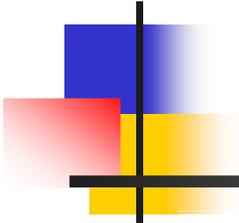


Ordine degli Ingegneri della Provincia di Pistoia
Corso sulla Vulnerabilità Sismica



Modelli evolutivi per la verifica del rischio di edifici esistenti

Quaderno 2 Semplici esempi di pushover

Prof. Enrico Spacone

Dipartimento di Ingegneria e Geologia
Università degli Studi "G. D'Annunzio" Chieti-Pescara

DIPARTIMENTO DI

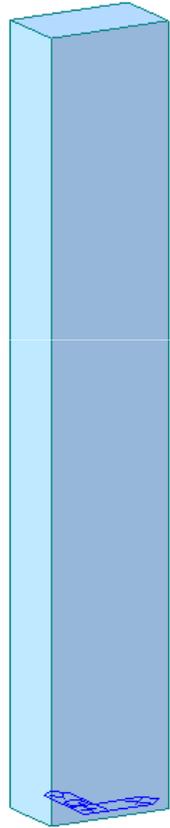
INGEGNERIA
E GEOLOGIA

31 Maggio 2012

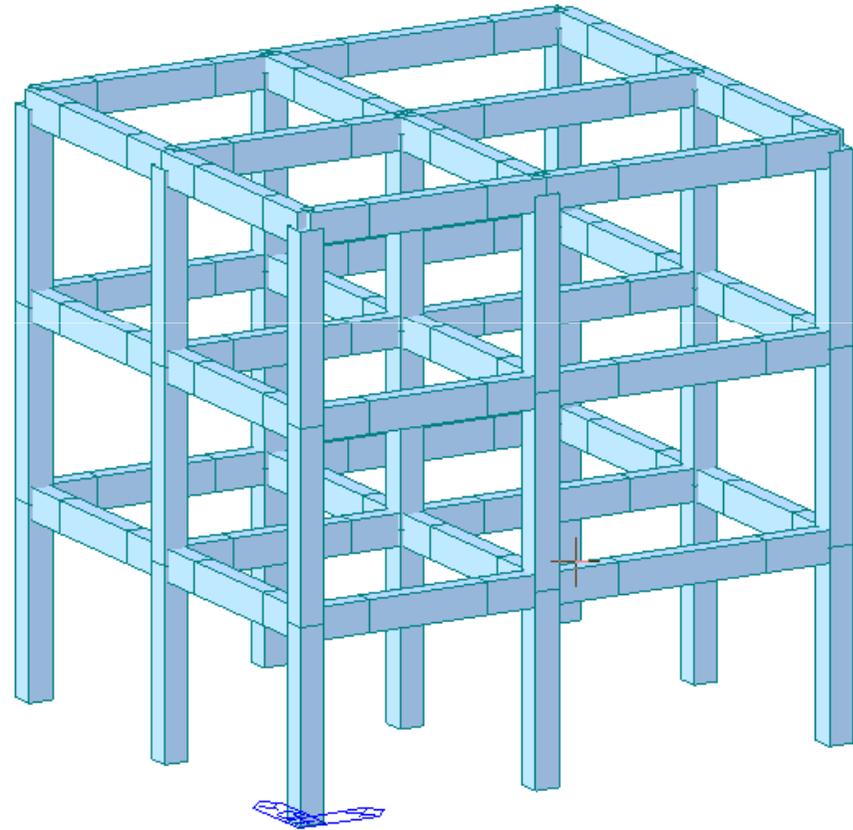


TEST CONOSCITIVI

Mensola

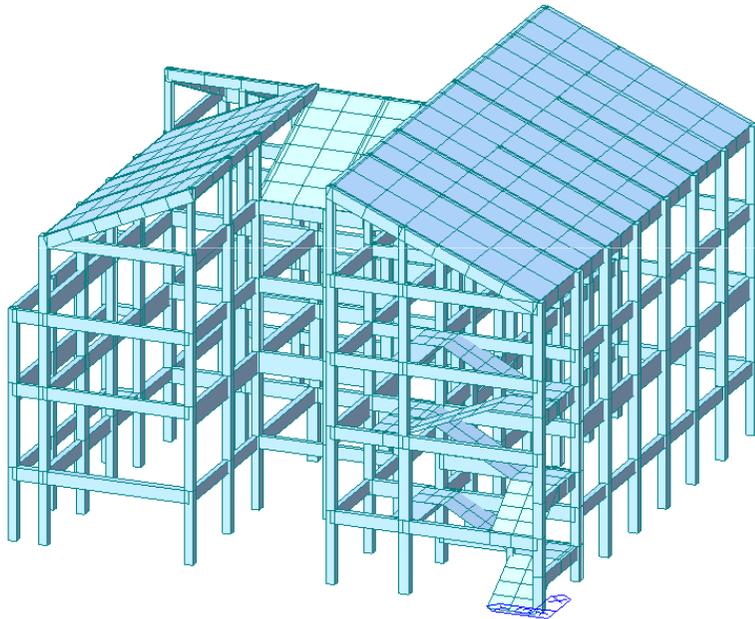


Edificio Semplice



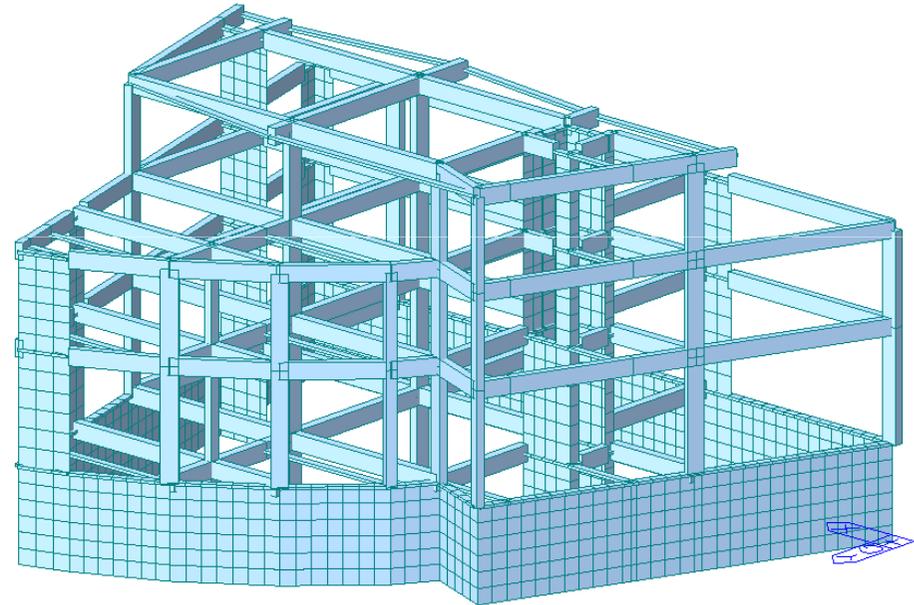
CASI REALI

Edificio Regolare



Edificio Irregolare

**Già visto! Analisi di vulnerabilità sismica
con spettro di risposta o fattore di struttura**



LA NORMATIVA ITALIANA – NTC 2008

Analisi statica non lineare – [7.3.4.1]

Si utilizza per i seguenti scopi:

- a) Valutare rapporti di sovraresistenza α_u / α_1 ;
- b) Verificare distribuzione domanda inelastica in edifici progettati con fattore q ;
- c) Metodo di progetto per edifici di nuova costruzione;
- d) ***Metodo per la valutazione di edifici esistenti.***

Si considerano almeno **due** distribuzioni, prese dai seguenti gruppi:

1. Principali: Gruppo 1 (le sue condizioni sono condizioni di applicabilità)

- Distribuzione forze proporzionale alle forze statiche (Massa 1° modo > 75%);
- **Distribuzione accelerazioni proporzionale al 1° modo nella direzione considerata;**
- Distribuzione corrispondente a quella dei tagli di piano derivanti da analisi dinamica lineare, se $T > T_C$.

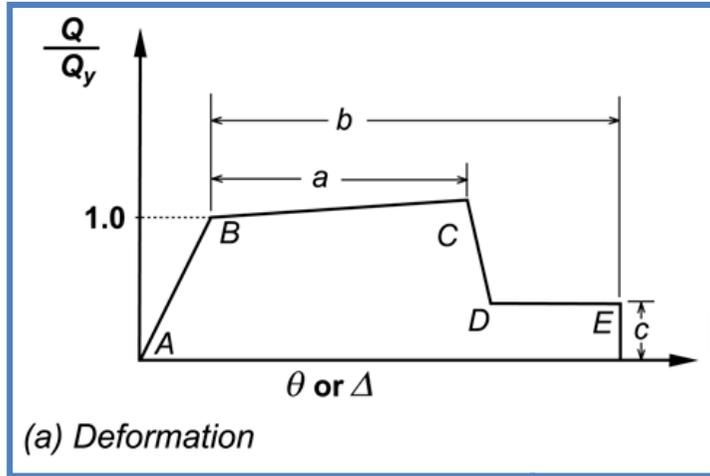
2. Secondarie: Gruppo 2

- **Distribuzione uniforme di forze, considerando accelerazioni uniformi lungo l'altezza;**
- Distribuzione adattiva, che muta al crescere dello spostamento del punto di controllo.

L'analisi è fatta associando al reale sistema un sistema ad un grado di libertà.

LA NORMATIVA INTERNAZIONALE

Plasticità Concentrata: FEMA 358



Per ogni tipologia di elemento (trave/colonna) sono definiti i parametri delle cerniere plastiche per rottura a flessionale e a taglio

Modeling Parameters and Numerical Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures— Reinforced Concrete Beams

Parametri di input:
 M_y e K_{iniz}

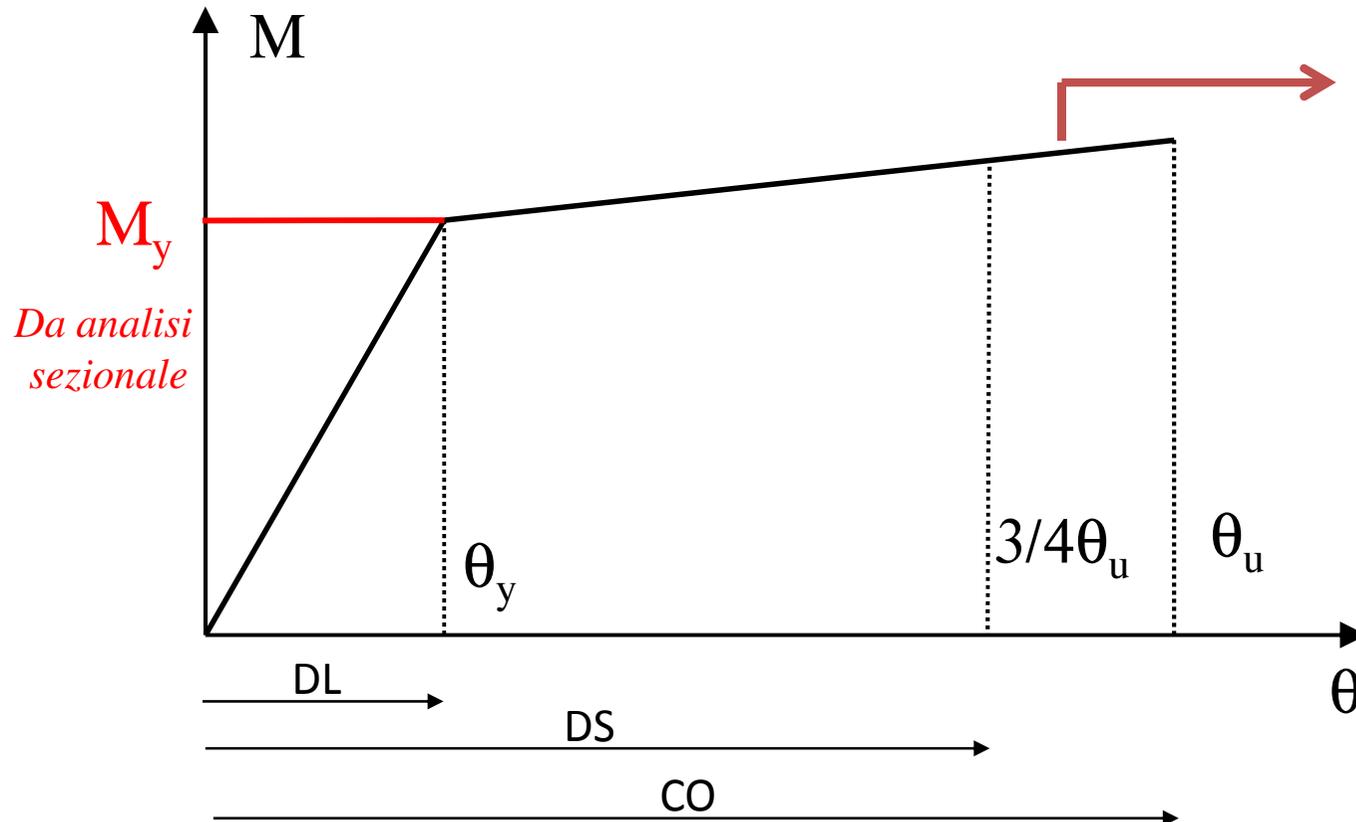


Si individua il punto B, cui corrisponde θ_y , ed a cascata tutti gli altri.

Conditions	Modeling Parameters ³			Acceptance Criteria ³						
	Plastic Rotation Angle, radians		Residual Strength Ratio	Plastic Rotation Angle, radians						
				Performance Level						
	a	b	c	IO	Component Type					
				LS	CP	LS	CP			
i. Beams controlled by flexure¹										
$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$	Trans. Reinf. ²	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$								
≤ 0.0	C	≤ 3	0.025	0.05	0.2	0.010	0.02	0.025	0.02	0.05
≤ 0.0	C	≥ 6	0.02	0.04	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.04
≥ 0.5	C	≤ 3	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.03
≥ 0.5	C	≥ 6	0.015	0.02	0.2	0.005	0.005	0.015	0.015	0.02
≤ 0.0	NC	≤ 3	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.03
≤ 0.0	NC	≥ 6	0.01	0.015	0.2	0.0015	0.005	0.01	0.01	0.015
≥ 0.5	NC	≤ 3	0.01	0.015	0.2	0.005	0.01	0.01	0.01	0.015
≥ 0.5	NC	≥ 6	0.005	0.01	0.2	0.0015	0.005	0.005	0.005	0.01

LA NORMATIVA INTERNAZIONALE

Plasticità Concentrata: EUROCODICI



Incrudimento non definito in alcun punto: si assume nullo nelle seguenti applicazioni. Un valore accettabile potrebbe essere 10%-20% (FEMA consigliano 10%).

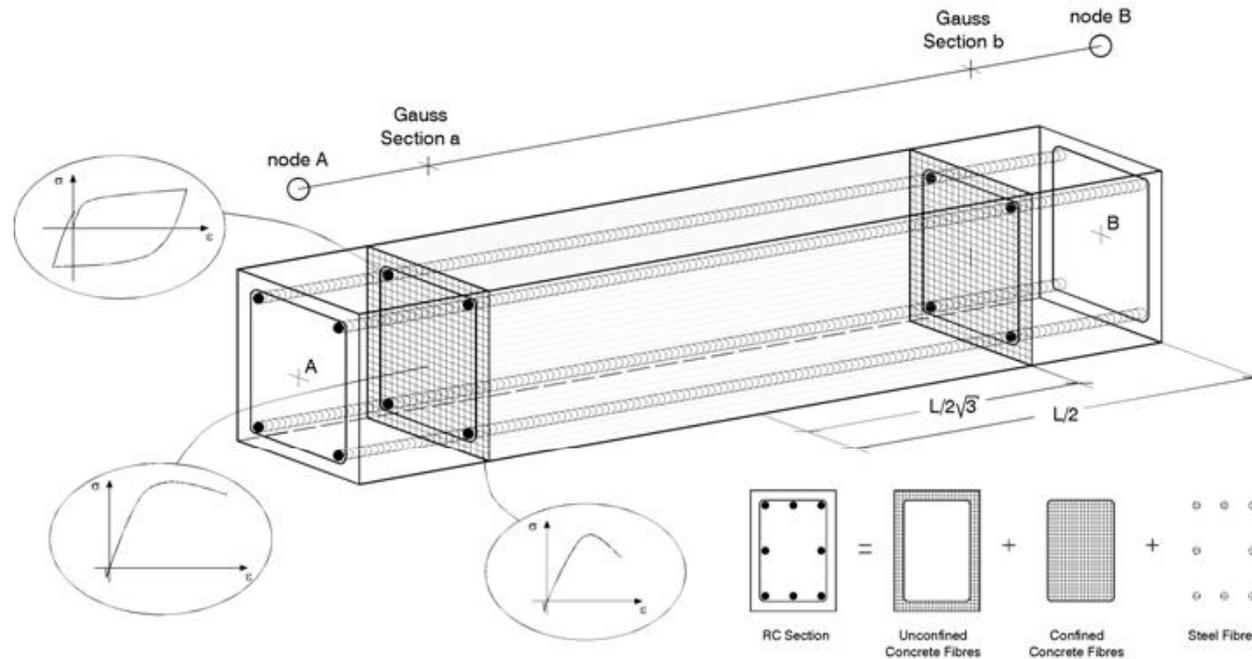
NTC08 – C8.7.2.5
$$\theta_y = \phi_y \frac{L_V}{3} + 0,0013 \left(1 + 1,5 \frac{h}{L_V} \right) + 0,13 \phi_y \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}}$$
 per travi e pilastri

NTC08 – C8.A.6.5
$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} \left(\theta_y + (\phi_u - \phi_y) L_{pl} \left(1 - \frac{0,5 L_{pl}}{L_V} \right) \right)$$

