

VALUTAZIONE DEGLI EDIFICI ESISTENTI
ANALISI STATICA NON LINEARE A
PLASTICITA'CONCENTRATA
APPLICAZIONE

Questo tipo di analisi può essere applicato per gli seguenti scopi:

- valutare i rapporti di sovraresistenza α_1/ α_u
- valutare l'effettiva duttilità globale in spostamento
- verificare l'effettiva distribuzione della domanda inelastica negli edifici progettati con il fattore di riduzione q ;
- come metodo di progetto per gli edifici di nuova costruzione sostitutivo dei metodi di analisi lineari;

- come metodo per la valutazione della capacità di edifici esistenti.



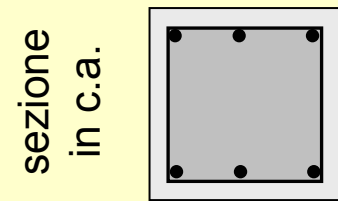
Metodo di verifica dei metodi di analisi lineare

L'analisi statica non lineare consente di rappresentare l'effettivo comportamento:

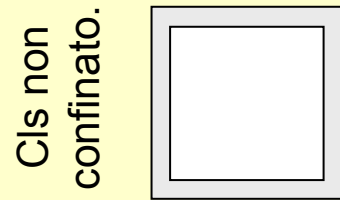
- del materiale
- della sezione
- dell'elemento
- della struttura.

Procedendo secondo questo processo logico-strutturale è possibile valutare la **CAPACITA'** intesa sia in termini di resistenza e (soprattutto) in termini di spostamento

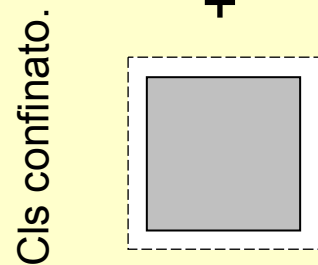
ANALISI DELLA SEZIONE



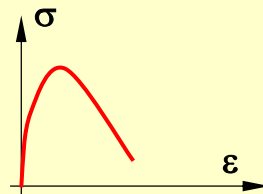
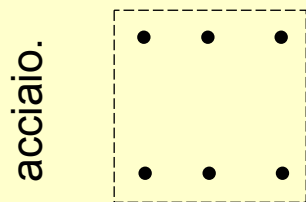
||



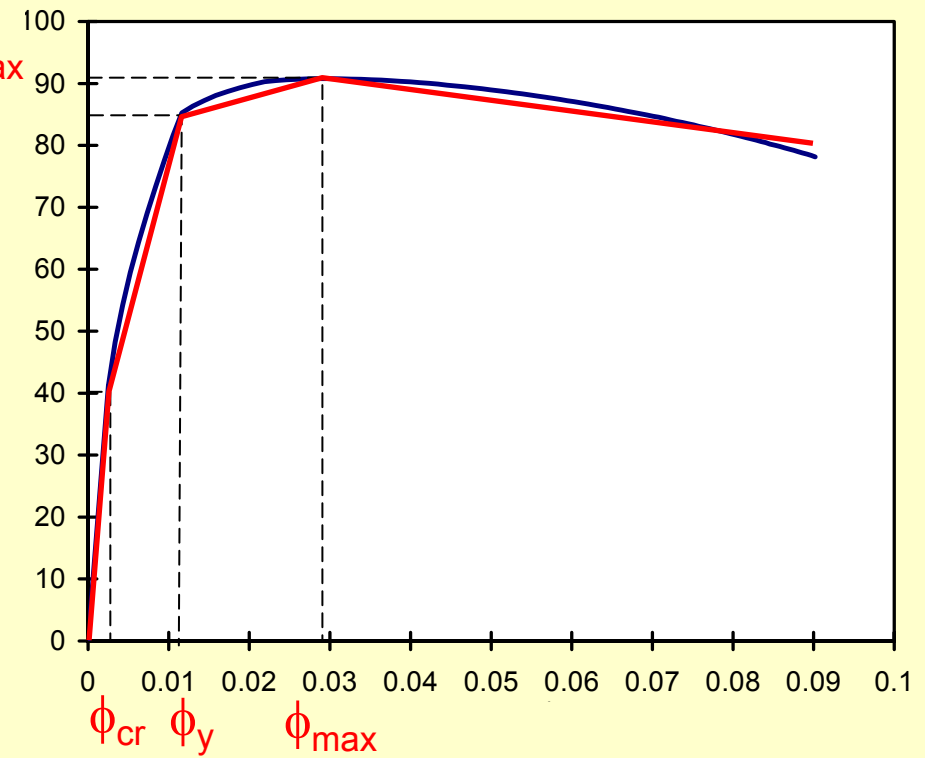
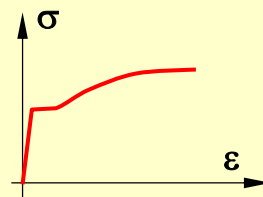
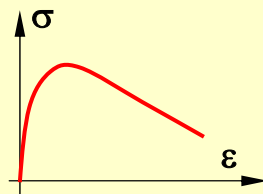
+



+

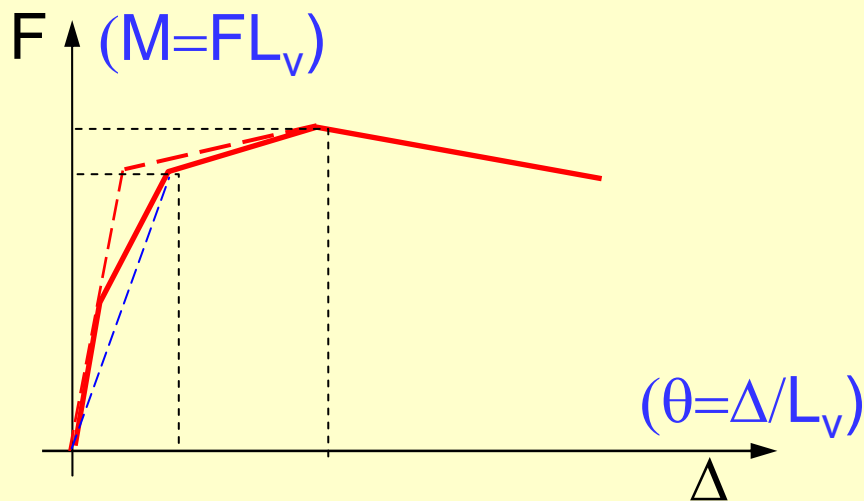
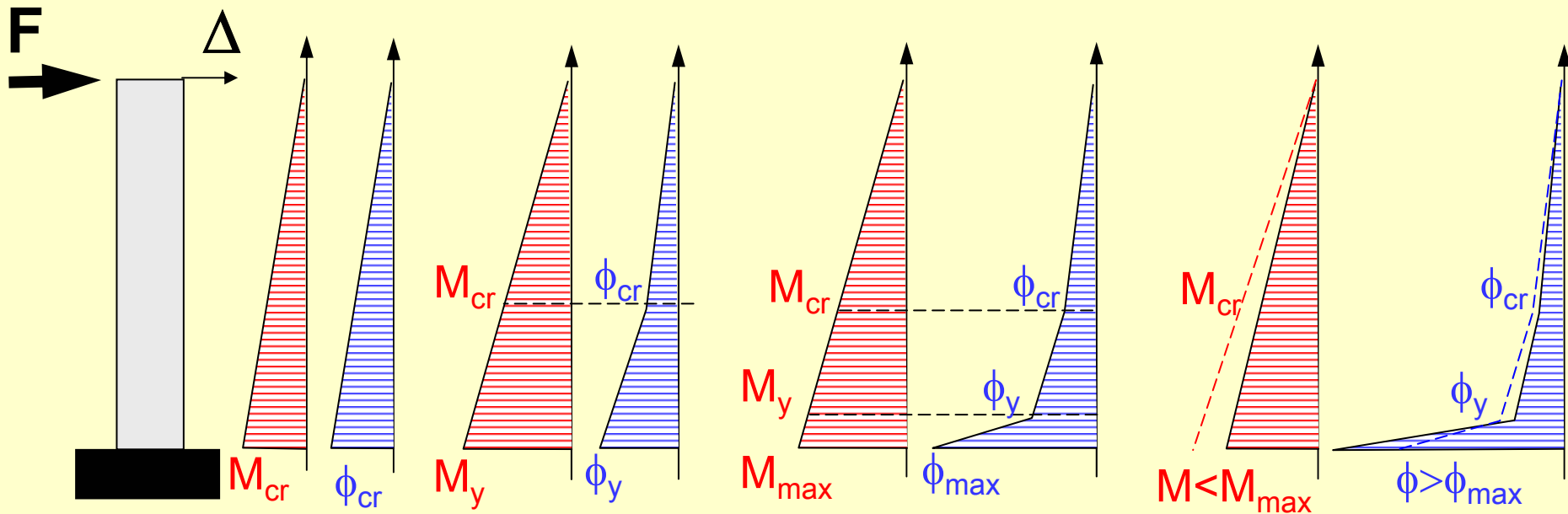


M_{cr}



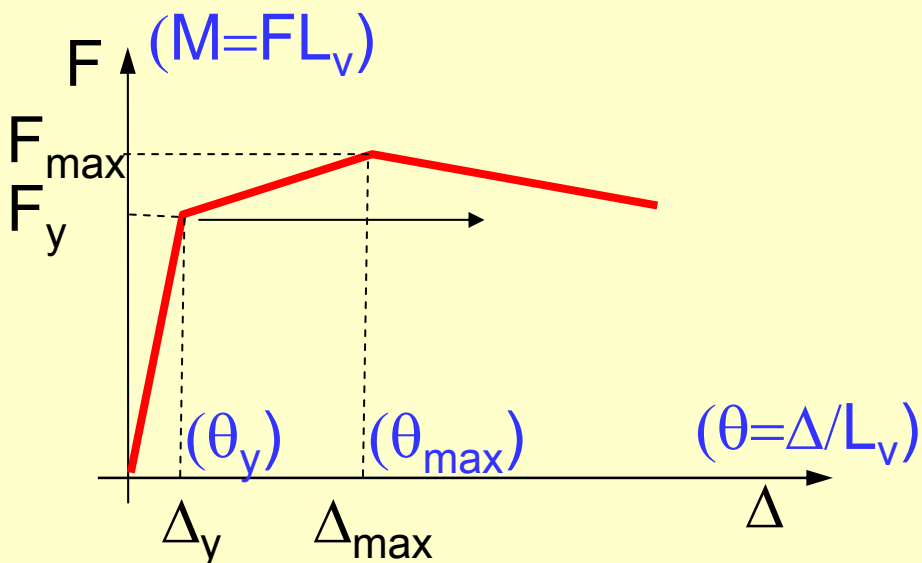
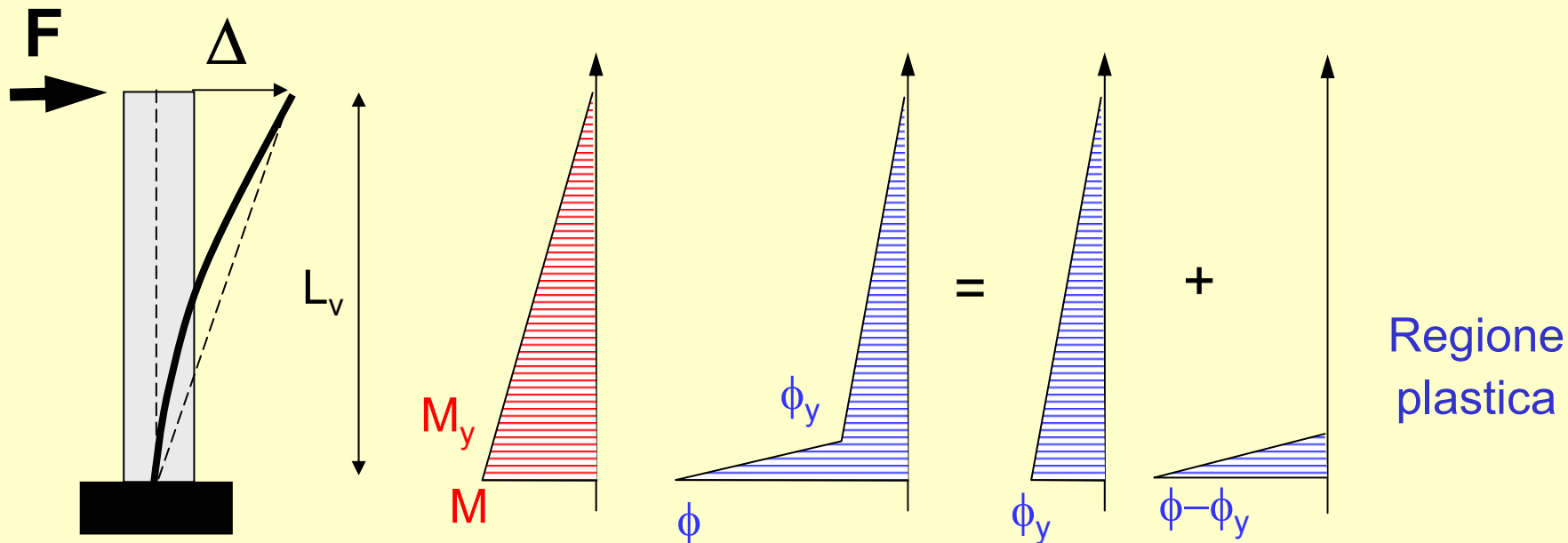
1. Fase elastica
2. Fase fessurata
3. Fase post-elastica
4. Fase post-picco (softening)

LA RISPOSTA STRUTTURALE DELL'ELEMENTO



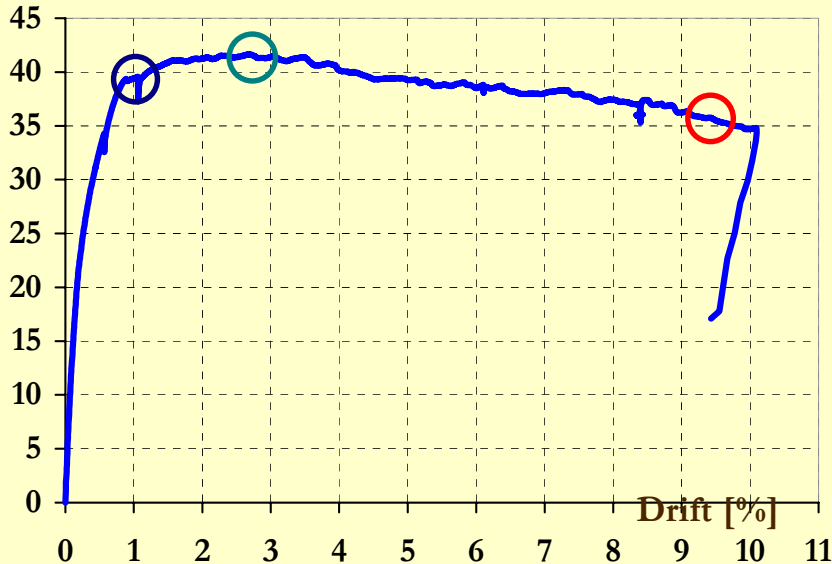
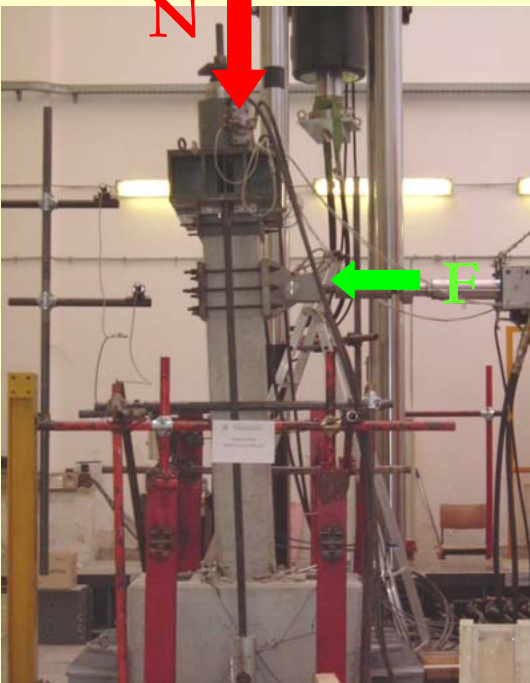
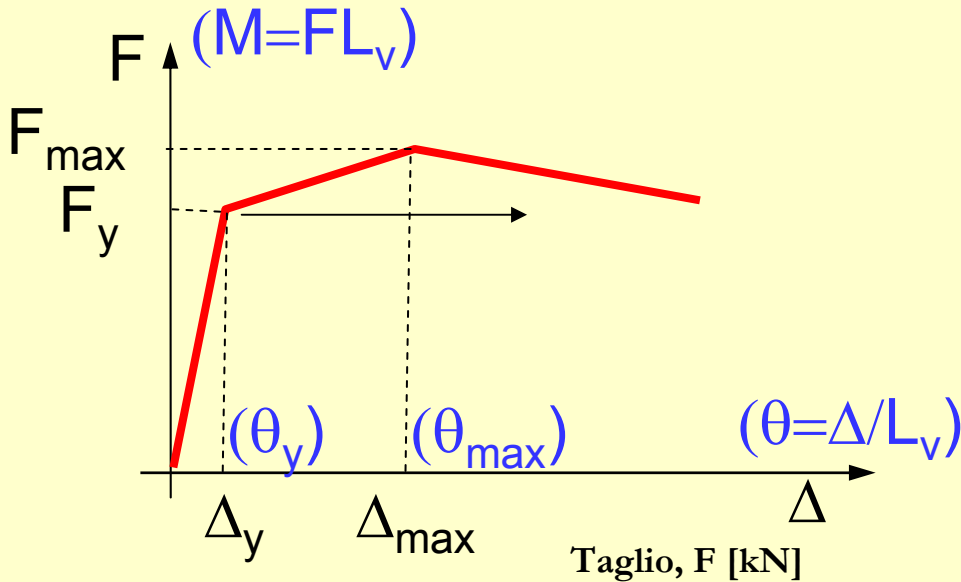
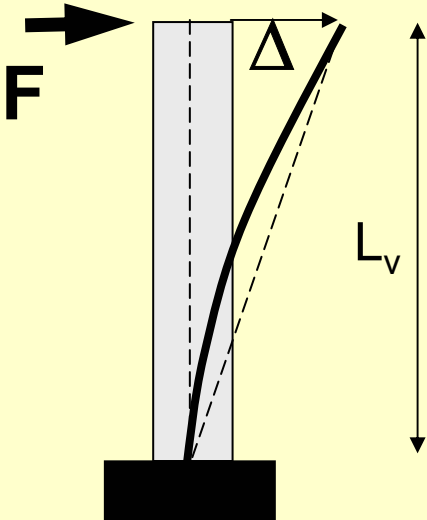
- ✚ Distribuzione dei momenti flettenti
- ✚ Distribuzione delle curvature
- ✚ Valutazione dello spostamento mediante applicazione PLV

