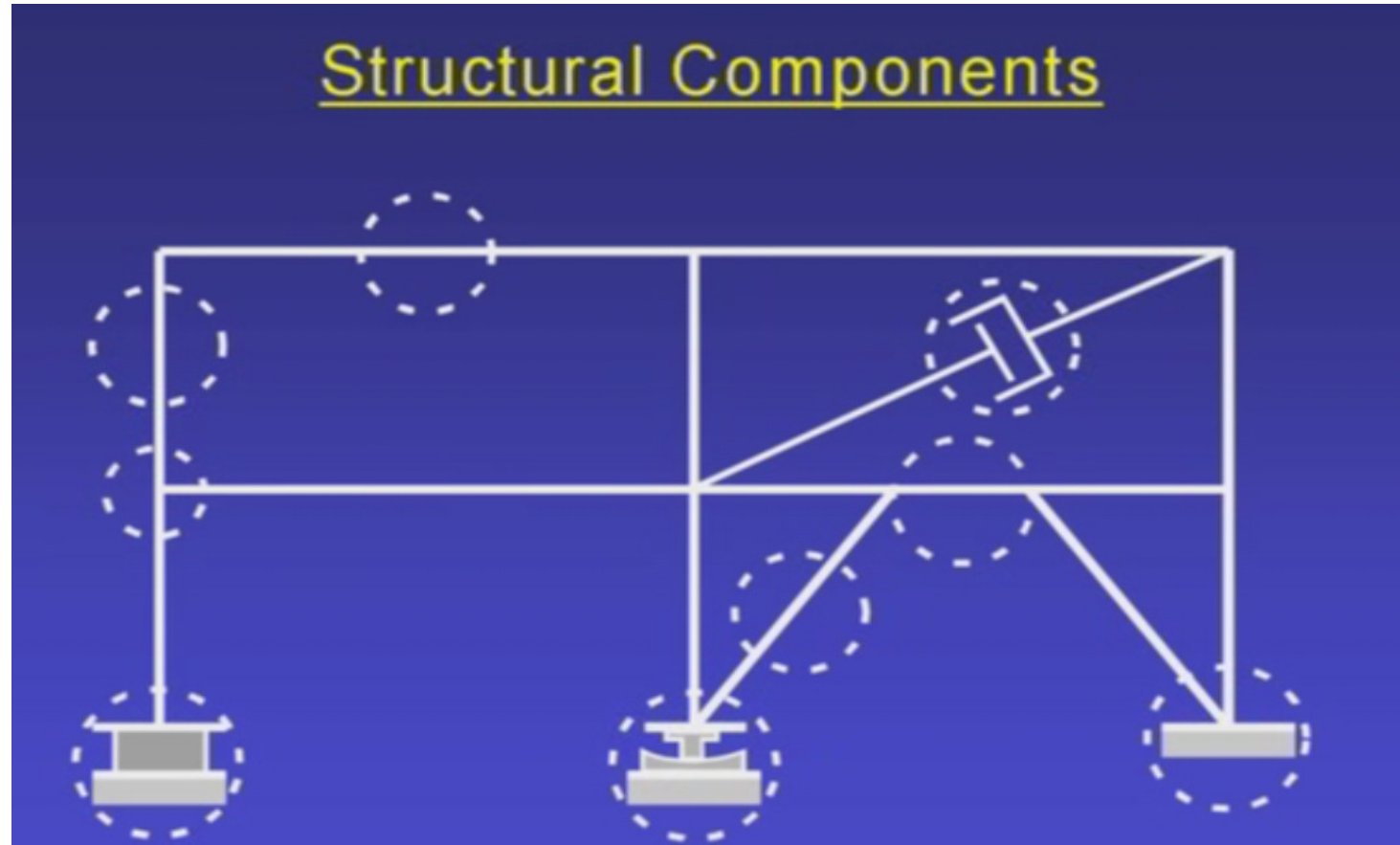
INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

ASPETTI IMPORTANTI SUL COMPORTAMENTO NON LINEARE



- La relazione tra forza e spostamento (F-D) deve essere nota per le membrature della struttura sia quelle con comportamento lineare che quelle a comportamento non lineare.
- La relazione tra forza e spostamento (F-D) della struttura è ottenuta dall'analisi.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

ASPETTI IMPORTANTI SUL COMPORTAMENTO NON LINEARE

ALCUNE COMPLICAZIONI: COMPORTAMENTO F-D



- Alcuni elementi strutturali hanno un comportamento difficilmente prevedibile che complica la determinazione della legge F-D.

INTRODUZIONE

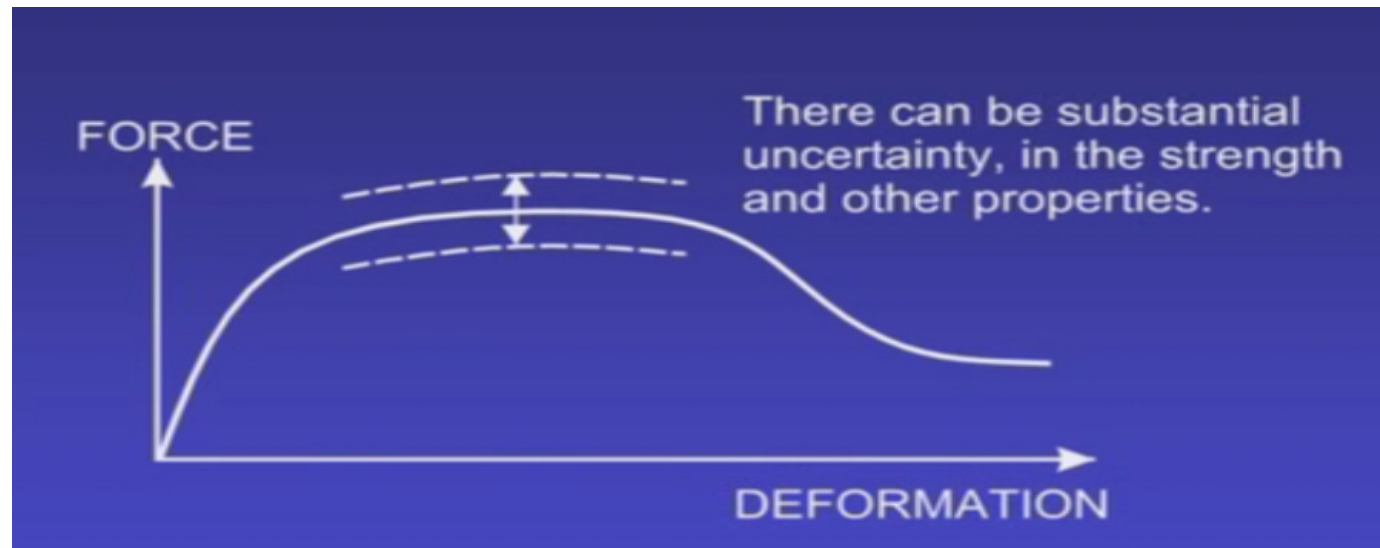
ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

ASPETTI IMPORTANTI SUL COMPORTAMENTO NON LINEARE

ALCUNE COMPLICAZIONI: RESISTENZA INCERTA



- La resistenza, ma anche altri fattori come la rigidezza e la duttilità, non sono “esattamente” note: altrimenti perché avremmo la necessità di adottare dei fattori di sicurezza?

INTRODUZIONE

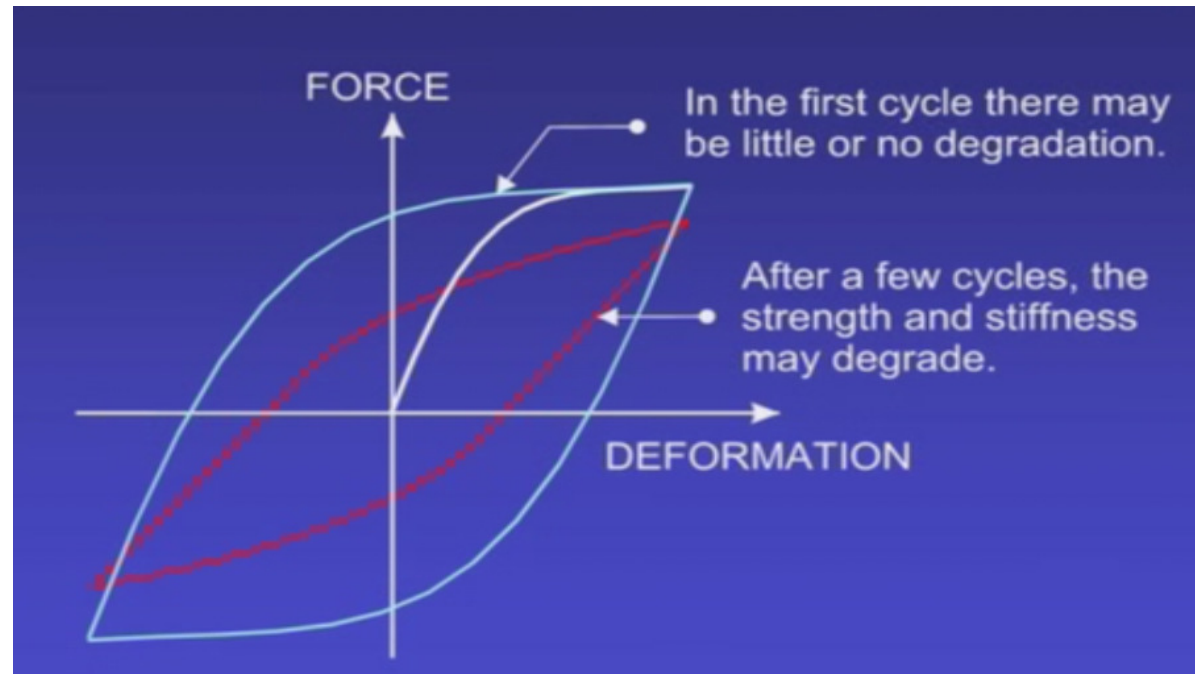
ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

ASPETTI IMPORTANTI SUL COMPORTAMENTO NON LINEARE

ALCUNE COMPLICAZIONI: INCERTEZZA SUL DEGRADO CICLICO



- L'alternanza dei cicli di carico e scarico può produrre un degrado ciclico con conseguente diminuzione di rigidezza e di resistenza della sezione.

INTRODUZIONE

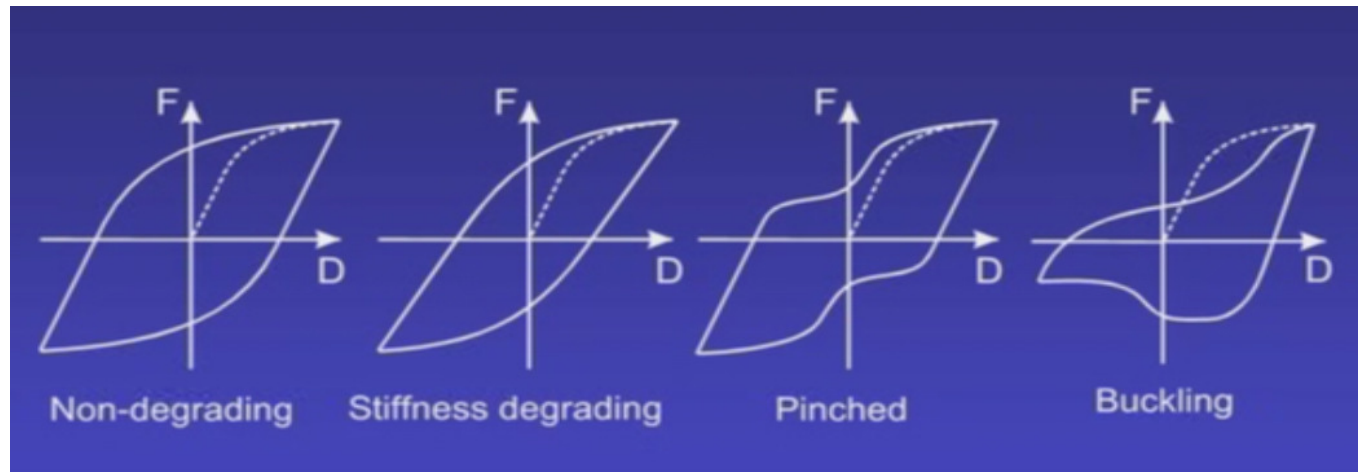
ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

ASPETTI IMPORTANTI SUL COMPORTAMENTO NON LINEARE

ESISTENZA DI DIVERSI CICLI ISTERETICI



Cicli non degradanti (per esempio quelli di molti dispositivi di protezione sismica), cicli con forte degrado, effetto di pinching (per esempio una nodo di una struttura in c.a. che soggetto a carico e scarico oltre un certo limite, produce l'espulsione di materiale dal nodo o dalla "cerniera"), cicli di elementi soggetti ad instabilità (per esempio aste di un controvento metallico).

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

ASPETTI IMPORTANTI SUL COMPORTAMENTO NON LINEARE

MOLTE COMPLICAZIONI... MA NON DISPERIAMO!

- **NON DISPERIAMO!** perché l'obiettivo non è l'esatta predizione del comportamento della struttura.
- **NON DISPERIAMO!** perché l'obiettivo è ottenere delle informazioni aggiuntive che ci consentano di migliorare la progettazione o studiare sistemi per migliorare il comportamento della struttura.
- **L'ANALISI LINEARE** è lontana da poter essere definita accurata, eppure nessuno di noi direbbe che non ci fornisce delle informazioni utili per la progettazione, quindi perché non applicare lo stesso concetto a l'analisi non lineare?
- L'analisi non lineare è più difficile, ma è anche più razionale!
- L'analisi non lineare è più difficile, ma può darci maggiori e migliori informazioni di una analisi lineare.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

- ASPETTI IMPORTANTI SUL COMPORTAMENTO NON LINEARE
- **PROGETTAZIONE SECONDO RESISTENZA vs PROGETTAZIONE SECONDO DEFORMAZIONE**
(strength-based vs deformation-based design)
- PROGETTAZIONE SECONDO PRESTAZIONE
(performance based design)
- GERARCHIA DELLA RESISTENZE
(capacity design)
- TECNICHE DI MODELLAZIONE NON LINEARE
- STATI LIMITE E RAPPORTO DOMANDA/CAPACITA'
- ANALISI DINAMICA NONLINEARE vs ANALISI PUSHOVER

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

PROGETTAZIONE SECONDO RESISTENZA vs PROGETTAZIONE SECONDO DEFORMAZIONE

PROGETTAZIONE SECONDO RESISTENZA

- La verifica si basa sul rapporto capacità/domanda, ovvero resistenza/azione. Ovviamente la resistenza caratteristica viene abbattuta con fattori di sicurezza per tener in conto dell'incertezza sul materiale e le azioni vengono incrementate per tener in conto della incertezza sulla loro determinazione.
- Di norma la verifica viene fatta al livello locale di ogni singola membratura.
- L'analisi lineare viene utilizzata per calcolare la domanda. Questo è corretto perché la struttura rimane "spesso" in campo sostanzialmente elastico.

INTRODUZIONE

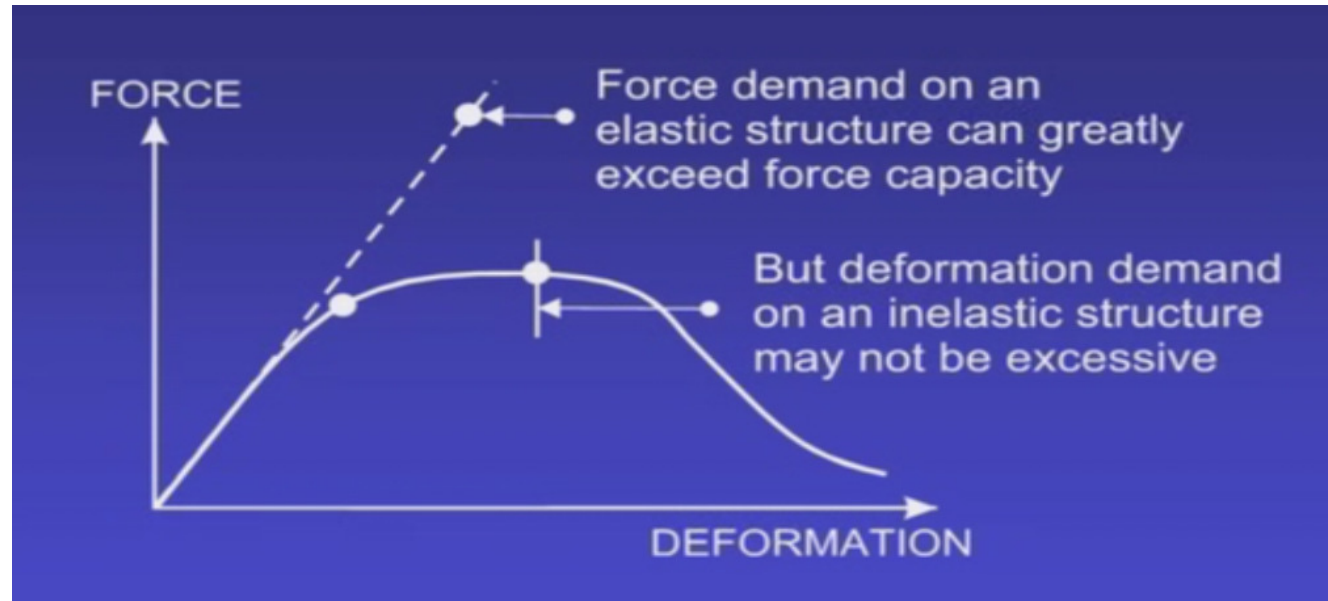
ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

PROGETTAZIONE SECONDO RESISTENZA vs PROGETTAZIONE SECONDO DEFORMAZIONE

PROGETTAZIONE SECONDO RESISTENZA



- Per l'azione sismica è impensabile pensare di progettare pretendendo che la struttura nel suo insieme ed in ogni sua membratura rimanga in campo elastico. Da qui nascono i concetti come il fattore di struttura, alla base della determinazione dell'abbattimento della domanda sotto sisma.
- L'escursione in campo non lineare produce un abbattimento delle forze ma un aumento degli spostamenti.

INTRODUZIONE

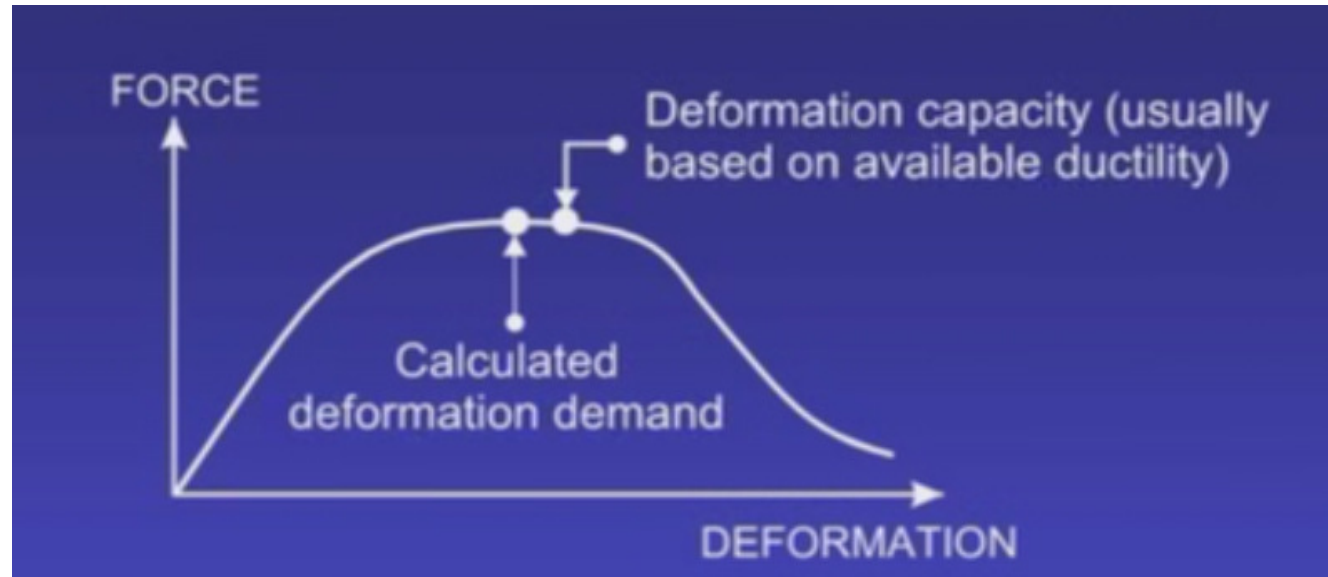
ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

PROGETTAZIONE SECONDO RESISTENZA vs PROGETTAZIONE SECONDO DEFORMAZIONE

PROGETTAZIONE SECONDO DEFORMAZIONE



- La verifica viene fatta a livello di componente strutturale o struttura completa confrontando la domanda di deformazione che deve essere minore della capacità di deformazione.
- La domanda di deformazione deve essere calcolata con un'analisi non lineare perché la struttura ha un comportamento non lineare e le sue membrature possono raggiungere e superare lo snervamento.

INTRODUZIONE

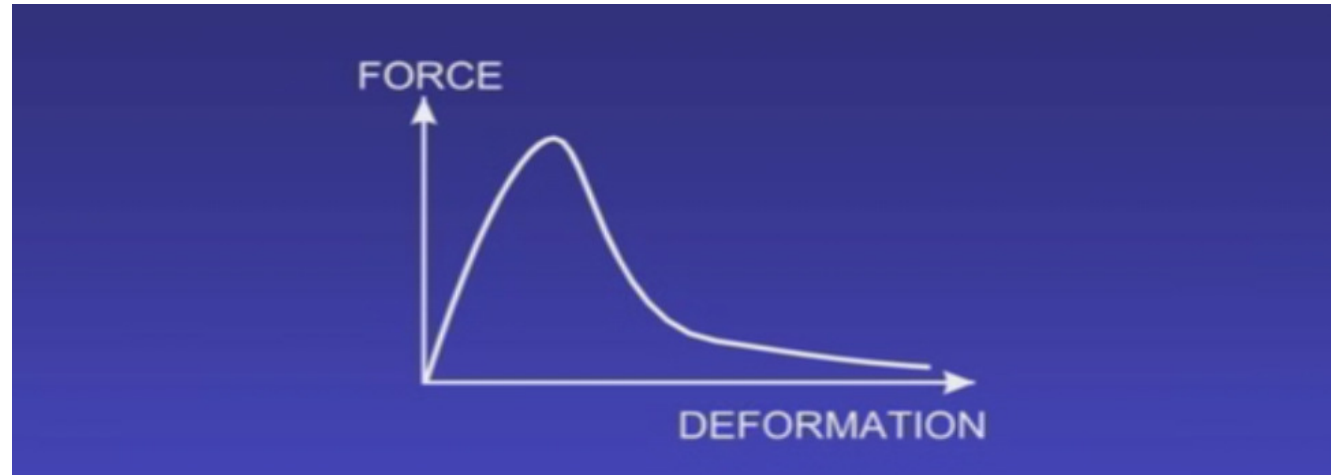
ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

PROGETTAZIONE SECONDO RESISTENZA vs PROGETTAZIONE SECONDO DEFORMAZIONE

COMPONENTI FRAGILI



- Questi elementi sono caratterizzati da una bassa duttilità e una volta raggiunta la loro massima resistenza se la domanda cresce arrivano a rottura.
- Questi elementi dovranno essere progettati confrontando capacità e domanda in termini di resistenza.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

PROGETTAZIONE SECONDO RESISTENZA vs PROGETTAZIONE SECONDO DEFORMAZIONE

PROCEDURA DI PROGETTAZIONE SECONDO DEFORMAZIONE

- Definizione delle capacità deformative degli elementi duttili.
- Definizione della capacità di resistenza per gli elementi fragili (o di tutti gli elementi che “vogliamo” far rimanere in campo elastico).
- Si usa una analisi non lineare sulla struttura per calcolare la domanda di deformazione e di resistenza.
- Se $D/C \leq 1$ la verifica è soddisfatta.

ATTENZIONE: come per le verifiche a resistenza non si ha solo un parametro generale di domanda e uno di capacità, ma per ogni membratura o gruppi di esse si otterranno rapporti D/C .

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

- ASPETTI IMPORTANTI SUL COMPORTAMENTO NON LINEARE
- PROGETTAZIONE SECONDO RESISTENZA *vs* PROGETTAZIONE SECONDO DEFORMAZIONE
(*strength-based vs deformation-based design*)
- **PROGETTAZIONE SECONDO PRESTAZIONE**
(*performance based design*)
- GERARCHIA DELLA RESISTENZE
(*capacity design*)
- TECNICHE DI MODELLAZIONE NON LINEARE
- STATI LIMITE E RAPPORTO DOMANDA/CAPACITA'
- ANALISI DINAMICA NONLINEARE *vs* ANALISI PUSHOVER

INTRODUZIONE

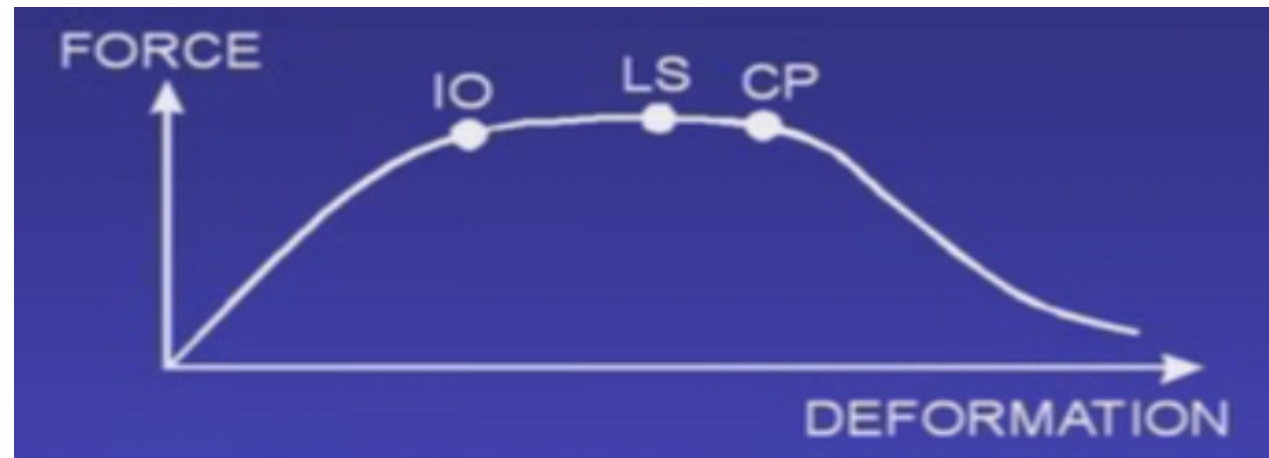
ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

PROGETTAZIONE SECONDO PRESTAZIONE

- Le normative “convenzionali” non stabiliscono esplicitamente i livelli prestazionali.
- L’approccio prestazionale vuole dare ragionevole sicurezza che un progetto soddisferà il raggiungimento di livelli prestazionali, ovvero, che la struttura non supererà, quando soggetta da una certa domanda, uno stato limite prestazionale.
- Comunemente si distingue tre livelli prestazionali:
 - IO - Occupazione immediata: limitato o assente stato di danno;
 - LS - Salvataggio delle vite: presenza di danno, anche severo;
 - CP - Prevenzione di Collasso: danno molto severo ma sicurezza ancora nei confronti del collasso, completo o parziale.



INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

PROGETTAZIONE SECONDO PRESTAZIONE

PROGETTAZIONE SECONDO APPROCCIO PRESTAZIONALE

- Scelta del livello prestazionale e dei carichi di progetto.
- Scelta di parametri di controllo del rapporto D-C: spostamenti di interpiano, rotazioni delle cerniere plastiche, resistenza a taglio...
- Assunzione delle capacità deformative e di resistenza:
 - Deformative: FEMA 356, OPCM 3274...
 - Resistenza: DM96, EC2, OPCM3274, NT2005...
- Calcolo della domanda di forza e deformazione usando un codice FEM.
- Se uno o più rapporti D/C > 1:
 - si modifica la struttura;
 - si fa “la punta alla matita” nella determinazione della Capacità
 - si fa “la punta alla matita” nella determinazione della Domanda

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

- ASPETTI IMPORTANTI SUL COMPORTAMENTO NON LINEARE
- PROGETTAZIONE SECONDO RESISTENZA *vs* PROGETTAZIONE SECONDO DEFORMAZIONE
(*strength-based vs deformation-based design*)
- PROGETTAZIONE SECONDO PRESTAZIONE
(*performance based design*)
- **GERARCHIA DELLE RESISTENZE**
(*capacity design*)
- TECNICHE DI MODELLAZIONE NON LINEARE
- STATI LIMITE E RAPPORTO DOMANDA/CAPACITA'
- ANALISI DINAMICA NONLINEARE *vs* ANALISI PUSHOVER

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

CAPACITY DESIGN NOTO COME “GERARCHIA DELLE RESISTENZE”

- Alcuni elementi di una struttura possono entrare in campo plastico mantenendo una certa sicurezza, altri no e devono quindi essere dimensionati per rimanere in campo elastico.
- Si decide in anticipo quale elemento e in quale punto della struttura può plasticizzarsi.
- Noi possiamo dotare gli elementi che si possono snervare di sufficiente duttilità e gli elementi elastici di sufficiente resistenza.
- Sarebbe buona cosa creare più modelli non lineari o analizzare gli stessi con diverse distribuzioni di forza. Inoltre dobbiamo fissare più punti di controllo in cui verificare i rapporti D/C.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

GERARCHIA DELLE RESISTENZE

STRUTTURE A TELAIO

- Si specificano le membrature che possono snervare, si verificano utilizzando fattori D/C di deformazione:
 - Travi in flessione
 - Colonne alla base e in copertura
- Le restanti membrature devono rimanere elastiche, si verificano utilizzando fattori D/C di resistenza:
 - Colonne eccetto alla base e in copertura
 - Connessioni
 - Travi e colonne a taglio
 - fondazioni

STRUTTURE A PARETI ACCOPPIATE E NON

- Si specificano le membrature che possono snervare, si verificano utilizzando fattori D/C di deformazione:
 - Cerniere plastiche alla base dei setti
 - Taglio nelle travi di accoppiamento
- Le restanti membrature devono rimanere elastiche, si verificano utilizzando fattori D/C di resistenza:
 - Flessione in tutti gli altri livelli dei setti
 - Taglio sui setti
 - fondazioni

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

GERARCHIA DELLE RESISTENZE

ASPETTI IMPORTANTI

- Si devono stabilire formalmente quali rapporti D/C considerare e quali parametri alla base della determinazione della domanda assumere (forma spettrale, tempo di ritorno, stato limite, ecc) e basare le scelte di miglioramento prestazionale su questi rapporti.
- Tutti i risultati dell'analisi sono importanti, non si deve trascurare niente, questo è il concetto di “**consistenza dei risultati**”.
- Si possono fare degli aggiustamenti soggettivi sia alla domanda che alla capacità degli elementi. Il procedimento deve essere però oggettivo.
- Il procedimento non è perfetto (e allo stato attuale sembra impossibile che lo possa diventare).

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

- ASPETTI IMPORTANTI SUL COMPORTAMENTO NON LINEARE
- PROGETTAZIONE SECONDO RESISTENZA *vs* PROGETTAZIONE SECONDO DEFORMAZIONE
(*strength-based vs deformation-based design*)
- PROGETTAZIONE SECONDO PRESTAZIONE
(*performance based design*)
- GERARCHIA DELLA RESISTENZE
(*capacity design*)
- **TECNICHE DI MODELLAZIONE NON LINEARE**
- STATI LIMITE E RAPPORTO DOMANDA/CAPACITA'
- ANALISI DINAMICA NONLINEARE *vs* ANALISI PUSHOVER

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

TECNICHE DI MODELLAZIONE NON LINEARE

RIEPILOGO

- L'analisi strutturale non è fine a se stessa, deve essere considerata uno strumento utile alla progettazione.
- L'obiettivo non è l'esatta simulazione del comportamento. Questo è impossibile per le strutture reali
- L'obiettivo è determinare dei rapporti D/C sufficientemente accurati per assumere delle decisioni importanti per la progettazione o per valutare una situazione in essere.

INTRODUZIONE

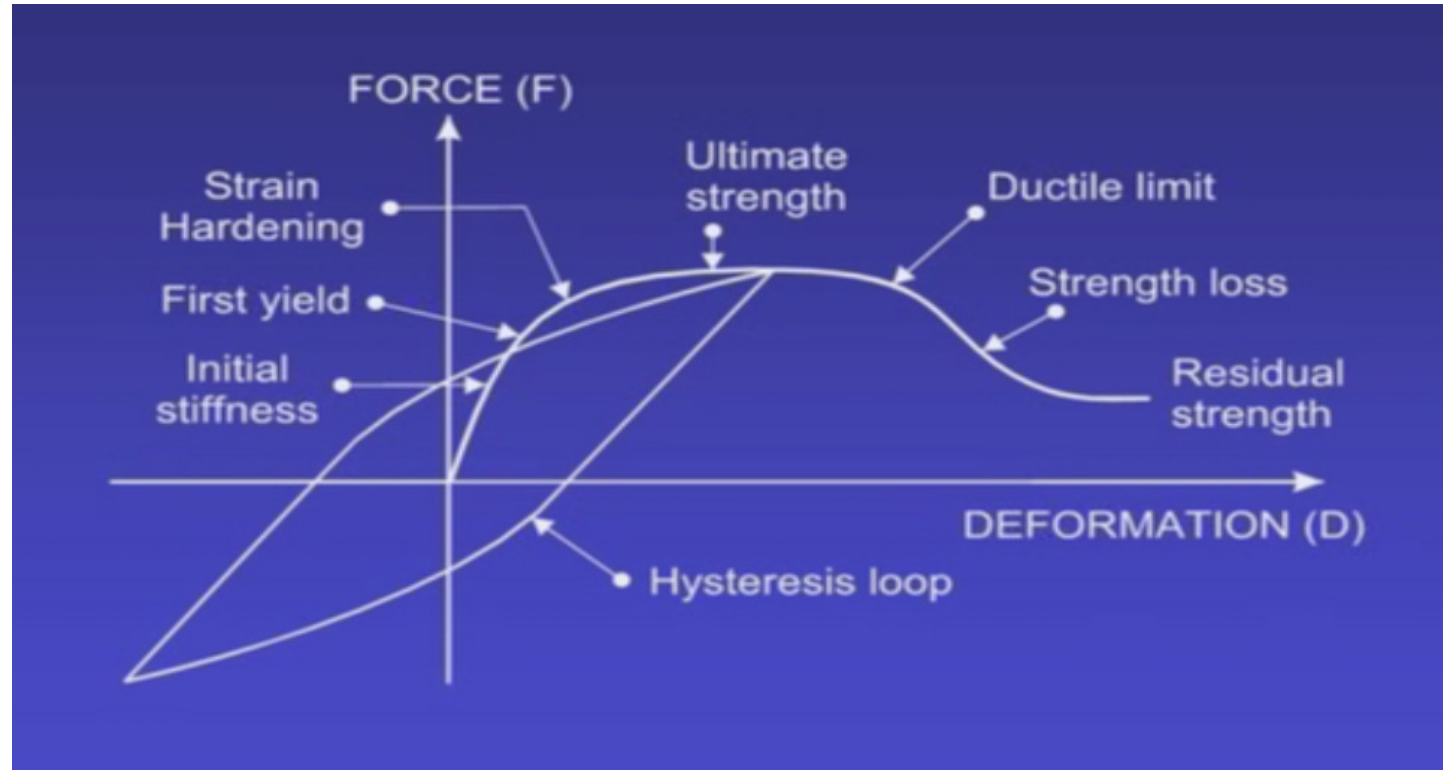
ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

TECNICHE DI MODELLAZIONE NON LINEARE

RIEPILOGO



INTRODUZIONE

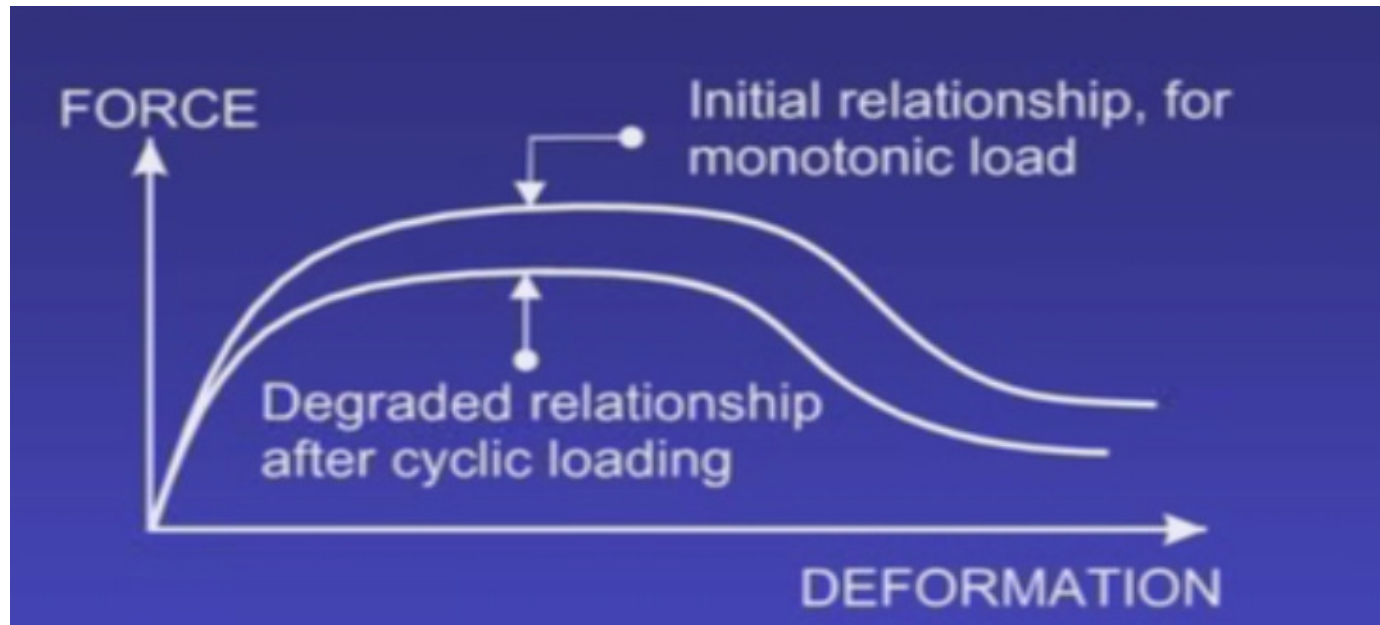
ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

TECNICHE DI MODELLAZIONE NON LINEARE

DEGRADO CICLICO



- La pratica comune è quella di assegnare una legge di degrado, una sorta di abbattimento energetico, dopo un ragionevole numero di cicli, della situazione iniziale.
- In futuro è possibile che si possa fornire un ciclo iniziale e uno completamente degradato, e poi assumere per gli stati intermedi una legge di variazione opportuna.