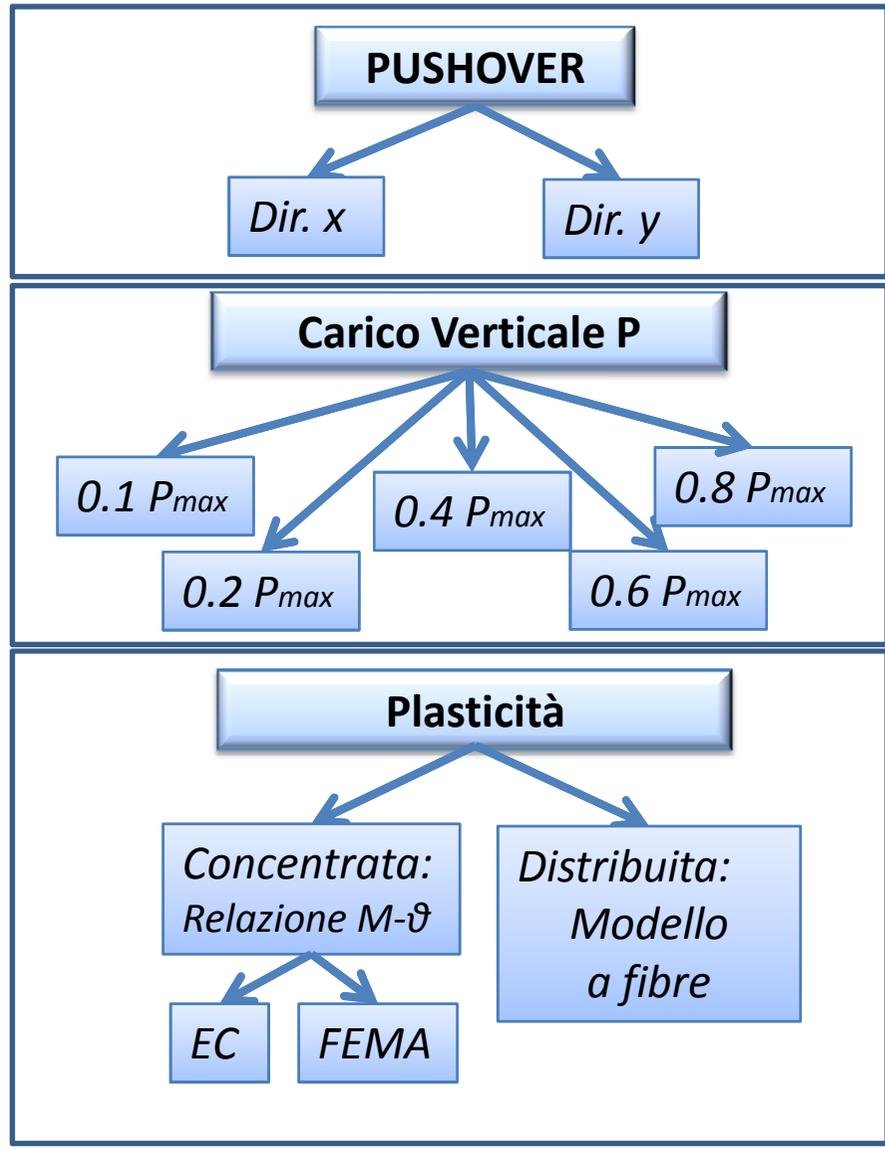
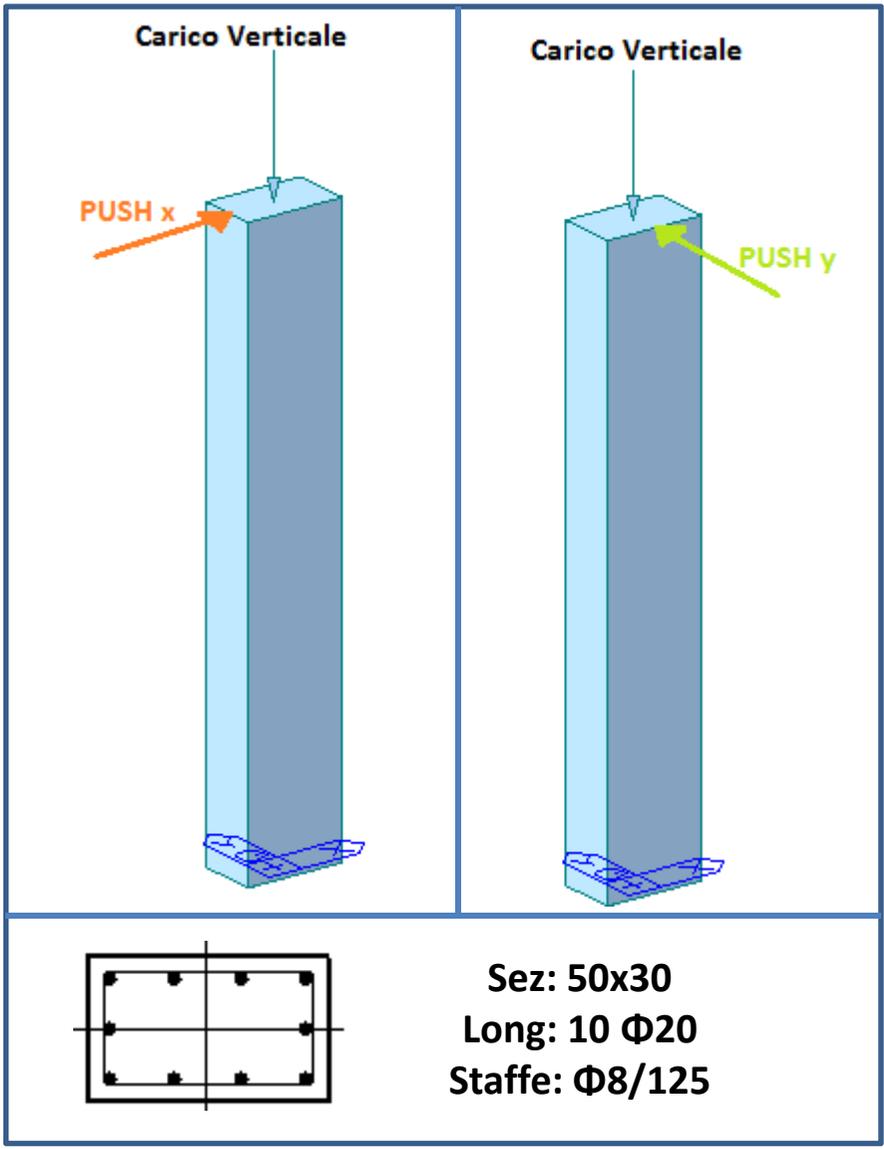
$$L_{pl} = 0,1 L_V + 0,17 h + 0,24 \frac{d_b L f_y}{\sqrt{f_c}}$$

LETTERATURA SCIENTIFICA

Plasticità Diffusa: modelli a fibre

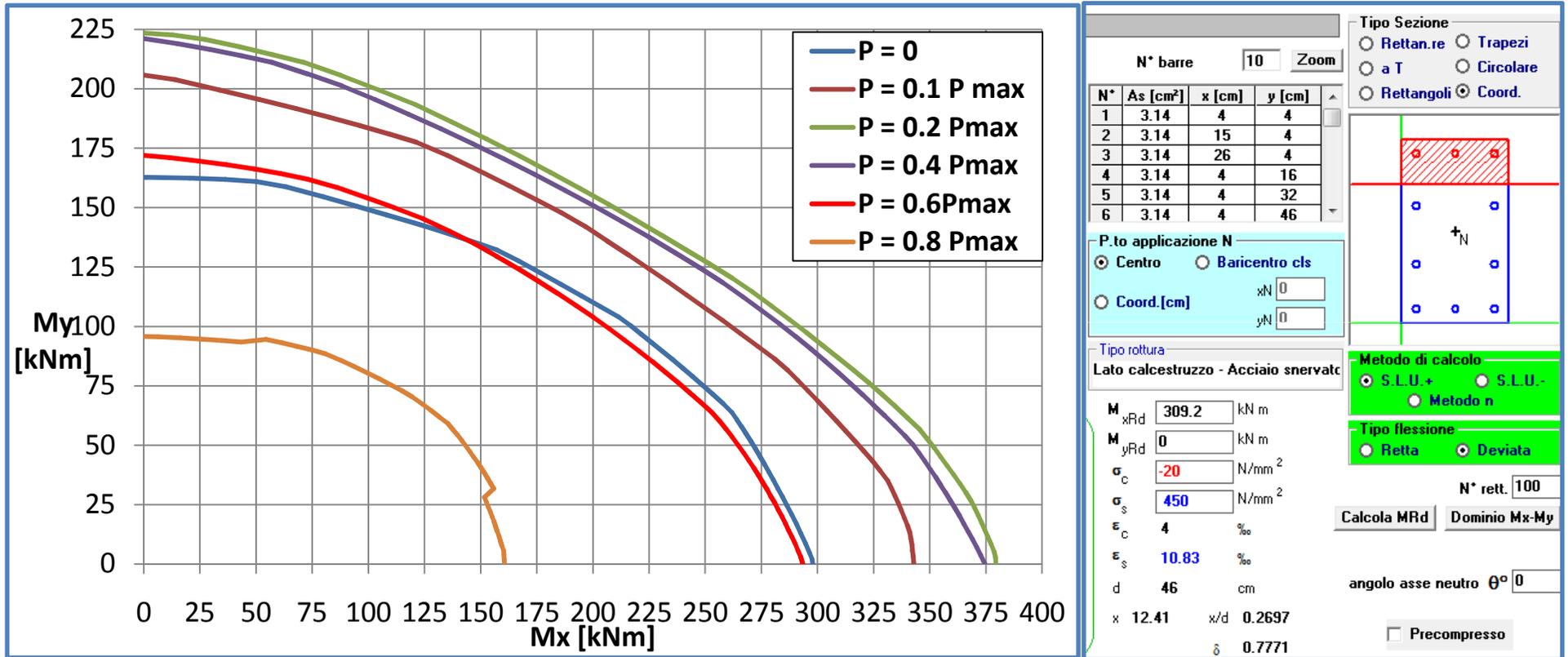


- *Ogni fibra contribuisce al comportamento sezionale attraverso la sua legge costitutiva (1D);*
- *Analisi sezionale nei punti di Gauss con definizione automatica di punti di controllo;*
- *Formulazione in rigidzze o spostamenti;*
- *Numero fibre equilibrato per avere risposta accurata ma evitare fenomeni di localizzazione.*



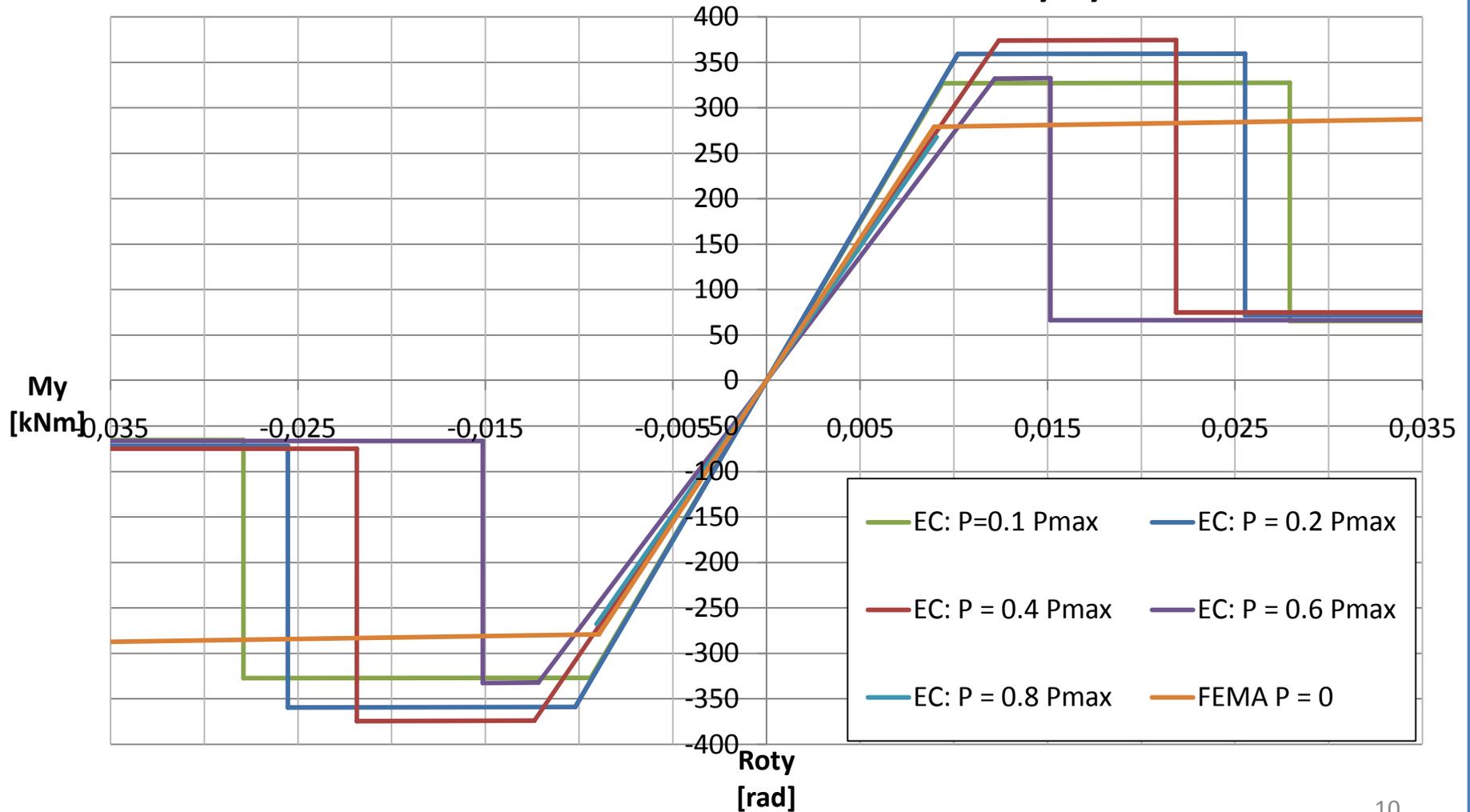
N.B. = non sono prese in considerazione cerniere a taglio, con rottura di tipo fragile ⁸

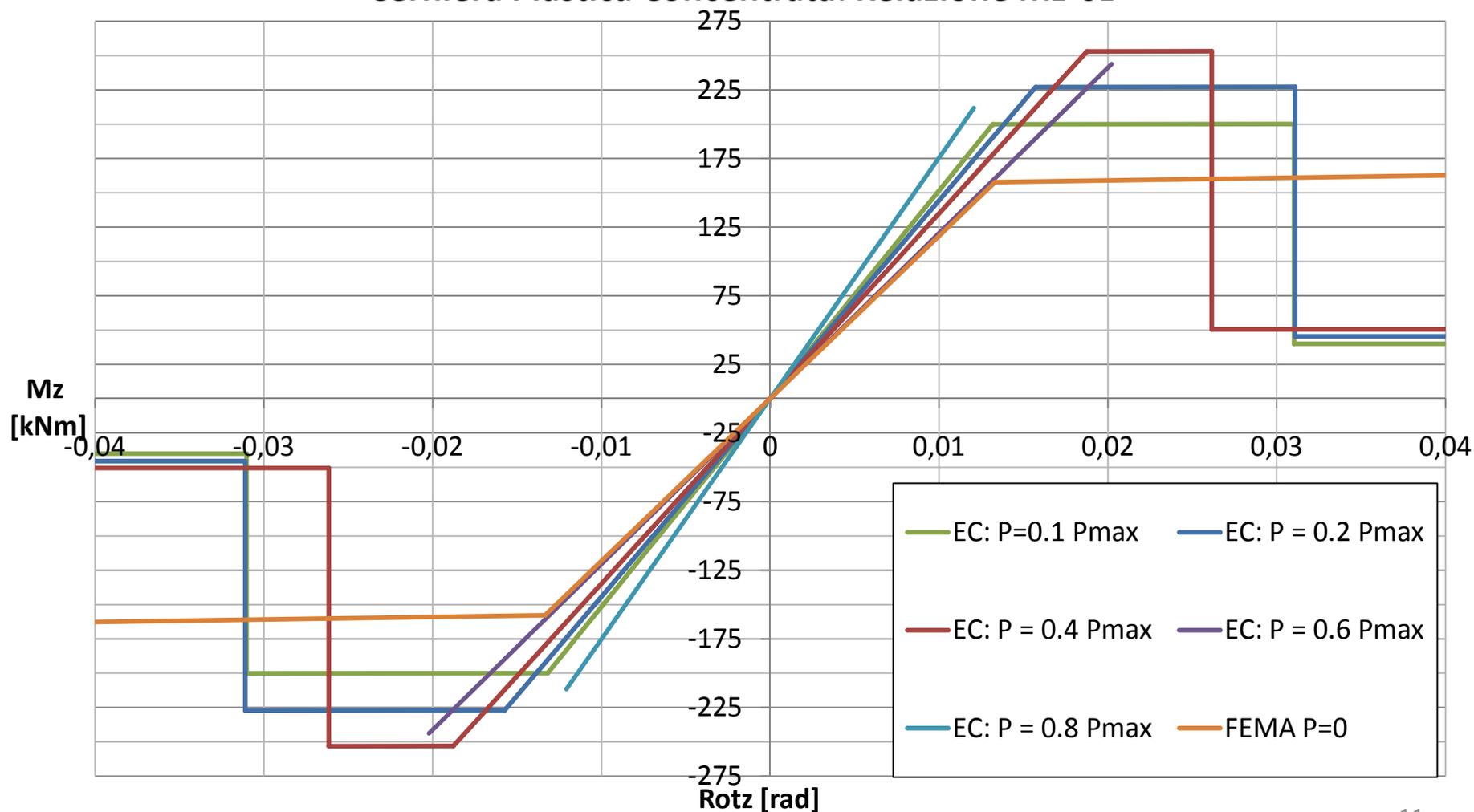
Pressoflessione Deviata: diagramma Mx - My



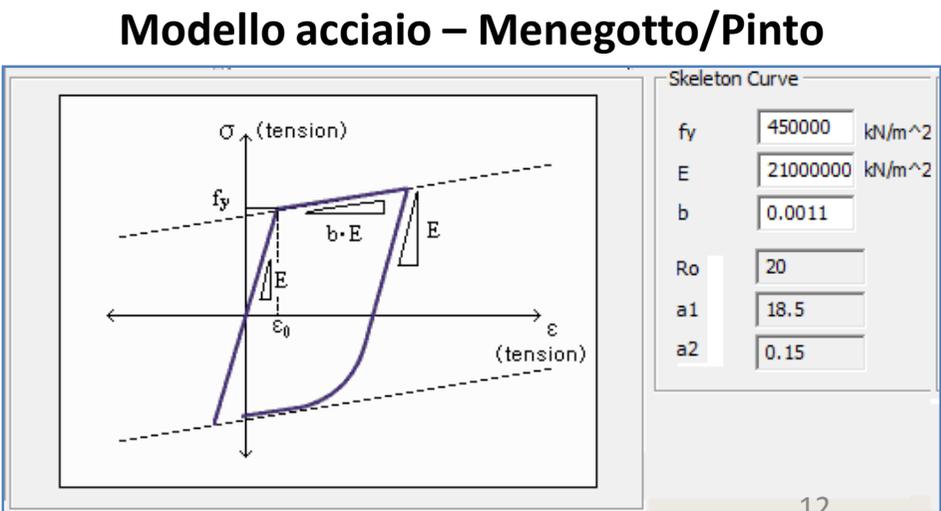
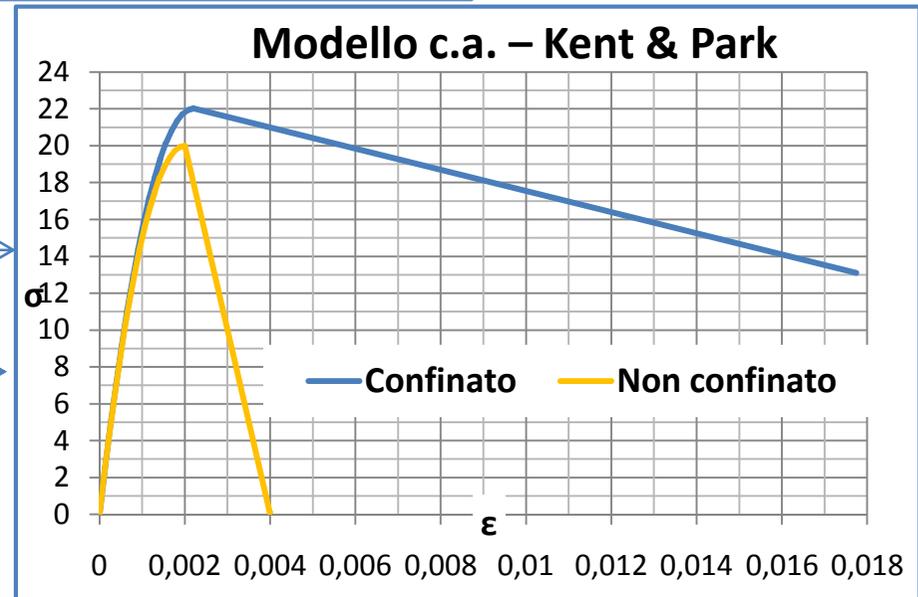
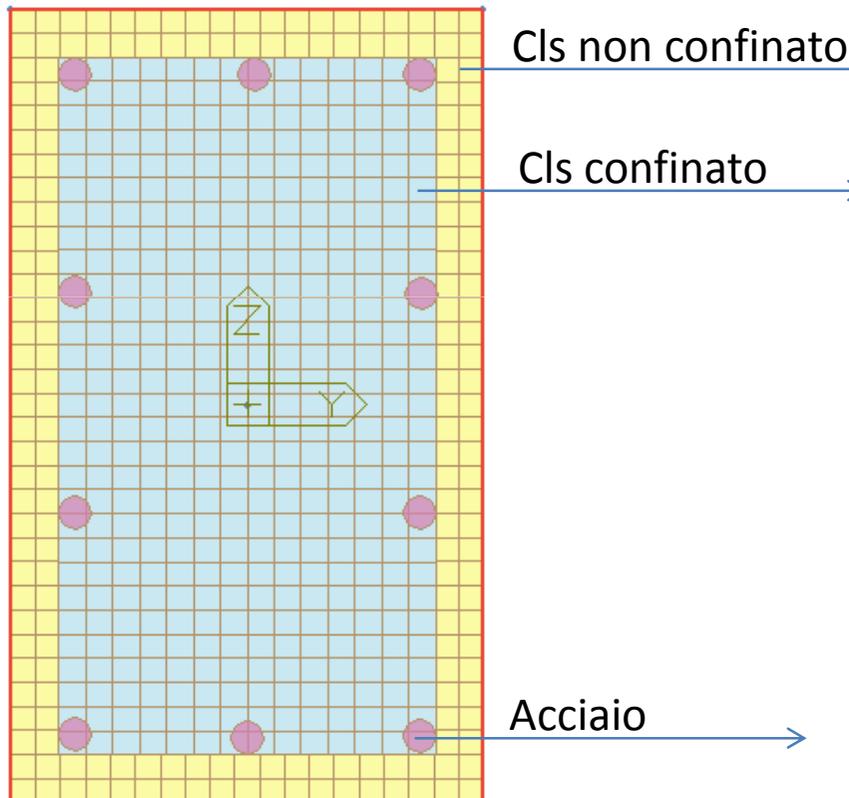
Plasticità Concentrata: Relazione $M_y-\vartheta_y$

