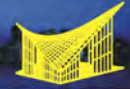


Horae

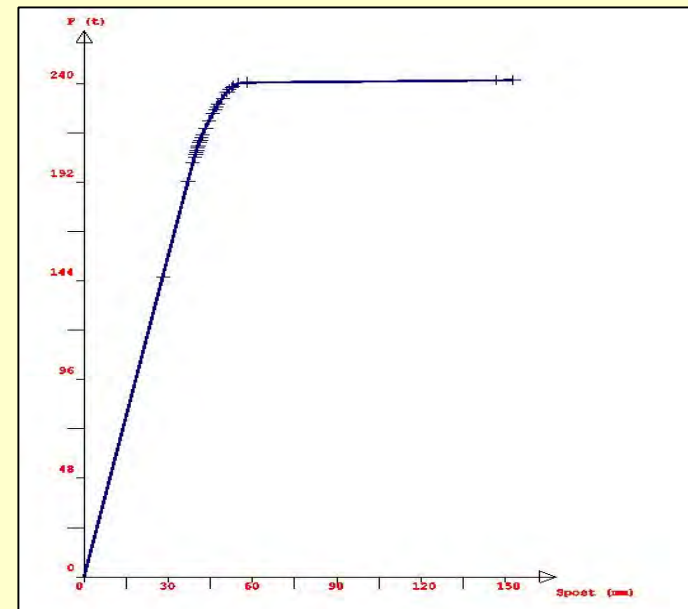
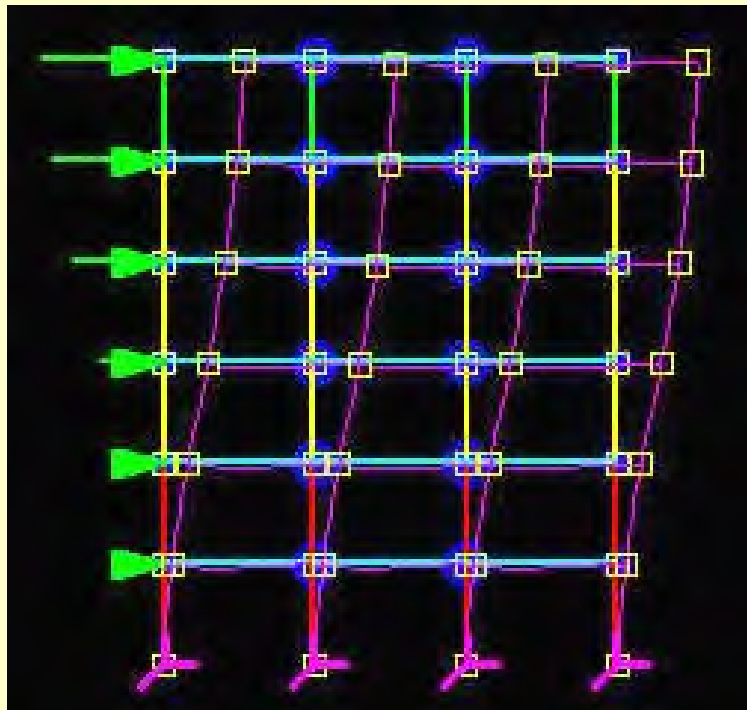
via C. Colombo, 19/p6 - 06127 - Perugia
tel. 075/5003198 - Fax 075/5004095

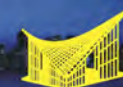


STS s.r.l.
Software Tecnico Scientifico



ANALISI PUSH-OVER





Analisi push-over

L'analisi push-over rappresenta l'ultima evoluzione dell'analisi statica delle costruzioni in zona sismica

L'idea di fondo è quella di ricondurre l'analisi dinamica non lineare ad un'analisi statica equivalente

L'equivalenza tra analisi dinamica e statica, acquisita in campo lineare, appare poco realistica nel caso di comportamento non lineare e non è supportata da valide considerazioni teoriche, ma i risultati ottenuti tramite analisi push-over sono confortanti

La tecnica di applicazione dell'analisi push-over per la verifica di edifici esistenti è dettagliatamente descritta nelle NTC 2008

Analisi push-over

C7.3.4.1 Analisi non lineare statica

Questo metodo d'analisi è utilizzabile solo per costruzioni il cui comportamento sotto la componente del terremoto considerata è governato da un modo di vibrare naturale principale, caratterizzato da una significativa partecipazione di massa.

L'analisi richiede che al sistema strutturale reale venga associato un sistema strutturale equivalente ad un grado di libertà.

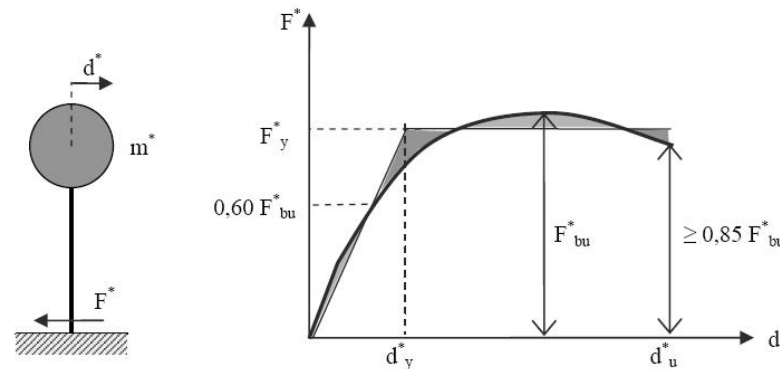
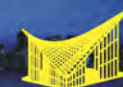


Figura C7.3.1 – Sistema e diagramma bilineare equivalente



Analisi push-over

Formulazione del metodo

Il metodo più accurato per la verifica sismica delle strutture è l'analisi dinamica completa

Limiti e difficoltà di applicazione

- Selezione degli accelerogrammi da utilizzare nell'analisi
- Interpretazione dei risultati derivanti dalle analisi
- Complessità computazionali nel caso di strutture a comportamento non lineare

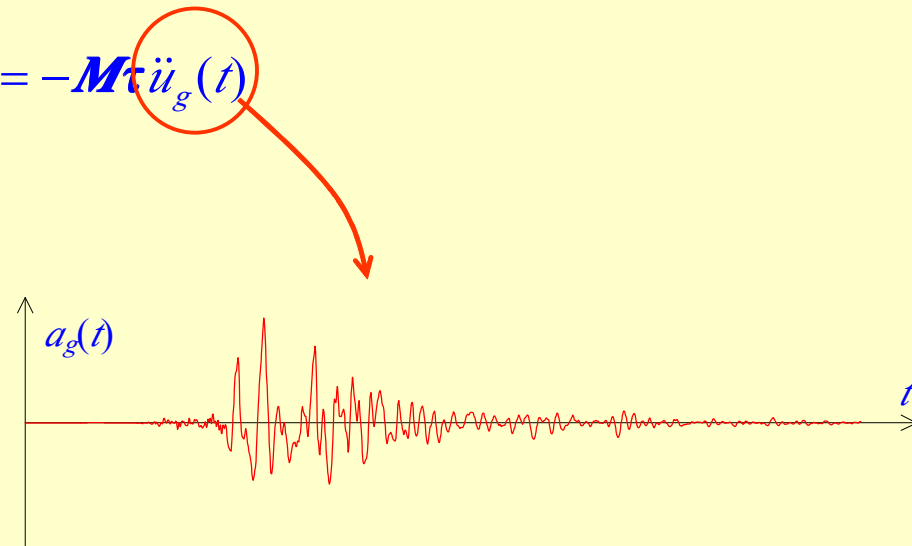
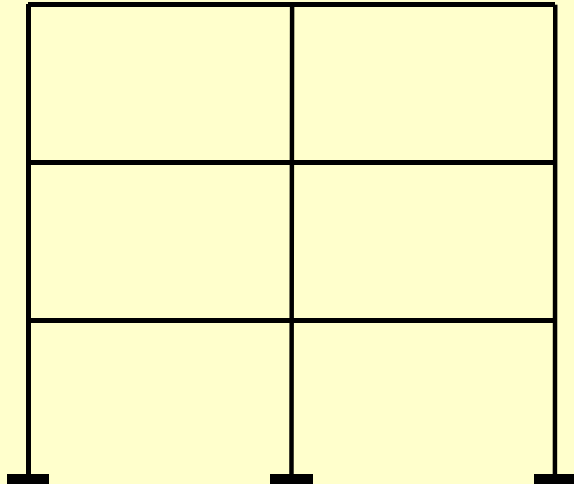
L'analisi **push-over** consente di superare tali difficoltà introducendo apposite ipotesi semplificative