INTRODUZIONE

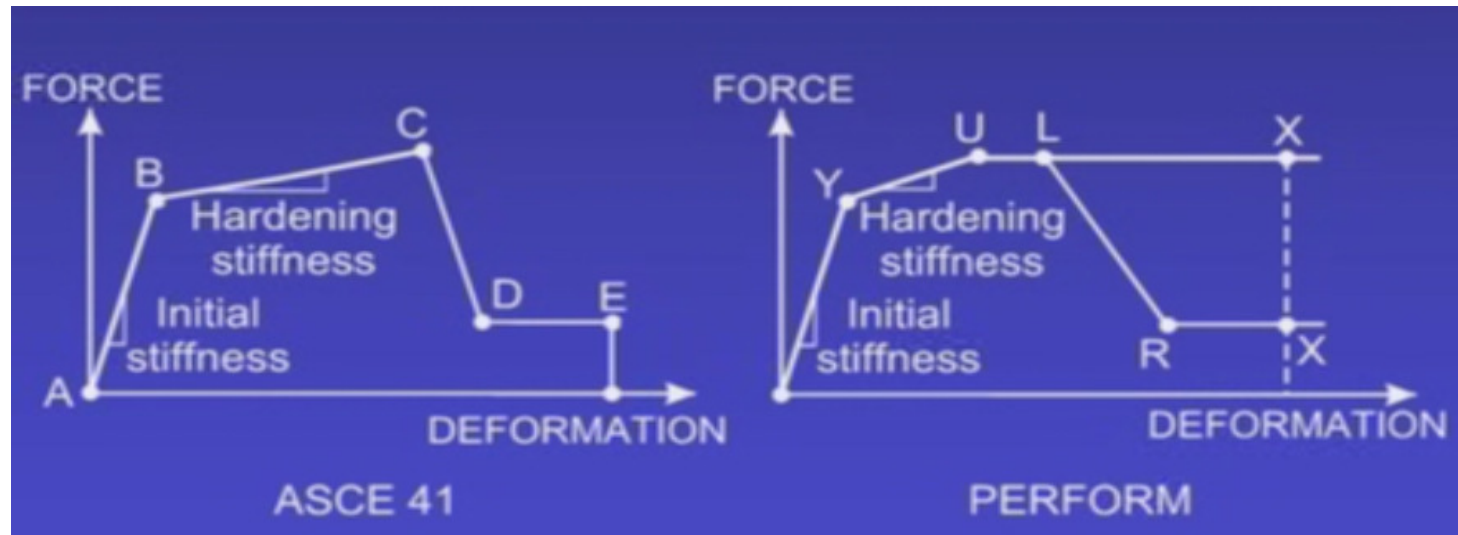
ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

TECNICHE DI MODELLAZIONE NON LINEARE

LEGGE FORZA SPOSTAMENTO



- Ci sono così tante incertezze sul comportamento “reale” non lineare di una sezione, così la cosa migliore che possiamo fare è catturare alcuni dei suoi aspetti più importanti.

INTRODUZIONE

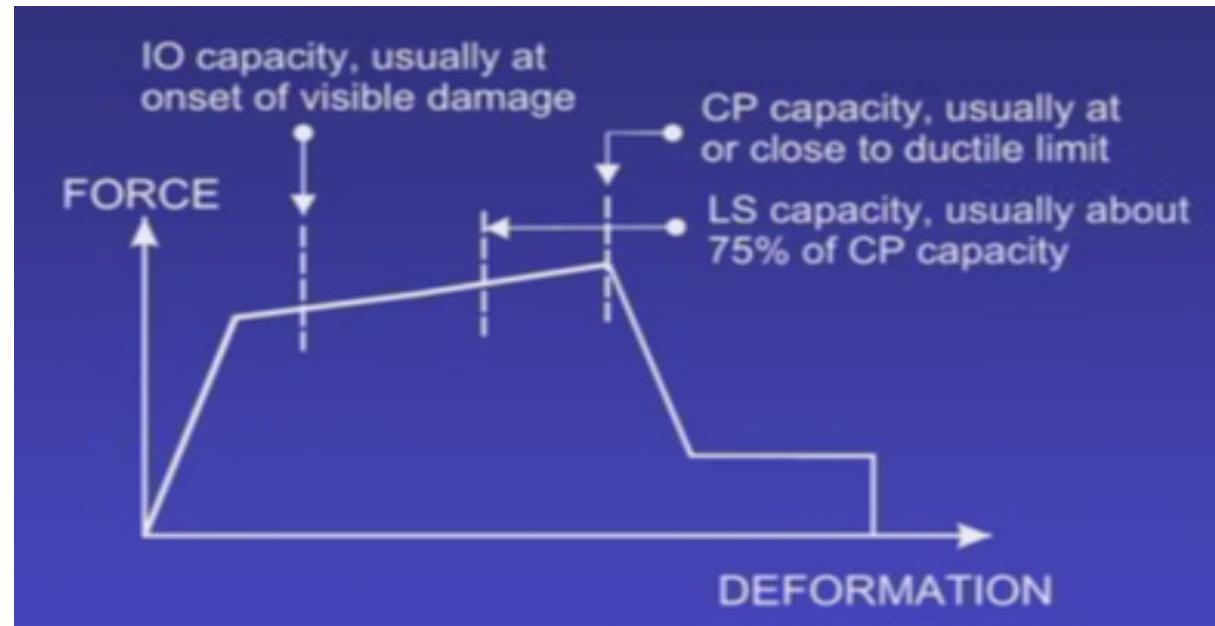
ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

TECNICHE DI MODELLAZIONE NON LINEARE

TIPICI CRITERI DI ACCETTAZIONE O TERMINI DI CAPACITA'



- I valori di capacità anche detti criteri di accettazione sono codificati in alcune “linee guida”, come per esempio la FEMA 356. Alcuni aspetti vengono affrontati anche nella nostra OPCM3274.

INTRODUZIONE

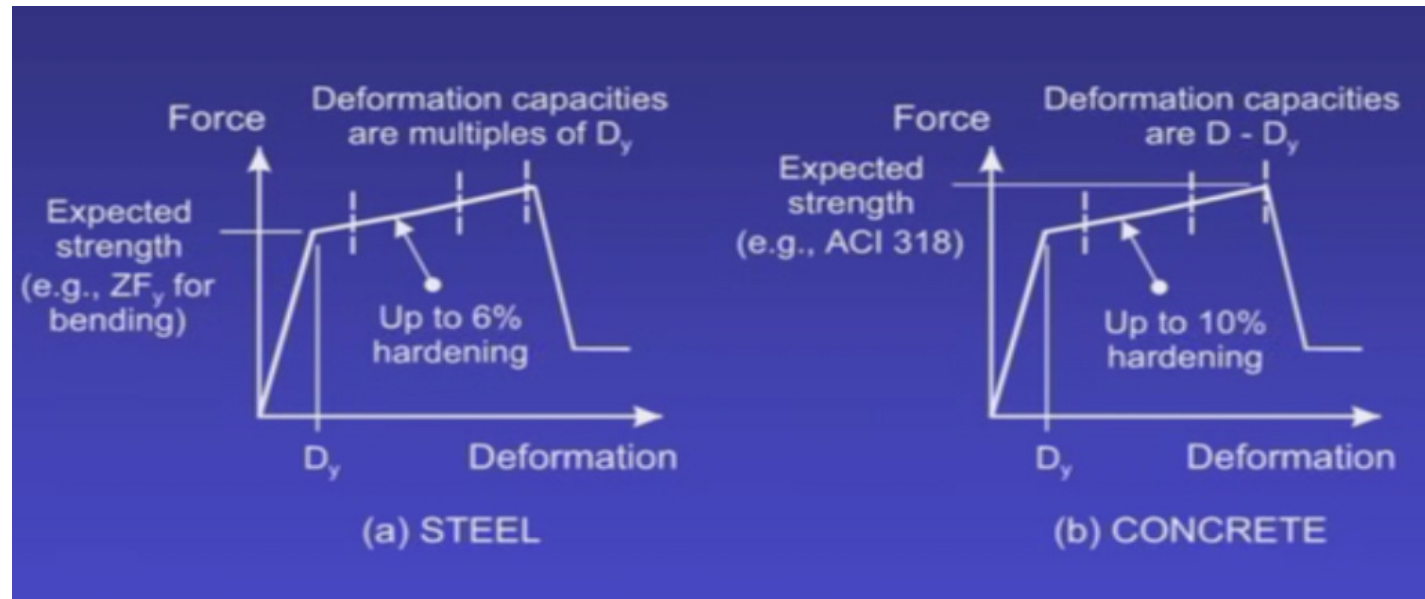
ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

TECNICHE DI MODELLAZIONE NON LINEARE

ACCIAIO vs CEMENTO ARMATO



- Nelle sezioni in acciaio la parte plastica inizia dopo il raggiungimento, in termini di forza del comune valore di resistenza. Nelle sezioni in cemento armato, per arrivare ai valori di resistenza, noti come stati limite di rottura, si ha già l'interessamento del tratto a comportamento plastico.

INTRODUZIONE

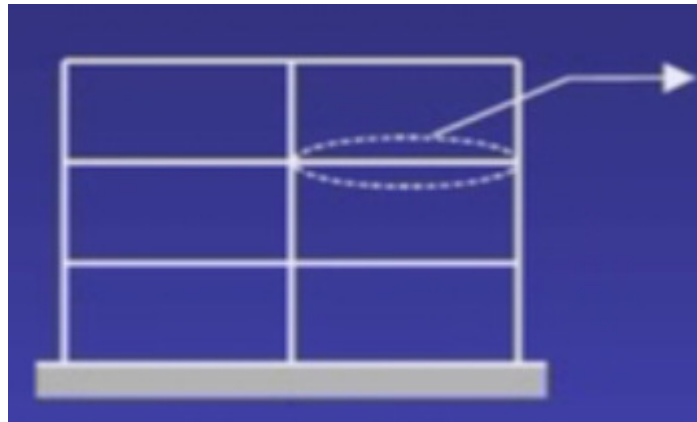
ESEMPIO

PUSHOVER

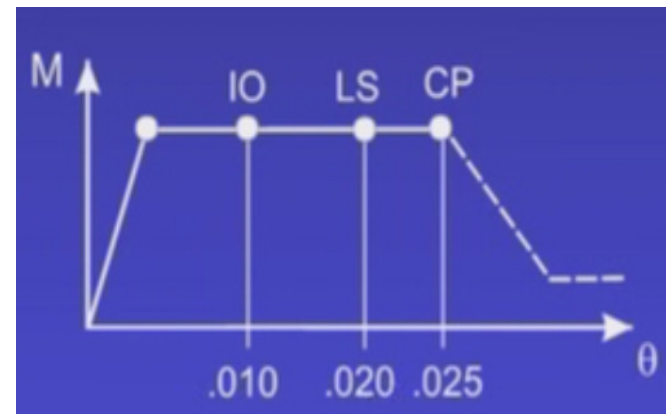
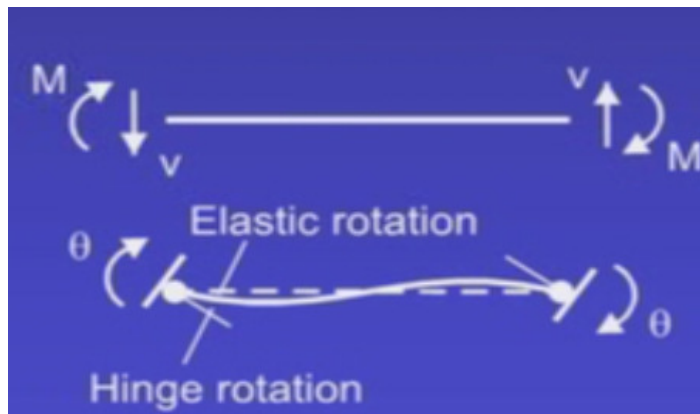
DINAMICA NON LINEARE

TECNICHE DI MODELLAZIONE NON LINEARE

ESEMPIO: TRAVE IN C.A.



Nell'ottica della progettazione secondo la capacità per una trave a comportamento duttile verrà usato come fattore di controllo D/C la rotazione plastica



INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

- ASPETTI IMPORTANTI SUL COMPORTAMENTO NON LINEARE
- PROGETTAZIONE SECONDO RESISTENZA *vs* PROGETTAZIONE SECONDO DEFORMAZIONE
(*strength-based vs deformation-based design*)
- PROGETTAZIONE SECONDO PRESTAZIONE
(*performance based design*)
- GERARCHIA DELLA RESISTENZE
(*capacity design*)
- TECNICHE DI MODELLAZIONE NON LINEARE
- **STATI LIMITE E RAPPORTO DOMANDA/CAPACITA'**
- ANALISI DINAMICA NONLINEARE *vs* ANALISI PUSHOVER

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

STATI LIMITE E RAPPORTO D/C

- Anche in una modesta struttura ci sono numerosi elementi, alcuni di essi saranno considerati duttili, altri fragili. In questo modo ci sono numerosi rapporti D/C da considerare e da tenere sotto controllo in una analisi non lineare. Di norma andrebbero controllati uno per uno.
- PERFORM organizza i rapporti D/C in “gruppi” di:
 - Elementi
 - Componenti
 - Livelli Prestazionali
- Per esempio questi potrebbero essere:
 - Travi di tutti i telai perimetrali
 - Ogni cerniera plastica di queste travi
 - Rotazioni di queste cerniere
 - Capacità di rotazione corrispondente ad uno stato limite

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

- ASPETTI IMPORTANTI SUL COMPORTAMENTO NON LINEARE
- PROGETTAZIONE SECONDO RESISTENZA *vs* PROGETTAZIONE SECONDO DEFORMAZIONE
(*strength-based vs deformation-based design*)
- PROGETTAZIONE SECONDO PRESTAZIONE
(*performance based design*)
- GERARCHIA DELLA RESISTENZE
(*capacity design*)
- TECNICHE DI MODELLAZIONE NON LINEARE
- STATI LIMITE E RAPPORTO DOMANDA/CAPACITA'
- **ANALISI DINAMICA NONLINEARE *vs* ANALISI PUSHOVER**

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

DINAMICA NON LINEARE:

- Si applicano i carichi gravitativi. Questa parte di analisi può anche essere una analisi lineare.
- L'azione sismica è rappresentata da accelerogrammi che possono essere naturali (registrazioni di eventi passati) o artificiali (spettro-compatibili). Quelli naturali sono distribuiti nelle tre componenti (Verticale, NS, EO). Gli accelerogrammi naturali possono essere scalati per adeguarli ad esigenze normative. Comunemente si usano quelli artificiali.
- L'analisi consiste in una risoluzione step-by-step delle equazioni di moto. Un tipico tempo di integrazione è di 0.01 o 0.02 sec.
- Vengono calcolati e monitorati tutti i rapporti D/C istante per istante.
- Ci sono molte tecniche di integrazione diretta e di norma si scelgono le tecniche più adeguate al caso in esame.
- Si devono utilizzare più accelerogrammi (5 o 7) e a seconda delle normative utilizzate vengono utilizzati o i valori peggiori dei rapporti D/C o valori intermedi.

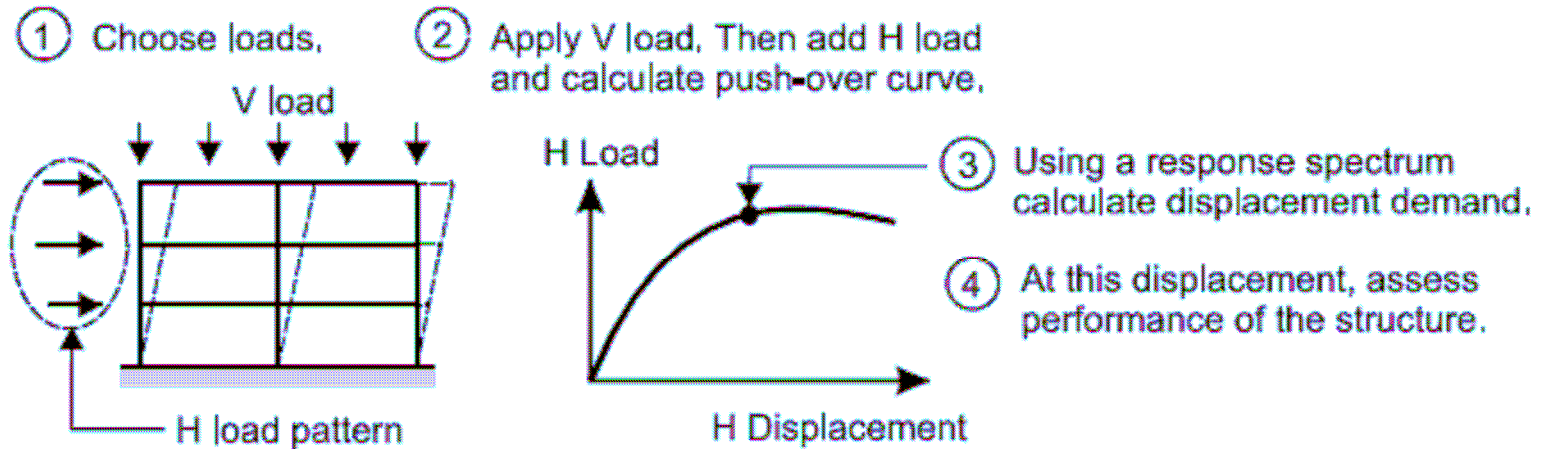
INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

PUSHOVER:



Analisi Pushover

1. Si sceglie una distribuzioni di forze o una forma di deformazione,
2. Si applica il carico verticale e successivamente quello orizzontale scelto come base per l'analisi Pushover, si traccia la curva Forza-Spostamento del sistema MDOF,
3. Si usa lo spettro di risposta elastico per ottenere la domanda di spostamento,
4. Allo spostamento domandato si verifica lo stato di danneggiamento della struttura e lo si confronta con quello di stati limite imposti.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

ALTRI ASPETTI DI MODELLAZIONE NON LINEARE IN PERFORM3D

[SAIE2007_SEMINARIO_APPROFONDIMENTI_PERFORM.ppt](#)

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

RICHIAMI TEORICI SULLE ANALISI DINAMICHE NON LINEARI

TIPO FNA E INTEGRAZIONE DIRETTA

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

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

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

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:

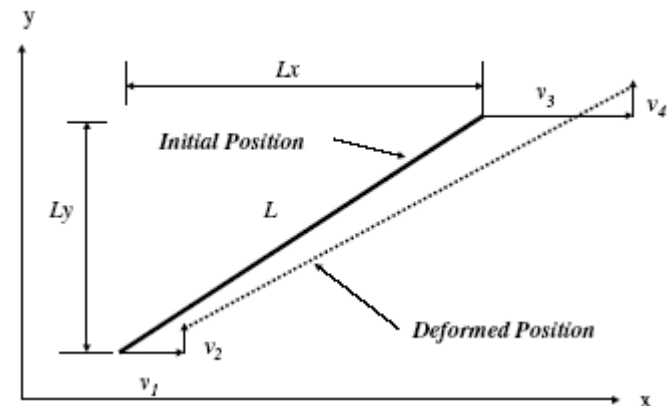
$$\dot{d}(t) = b\dot{u}(t) \quad (11)$$

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

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

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

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

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:

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

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

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

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

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_g 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 $\bar{F}(t)^i = F(t) - \mathbf{B}^T [f(t)^i - k_c d(t)^i]$

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

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

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

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

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

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

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

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

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

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

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:

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

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

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

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

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

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

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.

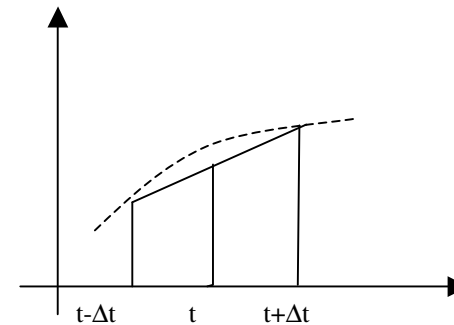
Altri metodi sono:

• **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

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

Direct Integration

Il metodo Wilson- θ (1973)

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

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

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

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

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

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

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

Confronto tra FNA e DI

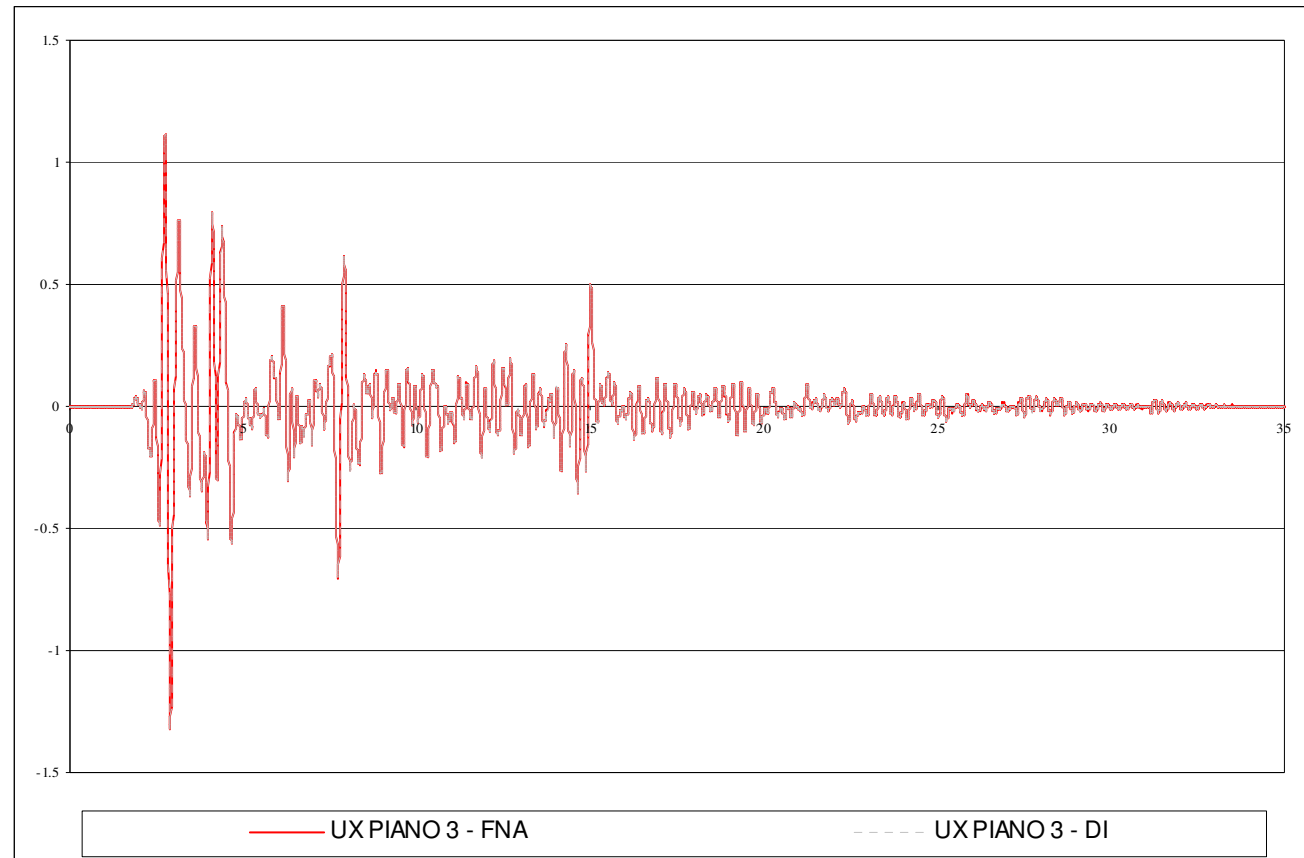
Sorace, S., Terenzi, G., Bandini, L., “Le potenzialità della FNA nella analisi dinamica non lineare di strutture dotate di strumenti avanzati di protezione sismica.”.

Durata analisi:
DI: 16 min
FNA: 26 s

MAX SPOSTAMENTO PUNTO DI CONTROLLO:

-FNA 1.112 cm

-DI 1.111 cm



INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

PERFORMANCE BASED DESIGN

**ESEMPIO DI UTILIZZO DELL'ANALISI PUSHOVER
E DELL'ANALISI DINAMICA NON LINEARE PER
VALUTARE LA PRESTAZIONE DI UNA STRUTTURA
SOGGETTA AD AZIONI SISMICHE**

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

ESEMPIO DI MODELLAZIONE:

L'esempio che tratteremo a titolo di studio dell'analisi Pushover è tratto dal seguente articolo:

"PLASTIC DESIGN OF SEISMIC RESISTANT STEEL FRAMES"

Prof. Federico M. Mazzolani (Università di Napoli)

Prof. Vincenzo Piluso (Università di Salerno)

Earthquake engineering and Structural Dynamics vol. 26, 167-191 (1997).

L'articolo descrive un nuovo metodo per il progetto di telai in acciaio basato su una applicazione del teorema cinematico di collasso plastico che porta alla realizzazione di un telaio con capacità di duttilità superiori a quelle che si otterrebbero con il comune metodo basato sulla gerarchia delle resistenze.

Confronteremo i risultati di una progettazione secondo gerarchia delle resistenze e secondo il metodo proposto nell'articolo in termini di performance e di comportamento al collasso.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

ESEMPIO DI MODELLAZIONE:

F. M. MAZZOLANI AND V. PILUSO

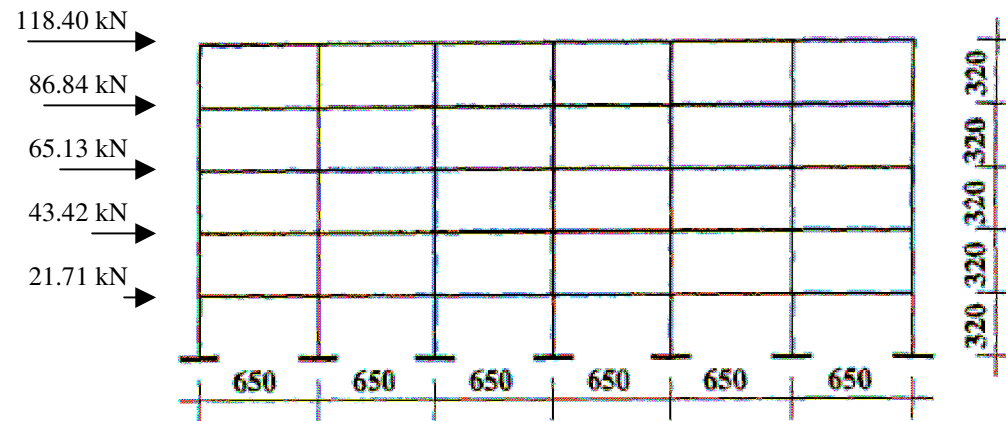


Figure 7. Structural scheme of the example frame (dimension in cm)

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

SPEKTRO: OPCM3274 – 0.35g - A

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

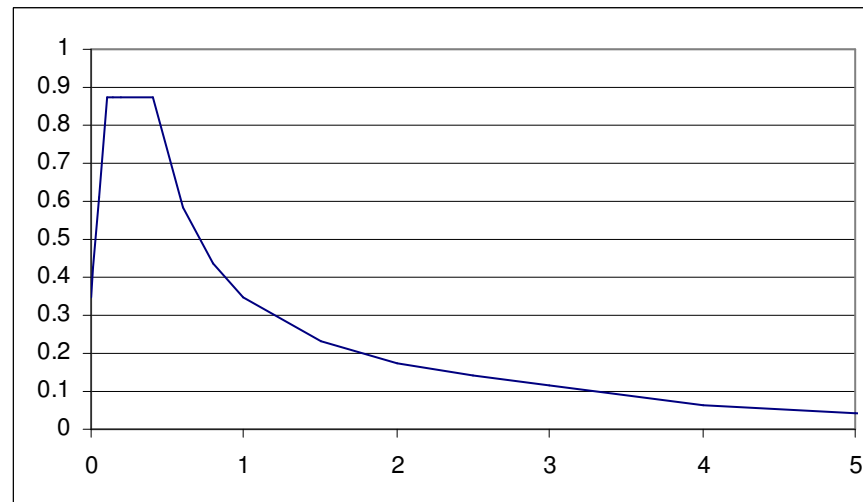
$$T_B \leq T \leq T_C: \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_o \quad [4.2]$$

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

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

Classe sottosuolo	S	β_o	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).



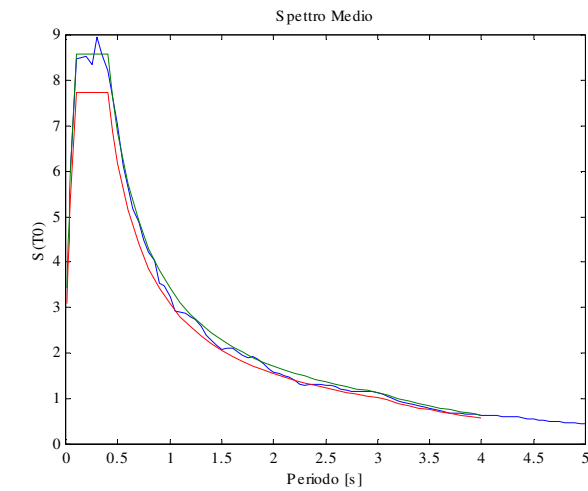
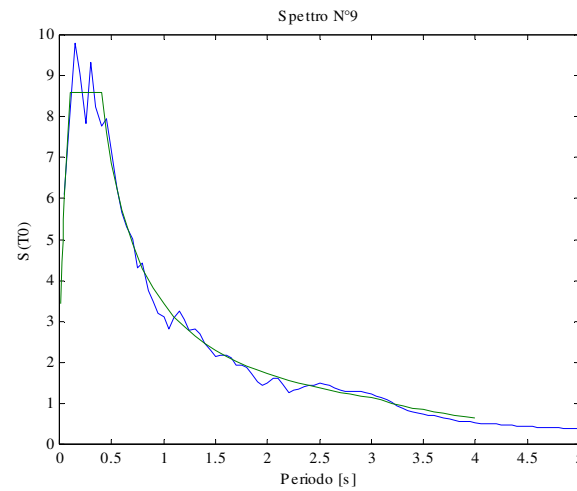
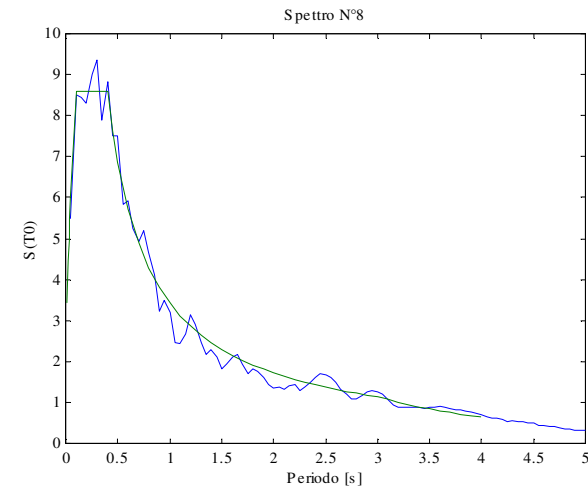
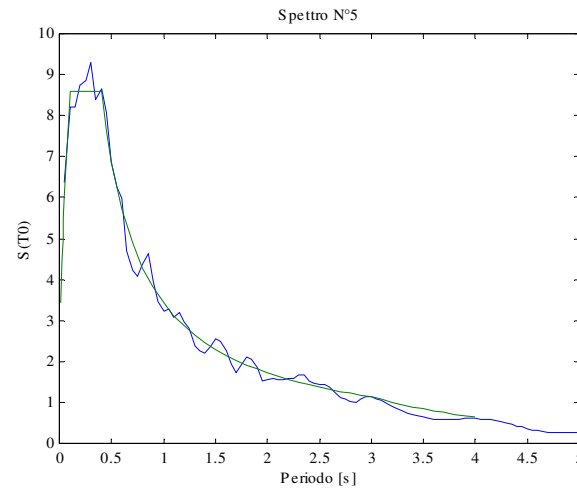
INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

ACC. SPETTRO COMPATIBILI: OPCM3274 – 0.35g - A



Raffronto tra gli spettro acc. generati e spettro di partenza

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

TRAVI INELASTICHE

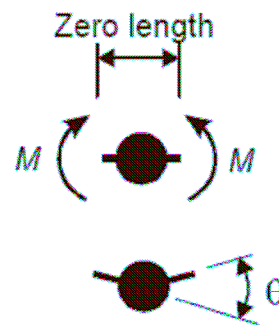
Ci sono numerosi modi per modellare una trave con comportamento inelastico:

- Modello a cerniera plastica;
- Modello a zona plastica concentrata;
- Modello a plasticità diffusa.

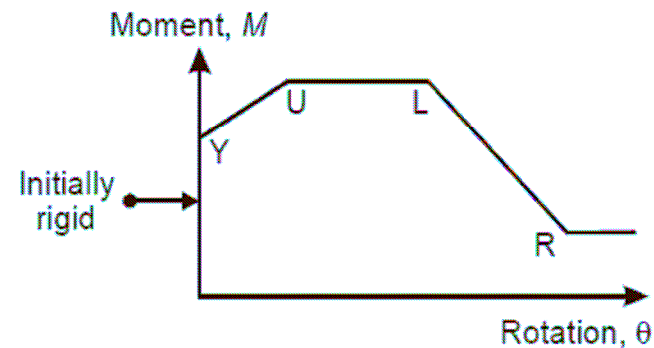
Il più comune metodo prevede l'utilizzo di cerniere plastiche.

CERNIERA PLASTICA

Letteralmente una cerniera plastica può essere vista come una cerniera rotazionale chiusa, in modo analogo ad un vecchio mulinello arrugginito, che può essere ruotato solo vincendo la resistenza dell'attrito. Questo comportamento può facilmente essere rappresentato mediante la seguente legge costitutiva.



(a) Action and Deformation



(b) Action-Deformation Relationship

INTRODUZIONE

ESEMPIO

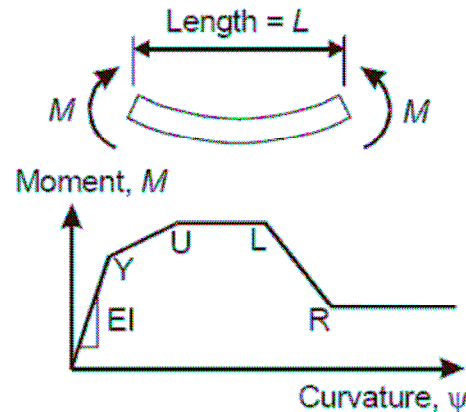
PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

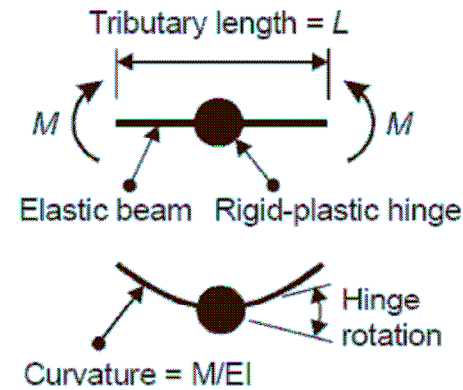
CERNIERA A ROTAZIONE E A CURVATURA

Le cerniere plastiche possono essere definite a rotazione o a curvatura. Una cerniera plastica a rotazione è una cerniera rigido plastica la cui legge costitutiva è stata mostrata precedentemente.

Una cerniera a curvatura è essenzialmente analoga tranne che nella legge azione-deformazione la deformazione è una curvatura al posto di una rotazione.



(a) Actual Beam



(b) Hinge Equivalent

La rigidità iniziale è la rigidità elastica della trave. In questo caso la deformazione totale della cerniera è composta da una componente elastica e da una componente rigido-plastica. Una cerniera a curvatura richiede oltre alla definizione della legge Momento-Curvatura anche la definizione di una lunghezza tributaria. D'altra parte è più conveniente ragionare in termini di momento-curvatura.

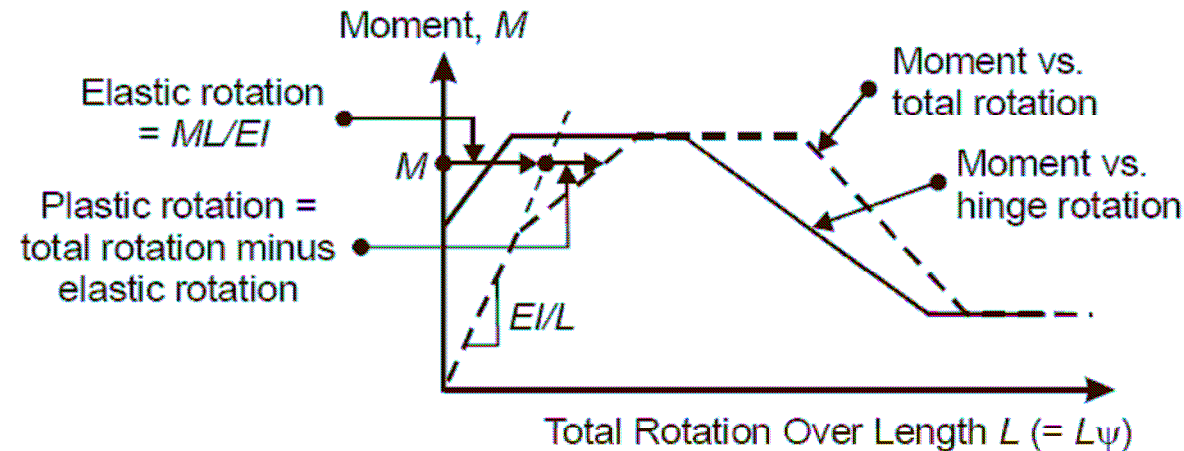
INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

CERNIERA A ROTAZIONE E A CURVATURA



Viene qui mostrata la relazione tra il momento flettente e la rotazione totale riferita ad una lunghezza pari alla lunghezza tributaria della cerniera a curvatura.