I CONTRIBUTI DEFORMATIVI FLESSIONALI

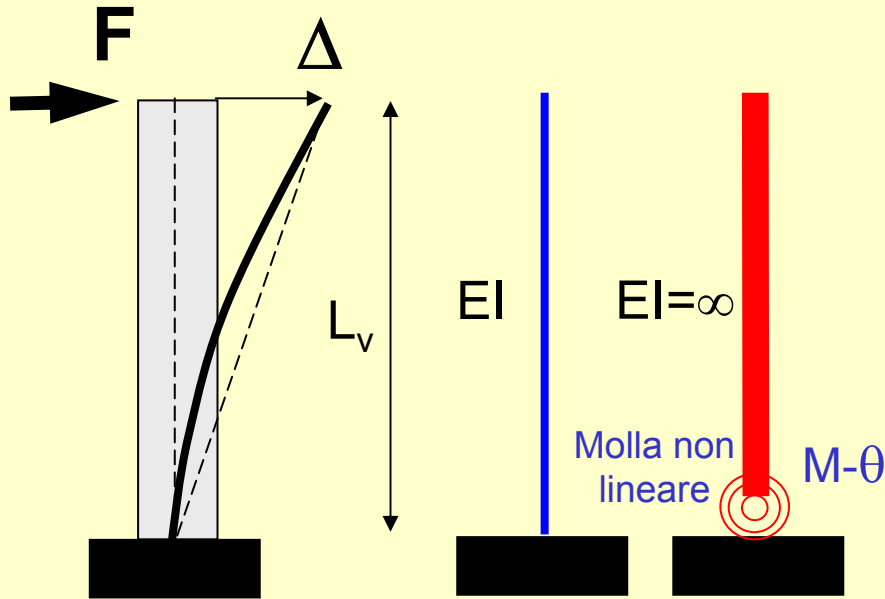


\downarrow \downarrow
 Contributo elastico Contributo plastico

I CONTRIBUTI DEFORMATIVI FLESSIONALI



LA PLASTICITA' CONCENTRATA



$$\text{Se } F \leq F_y$$

$$\Delta = FL_v/K = M/K$$

$$K = 3EI/L_v^2$$

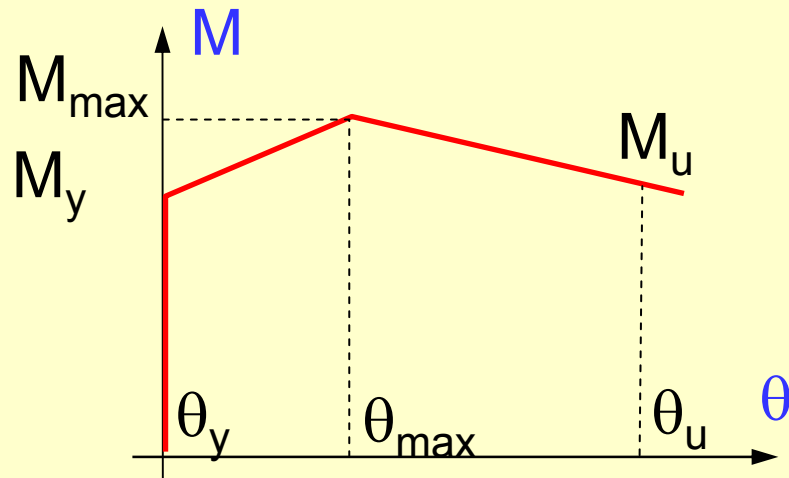
$$\text{Se } F_y \leq F \leq F_{\max}$$

$$\Delta = \Delta_y + \Delta_p$$

$$\Delta_y = F_y L_v / K = M_y / K$$

$$\Delta_p = (F - F_y) L_v / K_1 = (M - M_y) / K_1$$

$$K_1 = (M_{\max} - M_y) / (\theta_{\max} - \theta_y)$$

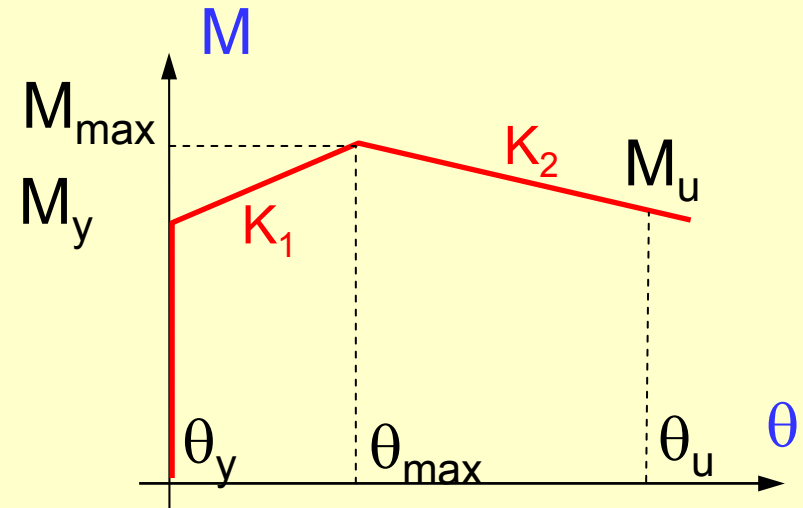
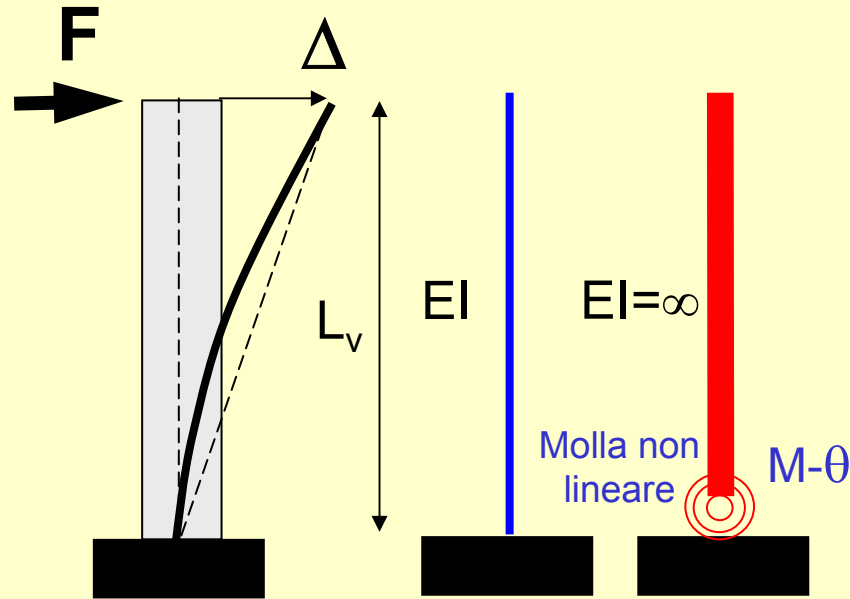


$$\text{Se } \theta \geq \theta_{\max}$$

$$F = F_{\max} + (\theta - \theta_{\max}) K_2 / L_v$$

$$K_2 = (M_u - M_{\max}) / (\theta_u - \theta_{\max})$$

LA CARATTERIZZAZIONE DELLA CERNIERA PLASTICA



$$K_1 = (M_{\max} - M_y) / (\theta_{\max} - \theta_y)$$

$$K_2 = (M_u - M_{\max}) / (\theta_u - \theta_{\max})$$

Parametri statici

M_y

M_{\max}

M_u

Parametri deformativi

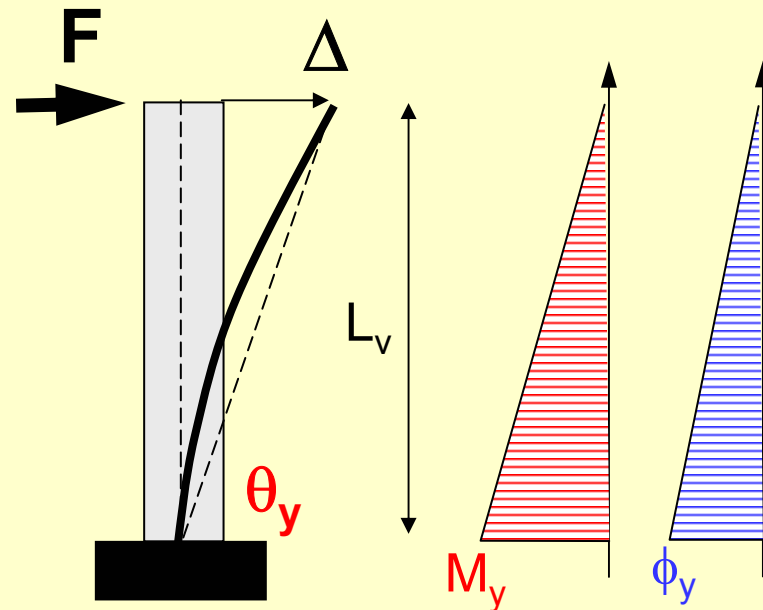
θ_y

θ_{\max}

θ_u



LA ROTAZIONE AL LIMITE ELASTICO (SNERVAMENTO)



$$\theta_y = \phi_y L_v / 3$$

Analisi della
sezione

$$\phi_y = \varepsilon_y / (h - x_c)$$

Valutazione
approssimata

$$\phi_y = \gamma \varepsilon_y / H$$

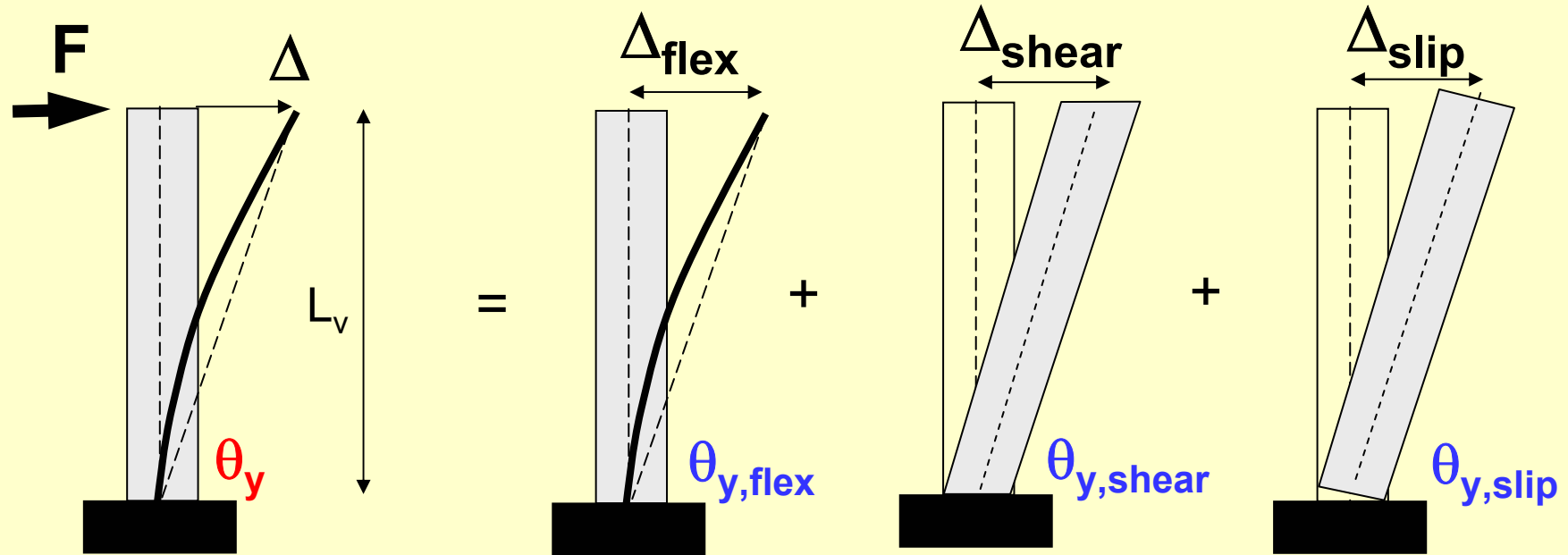
La rotazione allo snervamento così valutata tiene conto
della deformabilità flessionale

A questa va aggiunta la componente deformativa:

Tagliante

Scorrimento delle barre di armatura

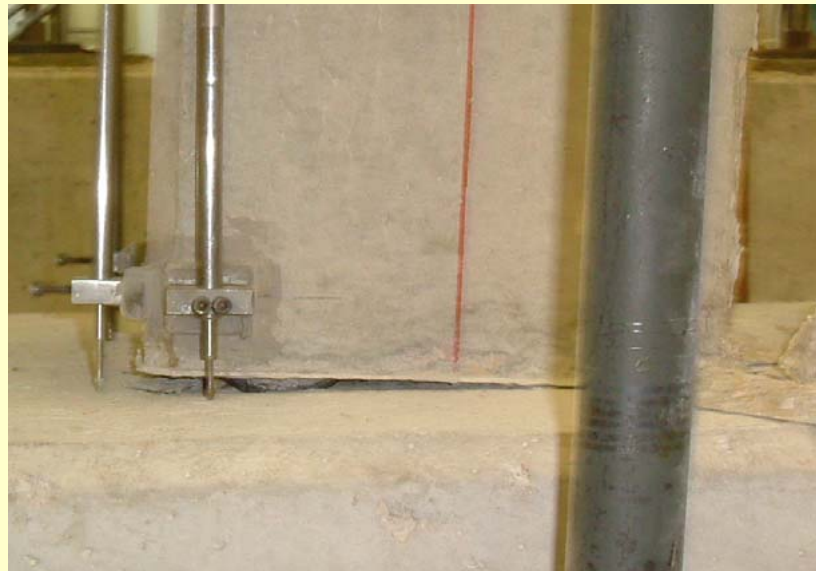
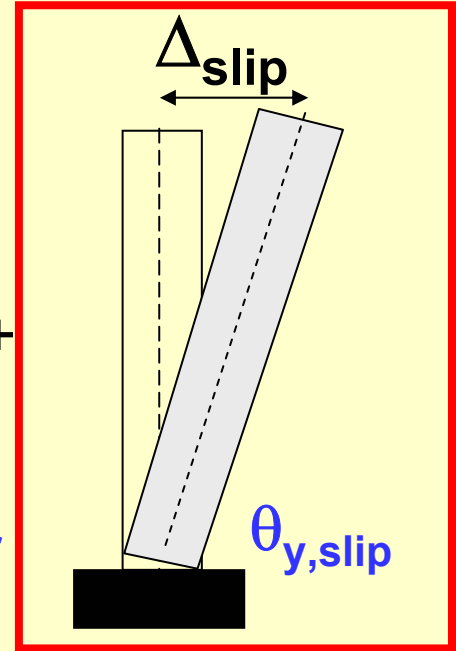
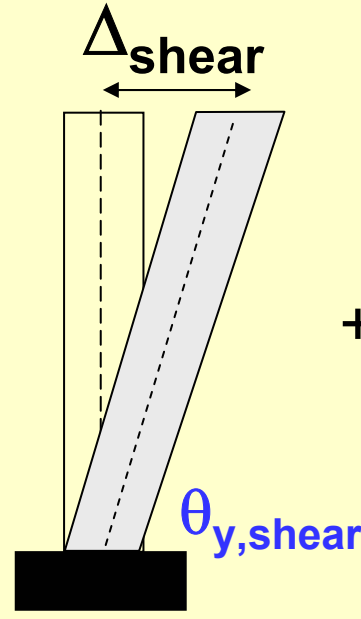
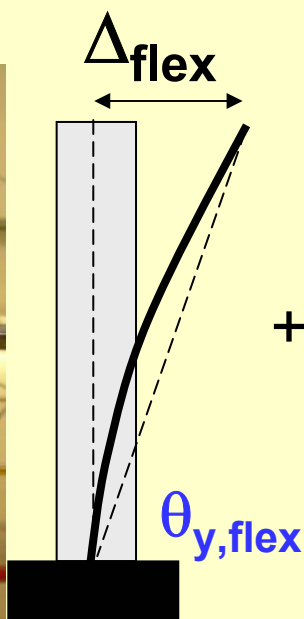
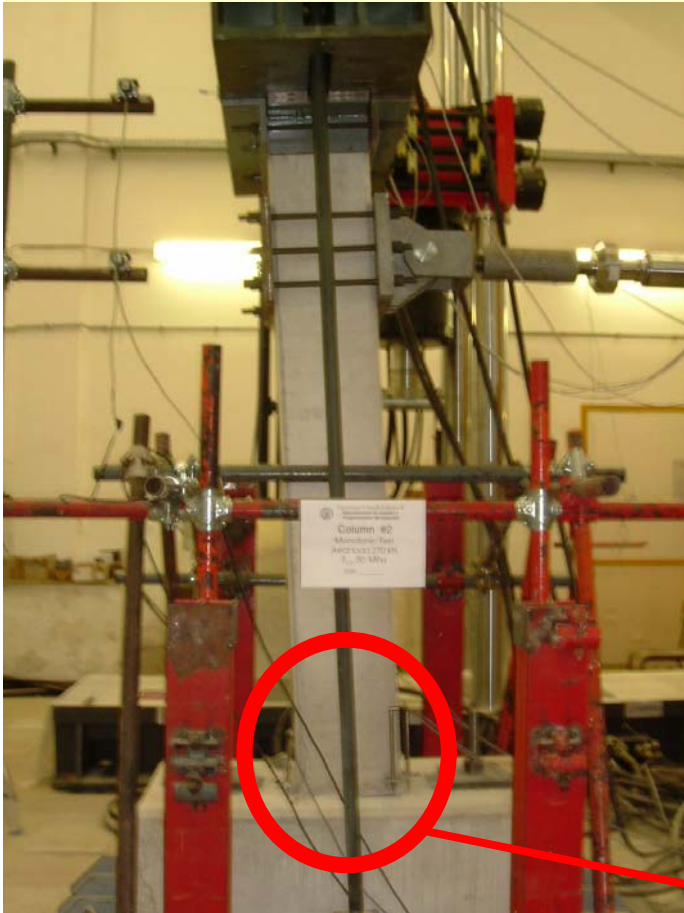
LA ROTAZIONE AL LIMITE ELASTICO: I DIVERSI CONTRIBUTI DEFORMATIVI



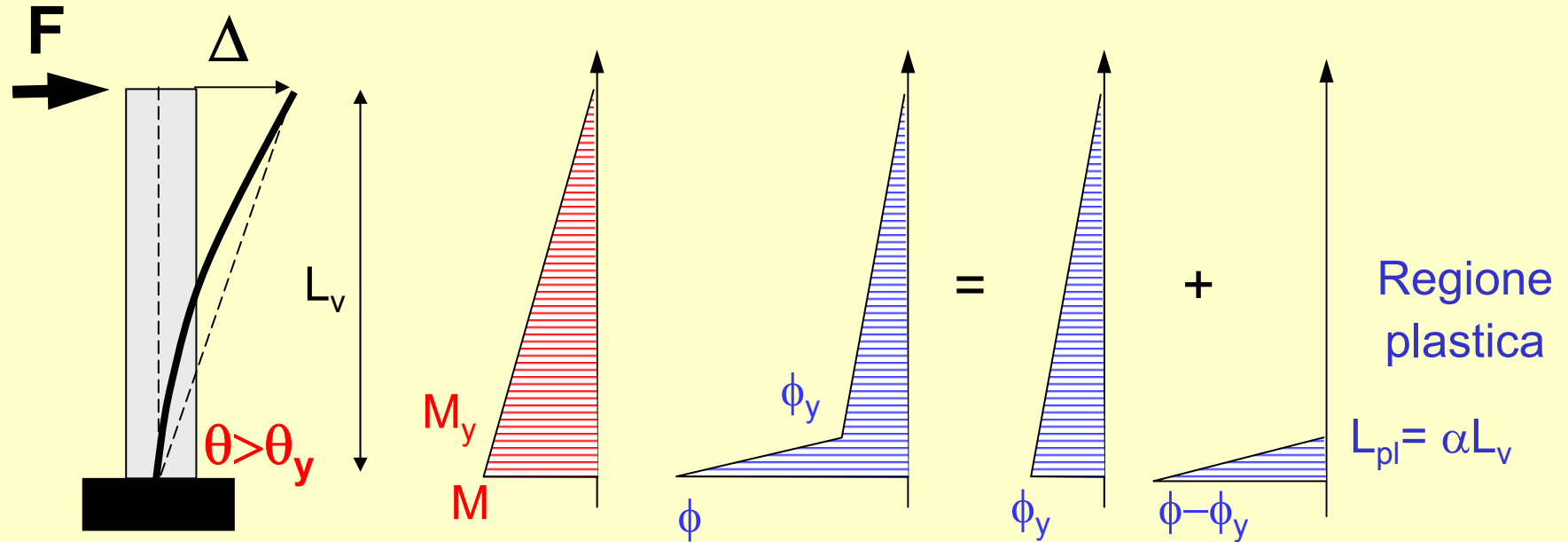
$$\theta_y = \phi_y \frac{L_v}{3} + 0,0013 \left(1 + 1,5 \frac{h}{L_v} \right) + 0,13 \phi_y \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}}$$

Valutazione dei 3 contributi (OPCM 3274-3431)