Formulazione del metodo

Sistemi a comportamento elastico

Equazione del moto del sistema strutturale

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = -M\ddot{u}_g(t)$$



Accelerogramma

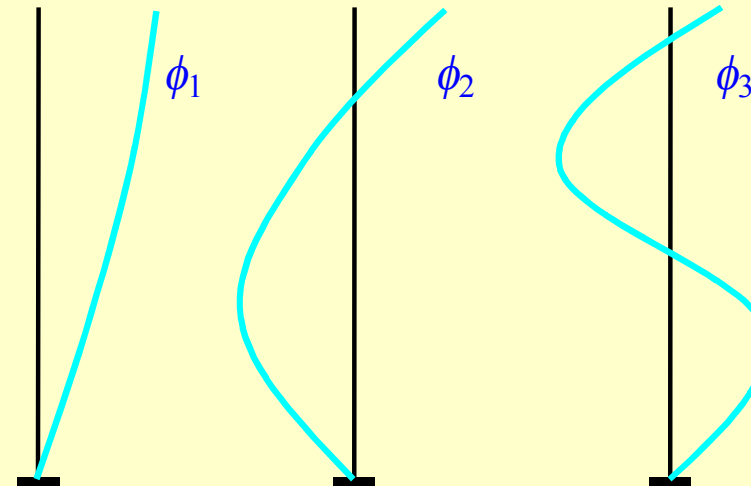
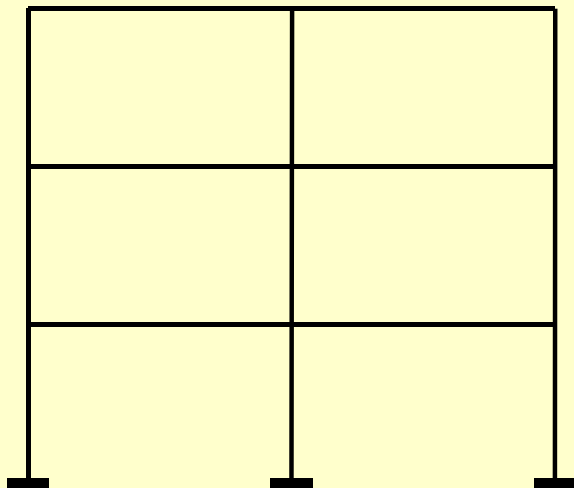


Formulazione del metodo

Sistemi a comportamento elastico

Sviluppo in serie dei modi dello spostamento (decomposizione modale)

$$\mathbf{u}(t) = \sum_n \mathbf{u}_n(t) \quad ; \quad \mathbf{u}_n(t) = \boldsymbol{\phi}_n q_n(t)$$

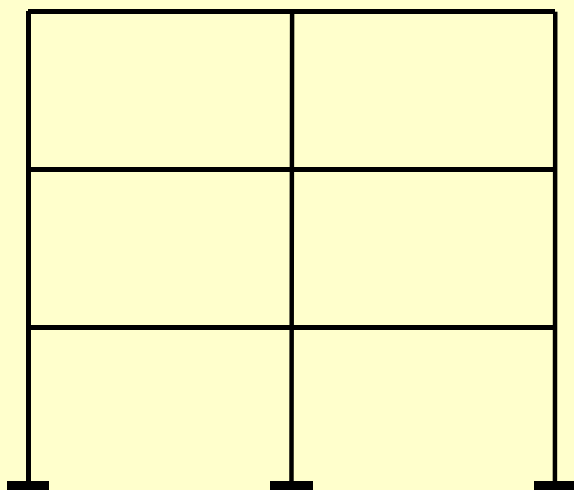


Formulazione del metodo

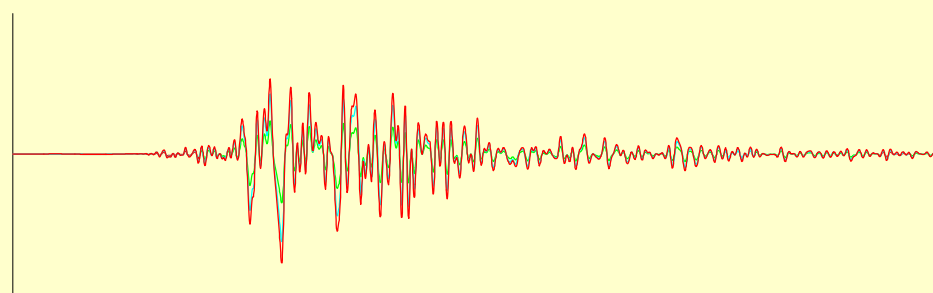
Sistemi a comportamento elastico

Integrazione delle equazioni del moto nello spazio modale

$$\ddot{q}_n(t) + 2\xi_n \omega_n \dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = -\Gamma_n \ddot{u}_g(t) \quad n=1,2,\dots$$



$$\mathbf{u}(t) = \sum_n \mathbf{u}_n(t) \quad \mathbf{u}_n(t) = \phi_n q_n(t)$$



Risposta

Formulazione del metodo

Sistemi a comportamento elastico

L'analisi push-over prende spunto dall'osservazione che la risposta dinamica associata ad ogni singola forma modale $\mathbf{u}_n(t)$ può essere ottenuta tramite analisi statica

$$\mathbf{K} \mathbf{u}_n(t) = \mathbf{f}_n^{(eq)}(t)$$

Forze equivalenti

$$\mathbf{f}_n^{(eq)}(t) = \mathbf{K} \boldsymbol{\phi}_n q_n(t) = \omega_n^2 \mathbf{M} \boldsymbol{\phi}_n \Gamma_n q_n(t) = \mathbf{s}_n A_n(t)$$

Formulazione del metodo

Sistemi a comportamento elastico

L'analisi push-over prende spunto dall'osservazione che la risposta dinamica associata ad ogni singola forma modale $\mathbf{u}_n(t)$ può essere ottenuta tramite analisi statica

$$\mathbf{K} \mathbf{u}_n(t) = \mathbf{f}_n^{(eq)}(t)$$

Forze equivalenti

$$\mathbf{f}_n^{(eq)}(t) = \mathbf{K} \boldsymbol{\phi}_n q_n(t) = \omega_n^2 \mathbf{M} \boldsymbol{\phi}_n \Gamma_n q_n(t) = \mathbf{s}_n A_n(t)$$

$$\mathbf{s}_n = \mathbf{M} \boldsymbol{\phi}_n \Gamma_n$$

- distribuzione spaziale delle forze

$$A_n(t) = \omega_n^2 q_n(t)$$

- variabilità temporale delle forze

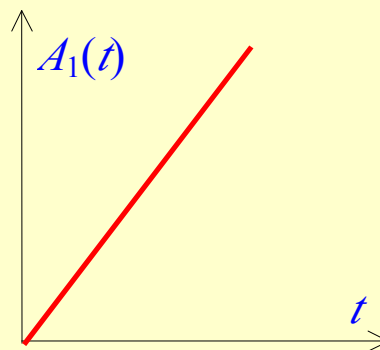
Formulazione del metodo

Sistemi a comportamento elastico

Si considerano gli effetti legati alla sola principale forma modale (n=1)

$$u_1(t) = K^{-1} f_1^{(eq)}(t) \qquad f_1^{(eq)}(t) = s_1 A_1(t)$$

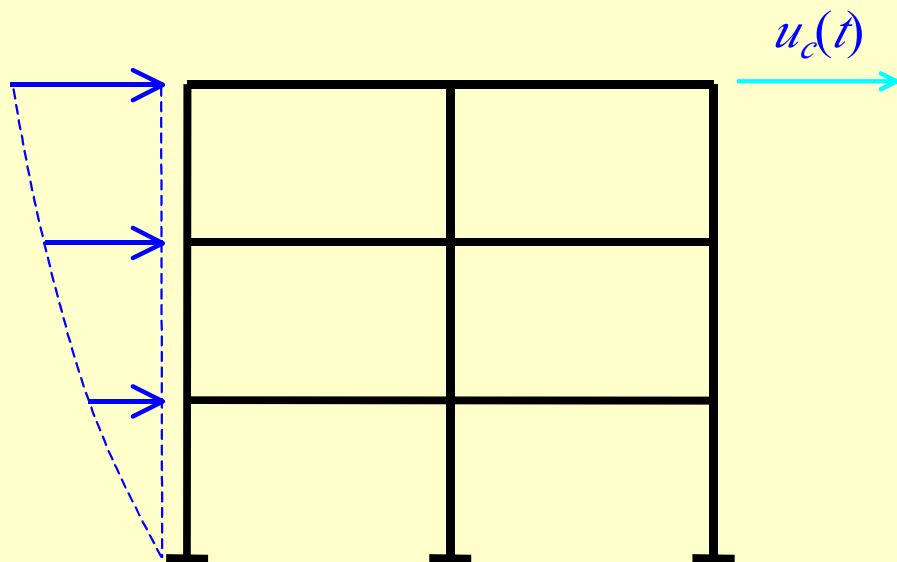
La variabilità nel tempo della funzione $A_1(t)$ è assunta lineare



Formulazione del metodo

Sistemi a comportamento elastico

Si applicano le forze alla struttura monotonamente crescenti con legge $A_1(t)$, si determina lo spostamento di controllo $u_c(t)$ (usualmente quello in cima all'edificio)

