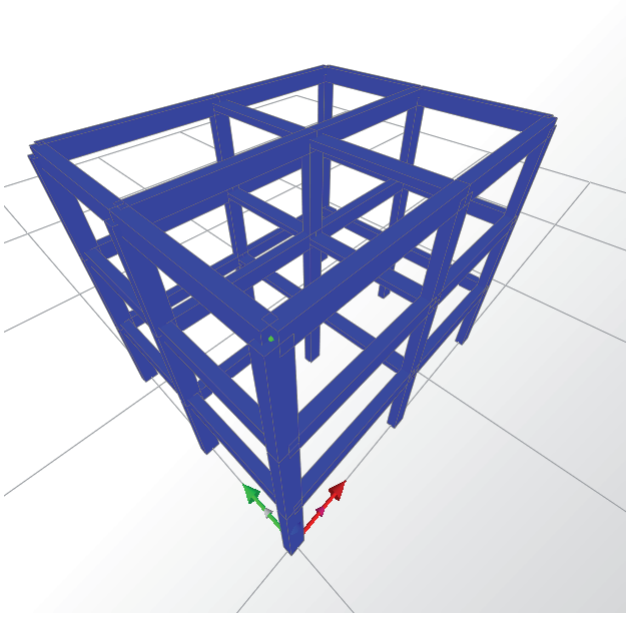
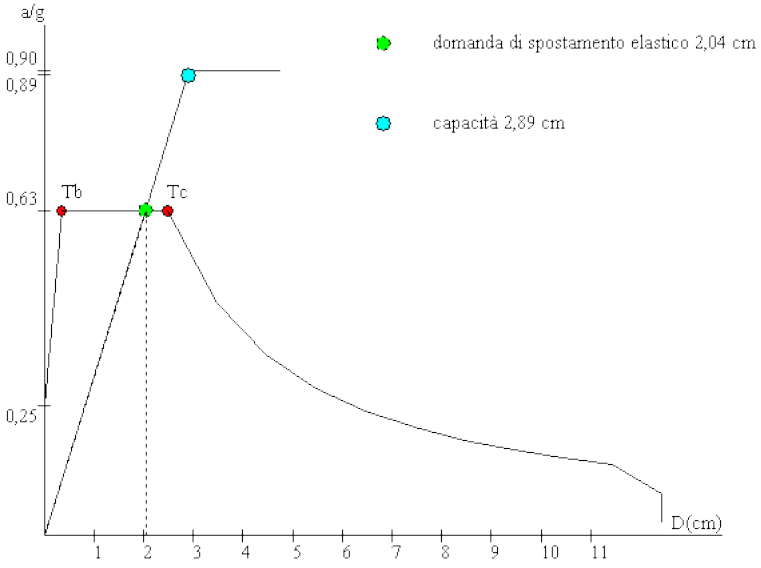
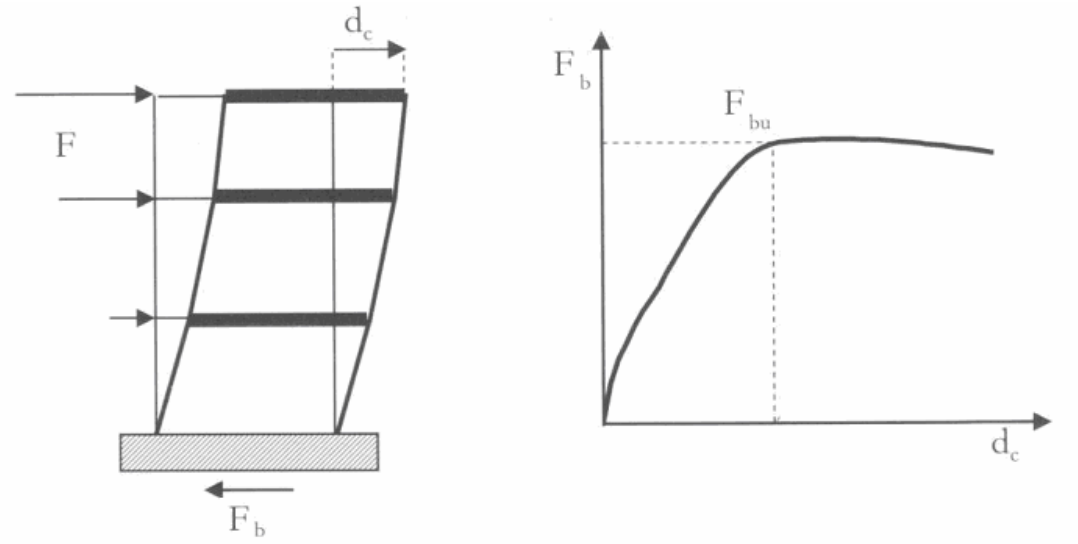
02 Analisi Non Lineare di un Telaio 3D





01. Analisi Statica non Lineare (Analisi Push-Over)

L'analisi statica non lineare, nota come analisi ***push-over***, prevede nella formulazione più generale del metodo l'applicazione incrementale ad un modello della struttura, rappresentativo del comportamento non lineare della stessa, di distribuzioni di forze orizzontali equivalenti alle azioni inerziali indotte dall'evento sismico. Tali azioni *spingono* la struttura fino al raggiungimento del collasso della stessa. Il risultato dell'analisi è la curva taglio alla base (**Fb**) spostamento in sommità (**dc**), che rappresenta la ***curva di capacità*** del sistema.



Con tale analisi è possibile dunque seguire l'evoluzione della risposta di un sistema strutturale, dalla formazione della prima cerniera plastica fino alla creazione del meccanismo di collasso e valutare, ad ogni passo, lo spostamento globale, lo spostamento relativo fra i piani, le deformazioni e le sollecitazioni nei singoli elementi strutturali.