LA ROTAZIONE AL LIMITE ELASTICO: I DIVERSI CONTRIBUTI DEFORMATIVI



LA ROTAZIONE PLASTICA: LA LUNGHEZZA DELLA CERNIERA PLASTICA



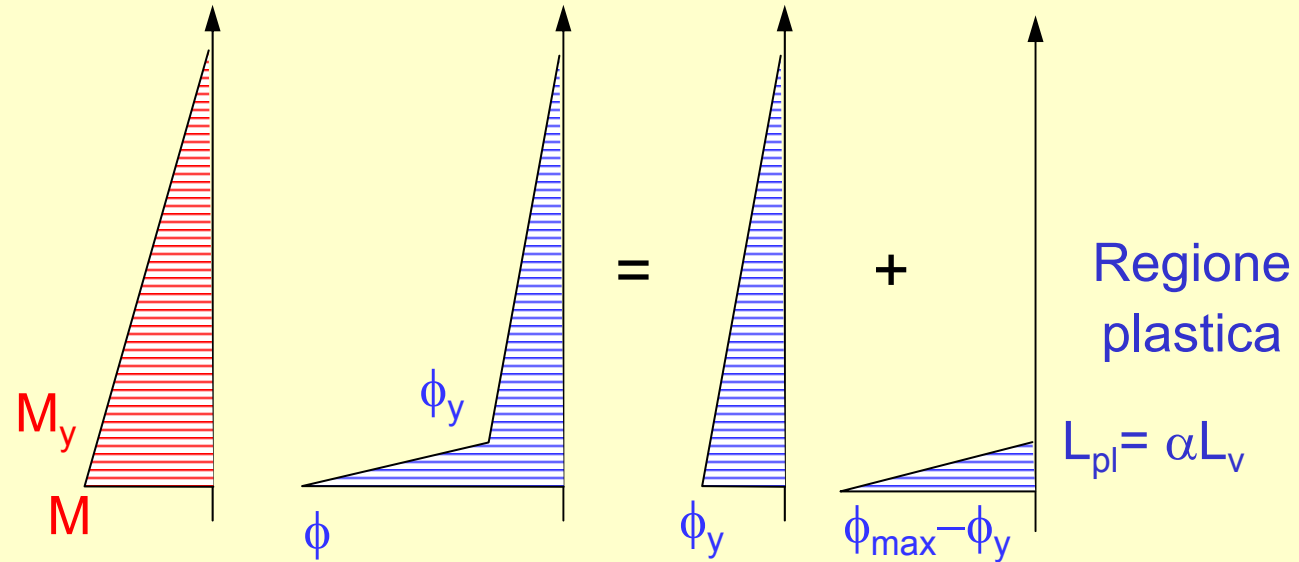
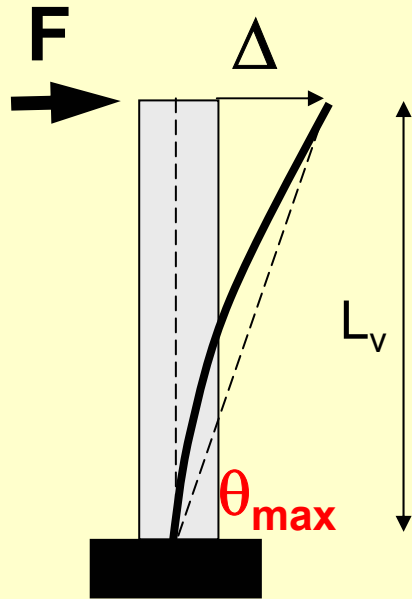
$$\theta = \theta_y + \theta_p$$

$$\theta_p = 0.5(\phi - \phi_y)L_{pl} (1 - 0.5L_{pl}/L_v)$$

$$L_{pl} = \alpha L_v$$

$$\alpha = (M - M_y)/M$$

LA ROTAZIONE DI PICCO



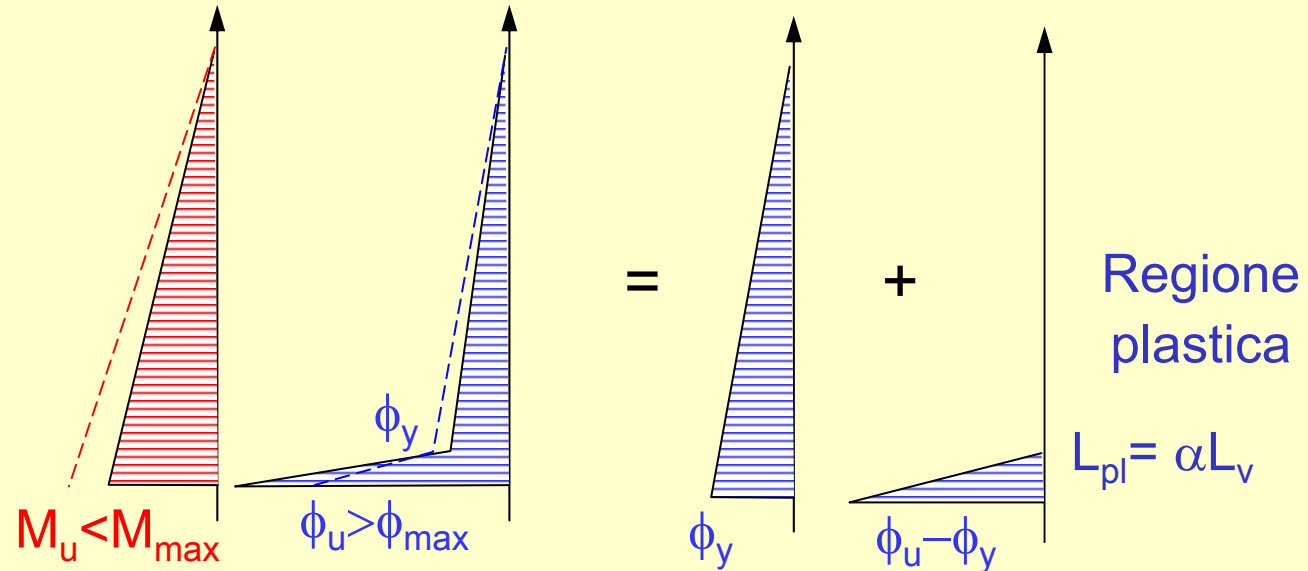
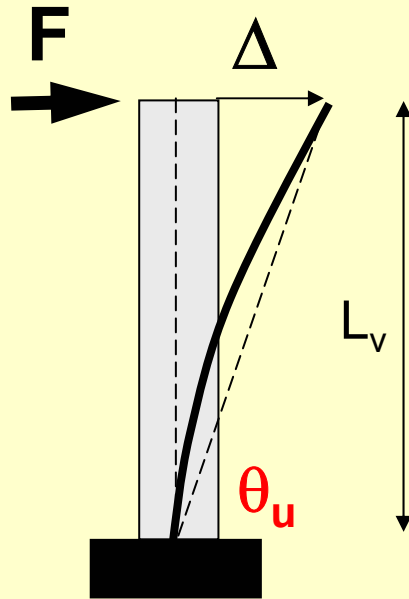
$$\theta_{\max} = \theta_y + \theta_{p,\max}$$

$$\theta_{p,\max} = 0.5(\phi_{\max} - \phi_y)L_{pl} (1 - 0.5L_{pl}/L_v)$$

$$L_{pl} = \alpha L_v$$

$$\alpha = (M_{\max} - M_y) / M_{\max}$$

LA ROTAZIONE ULTIMA



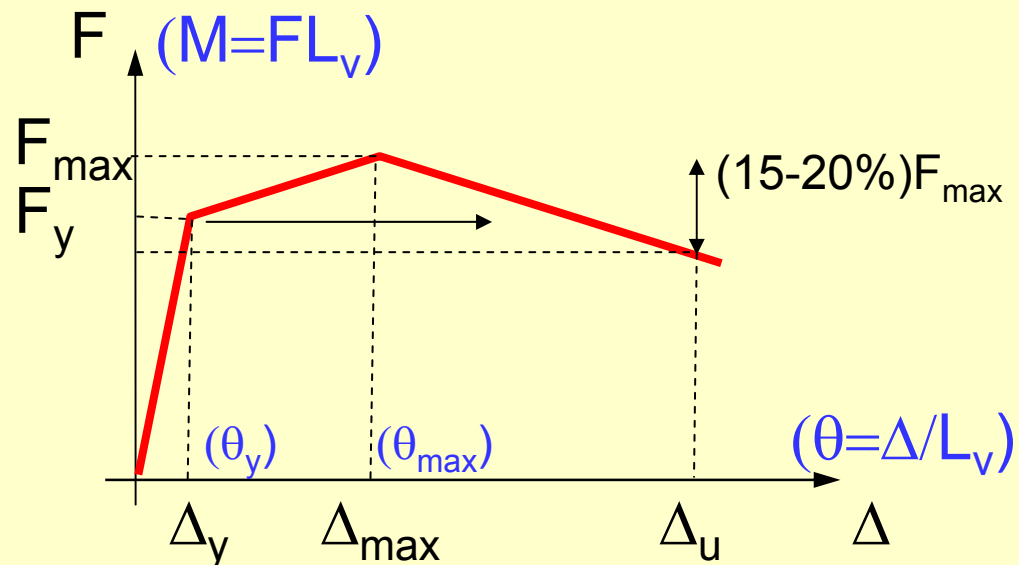
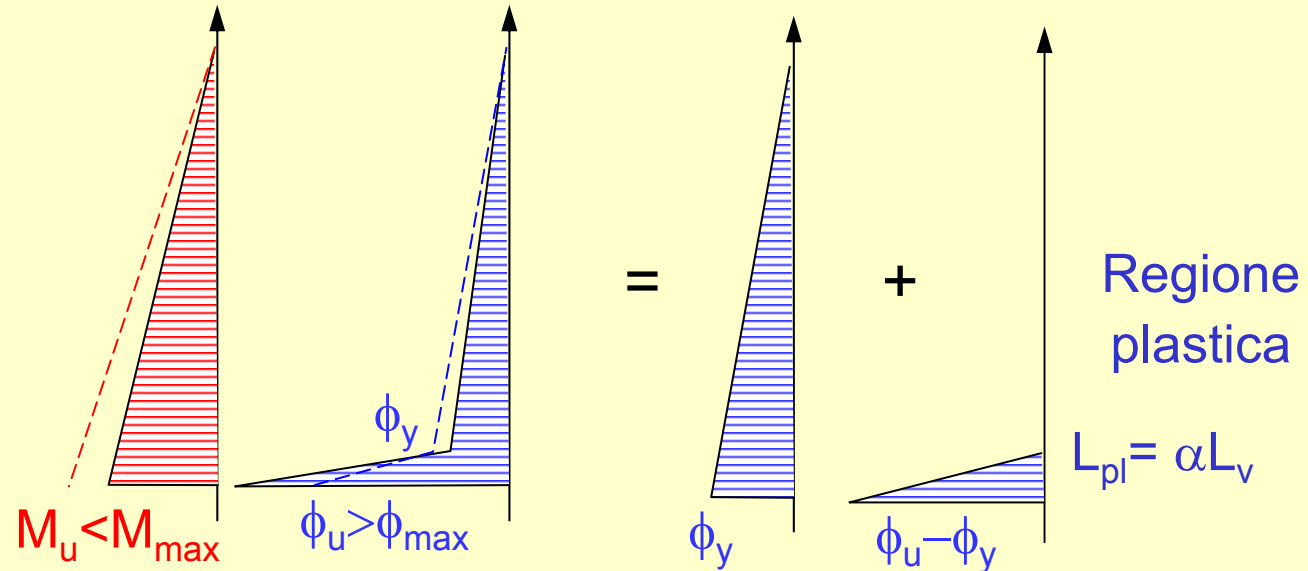
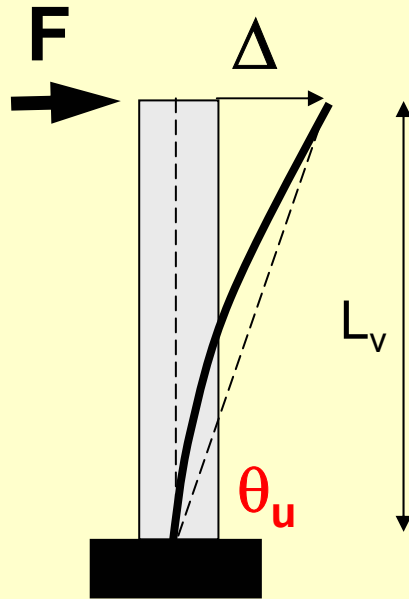
$$\theta_u = \theta_y + \theta_{p,u}$$

$$\theta_{p,u} = 0.5(\phi_u - \phi_y)L_{pl} (1 - 0.5L_{pl}/L_v)$$

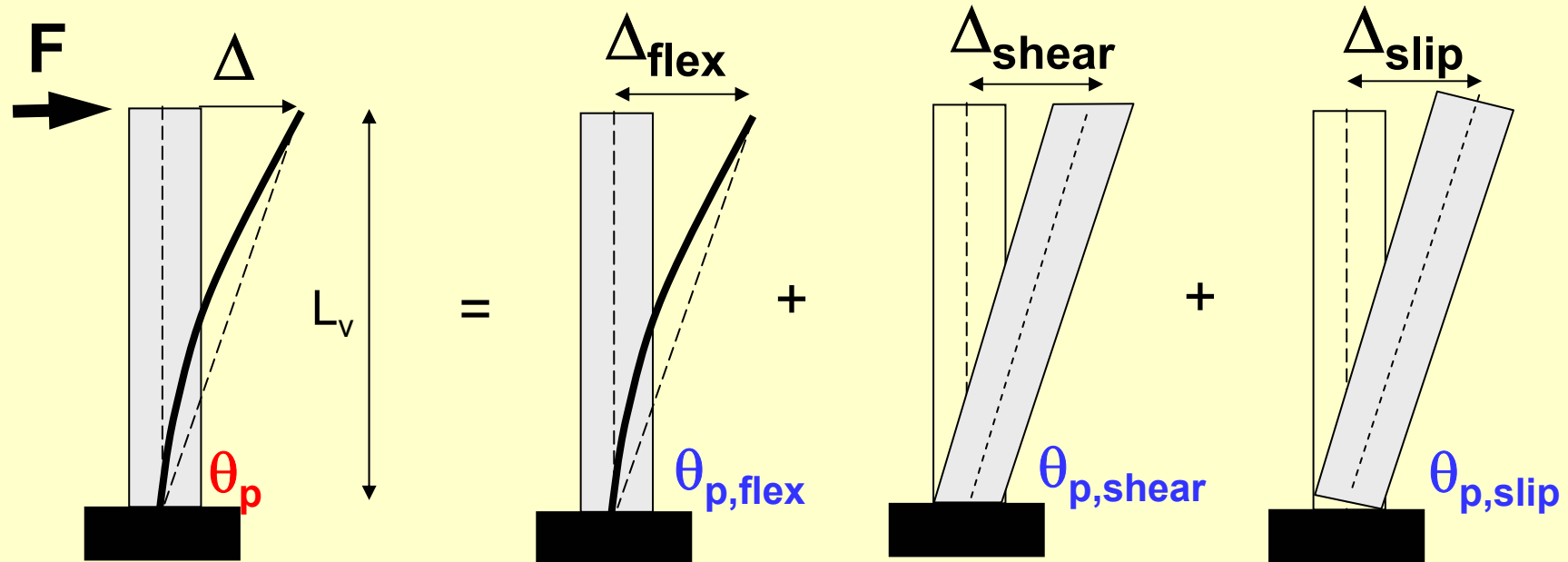
$$L_{pl} = \alpha L_v$$

$$\alpha = (M_{max} - M_y) / M_{max}$$

LA ROTAZIONE ULTIMA: DEFINIZIONE



LA ROTAZIONE PLASTICA: CONSIDERAZIONI



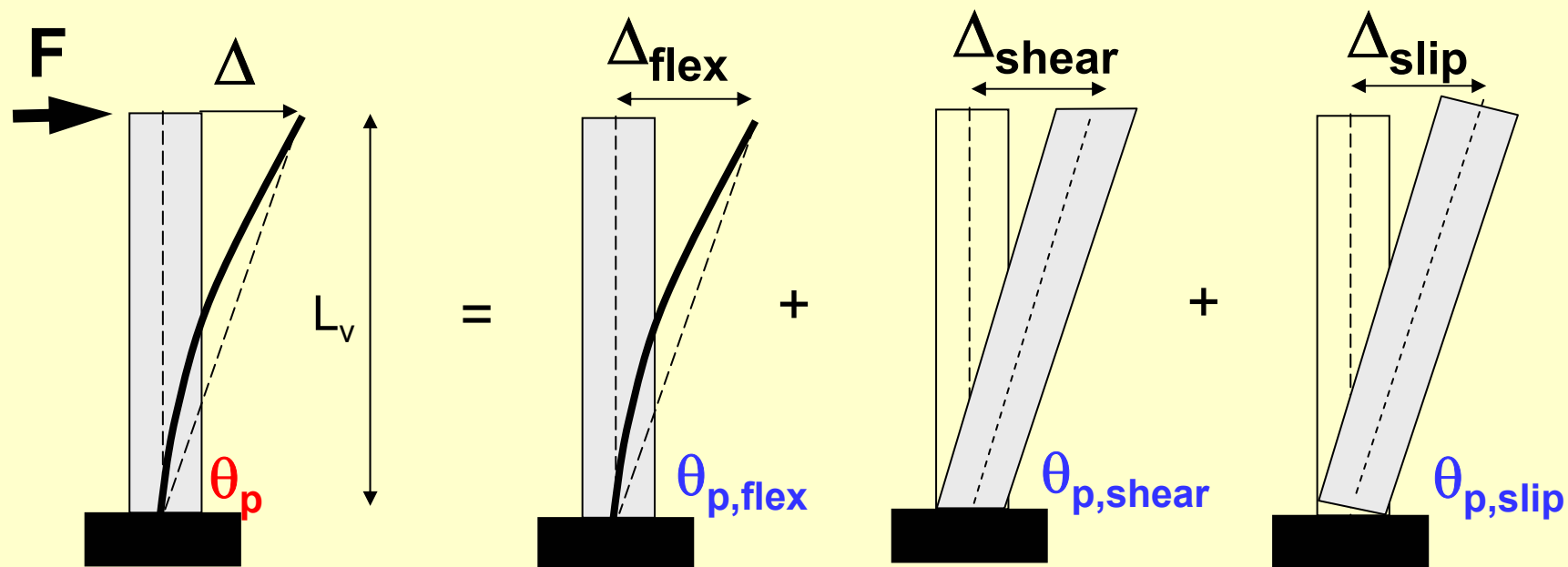
Ma anche in questo caso la rotazione plastica così valutata
tiene conto della sola deformabilità flessionale

A questa va aggiunta la componente deformativa:

Tagliante

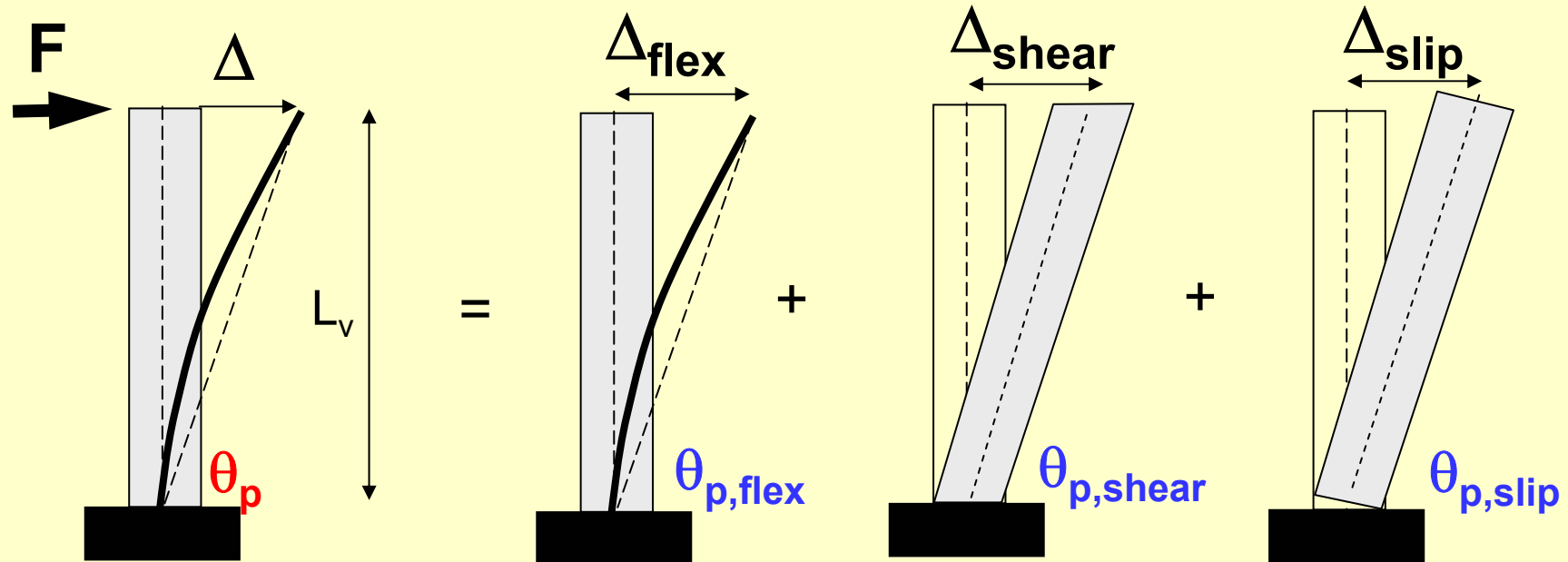
Scorrimento delle barre di armatura

LA VALUTAZIONE DEI CONTRIBUTI DEFORMATIVI



In genere, i contributi aggiuntivi (taglianti e di scorrimento barre) sono valutati aumentando la lunghezza della regione plastica, L_{pl}

LA ROTAZIONE ULTIMA: I CONTRIBUTI DEFORMATIVI



OPCM 3274-3431 propone in particolare una lunghezza di cerniera plastica per la sola condizione "ultima", ossia:

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} \left(\theta_y + (\phi_u - \phi_y) L_{pl} \left(1 - \frac{0,5L_{pl}}{L_v} \right) \right)$$

$$L_{pl} = 0,1L_v + 0,17h + 0,24 \frac{d_{bL} f_y}{\sqrt{f_c}}$$

LA ROTAZIONE ULTIMA: I CONTRIBUTI DEFORMATIVI

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

La lunghezza di cerniera plastica è tarata direttamente per la condizione ultima così come definita in precedenza.