Per un qualsiasi momento M , la rotazione nella trave elastica risulta ML/EI . **Per avere lo stesso comportamento della trave "reale", la cerniera a rotazione deve essere definita con una rotazione totale meno la componente elastica.**

PERFORM3D utilizza la lunghezza tributaria per convertire una cerniera a curvatura con una cerniera a rotazione.

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

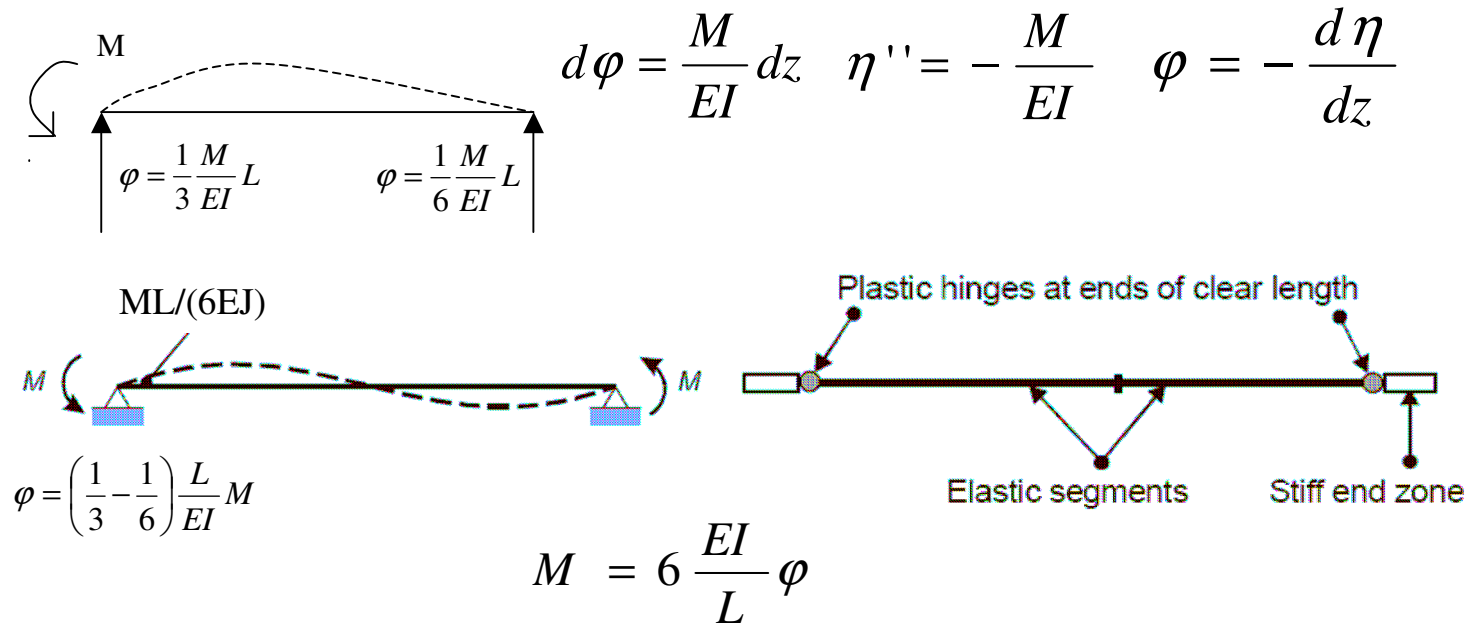
INTRODUZIONE

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).

$$s^* = \min\{\gamma_{ov} s, M_{j,Rd} / M_{e,Rd}\} \rightarrow$$

$$\theta_u = R\theta_y = R \frac{M_{e,Rd} L_V}{2EI}$$

$$L_V = M/V$$

$$\frac{s^* - 1}{2} \leq \rho \leq 0.3$$

$$R = \frac{1}{s^* - \rho} \left\{ (1 - \rho) + \frac{s^* - 1}{1 - \rho} \left[(1 - 2\rho) + \frac{\epsilon_h}{\epsilon_y} + (s^* - 1) \frac{E}{E_r} \right] \right\} - 1$$

$$\rho < \frac{s^* - 1}{2}$$

$$R = \frac{1}{(s^* - \rho)(1 - \rho)} \left\{ [1 + \rho^2 - 2\rho(s^* - 1)] + 2 \frac{\epsilon_h}{\epsilon_y} (s^* - \rho - 1) + \frac{E}{E_r} 4\rho(s^* - \rho - 1) + (s^* - 2\rho - 1)^2 \frac{E}{E_h} \right\} - 1$$

$$\rho = \frac{N_{sd}}{A f_y}$$

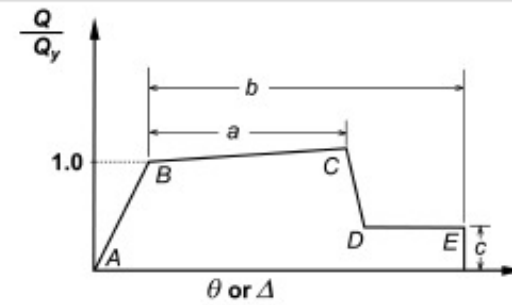
TABLE: Element Forces - Frames

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

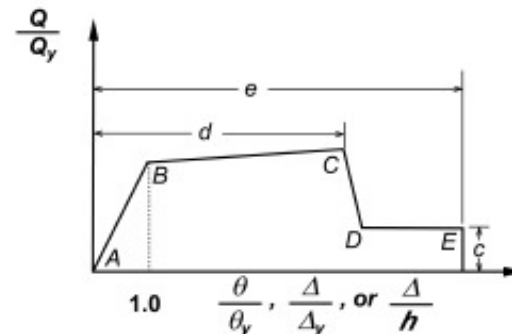
Figure C2-1 shows the generalized force versus deformation curves used throughout this standard to specify component modeling and acceptance criteria for deformation-controlled actions in any of the four basic material types. Linear response is depicted between point *A* (unloaded component) and an effective yield point *B*. The slope from *B* to *C* is typically a small percentage (0-10%) of the elastic slope, and is included to represent phenomena such as strain hardening. *C* has an ordinate that represents the strength of the component, and an abscissa value equal to the deformation at which significant strength degradation begins (line *CD*). Beyond point *D*, the component responds with substantially reduced strength to point *E*. At deformations greater than point *E*, the component strength is essentially zero.

The sharp transition as shown on idealized curves in Figure C2-1 between points *C* and *D* can result in computational difficulty and an inability to converge when used as modeling input in nonlinear computerized analysis software. In order to avoid this computational instability, a small slope may be provided to the segment of these curves between points *C* and *D*.

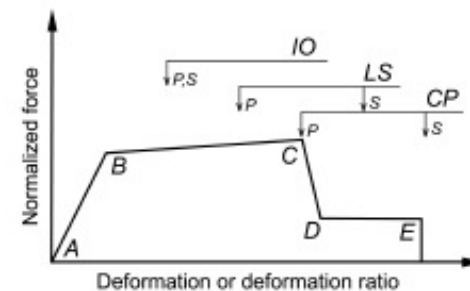
For some components it is convenient to prescribe acceptance criteria in terms of deformation (e.g., θ or Δ), while for others it is more convenient to give criteria in terms of deformation ratios. To accommodate this, two types of idealized force vs. deformation curves are used in Figures C2-1 (a) and (b). Figure C2-1(a) shows normalized force (Q/Q_{CE}) versus deformation (θ or Δ) and the parameters *a*, *b*, and *c*. Figure C2-1(b) shows normalized force (Q/Q_{CE}) versus deformation ratio (θ/θ_y , Δ/Δ_y , or Δ/h) and the parameters *d*, *e*, and *c*. Elastic stiffnesses and values for the parameters *a*, *b*, *c*, *d*, and *e* that can be used for modeling components are given in Chapters 5 through 8. Acceptance criteria for deformation or deformation ratios for primary members (P) and secondary members (S) corresponding to the target Building Performance Levels of Collapse Prevention (CP), Life Safety (LS), and Immediate Occupancy (IO) as shown in Figure 2-1(c) are given in Chapters 5 through 8.



(a) Deformation



(b) Deformation ratio



(c) Component or element deformation acceptance criteria

Figure C2-1 Generalized Component Force-Deformation Relations for Depicting Modeling and Acceptance Criteria

Table 5-6 Modeling Parameters and Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Structural Steel Components

Component/Action	Modeling Parameters			Acceptance Criteria				
	Plastic Rotation Angle, Radians		Residual Strength Ratio	Plastic Rotation Angle, Radians				
	a	b		IO	Primary		Secondary	
			LS		CP	LS	CP	
Beams—flexure								
a. $\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{F_{ye}}}$ and $\frac{h}{t_w} \leq \frac{418}{\sqrt{F_{ye}}}$	9 θ_y	11 θ_y	0.6	1 θ_y	6 θ_y	8 θ_y	9 θ_y	11 θ_y
b. $\frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}}$ or $\frac{h}{t_w} \geq \frac{640}{\sqrt{F_{ye}}}$	4 θ_y	6 θ_y	0.2	0.25 θ_y	2 θ_y	3 θ_y	3 θ_y	4 θ_y
c. Other	Linear interpolation between the values on lines a and b for both flange slenderness (first term) and web slenderness (second term) shall be performed, and the lowest resulting value shall be used							
Columns—flexure^{2,7}								
For $P/P_{CL} < 0.20$								
a. $\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{F_{ye}}}$ and $\frac{h}{t_w} \leq \frac{300}{\sqrt{F_{ye}}}$	9 θ_y	11 θ_y	0.6	1 θ_y	6 θ_y	8 θ_y	9 θ_y	11 θ_y
b. d $\frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}}$ or $\frac{h}{t_w} \geq \frac{460}{\sqrt{F_{ye}}}$	4 θ_y	6 θ_y	0.2	0.25 θ_y	2 θ_y	3 θ_y	3 θ_y	4 θ_y
c. Other	Linear interpolation between the values on lines a and b for both flange slenderness (first term) and web slenderness (second term) shall be performed, and the lowest resulting value shall be used							

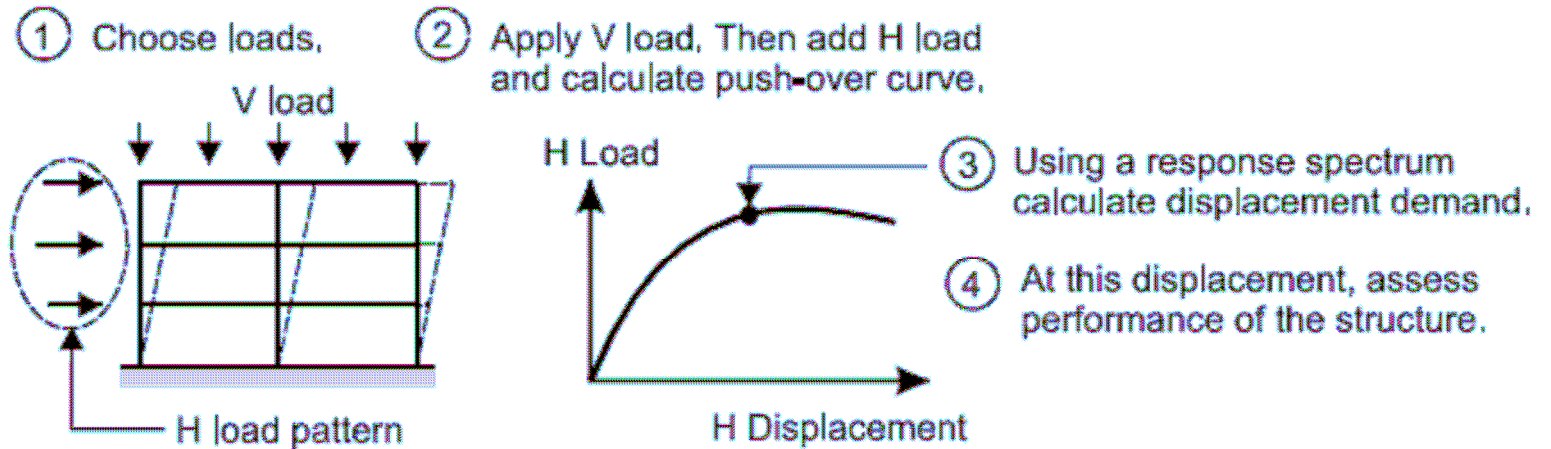
INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

PUSHOVER:



Analisi Pushover

1. Si sceglie una distribuzioni di forze o una forma di deformazione,
2. Si applica il carico verticale e successivamente quello orizzontale scelto come base per l'analisi Pushover, si traccia la curva Forza-Spostamento del sistema MDOF,
3. Si usa lo spettro di risposta elastico per ottenere la domanda di spostamento,
4. Allo spostamento domandato si verifica lo stato di danneggiamento della struttura e lo si confronta con quello di stati limite imposti.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

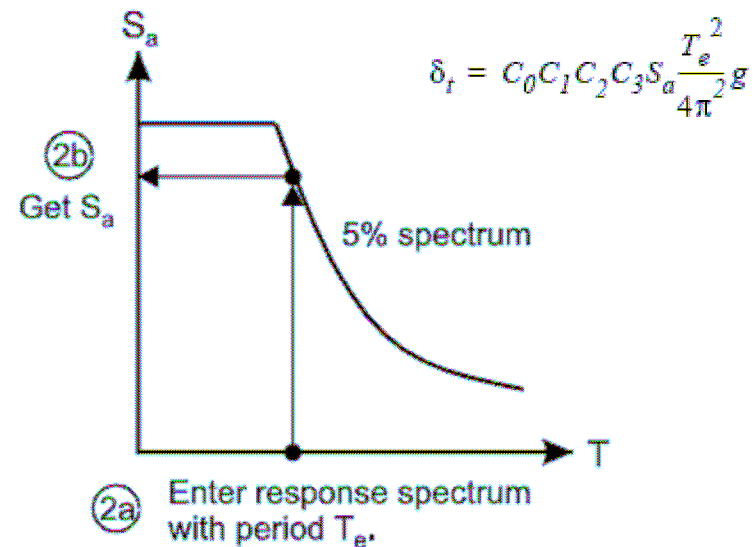
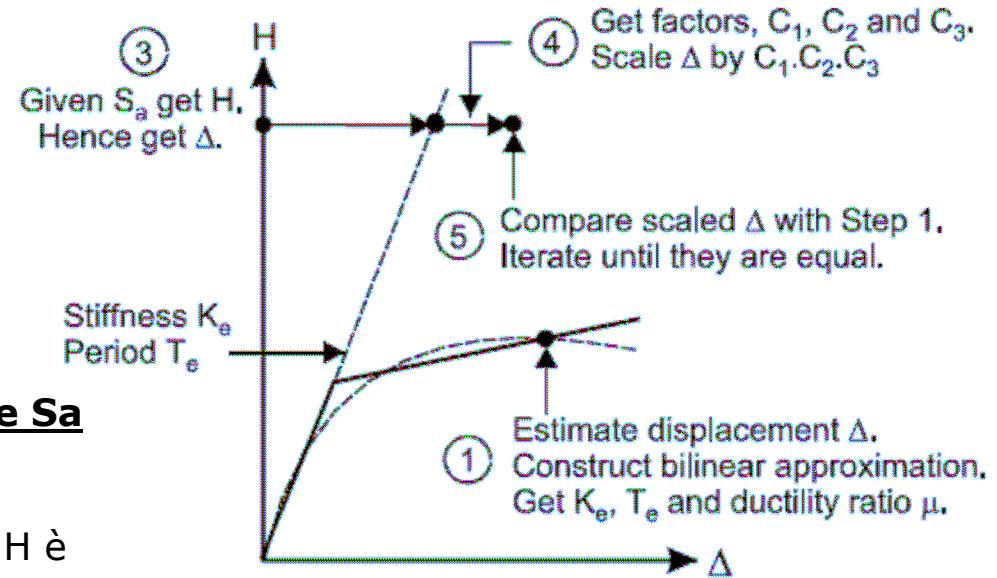
PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

FEMA356-FEMA440 Coefficient Methods

Ricavare H tramite Sa

Per uno SDOF il passaggio da Sa ad H è triviale. Basta moltiplicare Sa per la massa dello SDOF. Per un sistema MDOF è un po' più complesso, bisogna applicare i concetti della dinamica delle strutture. Si ricava $S_d = S_a/\omega^2$ quindi $H = S_d \times K_1$



3.3.3.3.2 Target Displacement

The target displacement, δ_p , 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

Table 3-2 Values for Modification Factor C_0 ¹

Number of Stories	Shear Buildings ²		Other Buildings
	Triangular Load Pattern (1.1, 1.2, 1.3)	Uniform Load Pattern (2.1)	Any Load Pattern
1	1.0	1.0	1.0
2	1.2	1.15	1.2
3	1.2	1.2	1.3
5	1.3	1.2	1.4
10+	1.3	1.2	1.5

1. Linear interpolation shall be used to calculate intermediate values.
2. Buildings in which, for all stories, interstory drift decreases with increasing height.

Table 3-3 Values for Modification Factor C_2

Structural Performance Level	$T \leq 0.1$ second ³		$T \geq T_S$ second ³	
	Framing Type 1 ¹	Framing Type 2 ²	Framing Type 1 ¹	Framing Type 2 ²
Immediate Occupancy	1.0	1.0	1.0	1.0
Life Safety	1.3	1.0	1.1	1.0
Collapse Prevention	1.5	1.0	1.2	1.0

1. Structures in which more than 30% of the story shear at any level is resisted by any combination of the following components, elements, or frames: ordinary moment-resisting frames, concentrically-braced frames, frames with partially-restrained connections, tension-only braces, unreinforced masonry walls, shear-critical, piers, and spandrels of reinforced concrete or masonry.
2. All frames not assigned to Framing Type 1.
3. Linear interpolation shall be used for intermediate values of T .

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

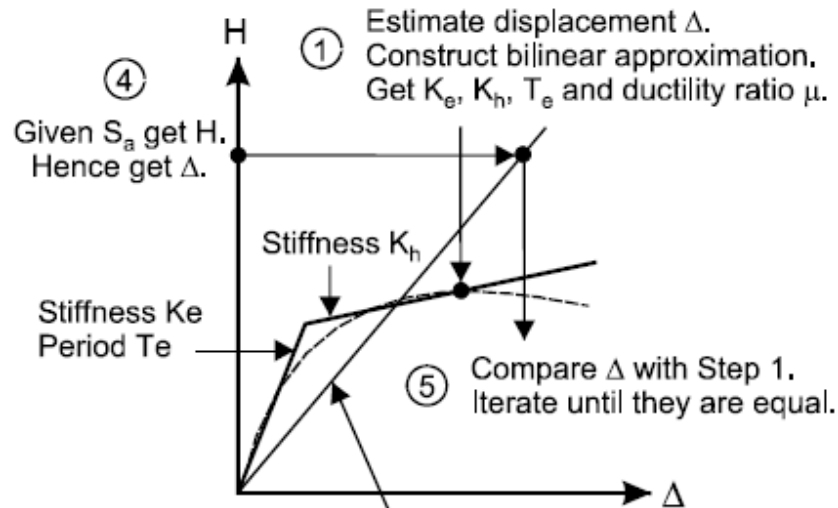
INTRODUZIONE

ESEMPIO

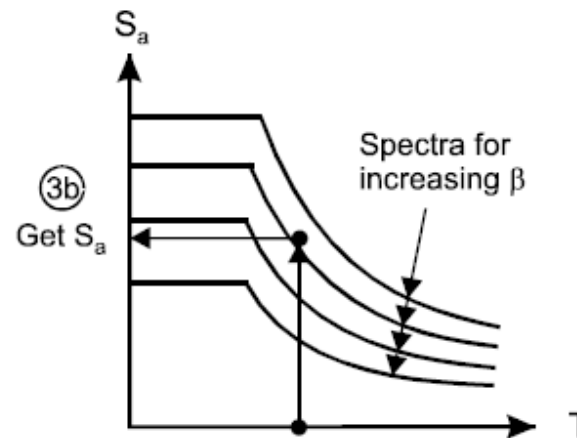
PUSHOVER

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.



③a Enter response spectrum
with T_{eff} and β_{eff} .

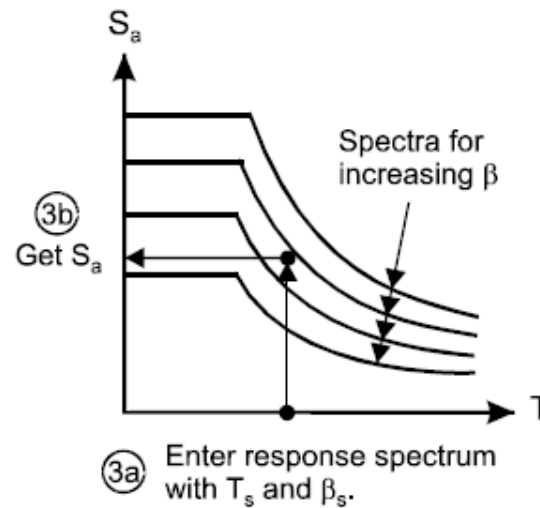
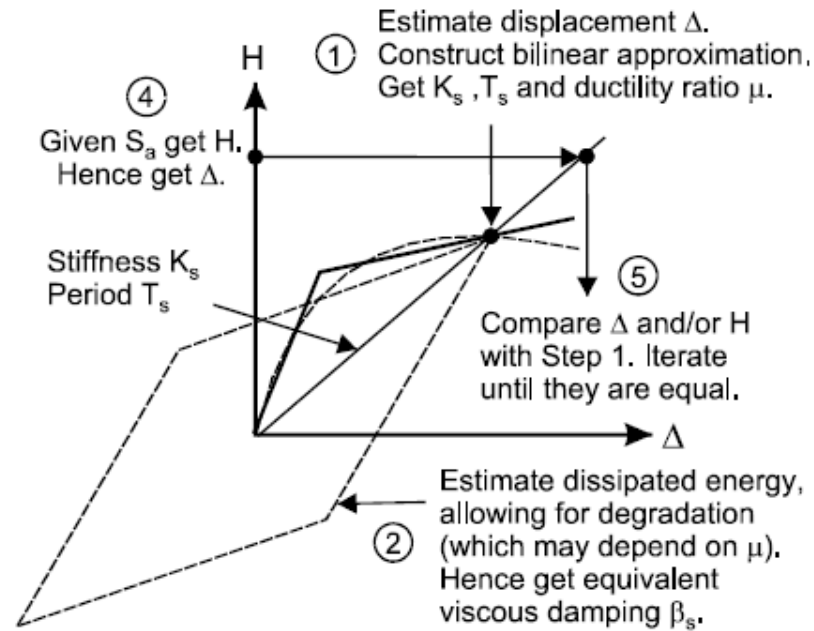
INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

ATC 40 Capacity Spectrum Method



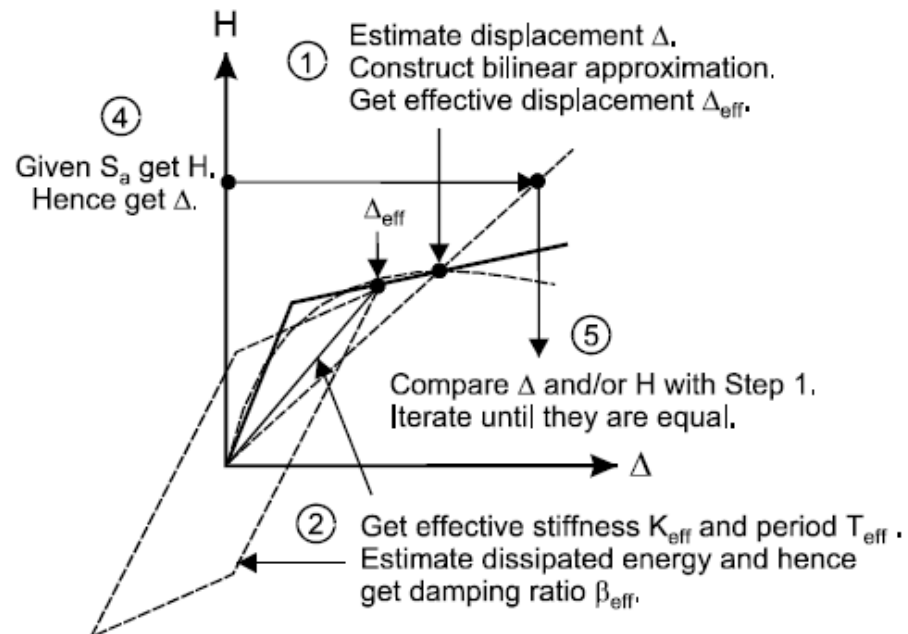
INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

ATC 40 Modified Capacity Spectrum Method



INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

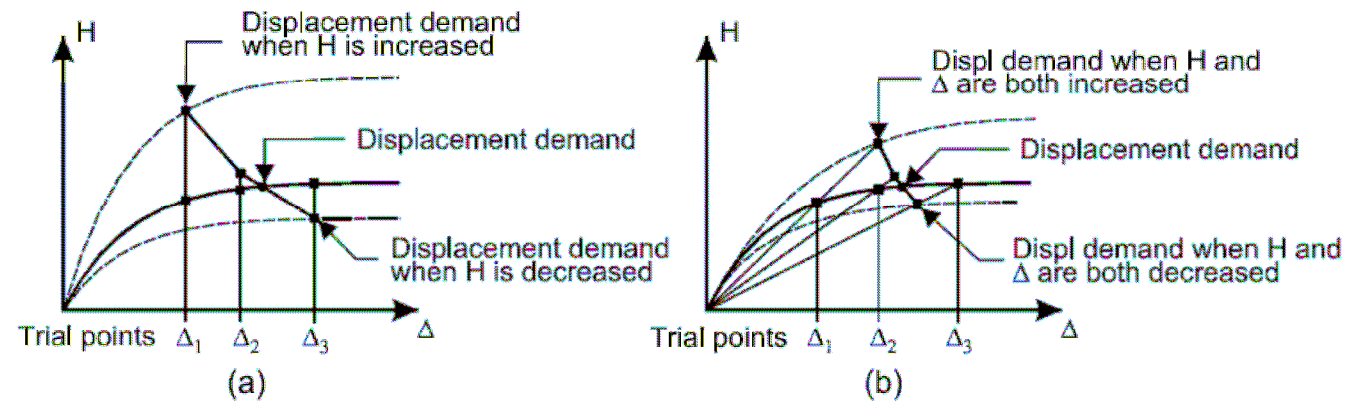


Figure 28.10 Sensitivity Information

Curva di domanda

La **figura a)** riporta la curva di capacità ottenuta modificando la rigidezza e la resistenza (mantenendo costante la proporzione). In questo caso le linee a periodo costante sono verticali. Questa figura mostra l'incremento della resistenza (e della rigidezza) da utilizzare al fine di abbattere lo spostamento target.

In **figura b)** riporta la curva di capacità ottenuta variando esclusivamente la resistenza (rigidezza costante). In questo caso le linee a periodo costante sono radiali.

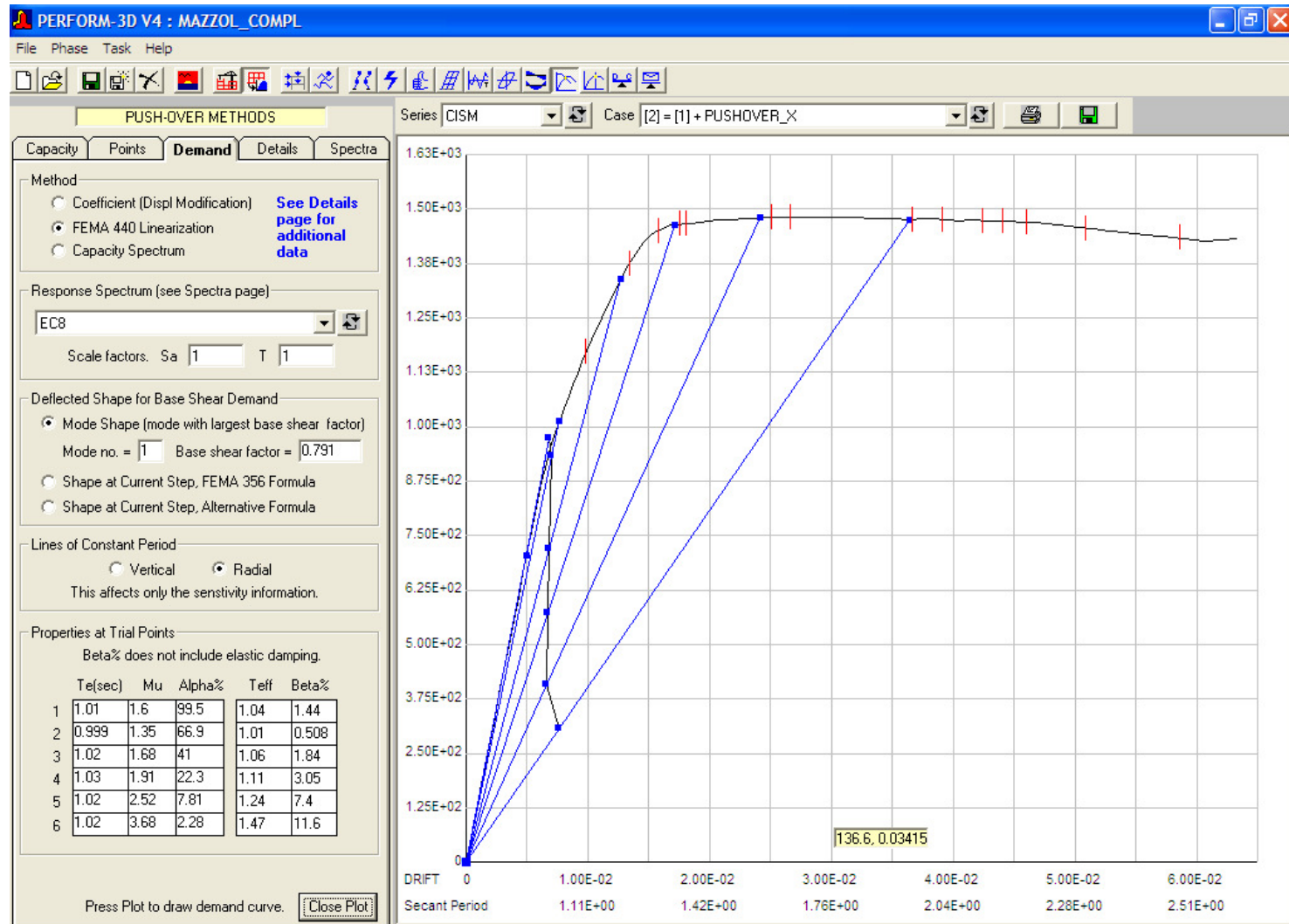
Queste curve possono essere utilizzate per valutare la sensibilità della risposta al variare di rigidezza o resistenza.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE



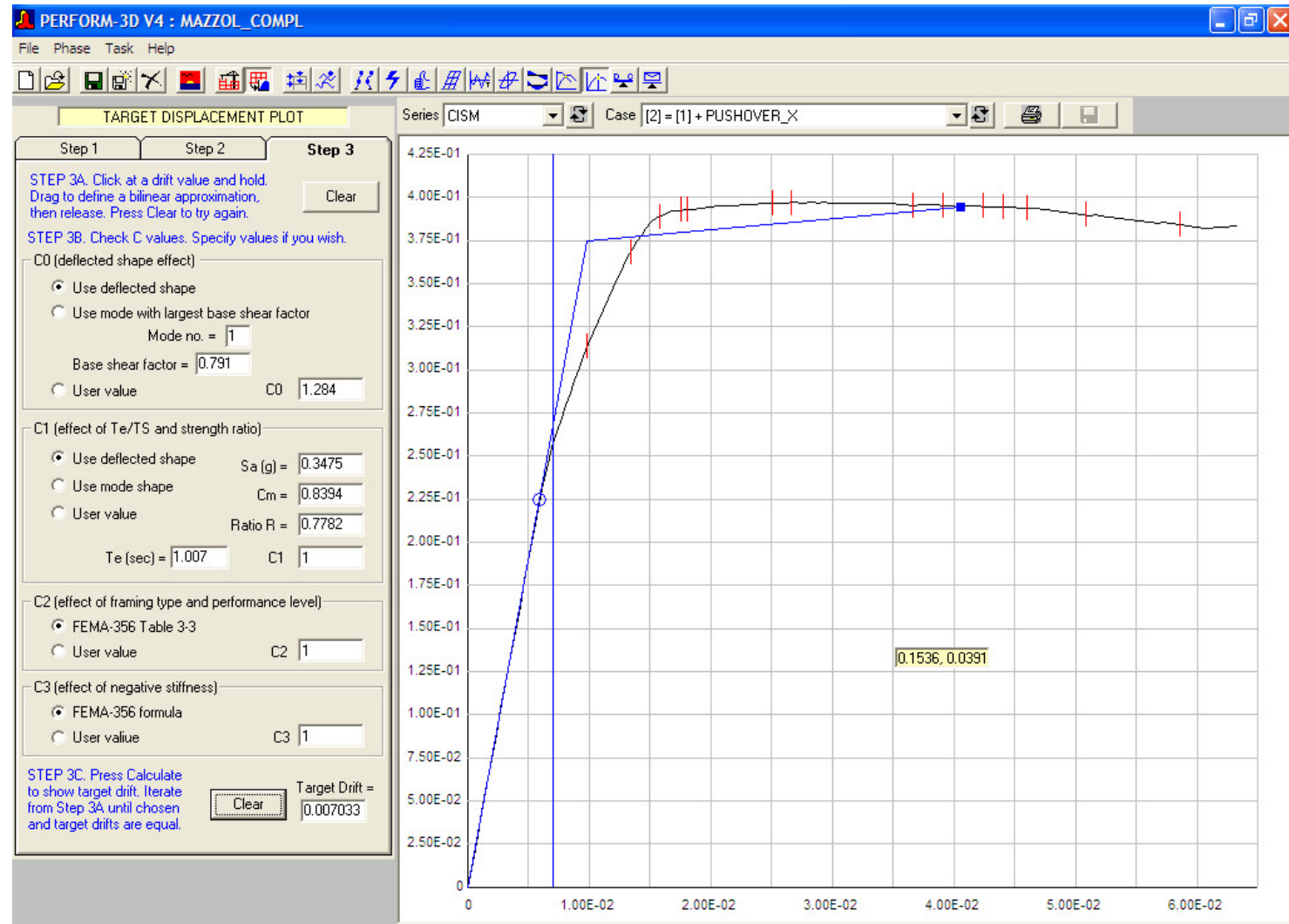
Ricerca del Target Displacement con il metodo della linearizzazione secondo FEMA440
 $d = 0.07 \times 1600 = 11.2 \text{ cm.}$

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE



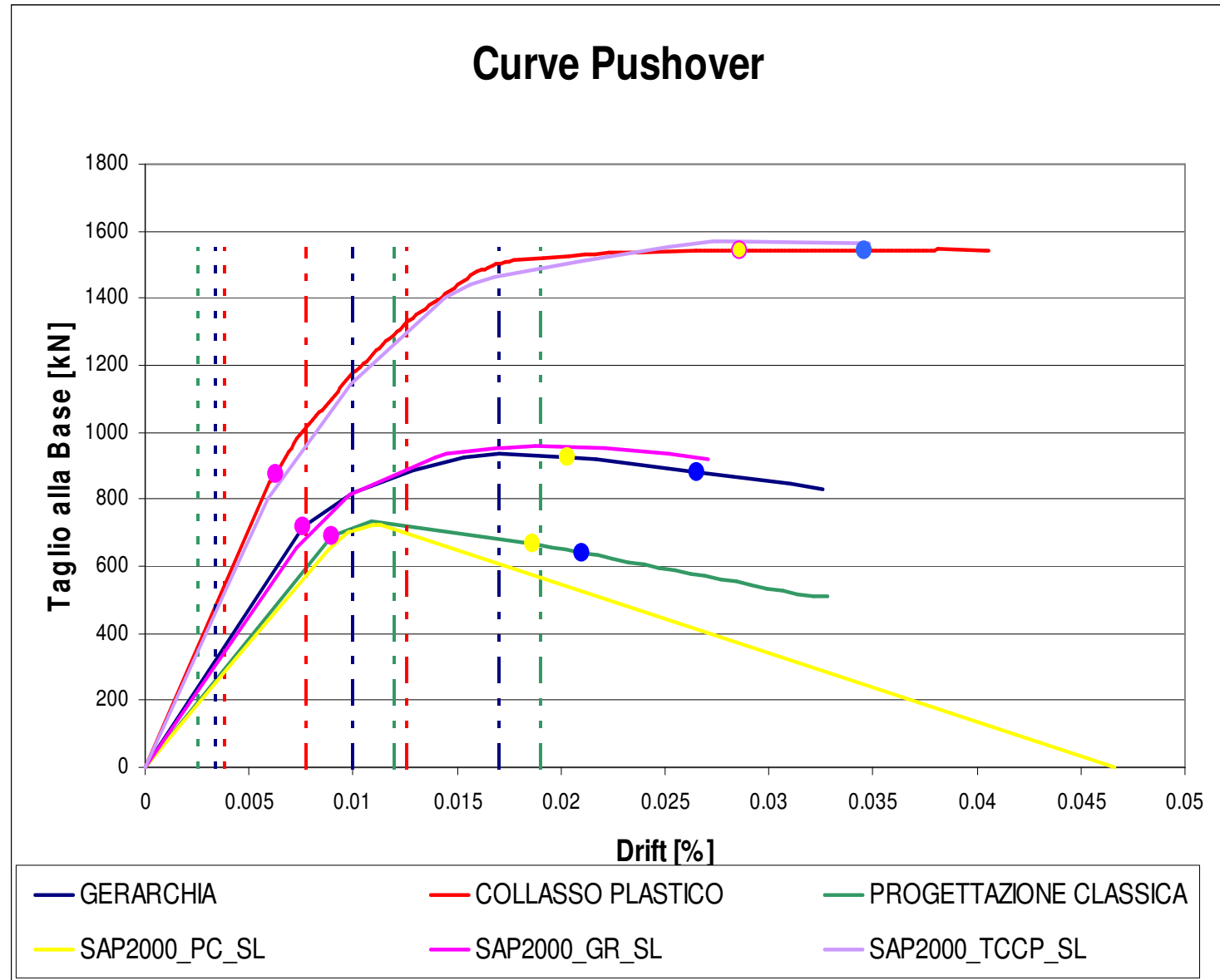
Ricerca del Target Displacement con il metodo dell'oscillatore elastoplastico elementare. Procedura equivalente a quella presente nella OPCM3274.
 $d = 0.07 \times 1600 = 11.2 \text{ cm}$.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE



INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

Degradazione Ciclica

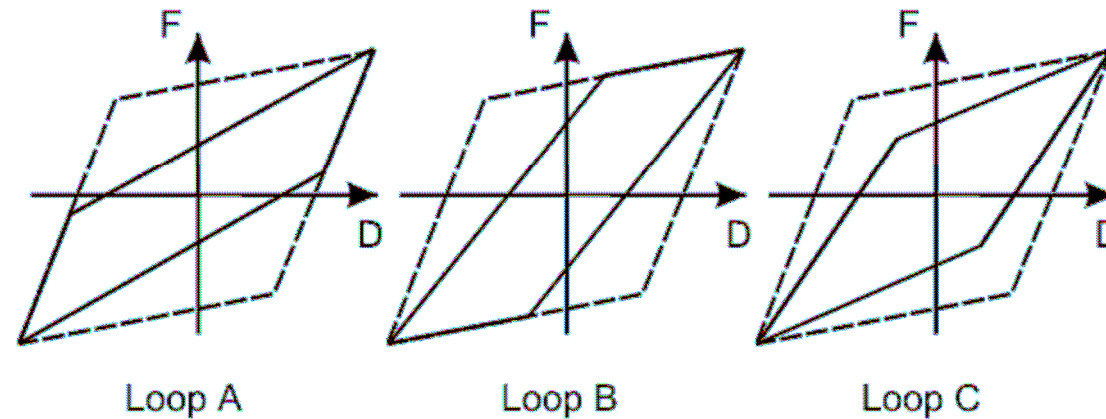


Figure 5.14 Loops with Same Energy Degradation

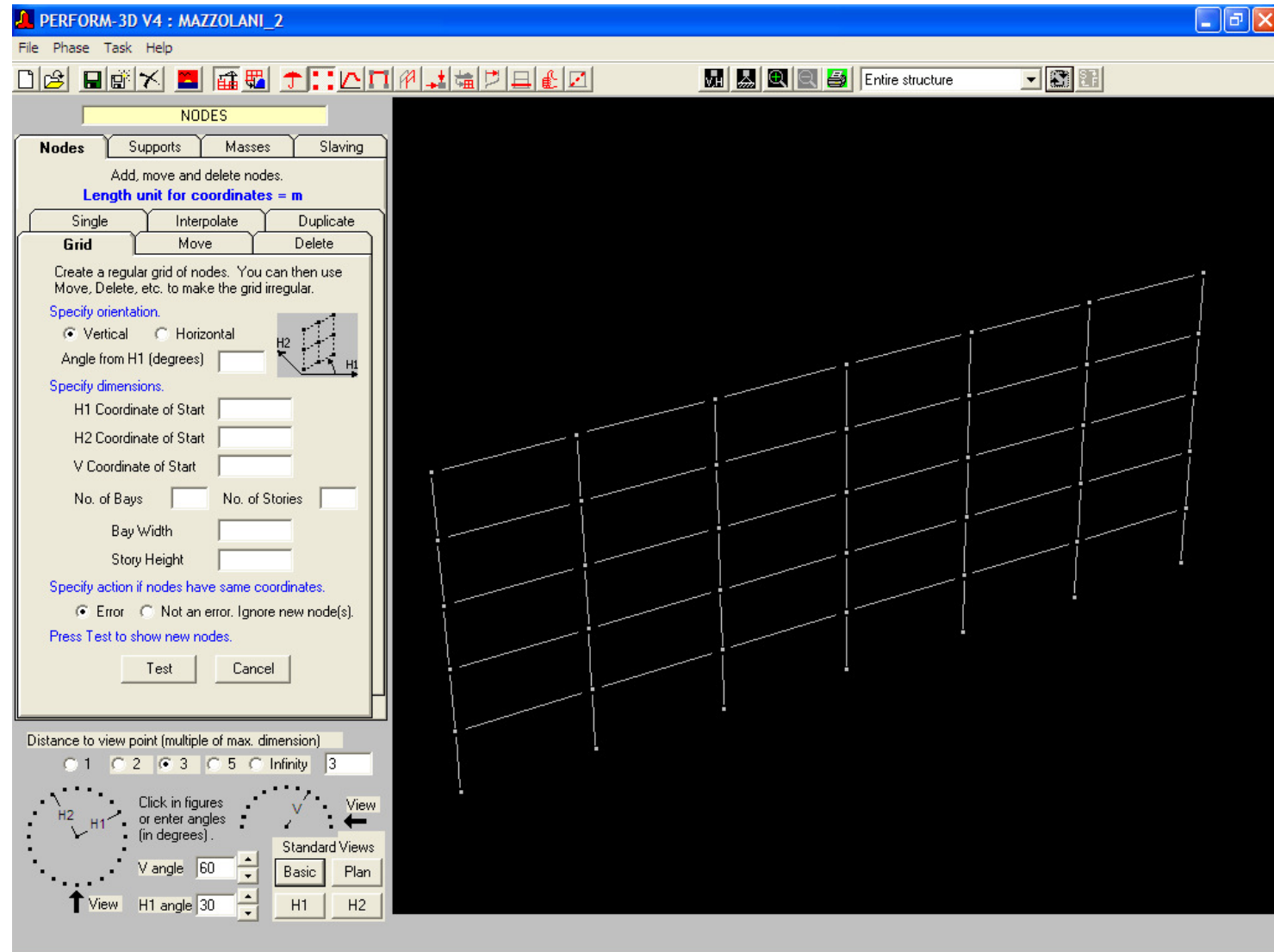
In PERFORM, the default option corresponds to Loop C. If you wish, you can specify an "unloading stiffness factor" that controls the loop shape. A value of zero for this factor (the default) corresponds to Loop C, a value of +1 corresponds to Loop A (maximum stiffness, smallest elastic range), and a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

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE



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.

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

Cross Section

Type: Beam, Standard Steel Section

Name: TRAVI

Component strength, as a multiple of section strength: 1

Section Dimensions

Axis 2 (TF), Axis 3 (TW), 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.

Definizione delle cerniere plastiche: Cerniere a Curvatura.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE

The screenshot displays the 'COMPONENT PROPERTIES' dialog box for an 'Inelastic' component. The 'Type' is set to 'FEMA Beam, Steel Type' and the 'Name' is 'TRAVI'. The 'Shape of Relationship' is 'E-P-P' and 'Strength Loss' is set to 'Yes'. The 'Deformation Capacities' section is active, showing a table of capacity values for levels 1 through 5.

Capacity values = D / D_Y

Level	Pos. Capacity	Neg. Capacity
1	2	
2	7	
3	12	
4		
5		

The graph on the right shows a bilinear moment-rotation relationship with a yield plateau. The x-axis represents rotation (ranging from -1.50E+01 to 1.50E+01) and the y-axis represents moment. Vertical red lines indicate the yield and ultimate capacities at each level.

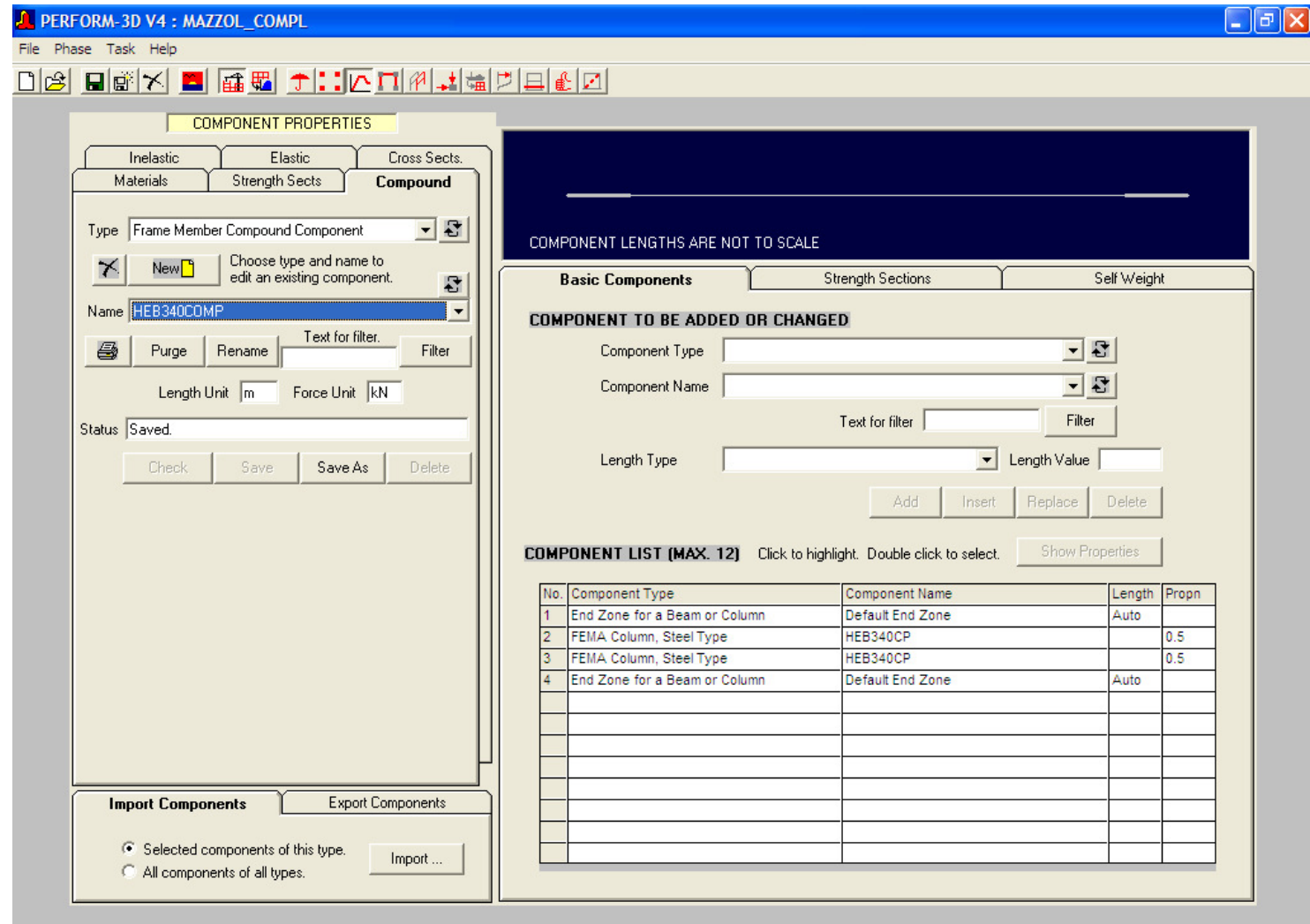
Definizione delle cerniere plastiche: Cerniere a Curvatura.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE



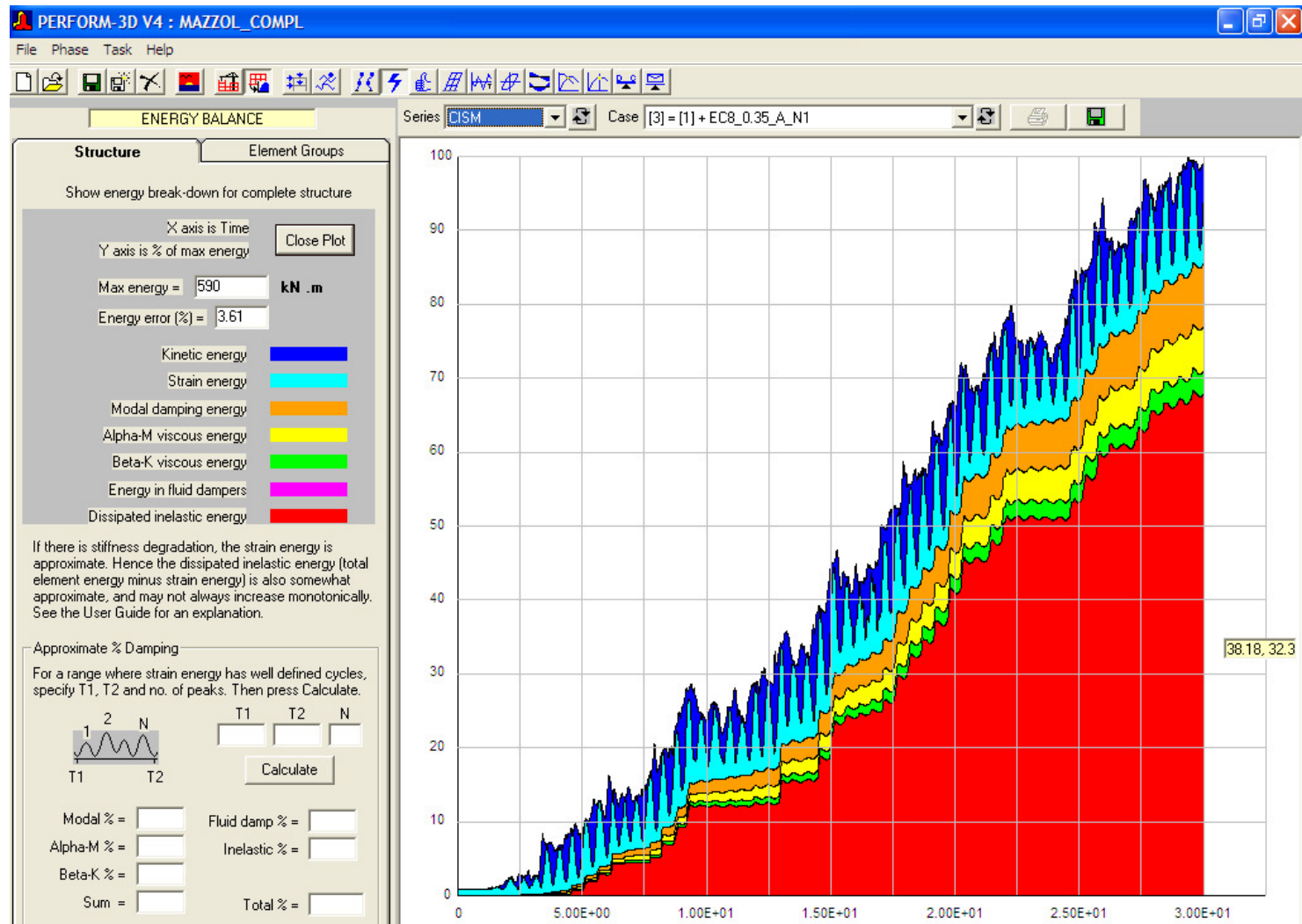
Definizione del compound: elemento di tipo FEMA.

INTRODUZIONE

ESEMPIO

PUSHOVER

DINAMICA NON LINEARE



Bilancio energetico.



**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

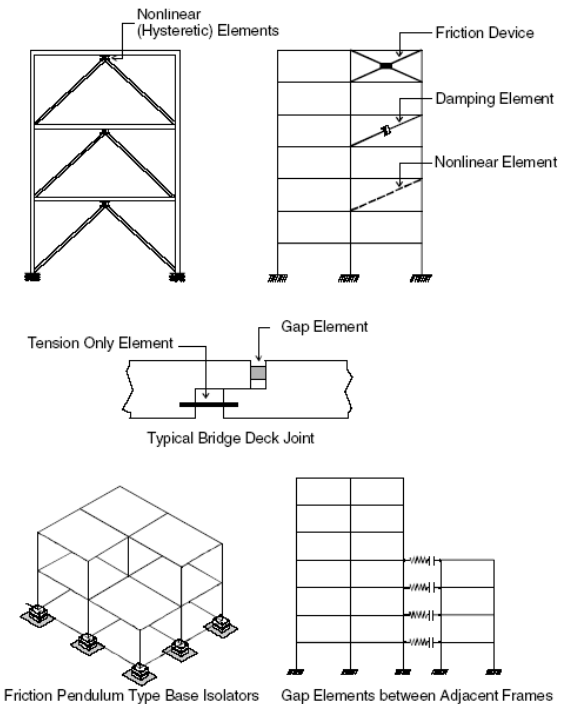
INTRODUZIONE

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

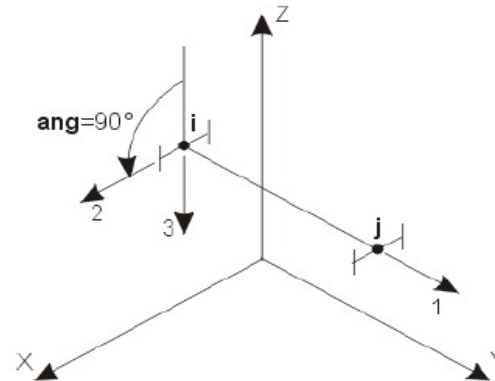
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

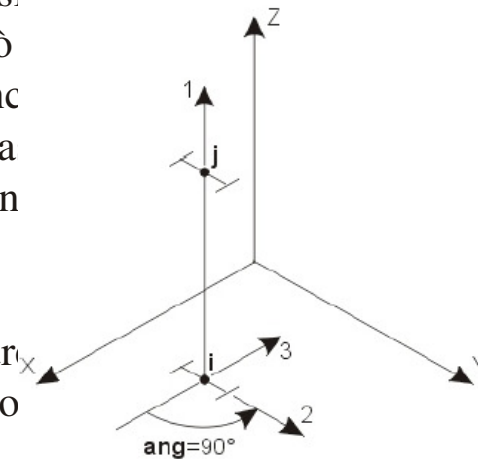
LINK - PROPRIETA' GENERALI:

L'e
all'
elas
seri
seri
(ele
Isol



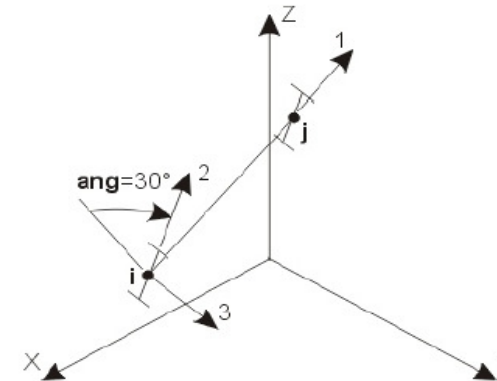
L'asse locale 1 è parallelo all'asse +Y
L'asse locale 2 è ruotato di 90° dal piano Z-1

- E' ...
- Può coinc
- E' a
- Ogn



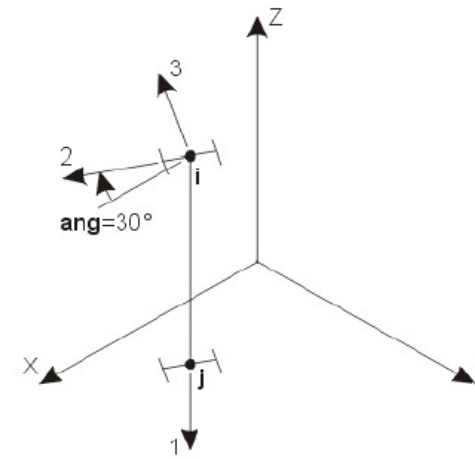
L'asse locale 1 è parallelo all'asse +Z
L'asse locale 2 è ruotato di 90° dal piano X-1

- Altr
- Uno



L'asse locale 1 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
n in
astic
ber



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

(anche
?).

effettivo
vertito nel
odal
rzamento
iene

Sommato ai valori di smorzamento modale assegnati.

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

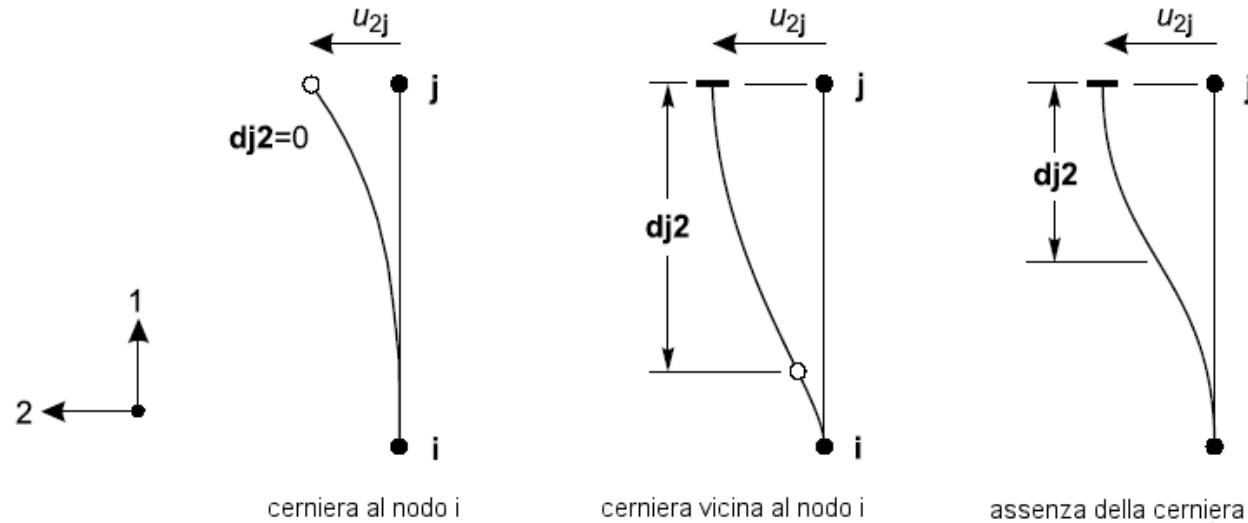
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

NLLINK - PROPRIETA' GENERALI:

Schematizzazione di un NLLINK lineare:



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

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:

Direction:

Type:

NonLinear:

Properties Used For Linear Analysis Cases

Effective Stiffness:

Effective Damping:

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:

Direction:

Type:

NonLinear:

Properties Used For Linear Analysis Cases

Effective Stiffness:

Effective Damping:

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

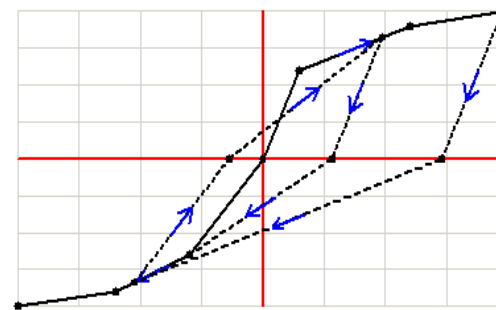
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

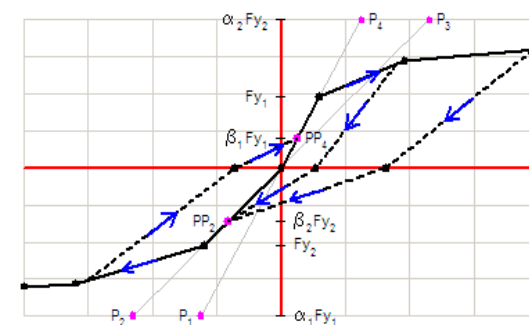
ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

MULTILINEAR PLASTIC:

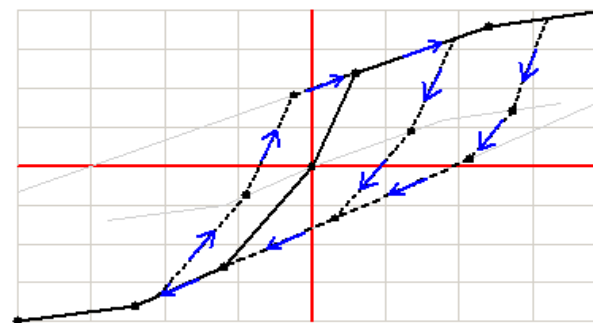
La relazione Forza-Deformazione è data da una curva **n-lineare elastica**. La curva n-lineare rappresenta rigidità costanti a tratti. La curva in fase di **scarico** deriva da quelle di carico secondo tre diversi modelli isteretici: **Takeda, Pivot** o ad **incrudimento cinematico**.



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

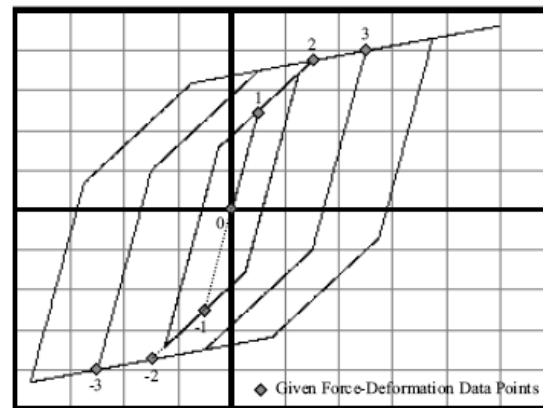
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

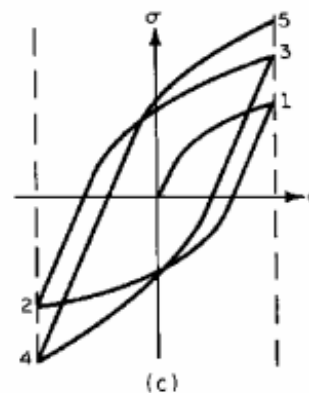
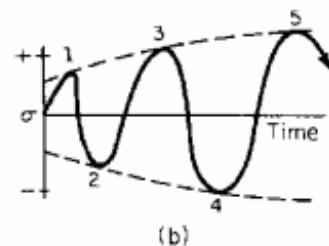
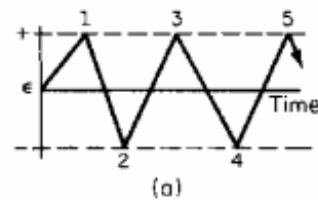
ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

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**

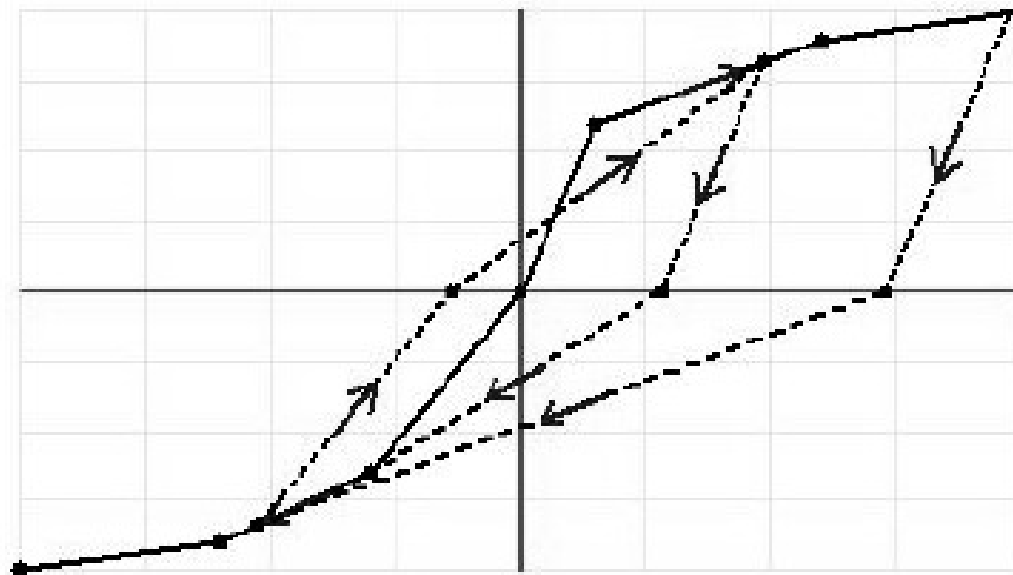
**DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO**

**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 rigidità secante.

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

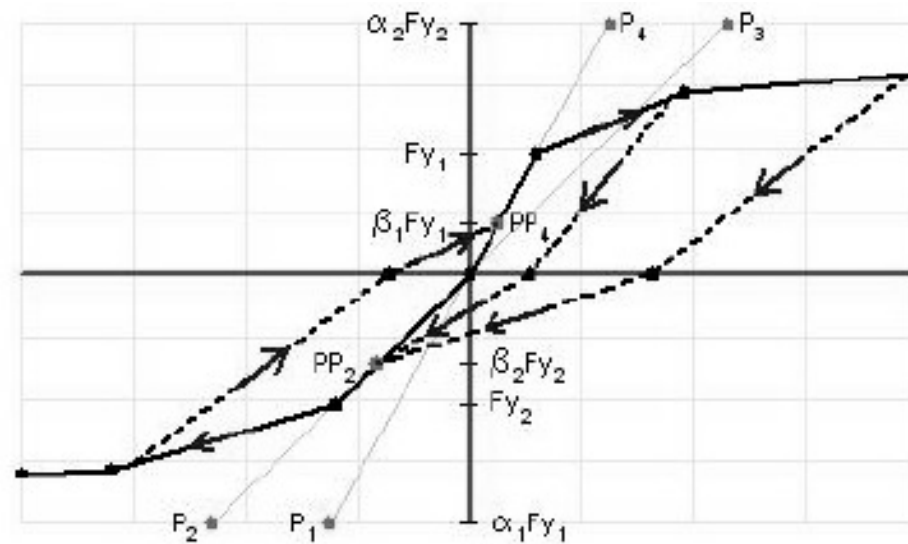
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

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

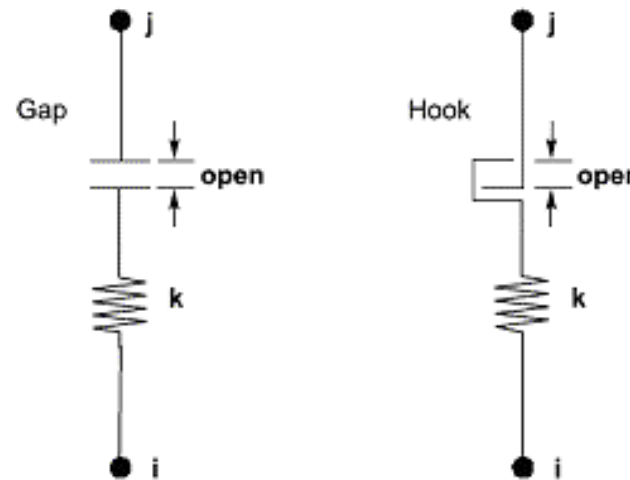
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

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

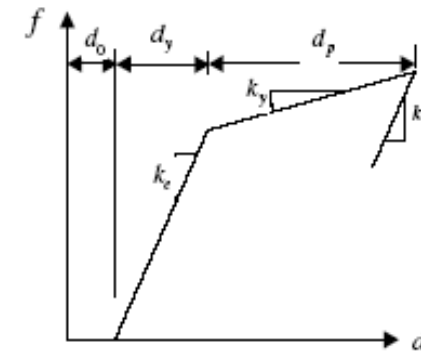
ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

GAP/HOOK:

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

1. Update Crush Deformation from Previously Converged Time Step:
 $y = d_{t-\Delta t} + d_0 + d_y$
 if $y > d_c$ then $d_c = y$
2. Calculate Elastic Deformation:
 $e_t^{(i)} = d_t^{(i)} + d_0 - d_c$
 if $e_t^{(i)} < -d_y$ then $e_t^{(i)} = -d_y$
3. Calculate Iterative Force:
 $f_t^{(i)} = k_y(d_t^{(i)} + d_0) + (k_e - k_y)e_t^{(i)}$
 if $f_t^{(i)} > 0$ 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."

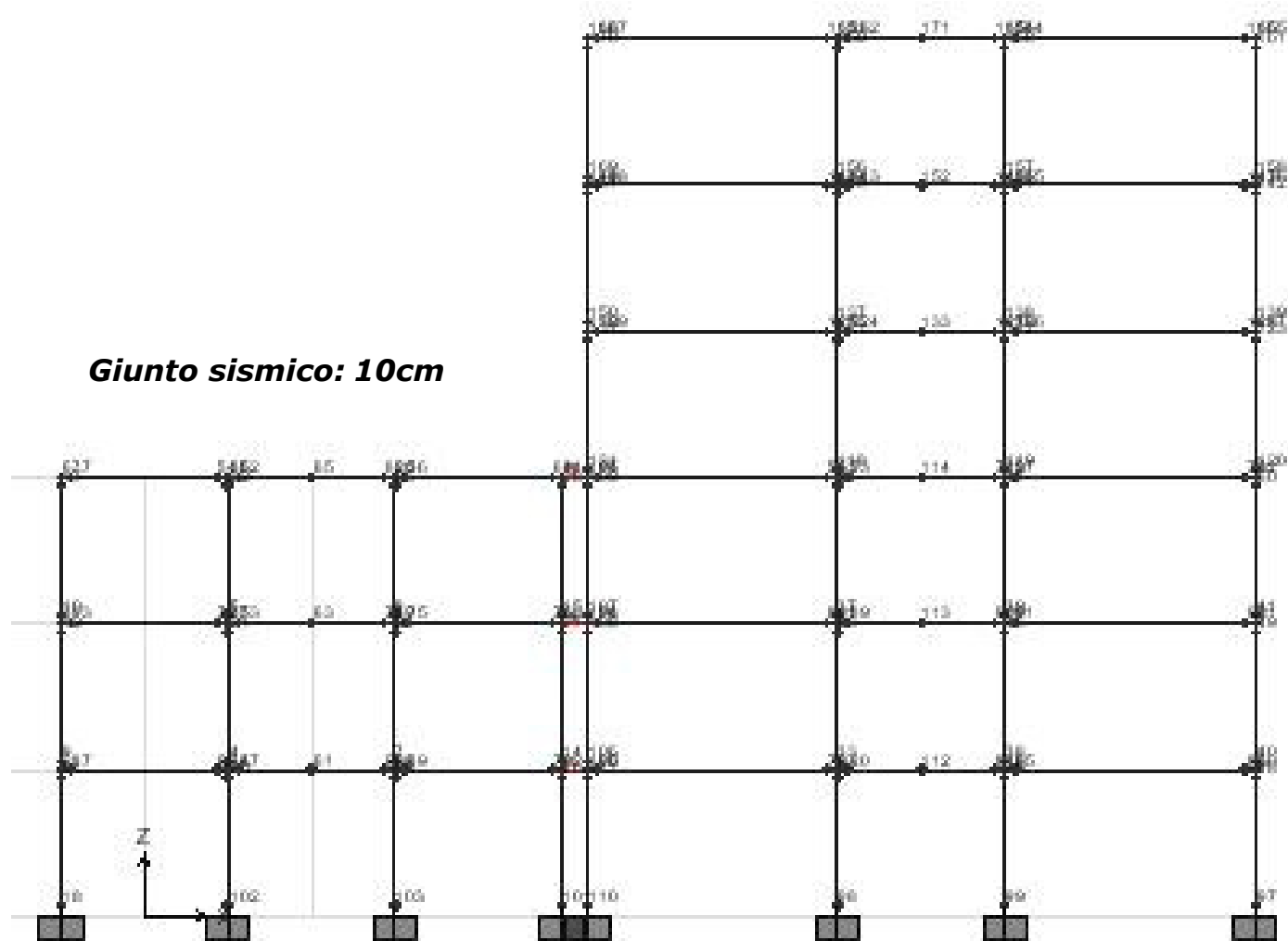
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**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."

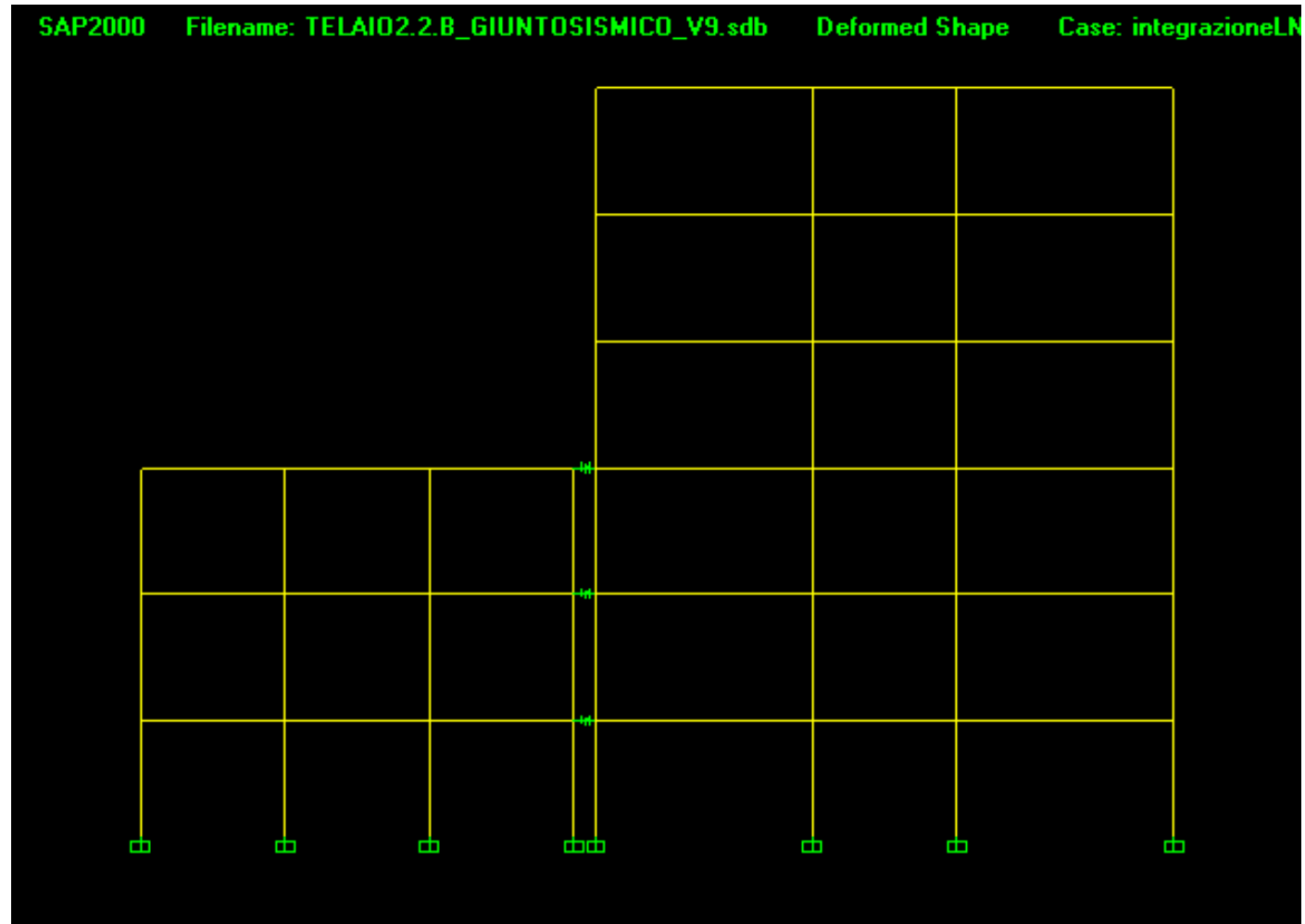
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**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."