Tale tipo di analisi consente di valutare l'effettiva capacità deformativa della struttura e quindi determinare il *coefficiente di struttura* **q** che, nel caso di strutture di elevato periodo di vibrazione, può essere assunto pari al rapporto tra lo spostamento ultimo e quello al limite elastico. Al variare del tipo di distribuzione di carico e della modalità di applicazione dello stesso, si distinguono diversi tipi di analisi push-over. In particolare, tale analisi può condursi a *"controllo di forze"* applicando al sistema una distribuzione di azioni orizzontali equivalenti alle azioni inerziali indotte dal sisma o a *"controllo di spostamenti"* applicando al sistema una distribuzione di spostamenti coerenti con la deformata dello stesso in campo elasto-plastico.

In entrambi i metodi, i carichi applicati sono incrementati in maniera tale da aumentare monotonamente lo spostamento di un nodo di controllo della struttura, generalmente scelto in sommità della stessa, e si basano sull'assunzione che il comportamento dinamico della struttura sia governato dalla prima forma modale e che la stessa si mantenga inalterata fino al raggiungimento delle condizioni ultime.

L'approccio tradizionale alla base delle correnti normative sia a livello europeo che nazionale [ATC40, 1997; SEAOC, 1995; CEN 1995; OPCM, 2003; Norme Tecniche per le Costruzioni, 2005] prevede generalmente l'applicazione di *analisi push-over a controllo di forze*, considerando due distribuzioni delle forze orizzontali, una proporzionale al prodotto delle masse per la deformata corrispondente alla prima forma modale e l'altra proporzionale alle masse.

La necessità di condurre due analisi statiche non lineari risiede nel fatto che, con la distribuzione di forze proporzionale alla prima forma modale si coglie il comportamento di strutture che presentono meccanismi di collasso di tipo globale mentre, con la distribuzione di forze proporzionale alle masse è possibile cogliere eventuali meccanismi di collasso che coinvolgono singoli piani.

Tale modalità di analisi può condurre a risultati fortemente approssimati nel caso di strutture irregolari o alte, nelle quali i modi di vibrare superiori al primo diventano significativi o il danno indotto dall'azione sismica modifica significativamente nel tempo i modi di vibrare della struttura. In questi casi è necessario utilizzare metodologie di analisi push-over più sofisticate in grado di tener conto dell'effettivo modo di danneggiarsi della struttura durante il moto sismico. Una modalità di analisi push-over più accurata è quella che si basa su procedure di tipo "evolutivo" o "adattivo", in cui la distribuzione delle forze applicate varia in funzione della deformata istantanea, e quindi della richiesta di plasticità del sistema.

In particolare, l'uso dei metodi push-over di tipo "adattivo" è raccomandato per gli edifici esistenti non regolari ed in cui non è possibile assumere che siano stati adottati principi di gerarchia delle resistenze e di duttilità rimandando alla estesa letteratura esistente per gli approfondimenti del caso.

02. Procedura per l'Analisi Statica non Lineare descritta nell'Ord. 3274/03 e successive modificazioni

La metodologia per l'applicazione dell'analisi statica non lineare contenuta nell'Ord. N. 3274/03 si basa sul metodo N2 (Fajfar P. [1996], "The N2 method for the sesmic damage analysis of rc buildings", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 25, 1996) ed è di seguito descritta:

1. *Analisi push-over per la definizione del legame forza-spostamento generalizzato tra risultante delle forze applicate e spostamento di un punto di controllo del sistema*:
   Scelto un punto significativo della struttura (punto di controllo), generalmente coincidente con il baricentro dell'ultimo piano, le distribuzioni di forza come sopra descritto vengono amplificate, mantenendo invariati i rapporti relativi tra le stesse, in modo da far crescere monotonamente lo spostamento orizzontale del punto di controllo fino al raggiungimento del collasso della struttura. Risultato dell'analisi è la curva non lineare taglio alla base Fb – spostamento del punto di controllo dc che rappresenta la curva di capacità della struttura.

2. *Determinazione delle caratteristiche di un sistema ad un grado di libertà a comportamento bi-lineare equivalente:*
   Calcolato il vettore Φ corrispondente al primo modo di vibrare, normalizzato rispetto allo spostamento del punto di controllo scelto, si calcola il coefficiente di partecipazione Γ associato alla prima forma modale:

$$\Gamma = \frac{\Sigma m_i \cdot \Phi_i}{\Sigma m_i \cdot \Phi_i^{\,2}}$$

In campo elastico la forza **F*** e lo spostamento **d*** del sistema equivalente ad un grado di libertà sono legati alle corrispondenti grandezze dell'edificio dalle relazioni:

$$F^* = \frac{F_b}{\Gamma}$$

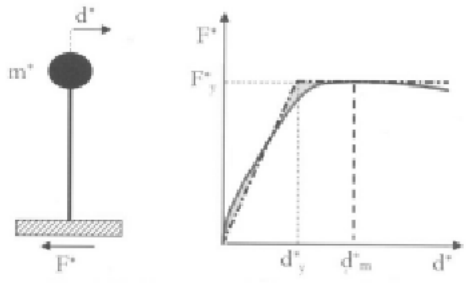
$$d^* = \frac{d_c}{\Gamma}$$

Individuato sulla curva di capacità il valore della resistenza massima **Fbu**, le coordinate del punto di snervamento del sistema bilineare equivalente sono:

$$F_y^* = \frac{F_{bu}}{\Gamma}$$

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

dove **k*** è la rigidezza secante del sistema equivalente. La rigidezza viene determinata graficamente costruendo la curva bilineare, fissando la resistenza pari al valore massimo del taglio alla base raggiunto nell'analisi push-over (**Fy*** uguale a **Fbu**), e fissando lo spostamento al limite elastico **dy*** in modo tale da eguagliare le aree comprese tra la curva push-over ed il diagramma stesso come di seguito illustrato.