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} \left(\theta_y + (\phi_u - \phi_y) L_{pl} \left(1 - \frac{0,5L_{pl}}{L_v} \right) \right)$$

In particolare, la curvatura ultima ϕ_u è valutata considerando le deformazioni ultime del conglomerato (tenuto conto del confinamento) e dell'acciaio da stimare:

sulla base dell'allungamento uniforme al carico massimo,

in mancanza di informazioni si può assumere che la deformazione ultima dell'acciaio sia pari al 4%)

Ciò non consente di utilizzare, a rigore, la stessa formulazione per la valutazione della rotazione θ_{max} .

LA CARATTERIZZAZIONE DELLA CERNIERA PLASTICA

La caratterizzazione meccanica della molla rotazionale non lineare, dipende in definitiva da una serie di parametri:

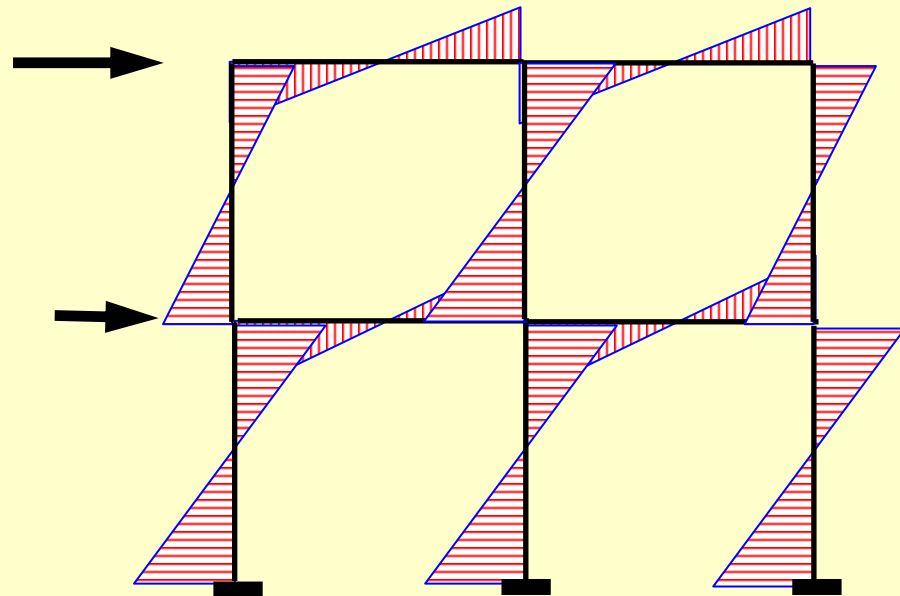
Geometrici: *dimensioni della sezione (B e H), luce di taglio (L_v), diametro delle barre (d_{bl}), ecc.*

Meccanici : *resistenze dei materiali, resistenze flessionali, curvature flessionali, ecc.*

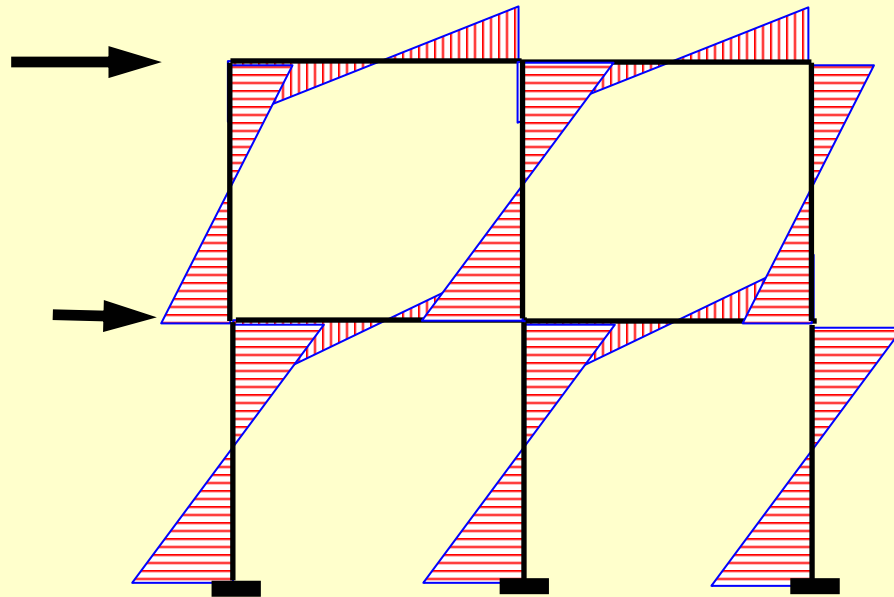
IL MODELLO A PLASTICITA' CONCENTRATA NELLE STRUTTURE A TELAIO

Nelle strutture intelaiate soggette ad azioni orizzontali, quali quelle indotte da eventi sismici, le sollecitazioni flettenti massime si verificano in corrispondenza delle estremità di travi e colonne. E' dunque in questi punti che, una volta superata la soglia elastica, si concentrano le deformazioni anelastiche.

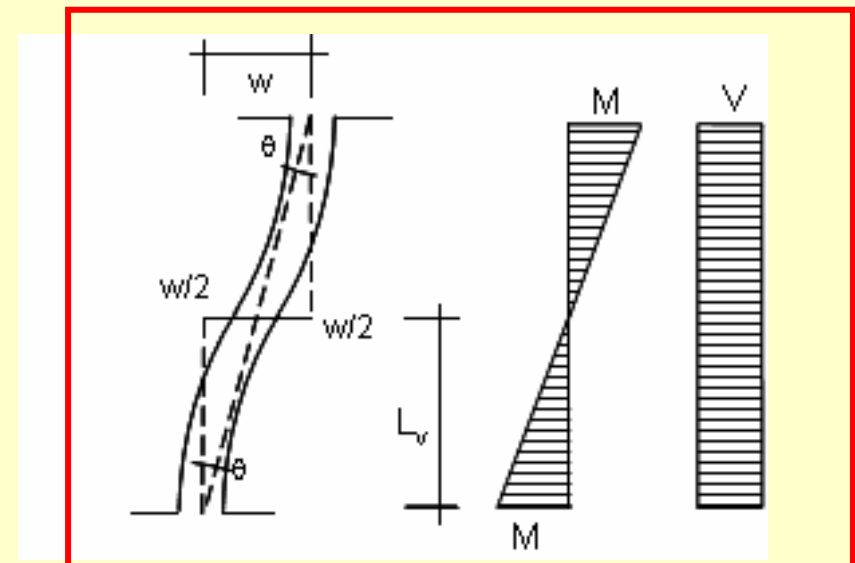
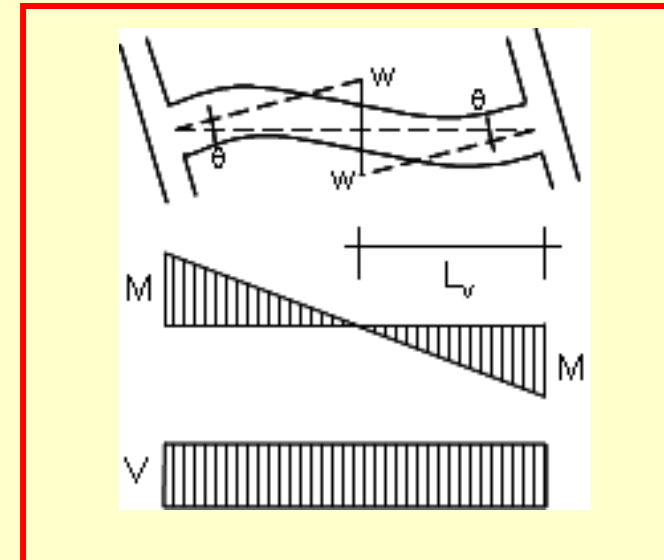
Partendo da queste considerazioni, alcuni modelli di trave considerano la plasticità tutta concentrata in cerniere plastiche puntuali disposte alle estremità degli elementi. Tali modelli vengono denominati modelli a **plasticità concentrata**.



IL MODELLO A PLASTICITA' CONCENTRATA NELLE STRUTTURE A TELAIO



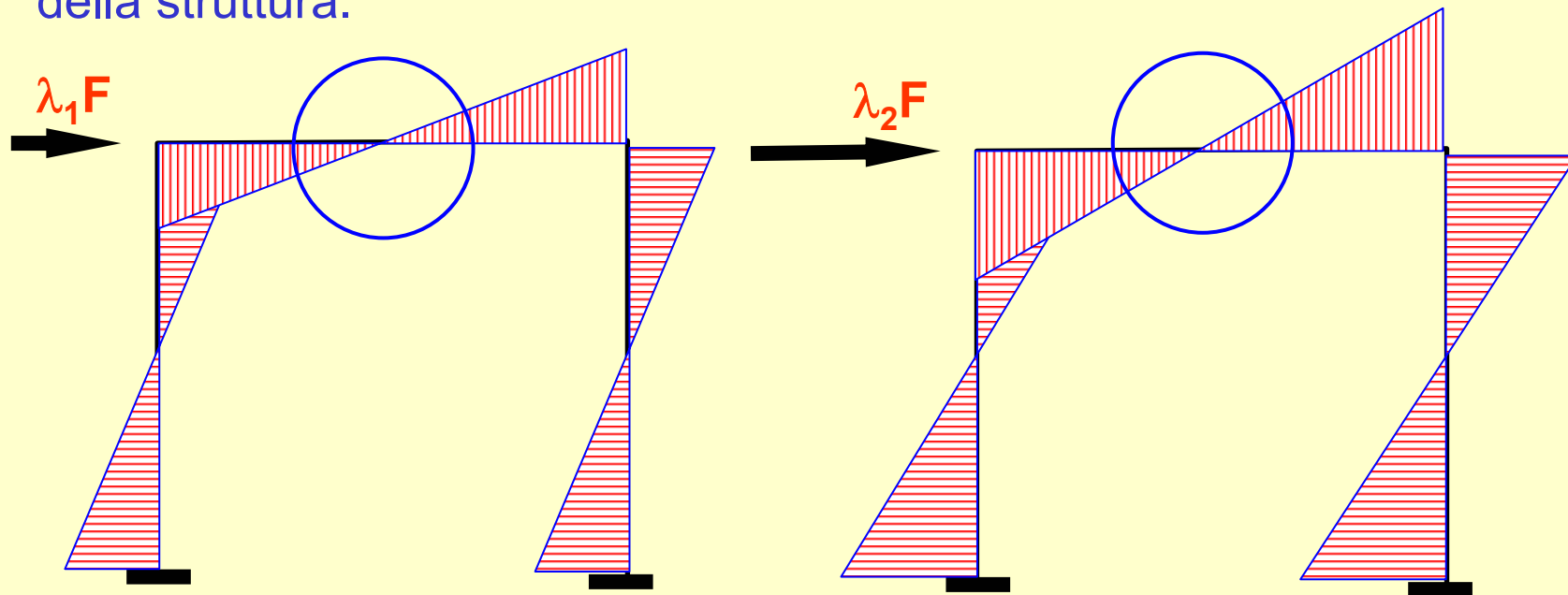
Nell'ipotesi di trascurare gli effetti dei carichi verticali, la distribuzione dei momenti risulta lineare e quindi l'elemento può essere riguardato come una trave a mensola, di luce L_v e caricata da una forza concentrata all'estremo libero.



IL MODELLO A PLASTICITA' CONCENTRATA: LA LUCE DI TAGLIO

La corretta valutazione del punto di flesso della deformata (punto di nullo del diagramma dei momenti), ossia della luce di taglio L_v non è di facile risoluzione.

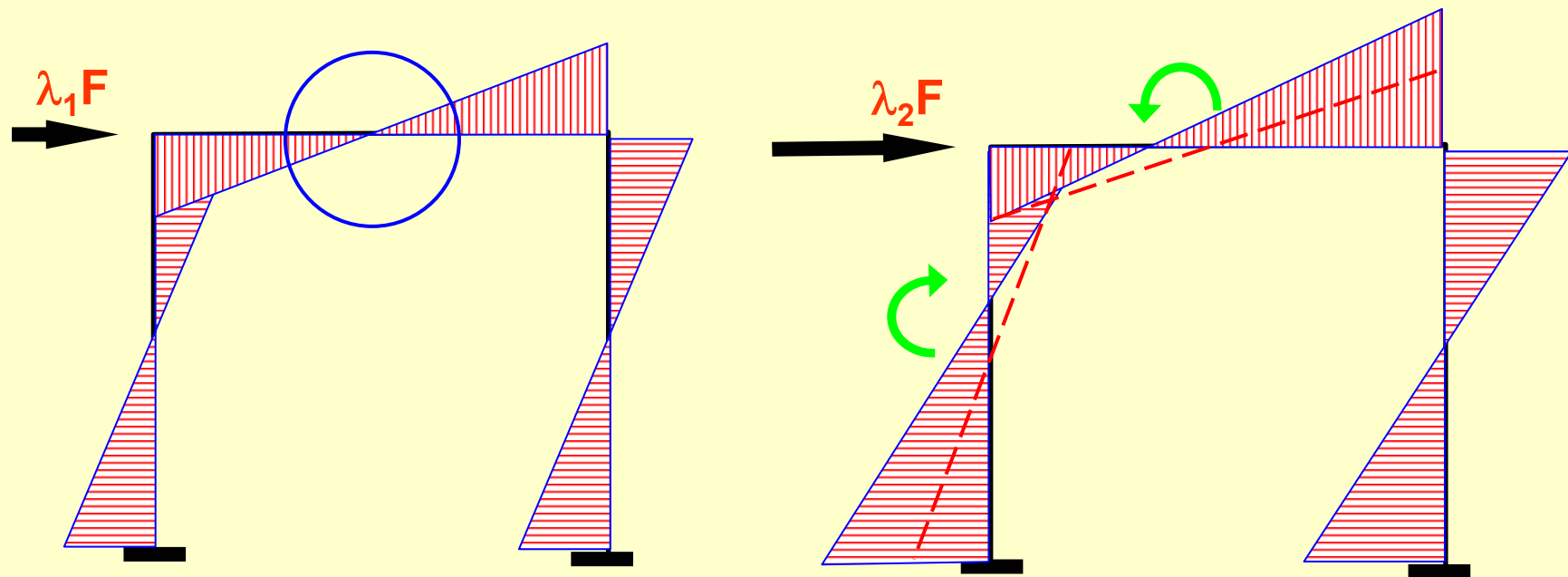
Una semplice analisi lineare consente di valutare in maniera esatta la posizione del punto di flesso durante il comportamento lineare della struttura.



IL MODELLO A PLASTICITA' CONCENTRATA: LA LUCE DI TAGLIO

D'altro canto, le prime formazioni di regioni plastiche comportano una redistribuzione delle sollecitazioni flettenti con conseguente traslazione del punto di flesso.

$$M_y(\text{positivo}) = 3 * M_y(\text{negativo})$$



IL MODELLO A PLASTICITA' CONCENTRATA: LA LUCE DI TAGLIO

Inoltre, la caratterizzazione meccanica della cerniera plastica è direttamente influenzata dalla posizione del punto di flesso per cui la sua variazione comporterebbe una diversa caratterizzazione della stessa. (problemi di convergenza del calcolo non lineare).

Pertanto in genere la posizione del punto di flesso, L_v è assunta costante durante il processo di carico (di analisi)

- (a)** la luce di taglio è valutata come metà della luce dell'elemento ($L_v=0.5L$).
- (b)** la luce di taglio è desunta dal diagramma dei momenti flettenti presente lungo l'elemento valutato mediante una analisi elastico lineare (statica o modale);
- (c)** la luce di taglio è desunta dal diagramma dei momenti flettenti presente lungo l'elemento, valutato mediante una analisi non lineare (es. analisi limite), corrispondente ad una configurazione deformata caratterizzata da uno spostamento del punto di controllo pari allo spostamento sismico richiesto.

IL MODELLO A PLASTICITA' CONCENTRATA NELLE STRUTTURE A TELAIO

In definitiva si effettuano due assunzioni fondamentali:

lo stato della zona plastica è determinato da quello della sezione di interfaccia trave-colonna. Questa assunzione può introdurre delle discrepanze tra il comportamento reale e quello colto dalla modellazione, legate soprattutto allo spostamento del punto di flesso durante l'analisi strutturale.

La rigidezza è considerata costante nella regione plastica e pari ad un valore che dipende dalla rigidezza della sezione di interfaccia trave-colonna.

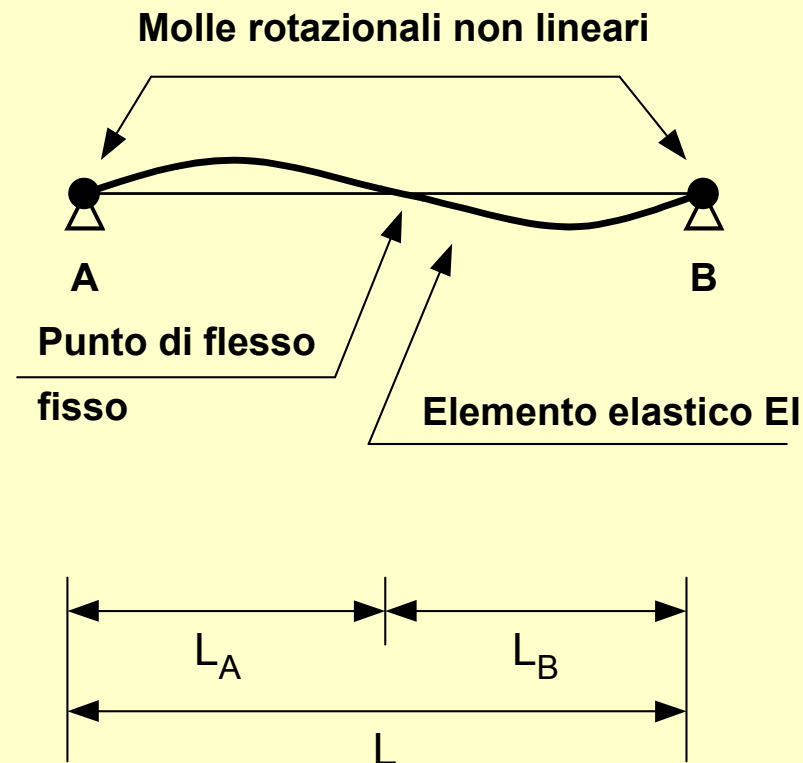
Sovrapposizioni di armatura (ad. es. piede delle colonne)

Presenza di ferri sagomati (ad. es. estremità delle travi)

LA MODELLAZIONE

Il modello noto come “*one component model*”, consiste nell'accoppiamento in serie di un elemento elastico e di un elemento rigido plastico.

