

*Centro Internazionale
di Aggiornamento
Sperimentale -
Scientifico*



organizza la

GIORNATA DI AGGIORNAMENTO
**DEGRADO E
CONSOLIDAMENTO
DELLE STRUTTURE
IN CEMENTO ARMATO**

In collaborazione con
l'Ordine degli Ingegneri
della Provincia di Bologna

sponsor:
4 EMME Service Spa
Tecnochem Italiana Spa

Sala dell'Ordine degli Ingegneri
della Provincia di Bologna
Strada Maggiore 13, 40125 Bologna

Bologna, venerdì 28 novembre 2008

ADEGUAMENTO SISMICO DEGLI EDIFICI ESISTENTI IN C.A..

Metodi di analisi e strumenti utilizzabili dai professionisti.

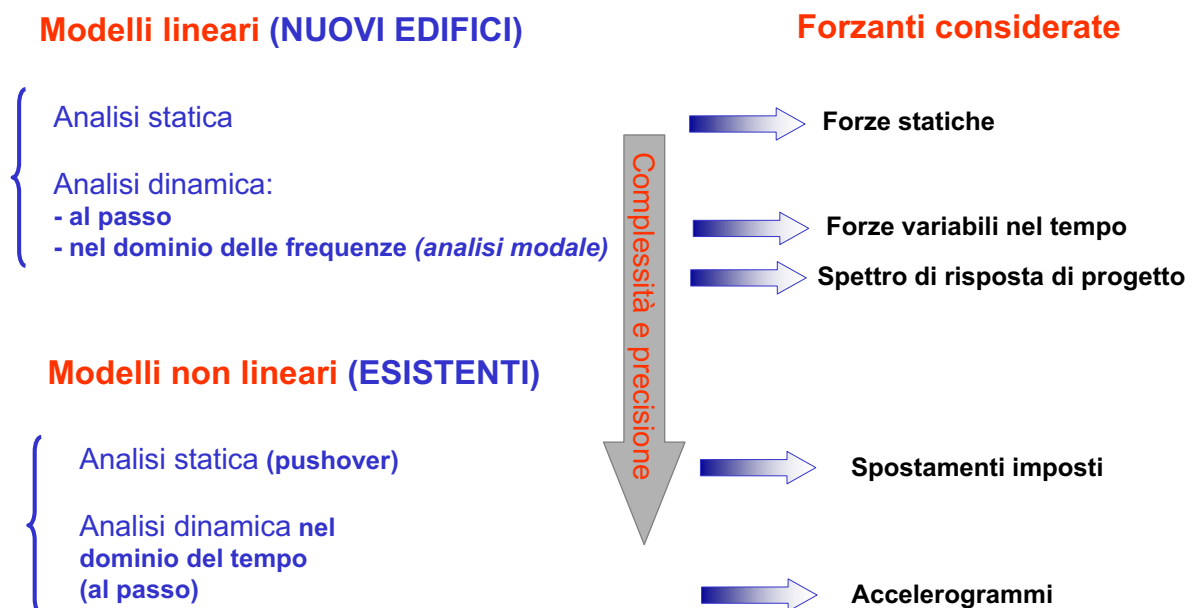
Ing. Roberto Scotta

**Università degli Studi di Padova
Facoltà di Ingegneria
Dip. di Costruzioni e Trasporti**

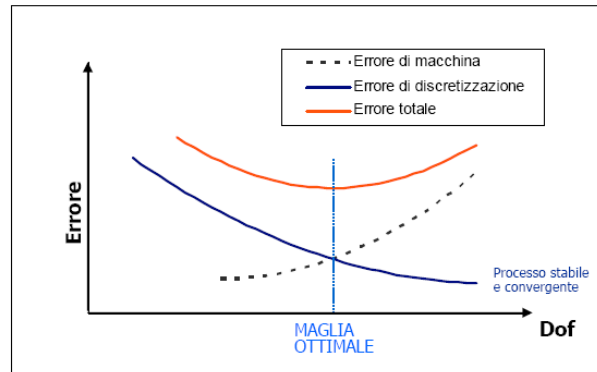
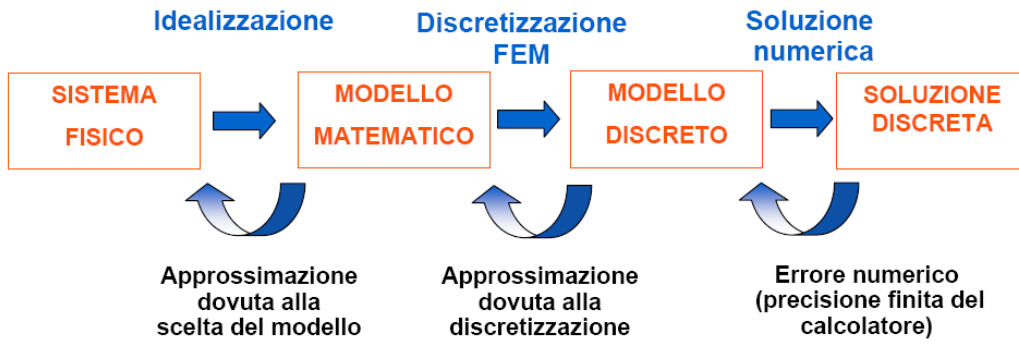
e_mail : roberto.scotta@unipd.it



Metodi di Analisi (con riferimento ai problemi sismici)



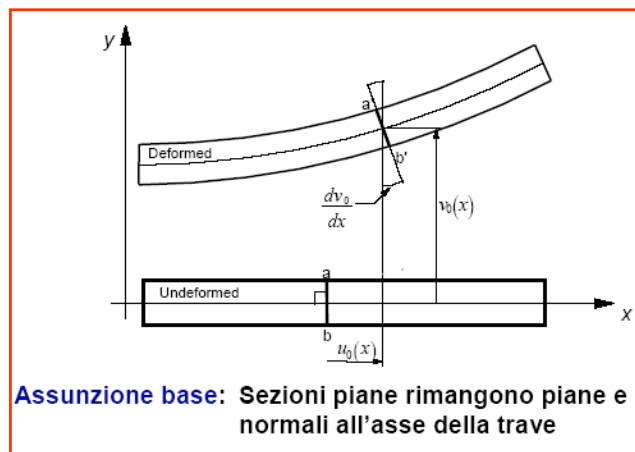
La modellazione strutturale



Da sistemi continui a sistemi discreti

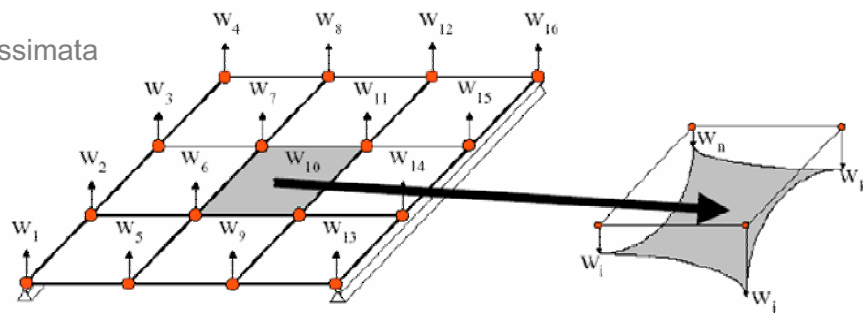
Telai e travi - beam and truss -

soluzione esatta nell'ambito di applicazione della trattazione delle travi di Eulero



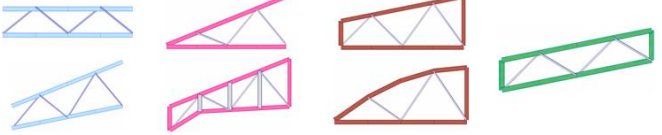

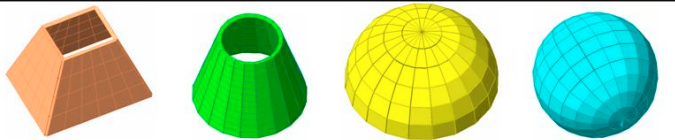


Piastre, lastre, strutture 3D - elementi finiti -

soluzione approssimata



TIPOLOGIE DI ELEMENTI FINITI

Arch		
Frame		
Truss		
Plate		
Shell		

Analisi Lineare (elastica)

Equazione generalizzata dell'equilibrio (sistemi discreti M-GDL):

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U}(t) = \mathbf{F}(t)$$

Matrice di Massa

Matrice di Rigidezza

Vettore delle forze

Matrice di Smorzamento
(Rayleigh: $\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K}$)

Vettore degli spostamenti
(incognita principale)

Proprietà dei sistemi lineari elastici:

- le matrici del sistema sono costanti e non dipendono da \mathbf{U}
- la soluzione esiste sempre ed è unica
- vale il principio di sovrapposizione degli effetti

Analisi Non Lineari

Sistema M-GDL soggetto a forzante esterna:

$$\mathbf{K}(\mathbf{U}, t, T, \dots) \cdot \mathbf{U}(t) = \mathbf{F}(t)$$

La matrice di rigidezza \mathbf{K} è funzione dell'incognita spostamento \mathbf{U} e anche di altri fattori (tempo, temperatura, ...). Il problema è **non lineare** e pertanto deve essere risolto per iterazioni successive.