Nota la curva caratteristica del sistema equivalente ad un solo grado di libertà, il suo periodo proprio elastico risulta essere pari a:

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

dove la massa **m*** del sistema equivalente rappresenta la massa generalizzata associata alla prima forma modale ed è data da:

$$m^* = \Sigma_i m_i \cdot \Phi_i$$

3. *Determinazione della risposta massima in spostamento del sistema equivalente con utilizzo dello spettro di risposta elastico:*

Nel caso in cui il sistema equivalente ad un solo grado di libertà abbia periodo proprio **T*** sufficientemente elevato (**T*≥Tc**), il massimo spostamento raggiunto dal sistema elasto-plastico può essere assunto pari a quello di un sistema elastico di pari periodo:

$$d^*_{max} = d_{e,max} = S_{de}(T^*)$$

essendo **SDe** lo spettro di risposta elastico in spostamento:

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

Se invece il sistema equivalente ad un solo grado di libertà ha periodo proprio T*<Tc, la risposta in spostamento del sistema elasto-plastico può essere valutato come indicato al punto 4.5.4.4 delle norme tecniche allegate all'Ord. 3274/03 e successive modificazioni:

$$d^*_{max} = \frac{d_{e,max}}{q^*}\left[1 + (q^* - 1)\frac{T_c}{T^*}\right] \geq d_{e,max}$$

essendo **q*** il rapporto tra la forza di risposta elastica (prodotto dello spettro di risposta

elastico **Se(T*)** e la massa **m*)** e la forza di snervamento del sistema equivalente **(F*y)**:

$$q^* = \frac{S_e(T^*) \cdot m^*}{F_y^*}$$

Nel caso in cui **q* < 1** si assume:

$$d_{max}^* = d_{e,max}$$

4. *Conversione dello spostamento del sistema equivalente nella configurazione deformata della struttura e verifica:*

Noto **d*max** , il massimo spostamento del sistema equivalente ad un grado di libertà, è possibile calcolare lo spostamento effettivo del punto di controllo dell'edificio attraverso la seguente equazione:

$$d_{max} = \Gamma_1 \cdot d_{max}^*$$

e quindi verificare che durante l'analisi sia stato raggiunto un valore di spostamento **dc** almeno pari a **dmax**.

Noto lo spostamento del nodo di controllo si conosce dall'analisi la configurazione deformata ed è quindi possibile eseguire la verifica dell'edificio, controllando la compatibilità degli spostamenti con quelli degli elementi che presentano un comportamento duttile e delle resistenze in quegli elementi che presentano un comportamento fragile.

03. Criteri di verifica.

Per la verifica degli edifici di interesse strategico e di quelli che possono assumere rilevanza in relazione alle conseguenze di un eventuale collasso è necessario riferirsi oltre che alle norme tecniche allegate all'OPCM 3274/03 e successive modificazioni anche al DPCM 21.10.03 "Disposizione attuative dell'art.2, commi 2, 3 e 4, dell'OPCM n°3274 del 20/03/03" che prevede tre livelli di conoscenza e verifica (Livello 0, Livello 1 e Livello 2) e all'O.P.C.M 3362 08/07/04 come di seguito descritto.

Livello di Conoscenza e Verifica	*Obiettivo*	*Tipologie delle costruzioni*
Livello 0	Acquisizione di dati sommari secondo le schede adeguatamente predisposte dalla Regione.	Tutte le costruzioni
Livello 1	Verifica puntuale degli edifici secondo quanto previsto dalle norme tecniche aggiornate di cui all'OPCM 3274/03	Strutture regolari. Ad esclusione delle categorie di suolo S1 e S2 ed degli edifici realizzati in prossimità di dirupi, creste o su corpi franosi
Livello 2		Strutture non regolari e condizioni di sito non favorevoli

Il DPCM 21.10.03 "Disposizione attuative dell'art.2, commi 2, 3 e 4, dell'OPCM n°3274 del 20/03/03" dispone che le verifiche siano condotte confrontando le massime accelerazioni al suolo che conducono agli Stati Limite di Collasso (**CO**), Danno Severo (**DS**) e Danno Limitato (**DL**) con quelle che definiscono gli spettri per i quali è necessario verificare i suddetti Stati Limite.
In considerazione del livello di Conoscenza e Verifica è necessario assicurare i seguenti Livelli di Conoscenza:

Livello di Conoscenza e Verifica	*Livello di Conoscenza richiesto*	*Caratterizzazione del sito*	*Metodi di analisi*
L1	Qualsiasi	Anche da studi ed indagini esistenti	Statica Lineare Dinamica Modale
L2	LC2 o LC3	Prove in situ	Statica Lineare Dinamica Modale Statica non Lineare

Nel caso di livello di conoscenza e verifica L2, l'analisi statica lineare e quella dinamica modale sono consentiti solo quando il rapporto domanda/capacità per i singoli elementi strutturali è uniforme (punto 11.2.5.4 delle norme tecniche allegate all'Ordinanza 3274/03 e successive modificazioni) ed i meccanismi di collasso fragile sono impediti.
L'obbligo di procedere ad un livello di conoscenza e verifica L2 comporta la necessità di procedere ad effettuare comunque le verifiche L1 almeno con analisi lineari.