Cerniera Plastica Concentrata: Relazione $M_y-\theta_y$

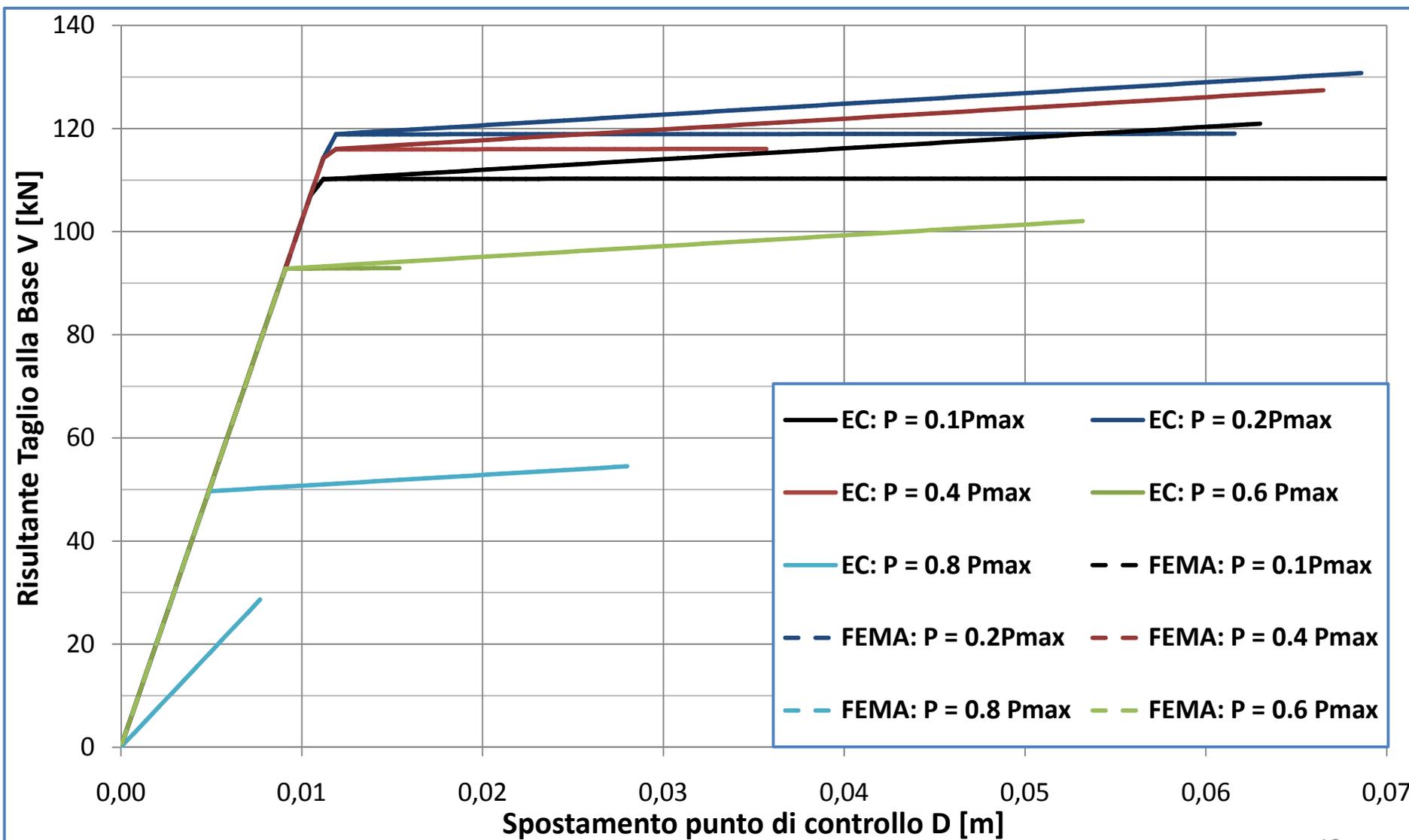


Plasticità Concentrata: Relazione $M_z - \vartheta_z$ Cerniera Plastica Concentrata: Relazione $M_z - \theta_z$ 

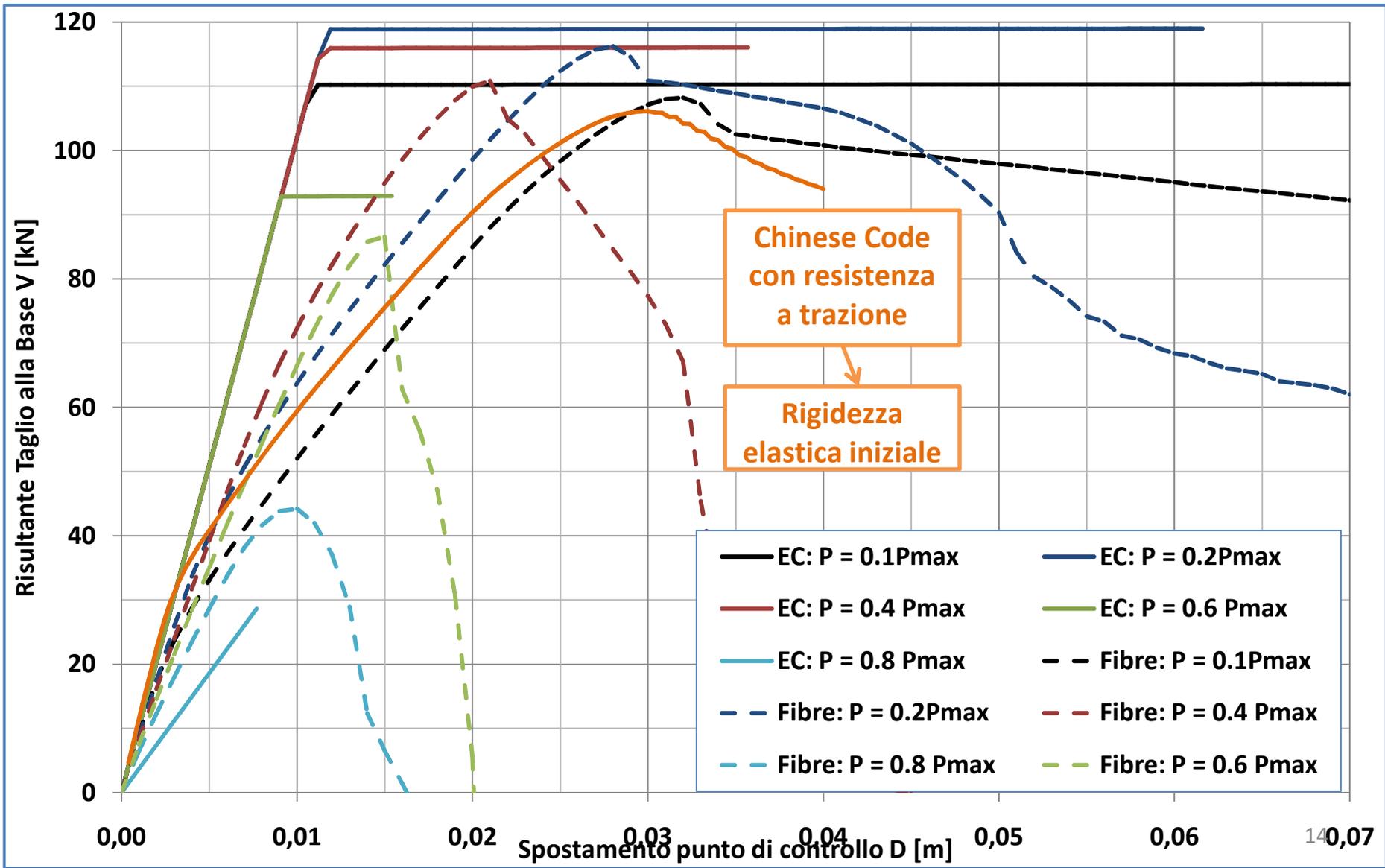
Plasticità Diffusa: Modelli c.a. e acciaio

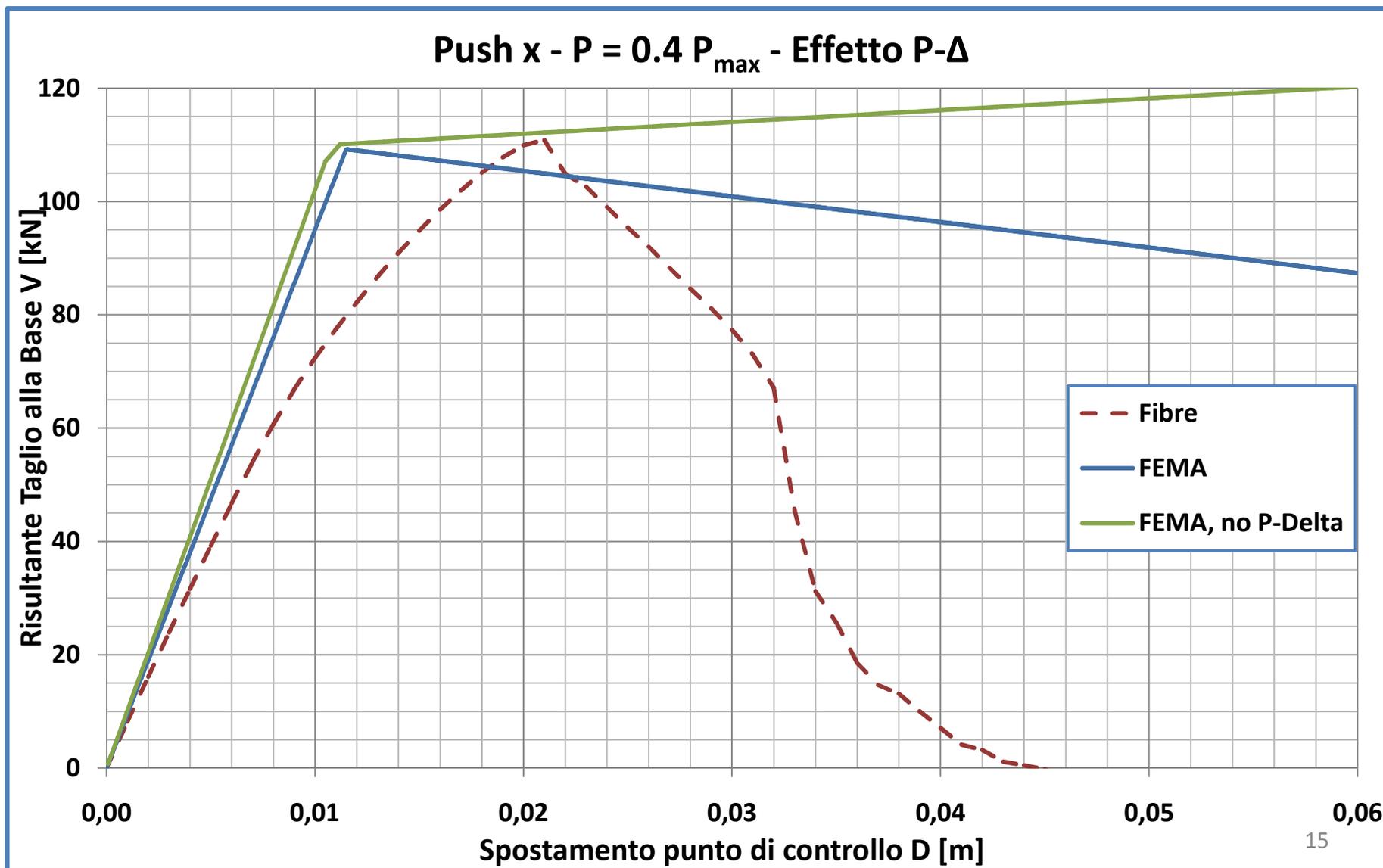


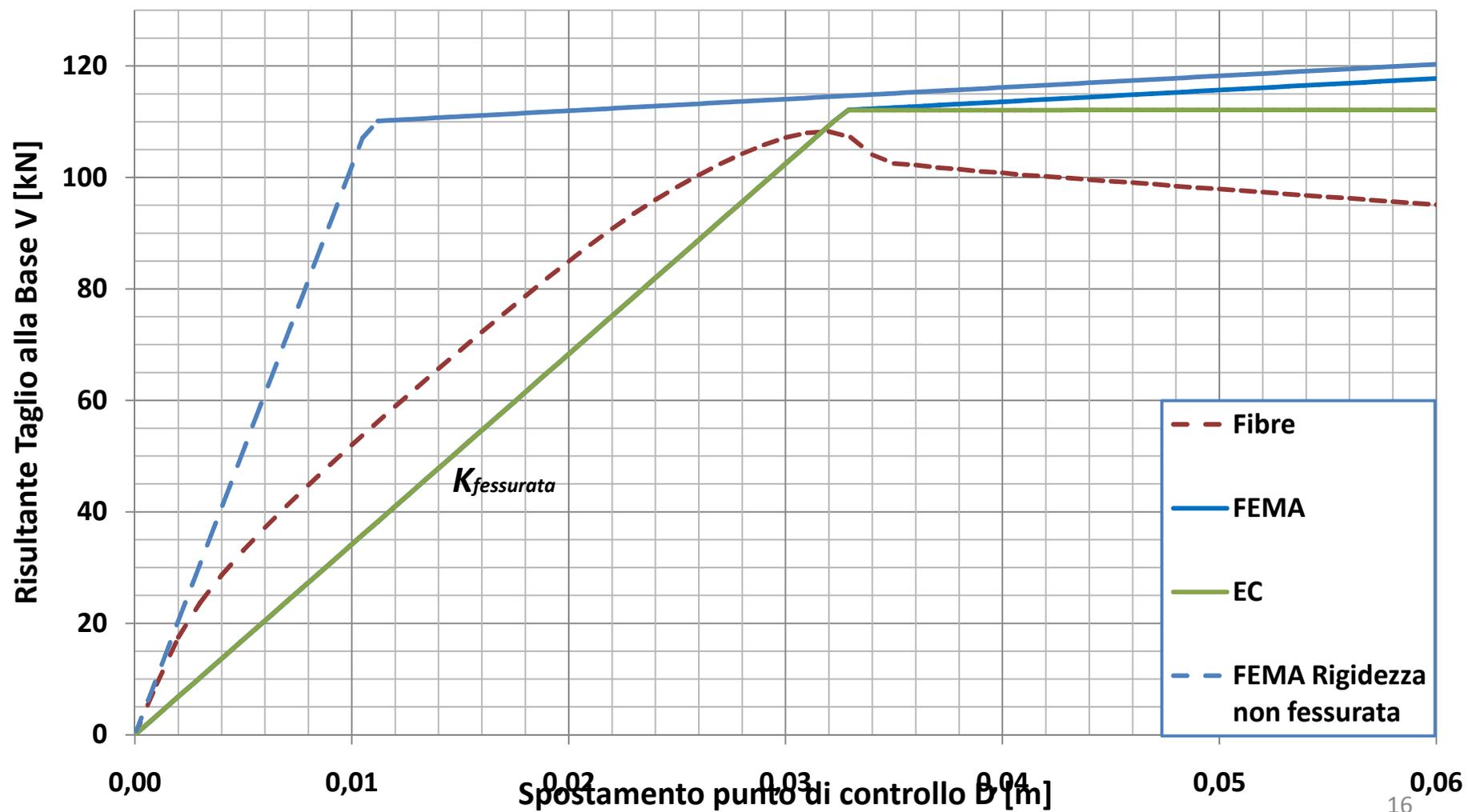
Push x - EC vs FEMA



Push x - EC vs Fibre

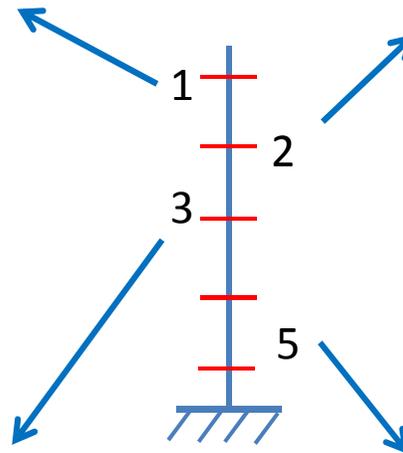
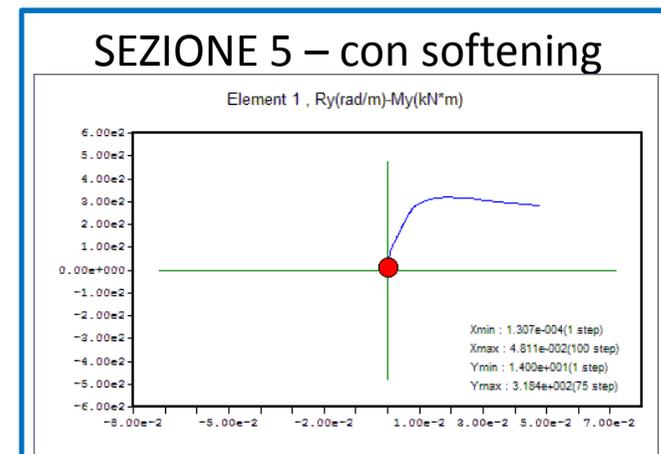
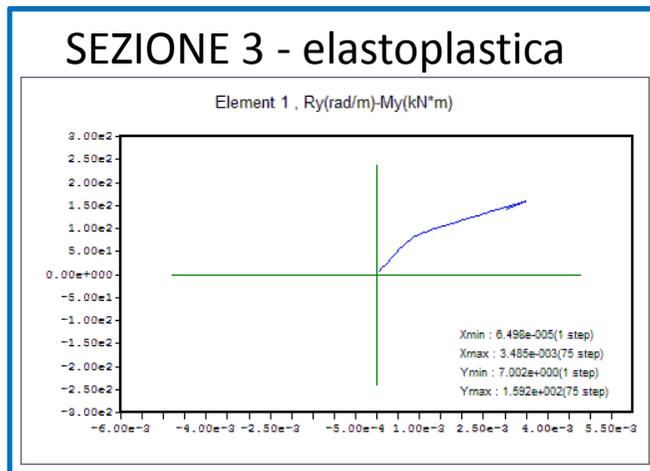
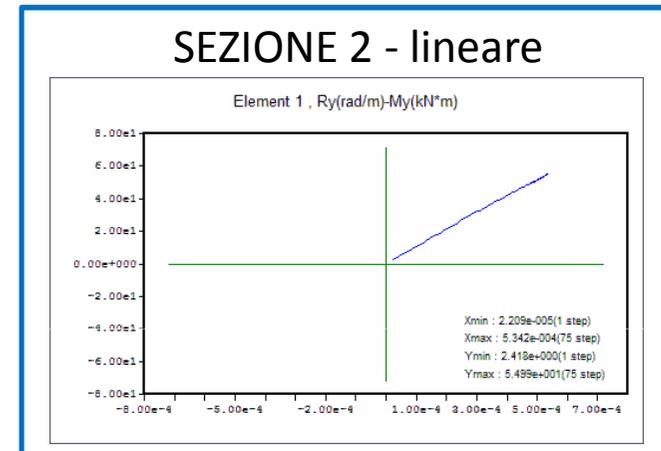
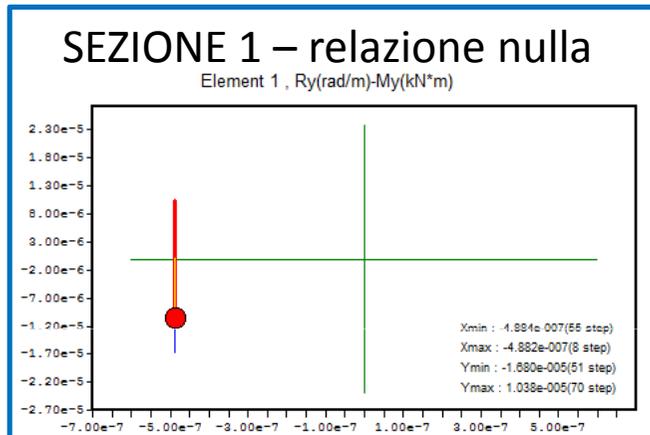


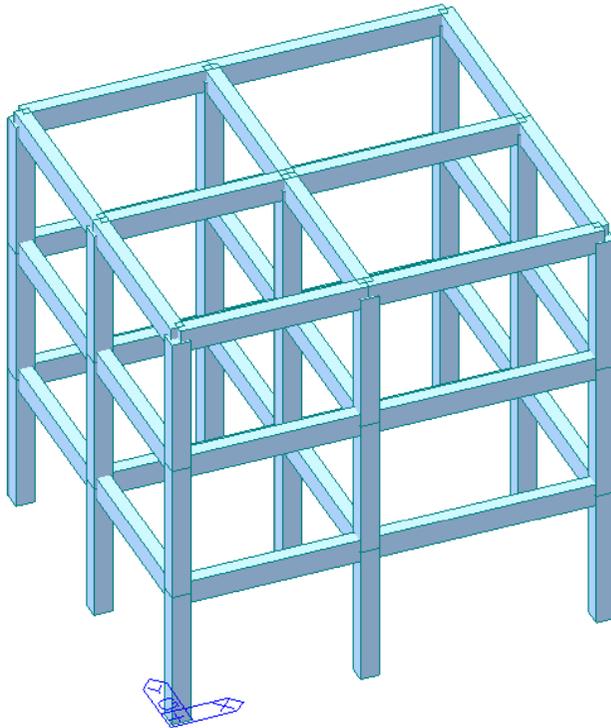
Push x – Effetto P- Δ – $P=0.4P_{max}$ 

*Push x – Rigidezza ridotta*Push x - $P = 0.1 P_{\max}$ - Plasticità concentrata con rigidezza fessurata

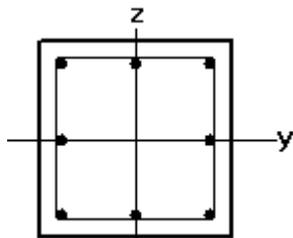
Cosa succede agli elementi a fibre?