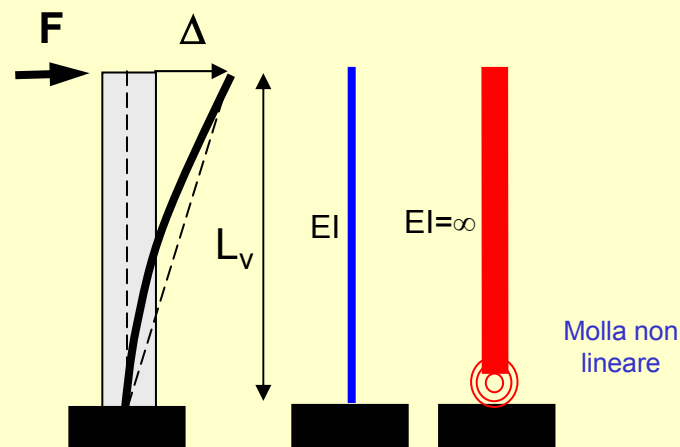
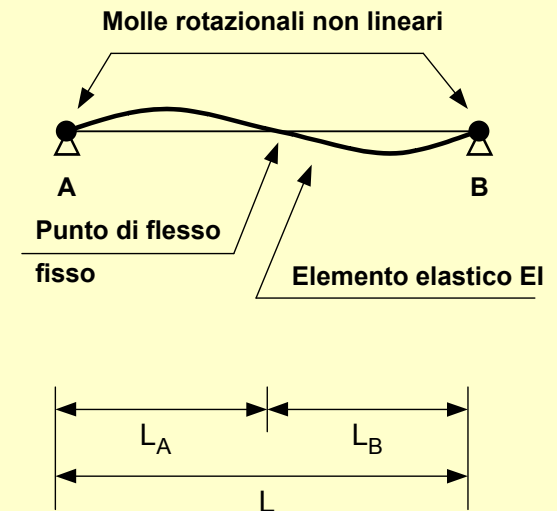
Pertanto la matrice di rigidezza dell'elemento complessivo è ottenuta dall'inversione della matrice di flessibilità fornita, a sua volta, dalla somma delle matrici di flessibilità dei due elementi in serie.



LA MODELLAZIONE

L'elemento elastico rappresenta il comportamento elastico della trave sino al superamento della soglia elastica, assumendo una rigidezza costante pari ad EI .

L'elemento rigido plastico, composto da un'asta rigida delimitata alle sue estremità da due molle rotazionali, è rappresentativo della fase plastica. Risulta chiaro che, anche in questo caso, le cerniere sono attivate solo dopo il superamento del momento di snervamento.

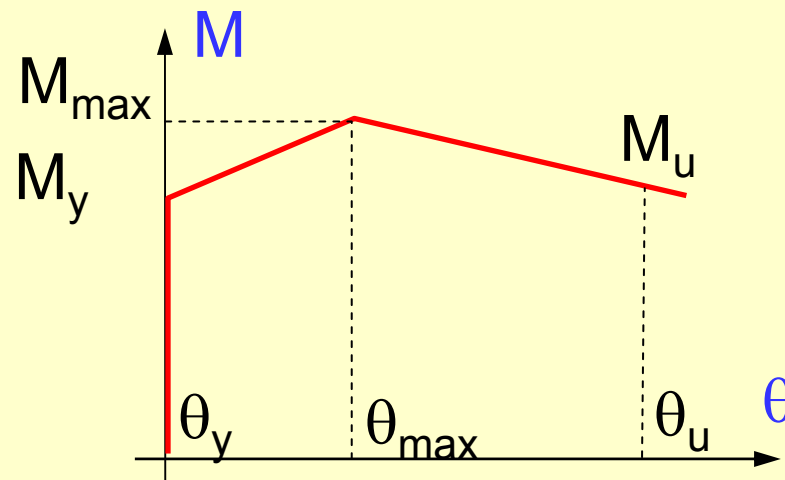
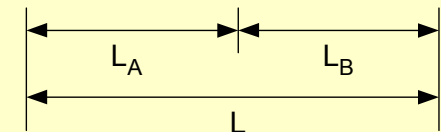
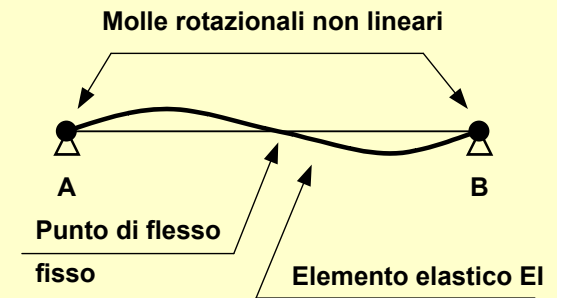


LA MODELLAZIONE

La matrice di deformabilità dell'elemento plastico si presenta:

$$F_{pl}^t = \begin{bmatrix} f_i & 0 \\ 0 & f_j \end{bmatrix}$$

La determinazione dei coefficienti della matrice di flessibilità è legata in maniera diretta alla caratterizzazione meccanica della cerniera plastica, ossia alla relazione **momento-rotazione**



LA MODELLAZIONE

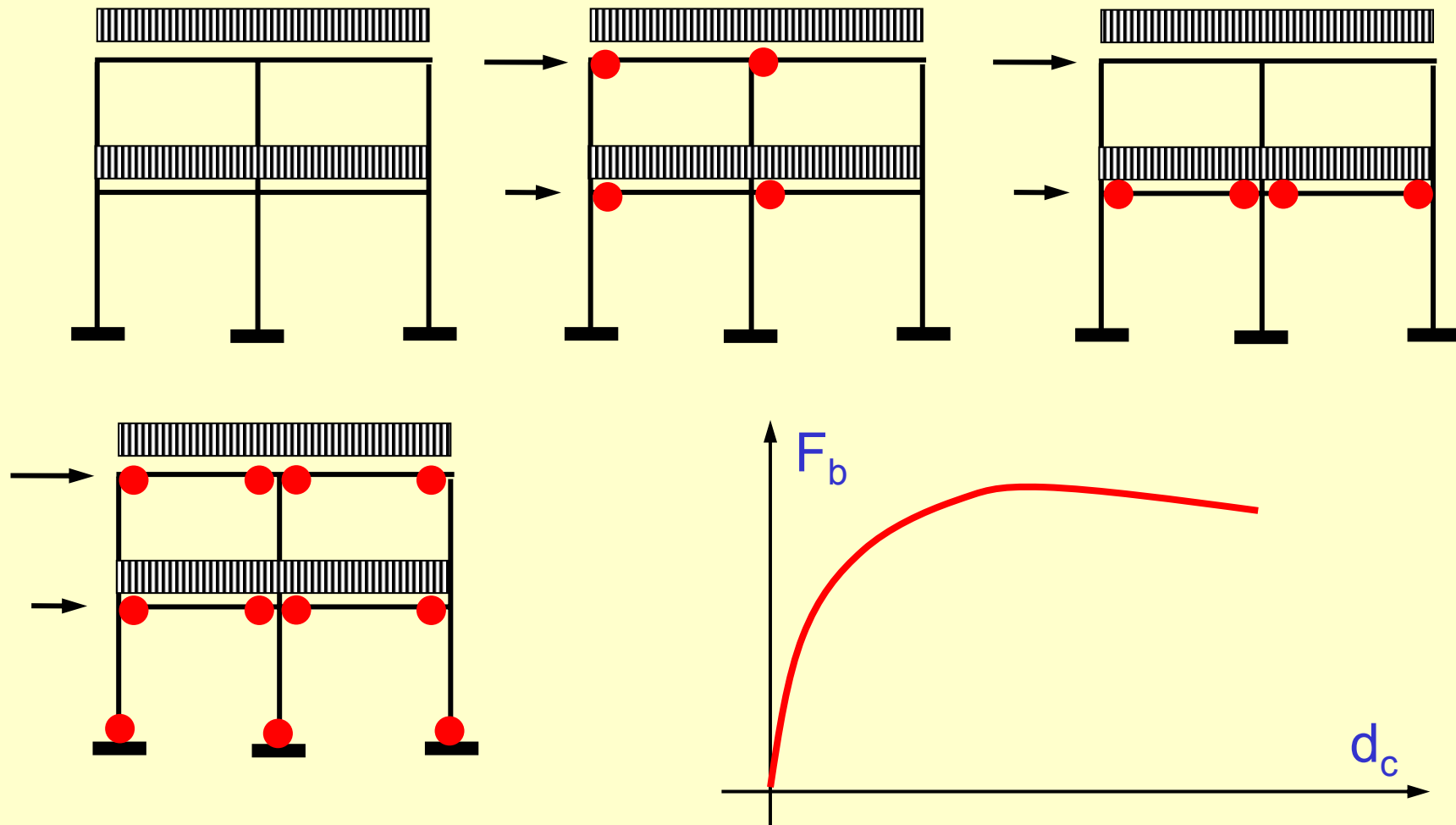
I principali vantaggi di tale modello sono soprattutto la sua semplicità e l'efficienza computazionale.

Una limitazione del modello è l'assunzione del punto di flesso fisso nella mezzeria durante l'analisi. Tale ipotesi, risulta poco realistica, se si considera che i momenti di snervamento alle estremità della trave non sono eguali, poiché diverse sono in genere le percentuali di armatura superiori e inferiori.

Il modello non permette di computare la formazione di zone plastiche in campata, causate dall'interazione tra i carichi orizzontali e quelli gravitazionali.

ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Consiste nell'applicare all'edificio i carichi gravitazionali e un sistema di forze orizzontali crescenti in maniera monotona fino al raggiungimento delle condizioni ultime.

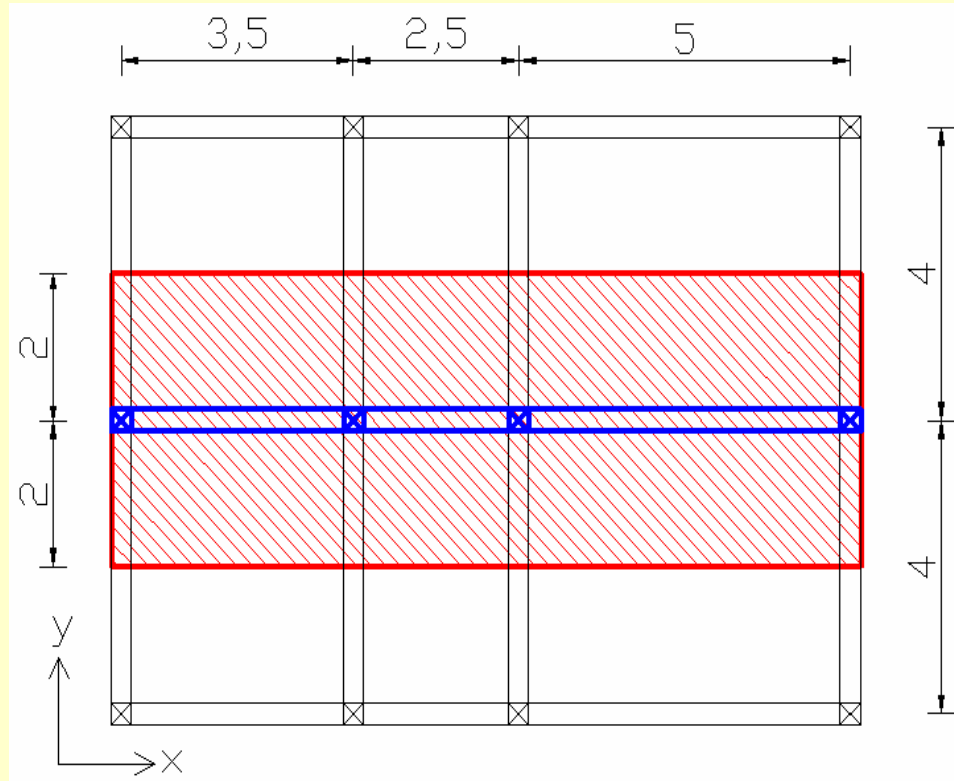


ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Il metodo si articola nei seguenti passi:

1. Determinazione di un legame forza-spostamento tra la risultante delle forze applicate, Taglio alla base F_b e lo spostamento d_c di un “punto di controllo” usualmente scelto come il baricentro dell'ultimo impalcato;
2. Determinazione delle caratteristiche di un sistema ad un grado di libertà equivalente a comportamento bi-lineare;
3. Determinazione della risposta massima in spostamento di tale sistema con utilizzo di spettro di risposta di progetto;
4. Conversione dello spostamento del sistema equivalente nella configurazione deformata effettiva dell'edificio
5. Verifica della compatibilità degli spostamenti per gli elementi/meccanismi duttili e delle resistenze per gli elementi/meccanismi fragili.

ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA



Per chiarire le modalità di esecuzione di tutte le possibili analisi, si fa riferimento ad un edificio in calcestruzzo armato

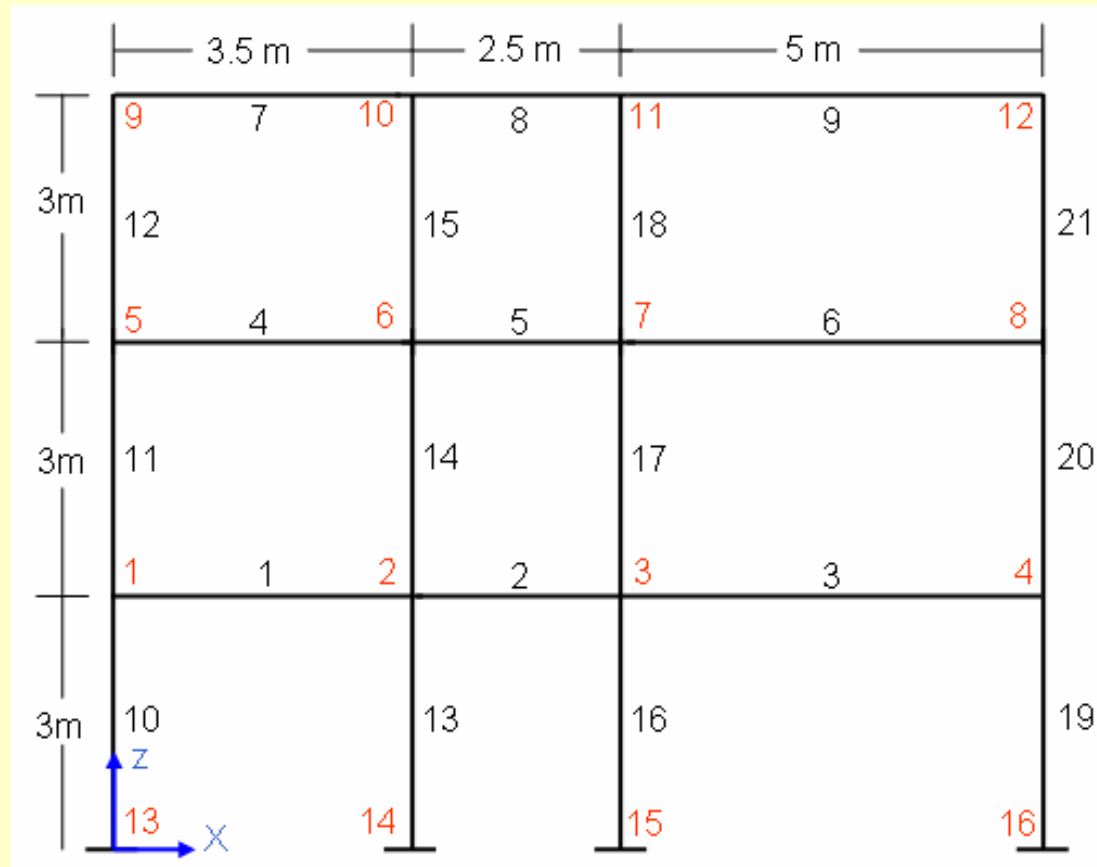
L'edificio è composto di due piani più la copertura accessibile, adibito ad uffici, situato in zona 2 e su suolo di tipo B.

L'edificio presenta un'altezza interpiano costante e pari a 3m.

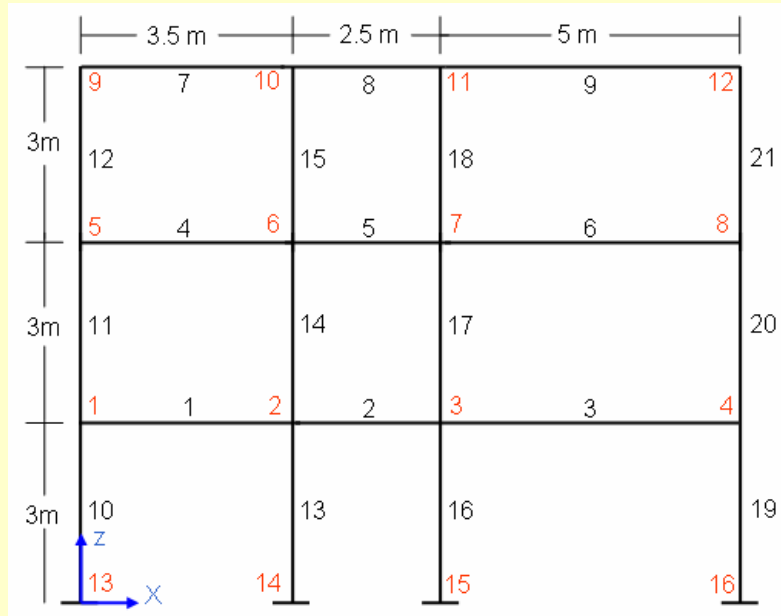
I massimi ingombri sono di 8 m in direzione y e di 11 m in direzione x.

ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

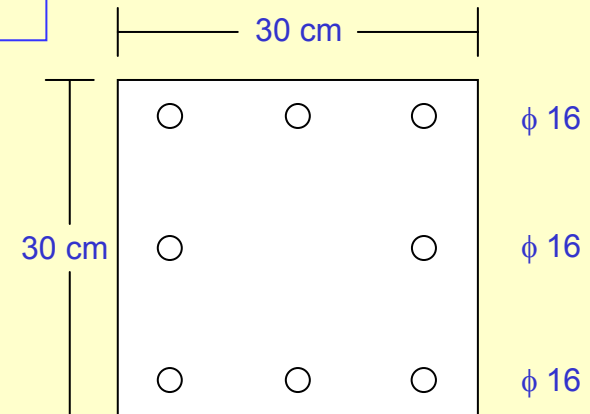
Si prende in considerazione il telaio bidimensionale diretto secondo la direzione principale x.