Il problema diventa di tipo statico quando si trascurano le componenti di forza inerziali e viscosi

Problemi Non Lineari

Cause di Non Linearità

Non linearità geometrica

grandi spostamenti/rotazioni/deformazioni
effetti del secondo ordine ($P-\Delta$)

Non linearità di materiale



Fig. 2.48 Esempi di legami costitutivi del comportamento anelastico ciclico di: (a) calcestruzzo; (b) acciaio

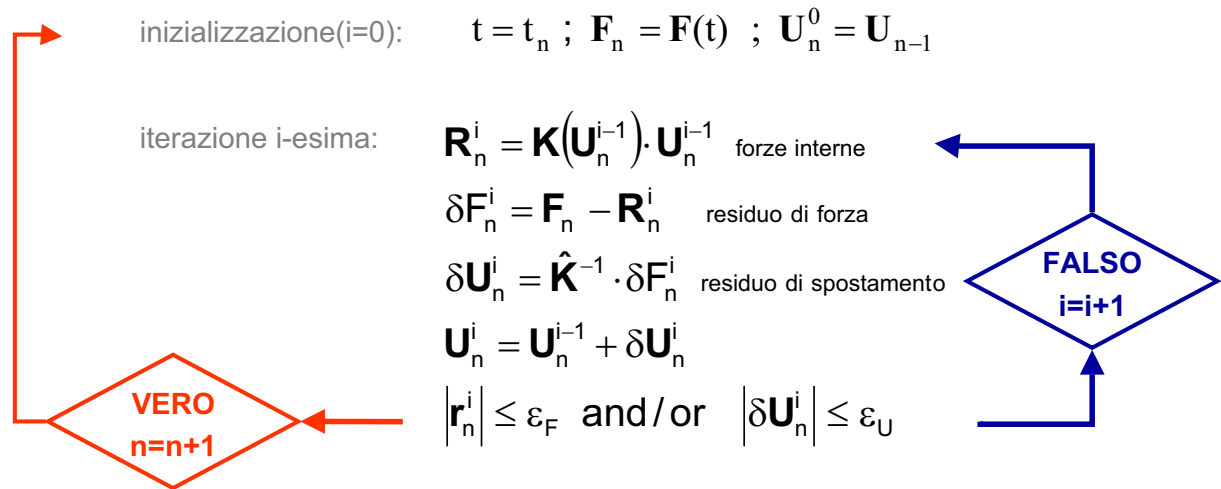
Modellazione a N.L. concentrata
concetto di cerniera plastica (elementi beam) – isolatori
(diagrammi $M-\chi$ - $F-\delta$)

Modellazione a N.L. diffusa (F.E.M.)
elementi beam a fibre - diagrammi $\sigma-\epsilon$
Materiale non lineare - diagrammi $\sigma-\epsilon$

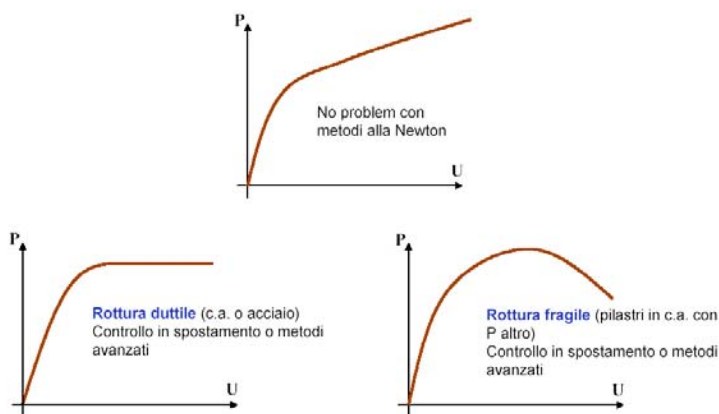
Problemi Non Lineari

Soluzione per iterazioni successive:

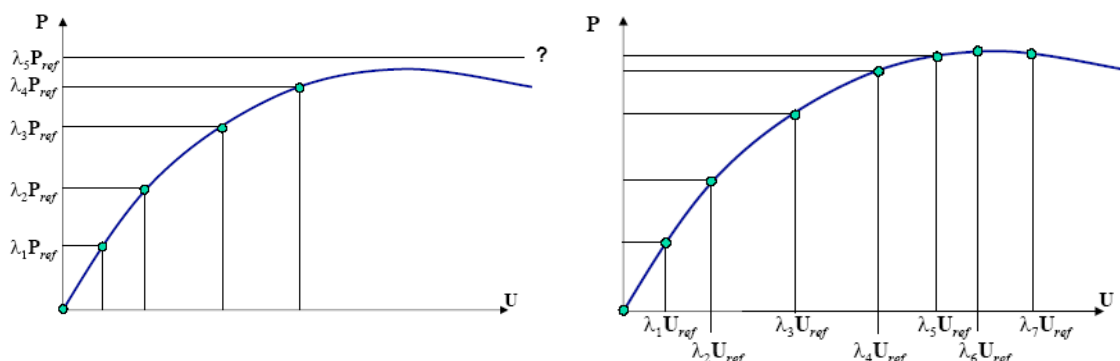
- E' nota la soluzione al passo n-1: \mathbf{U}_{n-1}
- Si cerca la soluzione al passo n:



Problemi Non Lineari

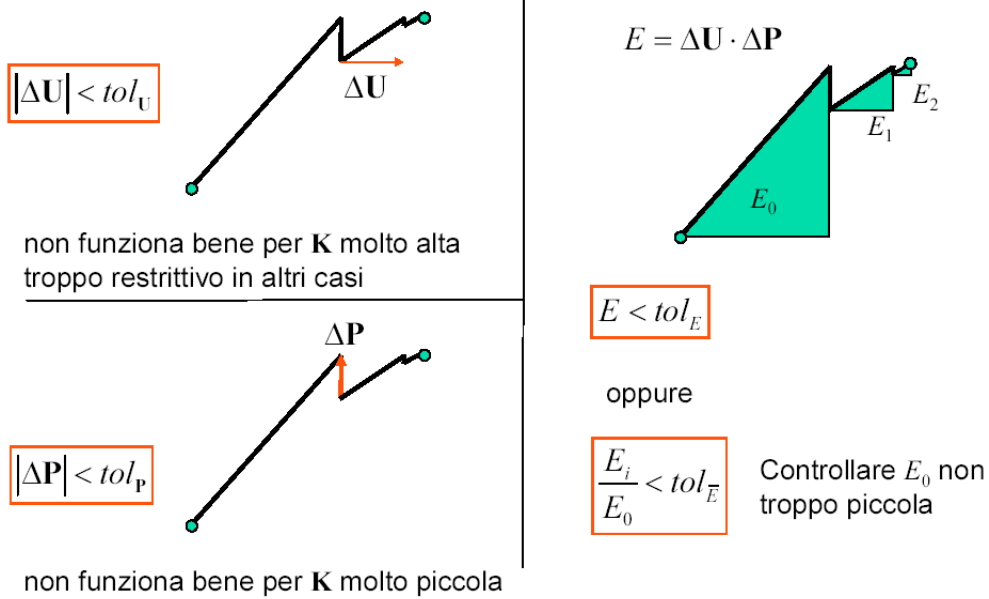


Diverse tipologie di risposta strutturale

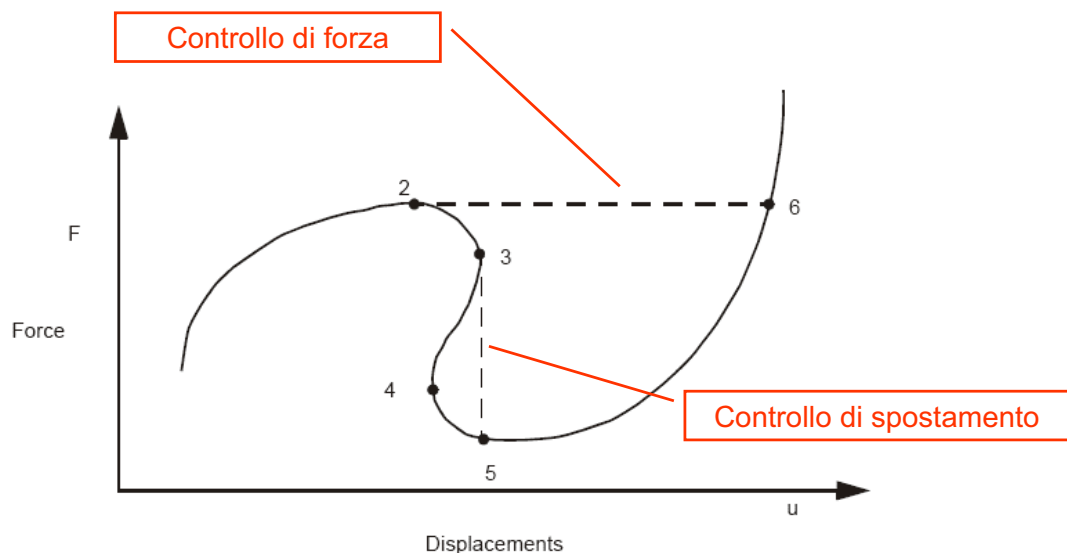


Problemi Non Lineari

Criteri di convergenza



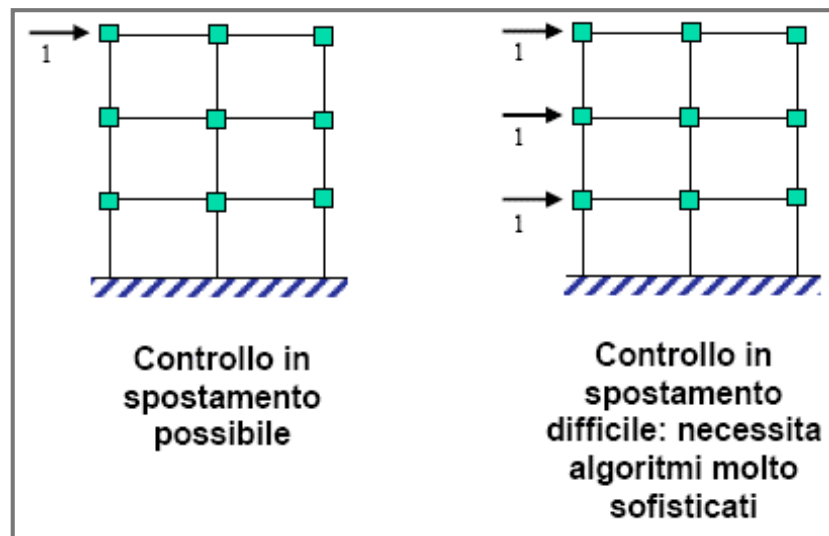
Problemi Non Lineari



La ricerca della soluzione non lineare è particolarmente sentita nei problemi statici o quasi-statici. In dinamica le forze inerziali aiutano a determinare la condizione di equilibrio.

Il controllo di spostamento diventa complicato quando si vuole controllare lo spostamento di m gradi di libertà in modo fra loro indipendente.

Problemi Non Lineari



La ricerca della soluzione non lineare è particolarmente sentita nei problemi statici o quasi-statici. In dinamica le forze inerziali aiutano a determinare la condizione di equilibrio.

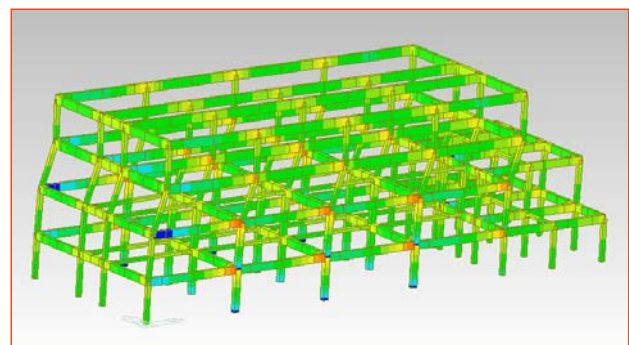
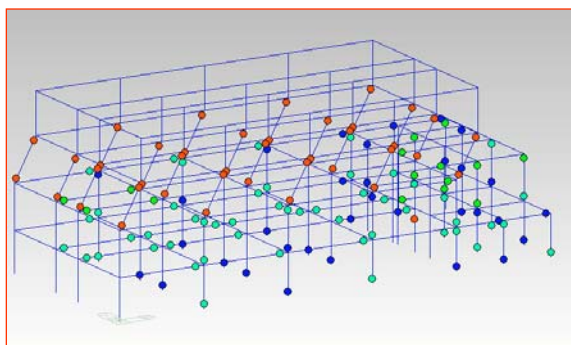
Il controllo di spostamento diventa complicato quando si vuole controllare lo spostamento di m gradi di libertà in modo fra loro indipendente.