Relazione momento curvatura nei punti di integrazione



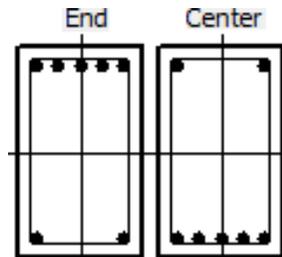


COLONNE



Long. : 8 Φ 20
Staffe: Φ 8/200

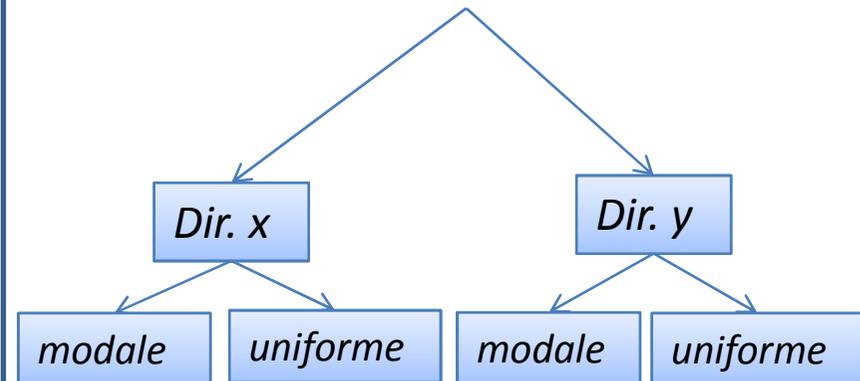
TRAVI



Long. : 5 Φ 20
Staffe: Φ 8/150

PUSHOVER

Carico verticale da:



Plasticità

Concentrata:
Relazione $M-\vartheta$

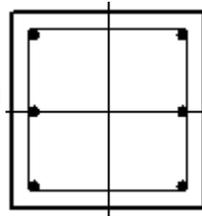
Distribuita:
Modello
a fibre

EC

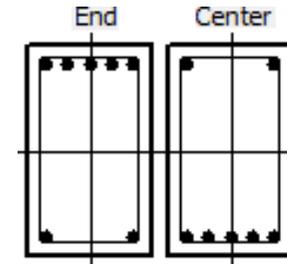
FEMA

Materiali: Calcestruzzo **C25/30** – Acciaio **B450C** $f_{yk} = 450 \text{ MPa}$

Sezioni: **Pilastro** 40 cm x 40 cm

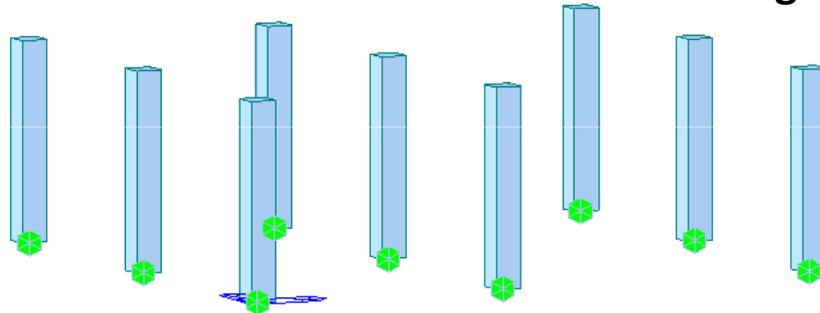


Trave 30 cm x 50 cm



Vincoli esterni:

Pilastri incastrati -> fondazioni molto rigide



Carichi:

CARICO	PESO
P.p. elementi	25 kN/m ³
P.p. solaio piano e copertura	3.2-3.6 kN/m ²
Accidentale	2 kN/m ²
neve	1.2 kN/m ²
Tamponamenti	4 kN/m

Vincoli cinematici interni:

Diaframma rigido

Name	Level(mm)	Floor Diaphragm
Roof	9000.00	Consider
3F	6000.00	Consider
2F	3000.00	Consider
1F	0.00	Do not consider

Masse sismiche:

$$\sum G_{k,j} + \sum \Psi_{Ej} Q_{Kj}$$

Località di costruzione: Scanno (AQ)

Coordinate Geografiche: sistema decimale

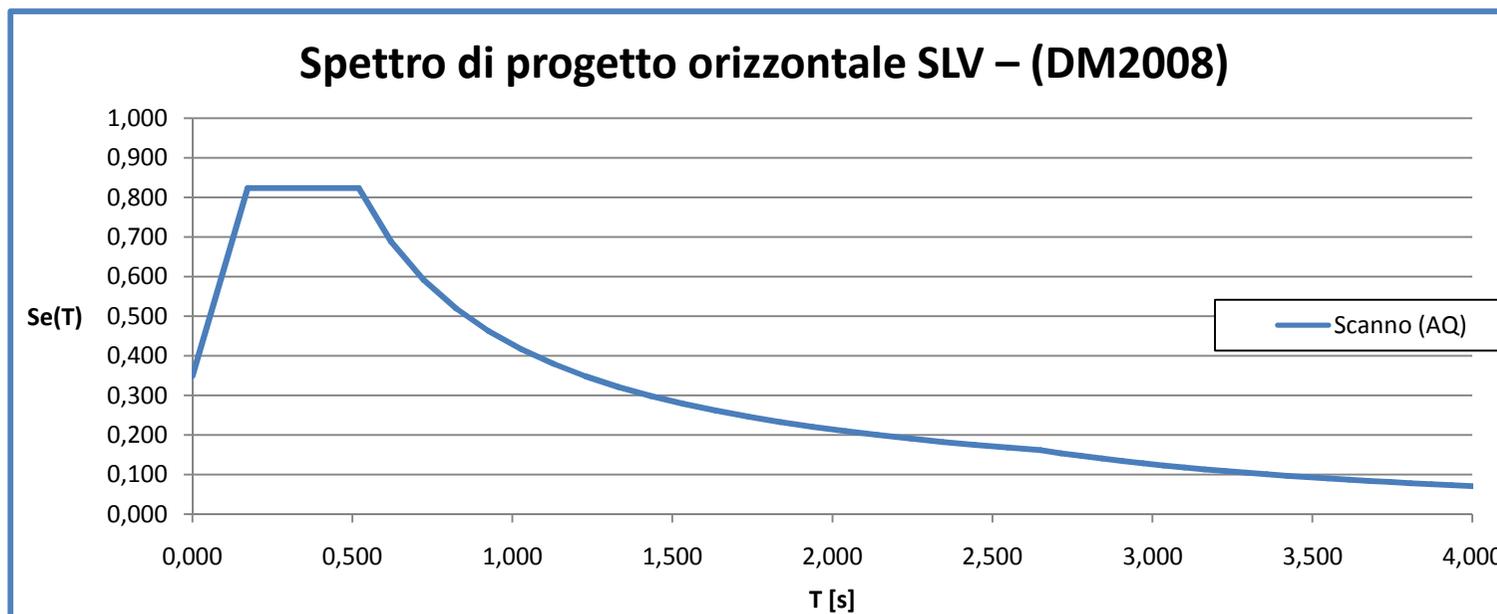
41,9020° N

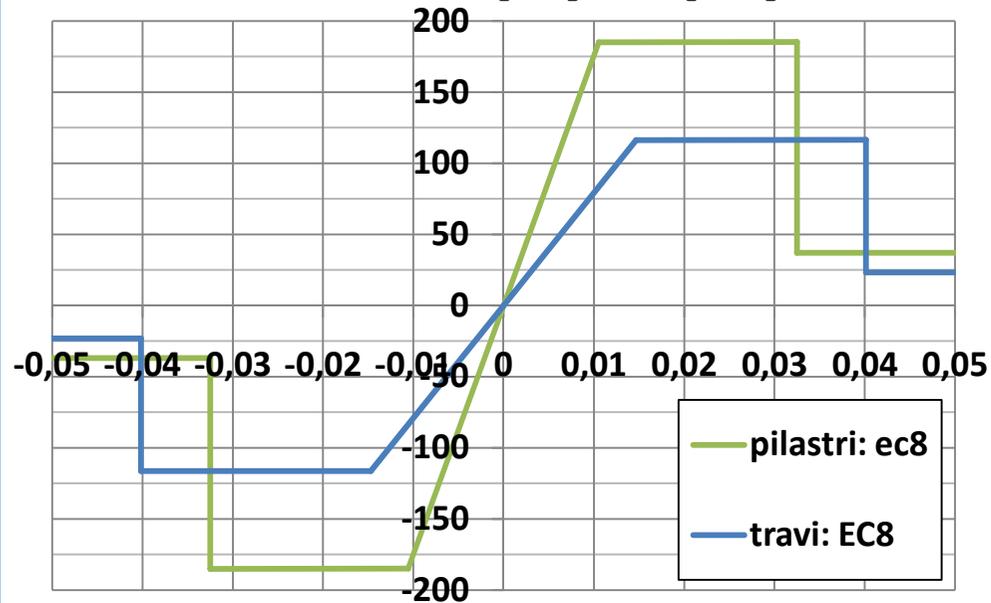
13,8845° E

Classificazione sismica : Zona 2
(OPCM3274)

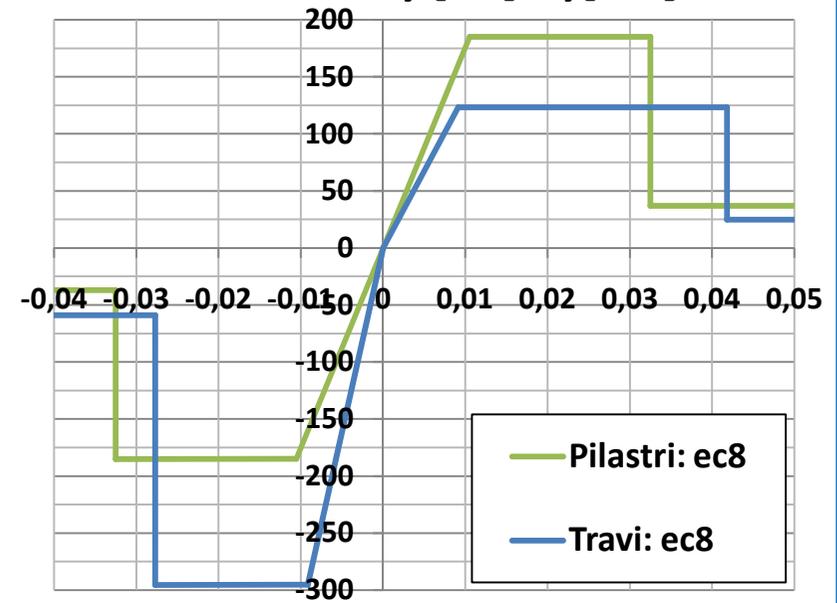
Tipologia di Suolo: C

Classe d'uso: II (Normali affollamenti) -> $V_N = 50$ anni $T_{R,slv} = 475$ anni



Plasticità Concentrata: Relazione M- θ Cerniera Plastica Concentrata:
Relazione M_z [kN] – θ_z [rad]

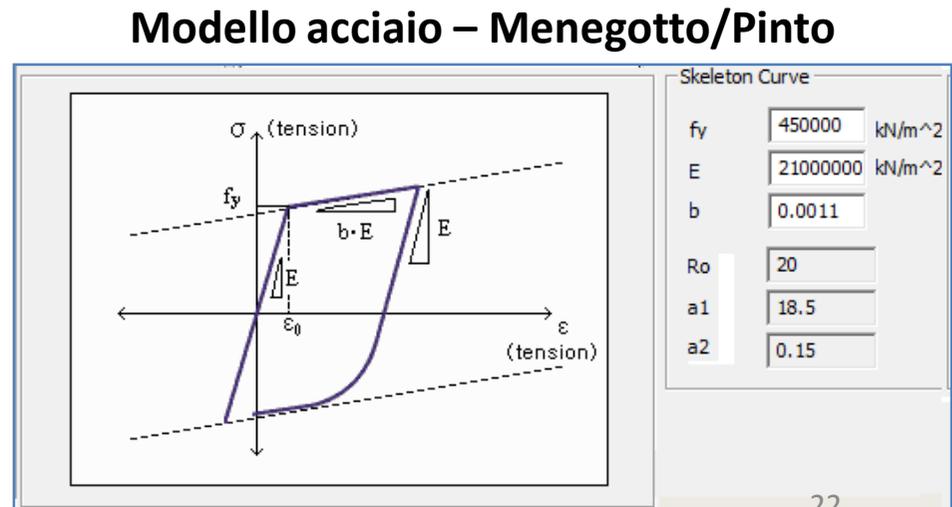
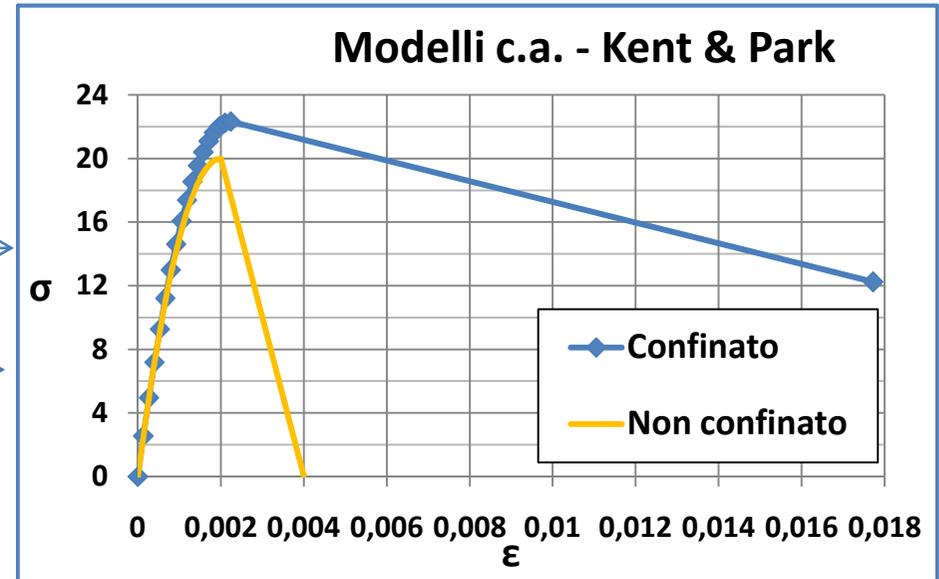
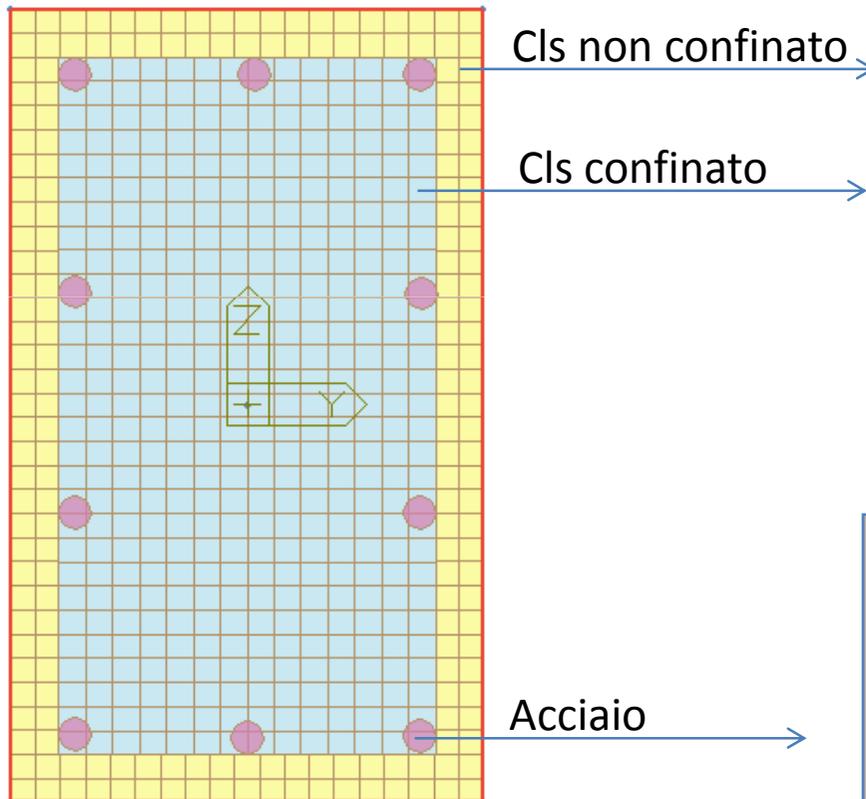
*La colonna è simmetrica:
Stessa relazione M- θ per
zona compressa superiore
ed inferiore*

Cerniera Plastica Concentrata:
Relazione M_y [kN]- θ_y [rad]

*La trave non è simmetrica:
Essa contiene armatura inferiore
diversa da quella superiore*

NOTA: Per la trave la cerniera è calcolata con riferimento alla sezione nodale dove è applicata