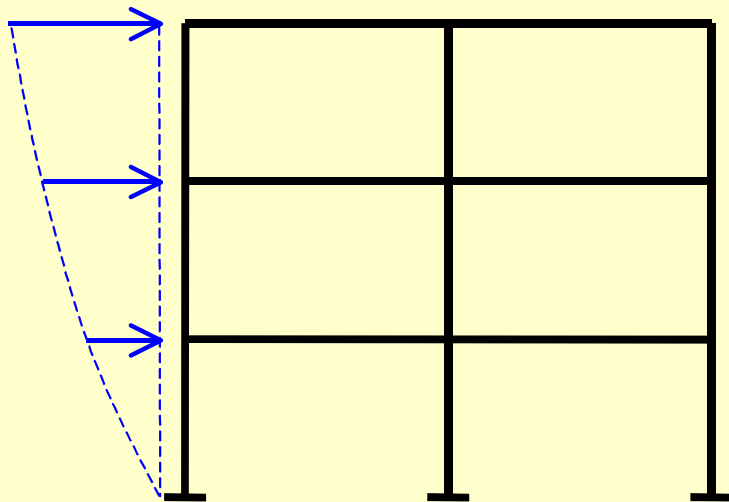


Formulazione del metodo

Sistemi a comportamento elastico

Si applicano le forze alla struttura monotonamente crescenti con legge $A_1(t)$

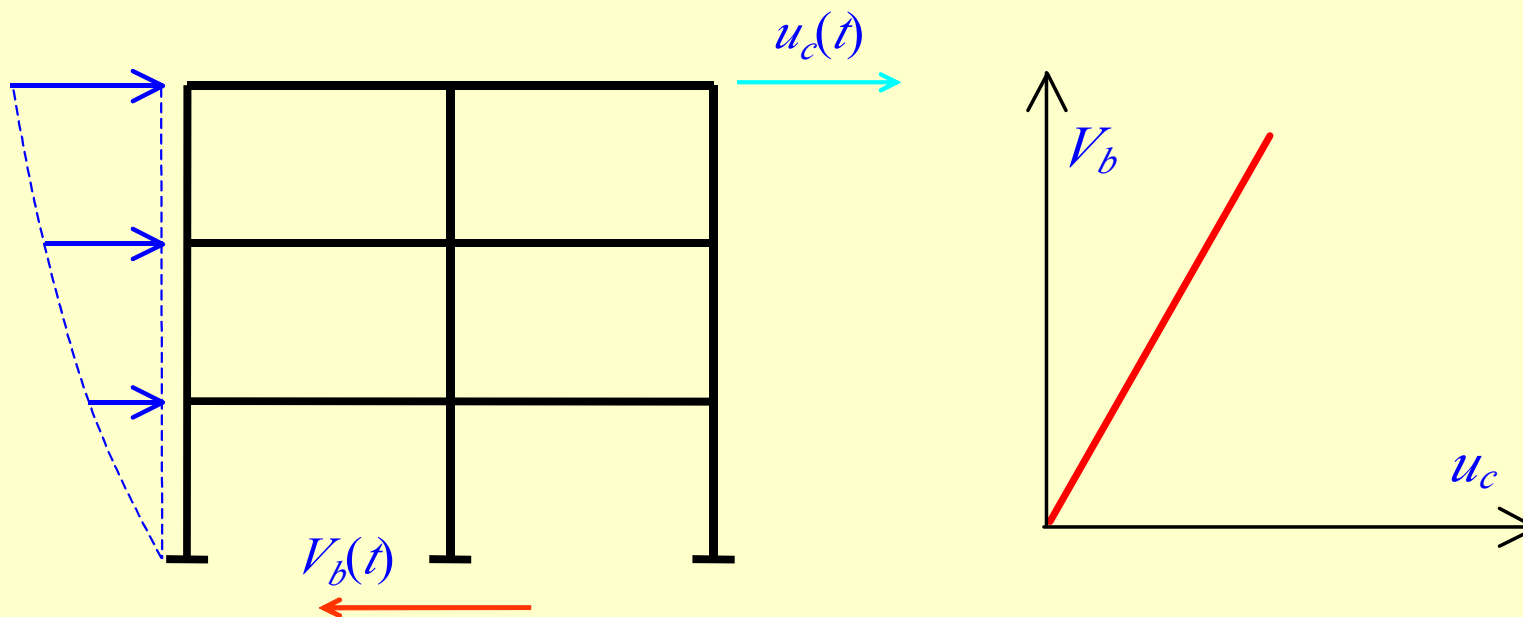
$$\mathbf{f}_1^{(eq)}(t) = \mathbf{s}_1 A_1(t)$$



Formulazione del metodo

Sistemi a comportamento elastico

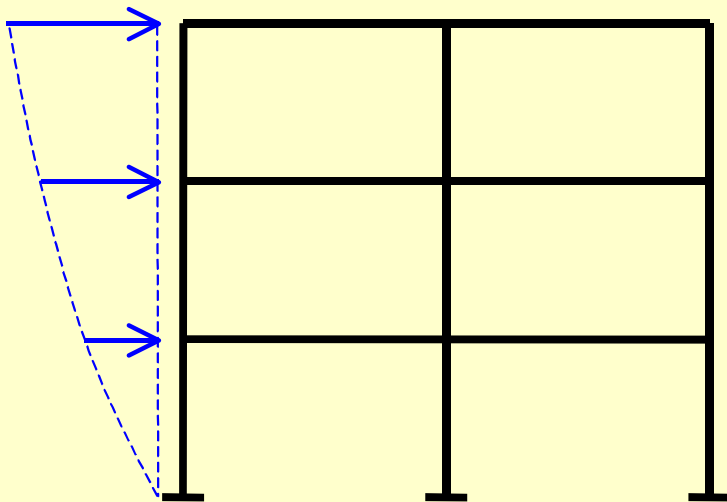
Si applicano le forze alla struttura monotonamente crescenti con legge $A_1(t)$, si determina lo spostamento di controllo $u_c(t)$ (usualmente quello in cima all'edificio) e lo si rappresenta in funzione del tagliante alla base $V_b(t)$



Formulazione del metodo

Sistemi a comportamento non lineare

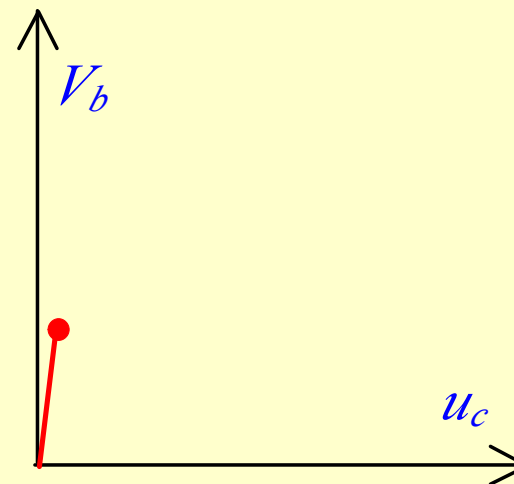
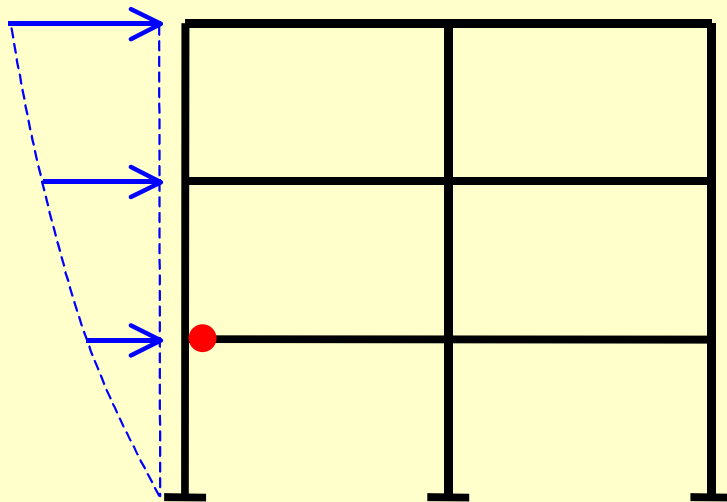
Si applicano la medesima procedura anche per i sistemi non lineari.