Analisi Non Lineari di Strutture Intelaiate

Per limitare la complessità di modellazione, ridurre i tempi di elaborazione e facilitare l'interpretazione dei risultati è conveniente utilizzare modelli di tipo ad aste 1-D a comportamento non lineare.

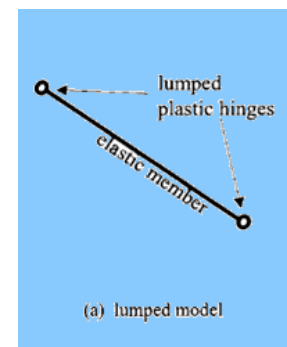
I modelli utilizzabili fondamentalmente sono di due tipi :

- modelli a non linearità concentrata (**modelli a cerniere plastiche**)
- modelli a non linearità diffusa (**modelli a fibre**)

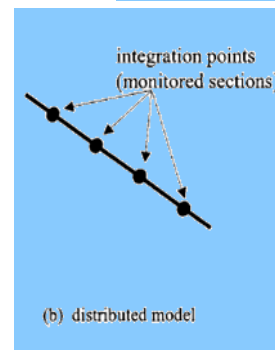


MODELLI A PLASTICITA' CONCENTRATA - DISTRIBUITA

Gli elementi ai quali vengono assegnate cerniere del tipo previsto dalle normative FEMA ed EC8, si caratterizzano per la nascita di zone di dissipazione di energia in punti opportuni e localizzati, che di norma si dispongono alle estremità dell'elemento beam.

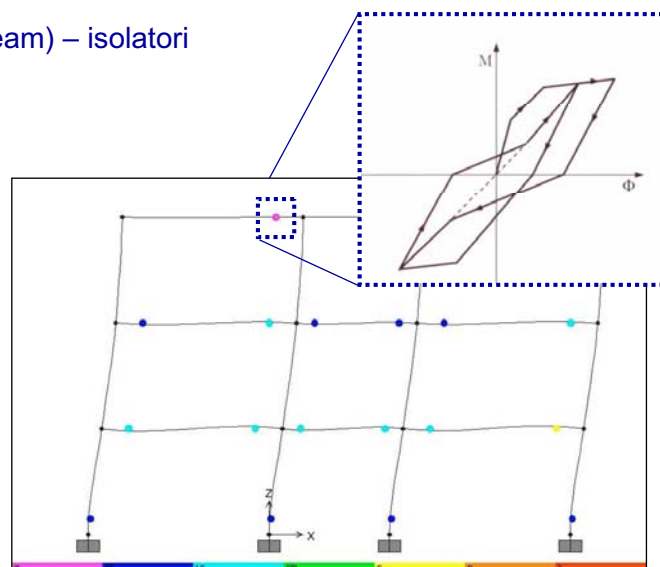
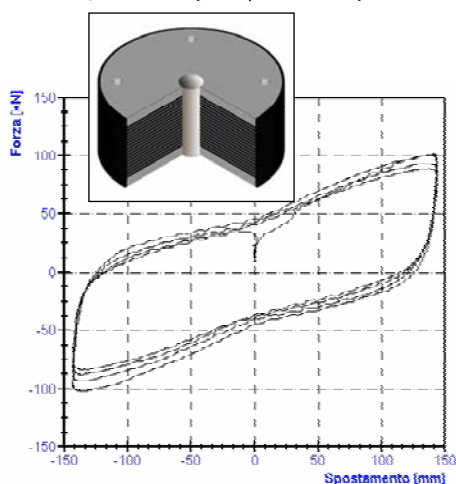


I modelli a plasticità distribuita sono molto più precisi e realistici. Le caratteristiche plastiche dell'elemento sono distribuite su tutta la sua lunghezza e non alle sole estremità. Sulla lunghezza dell'elemento sono distribuiti più punti di integrazione chiamati punti Gauss.



Modelli a N.L. concentrata

Concetto di cerniera plastica (elementi beam) – isolatori
diagrammi ($M-\phi$ - $F-\delta$)



Si concentrano le deformazioni plastiche della struttura in opportune zone caratterizzate da un legame rigido-plastico (cerniere plastiche).

Si impiegano quindi elementi elastici (beam) per collegare le cerniere plastiche.

Problema: definire le leggi costitutive e le dimensioni delle cerniere plastiche

Approssimazione: si individuano a priori le zone "critiche" della struttura

Modelli a N.L. concentrata

Secondo OPCM 3431/05 - EC8

Capacità di Rotazione
allo SL Danno Limitato

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

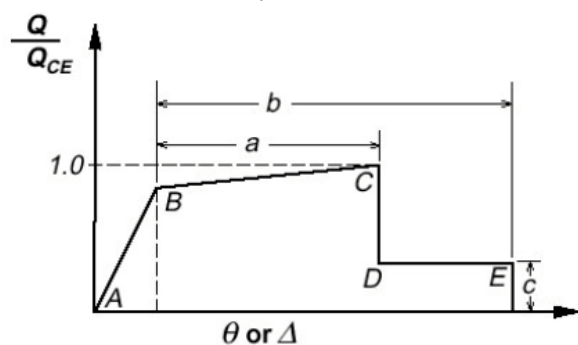
Capacità di Rotazione
allo SL Danno Severo

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

$$\theta_u = \frac{3}{4} \theta_{u,C,CO} = \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{\gamma_{el}} 0,016 (0,3)^v \left[\frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega)} f_c \right]^{0,225} \left(\frac{L_v}{h} \right)^{0,35} 25^{\left(\alpha_{psx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1,25^{100 \rho_d})$$

CAPACITA' DI ROTAZIONE SECONDO NERHP - FEMA 273

(TABELLA PER PILASTRI CON STAFFE NON CONFORMI)



$$V = \frac{M_u^{sx} + M_u^{dx}}{L} \pm \frac{P \cdot L}{2}$$

$$\rho_{bal} = 0.1667 \cdot \frac{f'_c}{f_y}$$

Fig.6.16 Legame costitutivo di riferimento

Tab.6.10 Parametri di modellazione e verifica delle cerniere plastiche dei pilastri

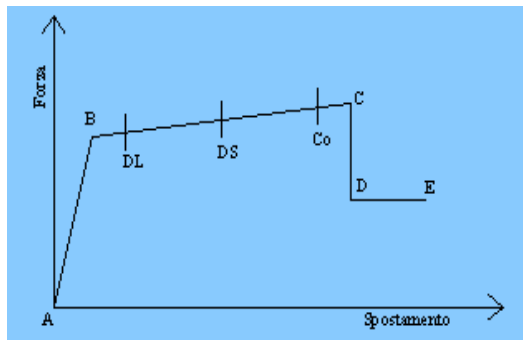
Parametri di riferimento		Parametri di modellazione			Parametri di verifica				
					Tipo di componente				
					Primario		Secondario		
					Livelli di prestazione				
$\frac{P}{A_g \cdot f'_c}$	$\frac{V}{b_w \cdot d \cdot \sqrt{f'_c}}$	a	b	c	IO	LS	CP	LS	CP
≤ 0.1	≤ 3	0.01	0.015	0.2	0.005	0.005	0.01	0.005	0.015
≤ 0.1	≥ 6	0.005	0.005	-	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
≥ 0.4	≤ 3	0.005	0.005	-	0.0	0.0	0.005	0.0	0.005
≥ 0.4	≥ 6	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Nota: per valori intermedi a quelli specificati sono consentite interpolazioni lineari

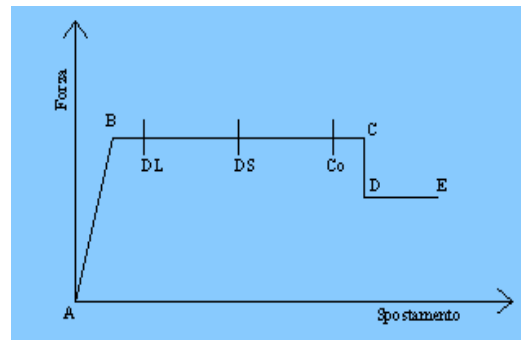
CERNIERE FEMA – EC8

- Tratto A-B: descrive la fase elastica ed è uguale nei due casi.
- Tratto B-C: rappresenta le deformazioni plastiche, a differenza dell'EC8 per le FEMA questa fase è di incrudimento.
- Tratto C-D: rappresenta la riduzione della resistenza dopo al raggiungimento del collasso, fino a rottura (E).

Cerniere FEMA



Cerniere EC8

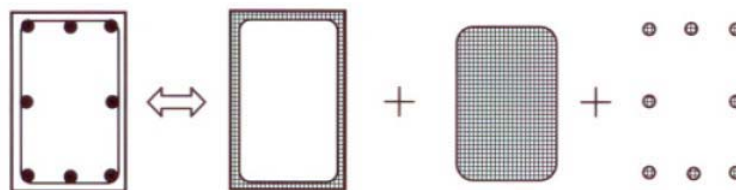


Modelli a N.L. distribuita - MODELLI A FIBRE

Concetto di approccio a fibre.

Si assume la conservazione delle sezioni piane.

In ogni sezione i parametri di deformazione sono solamente due.



Ogni fibra può essere costituita da acciaio o calcestruzzo. Per entrambi i materiali si definisce una opportuna legge costitutiva.

Dai due parametri di deformazione della sezione si risale alla deformazione, e quindi alla tensione di ogni singola fibra.