Plasticità Diffusa: Modelli c.a. e acciaio

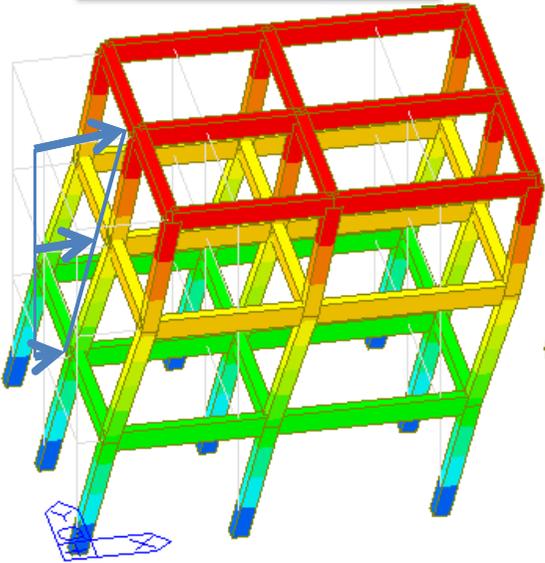


Profili di carico

Modale

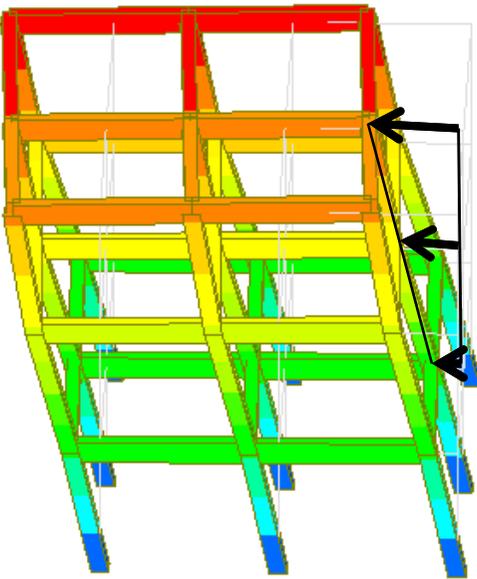
Uniforme

Modo 1:Dir x



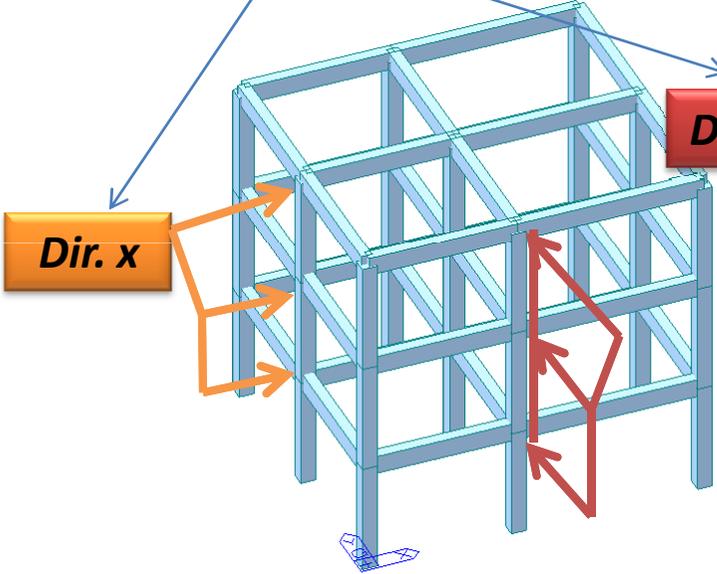
$T_1 = 0.311 s$
 $m_1 = 85\%$

Modo 2:Dir x



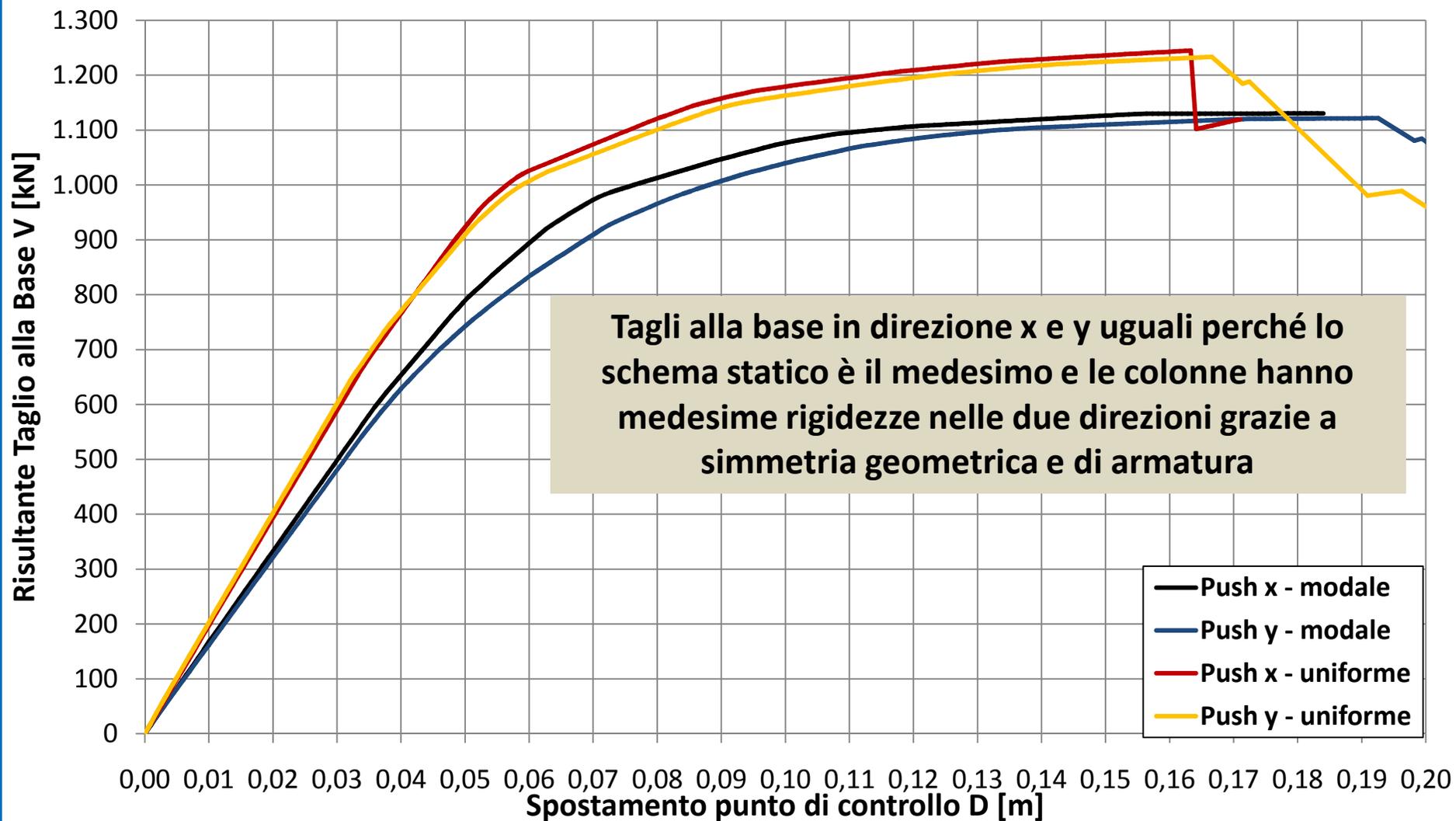
$T_2 = 0.305 s$
 $m_2 = 85\%$

Dir. x



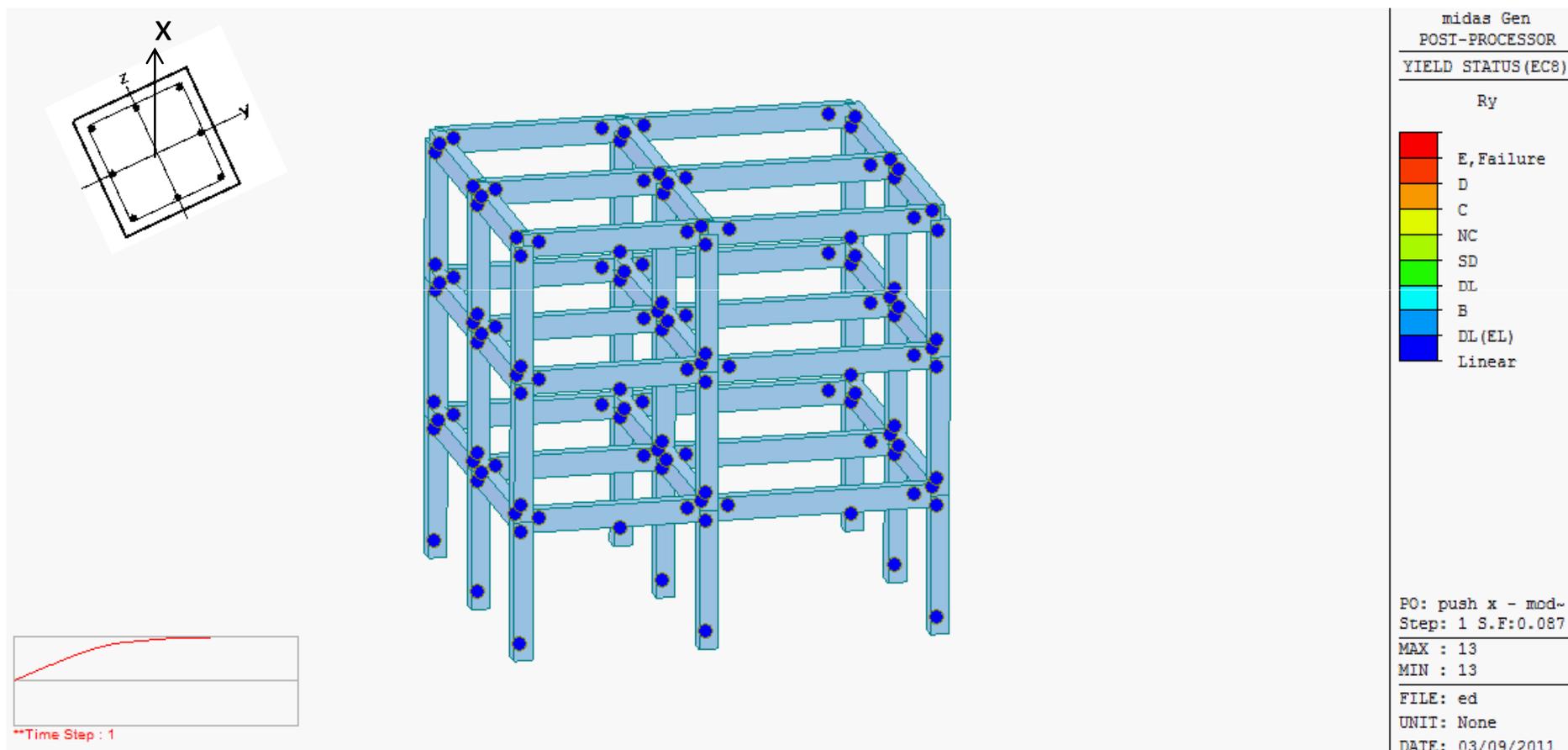
Dir. y

Push x/y - modale vs uniforme – plasticità concentrata

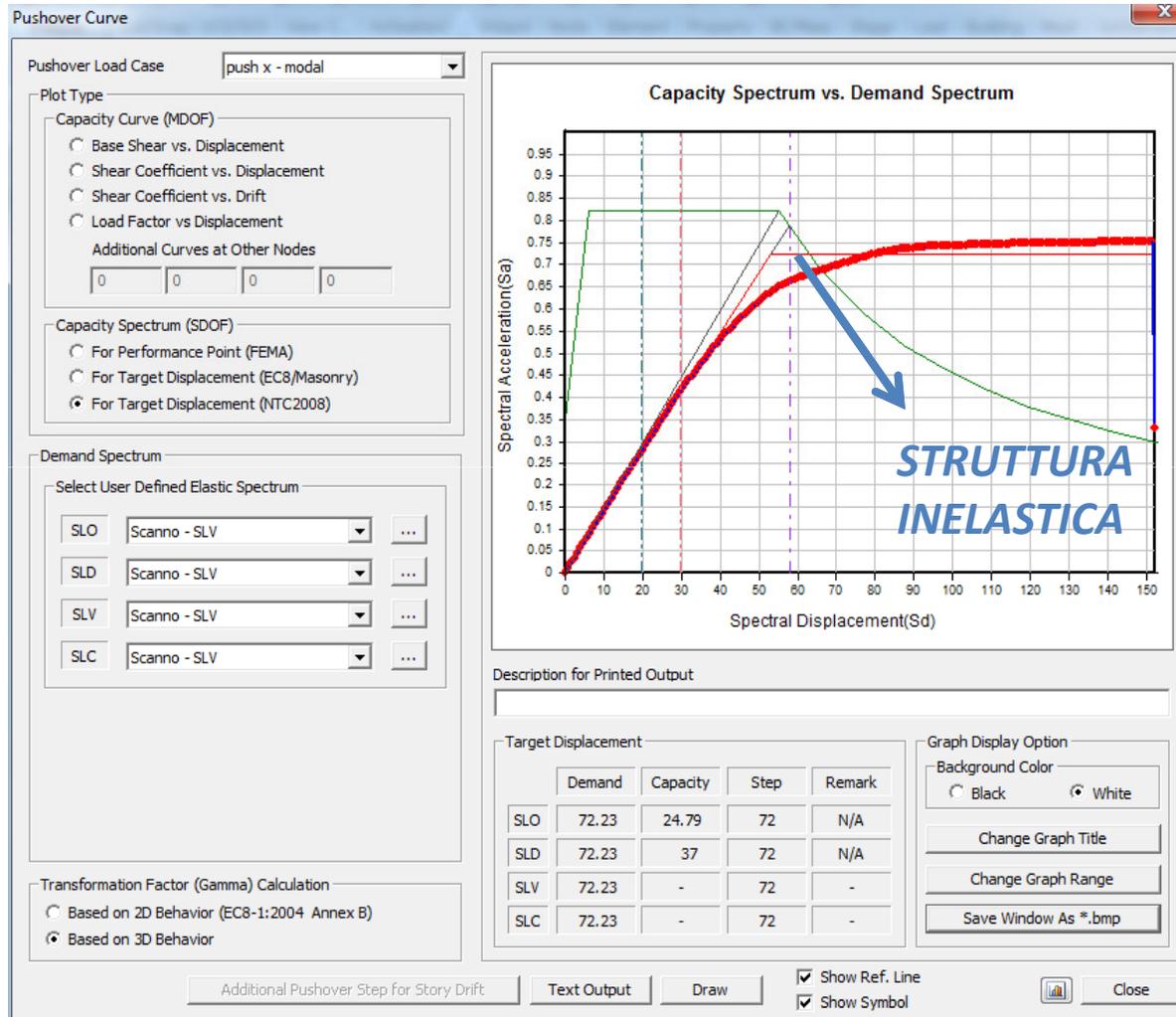


Push x modale: formazione e percorso della plasticizzazione

E' rappresentato il percorso di plasticizzazione flessionale nel piano xy dell'elemento



Determinazione Punto di Funzionamento



Spostamento target: SLV

$m^* = 121485 \text{ kg}$
 $\Gamma = 1.24815$
 $F_y^* = 862.2 \text{ kN}$
 $T^* = 0.542825 \text{ s}$
 $S_e(T^*) = 0.7906g$
 $d_{et}^* = 57.87 \text{ mm}$
 $d_t^* = 57.87 \text{ mm}$
 $d_t = 72.22 \text{ mm}$

Determinazione rapporto di sovraresistenza α_u / α_1

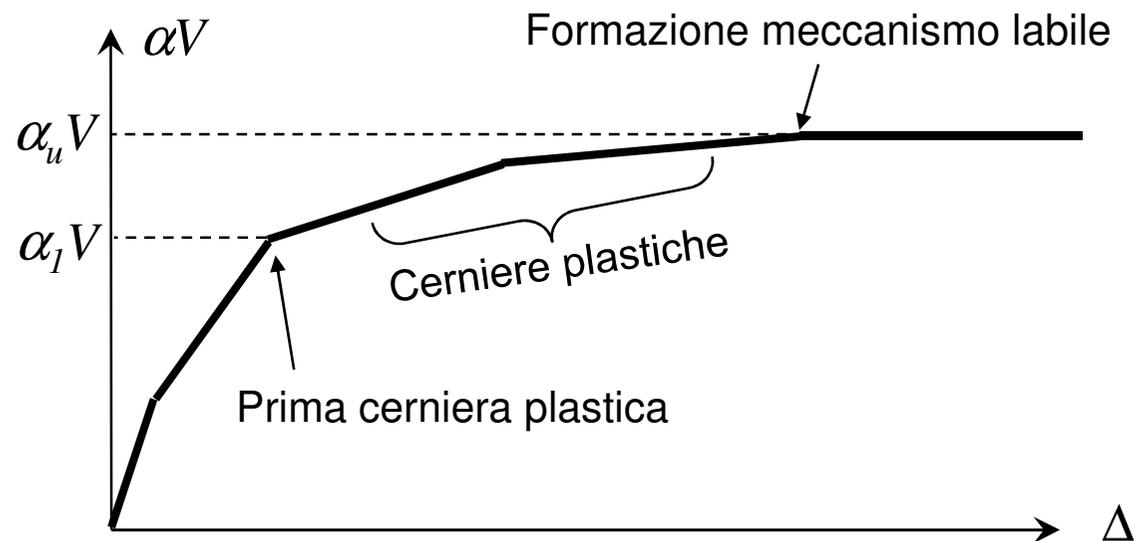
α_1 : moltiplicatore della forza sismica orizzontale per il quale il primo elemento strutturale raggiunge la sua resistenza flessionale

α_u : moltiplicatore della forza sismica orizzontale per il quale si verifica la formazione di un numero di cerniere plastiche tali da rendere la struttura labile

α_1 (STEP 40) $\rightarrow F_{40} = 609 \text{ kN}$

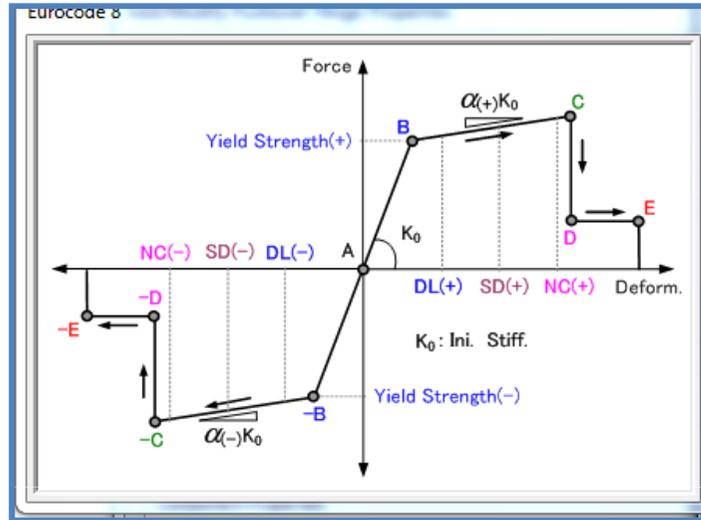
$\alpha_u \rightarrow F_{90\%} = 1117 \text{ kN}$

$\alpha_u / \alpha_1 = 1.8341$
(max 1.5 secondo OPCM 3274)

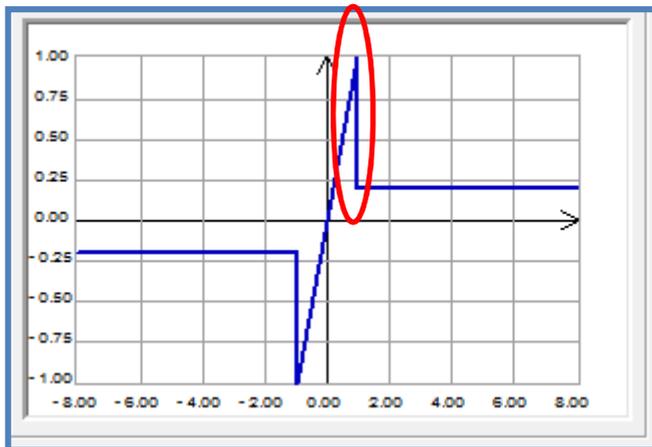


Ma non è stata considerata la rottura a taglio!