L'Ordinanza O.P.C.M. 3362 del 08/07/2004 introduce i seguenti indicatori di rischio che pongono a confronto le accelerazioni che producono lo stato limite considerato con quelle rispetto alle quali tale stato limite deve essere soddisfatto:

$$\alpha_u = \frac{PGA_{CO}}{PGA_{2\%}}$$

ovvero in alternativa:

$$\alpha_u = \frac{PGA_{DS}}{PGA_{10\%}} \text{ e } \alpha_e = \frac{PGA_{DL}}{PGA_{50\%}}$$

dove

- **PGA_{CO}** =accelerazione stimata di collasso della struttura;
- **PGA_{DS}** =accelerazione stimata di danno severo;
- **PGA_{DL}** =accelerazione stimata di danno limitato;
- **$PGA_{2\%}$** =accelerazione al suolo attesa con probabilità di occorrenza del 2% in 50 anni;
- **$PGA_{10\%}$** =accelerazione al suolo attesa con probabilità di occorrenza del 10% in 50 anni;
- **$PGA_{50\%}$** =accelerazione al suolo attesa con probabilità di occorrenza del 50% in 50 anni.

Il parametro α_u è considerato un indicatore del rischio di collasso, mentre il parametro α_e è considerato un indicatore del rischio di inagibilità dell'opera. Valori prossimi o superiori all'unità caratterizzano i casi in cui in cui il livello di rischio è prossimo a quello definito dalle norme, mentre valori bassi, prossimi a zero caratterizzano casi ad elevato rischio.

Nel caso di opere con conseguenze rilevanti in caso di collasso è necessario valutare α_u , nel caso di opere di interesse strategico il valore minimo tra α_e e α_u.

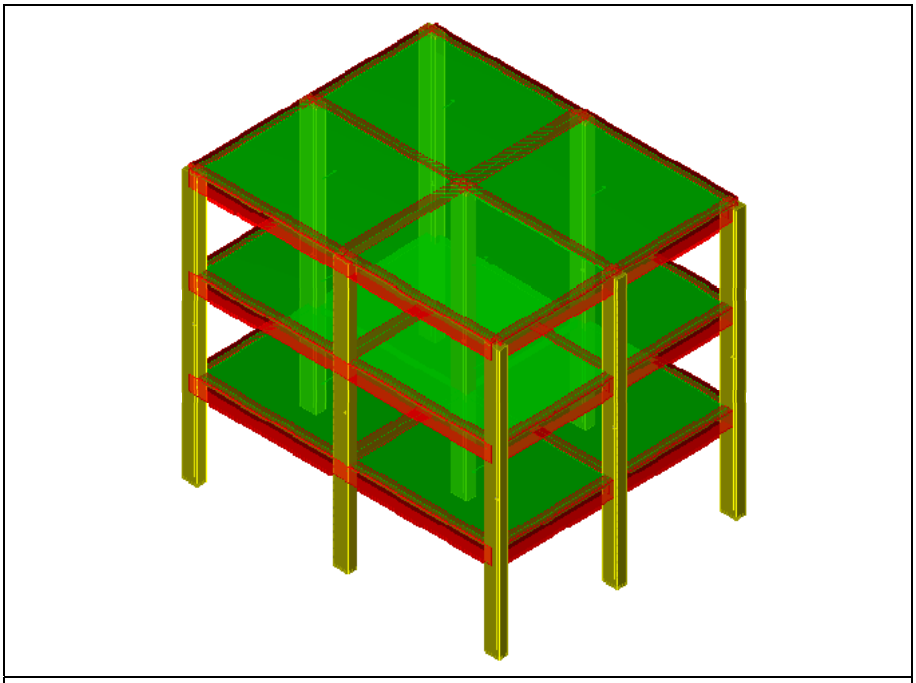
Tali indicatori di danno si valutano in considerazione dell'accelerazione massima orizzontale al suolo che determina il raggiungimento degli stati limite considerati.

In particolare, per lo stato limite di Collasso è necessario valutare l'accelerazione al suolo che comporta il raggiungimento della rotazione ultima (θ_u) in uno degli elementi che costituiscono la struttura.

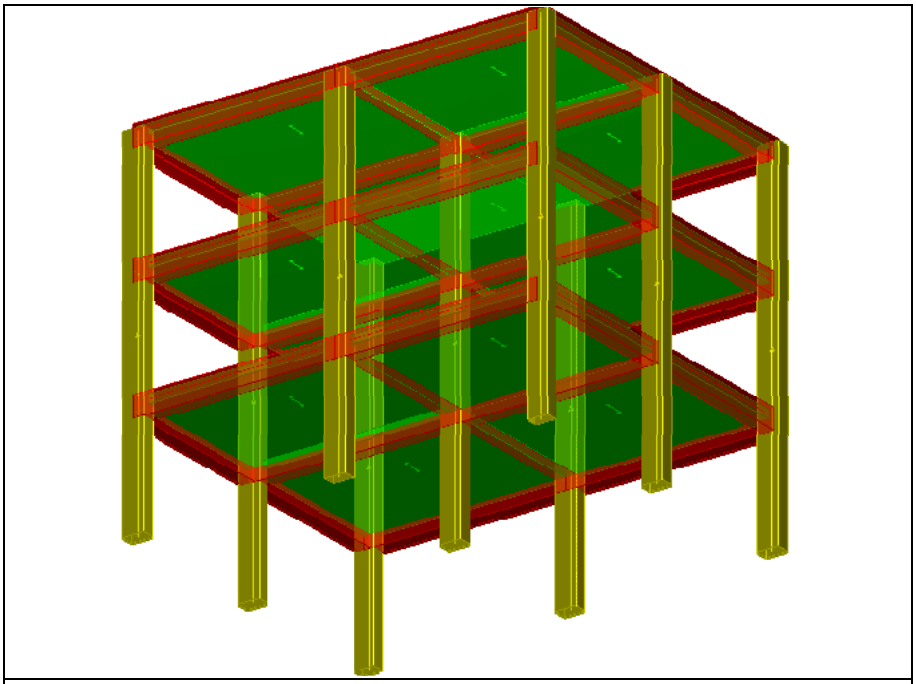
Per la verifica dello stato limite di Danno Severo si valuta l'accelerazione al suolo che comporta, invece, il raggiungimento della resistenza massima ovvero la rotazione massima ammissibile ($0{,}75\,\theta_u$) per tale stato limite in un elemento strutturale.