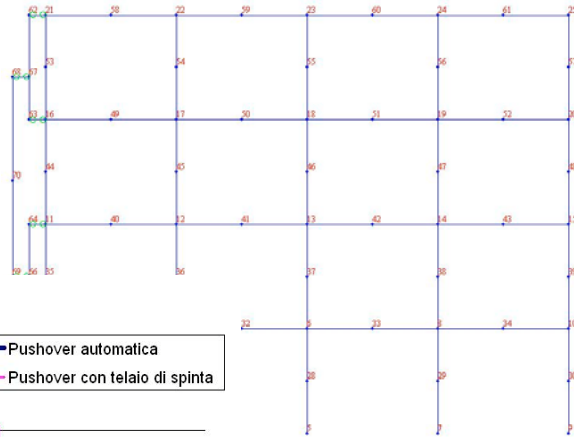
Per integrazione delle tensioni si ricavano le corrispondenti sollecitazioni interne della sezione che devono essere in equilibrio con quelle esterne.

$$\begin{array}{c}
 \varepsilon_g \\
 \chi
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \longrightarrow \\
 \longrightarrow
 \end{array}
 \sigma_i
 \begin{array}{c}
 \longrightarrow \\
 \longrightarrow
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 M = \int \sigma_i y dA \\
 N = \int \sigma_i dA
 \end{array}$$

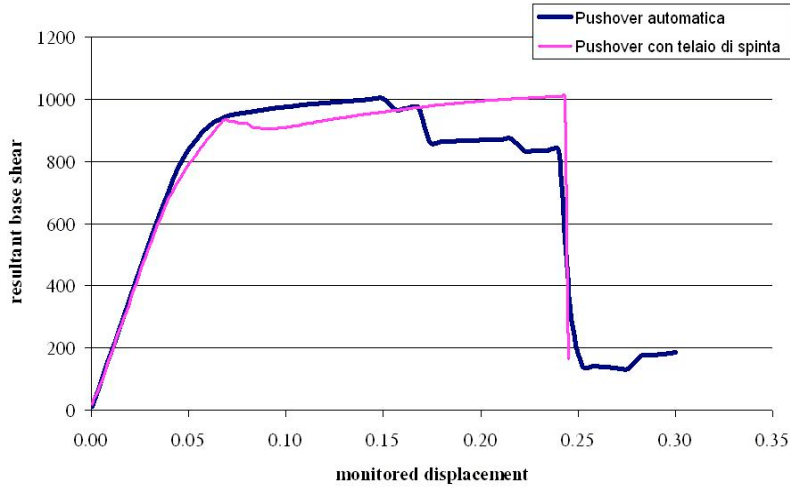
Esempio: modellazione a N.L. concentrata

Confronto fra metodi arc-length e spostamento imposto

Spostamento imposto



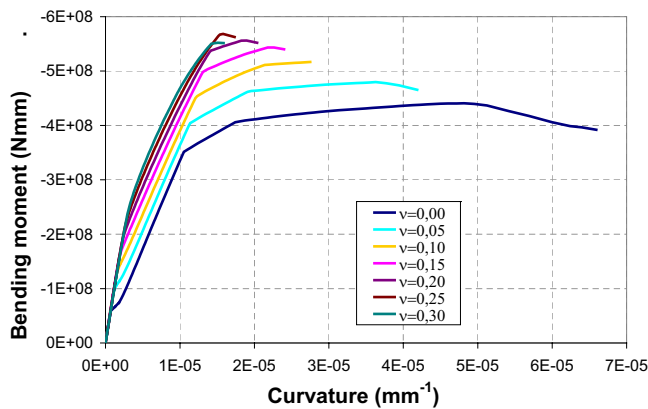
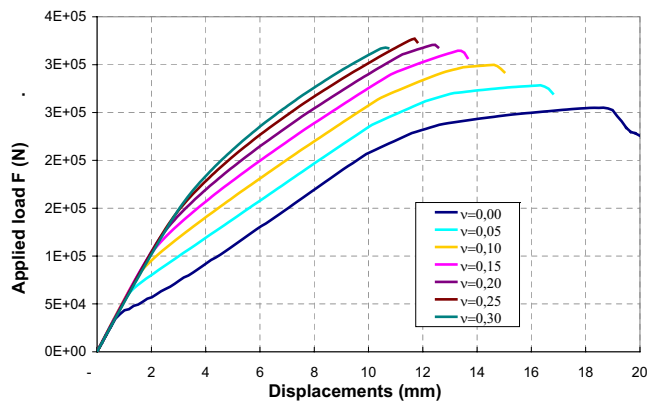
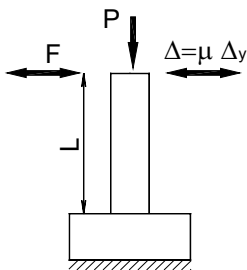
capacity curve



Curva di capacità

TEST DI VALIDAZIONE

Ductility of R.C. columns



Principal Test Data	
<i>R.C. Section</i>	
Base B	400 mm
Height H	400 mm
Length L	1700 mm
Cover C	40 mm
Long reinf A _s	12#24
Stirrups A _{st}	4#8 / 130
<i>Materials characteristics</i>	
f _c	38,0 MPa
f _t	3,8 MPa
E _c	34 500 MPa
ε ₀	0,20%
ε _u	0,57%
f _{y,s}	510 MPa
f _{t,s}	515 MPa
f _{y,st}	510 MPa
f _{t,st}	515 MPa
E _s	206 000 MPa

Push-over singola colonna - CP concentrate

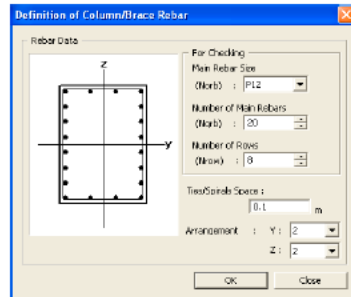


Figura 4.6: armature nella cerniera plastica. Figura 4.7: pilastro caricato.

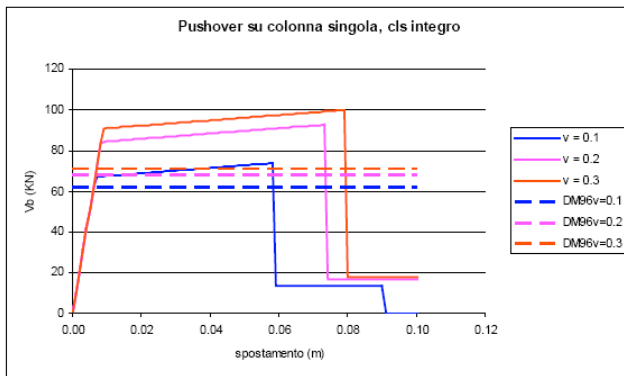


Figura 4.8: confronto tra V_b risultante dalla pushover e quello ottenuto dal calcolo lineare.

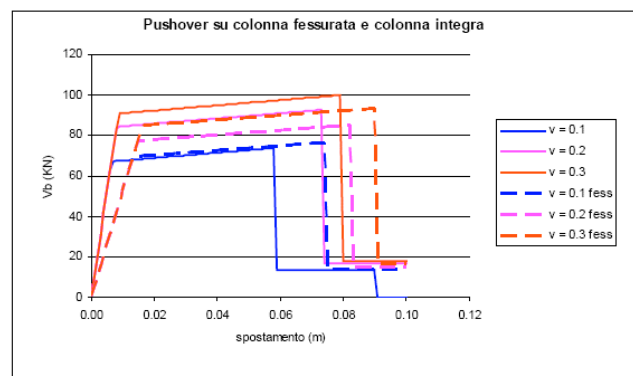


Figura 4.10: confronto tra colonna fessurata e colonna integra.

Push over singola colonna - Fibre

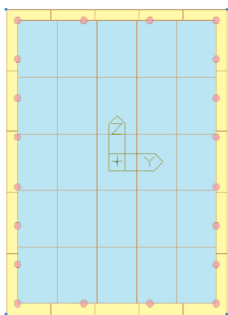


Figura 5.4: sezione con 61 fibre.

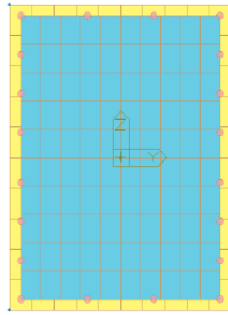


Figura 5.5: sezione con 100 fibre.

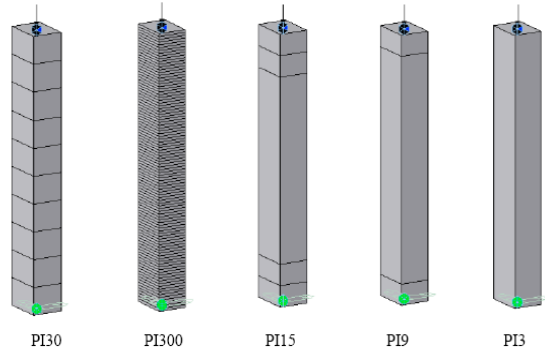


Figura 5.9: colonne utilizzate nella prova e loro suddivisione.

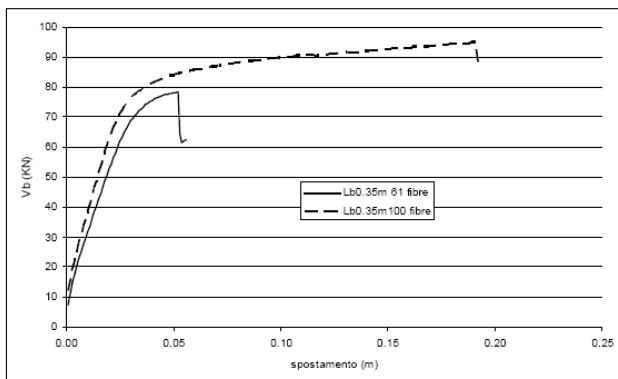


Figura 5.7: influenza del numero di fibre con dieci el. beam, per un totale quindi di 30 p.ti Gauss.

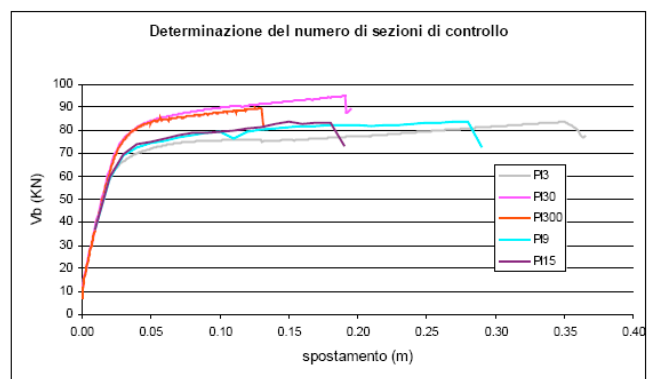


Figura 5.10: risultati dell'analisi.