TAGLIO



	F/FY	D/DY
-E	-0.2	-8
-D	-0.2	-1.01
-C	-1	-1.01
-B	-1	-1
A	0	0
B	1	1
C	1	1.01
D	0.2	1.01
E	0.2	8



Yield Strength (FY)

(+)	(-)
125.90476	125.90476

kN

Elastic Stiffness : GAs

Yield Strain (DY)

User Defined

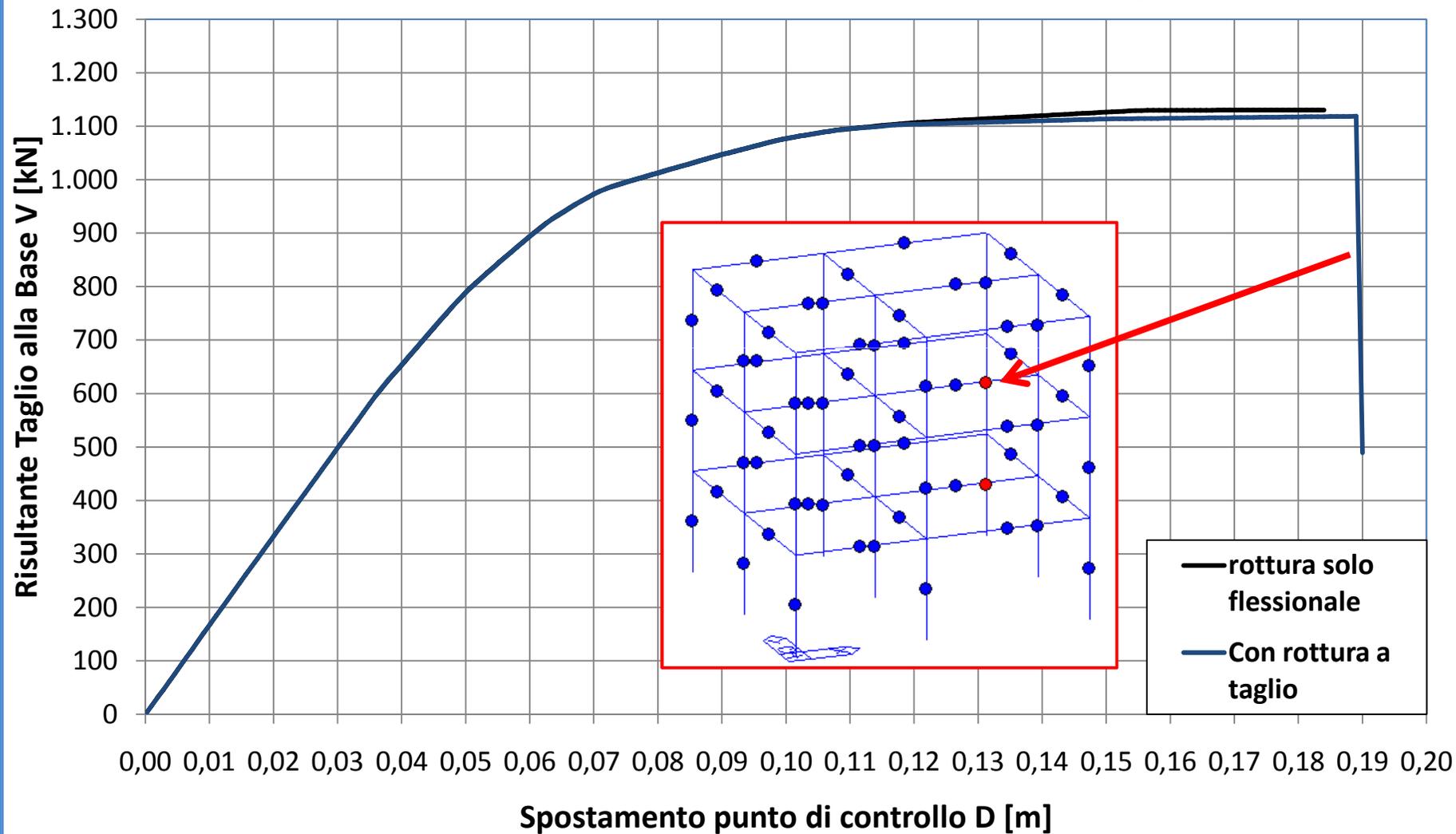
(+)	(-)
DY 8.0683940	8.0683940

Resistenza a taglio per elementi dotati di armatura

Rigidezza iniziale della sezione

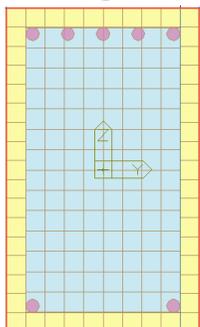
$$D_y = V_{Rd} / (GAs)$$

Push x modale - rottura solo duttile vs rottura fragile

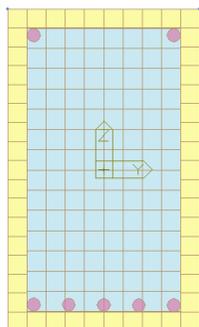


3 porzioni di trave con diversa sezione a fibre

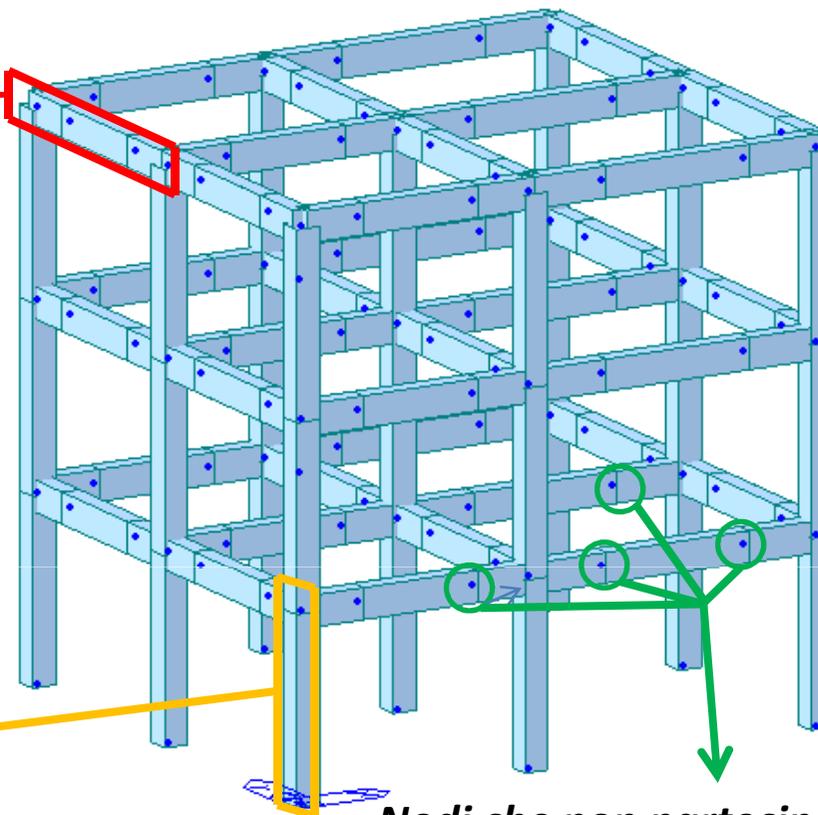
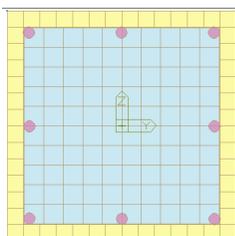
NODI



MEZZERIA



COLONNA



CASI DI CARICO

2 casi di carico statico nonlineare in sequenza:

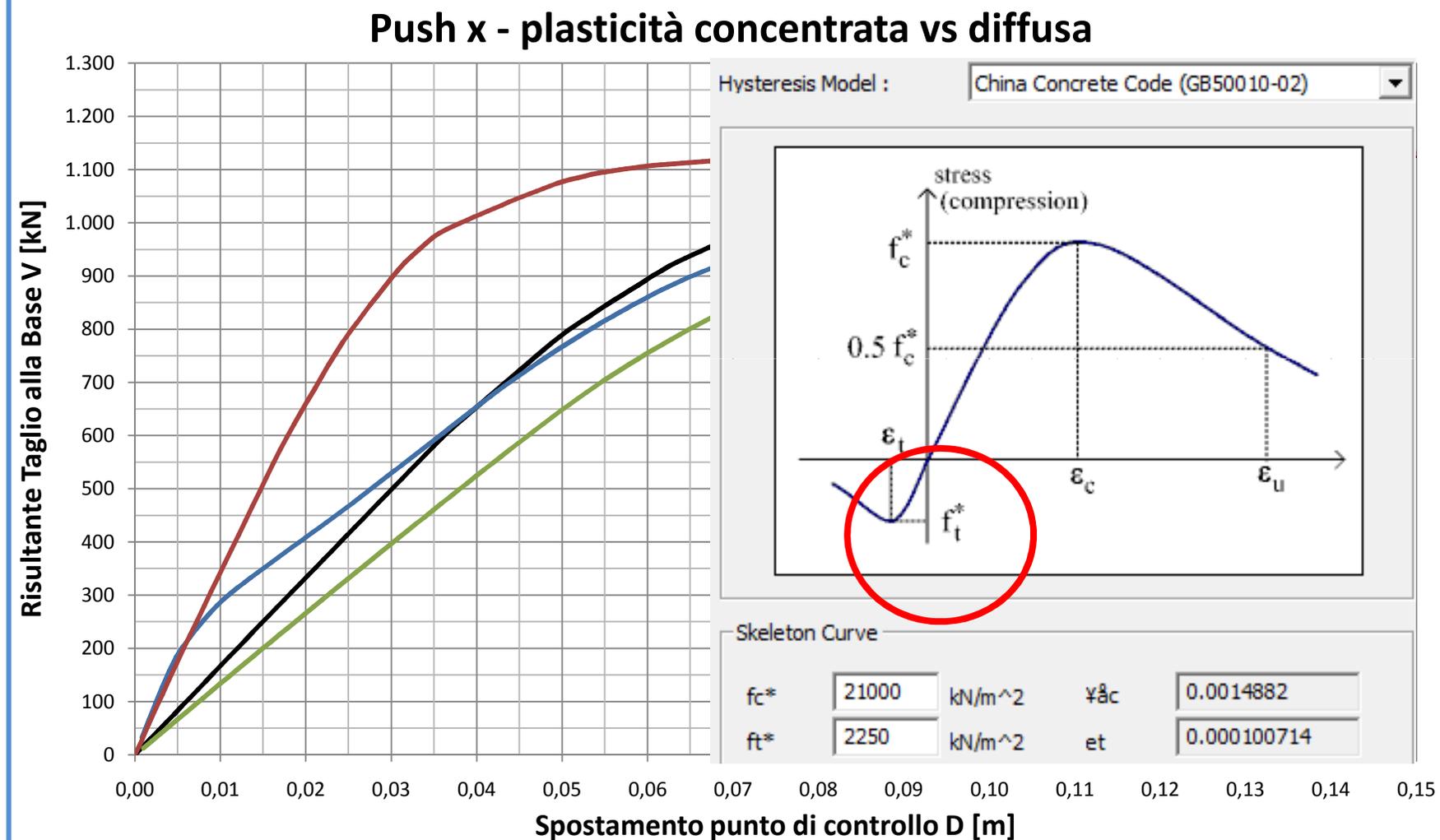
1. Carichi verticali;
2. Carico laterale.

Nodi che non partecipano al vincolo cinematico di piano, pena la nascita di azioni parassite

Diversi legami costitutivi di tipo Kent&Park per zone confinate e non confinate e per porzioni di calcestruzzo a staffatura differenziata.

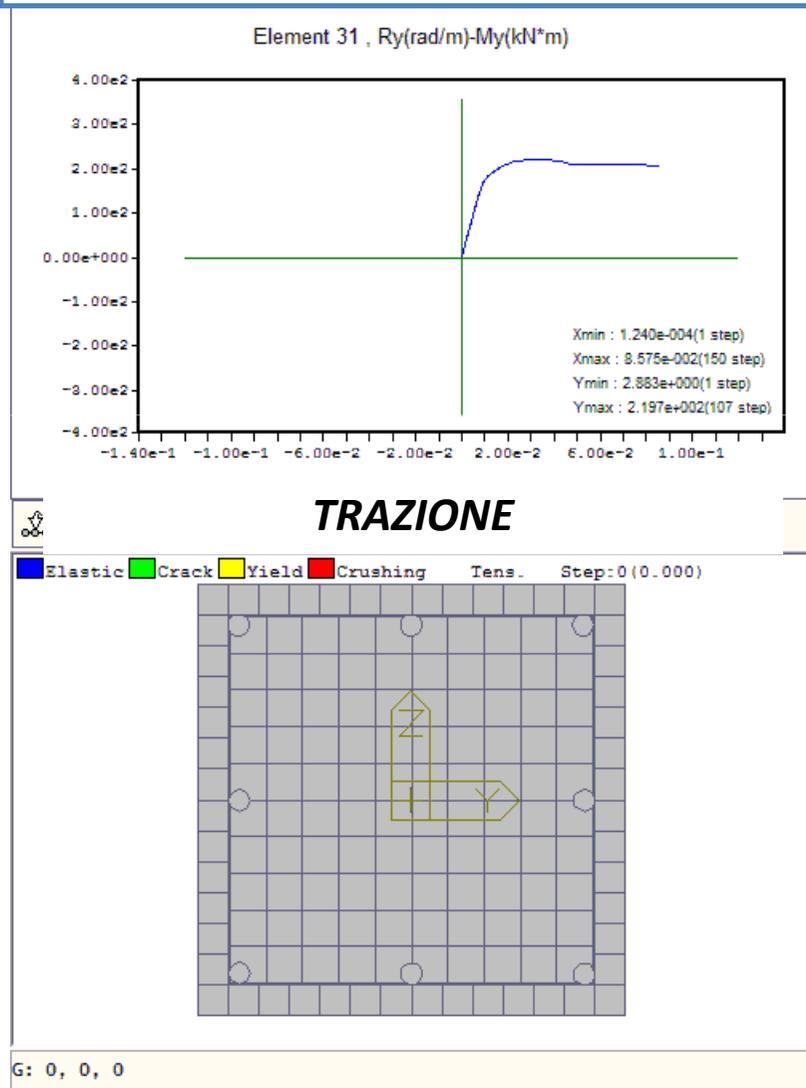


Il modello a fibre confrontato con quello a plasticità concentrata

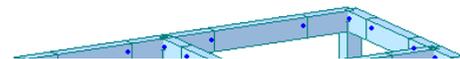
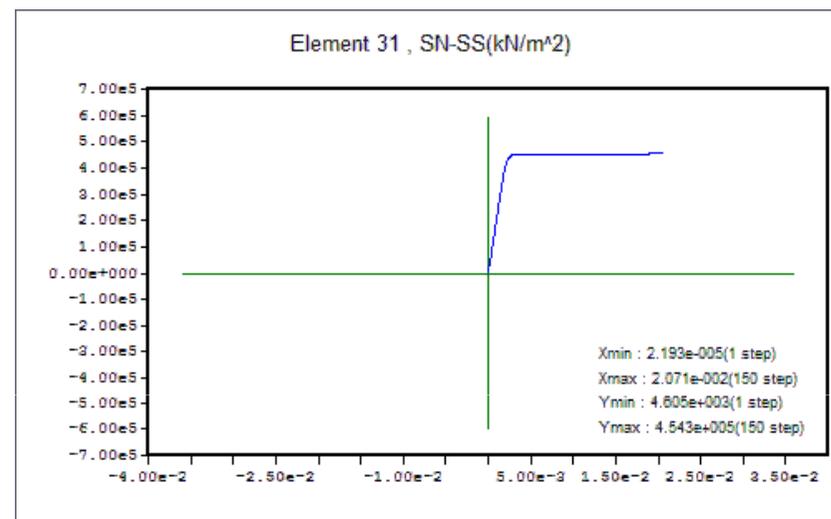


Cosa succede agli elementi a fibre?

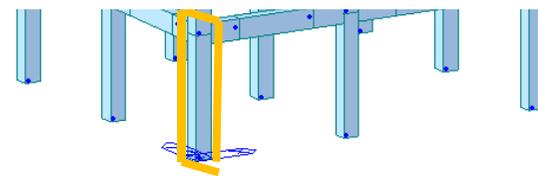
Colonna d'angolo: analisi sezionale



Fibra di acciaio all'angolo inferiore dx

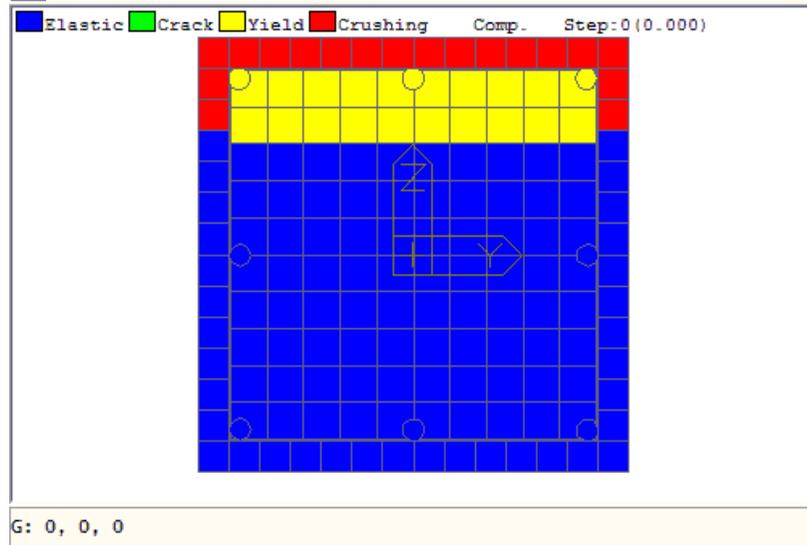
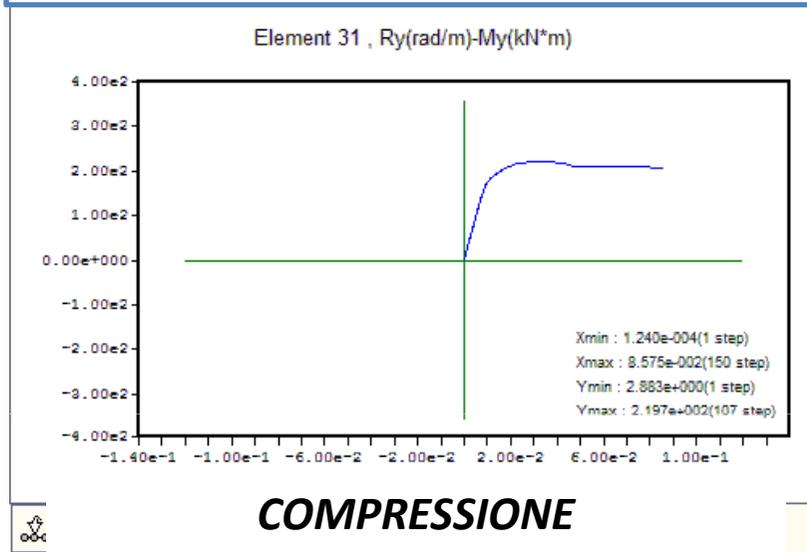


Le fibre di acciaio disposte nello strato inferiore di armatura raggiungono lo snervamento ma non la rottura. Il modello costitutivo è il Menegotto-Pinto.

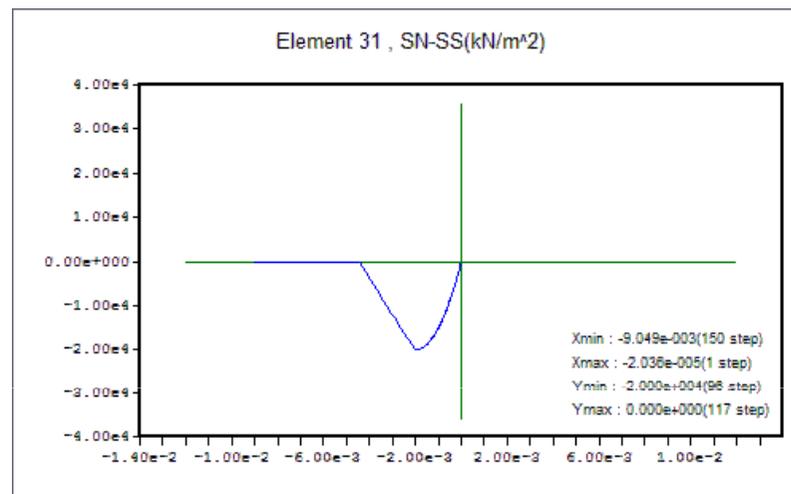


Cosa succede agli elementi a fibre?

Colonna d'angolo: analisi sezionale



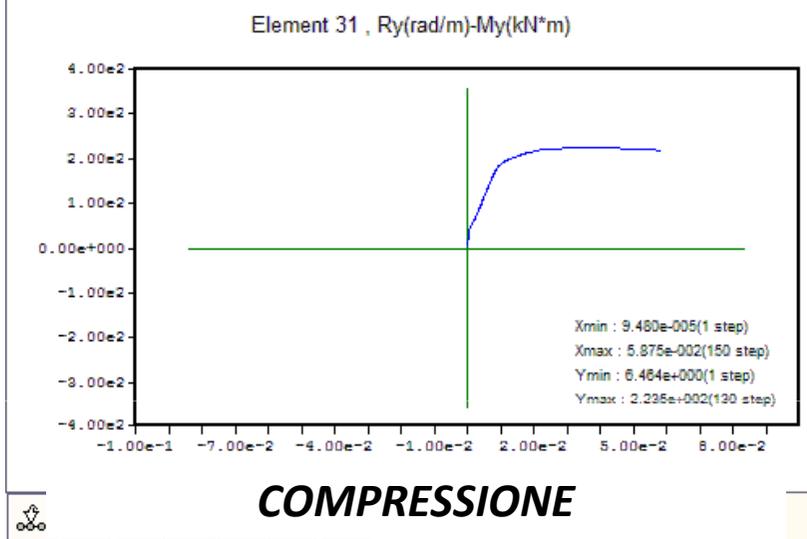
Fibra di cls all'angolo superiore sx



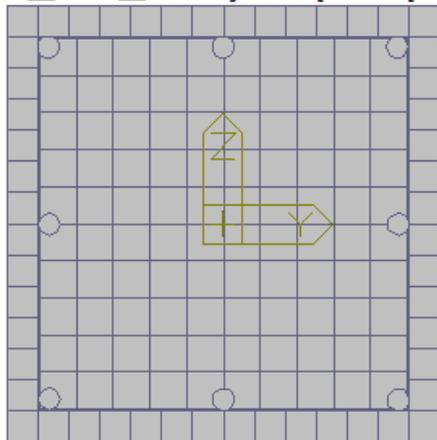
Le fibre della striscia superiore raggiungono il collasso. Le stesse fibre hanno comportamento fragile perchè appartengono alla fascia di calcestruzzo non confinato. Il modello qui adottato è il Park&Paulay.