Infine, per la verifica allo stato limite di Danno Limitato si valuta l'accelerazione al suolo che comporta il raggiungimento del limite massimo per gli spostamenti relativi di piano ovvero la rotazione al limite elastico (θ_y) in un elemento della struttura.

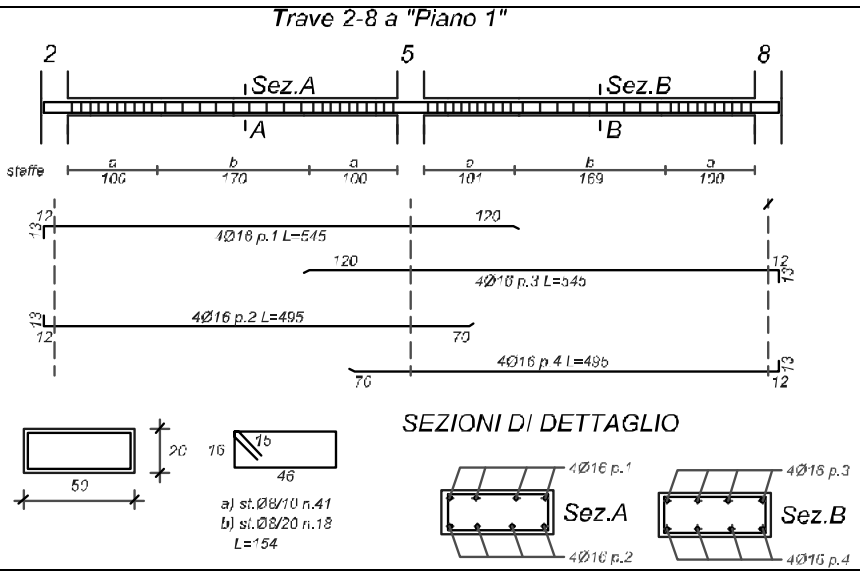
Dati del telaio 3D



Modello – Vista 1



Modello – Vista 2

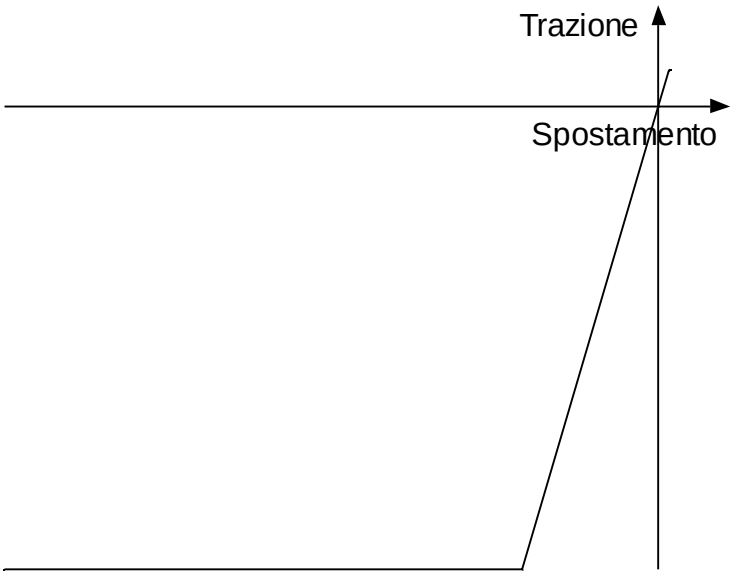


Armatura Travi

Dati generali

Materiali

Descrizione	Rck	E	Gamma	Poisson	G	Alfa
RCK250	250	285000	0.0025	0.1	129545.58	0.00001



Armature

Descrizione	fyk	Sigma amm.	Tipo	Classe barre	E	Gamma	Poisson	G	Alfa
FeB 44 k aderenza migliorata	4300	2550	Aderenza migliorata	B	2060000	0.00785	0.3	7.92E05	0.000012

Caratteristiche inerziali sezioni in c.a.

Descrizione	Xg	Yg	Area	Jx	Jy	Jxy	Jm	Jn	Jt	Alfa
R 30*50	15	25	1500	312500	112500	0	312500	112500	279900	0
R 50*30	25	15	1500	112500	312500	0	112500	312500	279900	0
R 50*20	25	10	1000	3.33E4	2.08E5	0	3.33E4	2.08E5	9.97E4	0

Analisi

Metodo di analisi	Ordinanza 3431 statica non lineare (pushover)	
Zona sismica	Zona 2 ag/g = 0,25	
Categoria di importanza	III	
Edificio in cemento armato	Si	
Tipologia delle strutture in c.a.	Strutture a telaio qo=4,5*alfau/alfa1	
alfau/alfa1	1.3	
Regolarità in elevazione	Si	
Regolarità in pianta	Si	
Smorzamento viscoso equivalente (%)	5	
Applicazione dello smorzamento viscoso agli spettri di progetto	Si	
Categoria del suolo	A	
S per sisma orizzontale	1	
Tb per sisma orizzontale	0.15	[s]
Tc per sisma orizzontale	0.4	[s]
Td per sisma orizzontale	2	[s]
Amplificazione topografica	1	
Fattore di struttura orizzontale	1	
Fattore di struttura verticale	1	
Curva di capacità per spostamento di risposta	Raggiungimento labilità	
Sistema forze sismiche	Da analisi statica lineare	
Numero frequenze	9	