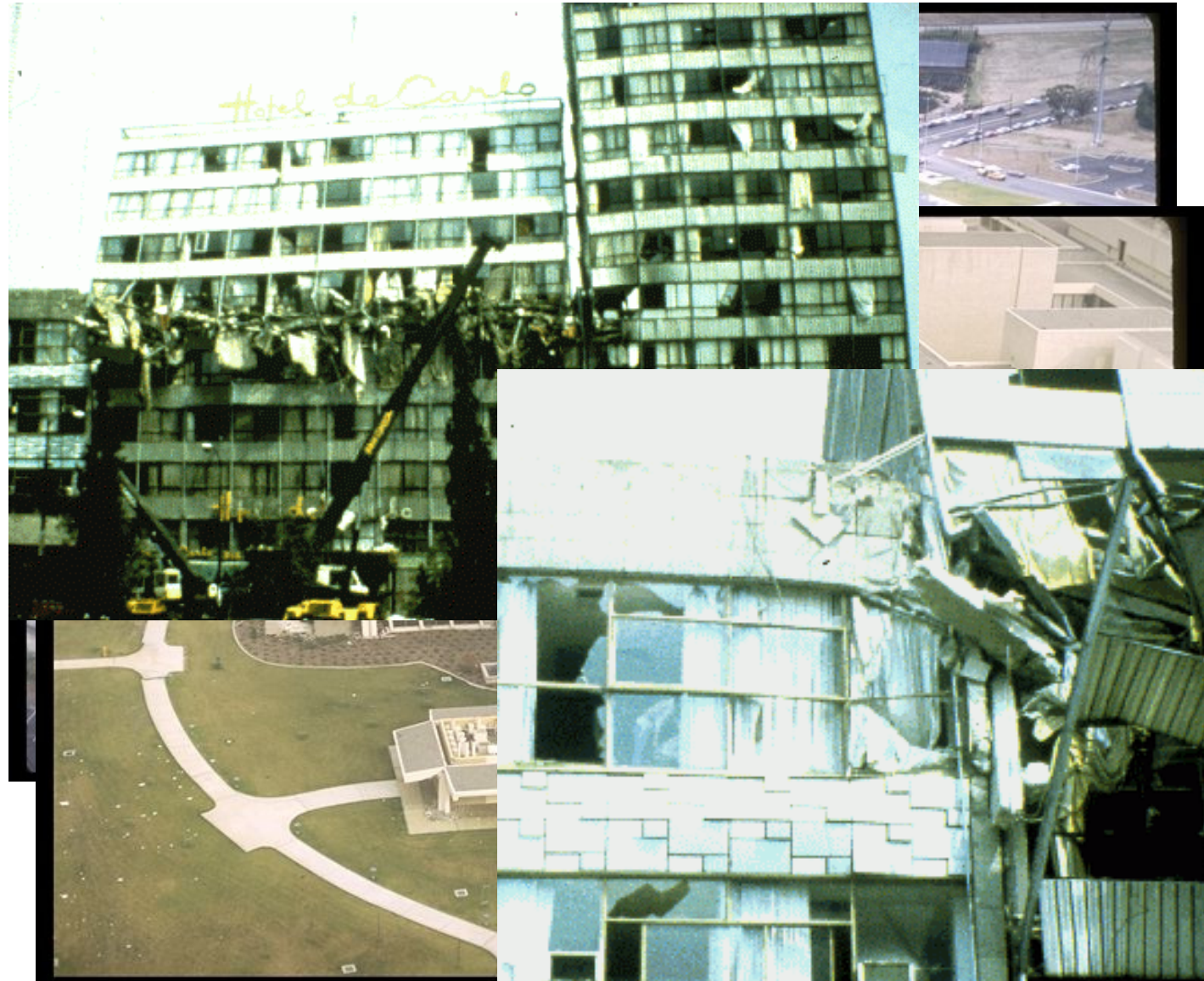
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**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."

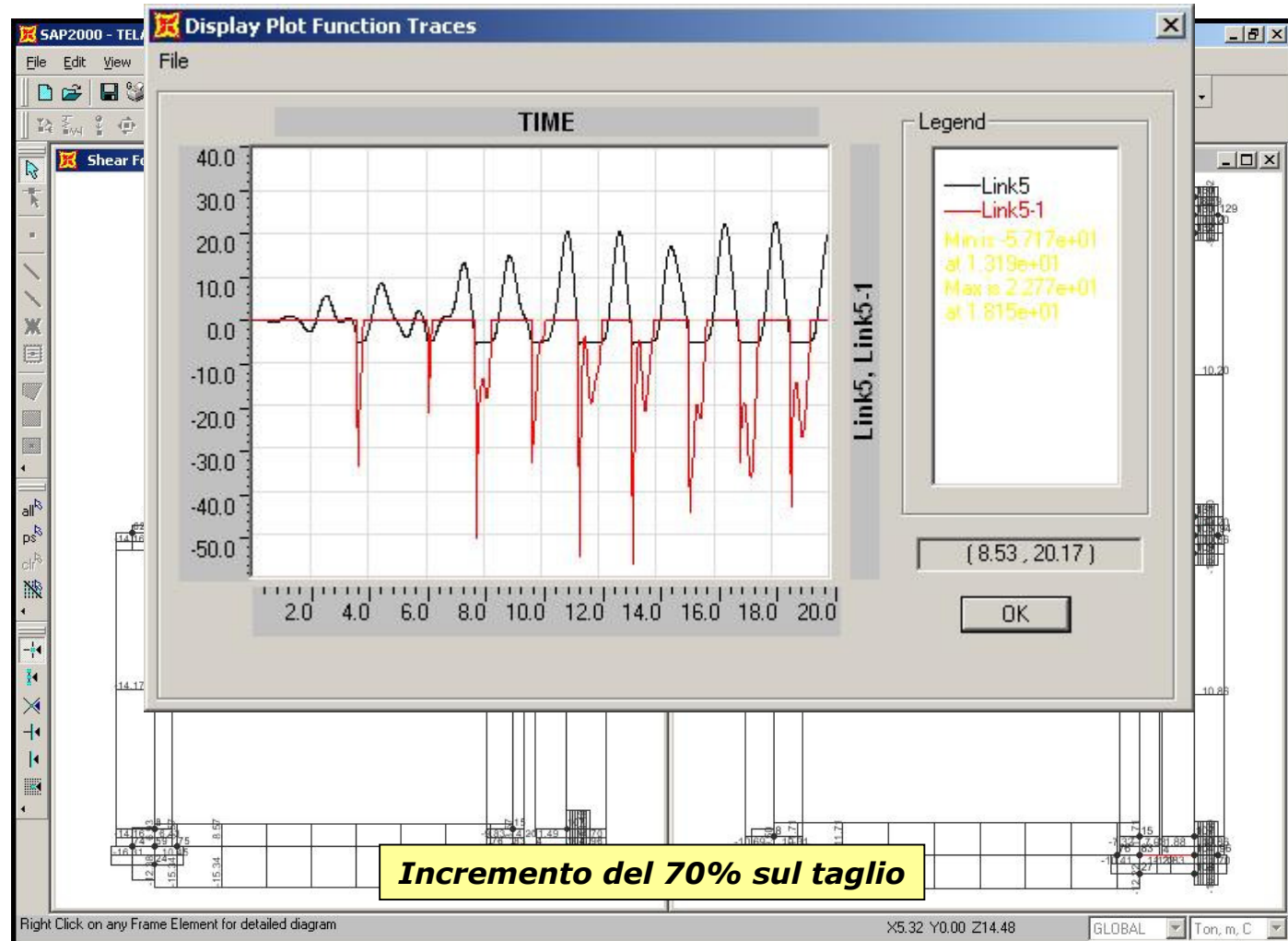
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

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

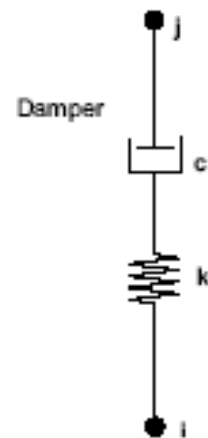
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

DAMPER

modello viscoelastico di Maxwell (Malvern, 1969)



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

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 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

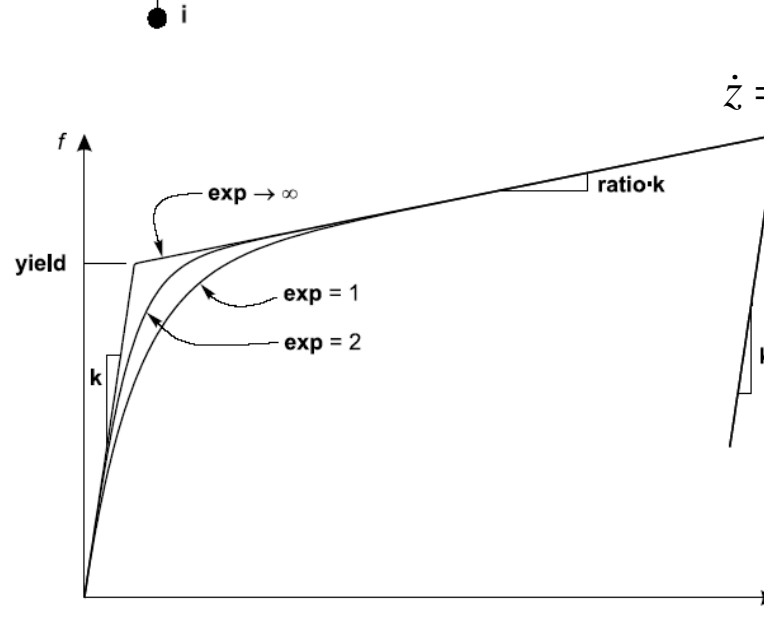
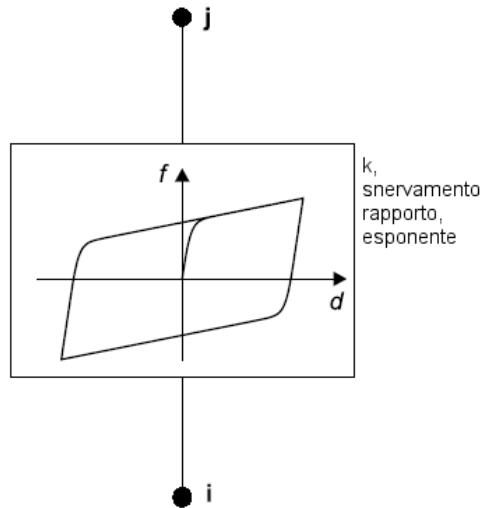
ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

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 $|z| = 1$.



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

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

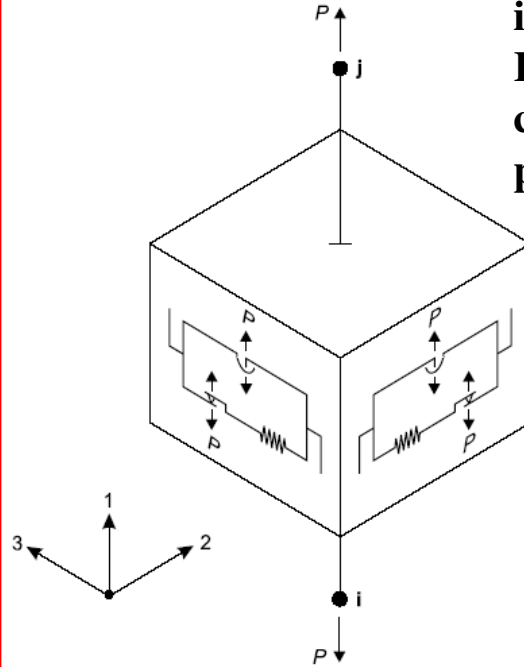
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

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.

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

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

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

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

Alta velocità Distacco (v=0)

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:

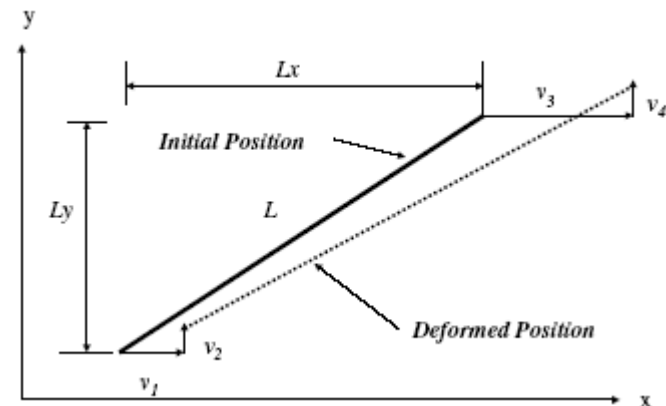
$$\dot{d}(t) = b\dot{u}(t) \quad (11)$$

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:

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

Le deformate dell'elemento espresse nelle coordinate modali:

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

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

E' interessante notare che B, matrice di dimensione LxN (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 $f(t)$ dalle quali:

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

$$F(t)_e = \Phi^T K_e u(t) = \Phi^T b^T k_e b u(t) = B^T k_e d(t) \quad (20)$$

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_g 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 $\bar{F}(t)^i = F(t) - \mathbf{B}^T[f(t)^i - k_c d(t)^i]$

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:

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

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:

$$M\ddot{u}_t + C\dot{u}_t + Ku_t = F_t \quad (28)$$

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

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

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):

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

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

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 $\mathbf{u}_0, \dot{\mathbf{u}}_0, \ddot{\mathbf{u}}_0$

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

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

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.

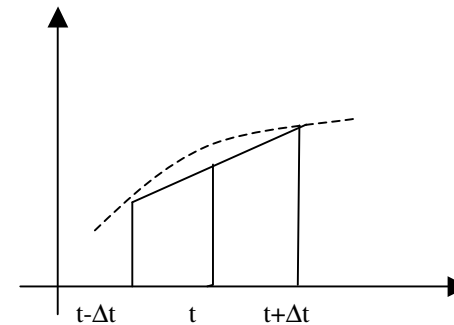
Altri metodi sono:

• **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.

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

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

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

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

γ	β	δ	Δt/T _{min}	condizione
1/2	0	0	0.3183	eccellente per piccoli Δt instabile per grandi Dt
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	Δt/π	inf.	dissipazione di energia per grandi Δt
Nota: C = δK				

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

Sorace, S., Terenzi, G., Bandini, L., "Le potenzialità della FNA nella analisi dinamica non lineare di strutture dotate di strumenti avanzati di protezione sismica."

MAX SPOSTAMENTO PUNTO DI CONTROLLO:

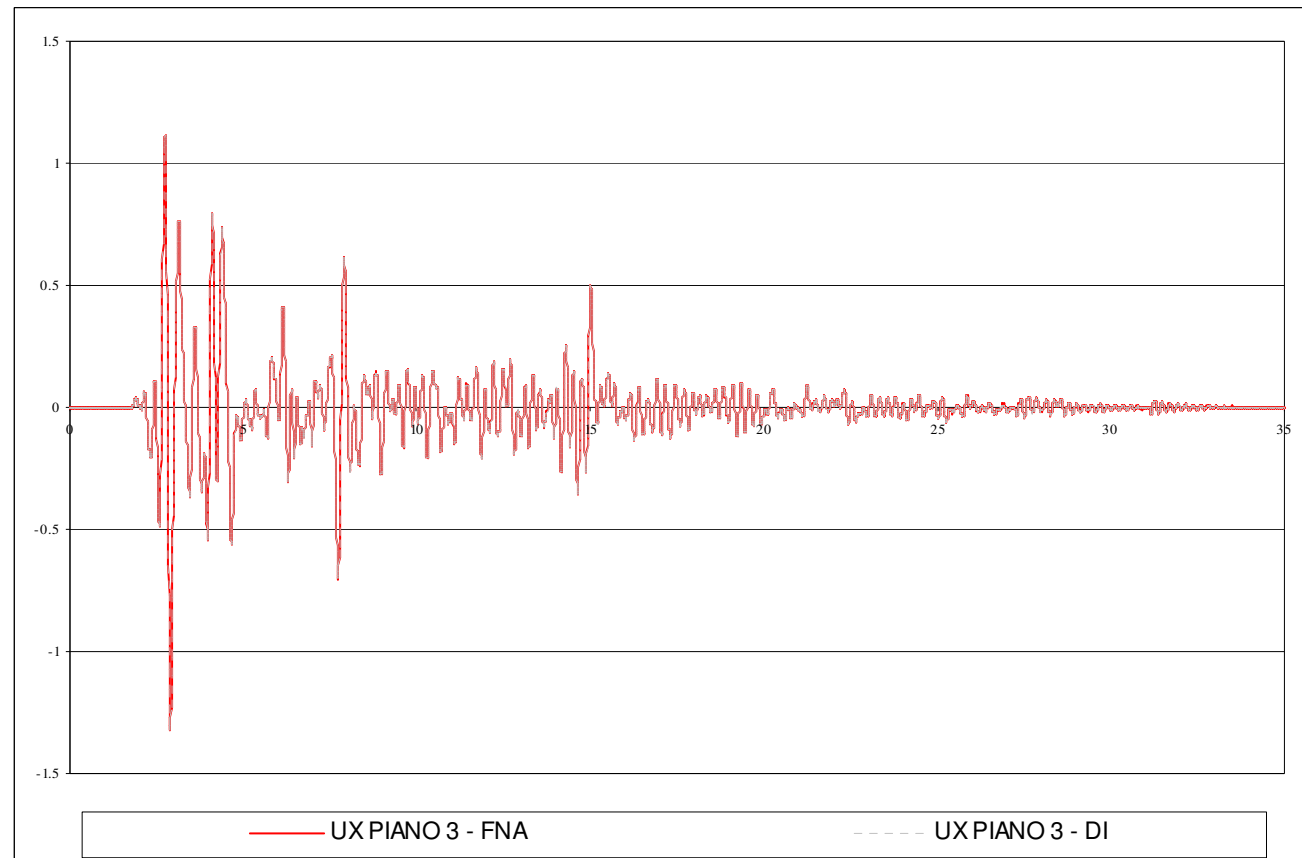
-FNA 1.112 cm

-DI 1.111 cm

Durata analisi:

DI: 16 min

FNA: 26 s



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

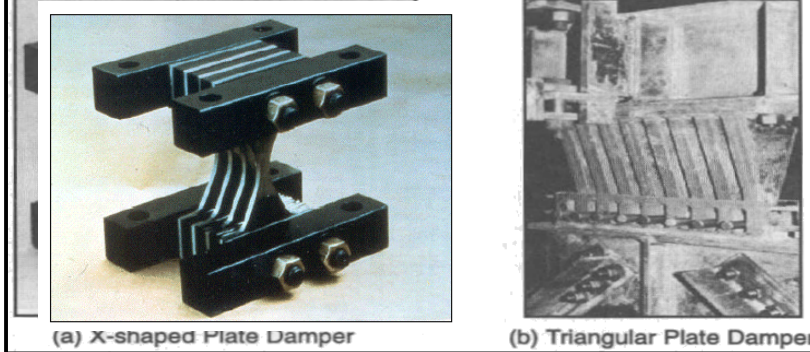
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

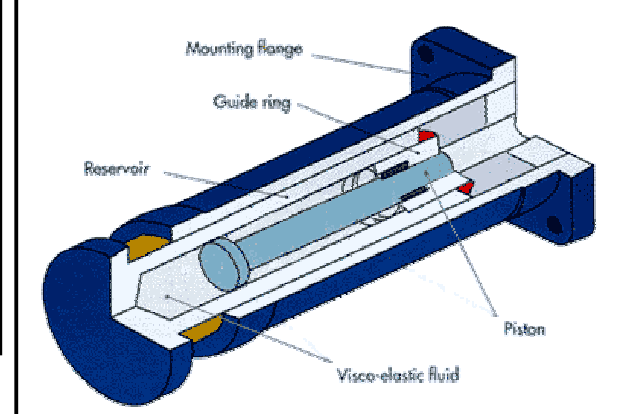
ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

DISPOSITIVI DI DISSIPAZIONE

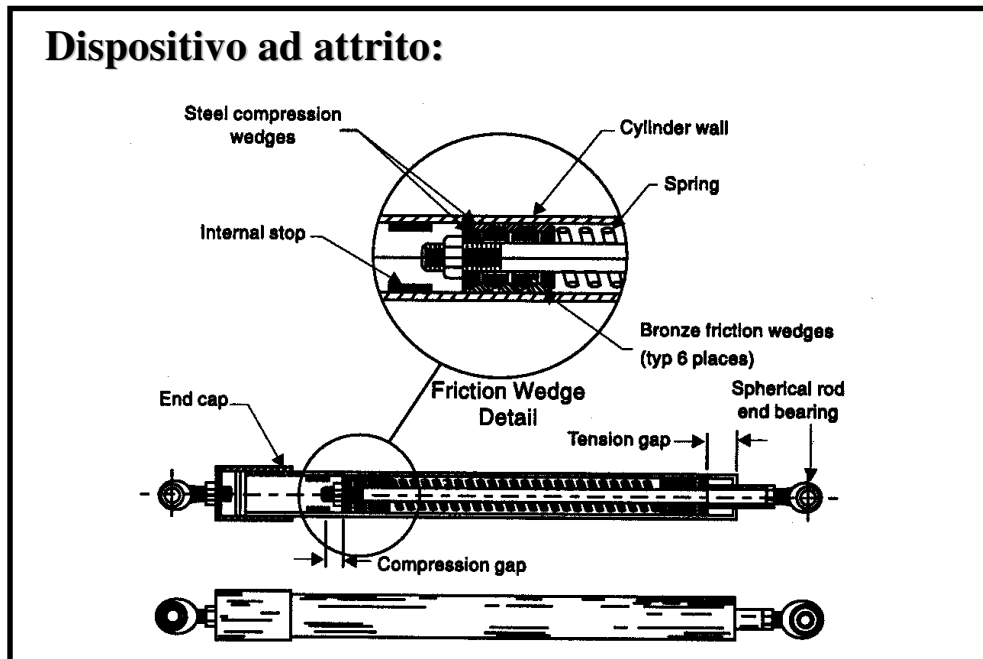
Dispositivo ADAS:



Dispositivo SFV:



Dispositivo ad attrito:



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

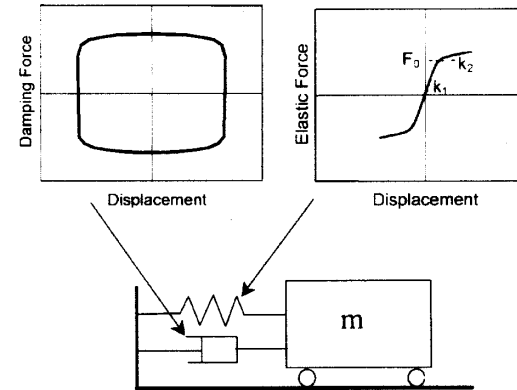
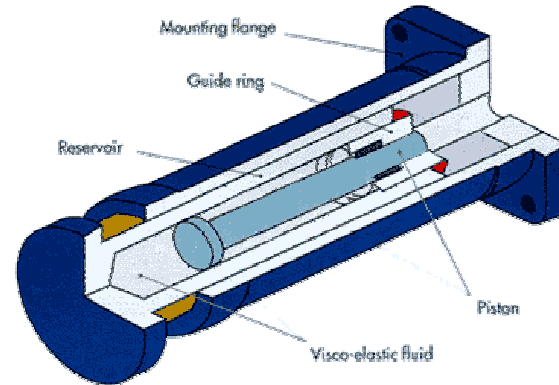
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

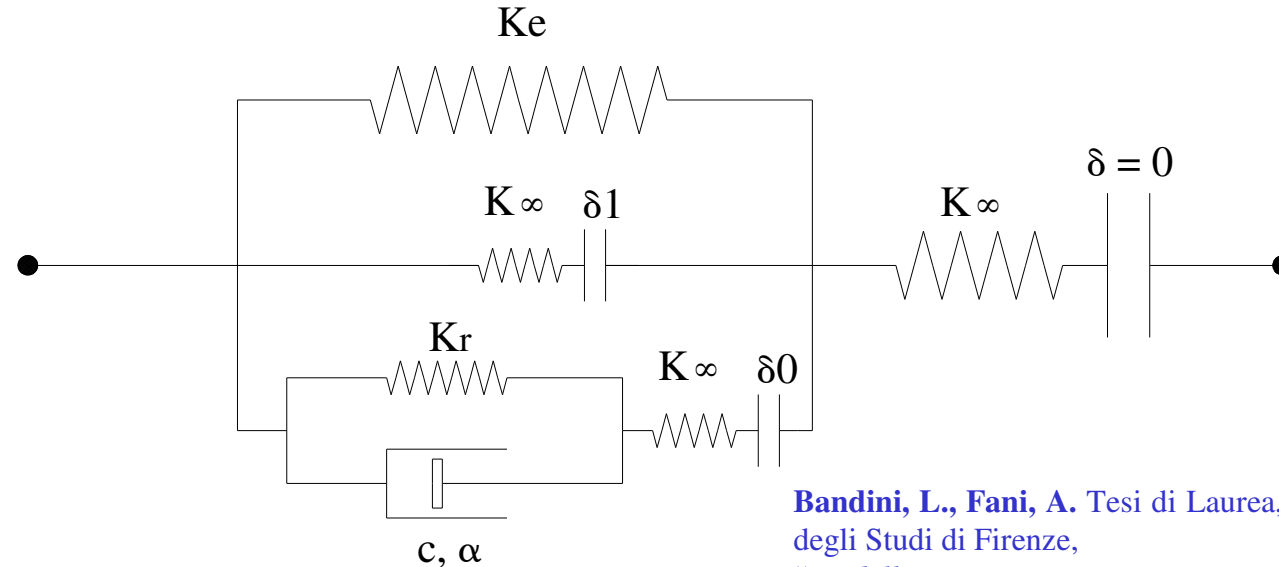
ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

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 dissipativi di strutture in acciaio".

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

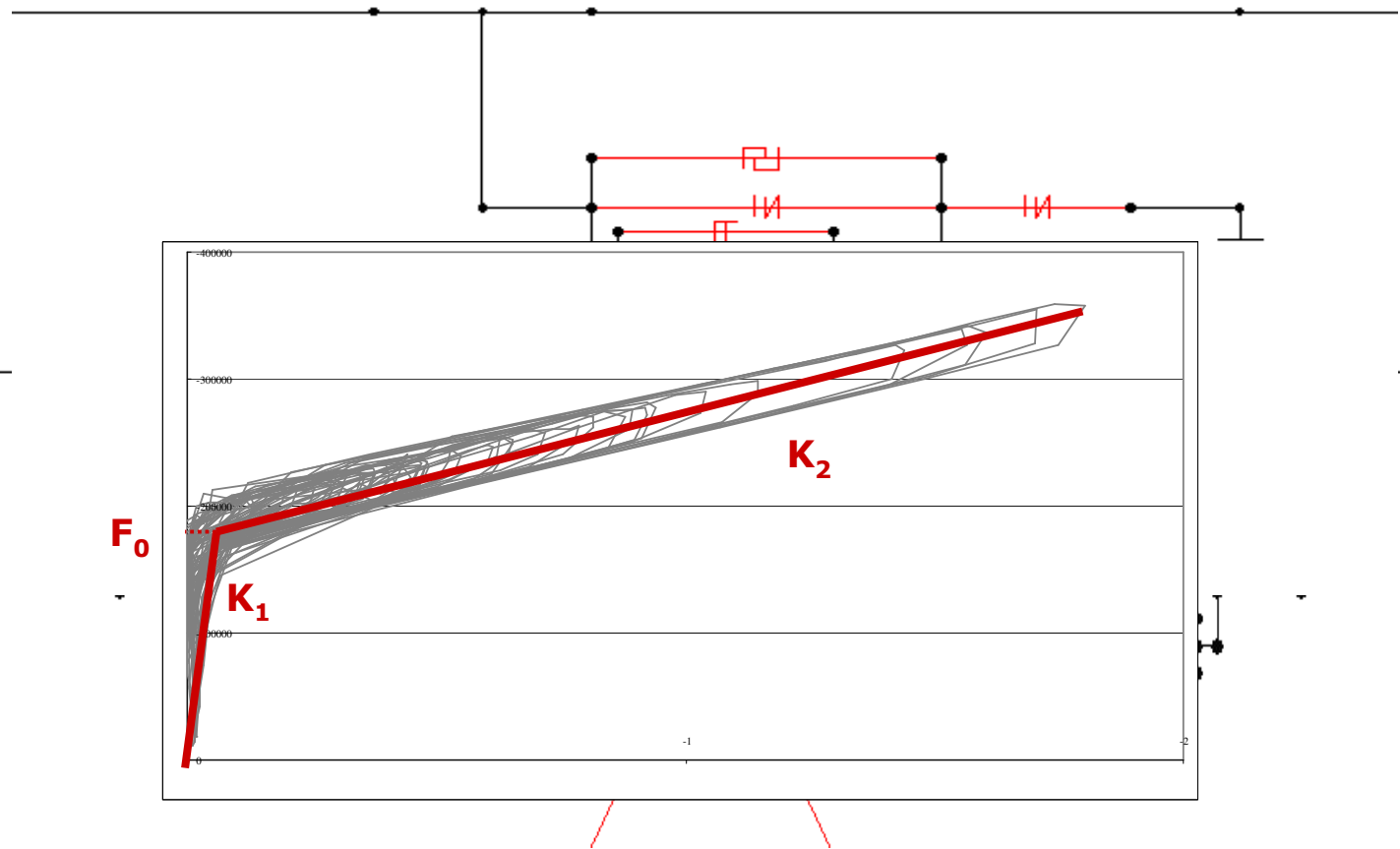
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

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."

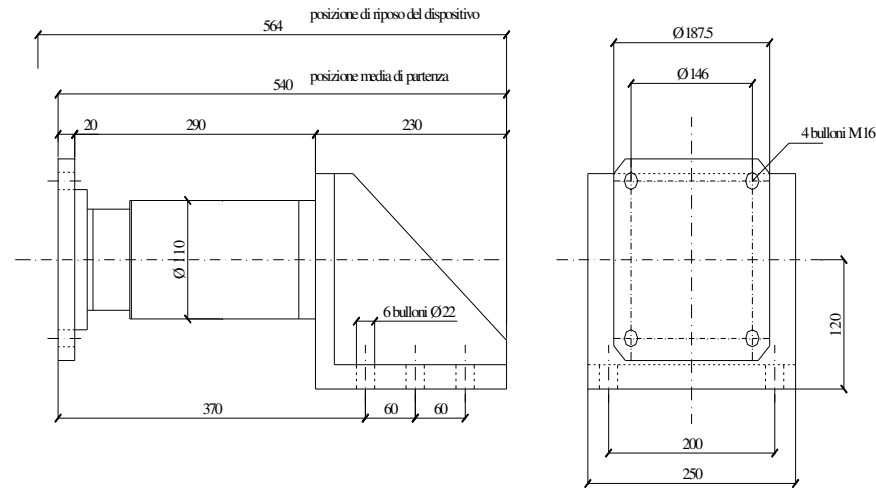
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO SILICONICO-FLUIDOVISCOSO

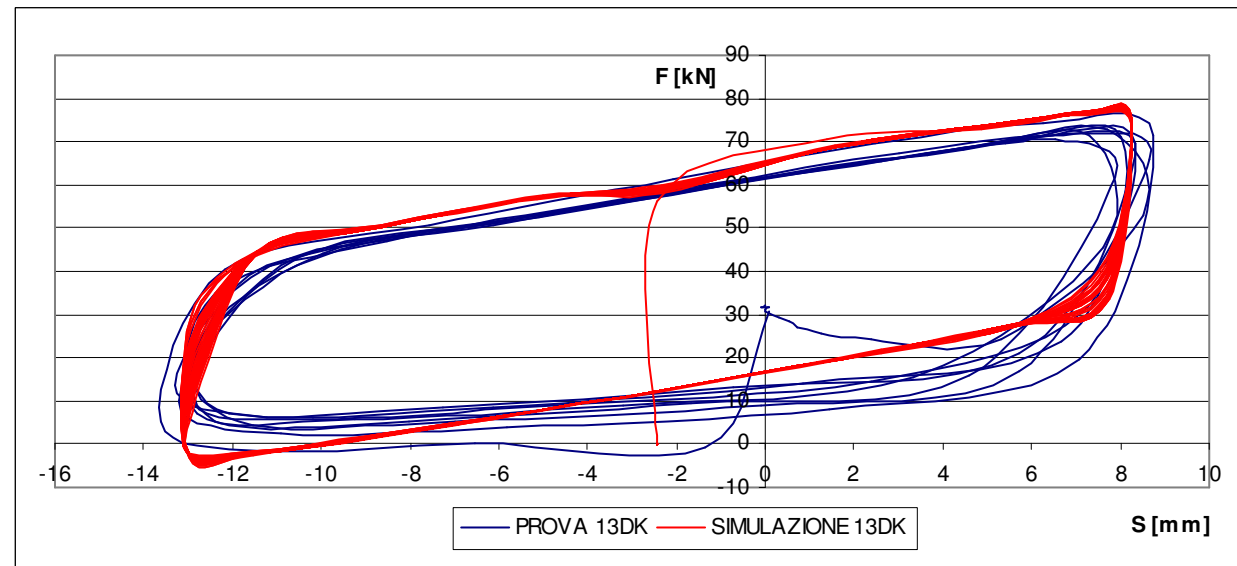


attuatore di tipo MTS 204.63 S/N 751 con caratteristiche di forza massima pari a 100 kN e di corsa pari a ± 120 mm

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."

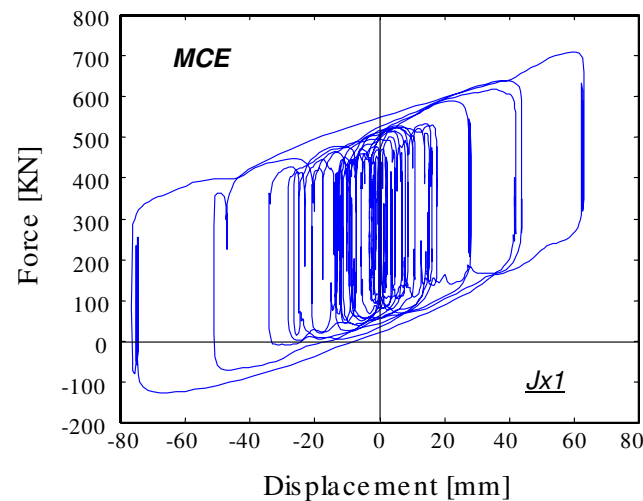
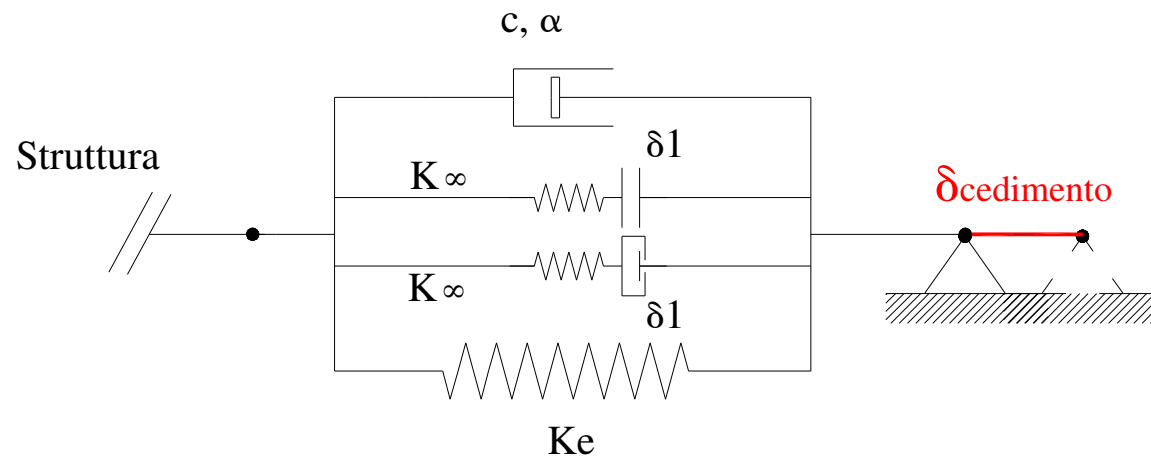
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

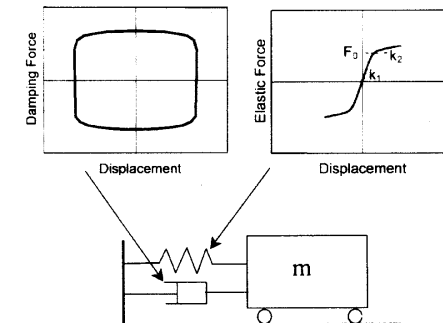
ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

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."