Analisi con modello costitutivo del calcestruzzo resistente a trazione

Colonna d'angolo: analisi sezionale

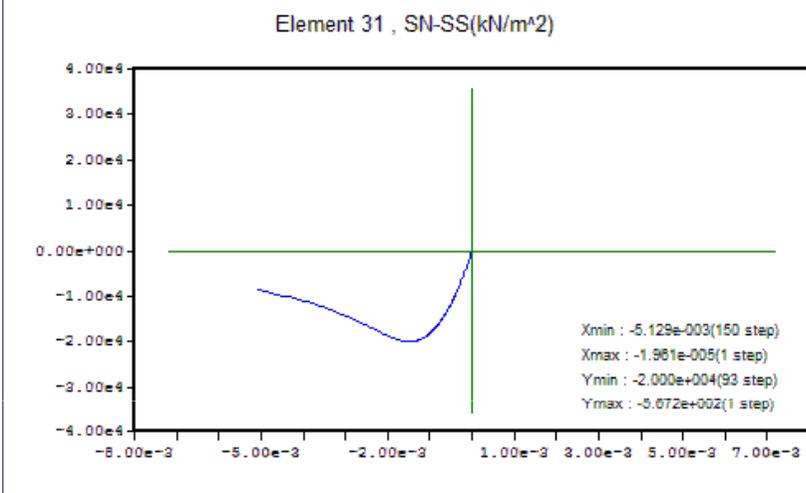


■ Elastic
 ■ Crack
 ■ Yield
 ■ Crushing
 Comp. Step: 0 (0.000)



G: -0.3564267, -0.1302904, 0

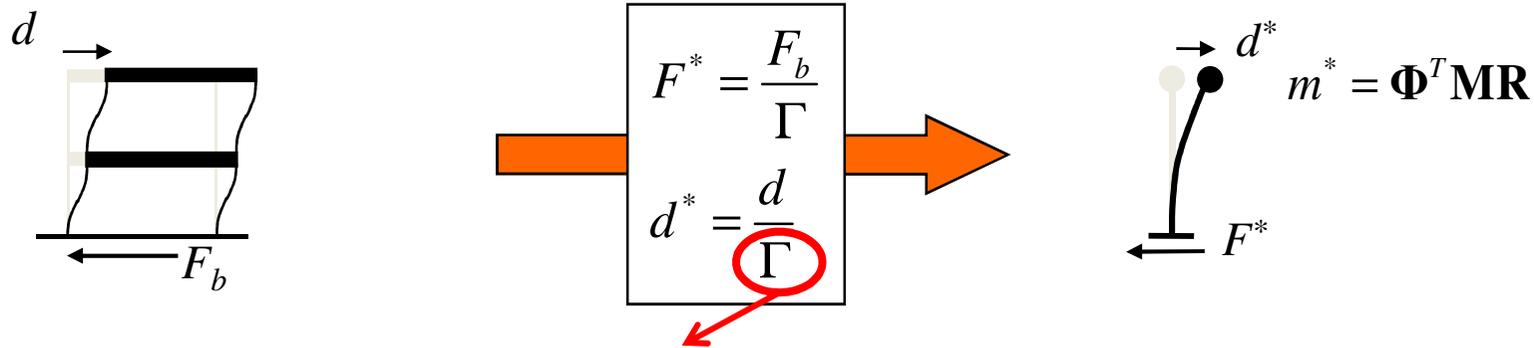
Fibra di cls all'angolo superiore sx



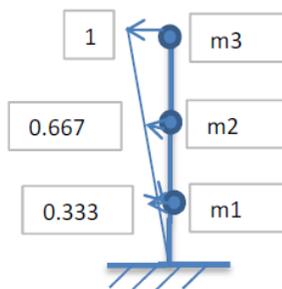
Le fibre della striscia superiore raggiungono il collasso. Le stesse fibre hanno comportamento fragile perchè appartengono alla fascia di calcestruzzo non confinato. Il modello qui adottato è quello indicato nella normativa cinese GB50010-02.

Costruzione foglio di calcolo per determinazione Punto di Funzionamento NTC08

STEP 1: Riduzione sistema ad 1 gdl equivalente



Pari a 1 per profilo di carico ad accelerazione uniforme



	u1	u2	u3	
φ	0.3333333	0.666667	1	
\underline{M}	1	0	0	m
	0	1	0	
	0	0	1	
\underline{r}	1	1	1	

W [kN]	1775
m [kg]	180938
m^*	121485

$$\Gamma = \frac{\varphi^T M \underline{r}}{\varphi^T M \varphi}$$

Γ	1.2857143
----------	-----------

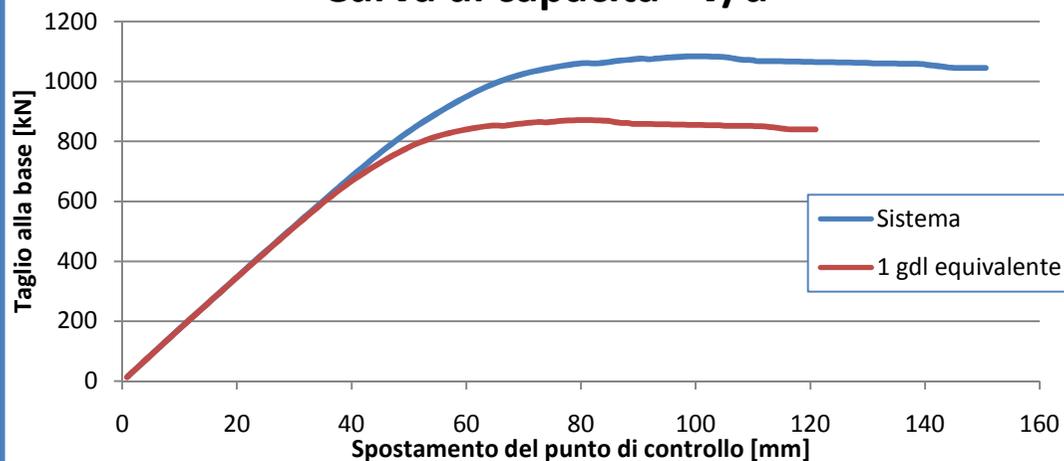
Costruzione foglio di calcolo per determinazione Punto di Funzionamento NTC08

STEP 1: Riduzione sistema ad 1 gdl equivalente

RIDUZIONE AD UN SISTEMA AD 1 GDL					
Profilo di carico		MODALE	Γ	1.245	
Step	Taglio alla base [kN]	spostamento punto controllo [mm]	Taglio alla base 1gdl	spostament o estremità 1gdl	Energia 1 gdl [kN m]
0	16	0.9811269	13	0.79	0.0
1	34	1.978179	27	1.59	21.5
2	51	2.975877	41	2.39	48.9
3	69	3.973718	56	3.19	87.7
4	87	4.971556	70	3.99	137.9

Curve del sistema reale e del sistema ad 1 gdl equivalente coincidenti se profilo di carico uniforme perché Γ

Curva di capacità - V/d



Costruzione foglio di calcolo per determinazione Punto di Funzionamento NTC08

STEP 2: Bilinearizzazione curva di capacità e determinazione spettro di capacità

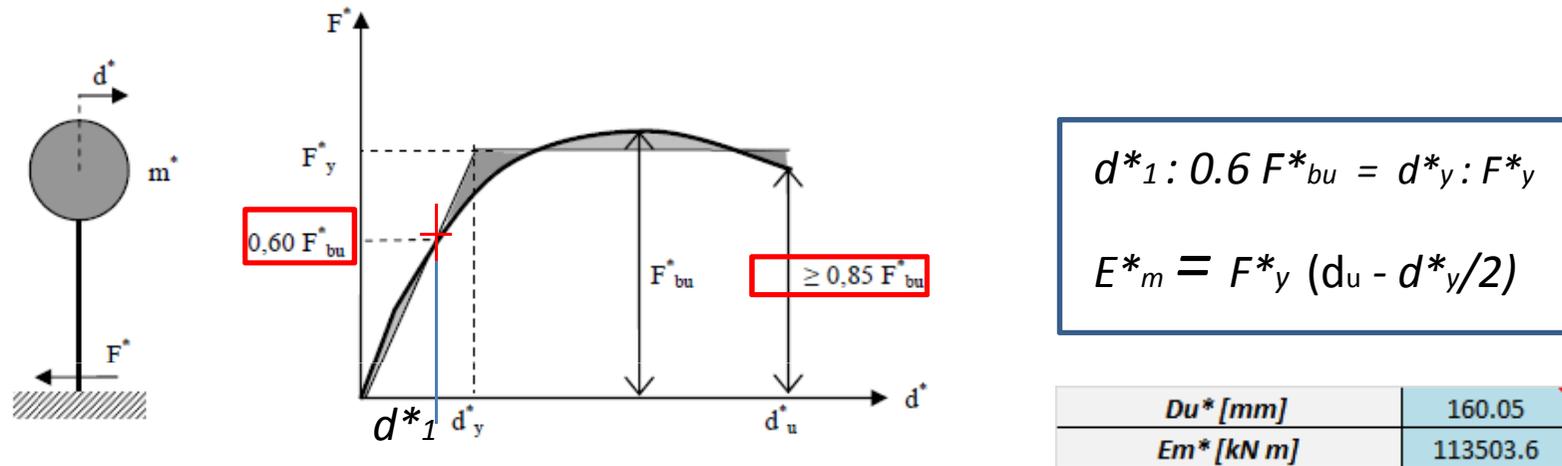
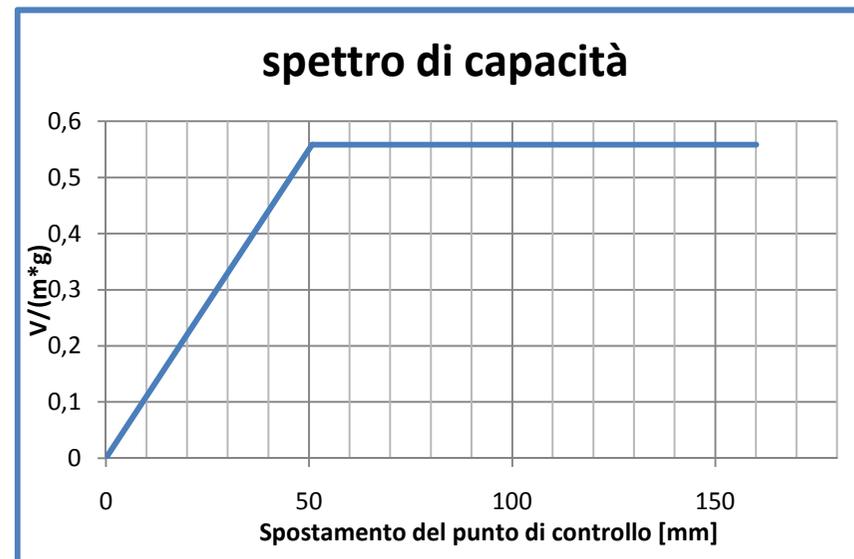
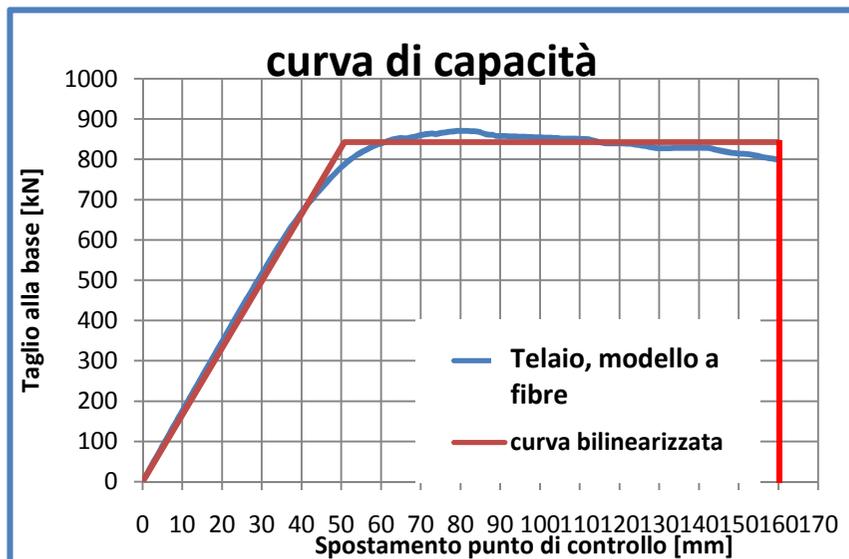


Figura C7.3.1 – Sistema e diagramma bilineare equivalente

1. Si assume d_u tale che il taglio corrispondente sia superiore a $0.85 F^*_{bu}$;
2. L'energia sottesa dalla curva è automaticamente determinata;
3. Si impone passaggio del tratto elastico dal punto $0.6 F_{bu}$;
4. Si risolve un'equazione di 2° grado per determinare d_y^* o F_y^* .

Costruzione foglio di calcolo per determinazione Punto di Funzionamento NTC08

STEP 2: Bilinearizzazione curva di capacità e determinazione spettro di capacità



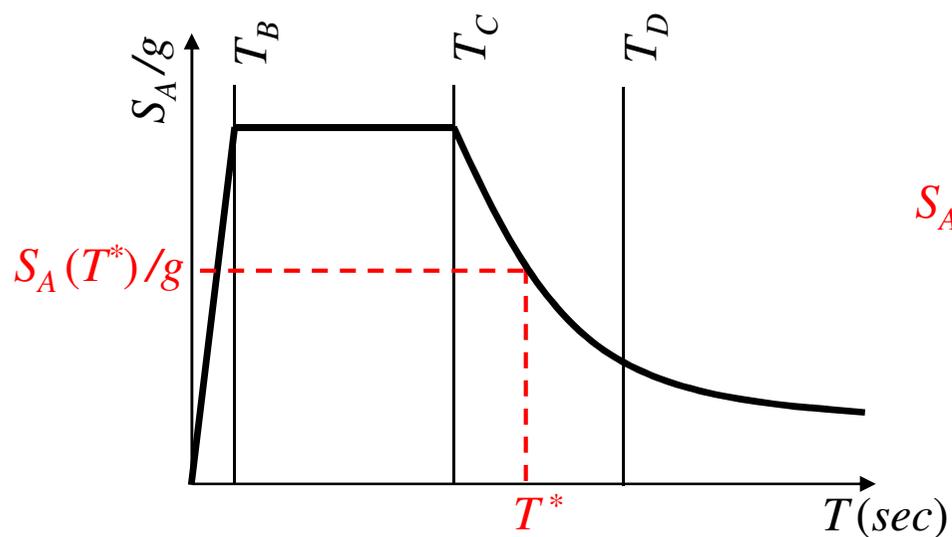
<i>bilinearizzazione curva di capacità</i>	
<i>perfettamente plastico</i>	
F_{max} [kN]	1084
F_{max}^* [kN]	871
0.6 F_{max} [kN]	522.61
d_1	30.44
dy^* [mm]	50.74
F_y^*	842.77
T^* [s]	0.60
fy^*	0.56

<i>curve bilinearizzate</i>	
<i>curva di capacità</i>	
0	0
50.74	843
160.05	843
<i>spettro di capacità</i>	
0	0
50.74	0.558585
160.05	0.558585

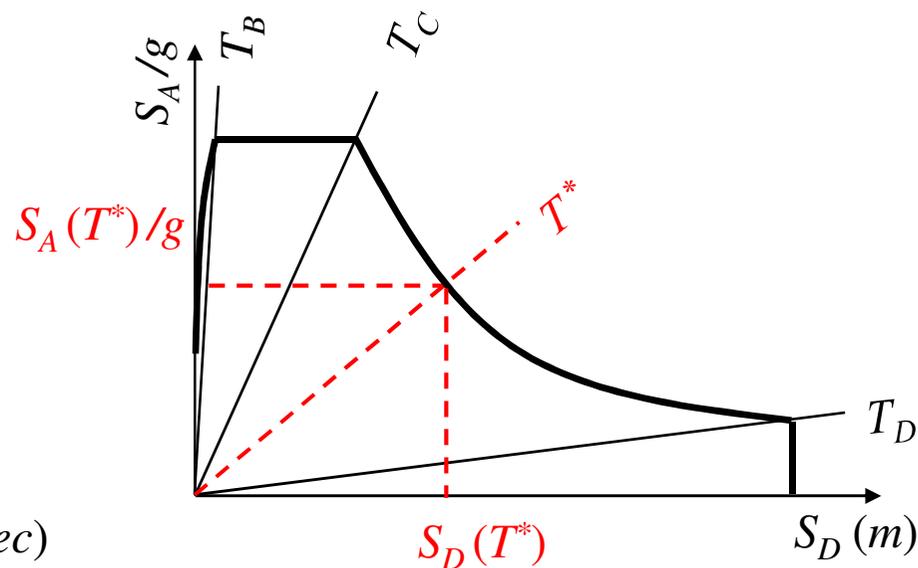
Costruzione foglio di calcolo per determinazione Punto di Funzionamento NTC08

STEP 3: Passaggio a spettro ADRS

Spettro progetto elastico



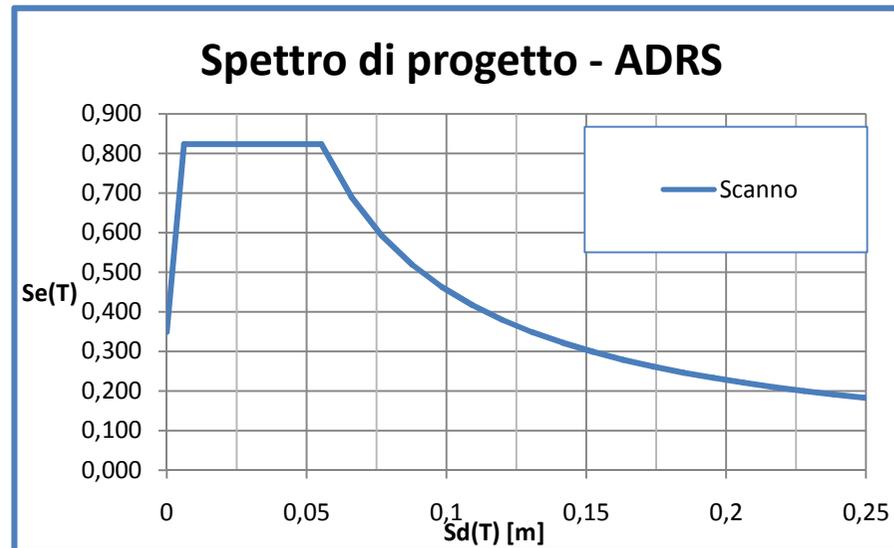
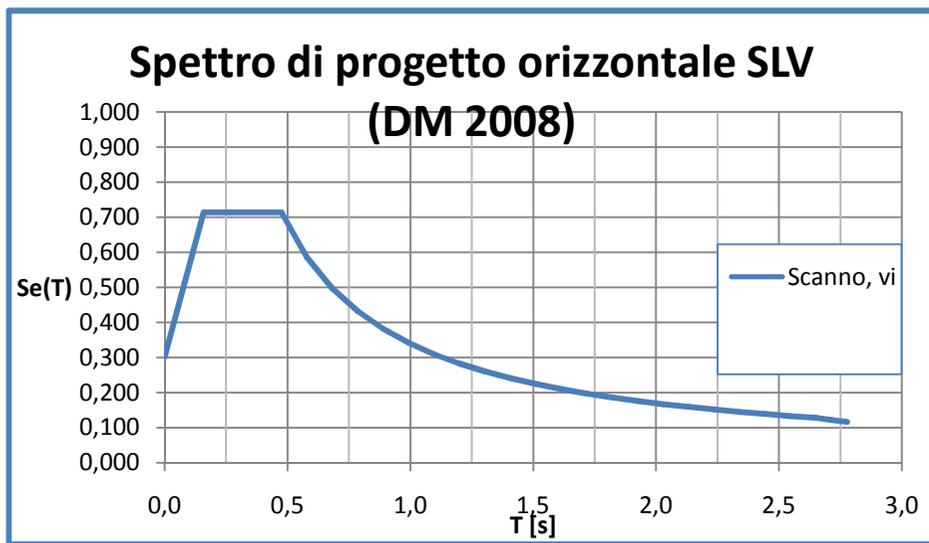
Spettro ADRS