Formulazione del metodo

Sistemi a comportamento non lineare

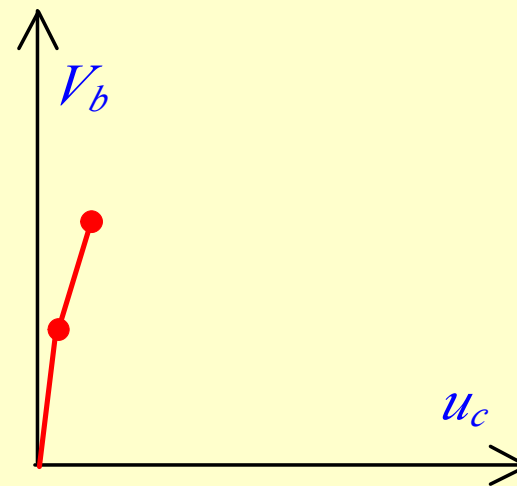
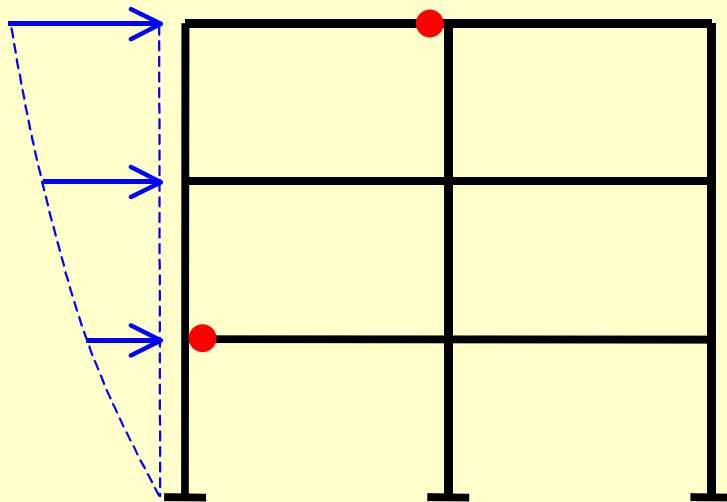
Si applicano la medesima procedura anche per i sistemi non lineari.
Si fanno crescere le forze seguendo l'evoluzione delle cerniere plastiche



Formulazione del metodo

Sistemi a comportamento non lineare

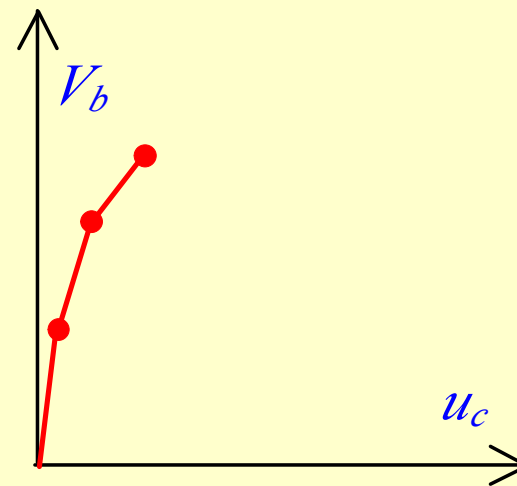
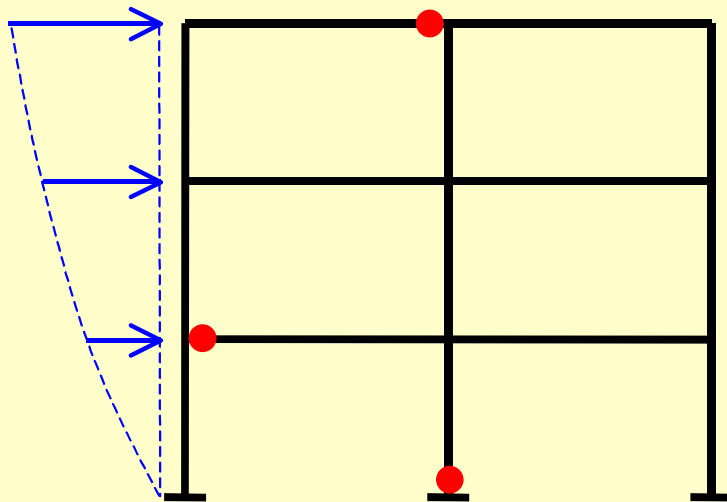
Si applicano la medesima procedura anche per i sistemi non lineari.
Si fanno crescere le forze seguendo l'evoluzione delle cerniere plastiche



Formulazione del metodo

Sistemi a comportamento non lineare

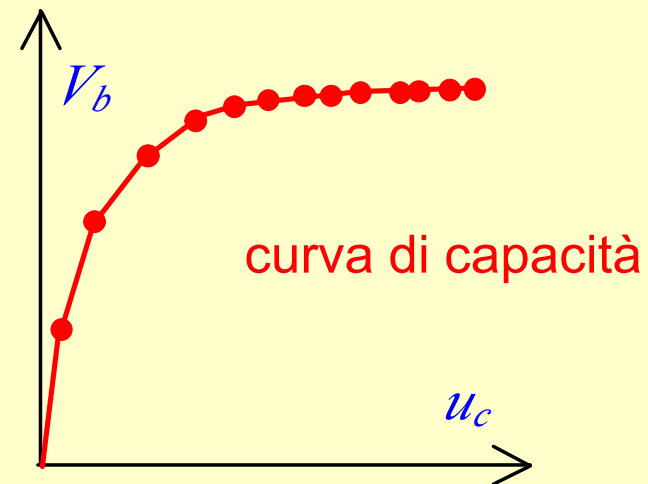
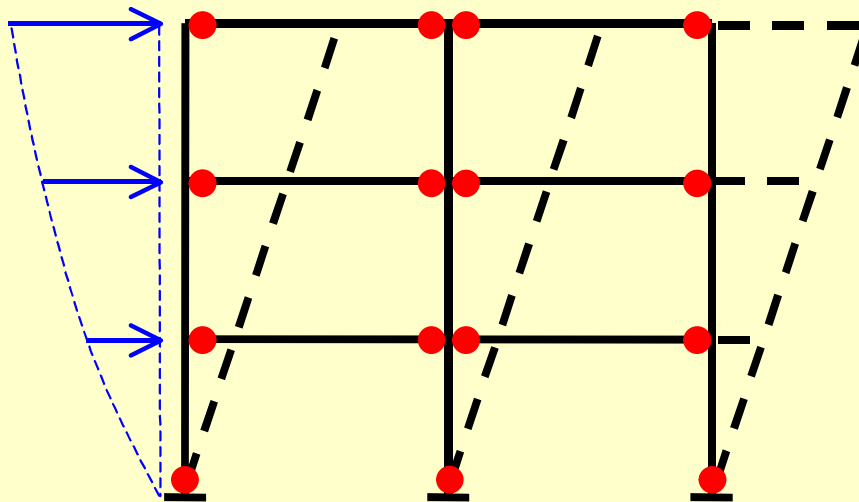
Si applicano la medesima procedura anche per i sistemi non lineari.
Si fanno crescere le forze seguendo l'evoluzione delle cerniere plastiche



Formulazione del metodo

Sistemi a comportamento non lineare

Si applicano la medesima procedura anche per i sistemi non lineari.
Si fanno crescere le forze seguendo l'evoluzione delle cerniere plastiche fino al raggiungimento della crisi



Formulazione del metodo

Sistemi a comportamento non lineare

Si applicano la medesima procedura anche per i sistemi non lineari.
Si fanno crescere le forze seguendo l'evoluzione delle cerniere plastiche fino al raggiungimento della crisi

La crisi può manifestarsi per:

- formazione di un cinematismo;
- collasso fragile di una membratura;
- eccesso di rotazione in una cerniera plastica;

Formulazione del metodo

Rotazione ultima cerniera plastica

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_v}{3} + 0,0013 \left(1 + 1,5 \frac{h}{L_v} \right) + 0,13 \phi_y \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}} \quad \text{per travi e pilastri}$$

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_v}{3} + 0,002 \left(1 - 0,125 \frac{L_v}{h} \right) + 0,13 \phi_y \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}} \quad \text{per pareti}$$