Push over singola colonna - CP vs. Fibre

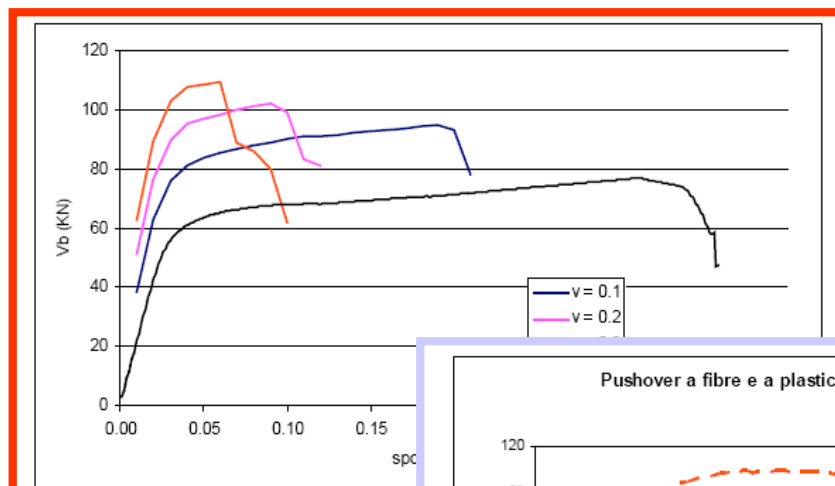


Figura 5.12: influenza del carico assiale sulla pr

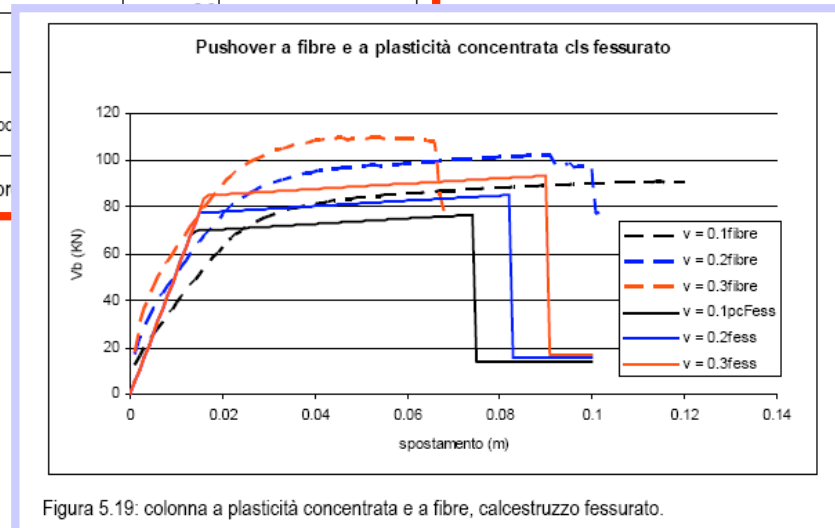


Figura 5.19: colonna a plasticità concentrata e a fibre, calcestruzzo fessurato.

ANALISI STATICA NON LINEARE (PUSHOVER)

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

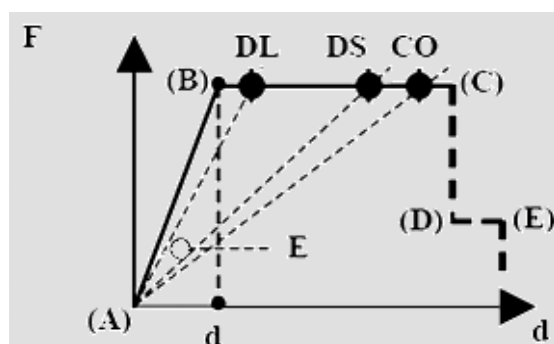
- valutare i rapporti di sovreresistenza α_u/α_1 per la determinazione di q ;
- verificare l'effettiva distribuzione della domanda inelastica negli edifici progettati con il fattore di riduzione q ;
- La possibilità di verificare le conseguenze della perdita di resistenza di un elemento sulla stabilità dell'intera struttura;
- L'individuazione delle zone critiche dove si ha maggiore richiesta di duttilità;
- L'individuazione di irregolarità in pianta o in altezza in termini di resistenza che causano modifiche della risposta dinamica in campo non lineare;
- La valutazione degli spostamenti relativi fra i piani tenendo conto delle discontinuità di resistenza e rigidezza fra i piani. In questo modo è possibile controllare il danno di elementi non strutturali;
- Il monitoraggio continuo di deformazioni, sollecitazioni, snervamento e rottura nei singoli elementi, nonché della curva di capacità dell'intera struttura;
- 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.

PUSHOVER

Se è possibile individuare un sistema di azioni o di deformazioni tali che un particolare modo di risposta o una combinazione di modi può essere rappresentata staticamente,

allora la risposta della struttura ottenuta sotto l'effetto di un vettore crescente di azioni o di deformazioni può sostituire i risultati ottenuti dall'analisi dinamica

Il sistema di forze da applicare alla struttura deve essere tale da involuppare tutte le possibili risposte calcolate mediante analisi non lineari dinamiche



ANALISI STATICA NON LINEARE

Diversi tipi di analisi di pushover:

- **Metodo N2 (OPCM e EC8)**
 - Metodo dello Spettro di Capacità
 - Metodo N2 modificato
 - Metodi adattativi
 - Metodo modal pushover
 - altri

I metodi più avanzati rispetto all'N2 cercano di meglio cogliere l'effetto della dissipazione energetica dovuta al danneggiamento, dei modi superiori (negli edifici irregolari in altezza e/o alti), e/o gli effetti torsionali e/o il variare delle forme modali con il danneggiamento progressivo della struttura.

ANALISI STATICA NON LINEARE SECONDO METODO N2

Ipotesi:

la risposta di un sistema a più gradi di libertà **M-GDL** può essere correlata alla risposta di un sistema equivalente ad un grado di libertà **1-GDL** con un'appropriata caratteristica isteretica.

Questo implica che il comportamento del sistema **M-GDL** sia determinato principalmente da un solo **modo** la cui forma Φ rimane costante durante l'analisi.

Passaggio dal sistema M-GDL al sistema 1-GDL:

definito il sistema 1-GDL equivalente e calcolato il suo periodo proprio T^* è immediato, con l'utilizzo dello spettro di risposta elastico in spostamento, dedurre lo spostamento massimo che deve essere in grado di sopportare e da questo dedurre lo spostamento richiesto al sistema M-GDL.

ANALISI STATICA NON LINEARE

Si applicano all'edificio:

- i carichi gravitazionali nella combinazione sismica
- ed un **sistema di forze orizzontali** applicate ai baricentri di piano che, mantenendo invariati i rapporti relativi fra le forze stesse, vengano tutte scalate in modo **da far crescere monotonamente lo spostamento orizzontale di un punto di controllo** sulla struttura (es. un punto in sommità dell'edificio), **fino al superamento dello stato limite oggetto di verifica** .

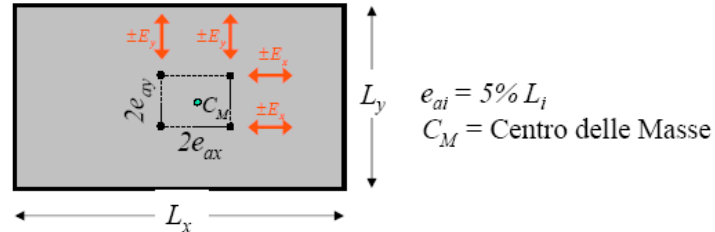
Secondo OPCM nel caso di analisi non lineare statica non si applica la combinazione delle due componenti orizzontali dell'azione sismica: l'analisi della risposta strutturale è svolta considerando l'azione sismica applicata separatamente secondo ciascuna delle due direzioni orizzontali.

Non è richiesto di tenere conto di effetti torsionali.

EFFETTI DI ECCENTRICITA' (EC8)

Pianta irregolare - Effetti di pianta (EC8)

Le forze orizzontali vengono applicate alle masse del modello 3D tenendo conto delle eccentricità accidentali e_i



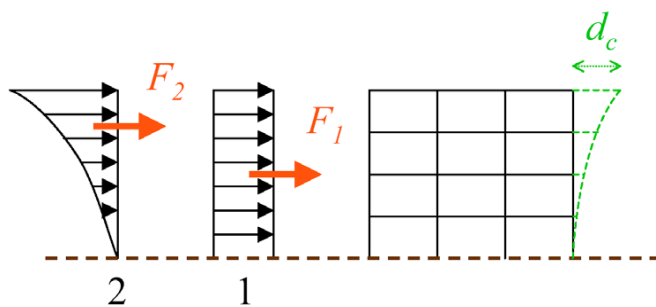
L'analisi Pushover può sottostimare fortemente le deformazioni di una struttura con modi prevalentemente torsionali

In tal caso lo spostamento derivante dal pushover sulla struttura torsionalmente "bilanciata" va amplificato

Il coefficiente di amplificazione può esser ricavato da una analisi elastica modale sulla struttura 3D

ANALISI STATICA NON LINEARE

La curva risultante rappresenta la **CAPACITA'** della struttura, che dovrà essere poi confrontata con la **DOMANDA** imposta dall'azione sismica di progetto.



- a) Sono da considerare 2 sistemi di forze da applicare separatamente, in alternativa
- distribuzione proporzionale alle masse (risultante F_1)
 - distribuzione proporzionale alle masse per la deformata del 1° modo (risultante F_2)

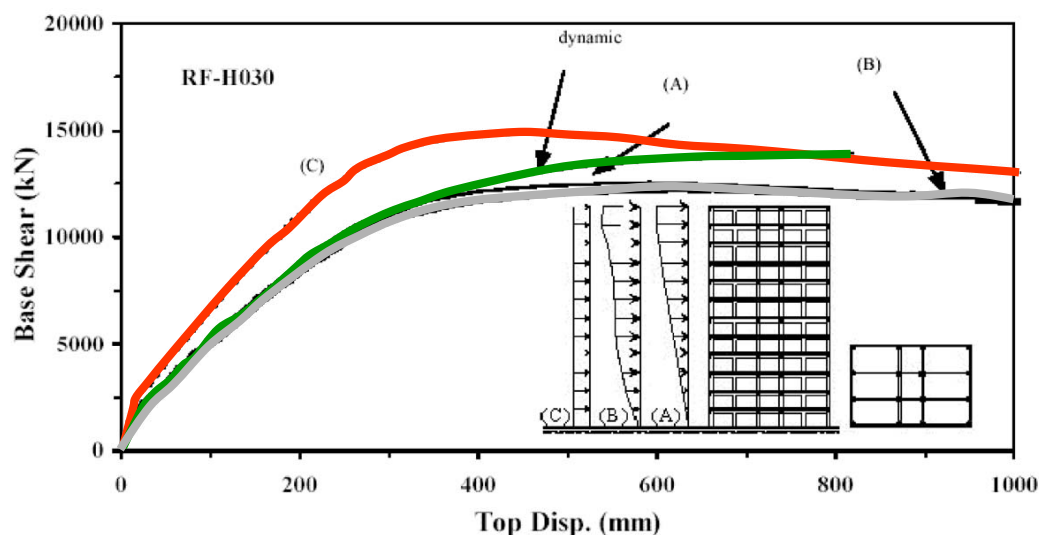
Tale scelta nasce dalla considerazione che la distribuzione delle forze laterali dovrebbe inviluppare la distribuzione delle forze di inerzia presenti sulla struttura durante il sisma.

Confronti con analisi dinamiche non lineari hanno evidenziato che:

- 🌐 le distribuzioni di forza proporzionali al primo modo colgono meglio la risposta dinamica finché la struttura rimane in campo elastico,
- 🌐 mentre quando si raggiungono grandi deformazioni la risposta dinamica è meglio rappresentata da distribuzioni di forze proporzionali alle masse.