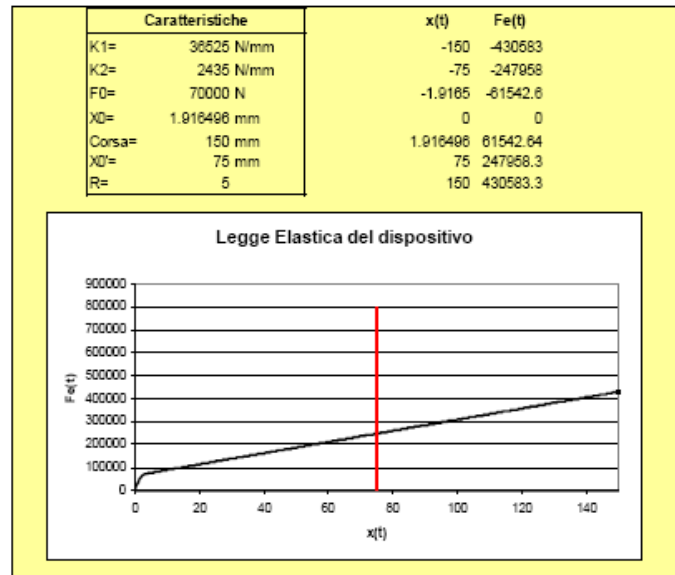
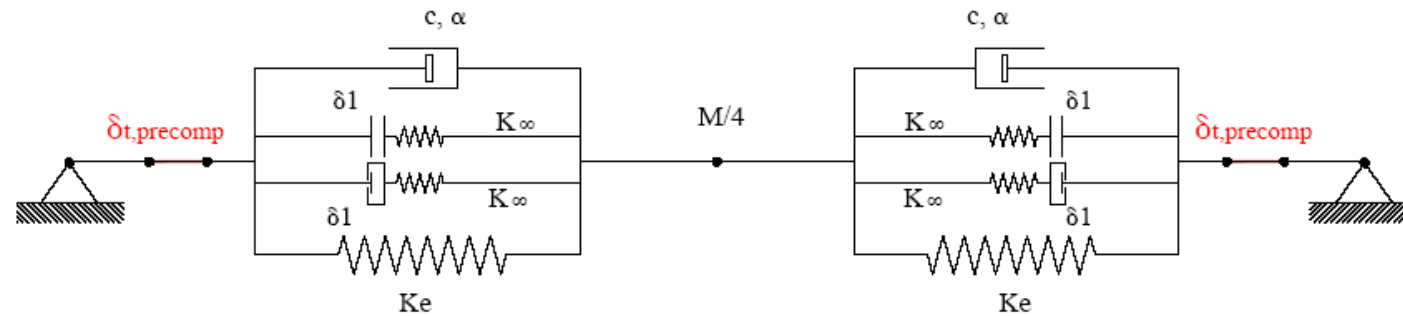
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

**ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO SILICONICO-FLUIDOVISCOSO
NUOVO SCHEMA**



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."

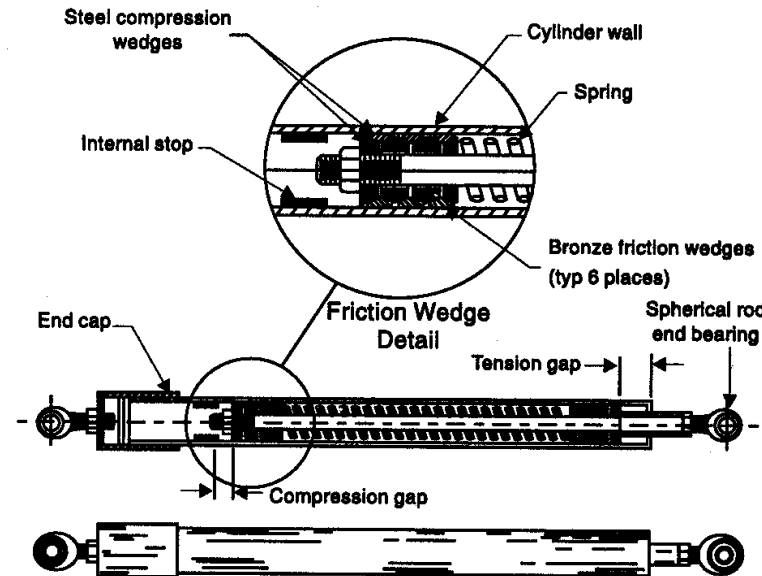
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

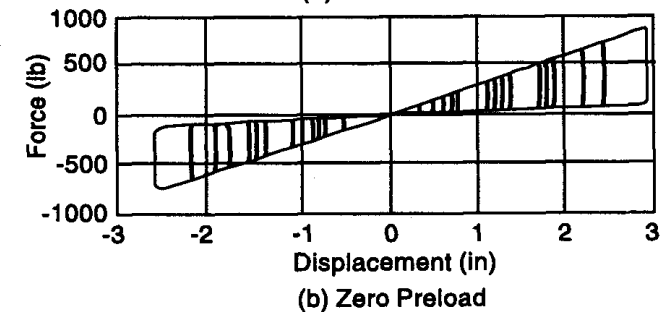
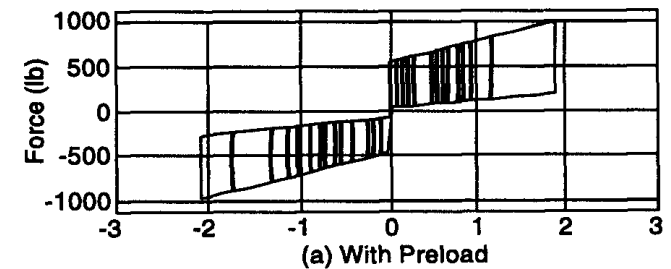
ASSEMBLAGGI DI NLLINK - DISPOSITIVO CON MOLLE AD ATTRITO PRECARICATE



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."

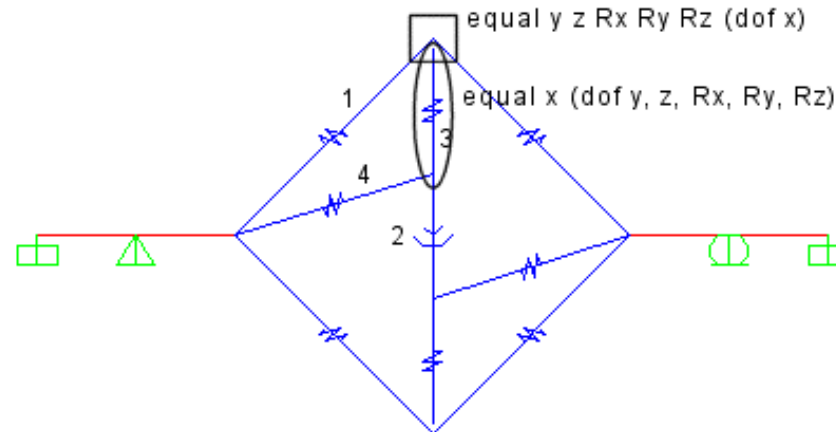
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

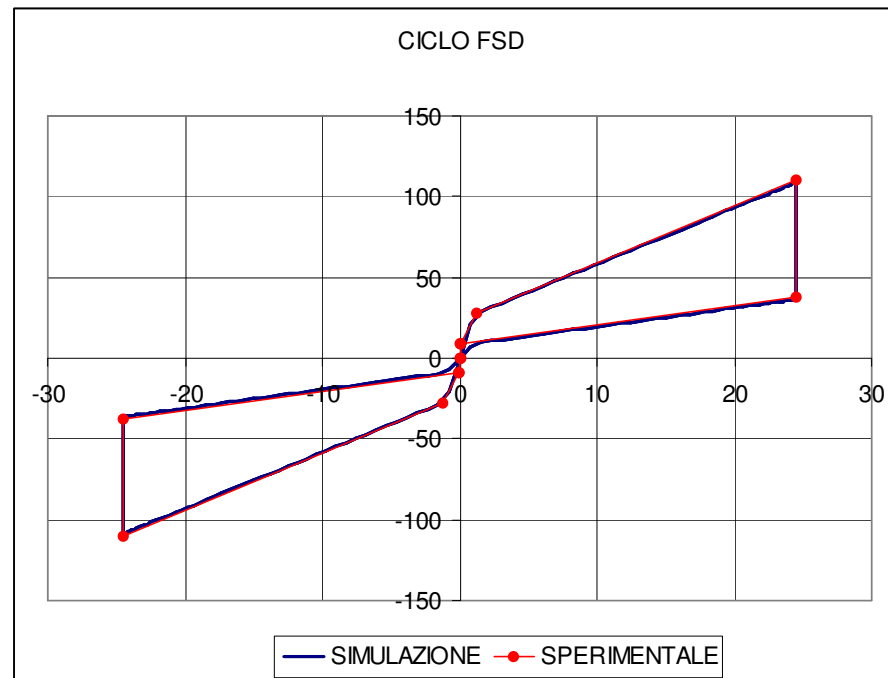
ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

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."

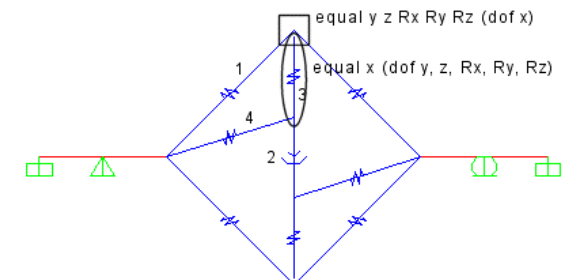
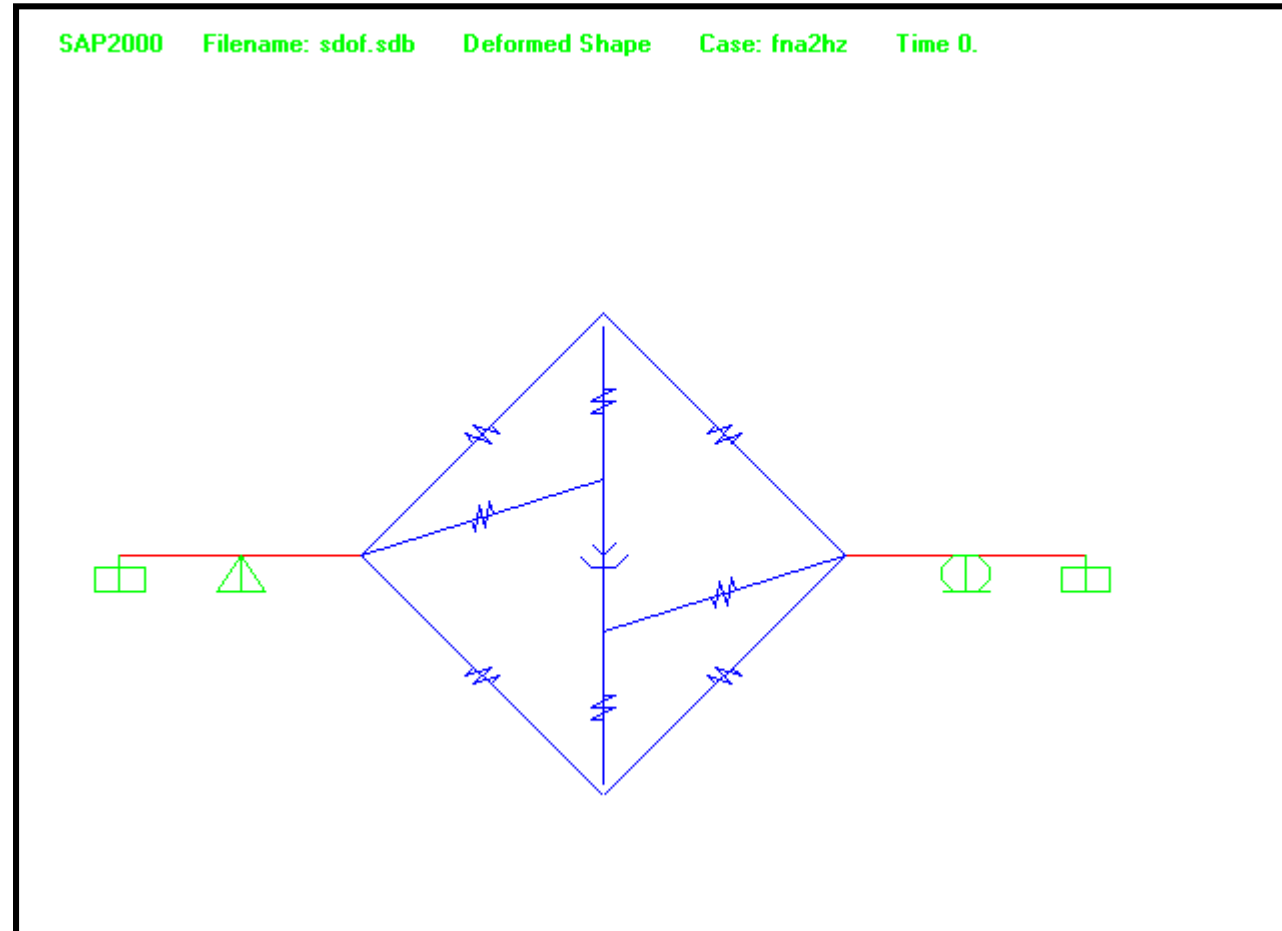
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**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."

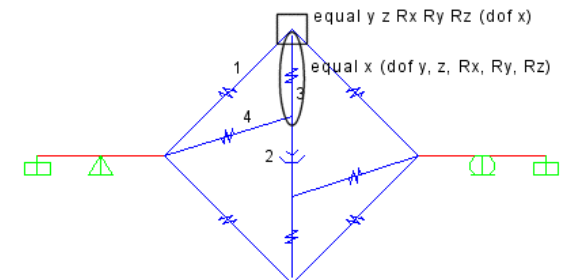
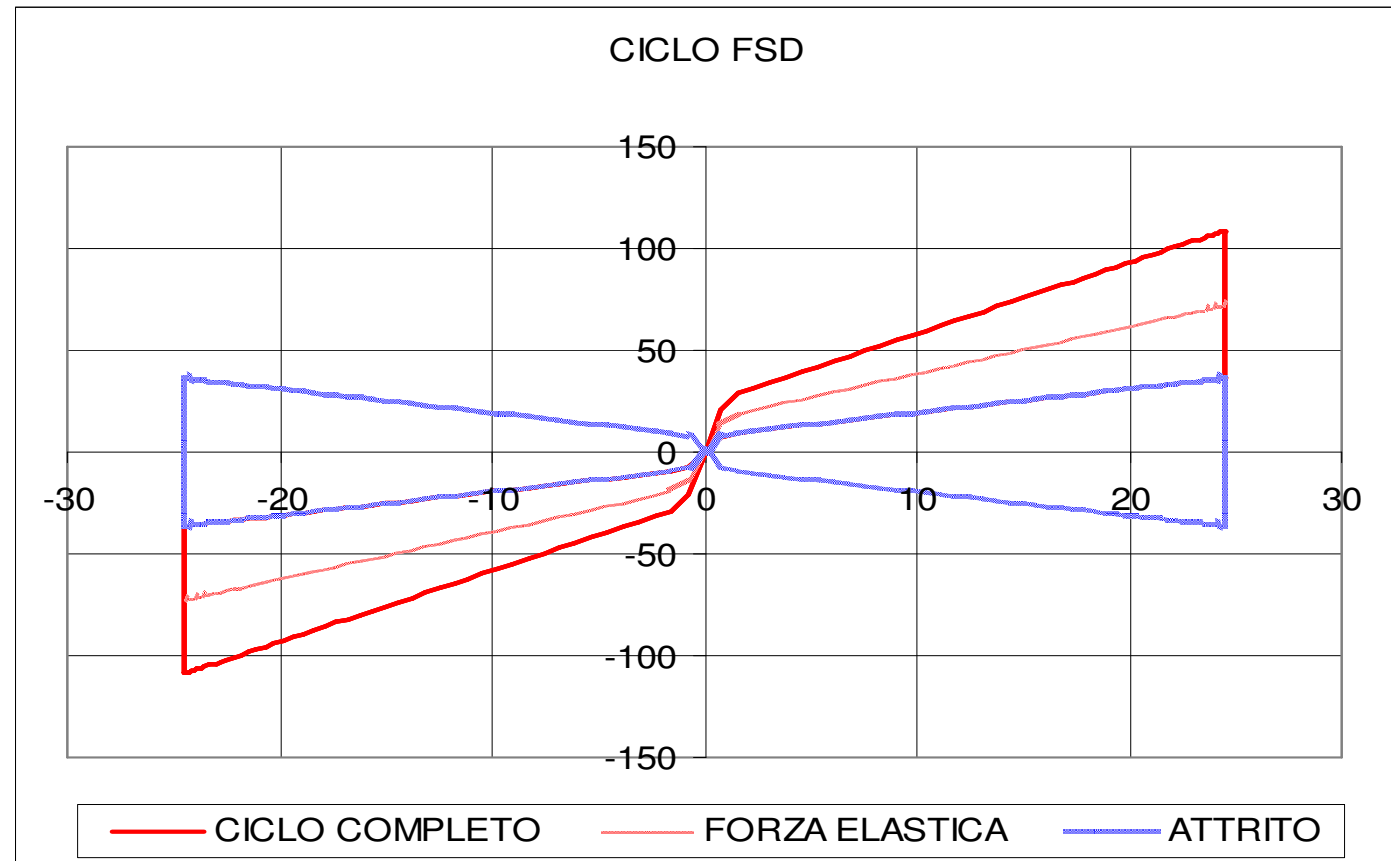
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

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

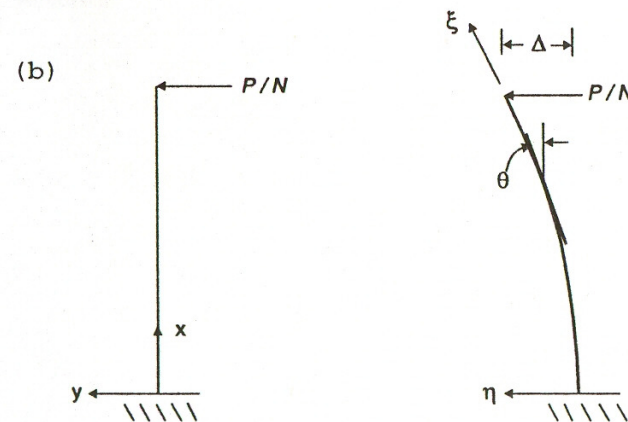
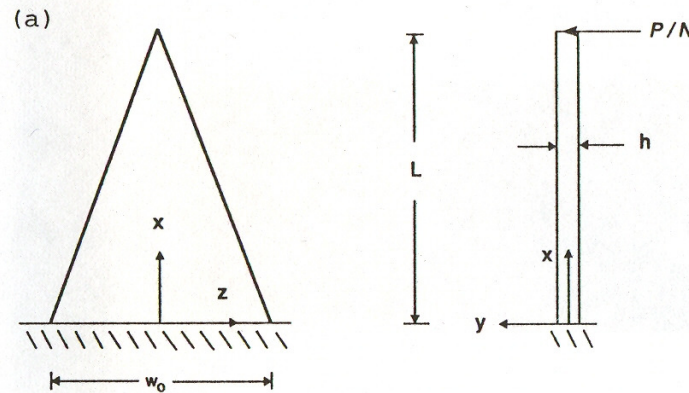
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

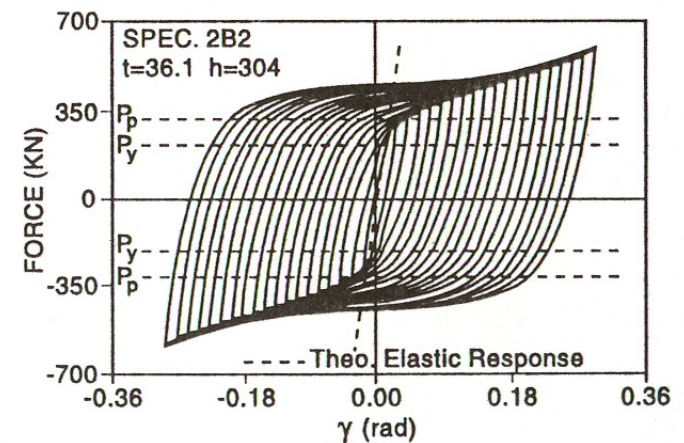
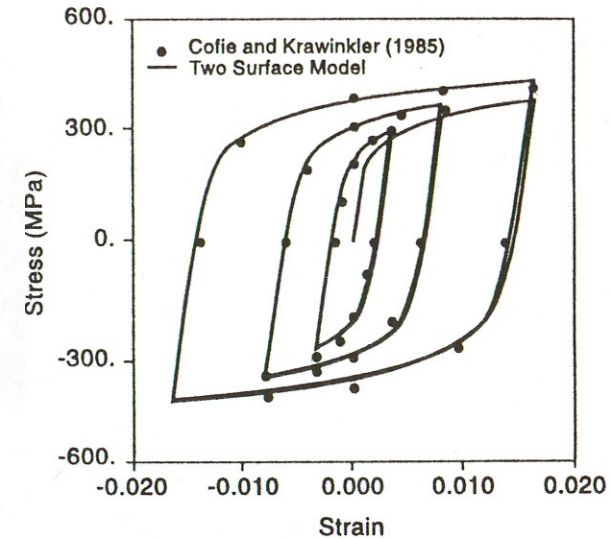
ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

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."

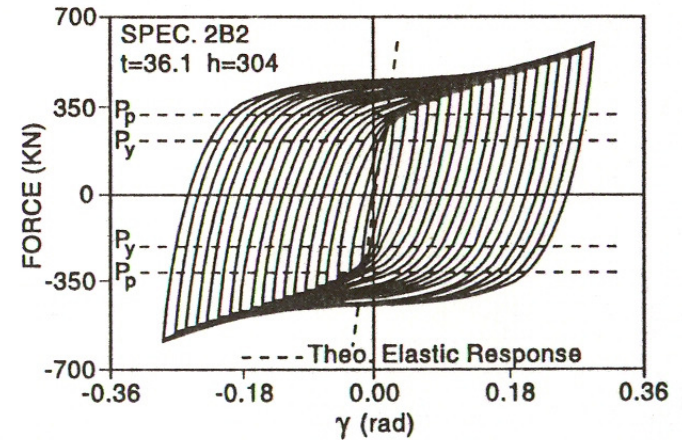
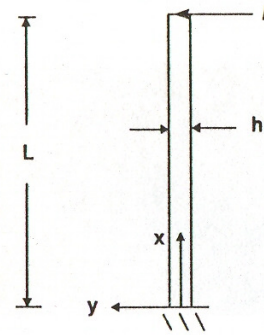
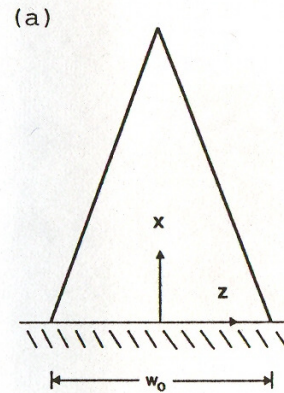
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

ASSEMBLAGGI DI NLLINK – DISPOSITIVO ADAS

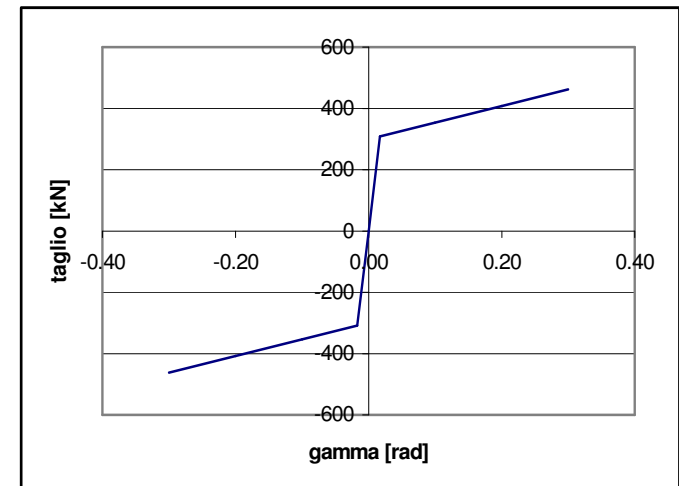


N	8	γ	Δ [mm]	F [kN]
E	200000 N/mm ²	-0.30	-91.20	-462.181
w0	133.3 mm	-0.20	-60.80	-407.8942
L	304 mm	-0.10	-30.40	-353.6073
h	36.1 mm	-0.02	-5.18	-308.5778
σ_y	270 N/mm ²	0.00	0.00	0
k1=P/(D)	59525.05 N/mm	0.02	5.18	308.5778
beta	0.03	0.10	30.40	353.6073
k2	1785.751 N/mm	0.20	60.80	407.8942
Pu	308577.8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

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

$$k_2 = \beta \cdot k_1$$

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



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

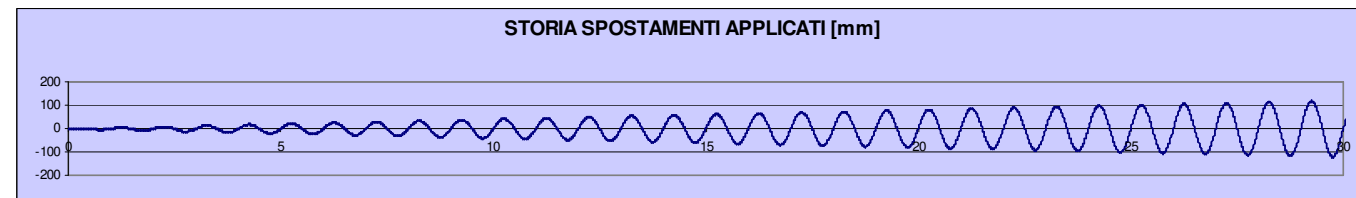
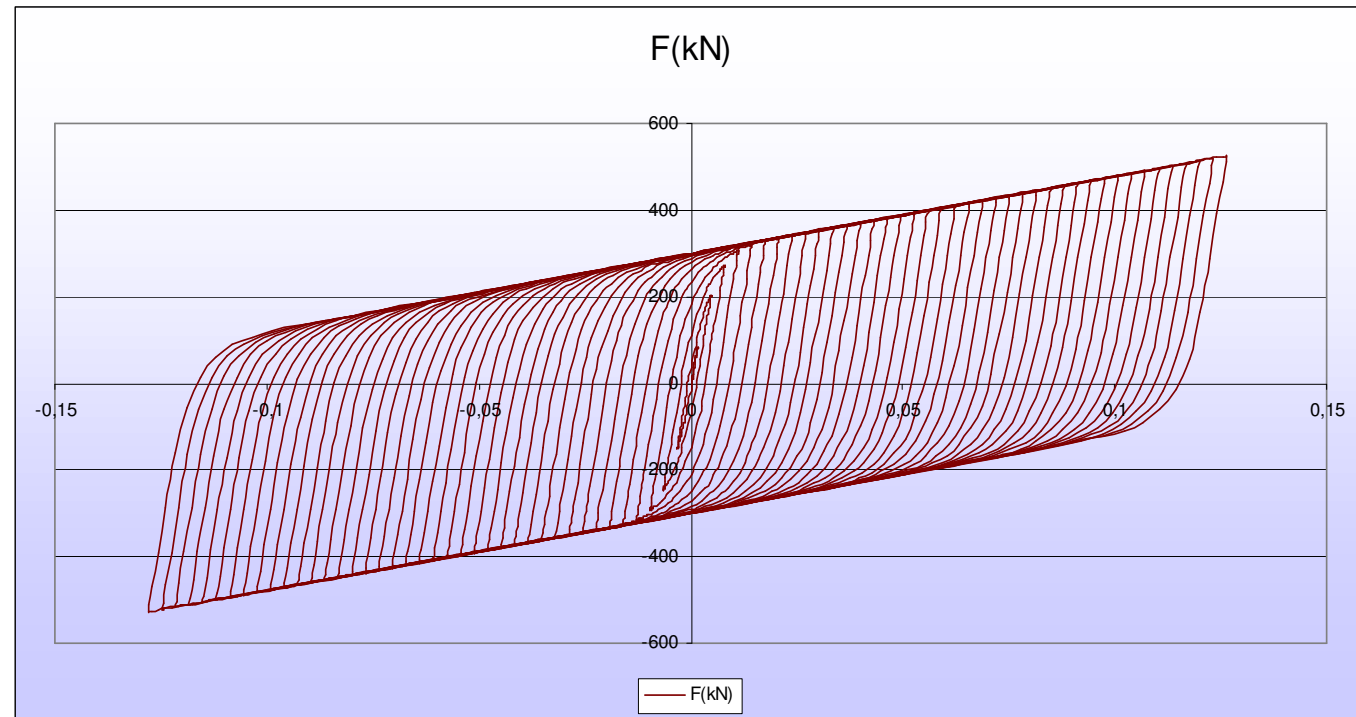
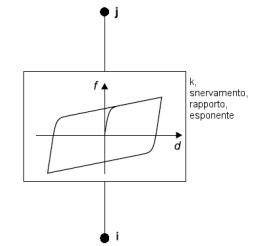
**DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO**

**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."

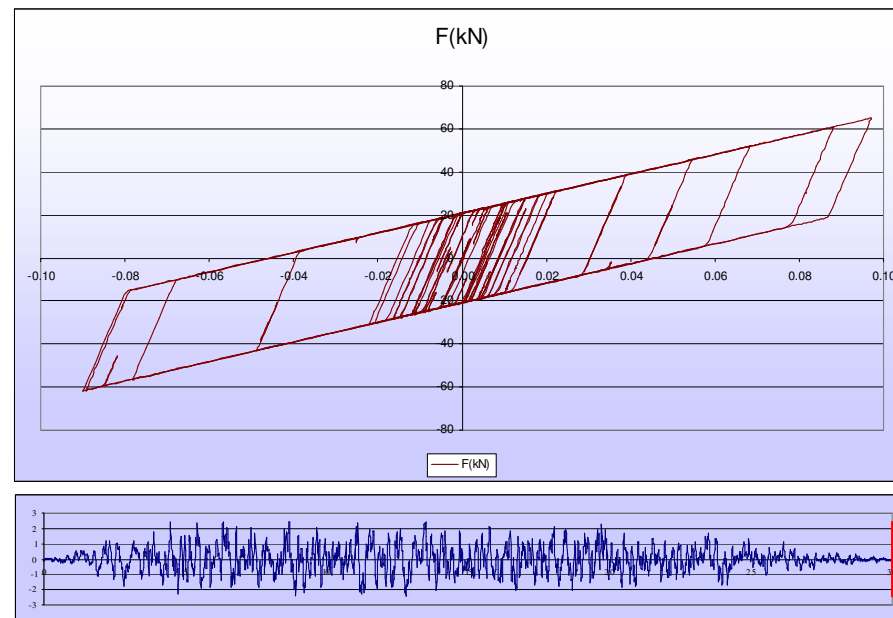
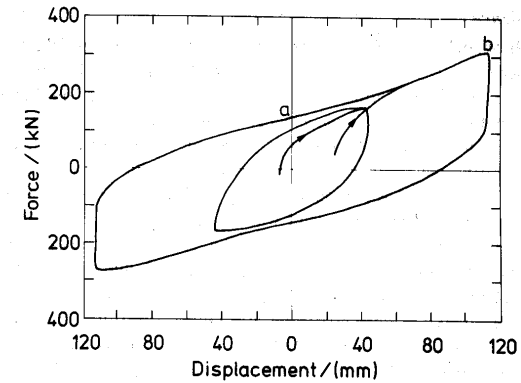
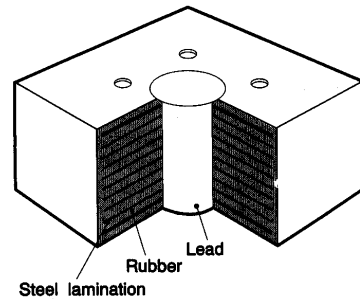
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

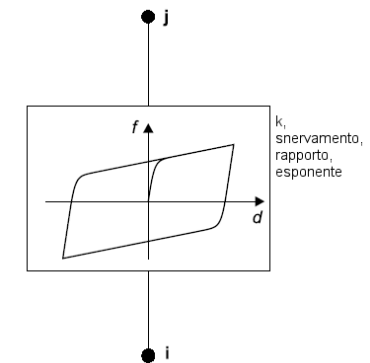
ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

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."

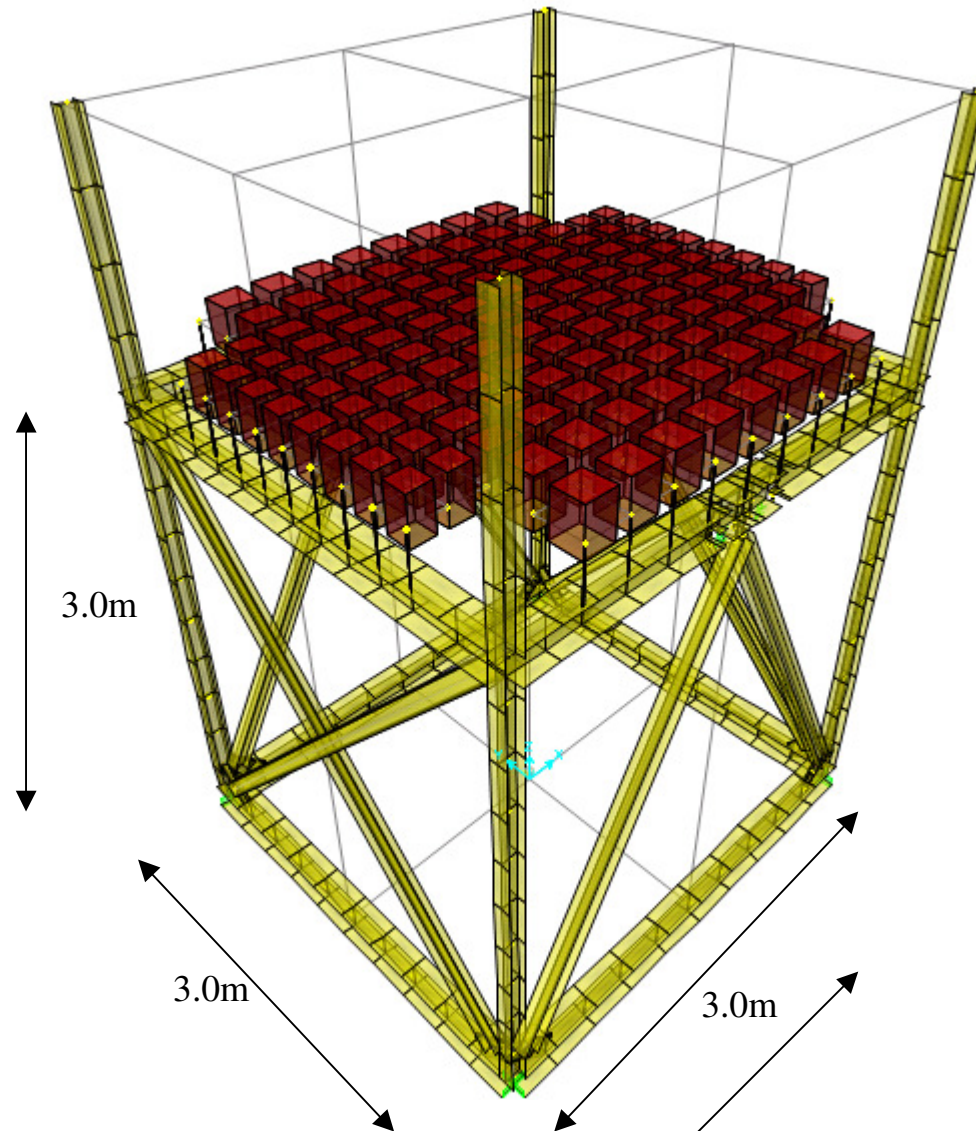
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**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.

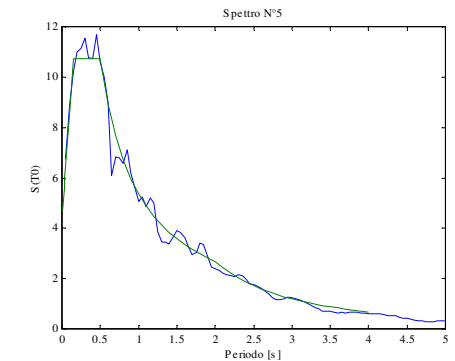
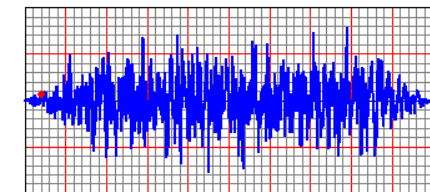
Htot: 4.50m

Himp: 3.0m

Massa totale: 824 kgs²/m

**Accelerogramma Zona 1
terreno B**

**spettrocompatibile
OPCM3274**



Direzione protetta da controventi dissipativi

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

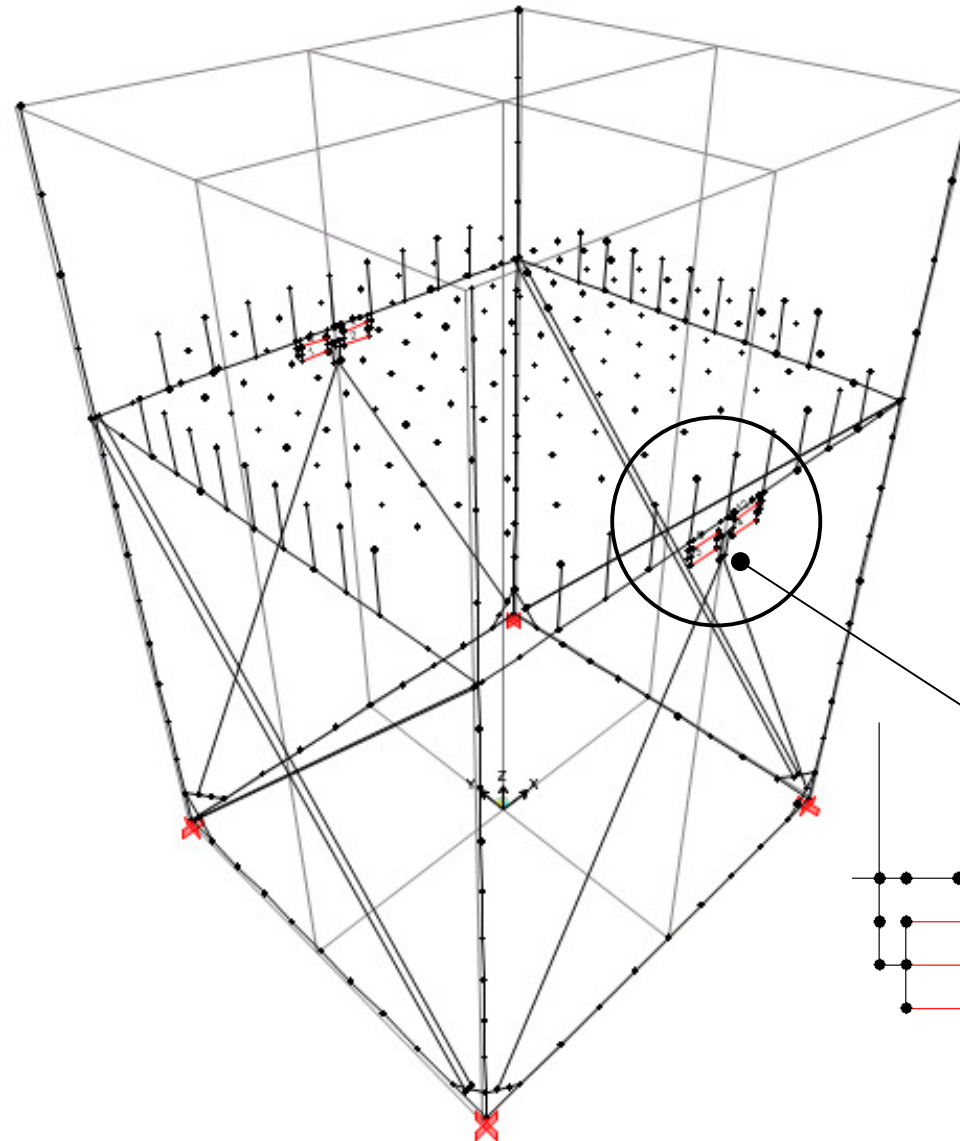
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

**ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI**

**ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO**

ESEMPIO APPLICATIVO: (telaio PROGETTO Neforee)



Dispositivi JARRET tipo BC1BN

corsa = 25 mm

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

$\alpha = 0.2$

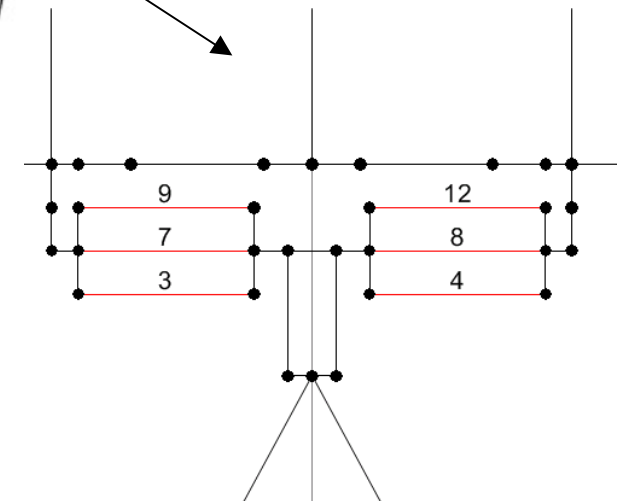
$K = 0.52 \text{ KN/mm}$

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

9, 12 sono elementi elastici multilineari

3, 4 sono elementi "Dampers" 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."