θ_y : rotazione rispetto alla corda allo snervamento

θ_{up} : rotazione plastica ultima della cerniera

$\theta_u = \theta_y + \theta_{up}$: rotazione ultima rispetto alla corda

ϕ_y : curvatura allo snervamento

$L_v = M / T$: luce di taglio

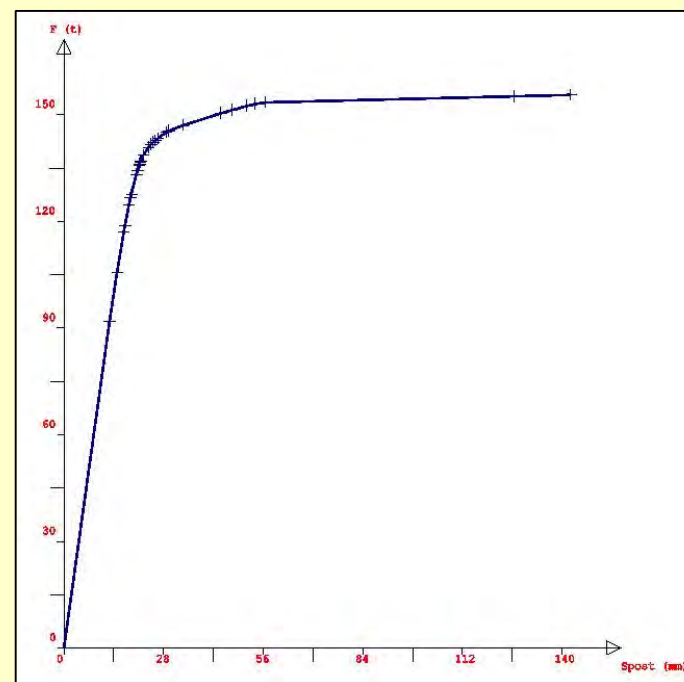
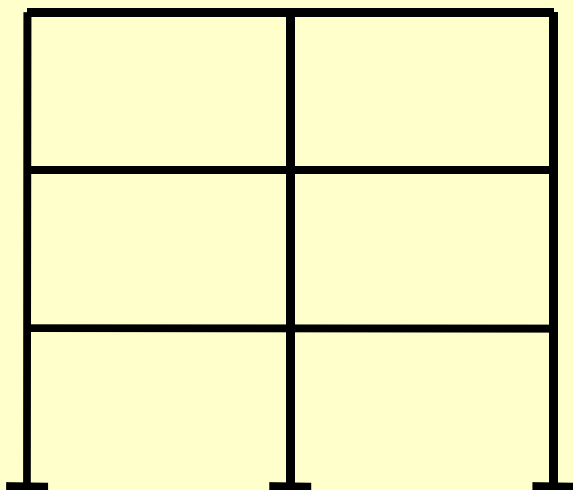
d_b : diametro medio barre, h : altezza della sezione

f_c, f_y : resistenza del calcestruzzo e resistenza snervamento barre

Verifica di sicurezza

Capacità del sistema

La **curva di capacità** rappresenta una misura della capacità del sistema strutturale di deformarsi sotto l'effetto dei carichi orizzontali (misura della duttilità strutturale)

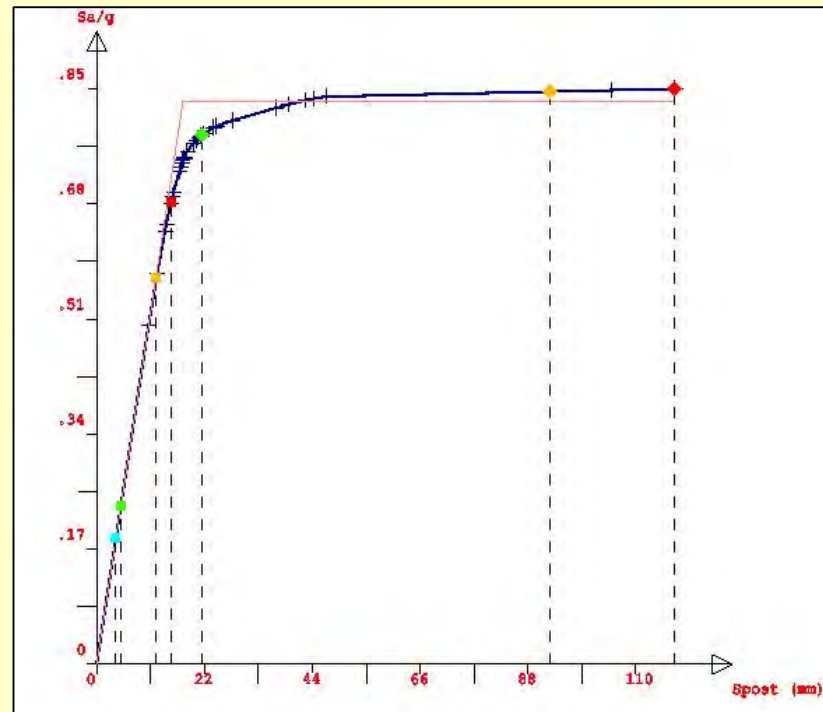
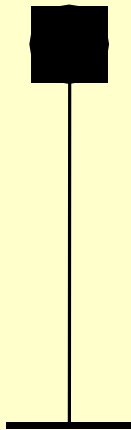




Verifica di sicurezza

Capacità del sistema

Dalla curva di capacità del sistema si determina quella dell'oscillatore elementare equivalente (**spettro ADSR**), usualmente approssimata con una bilatera



Verifica di sicurezza

Capacità del sistema

Dalla curva di capacità del sistema si determina quella dell'oscillatore elementare equivalente (spettro ADSR), usualmente approssimata con una bilatera

Lo spettro ADSR rappresenta una misura della capacità di spostamento dell'oscillatore equivalente al sistema strutturale

Possono quindi essere determinate le caratteristiche dinamiche (periodo, rigidità iniziale, limite elastico) dell'oscillatore equivalente

Verifica di sicurezza

Domanda sismica

Si definisce domanda sismica la richiesta di spostamento sotto sisma (spettro anelastico dello spostamento $S_{De}(T)$)

Lo si determina a partire dallo spettro elastico delle accelerazioni fornito dalla norma $S_e(T)$

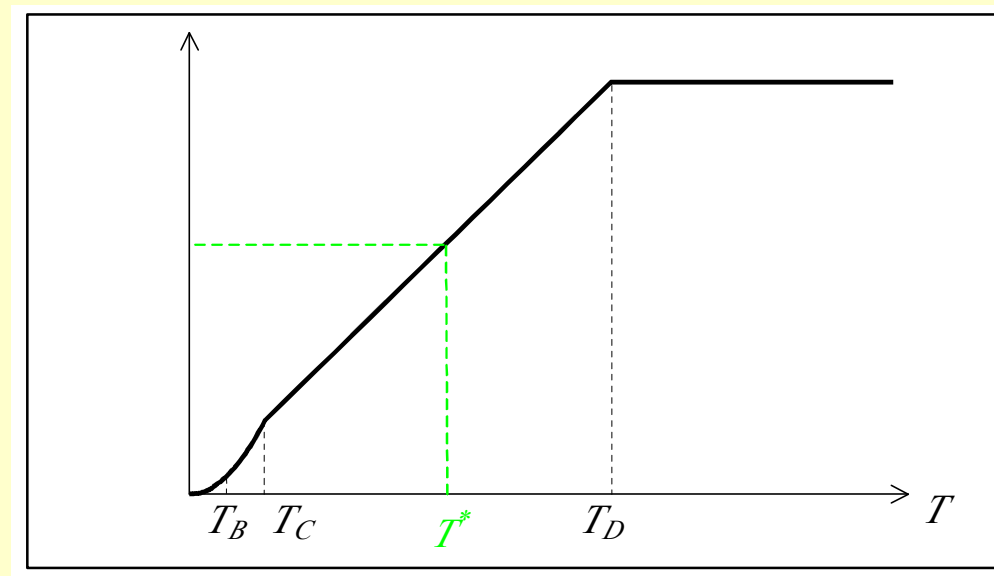
$$S_{De}(T) = S_e(T) \cdot \left(\frac{T}{2 \cdot \pi} \right)^2$$

$$\begin{cases} d_{\max} = d_{e,\max} = S_{De}(T) & T \geq T_C \\ d_{\max} = \frac{d_{e,\max}}{q} \left[1 + (q-1) \cdot \frac{T_C}{T} \right] & T < T_C \end{cases} \quad q = \frac{S_{De}(T) \cdot m}{F_y^*}$$

Verifica di sicurezza

Domanda sismica

Noto il periodo T^* dell'oscillatore equivalente si determina il massimo spostamento richiesto dal sisma di progetto



Verifica di sicurezza

Verifica

La verifica di vulnerabilità si conduce confrontando la capacità di spostamento dell'oscillatore elementare equivalente con la richiesta (domanda) di spostamento dallo spettro di progetto

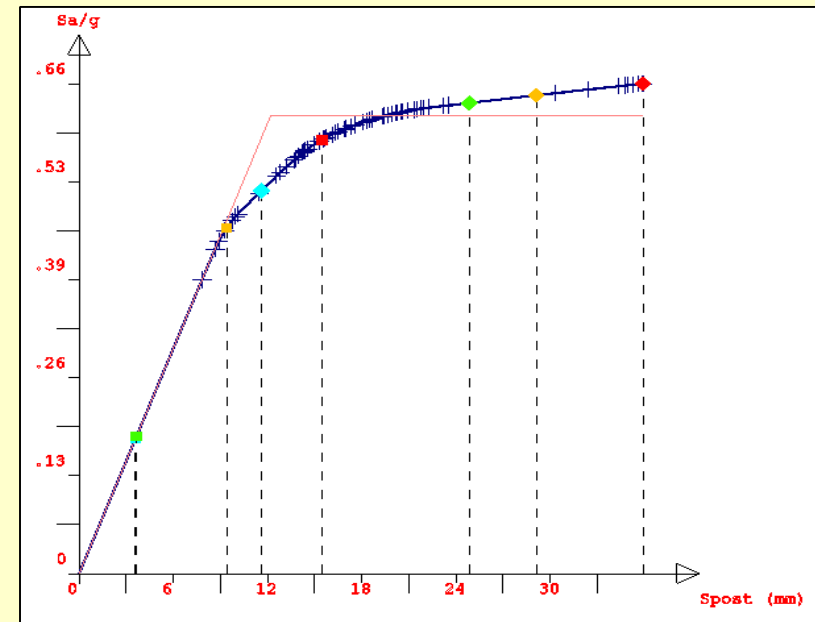
Nello spirito D.M. 2008 la verifica di sicurezza sismica è ricondotta da una verifica di resistenza (confronto fra tensioni agenti ed ammissibili) ad una verifica di duttilità (confronto fra spostamento richiesto e disponibile)

Verifica di sicurezza

Verifica

Si definiscono sulla curva i vari livelli di prestazioni in termini di capacità di spostamento, e verificando che la domanda di spostamento dovuto al sisma atteso per quel livello di prestazione sia inferiore.