Preferenze di analisi non lineare

Metodo iterativo	Secante
Tolleranza iterazione	0.0001
Numero massimo iterazioni	50
Fattore di confinamento per aste in c.a.	1.2
Deformabilità a taglio delle aste nel modello inelastico	si

Analisi statica non lineare (valori in daN,cm)

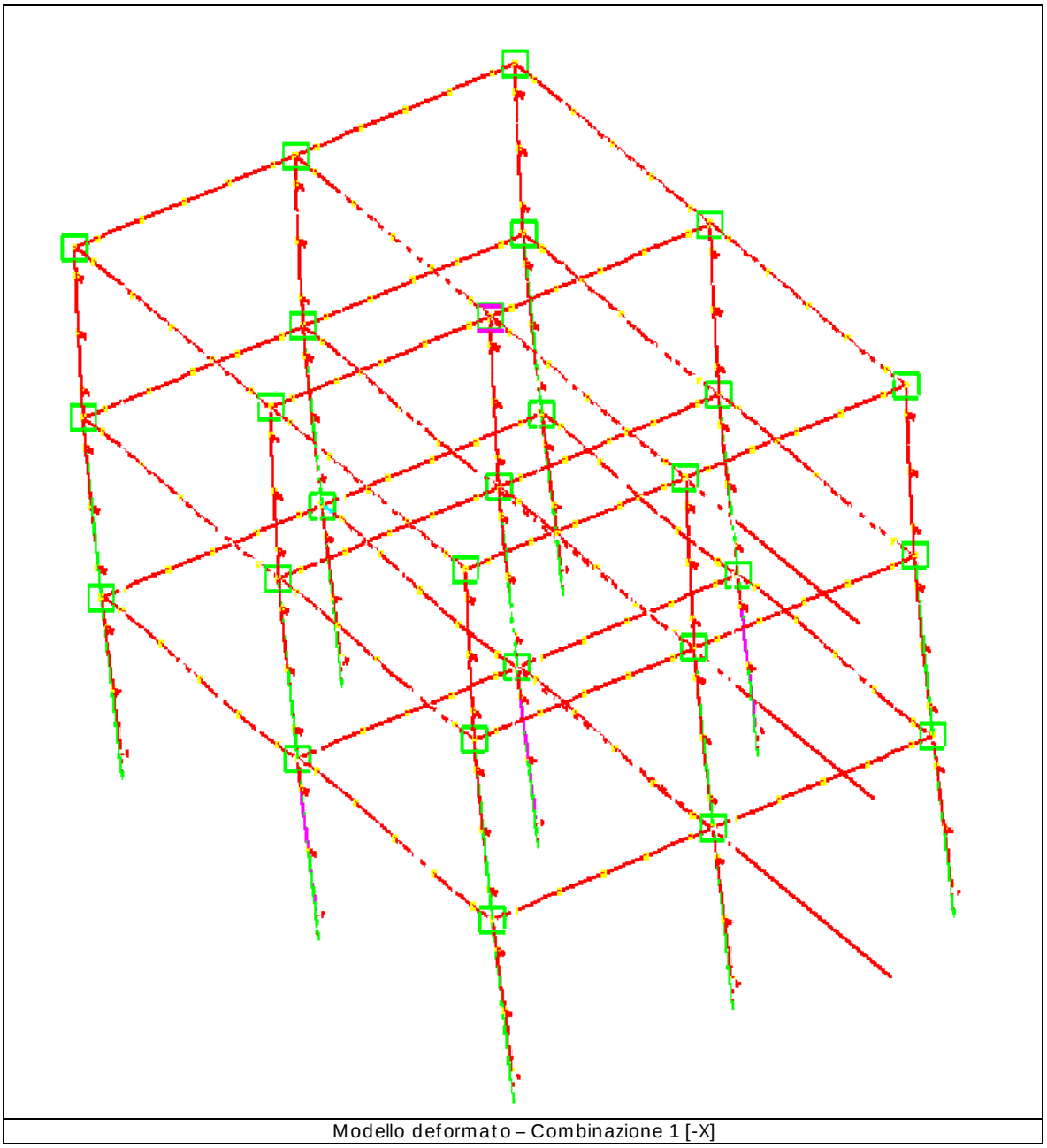
Coordinate del punto di controllo x=500,0 y=400,0 z=900,0 (nodo 3)