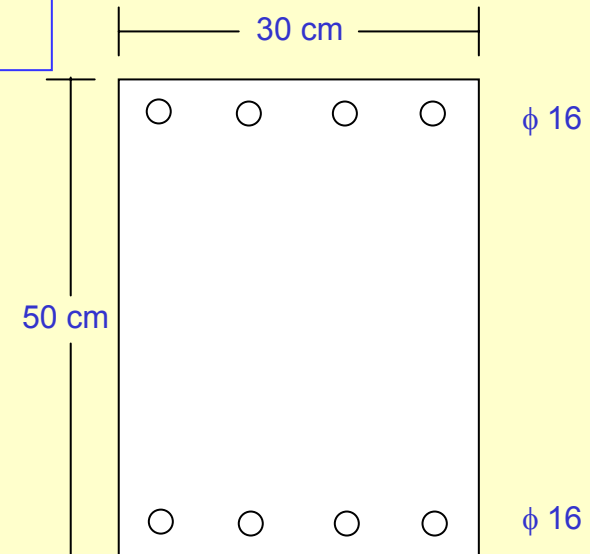
ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA



PILASTRI



TRAVI



Al fine di resistere ai carichi gravitazionali, sono state scelte per le colonne sezioni rettangolari **30cm x 30cm**, armate con **3 ferri $\Phi 16$** per lato

Per le travi sono state scelte sezioni rettangolari **50cm x 30cm**, armate sia superiormente che inferiormente con **4 ferri $\phi 16$**

ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Si è assunto che, sulla base di prove sperimentali condotte sull'edificio, si sia ricavato il seguente dato relativo alla resistenza media a compressione del calcestruzzo impiegato:

$$f_{cm} = 20 \text{ N/mm}^2$$

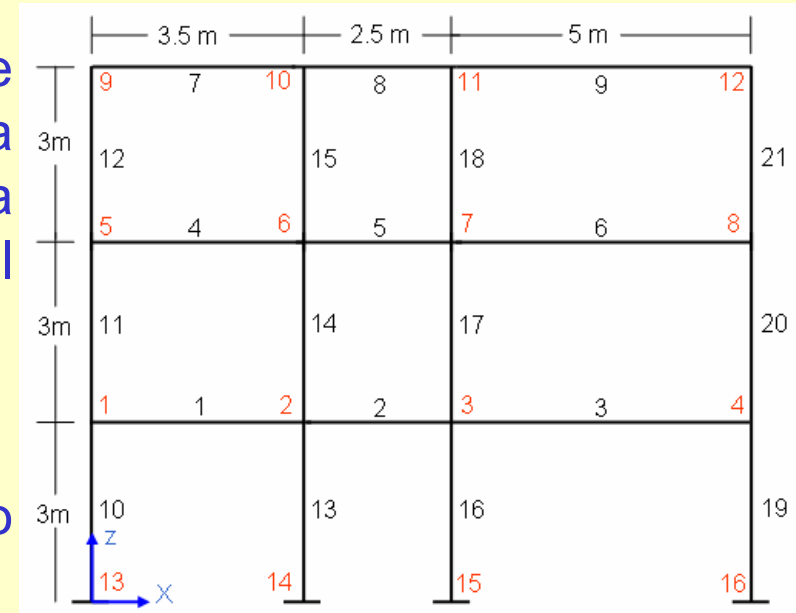
da cui si deduce il seguente valore medio del modulo elastico normale:

$$E_c = 1.2 \cdot 4700 \cdot (f_{cm})^{0.5} = 25223 \text{ N/mm}^2$$

Per ciò che concerne l'acciaio impiegato nelle barre, è stato scelto acciaio del tipo Feb44k da cui:

$$f_{ym} = 440 \text{ N/mm}^2$$

$$E_s = 200000 \text{ N/mm}^2$$



ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Di seguito sono riportati i valori dei carichi presi in esame:

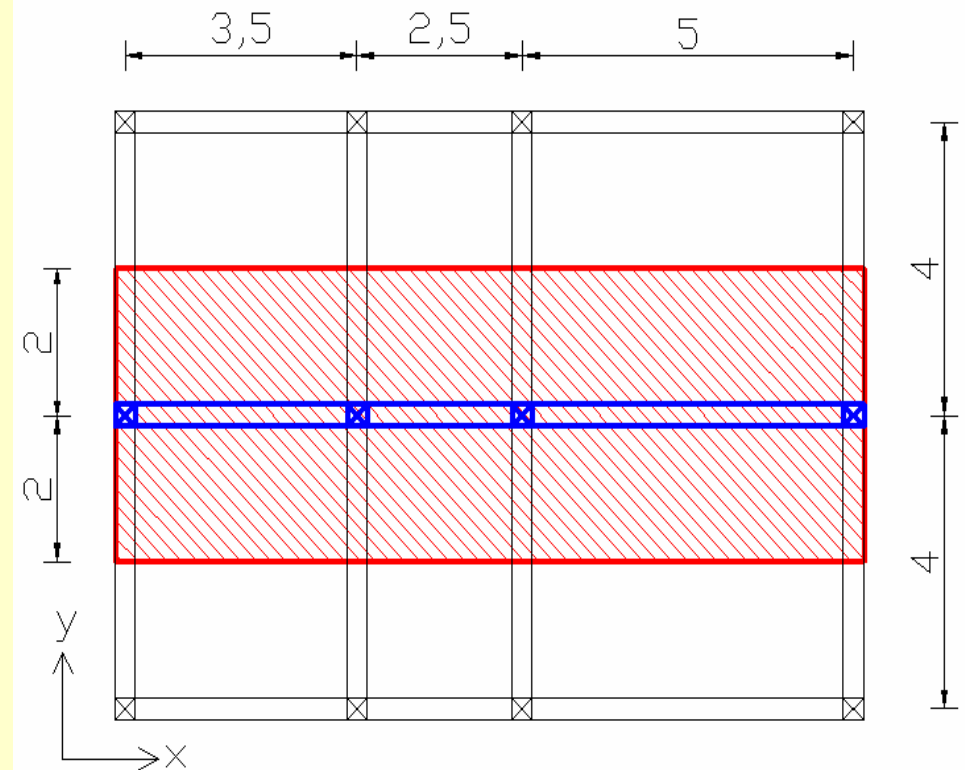
conglomerato armato: 25 kN/m³

solai: 4 kN/m²

muri di divisione: 1.3 kN/m²

sovraccarico accid.: 4 kN/m²

(corrispondente ad edifici suscettibili di grande affollamento).



ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Combinazione dell'azione sismica con le altre azioni

La verifica allo stato limite deve essere effettuata per la seguente combinazione degli effetti della azione sismica con le altre

$$\gamma_1 E + G_K + P_K + \sum_i (\psi_{2i} Q_{Ki})$$

essendo:

$\gamma_1 \cdot E$ l'azione sismica per lo stato limite in esame; (γ_1 =fattore di importanza)

G_K il valore caratteristico delle azioni permanenti;

Q_{Ki} il valore caratteristico della azione variabile Q_i ;

ψ_{2i} coefficiente di combinazione che fornisce il valore quasi permanente della azione variabile Q_i

Destinazione d'uso	ψ_{2i}
Abitazioni, Uffici	0,30
Uffici aperti al pubblico, Scuole, Negozi, Autorimesse	0,60
Tetti e coperture con neve	0,20
Magazzini, Archivi, Scale	0,80
Vento, variazione termica	0,00

ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Le masse associate ai carichi gravitazionali sono:

$$G_K + \sum_i (\psi_{Ei} Q_{Ki})$$

ψ_{Ei} è un coefficiente di combinazione dell'azione variabile Q_i ed è pari:
 $\phi \psi_{2i}$

Carichi ai piani	ϕ
Copertura	1,0
Archivi	1,0
Carichi correlati	0,8
Carichi indipendenti	0,5

ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Valutazione delle masse

Valutazione dei carichi caratteristici G_k

Solaio		149.48	149.48	149.48
Pilastr		22.50	22.50	9.00
Travi		97.88	97.88	97.88
Muri divisor		48.58	48.58	24.29
TOTALE	(kN)	318.44	318.44	280.65

Valutazione dei carichi caratteristici Q_k

Solaio		149.48	149.48	149.48
TOTALE	(kN)	149.48	149.48	149.48

Ψ_{Ei}		0.50x0.30	0.50x0.30	0.20
-------------	--	-----------	-----------	------

MASSA	(ton)	34.75	34.75	31.66
--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

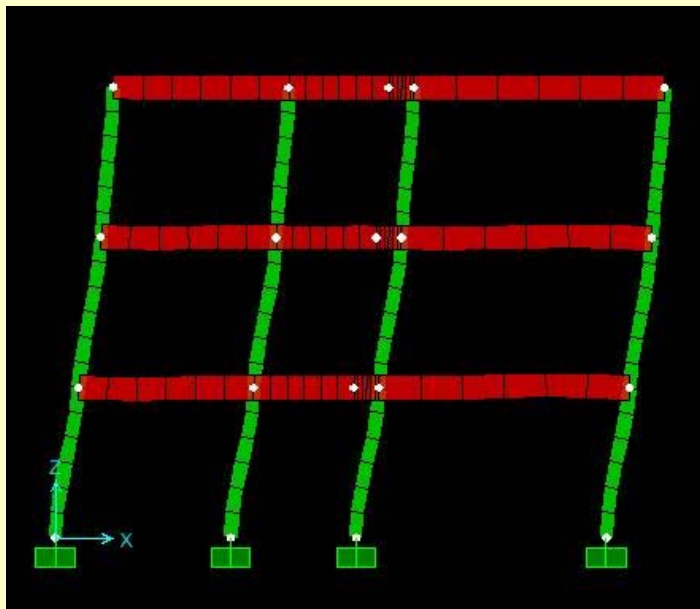
Valutazione dei carichi gravitazionali da combinazione sismica

impalcato	luce	Gk solaio	Qk solaio	Gk solaio	Gk travi	Gk muri	ψ_2 Qk solaio	Totale
	m	KN/mq	KN/mq	KN/m	KN/m	KN/m	KN/m	KN/m
1	4	4	4	16	3.75	5.2	4.8	29.75
2	4	4	4	16	3.75	5.2	4.8	29.75
3	4	4	4	16	3.75	0.0	3.2	22.95

ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Caratterizzazione dinamica lineare

	Masse [ton]	1° modo	1° modo norm	$m_i\phi_i=m^*$	$m_i\phi_i^2$
1	34.75	0.0051	0.395	13.74	5.43
2	34.75	0.0101	0.783	27.20	21.30
3	31.66	0.0129	1.000	31.66	31.66
				72.60	58.39
T	0.77 s			Γ	1.24



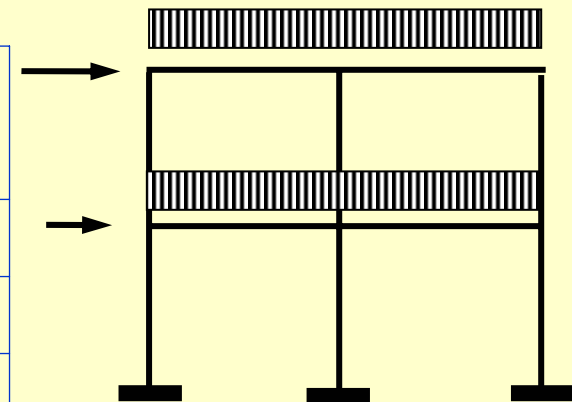
ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Distribuzioni di forze orizzontali

Devono essere applicati all'edificio almeno due distinte distribuzioni di forze orizzontali, applicati ai baricentri delle masse a ciascun piano:

1. Una distribuzione di forze proporzionali alle masse
2. Una distribuzione di forze proporzionali al prodotto delle masse per la deformata corrispondente al primo modo di vibrazione

	Masse [KN/ms ²]	1° modo norm	$m_i\phi_i=m^*$	Distrib. 1	Distrib. 1
1	34.75	0.395	13.74	0.43	1.00
2	34.75	0.783	27.20	0.86	1.00
3	31.66	1.000	31.66	1.00	1.10

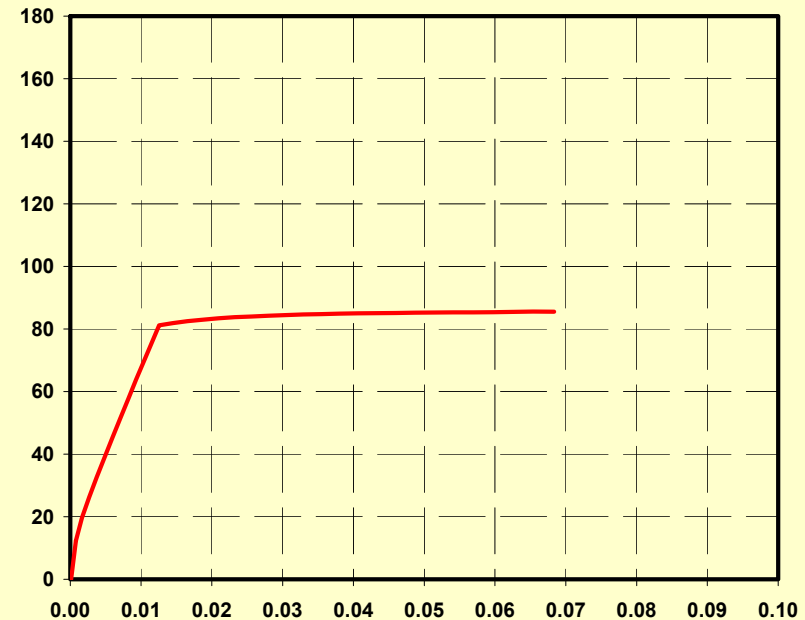
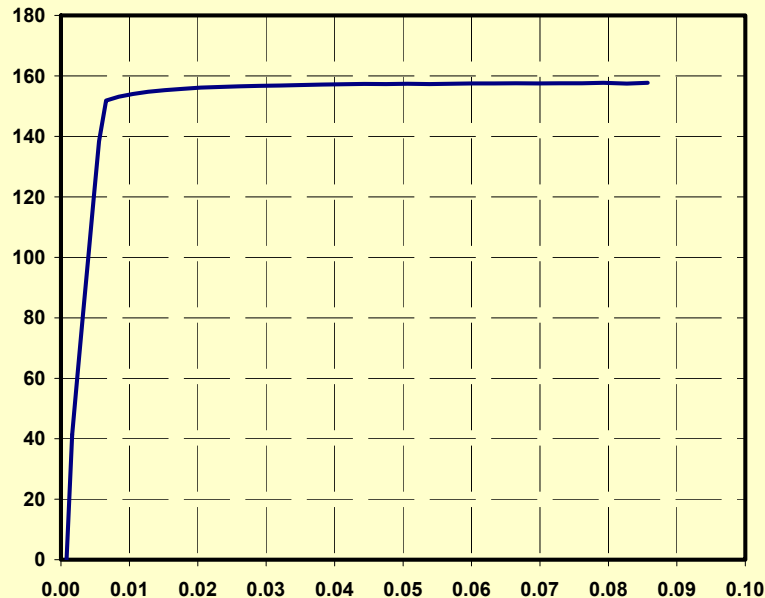


ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Caratterizzazione delle cerniere plastiche

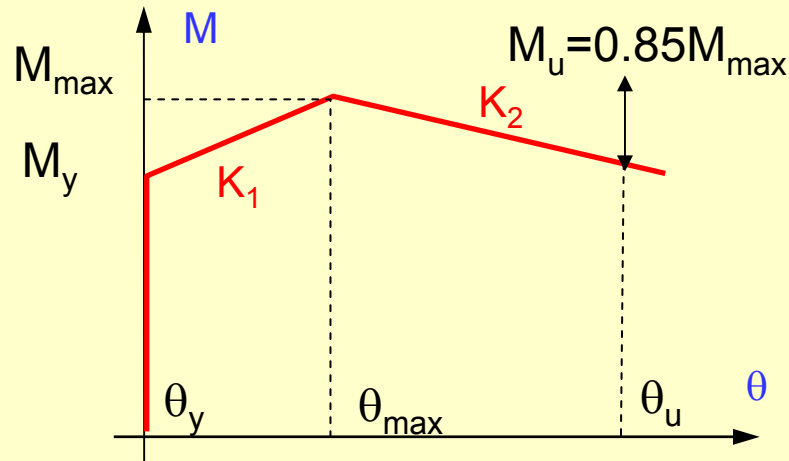
La caratterizzazione delle cerniere plastiche consiste nella definizione del legame momento-rotazione, effettuato a partire dal legame momento curvatura.

La relazione momento curvatura è valutata in ciascuna estremità dell'elemento strutturale (trave e pilastro). In particolare, con riferimento ai pilastri la valutazione del legame momento curvatura è effettuata nell'ipotesi di uno sforzo assiale pari a quello agente in condizione di carico gravitazionale da combinazione sismica.



ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Caratterizzazione delle cerniere plastiche



La luce di taglio L_v è assunta costante e pari $L_v = L/2$

La rotazione snervamento è valutata con la proposta dell'OPCM 3271-3431

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

La rotazione ultima è valutata con la prima alternativa proposta dall'OPCM 3271-3431

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{e1}} 0,016 \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega)} f_c \right]^{0,225} \left(\frac{L_v}{h} \right)^{0,35} 25^{\left(\alpha_{p_{rx}} \frac{f_{yr}}{f_c} \right)} (1,25^{100\rho_d})$$

La rotazione massima è valutata proporzionalmente alla rotazione di snervamento

Parametri statici	Parametri deformativi
M_y	θ_y
M_{max}	θ_{max}
M_u	θ_u

ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Caratterizzazione delle cerniere plastiche

In particolare sono condotte una serie di analisi non lineari coerentemente alle seguenti assunzioni:

A. Valutazione delle rotazioni allo snervamento e massima secondo modello meccanico. Valutazione del solo contributo flessionale.

B. Valutazione dei parametri deformativi secondo OPCM. Valutazione della rotazione massima come:

$$\theta_{\max} = 1.50 \theta_y$$

$$\theta_{\max} = 2.00 \theta_y$$

C. Caratterizzazione del legame momento-rotazione elasto-plastico senza incrudimento:

$$M_y = M_{\max}$$

ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Caratterizzazione delle cerniere plastiche (modello meccanico)

	N	v	L	M_y	ϕ_y	M_{max}	ϕ_{max}	fc	fy	Lv	θ_y	θ_{max}	θ_u
P1-1	166.62	0.09	3.00	81.16	0.0126	85.51	0.0683	20	440	150	0.0063	0.0105	0.033
P1-2	111.00	0.06	3.00	75.7	0.0127	79.12	0.0762	20	440	150	0.0063	0.0104	0.034
P1-3	54.34	0.03	3.00	66.87	0.0111	72.45	0.0851	20	440	150	0.0056	0.0141	0.035
P2-1	275.75	0.15	3.00	89.07	0.0130	97.59	0.0551	20	440	150	0.0065	0.0120	0.031
P2-2	184.93	0.10	3.00	80.67	0.0123	87.6	0.0659	20	440	150	0.0061	0.0125	0.032
P2-3	91.83	0.05	3.00	71.75	0.0116	76.87	0.0791	20	440	150	0.0058	0.0126	0.035
P3-1	380.19	0.21	3.00	101.03	0.0144	107.93	0.0446	20	440	150	0.0072	0.0101	0.029
P3-2	252.21	0.14	3.00	84.41	0.0123	95.02	0.0577	20	440	150	0.0061	0.0138	0.031
P3-3	129.44	0.07	3.00	76.52	0.0121	81.27	0.0735	20	440	150	0.0060	0.0114	0.034
P4-1	226.99	0.13	3.00	85.03	0.0127	92.29	0.0606	20	440	150	0.0063	0.0120	0.032
P4-2	151.56	0.08	3.00	75.91	0.0117	83.79	0.0704	20	440	150	0.0059	0.0141	0.033
P4-3	74.23	0.04	3.00	71.72	0.0120	74.93	0.0817	20	440	150	0.0060	0.0105	0.035
TRAVE	0.00	0.00	3.50	138.44	0.0056	157.76	0.0858	20	440	175	0.0032	0.0204	0.039
TRAVE	0.00	0.00	2.50	138.44	0.0056	157.76	0.0858	20	440	125	0.0023	0.0146	0.034
TRAVE	0.00	0.00	5.00	138.44	0.0056	157.76	0.0858	20	440	250	0.0046	0.0292	0.044

ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Caratterizzazione delle cerniere plastiche ($q_{max}=1.50q_y$)

	N	v	L	M_y	ϕ_y	M_{max}	fc	fy	Lv	θ_y	θ_{max}	θ_u
P1-1	166.62	0.09	3.00	81.16	0.0126	85.51	20	440	150	0.011	0.016	0.033
P1-2	111.00	0.06	3.00	75.7	0.0127	79.12	20	440	150	0.011	0.016	0.034
P1-3	54.34	0.03	3.00	66.87	0.0111	72.45	20	440	150	0.010	0.014	0.035
P2-1	275.75	0.15	3.00	89.07	0.0130	97.59	20	440	150	0.011	0.016	0.031
P2-2	184.93	0.10	3.00	80.67	0.0123	87.6	20	440	150	0.010	0.016	0.032
P2-3	91.83	0.05	3.00	71.75	0.0116	76.87	20	440	150	0.010	0.015	0.035
P3-1	380.19	0.21	3.00	101.03	0.0144	107.93	20	440	150	0.012	0.018	0.029
P3-2	252.21	0.14	3.00	84.41	0.0123	95.02	20	440	150	0.010	0.016	0.031
P3-3	129.44	0.07	3.00	76.52	0.0121	81.27	20	440	150	0.010	0.015	0.034
P4-1	226.99	0.13	3.00	85.03	0.0127	92.29	20	440	150	0.011	0.016	0.032
P4-2	151.56	0.08	3.00	75.91	0.0117	83.79	20	440	150	0.010	0.015	0.033
P4-3	74.23	0.04	3.00	71.72	0.0120	74.93	20	440	150	0.010	0.015	0.035
TRAVE	0.00	0.00	3.50	138.44	0.0056	157.76	20	440	175	0.006	0.009	0.039
TRAVE	0.00	0.00	2.50	138.44	0.0056	157.76	20	440	125	0.005	0.008	0.034
TRAVE	0.00	0.00	5.00	138.44	0.0056	157.76	20	440	250	0.007	0.011	0.044

ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Caratterizzazione delle cerniere plastiche ($q_{max}=2.00q_y$)