S.L.O.:	
■	Domanda di spostamento : 3.59 mm
◆	Capacita' di spostamento : 11.62 mm
	PgalO : .2 Ag/g
S.L.D.:	
■	Domanda di spostamento : 3.66 mm
◆	Capacita' di spostamento : 24.85 mm
	PgalD : .37 Ag/g
S.L.V.:	
■	Domanda di spostamento : 9.39 mm
◆	Capacita' di spostamento : 29.1 mm
	PgalV : .37 Ag/g
S.L.C.:	
■	Domanda di spostamento : 15.45 mm
◆	Capacita' di spostamento : 35.89 mm
	PgalC : .37 Ag/g



Verifica di sicurezza

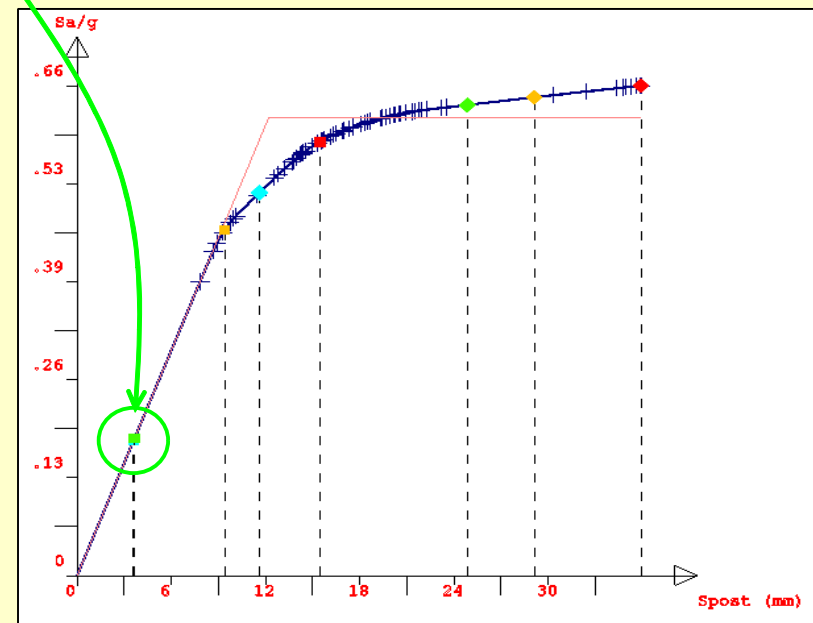
Verifica allo S.L.O.

S.L.O.:

- Domanda di spostamento : 3.59 mm
- ◆ Capacita' di spostamento : 11.62 mm
- PgaLO : .2 Ag/g

S.L.O.:

- Domanda di spostamento : 3.59 mm
- ◆ Capacita' di spostamento : 11.62 mm
- PgaLO : .2 Ag/g





Verifica di sicurezza

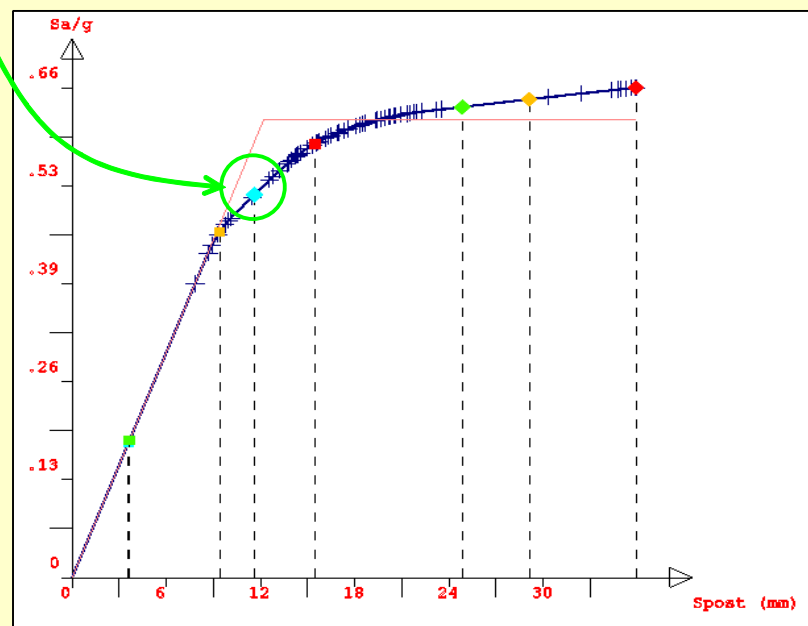
Verifica allo S.L.O.

S.L.O.:

- Domanda di spostamento : 3.59 mm
- ◆ Capacita' di spostamento : 11.62 mm
- PgaLO : .2 Ag/g

S.L.O.:

- Domanda di spostamento : 3.59 mm
- ◆ Capacita' di spostamento : 11.62 mm
- PgaLO : .2 Ag/g



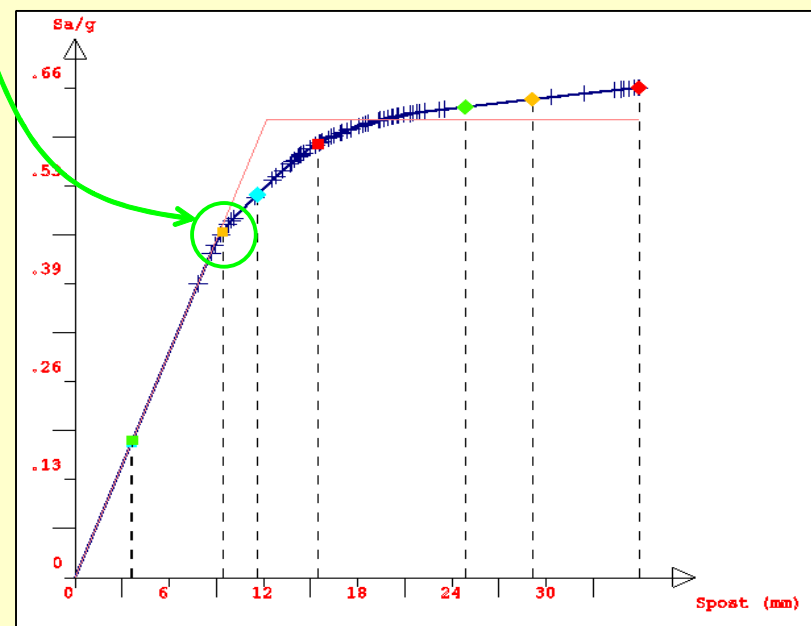


Verifica di sicurezza

Verifica allo S.L.V.

S.L.V. :	
■	Domanda di spostamento : 9.39 mm
◆	Capacita' di spostamento : 29.1 mm
	PgaLV : .37 Ag/g

S.L.V. :	
■	Domanda di spostamento : 9.39 mm
◆	Capacita' di spostamento : 29.1 mm
	PgaLV : .37 Ag/g

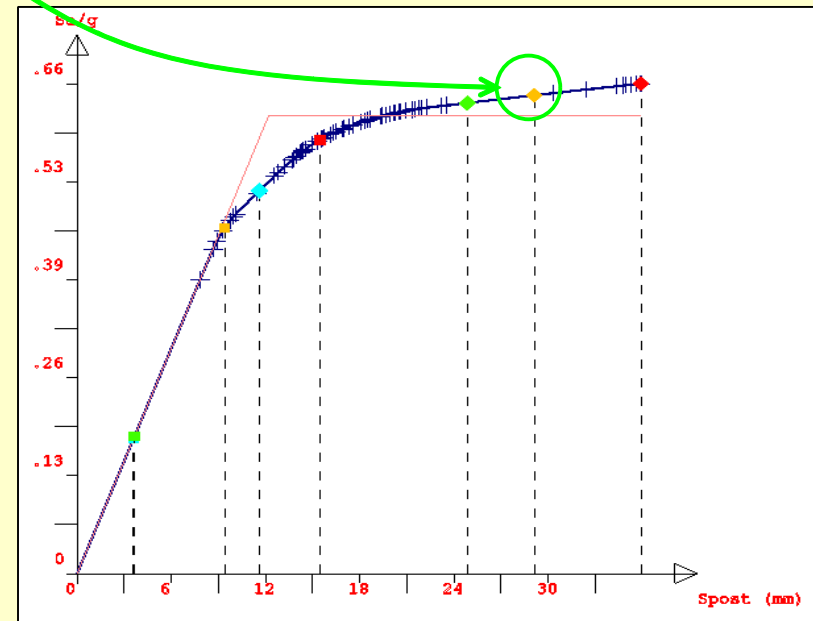


Verifica di sicurezza

Verifica allo S.L.V.