Tagliante elastico in direzione X 112642,7

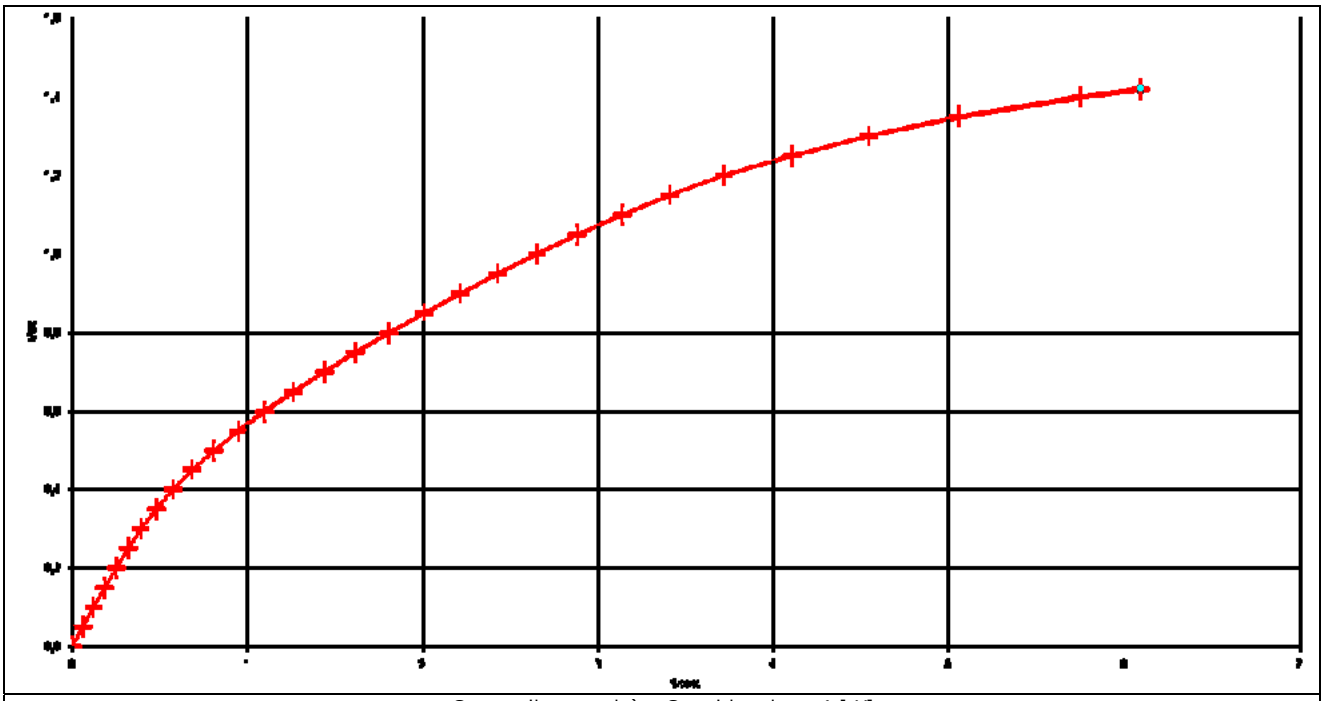
Tagliante elastico in direzione Y 112642,7

Le forze proporzionali al prodotto delle masse per gli autovettori sono ricavate dalla analisi statica lineare.

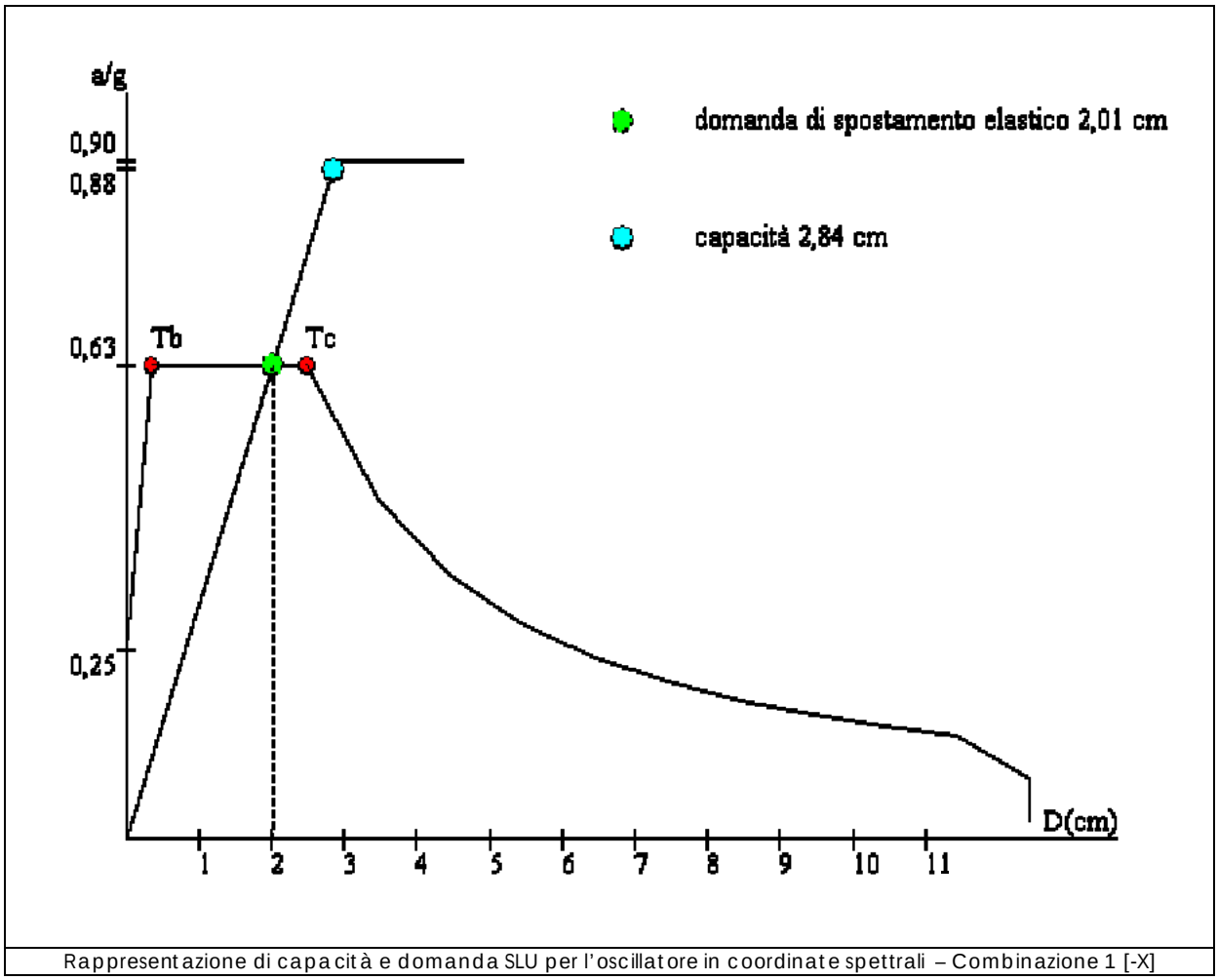
Modello con forze proporzionali alle masse- combinazione n. 1 [-X]