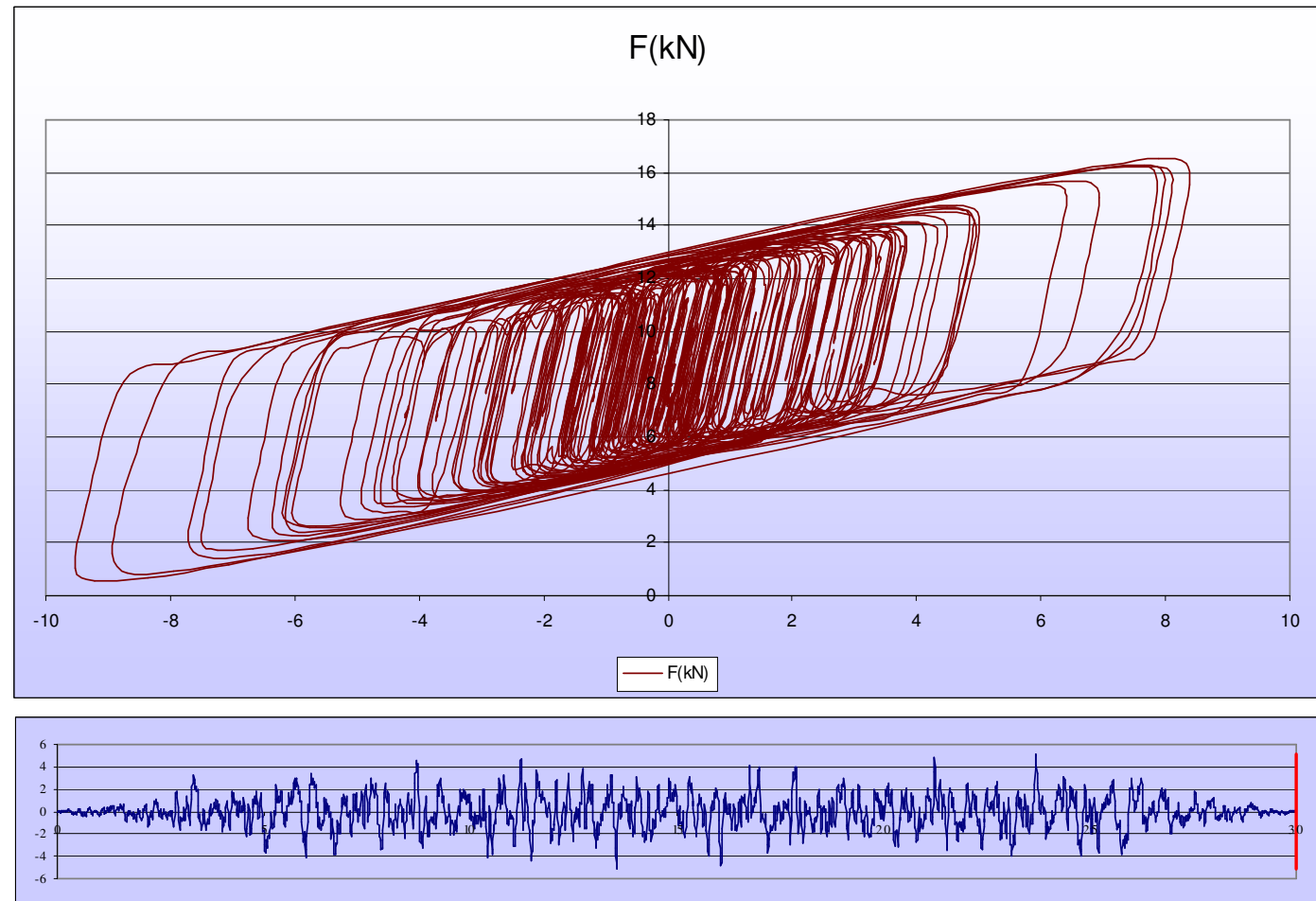
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

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."

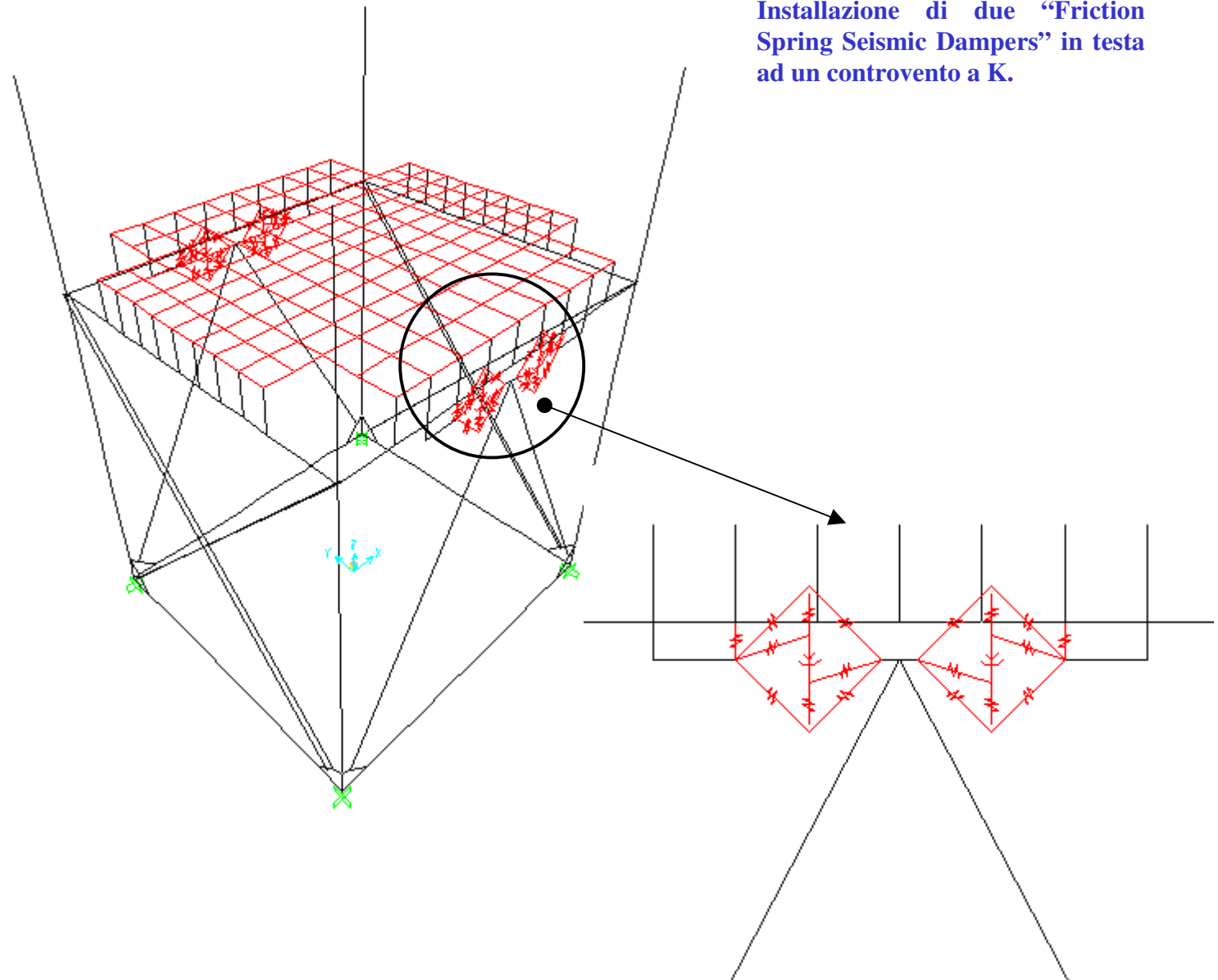
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

**ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI**

**ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO**

ESEMPIO APPLICATIVO: (telaio PROGETTO Neforee)



INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

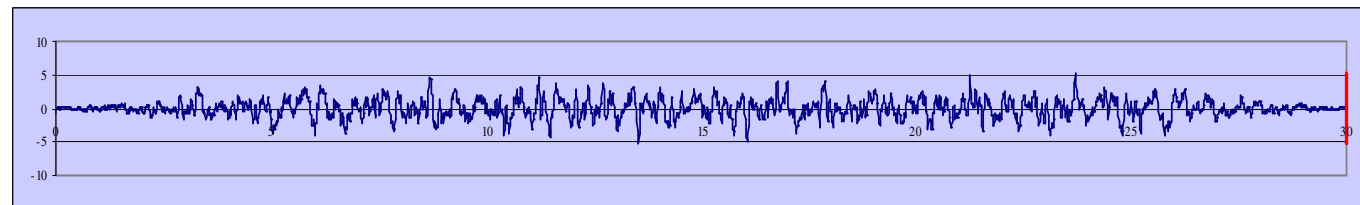
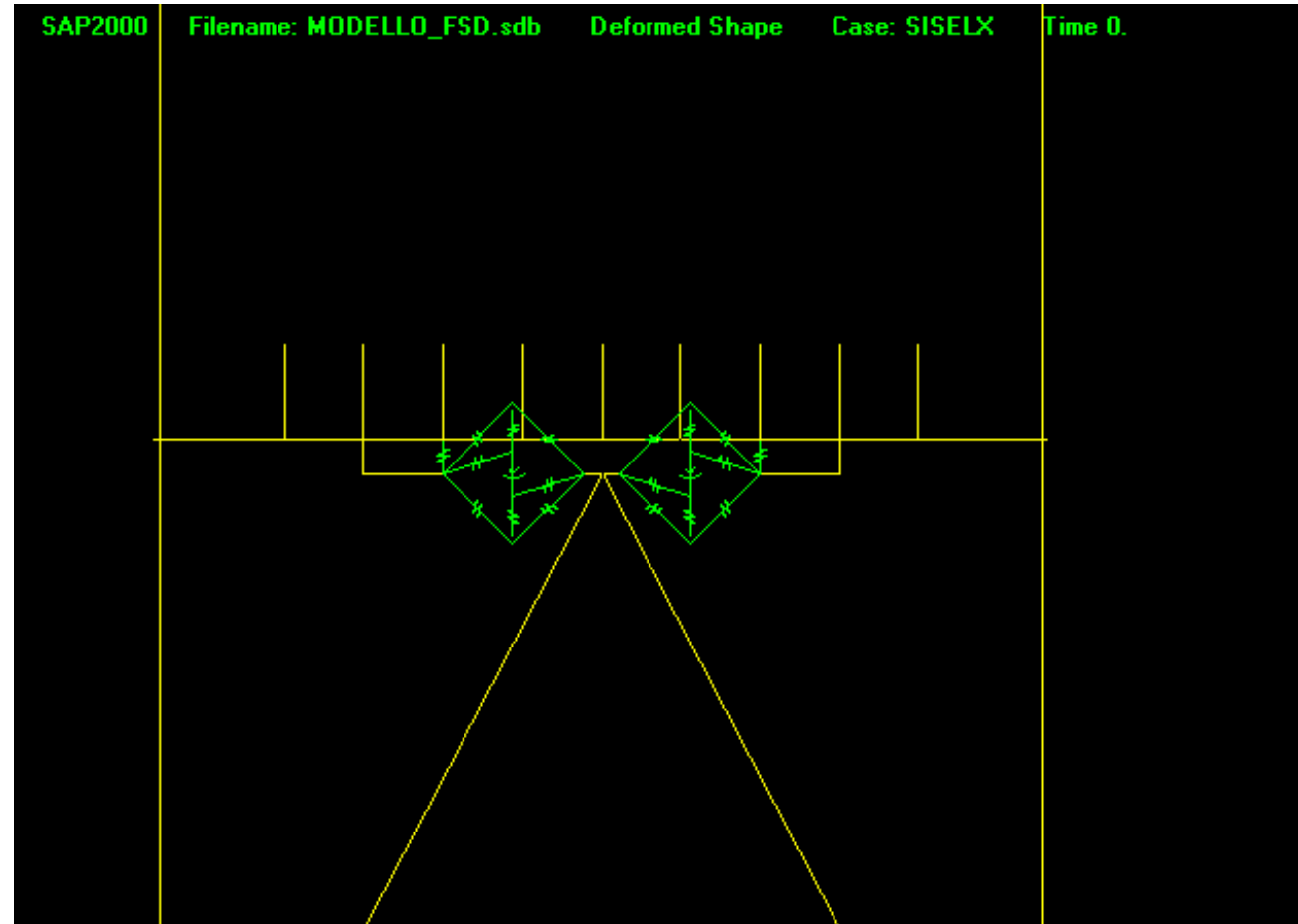
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**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."

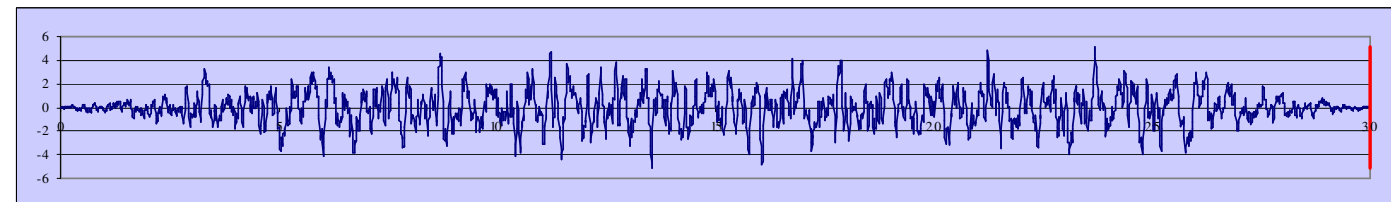
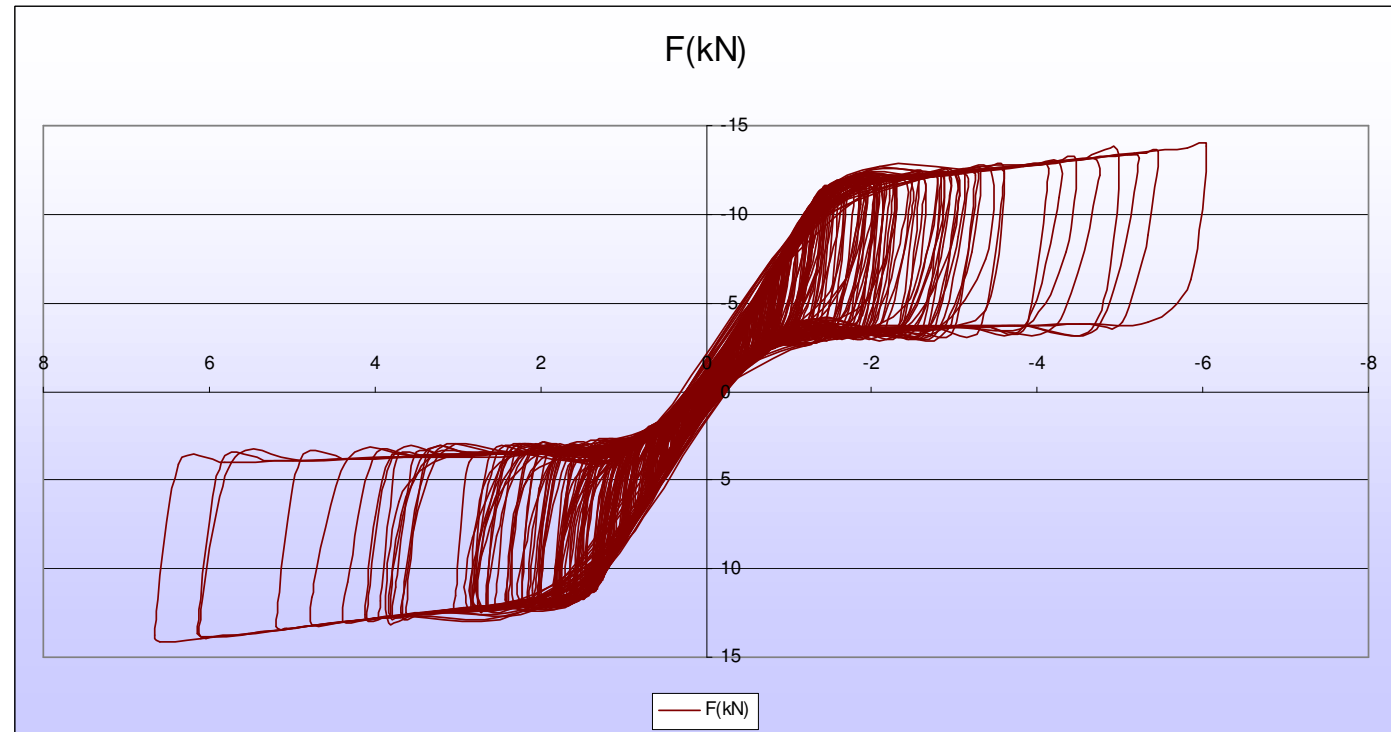
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**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."

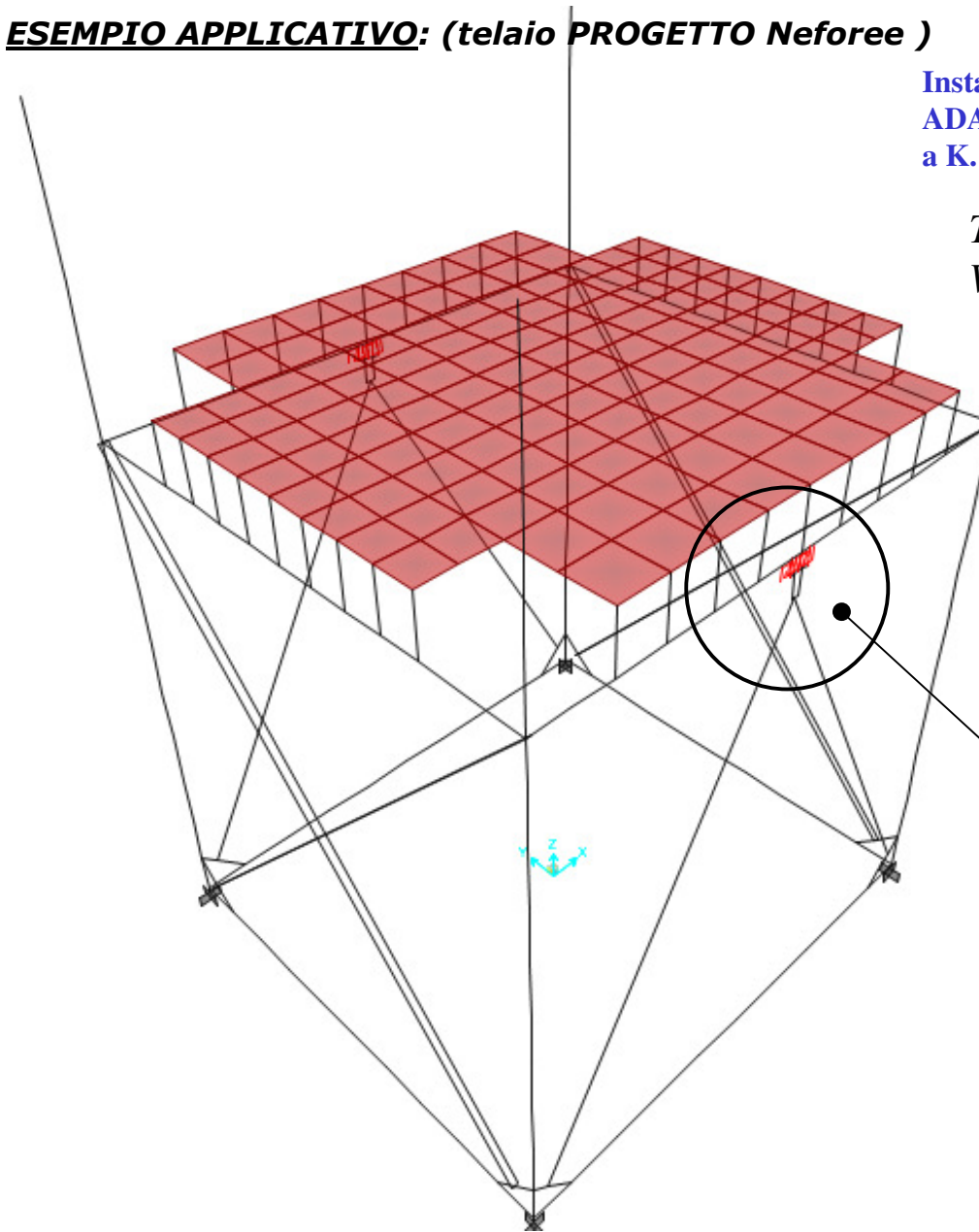
DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

**ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI**

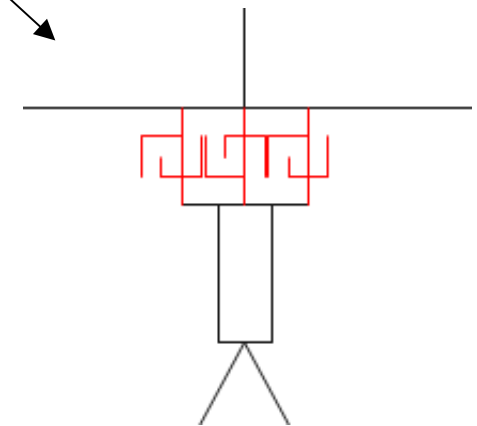
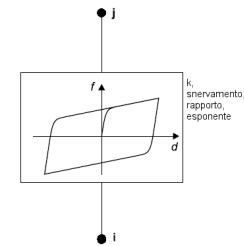
**ESEMPI:
ISOLAMENTO SISMICO**

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

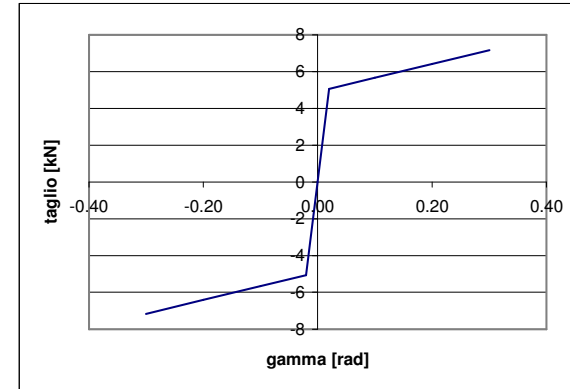
DISPOSITIVI PER L'ISOLAMENTO

ESEMPI: CONTROVENTI DISSIPATIVI

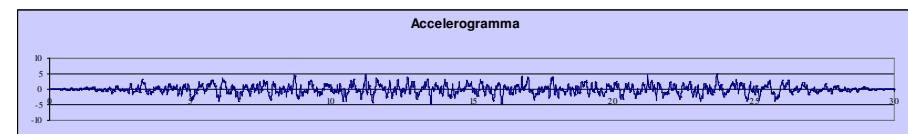
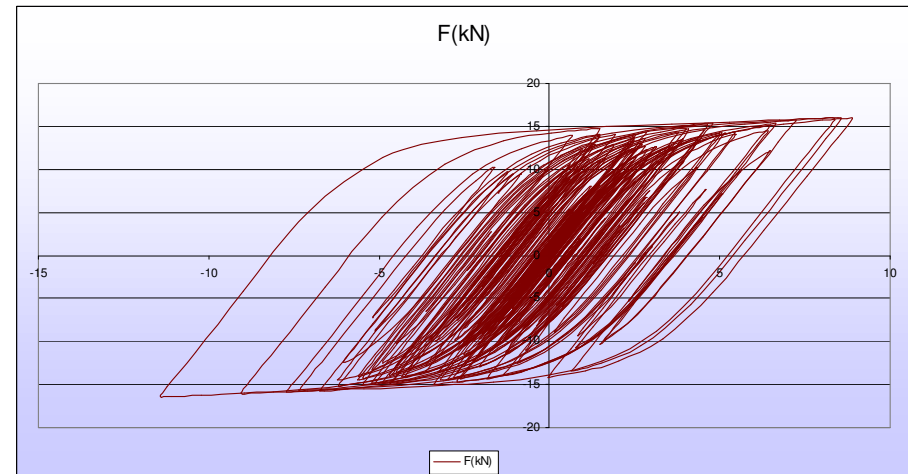
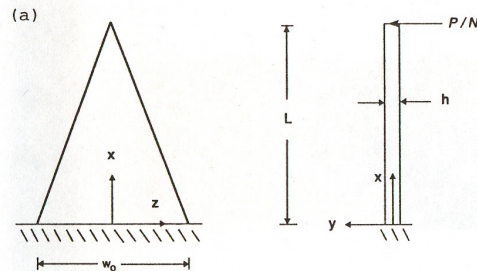
ESEMPI: ISOLAMENTO SISMICO

ESEMPIO APPLICATIVO: (telaio PROGETTO Neforee)

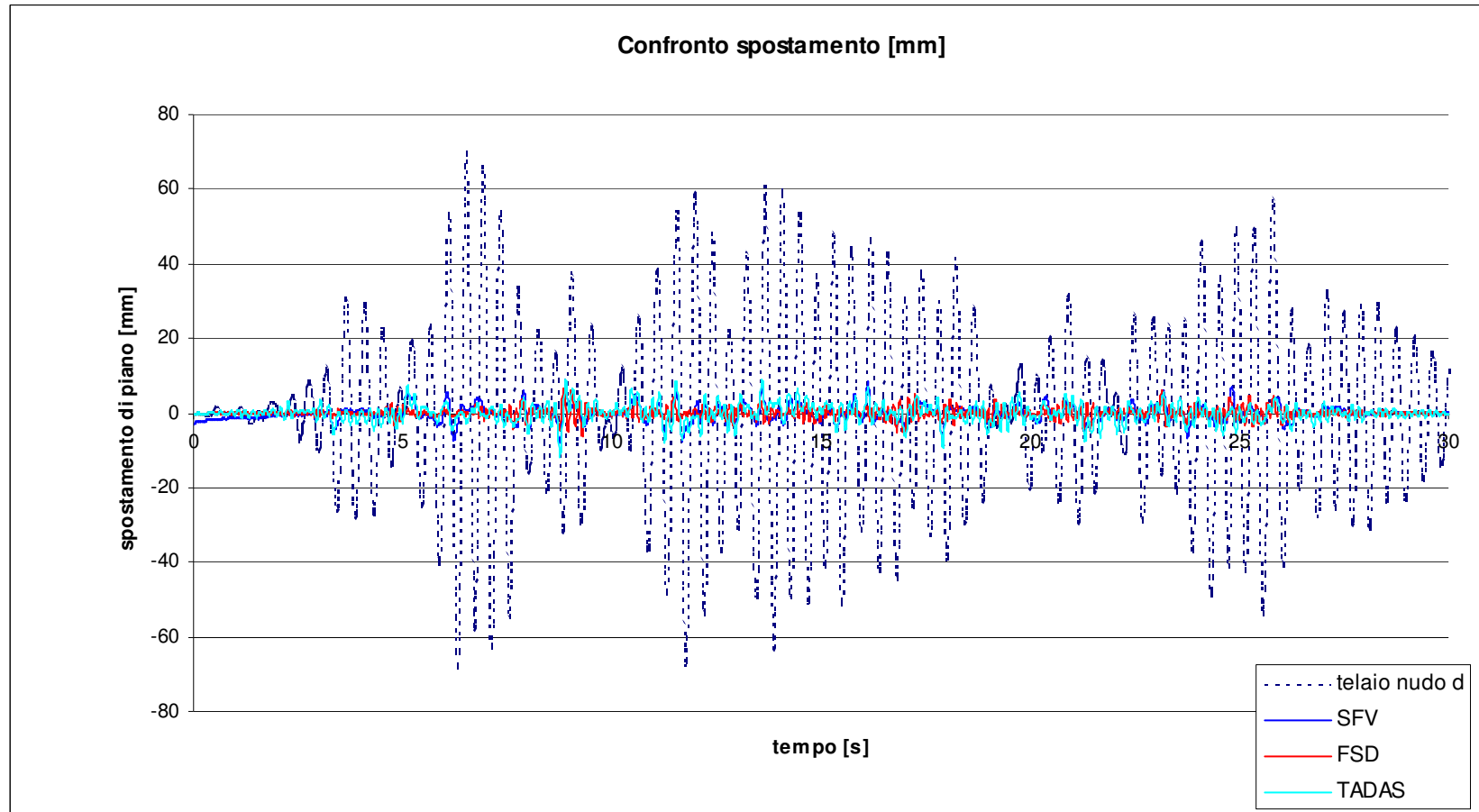
N	1	γ	Δ [mm]	F [kN]
E	200000 N/mm ²	-0.30	-45.00	-7.160625
w0	50 mm	-0.20	-30.00	-6.410625
L	150 mm	-0.10	-15.00	-5.660625
h	15 mm	-0.02	-3.04	-5.0625
σ_y	270 N/mm ²	0.00	0.00	0
k1=P/(D)	1666.667 N/mm	0.02	3.04	5.0625
beta	0.03	0.10	15.00	5.660625
k2	50 N/mm	0.20	30.00	6.410625
Pu	5062.5 N	0.30	45.00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



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

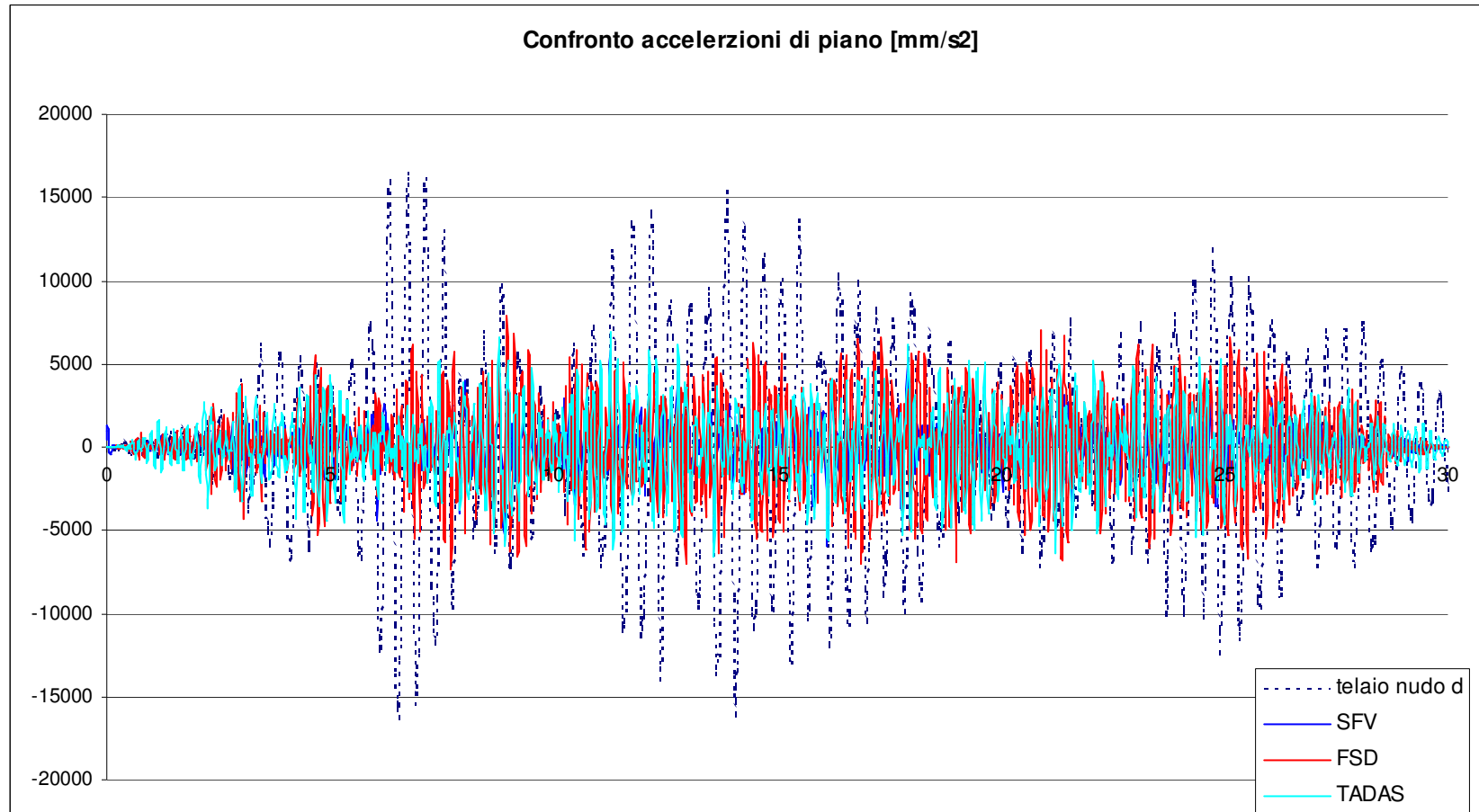


ESEMPIO APPLICATIVO: (telaio PROGETTO Neforee)



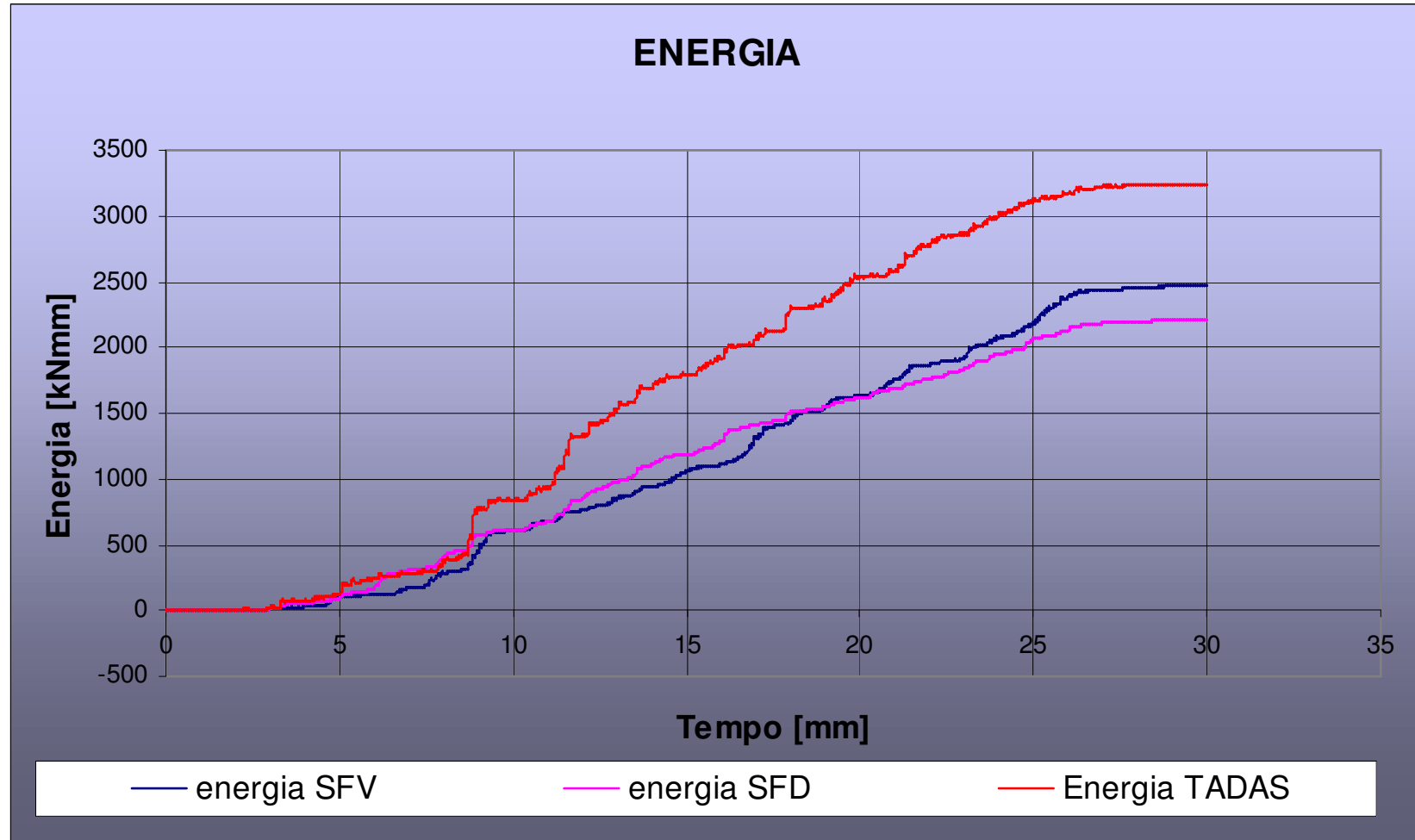
	d[mm]	a[mm/s ²]
telaio nudo	70.6	16518
contr. SFV	9.0	5982
contr. FSD	6.7	7906
contr. TADAS	11.7	6878

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."