S.L.V. :	
■	Domanda di spostamento : 9.39 mm
◆	Capacita' di spostamento : 29.1 mm
	PgaLV : .37 Ag/g

S.L.V. :	
■	Domanda di spostamento : 9.39 mm
◆	Capacita' di spostamento : 29.1 mm
	PgaLV : .37 Ag/g



Verifica di sicurezza

Verifica

La verifica sismica tramite analisi push-over tiene conto, seppur in forma approssimata, del comportamento non lineare del sistema strutturale

La duttilità strutturale interviene direttamente nell'analisi e non si traduce in una fittizia riduzione delle azioni sismiche tramite fattore di struttura q

La verifica tramite analisi push-over non richiede quindi l'applicazione del criterio della **gerarchia delle resistenze**, e risulta quindi il metodo di verifica più efficace (se non unico) per gli edifici esistenti progettati prima dell'avvento delle norme sismiche

Modello strutturale

Per il tracciamento della curva di capacità è necessaria la definizione di un modello non lineare del sistema strutturale

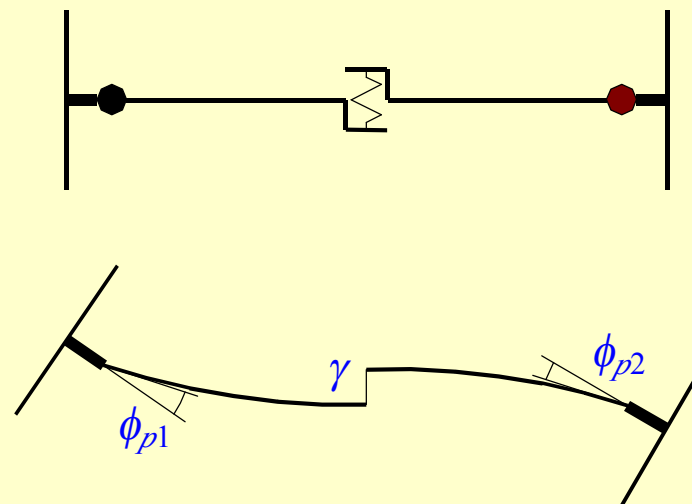
Possono essere adottati:

- modello a plasticizzazione concentrata (cerniere plastiche)
- modello a plasticizzazione distribuita

Modello strutturale

Modello a plasticizzazione concentrata

le sezioni dell'asta hanno comportamento elastico fino al raggiungimento del momento plastico, cui corrisponde la formazione della cerniera plastica



Modello strutturale

Modello a plasticizzazione concentrata

in OpenSees è adottato l'elemento *beamWithHinges*

Beam With Hinges Element

Contact Author:

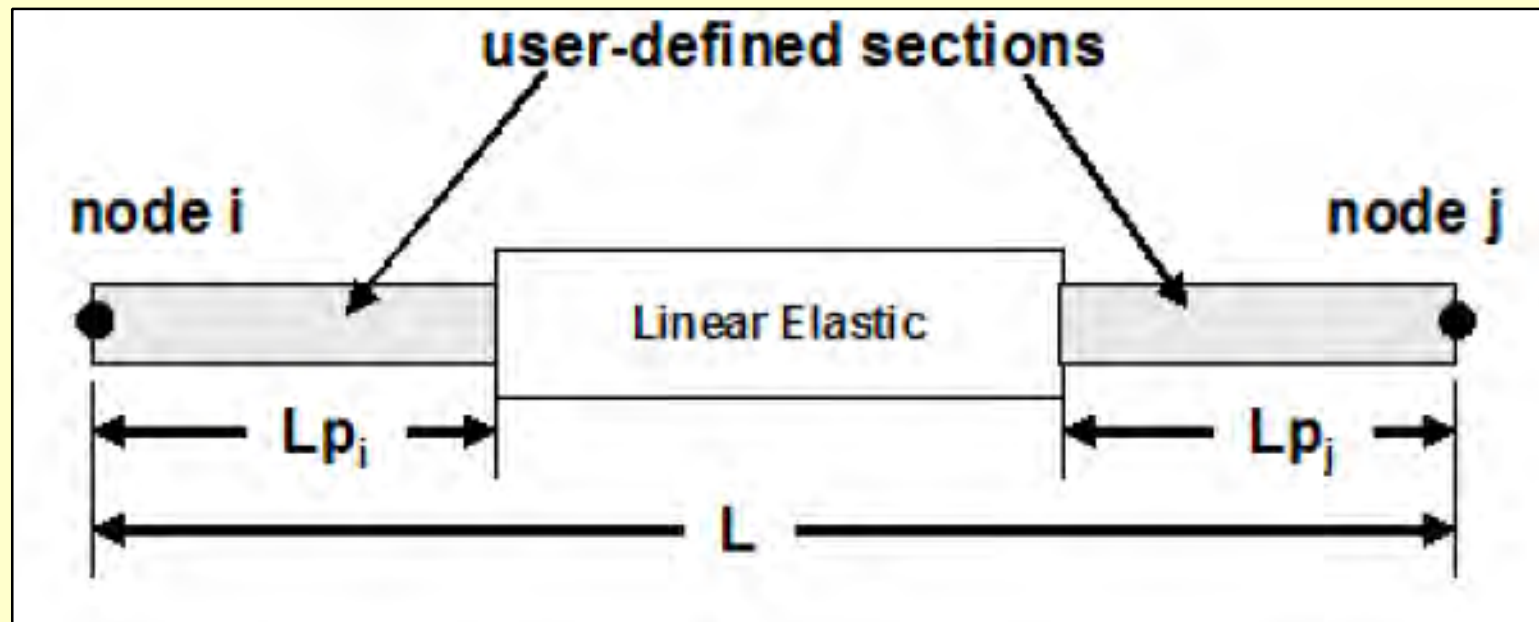
Michael H. Scott

Oregon State University

Modello strutturale

Modello a plasticizzazione concentrata

in OpenSees è adottato l'elemento *beamWithHinges*



Modello strutturale

Modello a plasticizzazione distribuita

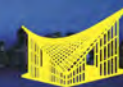
Le sezioni dell'asta hanno comportamento sempre non lineare in ogni sezione congruentemente con i legami costitutivi adottati per i materiali

in OpenSees è adottato l'elemento *nonlinearBeamColumn*

Nonlinear Beam Column Element

This command is used to construct a nonlinearBeamColumn element object, which is based on the non-iterative (or iterative) force formulation, and considers the spread of plasticity along the element.

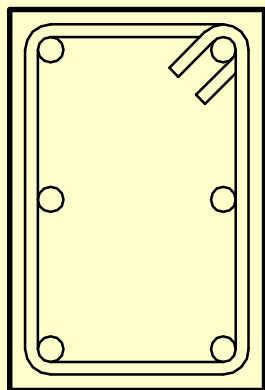
```
element nonlinearBeamColumn $eleTag $iNode $jNode $numIntgrPts $secTag  
$transfTag <-mass $massDens> <-iter $maxIters $tol>
```

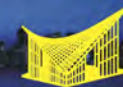


Modello strutturale

Sezioni

per le sezioni degli elementi strutturali è adottato il modello a fibre

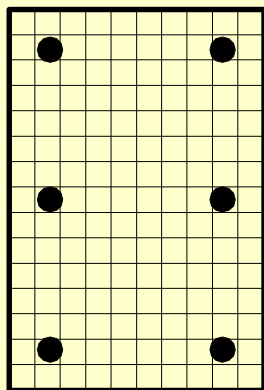
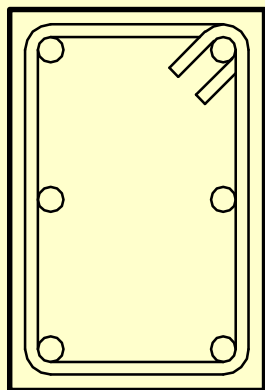