	N	v	L	M_y	ϕ_y	M_{max}	fc	fy	Lv	θ_y	θ_{max}	θ_u
P1-1	166.62	0.09	3.00	81.16	0.0126	85.51	20	440	150	0.011	0.021	0.033
P1-2	111.00	0.06	3.00	75.7	0.0127	79.12	20	440	150	0.011	0.021	0.034
P1-3	54.34	0.03	3.00	66.87	0.0111	72.45	20	440	150	0.010	0.019	0.035
P2-1	275.75	0.15	3.00	89.07	0.0130	97.59	20	440	150	0.011	0.022	0.031
P2-2	184.93	0.10	3.00	80.67	0.0123	87.6	20	440	150	0.010	0.021	0.032
P2-3	91.83	0.05	3.00	71.75	0.0116	76.87	20	440	150	0.010	0.020	0.035
P3-1	380.19	0.21	3.00	101.03	0.0144	107.93	20	440	150	0.012	0.024	0.029
P3-2	252.21	0.14	3.00	84.41	0.0123	95.02	20	440	150	0.010	0.021	0.031
P3-3	129.44	0.07	3.00	76.52	0.0121	81.27	20	440	150	0.010	0.020	0.034
P4-1	226.99	0.13	3.00	85.03	0.0127	92.29	20	440	150	0.011	0.021	0.032
P4-2	151.56	0.08	3.00	75.91	0.0117	83.79	20	440	150	0.010	0.020	0.033
P4-3	74.23	0.04	3.00	71.72	0.0120	74.93	20	440	150	0.010	0.020	0.035
TRAVE	0.00	0.00	3.50	138.44	0.0056	157.76	20	440	175	0.006	0.012	0.039
TRAVE	0.00	0.00	2.50	138.44	0.0056	157.76	20	440	125	0.005	0.010	0.034
TRAVE	0.00	0.00	5.00	138.44	0.0056	157.76	20	440	250	0.007	0.015	0.044

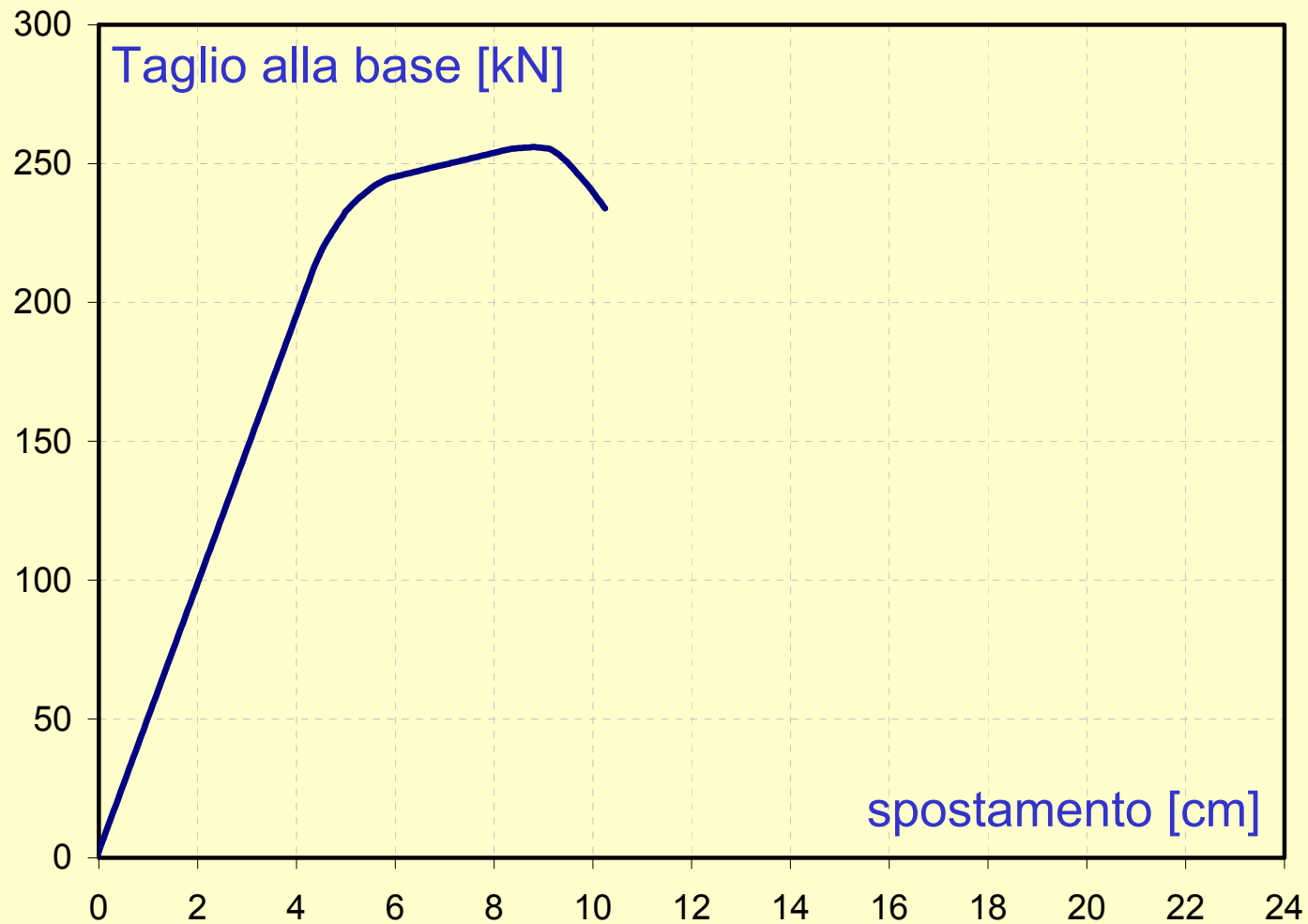
ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Caratterizzazione delle cerniere plastiche (elasto-plastica)

	N	v	L	M_y	ϕ_y	M_{max}	fc	fy	Lv	θ_y	θ_u
P1-1	166.62	0.09	3.00	81.16	0.0126	85.51	20	440	150	0.011	0.033
P1-2	111.00	0.06	3.00	75.7	0.0127	79.12	20	440	150	0.011	0.034
P1-3	54.34	0.03	3.00	66.87	0.0111	72.45	20	440	150	0.010	0.035
P2-1	275.75	0.15	3.00	89.07	0.0130	97.59	20	440	150	0.011	0.031
P2-2	184.93	0.10	3.00	80.67	0.0123	87.6	20	440	150	0.010	0.032
P2-3	91.83	0.05	3.00	71.75	0.0116	76.87	20	440	150	0.010	0.035
P3-1	380.19	0.21	3.00	101.03	0.0144	107.93	20	440	150	0.012	0.029
P3-2	252.21	0.14	3.00	84.41	0.0123	95.02	20	440	150	0.010	0.031
P3-3	129.44	0.07	3.00	76.52	0.0121	81.27	20	440	150	0.010	0.034
P4-1	226.99	0.13	3.00	85.03	0.0127	92.29	20	440	150	0.011	0.032
P4-2	151.56	0.08	3.00	75.91	0.0117	83.79	20	440	150	0.010	0.033
P4-3	74.23	0.04	3.00	71.72	0.0120	74.93	20	440	150	0.010	0.035
TRAVE	0.00	0.00	3.50	138.44	0.0056	157.76	20	440	175	0.006	0.039
TRAVE	0.00	0.00	2.50	138.44	0.0056	157.76	20	440	125	0.005	0.034
TRAVE	0.00	0.00	5.00	138.44	0.0056	157.76	20	440	250	0.007	0.044

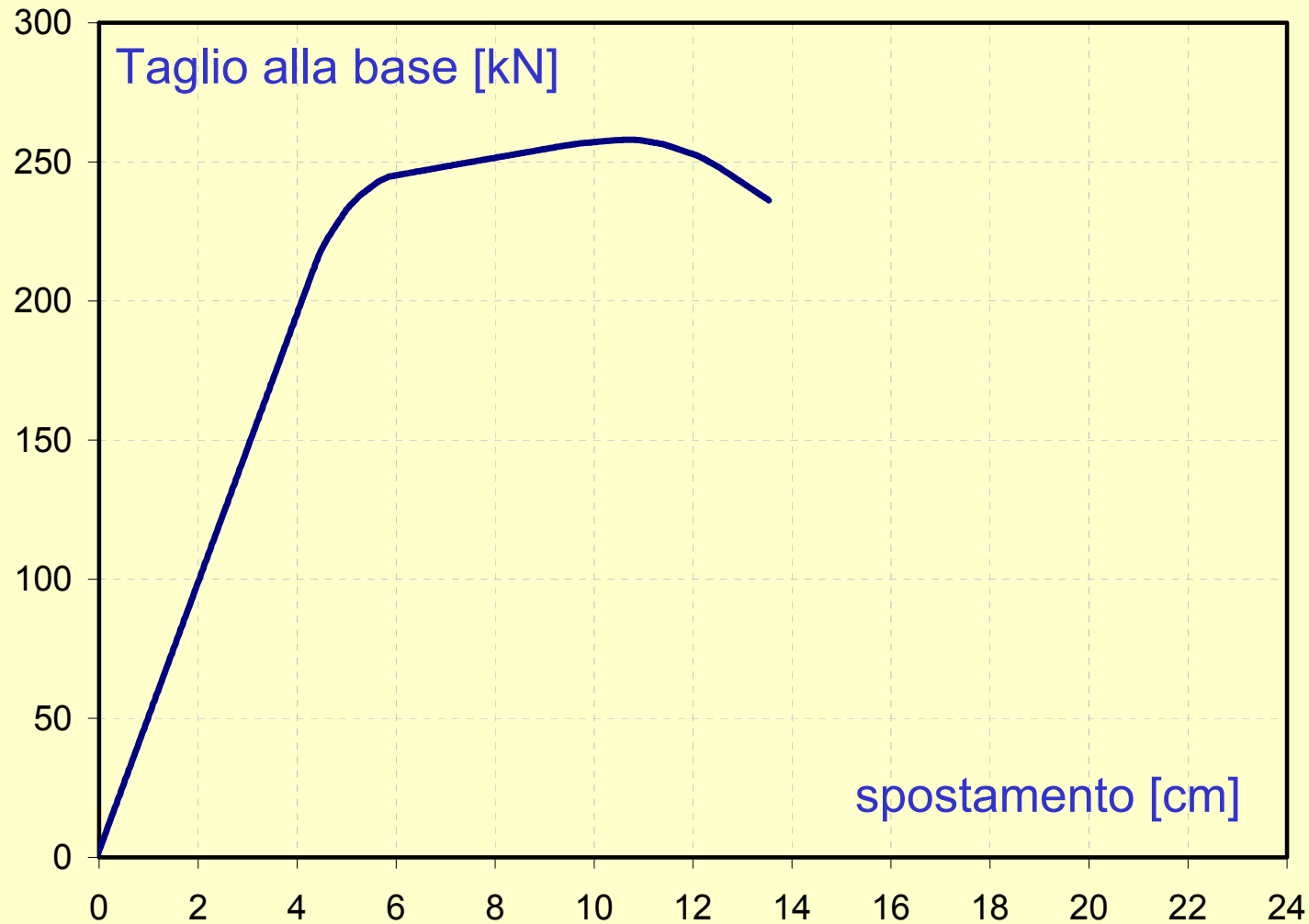
ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Curva di push-over (modello meccanico)



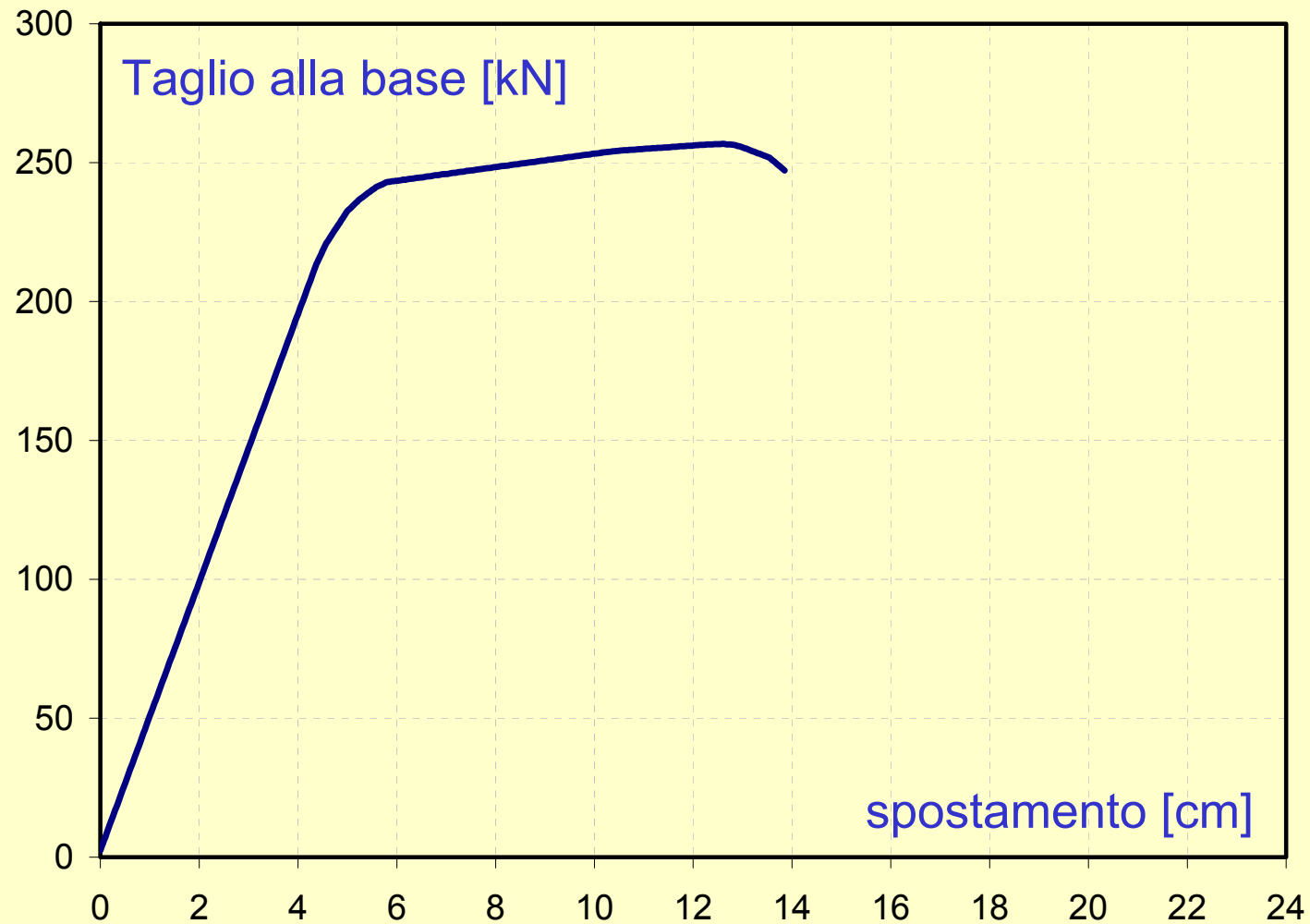
ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Curva di push-over ($q_{max}=1.50q_y$)



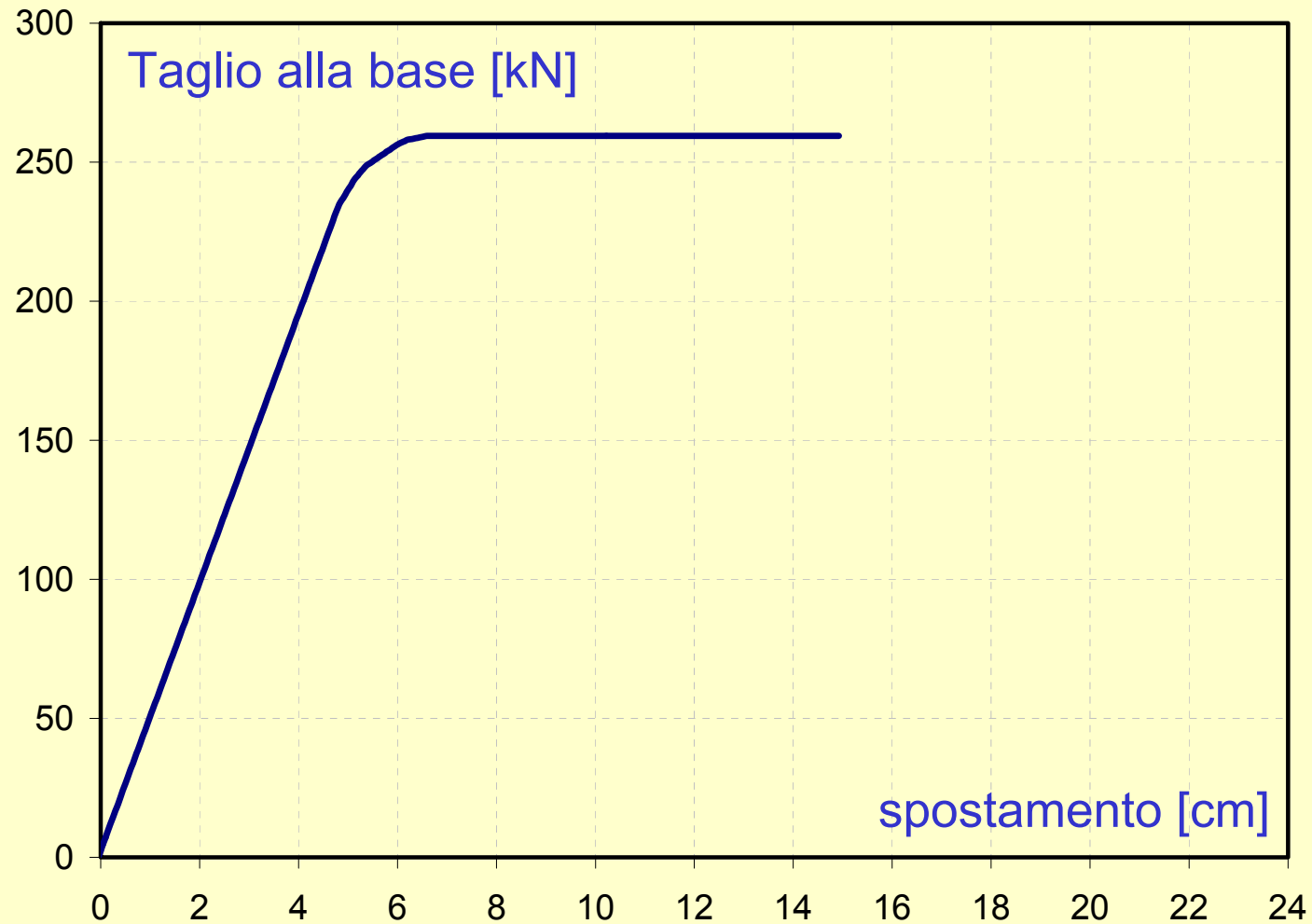
ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Curva di push-over ($q_{max}=2.00q_y$)