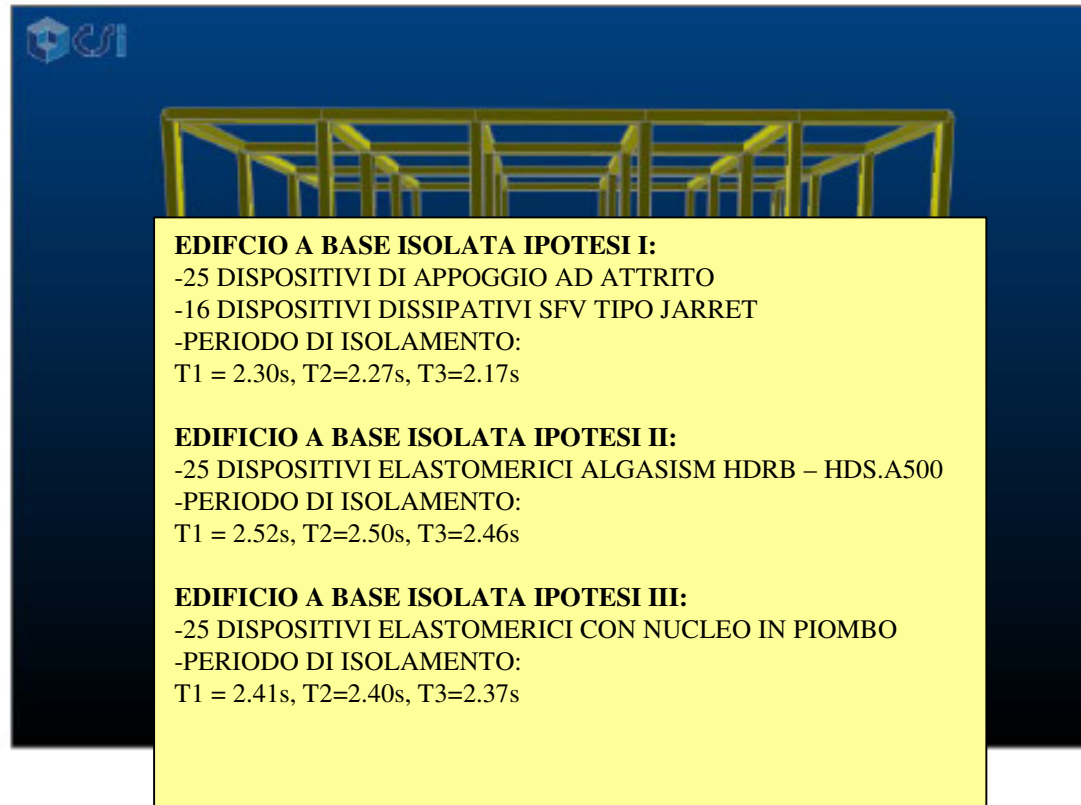
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**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:
 $T_1 = 2.30s, T_2=2.27s, T_3=2.17s$

EDIFICIO A BASE ISOLATA IPOTESI II:

- 25 DISPOSITIVI ELASTOMERICI ALGASISM HDRB – HDS.A500
- PERIODO DI ISOLAMENTO:
 $T_1 = 2.52s, T_2=2.50s, T_3=2.46s$

EDIFICIO A BASE ISOLATA IPOTESI III:

- 25 DISPOSITIVI ELASTOMERICI CON NUCLEO IN PIOMBO
- PERIODO DI ISOLAMENTO:
 $T_1 = 2.41s, T_2=2.40s, T_3=2.37s$

EDIFICIO:

- MASSA TOTALE: $1962.28 \text{ kNs}^2/\text{m}$
- PRIMO PERIODO A BASE FISSA: $1.26s$

INTRODUZIONE

LEGGI NON LINEARI

ANALISI "F.N.A."

ANALISI "D.I."

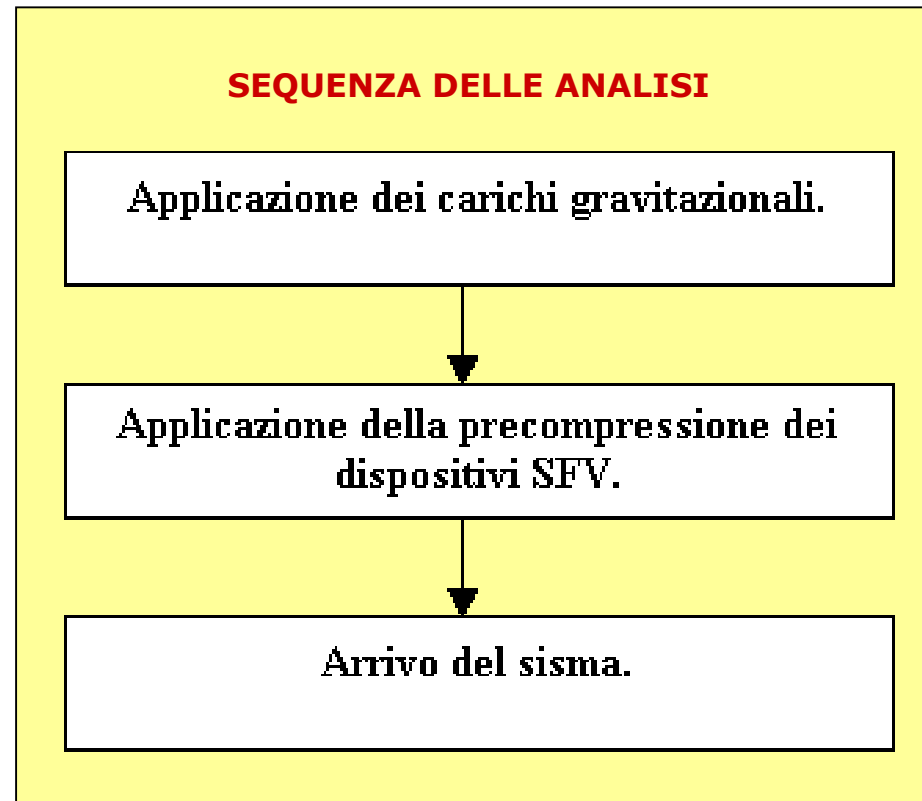
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

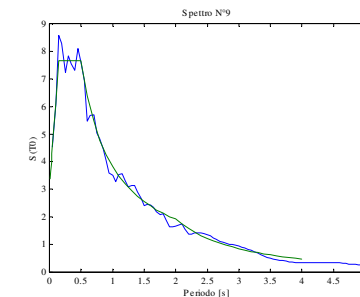
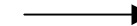
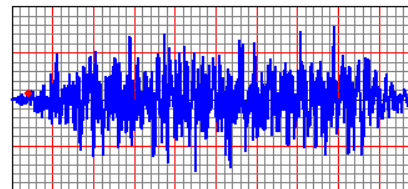
ESEMPI:
CONTROVENTI DISSIPATIVI

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**

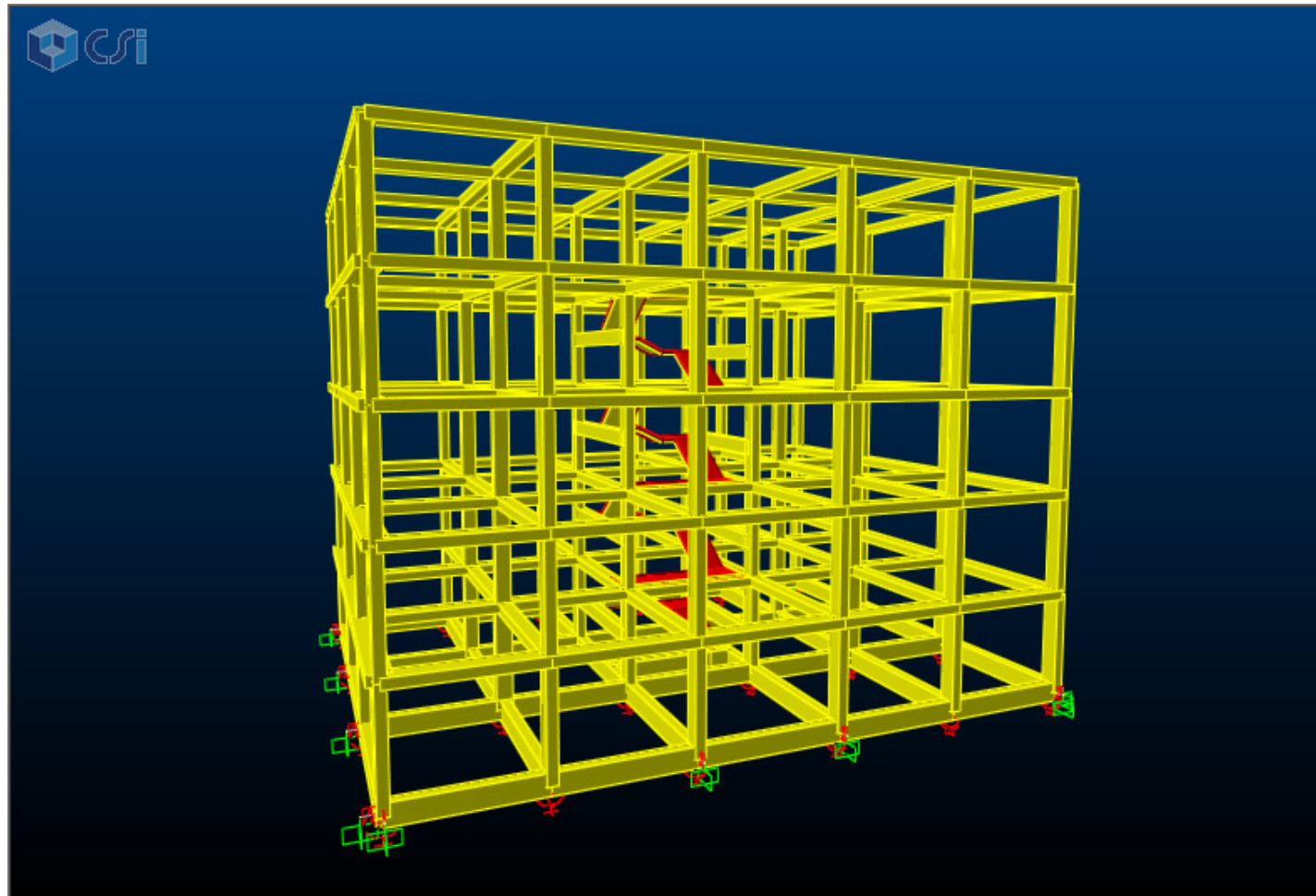
**DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO**

**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**

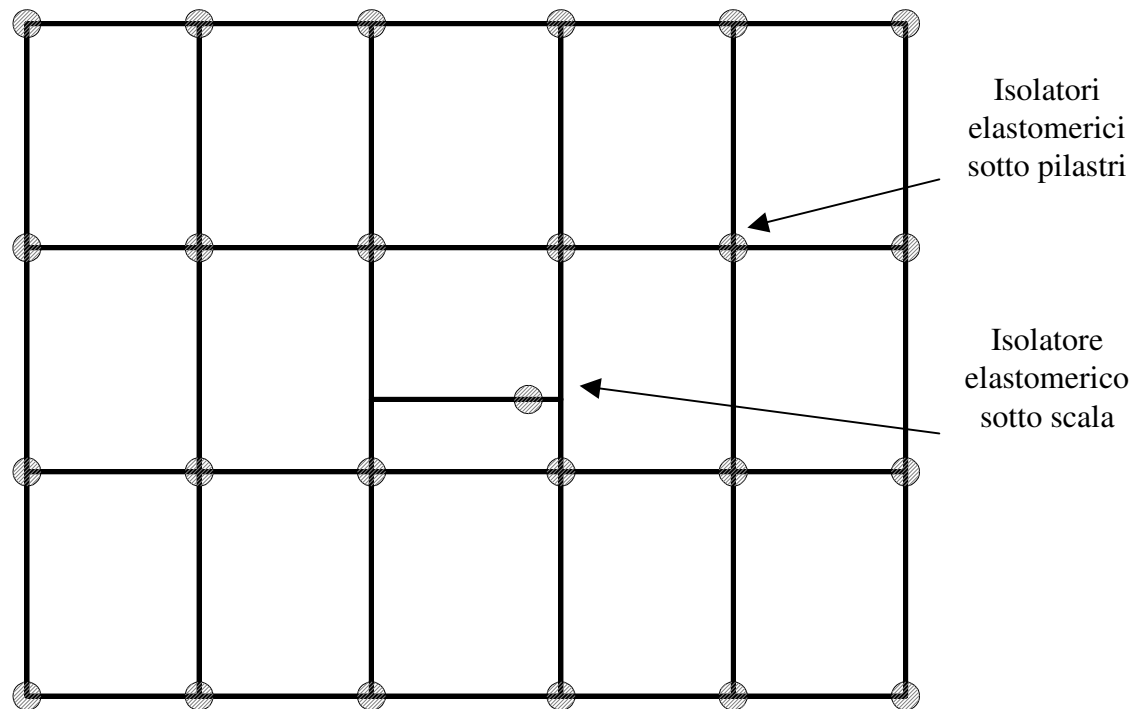
**DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO**

**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**

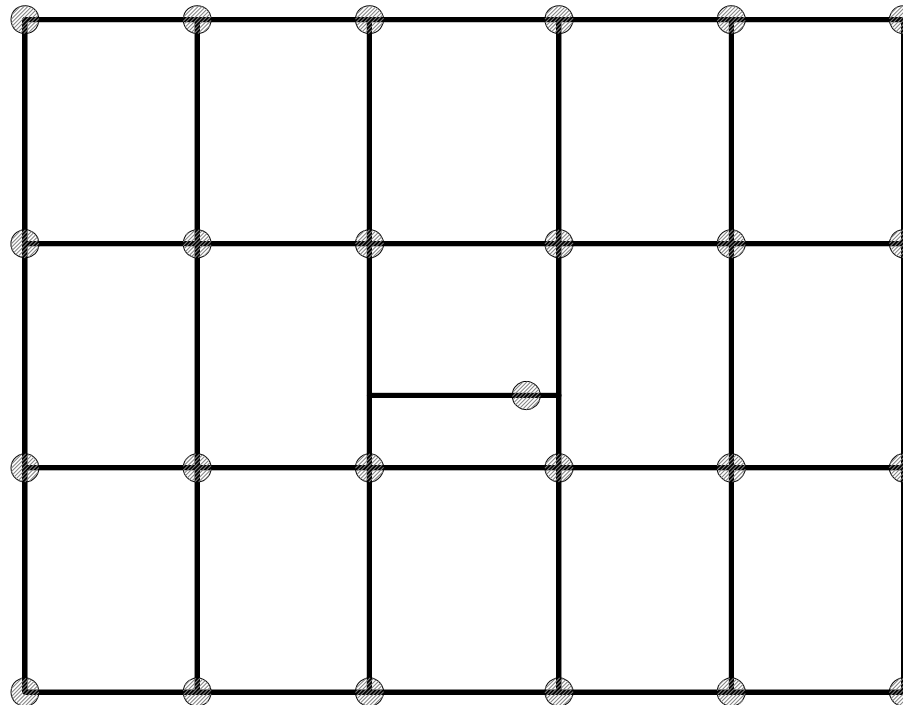
**DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO**

**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."

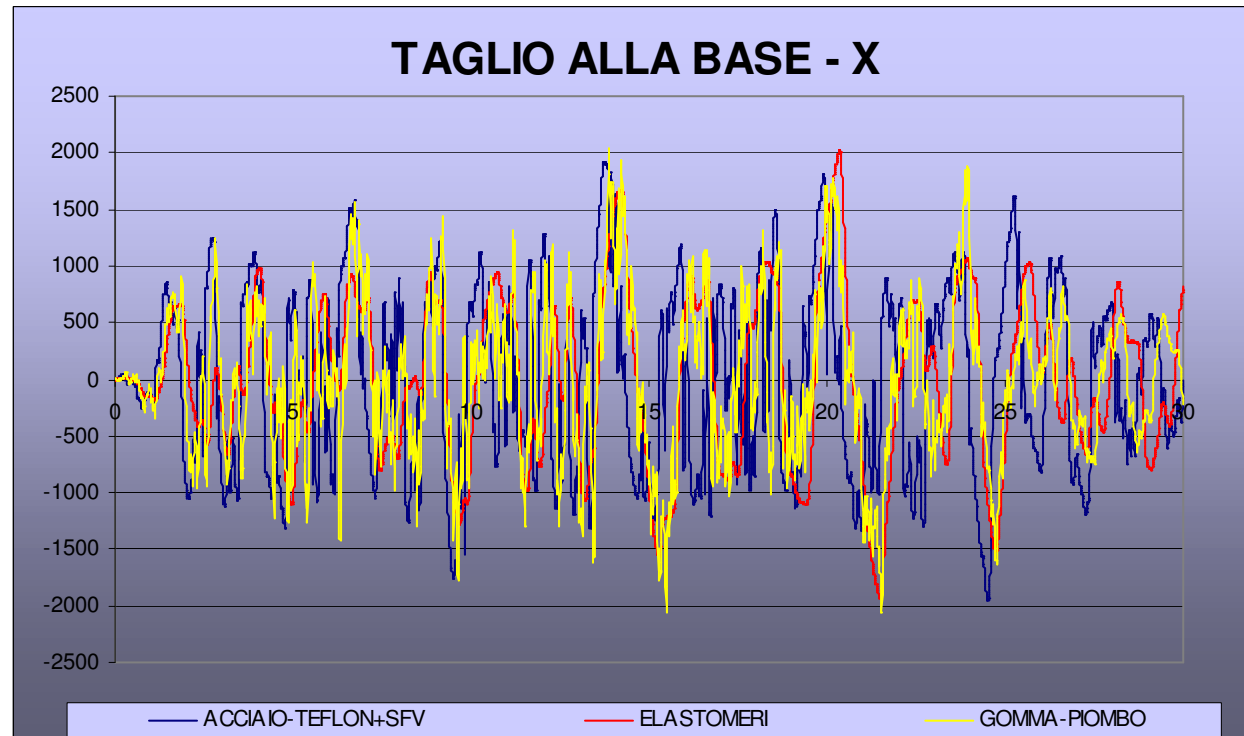
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

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."

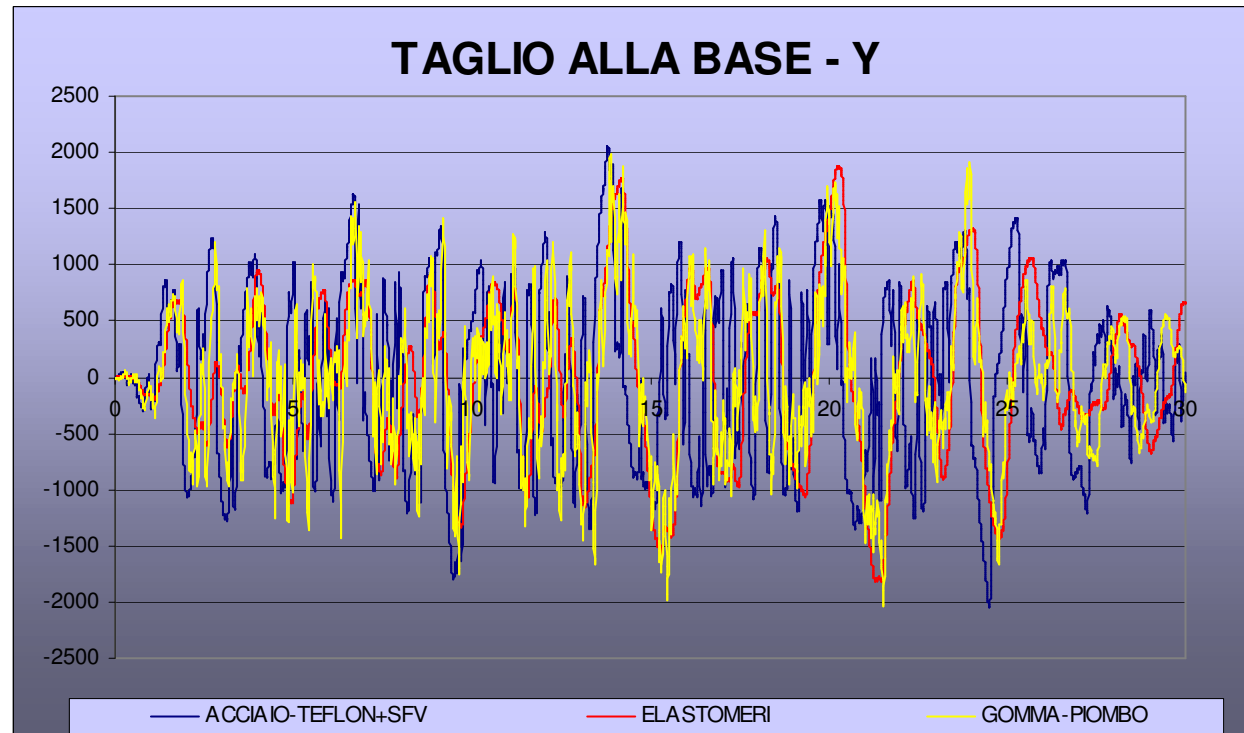
**DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE**

**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."

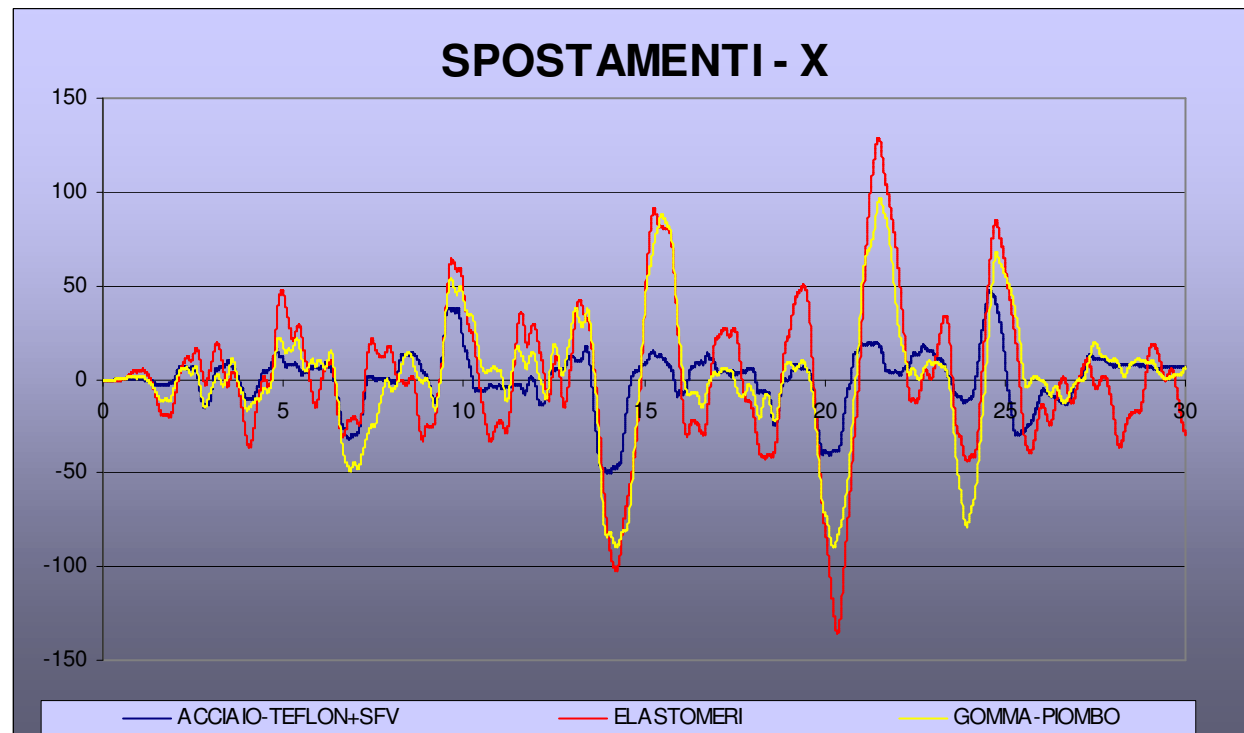
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

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."

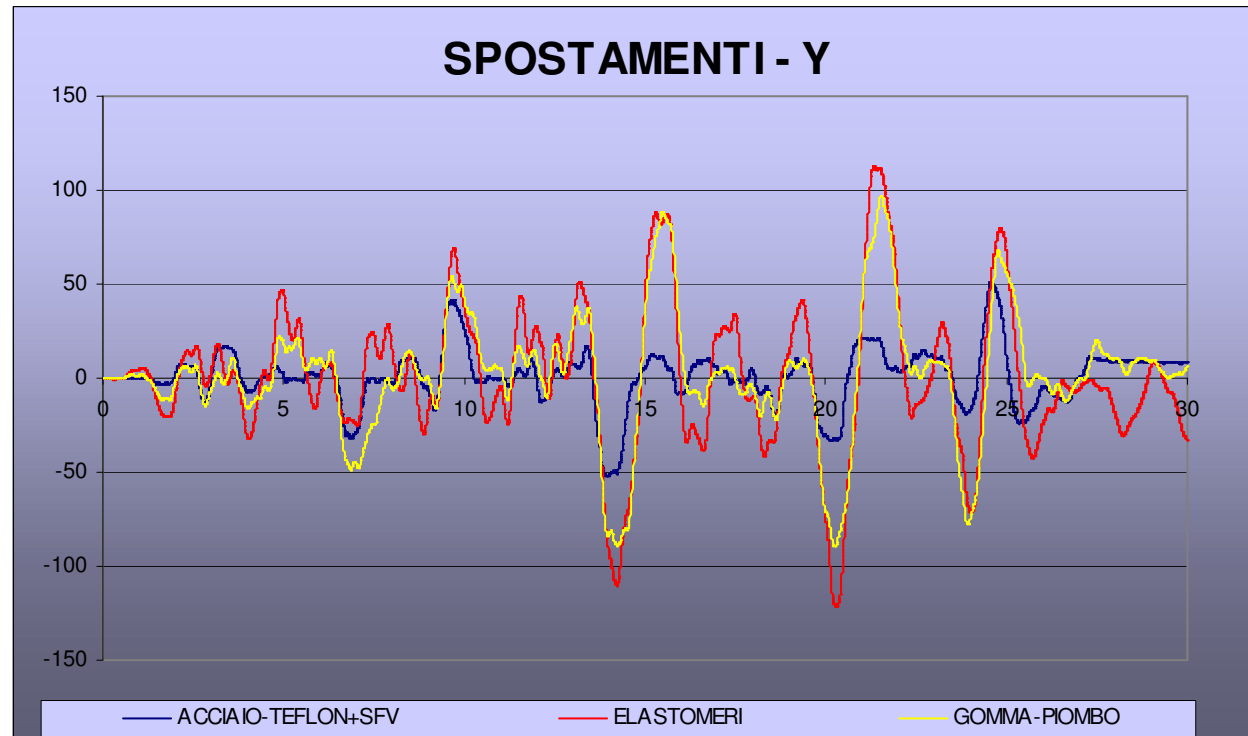
DISPOSITIVI PER LA
DISSIPAZIONE

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

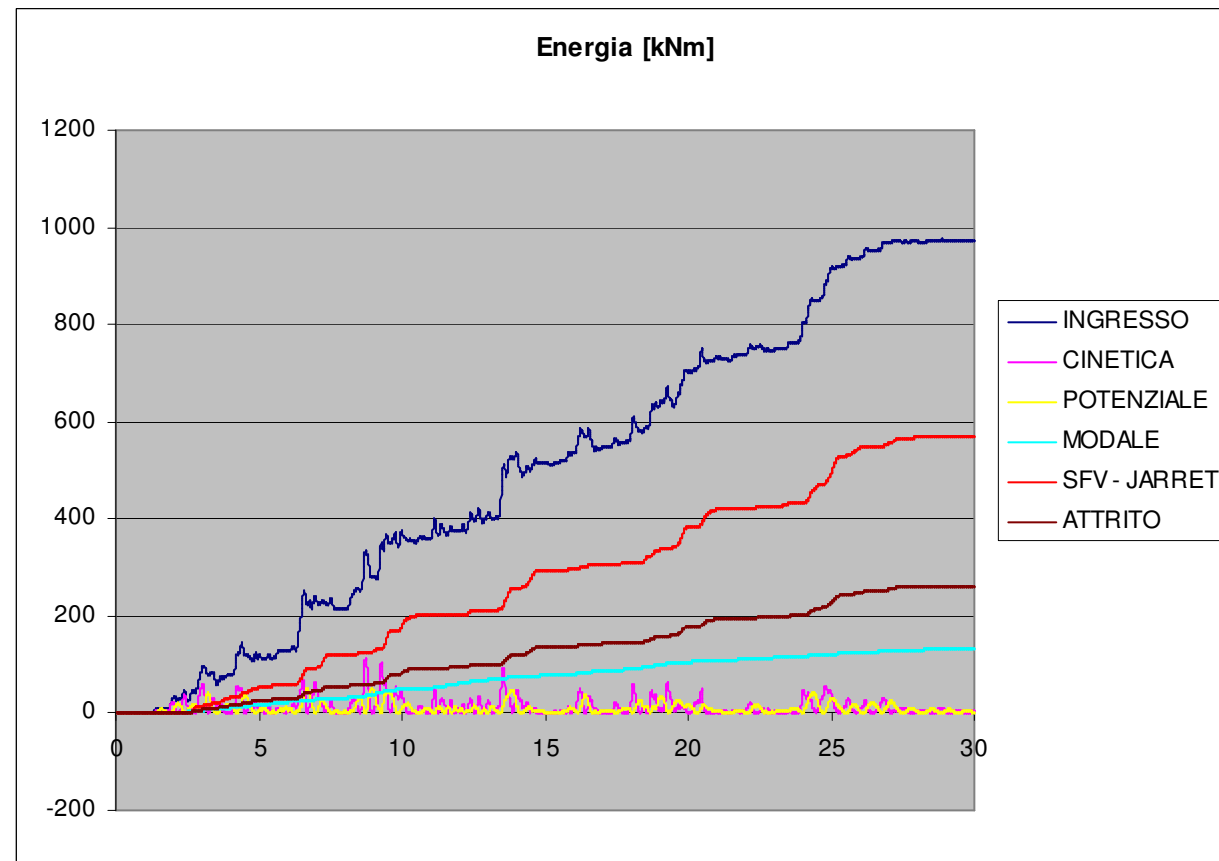
DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

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

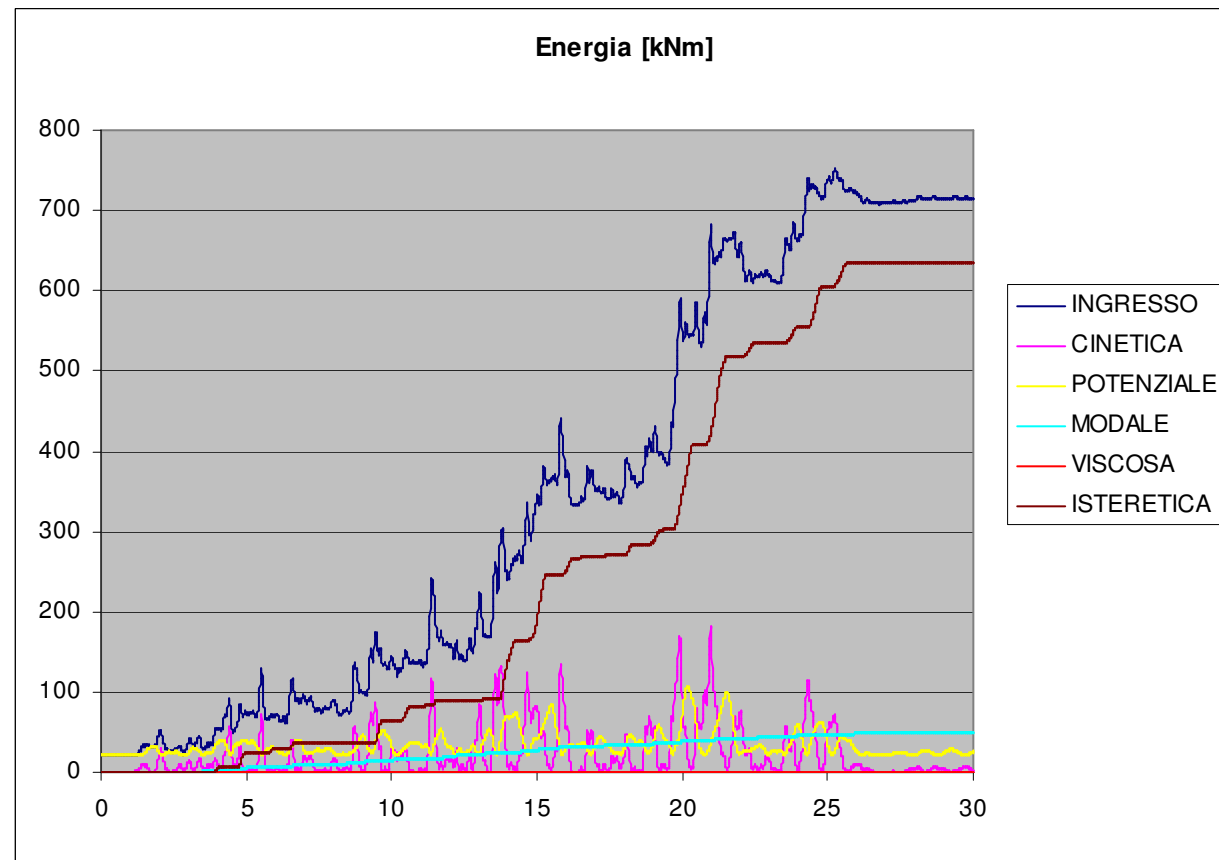
DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

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

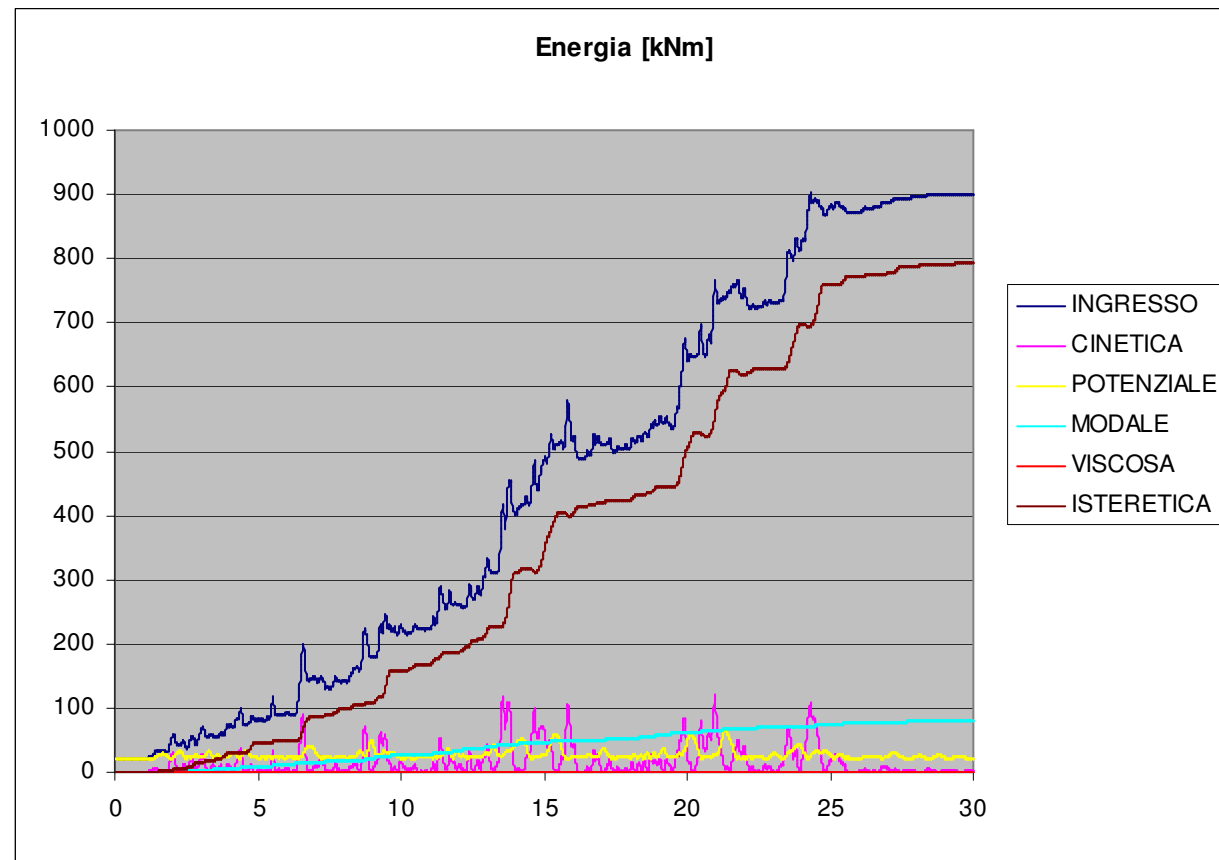
DISPOSITIVI PER
L'ISOLAMENTO

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





SAIE07 INTERNATIONAL
BUILDING
EXHIBITION
BOLOGNA: 24 - 28 OTTOBRE
ORARI D'APERTURA: FERIALE 9.00-19.00 DOMENICA 9.00-17.30

***Nuovi sviluppi per il calcolo strutturale
e strumenti avanzati di protezione sismica***

SAP2000 – ETABS – PERFORM3d

Ing. Leonardo Bandini - Ing. Massimo Brunetta

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

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