ANALISI STATICA NON LINEARE

La forma più adeguata del vettore di azioni o di spostamenti impressi:
Considerando il comportamento in fase elastica e post-elastica di un edificio le distribuzioni più appropriate potrebbero essere rappresentate dalla **triangolare inversa** e dalla **costante**. In realtà considerando tali distribuzioni c'è il rischio di sovra o sottostimare anche grossolanamente la risposta globale



UN CASO STUDIO APPLICATIVO esempio n. 4 - task 2 progetto ReLluis

Obiettivi del progetto n° 2 TASK-IRREG del ReLluis

Valutazione del comportamento di edifici esistenti di forma irregolare

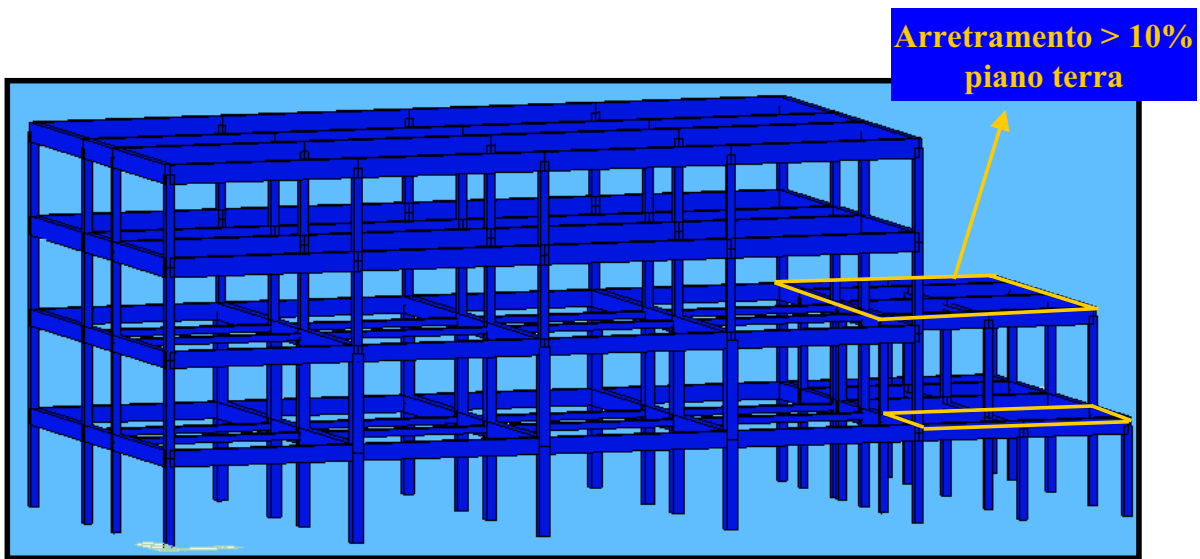
Stimare i livelli di intensità sismica (PGA) corrispondenti agli stati limite di Danno Severo(DS) e di Collasso(CO).

Modelli FEM e normative

Confrontare i risultati delle analisi ottenute considerando sia i modelli a plasticità concentrata, sia modelli a plasticità distribuita.

Per i modelli a plasticità concentrata, si confrontano i risultati ottenuti con la normativa EC8, e con la normativa FEMA.

EDIFICIO OGGETTO DI ANALISI

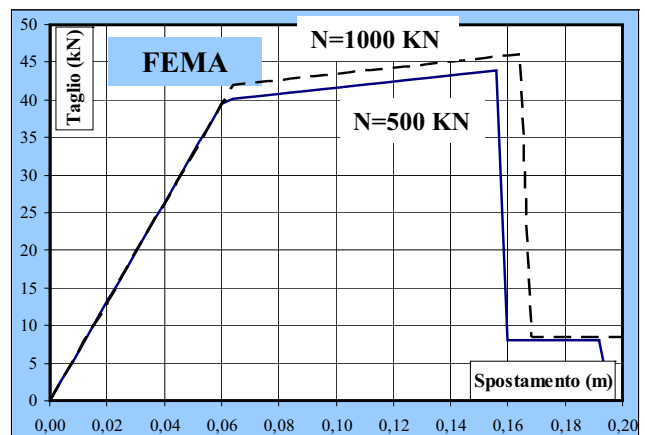
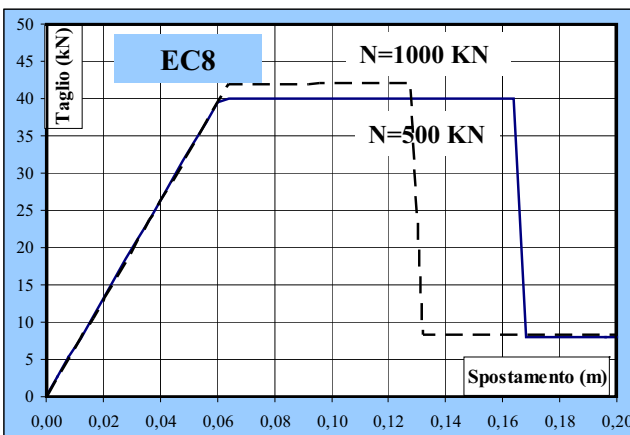


La struttura non è regolare in altezza.
A rigore l'analisi di pushover non sarebbe utilizzabile

PILASTRO a cerniere plastiche concentrate

I modelli sono stati tarati su strutture semplici.

Esempio: pilastro incastrato alla base sollecitato a presso flessione.



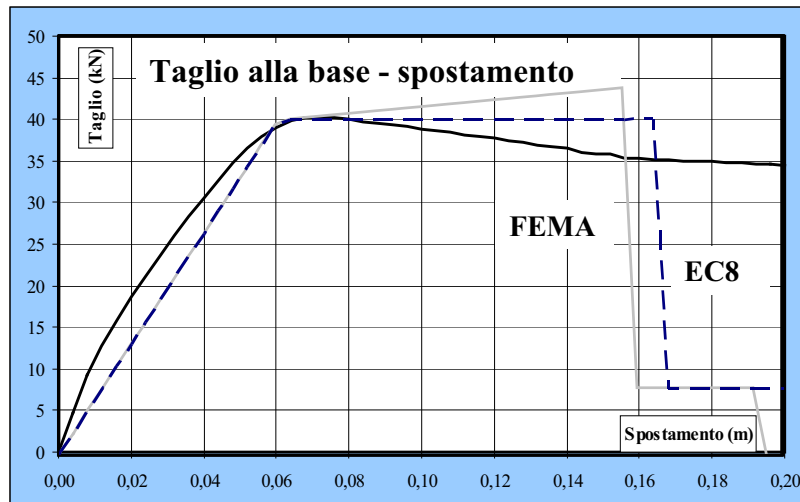
EC8	$\nu = 0,25$	$\nu = 0,5$	Diff. %
Taglio base	40,0	42,00	5,00
Spostamento	0,164	0,128	-21,95

FEMA	$\nu = 0,25$	$\nu = 0,5$	Diff. %
Taglio base	43,90	46,20	5,24
Spostamento	0,156	0,164	5,13

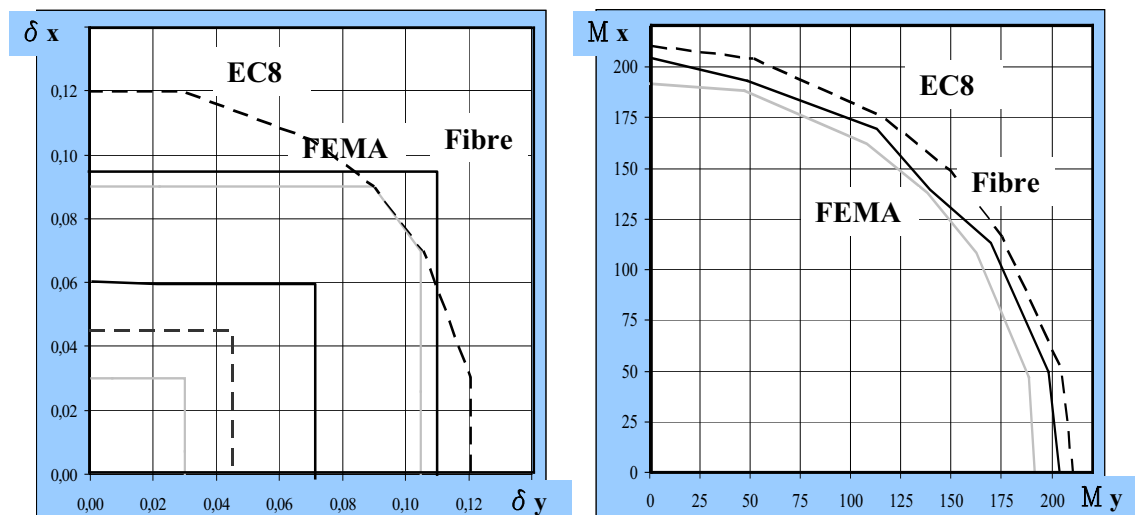
PILASTRO SINGOLO: confronto fra CP e fibre

Nel modello a fibre si è cerca di ottimizzare il modello operando su:

- il numero di fibre in cui viene divisa la sezione;
- il numero di punti di integrazione;
- il numero di elementi beam in cui viene diviso il pilastro.