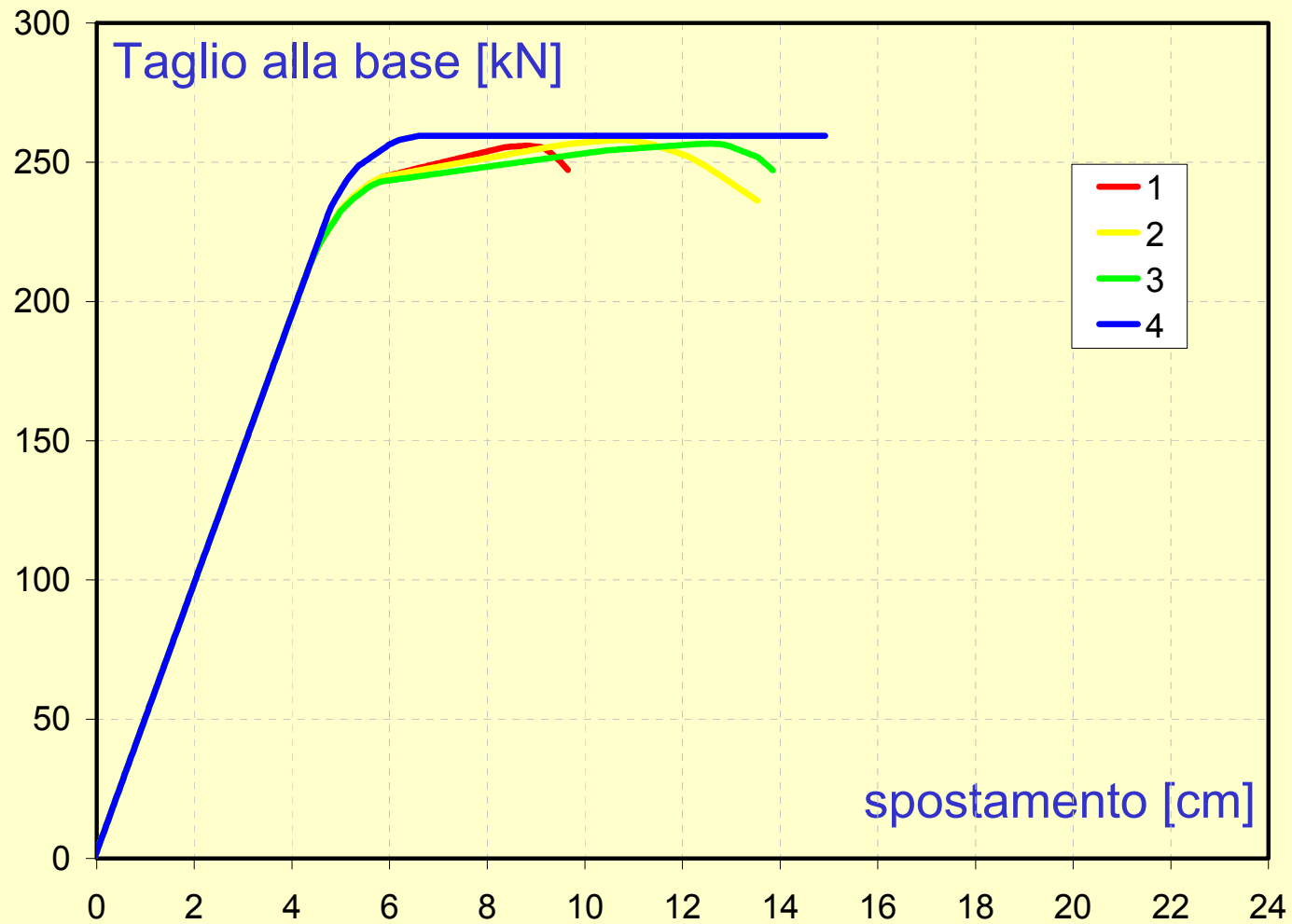
ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Curva di push-over (elasto-plastica)



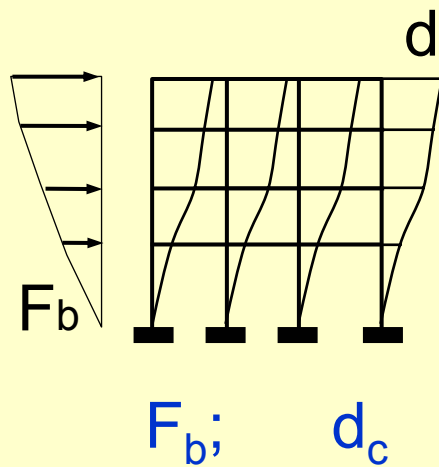
ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Confronto delle curve di push-over



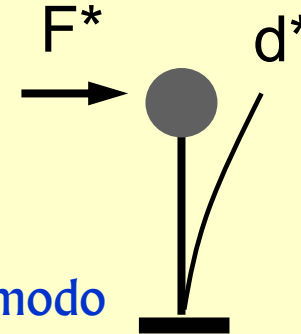
ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Determinazione di un sistema SDOF equivalente



$$\Gamma = \frac{\sum m_i \Phi_i}{\sum m_i \Phi_i^2}$$

coeff. di partecipazione del 1° modo

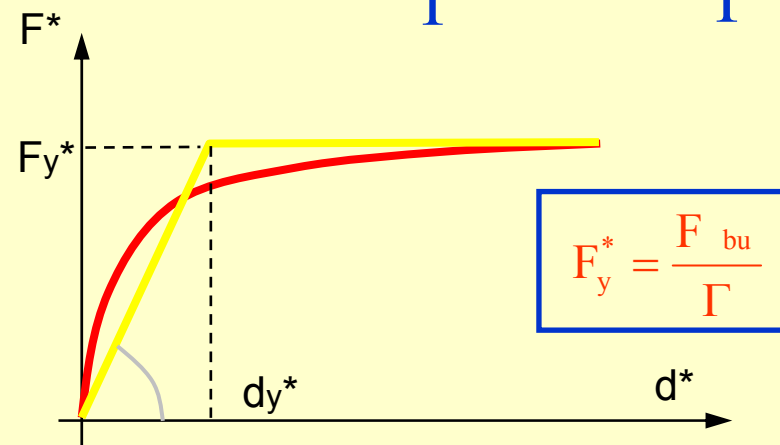


$$F^* = \frac{F_b}{\Gamma} \quad d^* = \frac{d_c}{\Gamma}$$

$$m^* = \sum m_i \Phi_i$$

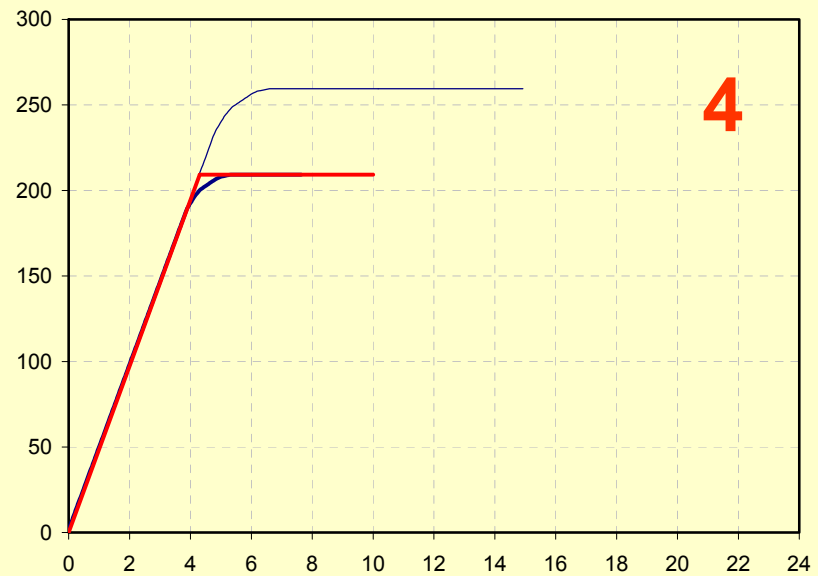
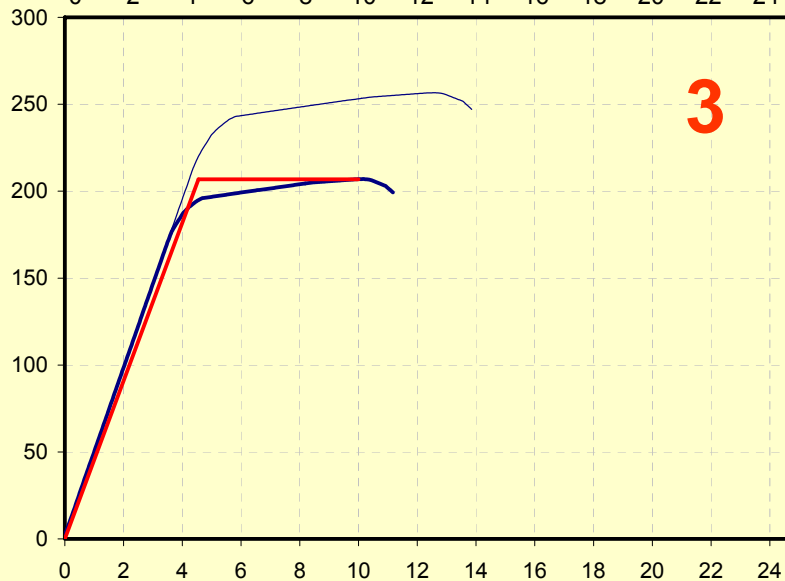
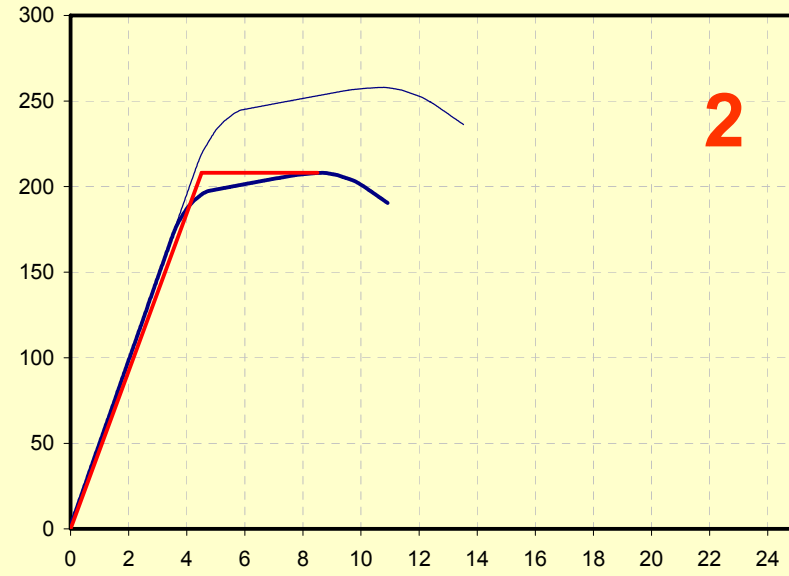
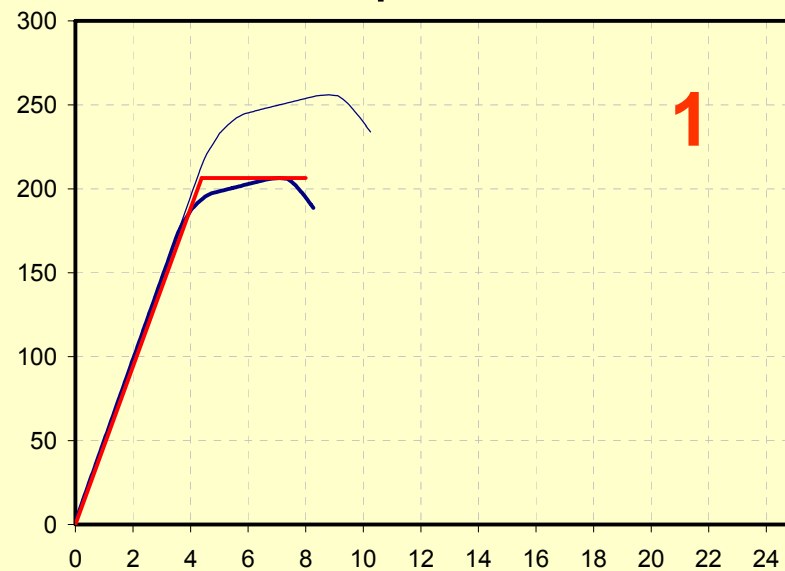
$$k^* = \frac{F_y^*}{d_y^*}$$

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^*}{k^*}}$$



ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Curva forza spostamento del sistema SDOF



ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Valutazione delle caratteristiche del sistema SDOF equivalente

	Masse [ton]	l° modo	l° modo norm	$m_i\phi_i=m^*$	$m_i\phi_i^2$
1	34.75	0.0051	0.395	13.74	5.43
2	34.75	0.0101	0.783	27.20	21.30
3	31.66	0.0129	1.000	31.66	31.66
				72.60	58.39
				Γ	1.24

Analisi	modellaz	F_y^* [kN]	dy^* [m]	m^* [ton]	K [kN/m]	T_{eff} [sec]	Tel [sec]
1	Teta fless	206.42	0.044	72.60	4704.75	0.914	0.773
2	1.5Qy	208.07	0.045	72.60	4612.89	0.923	0.773
3	2Qy	206.91	0.045	72.60	4550.41	0.929	0.773
4	Mu elast-plast	209.23	0.043	72.60	4858.75	0.899	0.773

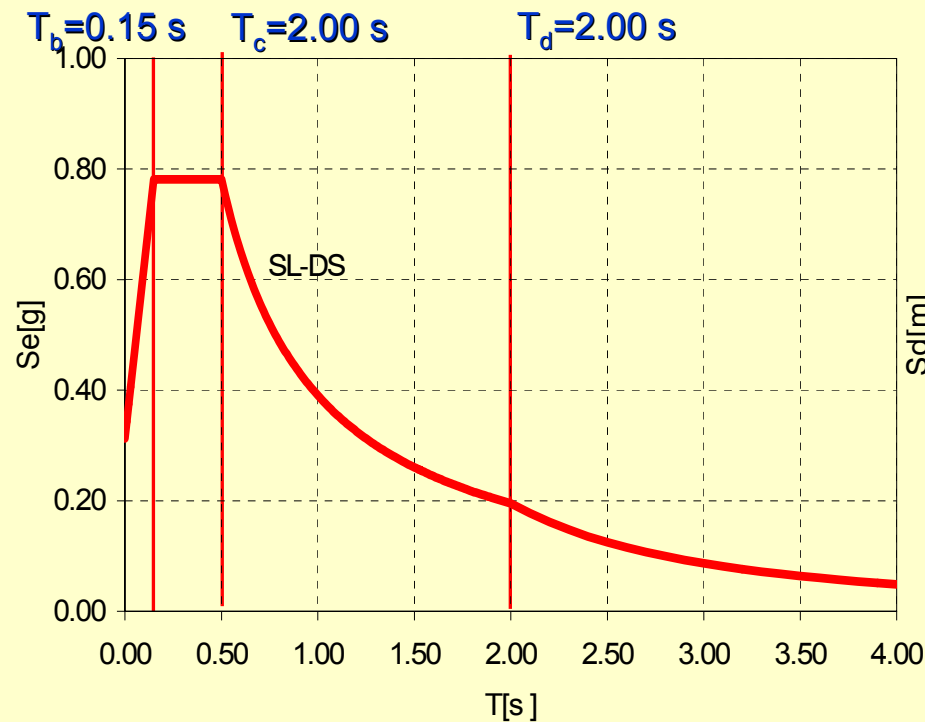
ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Determinazione della richiesta di spostamento del sistema SDOF equivalente

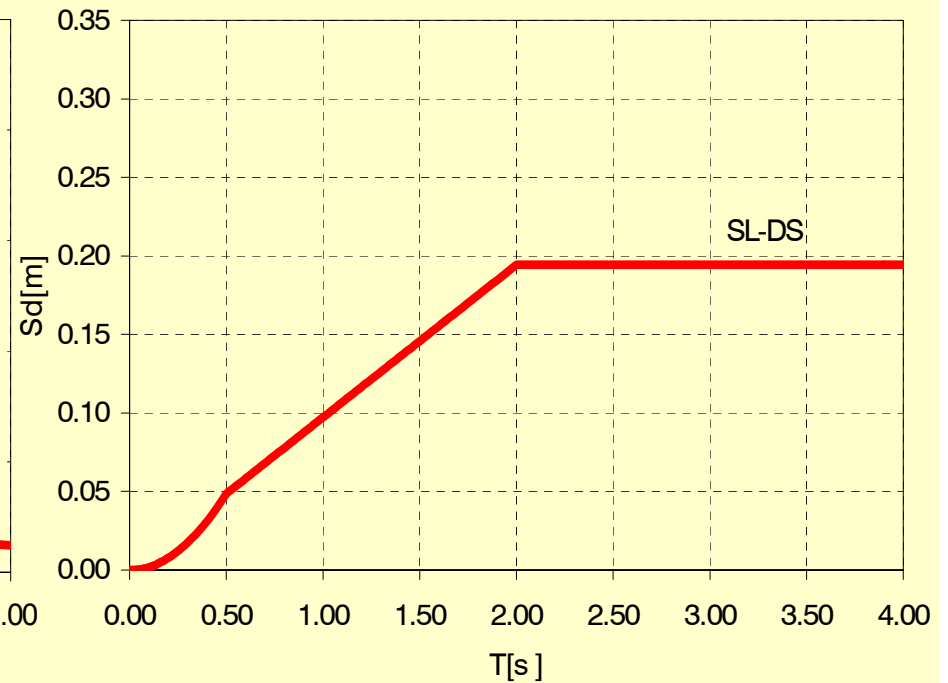
Zona 2
Terreno B

$a/g=0.25$
 $S=1.25$

Spettro in accelerazioni



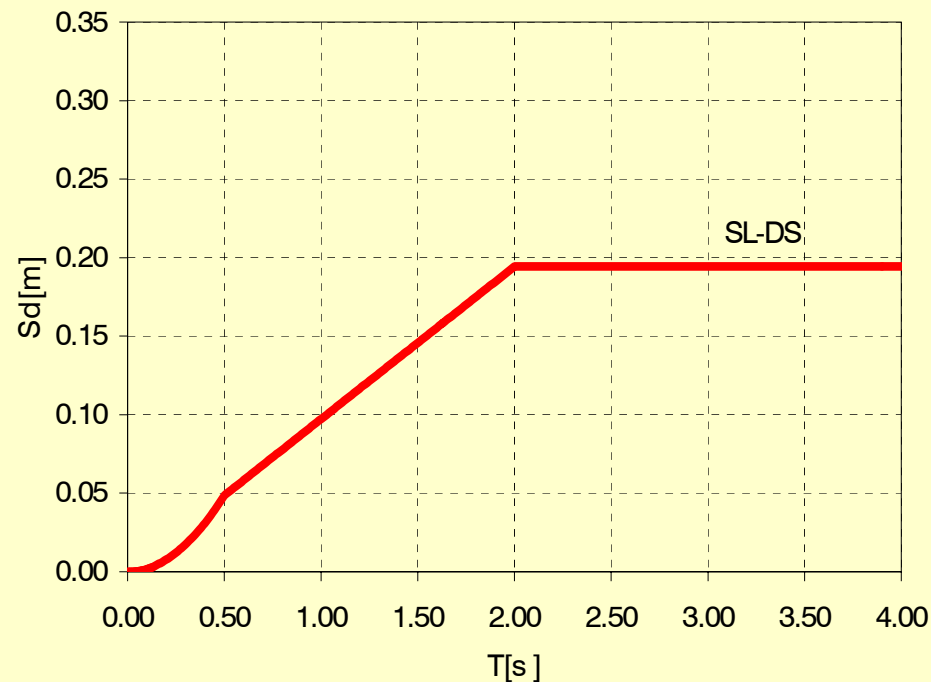
Spettro in spostamento



ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Determinazione della richiesta di spostamento del sistema SDOF equivalente

	MOD	Fy* [kN]	dy* [m]	Teff [sec]	Tel [sec]	d*max [m]
1	Teta fless	206.42	0.044	0.914	0.773	0.089
2	1.5Qy	208.07	0.045	0.923	0.773	0.090
3	2Qy	206.91	0.045	0.929	0.773	0.091
4	Mu elast-plast	209.23	0.043	0.899	0.773	0.085



Nel caso che $T_{eff} \geq T_c$ la risposta in spostamento del sistema anelastico è assunta uguale a quella di un sistema elastico di pari periodo :

$$d^*_{max} = d_{el,max} = S_d(T)$$

ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Determinazione della richiesta di spostamento del sistema MDOF

	MOD	Fy* [kN]	dy* [m]	Teff [sec]	Tel [sec]	d*max [m]	Γ	d*max [m]
1	Teta fless	206.42	0.044	0.914	0.773	0.089	1.24	0.111
2	1.5Qy	208.07	0.045	0.923	0.773	0.090	1.24	0.111
3	2Qy	206.91	0.045	0.929	0.773	0.091	1.24	0.113
4	Mu elast-plast	209.23	0.043	0.899	0.773	0.085	1.24	0.106

Lo spostamento effettivo di risposta del punto di controllo dell'edificio risulta pari a

$$d_{\max} = \Gamma d^*_{\max}$$

Una volta trovato lo spostamento effettivo di risposta per lo SL in studio, si procede alla verifica della compatibilità degli spostamenti per elementi/meccanismi duttili e delle resistenze per gli elementi/meccanismi fragili.

ANALISI STATICA NON LINEARE A PLASTICITA' CONCENTRATA

Determinazione della richiesta di spostamento del sistema MDOF

Lo spostamento effettivo di risposta del punto di controllo dell'edificio risulta pari a

$$d_{\max} = \Gamma d^*_{\max}$$

Una volta trovato lo spostamento effettivo di risposta per lo SL in studio, si procede alla verifica:

- della compatibilità degli spostamenti per elementi/meccanismi duttili
- delle resistenze per gli elementi/meccanismi fragili.