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

Costruzione foglio di calcolo per determinazione Punto di Funzionamento NTC08

STEP 3: Passaggio a spettro ADRS

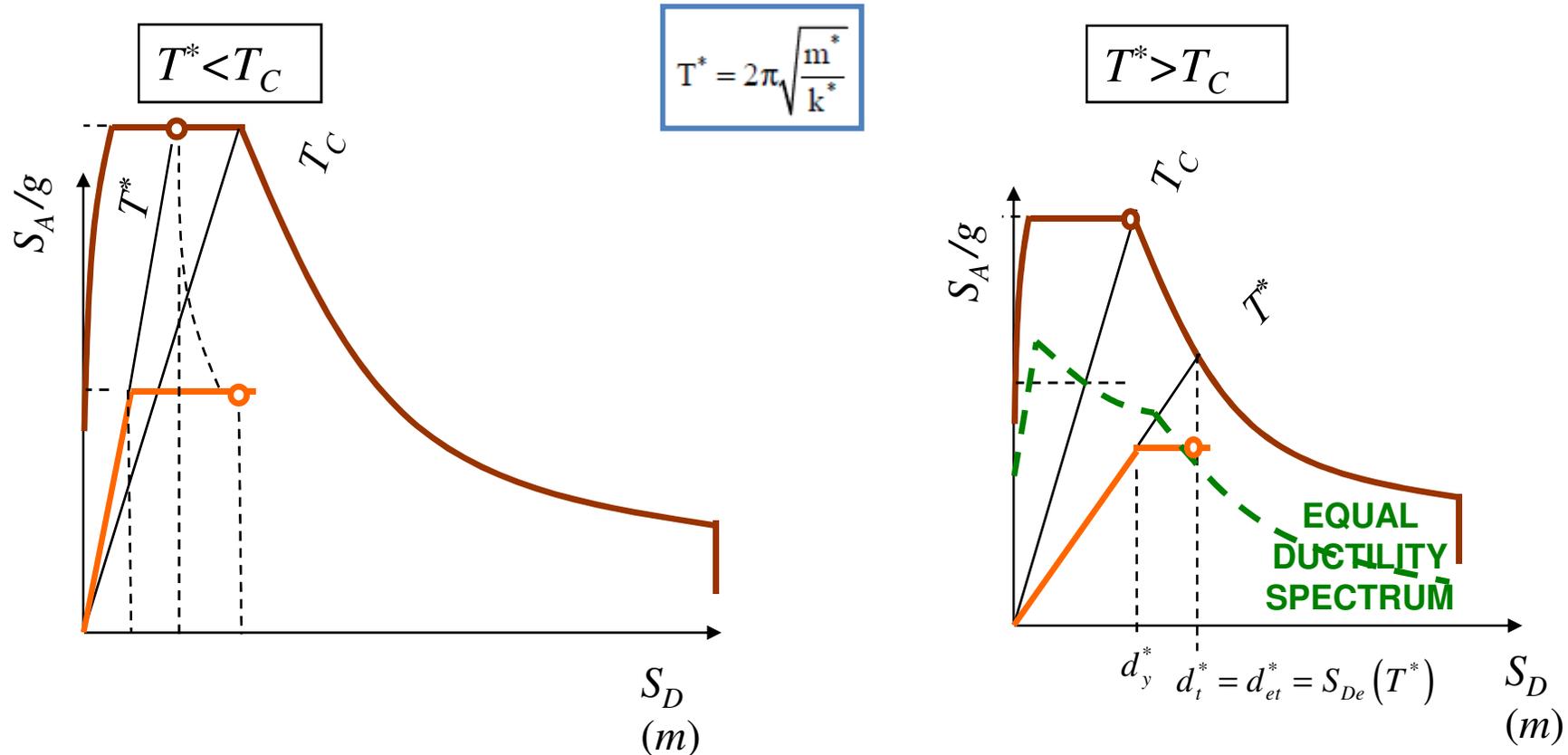


ag	0.262
f0	2.363
Tc	0.350
Ss	1.328
Cc	1.484
St	1.000
S	1.328

ω	$Sd(T)$	T	$Sa(T)$
	0	0.000	0.348
36.26153	0.006143	0.173	0.823
12.08718	0.055284	0.520	0.823
10.11394	0.06607	0.621	0.689
8.694555	0.076856	0.723	0.592
7.62453	0.087642	0.824	0.519

Costruzione foglio di calcolo per determinazione Punto di Funzionamento NTC08

STEP 4: Determinazione target displacement



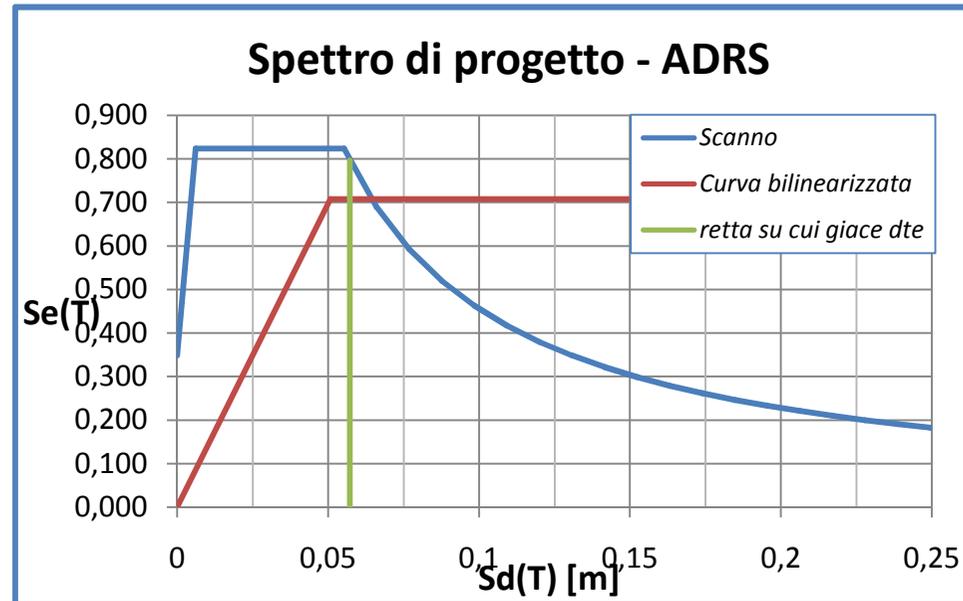
Se: $F_y^*/m^* \geq S_e(T^*) \quad d_t^* = d_{et}^*$

Se: $F_y^*/m^* < S_e(T^*) \quad d_t^* = \frac{d_{et}^*}{q_u} \left(1 + (q_u - 1) \frac{T_C}{T^*} \right) \quad q_u = \frac{S_e(T^*)}{F_y^*/m^*}$

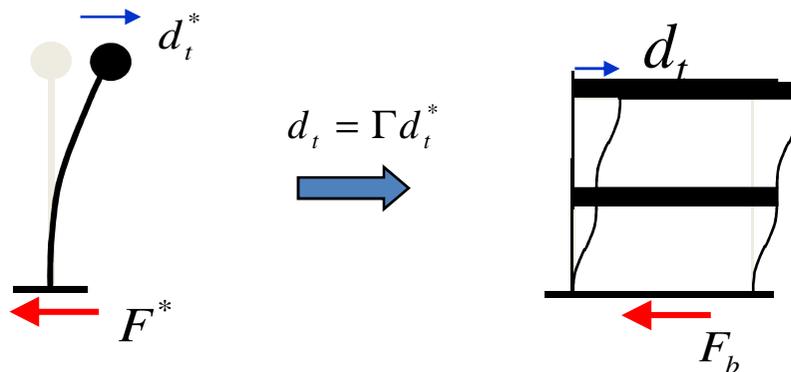
$d_t^* = d_{et}^* = S_{De}(T^*)$

Costruzione foglio di calcolo per determinazione Punto di Funzionamento NTC08

STEP 4: Determinazione punto di funzionamento



STEP 5: Determinazione spostamento target sistema reale



$Se(T)$	0.80
$dte^* [mm]$	57.15
$dt^* [mm]$	57.15
$dt [mm]$	71.15057
dt^*-du^*	102.90

Osservazioni al metodo proposto dalle NTC08

- Gli **effetti torsionali accidentali** sono considerati nel modo previsto al § 7.2.6 delle NTC.
- Una volta trovata la domanda in spostamento d_{max} per lo stato limite in esame si **verifica** che sia $d_{max} < d_u$ e si procede alla verifica della *compatibilità degli spostamenti per gli elementi/meccanismi duttili e delle resistenze per gli elementi/meccanismi fragili*.
- *L'analisi non lineare statica condotta nei modi previsti dalle NTC può sottostimare significativamente le deformazioni sui lati più rigidi e resistenti di strutture flessibili torsionalmente, cioè strutture in cui il modo di vibrare torsionale abbia un periodo superiore ad almeno uno dei modi di vibrare principali traslazionali. Per tener conto di questo effetto, tra le distribuzioni secondarie delle forze occorre scegliere la distribuzione adattiva. L'azione sismica deve essere applicata, per ciascuna direzione, in entrambi i possibili versi e si devono considerare gli effetti più sfavorevoli derivanti dalle due analisi.*

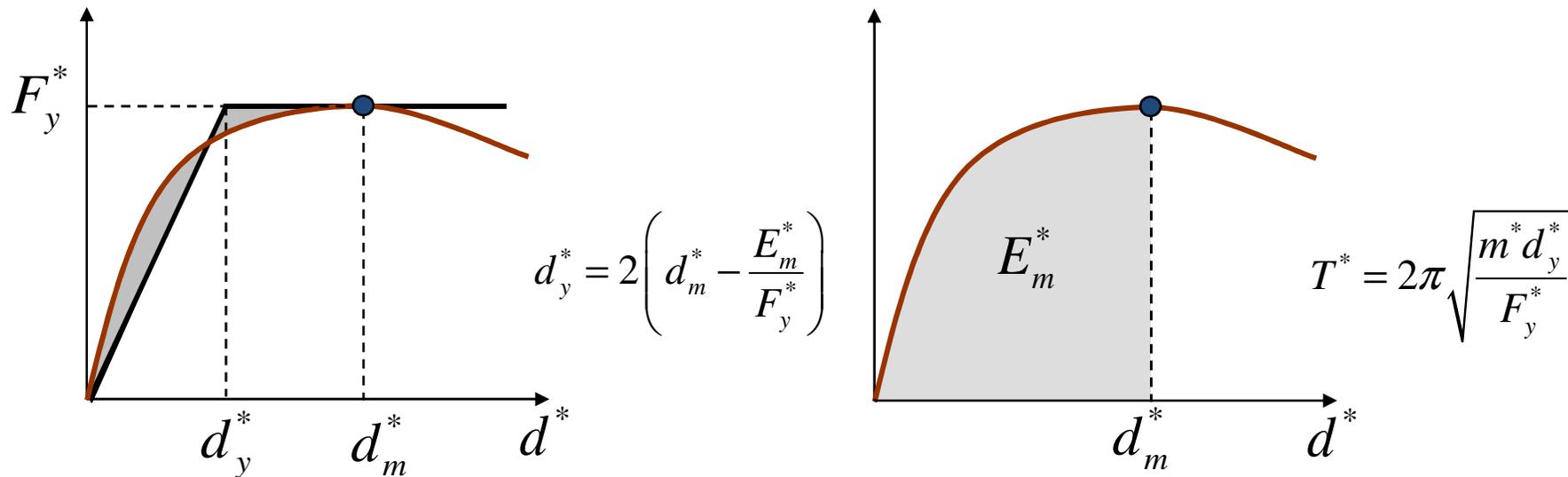
(Non) Combinazione effetti azione sismica - § 7.3.5

Se la risposta viene valutata mediante **analisi statica** in campo **non lineare**, **ciascuna delle due componenti orizzontali** (insieme a quella verticale, ove necessario, e agli spostamenti relativi prodotti dalla variabilità spaziale del moto, ove necessario) **è applicata separatamente**. Come effetti massimi **si assumono i valori più sfavorevoli** così ottenuti.

Determinazione Punto di Funzionamento EuroCodici tramite differenza con NTC

DIFFERENZE RISPETTO ALLA COSTRUZIONE DEL TIPO NTC08:

- *L'energia da prendere in considerazione nella fase di bilinearizzazione della curva di capacità è quella ottenuta integrando la relazione taglio alla base – spostamento del punto di controllo dalla condizione di spostamento iniziale nel piano corrispondente ad un carico orizzontale nullo fino allo spostamento target atteso.*



d_m^* Target displacement (stimato a questo punto)

Determinazione Punto di Funzionamento EuroCodici tramite differenza con NTC

DIFFERENZE RISPETTO ALLA COSTRUZIONE DEL TIPO NTC08:

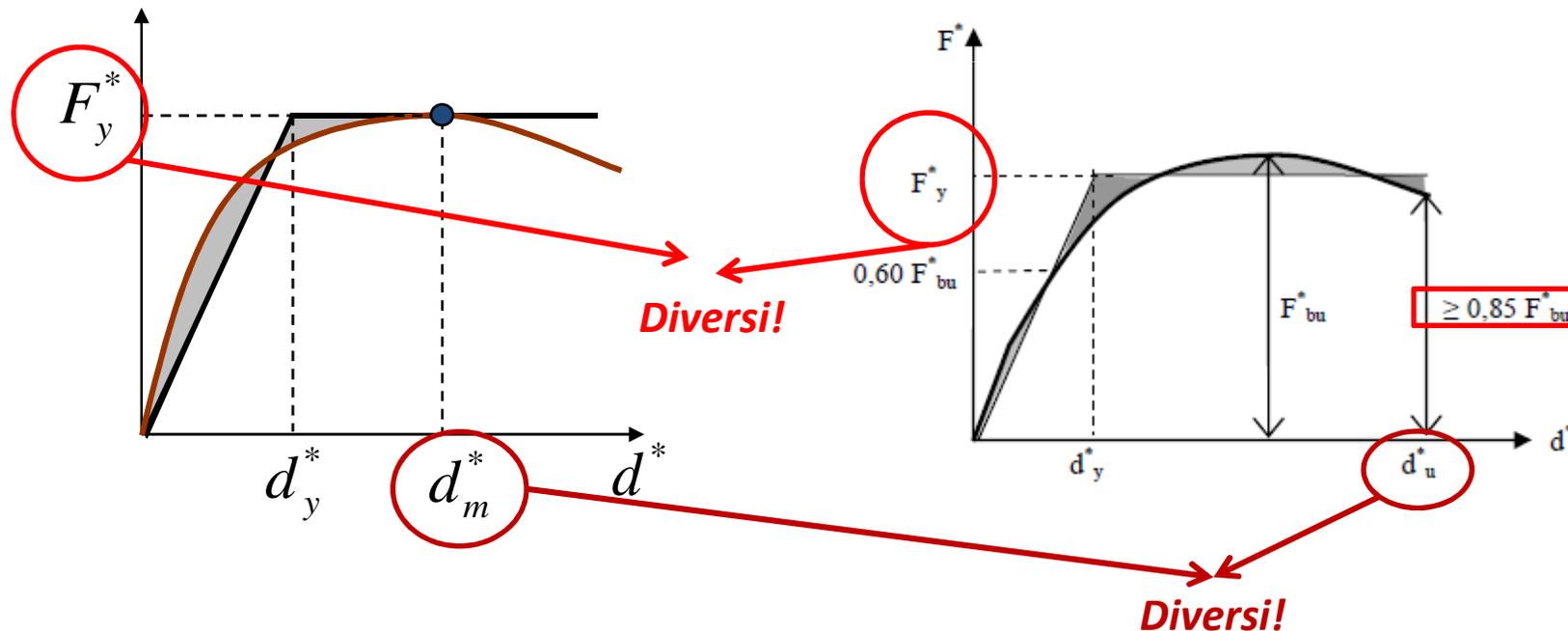
- Lo spostamento target atteso non deve valere più del 150% dello spostamento target trovato dall'applicazione della procedura di determinazione del punto di funzionamento. In tal caso è opportuna una nuova ipotesi di spostamento target atteso. E' possibile adottare la strategia ricorsiva indicata in appendice.

$$\begin{array}{l}
 \boxed{d_m^* \leq 150\% d_t^*} \\
 \begin{array}{l}
 \nearrow d_t^* = d_{et}^* \quad \text{se } T^* > T_c \\
 \searrow d_t^* = \frac{d_{et}^*}{q_u} \left(1 + (q_u - 1) \frac{T_c}{T^*} \right) \quad \text{con } q_u = \frac{S_e(T^*)}{F_y^*/m^*} \\
 \quad \text{se } T^* < T_c \text{ e } F_y^*/m^* \geq S_e(T^*) \\
 \quad \text{se } T^* < T_c \text{ e } F_y^*/m^* < S_e(T^*)
 \end{array}
 \end{array}$$

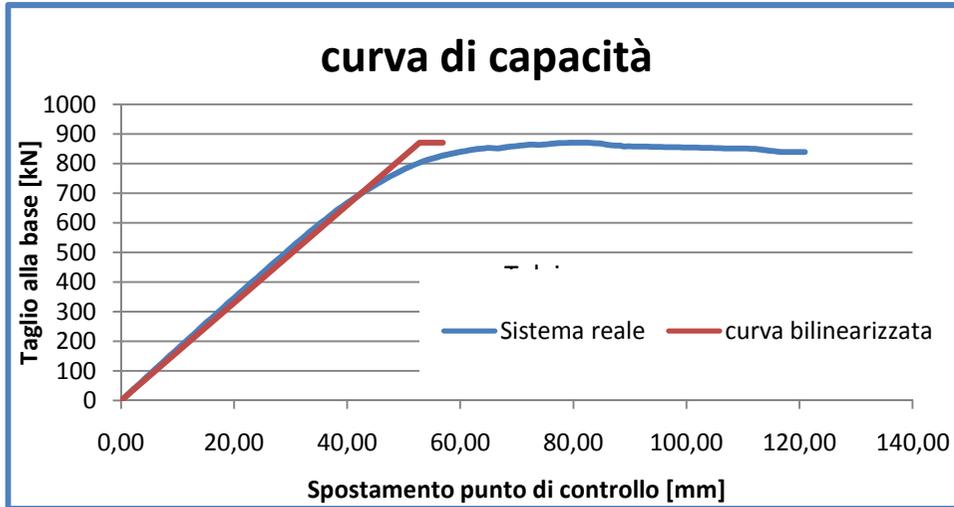
Determinazione Punto di Funzionamento EuroCodici tramite differenza con NTC

DIFFERENZE RISPETTO ALLA COSTRUZIONE DEL TIPO NTC08:

- *Il valore di taglio alla base allo snervamento nella bilinearizzazione della curva di capacità è pari al valore massimo corrispondente allo spostamento target atteso. Questa condizione implica che l'unica incognita sia il valore dello spostamento allo snervamento. Di conseguenza nessuna condizione di intersezione è imposta.*



Determinazione Punto di Funzionamento secondo EuroCodici



Dm^* [mm]	56.91
Em^* [kN m]	26572.0

bilinearizzazione curva di capacità	
perfettamente plastico	
Fy [kN]	1084
Fy^* [kN]	871
dy^* [mm]	52.81
T^* [s]	0.54
fy^*	0.73

$Se(T)$	0.79
dte^* [mm]	57.35
dt^* [mm]	57.35
qu	1
dt	71.39922
$dt^* \cdot dm^*$	0.44
$dt^*/dm^* \%$	100.76869
valore accettabile secondo NTC08	

Confronto NTC08 - EC

dt [mm]	71.15057	VS	dt	71.39922
-----------	-----------------	----	------	-----------------