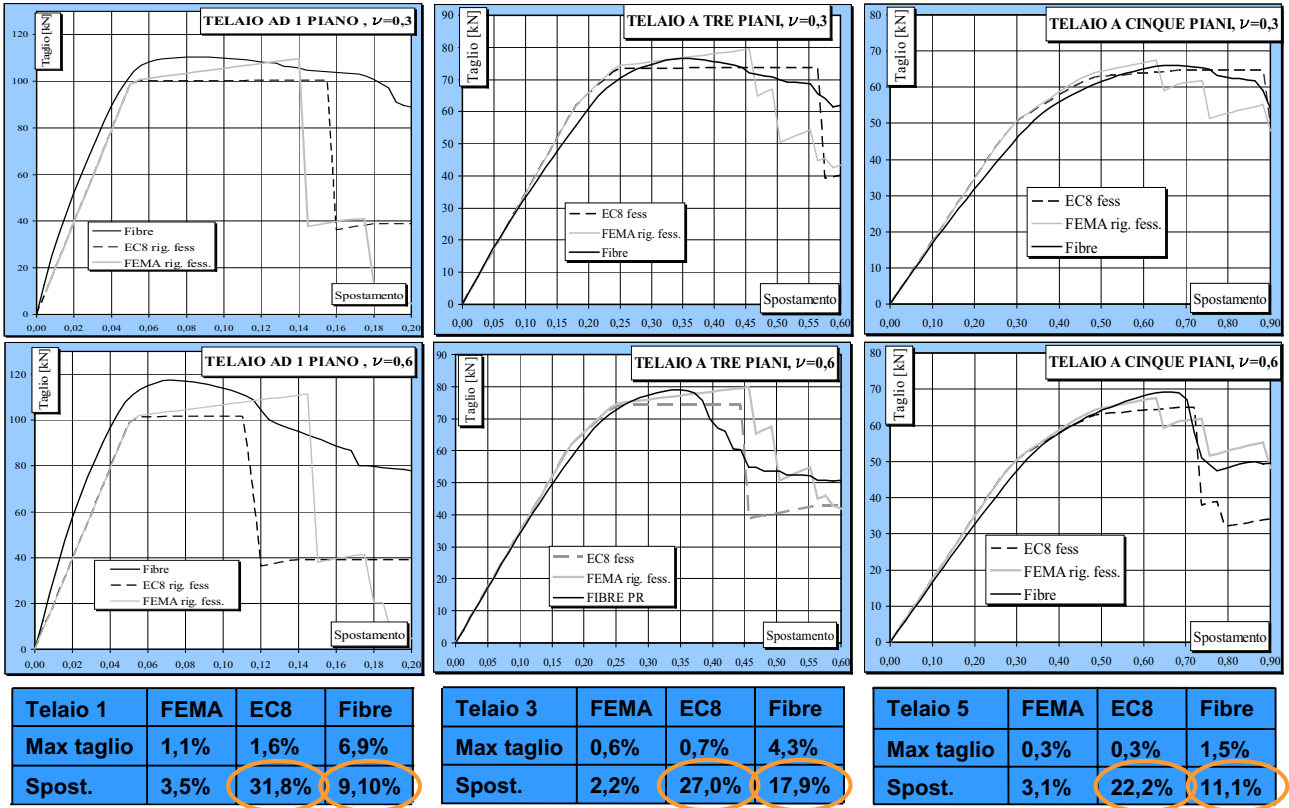
PILASTRO SEMPLICE in pressoflessione deviata



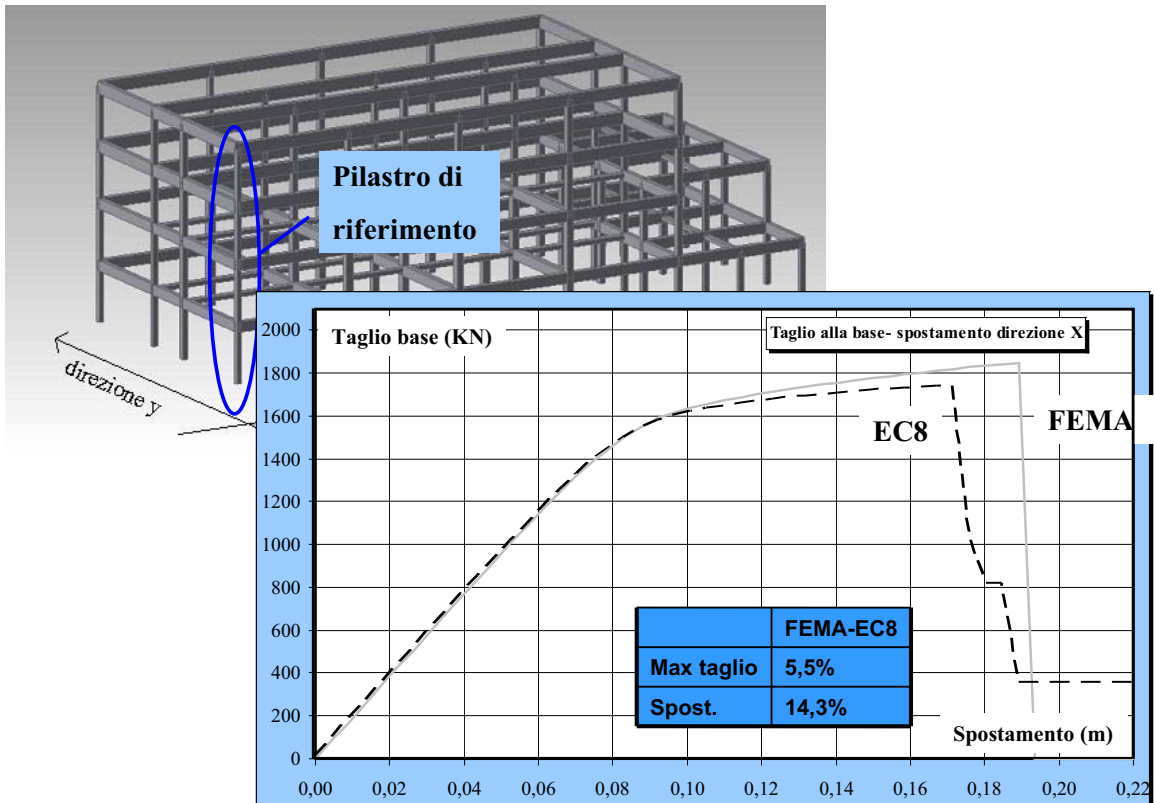
Solo in termini di sollecitazioni si ha interazione tra le due direzioni.

Solo le cerniere EC8 mostrano iterazione anche in termini di spostamenti.

CONFRONTO FRA ANALISI DI TELAI MULTIPIANO

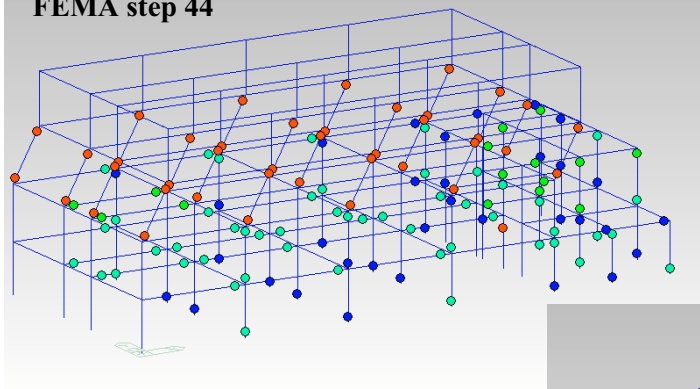


ANALISI PUSHOVER



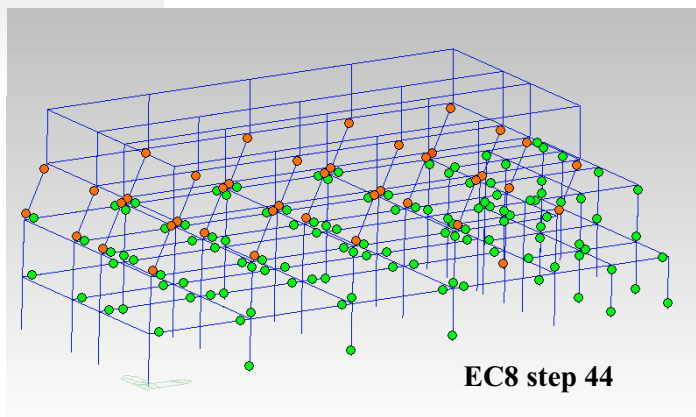
EDIFICIO – sviluppo delle cerniere plastiche

FEMA step 44



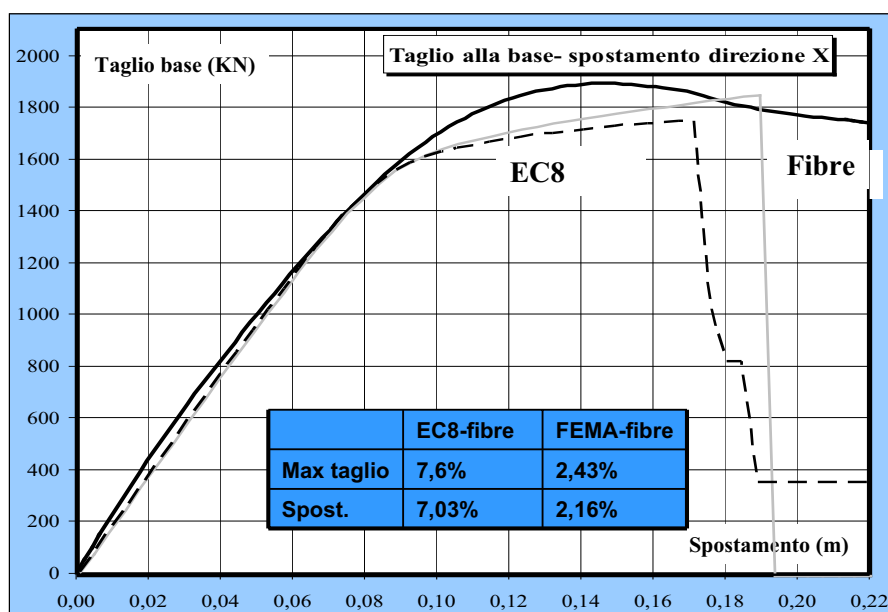
Il modello con cerniere tipo EC8 raggiunge lo stato limite di collasso prima rispetto alle FEMA.

Per entrambi i modelli la struttura giunge al collasso per la formazione di un piano sofficia tra il secondo e il terzo livello.