Modello strutturale

Sezioni: modello a fibre

Si suddivide la sezioni in fibre

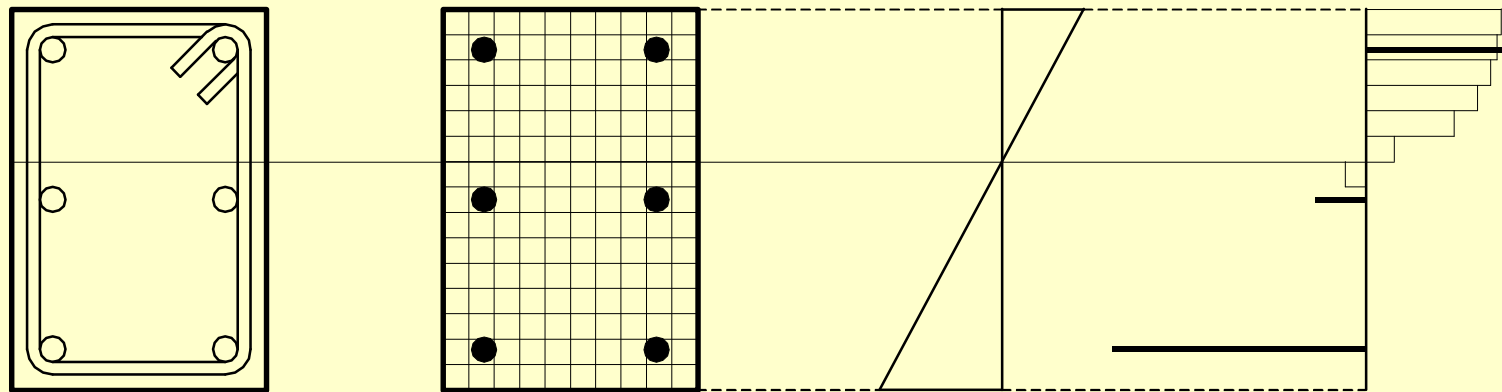


Modello strutturale

Sezioni: modello a fibre

Si suddivide la sezioni in fibre

A partire dalle deformazioni, dai legami costitutivi adottati per i materiali si associa ad ogni fibra la tensione corrispondente



Modello strutturale

Sezioni: modello a fibre

- si tiene conto della reale distribuzioni di tensioni nei materiali e non di valori mediati sulla sezione
- la parzializzazione della sezione dovuta alla modesta resistenza a trazione del calcestruzzo è tenuta in conto in maniera accurata
- è possibile cogliere gli effetti locali (espulsione copriferro, plasticizzazione singola armatura etc..)

Modello strutturale

Sezioni: modello a fibre

in OpenSees è possibile definire sezioni a fibre di geometria qualsiasi

Fiber Section

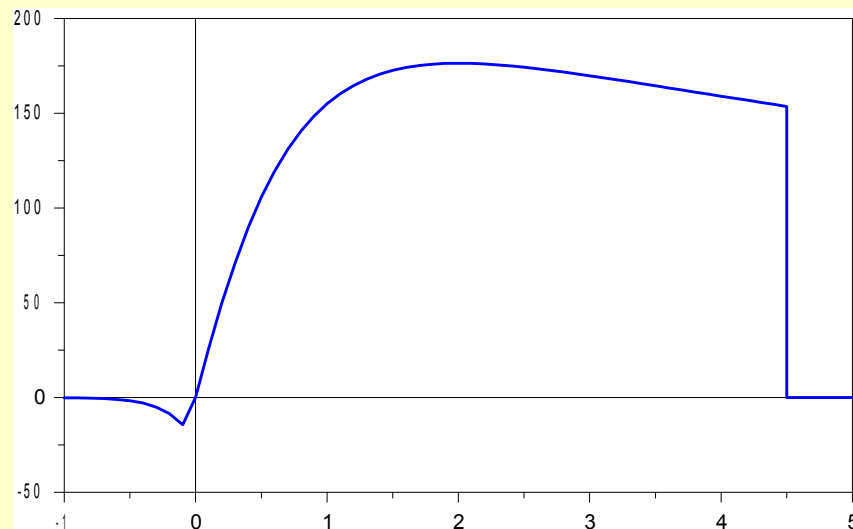
```
section Fiber $secTag {  
    fiber <fiber arguments>  
    patch <patch arguments>  
    laver <laver arguments>
```

Modello strutturale

Legami costitutivi dei materiali

in *OpenSees* sono presenti diversi legami costitutivi per calcestruzzo ed acciaio

Calcestruzzo: i legami costitutivi tengono conto della resistenza a trazione del materiale, del ramo di softening a compressione e del comportamento isteretico del materiale



Modello strutturale

Legami costitutivi dei materiali

in *OpenSees* sono presenti diversi legami costitutivi per calcestruzzo ed acciaio

Calcestruzzo

Concrete01 Material -- Zero Tensile Strength

This command is used to construct a uniaxial Kent-Scott-Park concrete material object with degraded linear unloading/reloading stiffness according to the work of Karsan-Jirsa and no tensile strength. (REF: Fedeas).

```
uniaxialMaterial Concrete01 $matTag $fpc $epsc0 $fpcu $epsU
```

Concrete02 Material -- Linear Tension Softening

This command is used to construct a uniaxial concrete material object with tensile strength and linear tension softening. This is a Fedeas Material and the source code may not be available, yet.

```
uniaxialMaterial Concrete02 $matTag $fpc $epsc0 $fpcu $epsU $lambda $ft $Ets
```

Modello strutturale

Legami costitutivi dei materiali

in *OpenSees* sono presenti diversi legami costitutivi per calcestruzzo ed acciaio

Calcestruzzo

Concrete03 Material -- Nonlinear Tension Softening

This command is used to construct a uniaxial concrete material object with tensile strength and nonlinear tension softening. This is a Fedeeas Material and the source code may not be available, yet.

```
uniaxialMaterial Concrete03 $matTag $fpc $epsc0 $fpcu $epsU $lambda $ft
$epst0 $ft0 $beta $epstu
```

Concrete04 Material -- Popovics Concrete Material

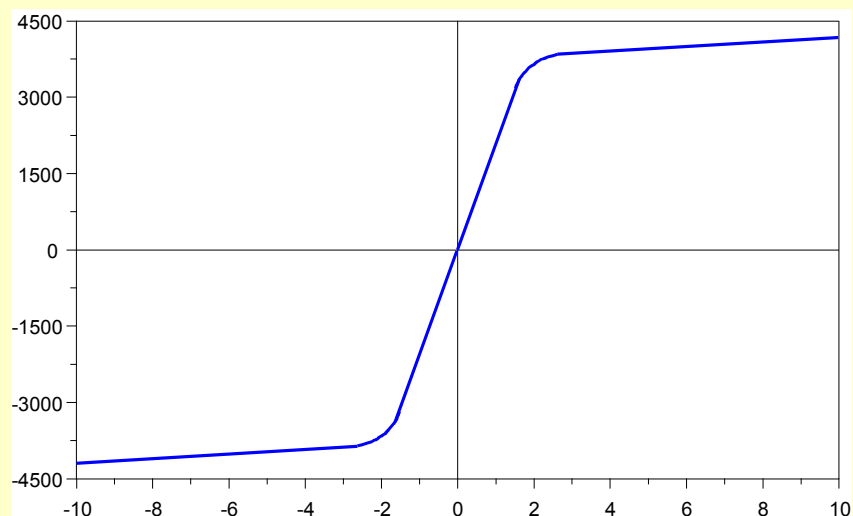
This command is used to construct a uniaxial Popovics concrete material object with degraded linear unloading/reloading stiffness according to the work of Karsan. linear and tensile strength with

Modello strutturale

Legami costitutivi dei materiali

in *OpenSees* sono presenti diversi legami costitutivi per calcestruzzo ed acciaio

Acciaio: i legami costitutivi tengono conto del ramo di hardening (incrudimento) e del tratto di raccordo fra comportamento elastico e plastico



Modello strutturale

Legami costitutivi dei materiali

in *OpenSees* sono presenti diversi legami costitutivi per calcestruzzo ed acciaio

Acciaio

Steel01 Material

This command is used to construct a uniaxial bilinear steel material object with kinematic hardening and optional isotropic hardening described by a non-linear evolution equation (REF: Fedeeas).

```
uniaxialMaterial Steel01 $matTag $Fy $E0 $b <$a1 $a2 $a3 $a4>
```

Steel02 Material -- Giuffré-Menegotto-Pinto Model with Isotropic Strain Hardening

This command is used to construct a uniaxial Giuffre-Menegotto-Pinto steel material object with isotropic strain hardening.

```
uniaxialMaterial Steel02 $matTag $Fy $E $b $R0 $cR1 $cR2 $a1 $a2 $a3 $a4
```

Analisi senza piani rigidi

$$***T * S_{pf} = F_i * S_i***$$

dove :

T = Tagliante alla base

S_{pf} = Spostamento del Punto di controllo Fittizio

F_i = Forza applicata al nodo i-esimo

S_i = Spostamento del nodo i-esimo

Horae

via C. Colombo,19/p6 - 06127 - Perugia
tel.075/5003198 - Fax 075/5004095



STS s.r.l.
Software Tecnico Scientifico



ANALISI PUSH-OVER

FINE