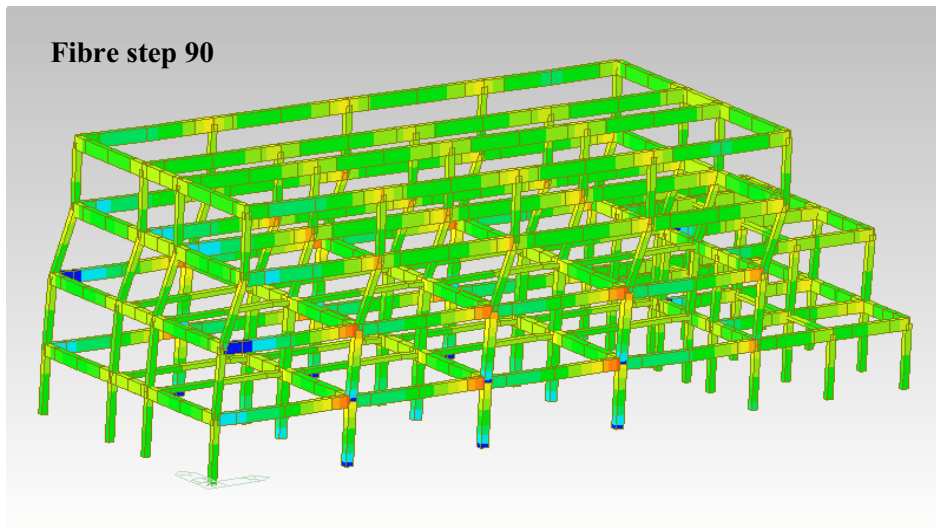
EC8 step 44

EDIFICIO – plasticità distribuita

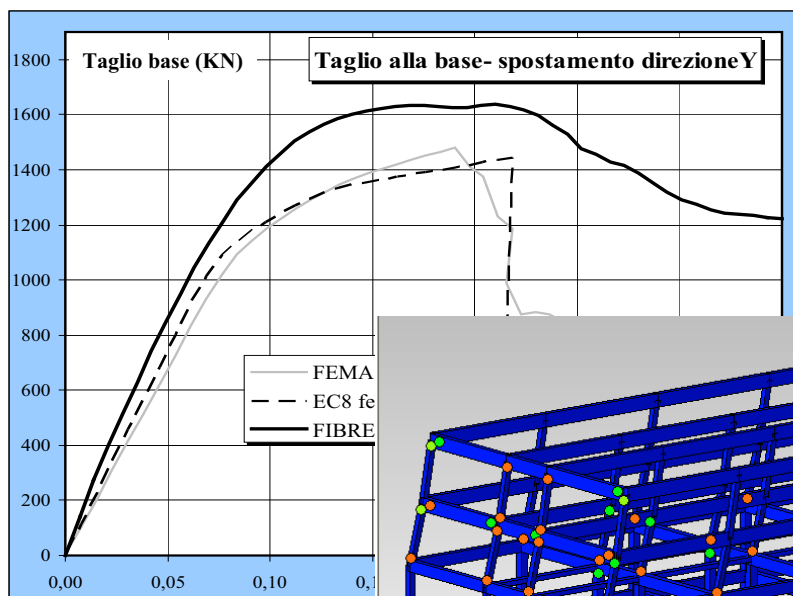


EDIFICIO – sviluppo delle deformazioni plastiche

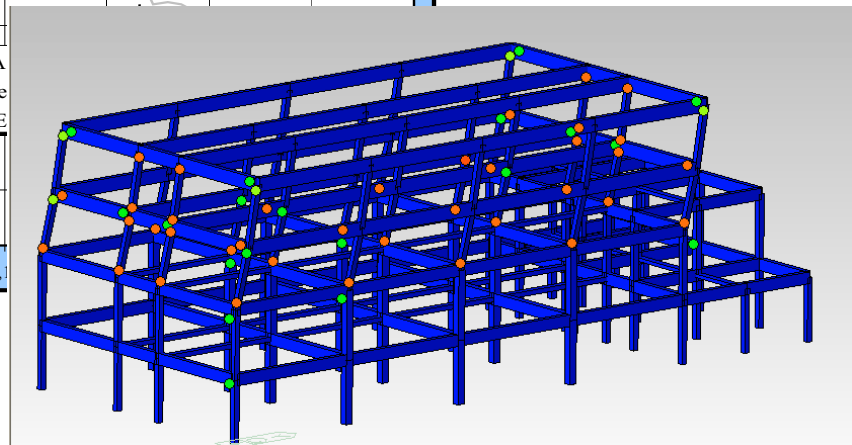
Le deformazioni plastiche si sviluppano in modo analogo a quanto ottenuto con i modelli a cerniere plastiche concentrate.



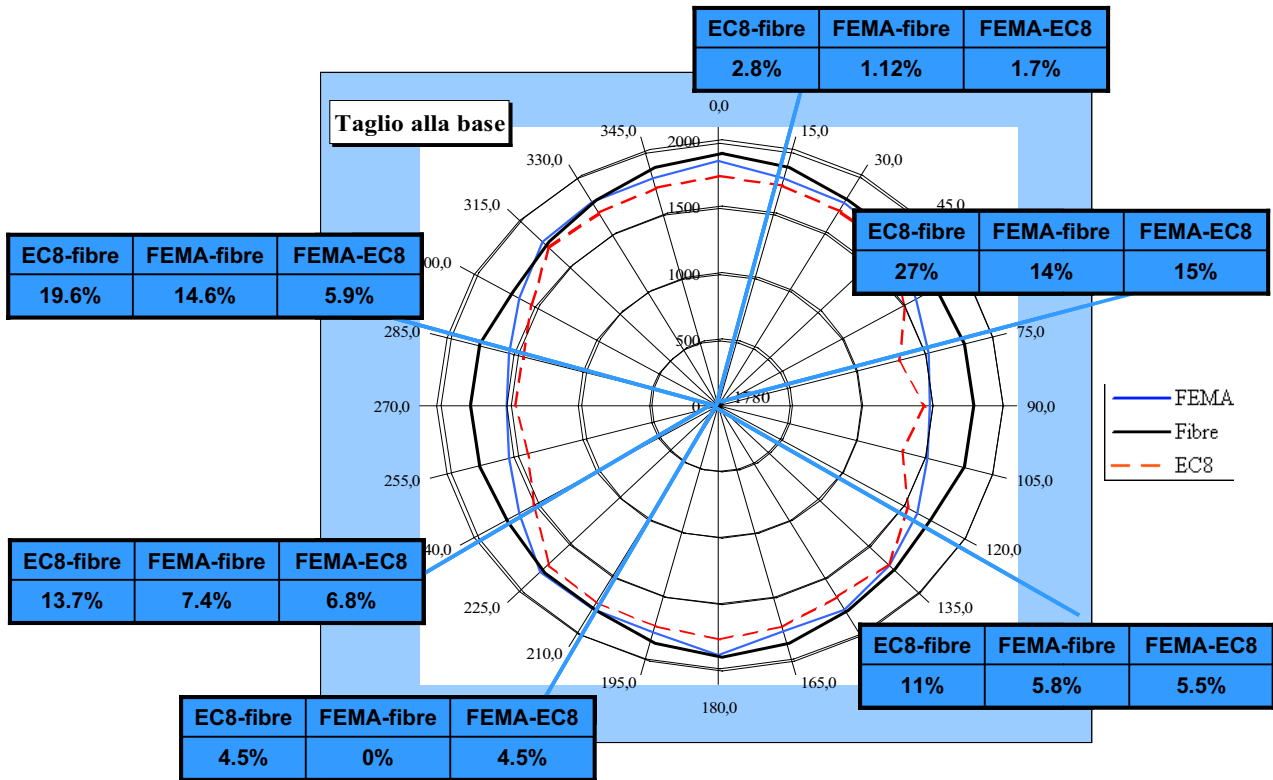
EDIFICIO – analisi in direzione y



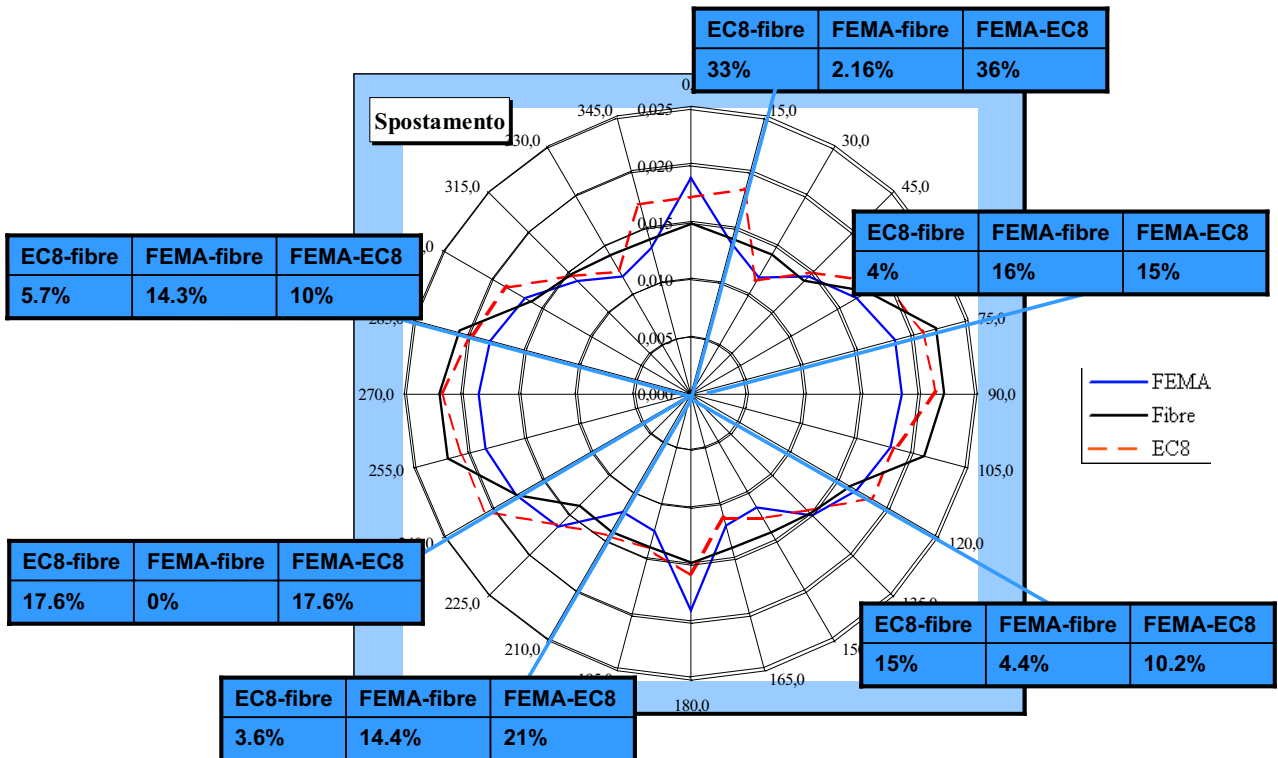
	EC8-fibre	FEMA-fibre
Max taglio	11,60%	9.20%
Spost.	3.54%	15.18%



GRAFICI POLARI – taglio alla base



GRAFICI POLARI – spostamento



CONCLUSIONI

- L'applicazione delle normative FEMA ed EC8 fornisce curve di capacità globali tra loro molto simili.
- I risultati ottenuti per i modelli a fibre sono conformi a quelli conseguiti con modelli a plasticità concentrata. Essi rappresentano quindi una ottima alternativa ai modelli classici a CP concentrate.
- Le esperienze maturate hanno dimostrato una buona capacità dei metodi Pushover di sostituire le analisi dinamiche non lineari al passo.
- I modelli di valutazione dovranno essere completati con l'analisi in automatico delle rottura fragili (rotture per taglio, rottura dei nodi, ...).
- I risultati che si ottengono sono molto sensibili ai dati di ingresso e alle scelte di analisi. E' necessario eseguire dei test di affidabilità del risultato e di robustezza della soluzione.
- Per questo è fondamentale tarare i modelli su strutture molto semplici come travi o pilastri. Il software che si utilizza deve essere di comprovata validità e deve essere completamente controllabile dal progettista.
- La valutazione di affidabilità delle strutture esistenti comincia sempre e comunque con una completa ed esaustiva conoscenza dell'oggetto da studiare: *importanza delle indagini conoscitive.*

GRAZIE PER L'ATTENZIONE.

per contatti e approfondimenti: roberto.scotta@unipd.it