Modello deformato – Combinazione 1 [-X]



Curva di capacità – Combinazione 1 [-X]



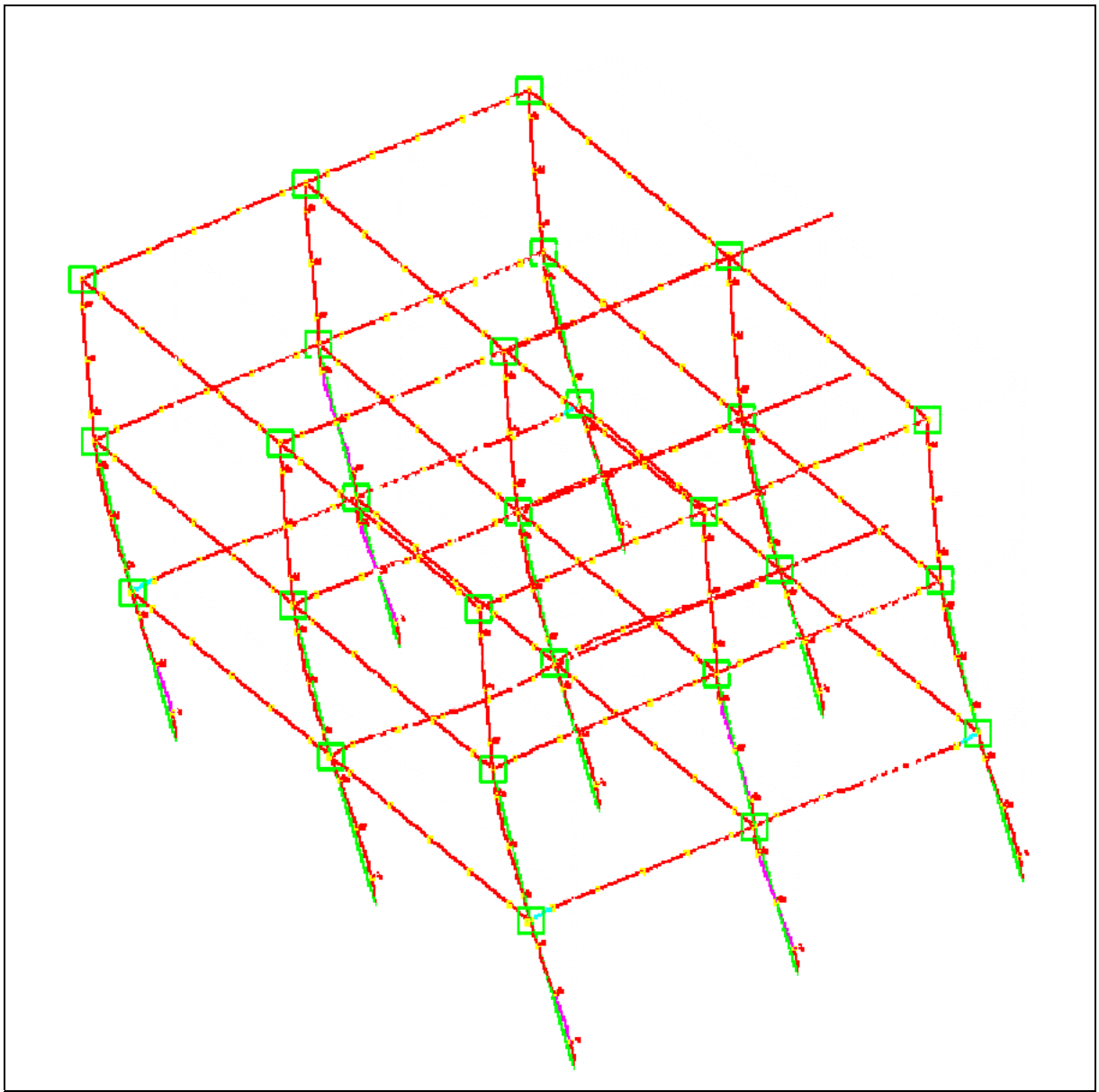
Rappresentazione di capacità e domanda SLU per l'oscillatore in coordinate spettrali – Combinazione 1 [-X]

Somma(Mi*Fi)	139,5 (daN*s^2/cm)
Coefficiente di partecipazione	1,306
Periodo di vibrazione dell'oscillatore bilineare equivalente	0,360 s
K* (rigidezza dell'oscillatore bilineare)	42509,844 daN/cm
Fbu	159952,688 daN
Q* SLU	0,698
Spostamento di risposta SLU	2,628
Capacità di spostamento SLU	3,715
Moltiplicatore delle forze che produce lo spostamento di risposta SLU	0,995
Q* SLD	0,279
Spostamento di risposta SLD	1,051
Capacità di spostamento SLD	1,808
Moltiplicatore delle forze che produce lo spostamento di risposta SLD	0,585
Massima accelerazione al suolo SLU	0,353*g
Massima accelerazione al suolo SLD	0,172*g

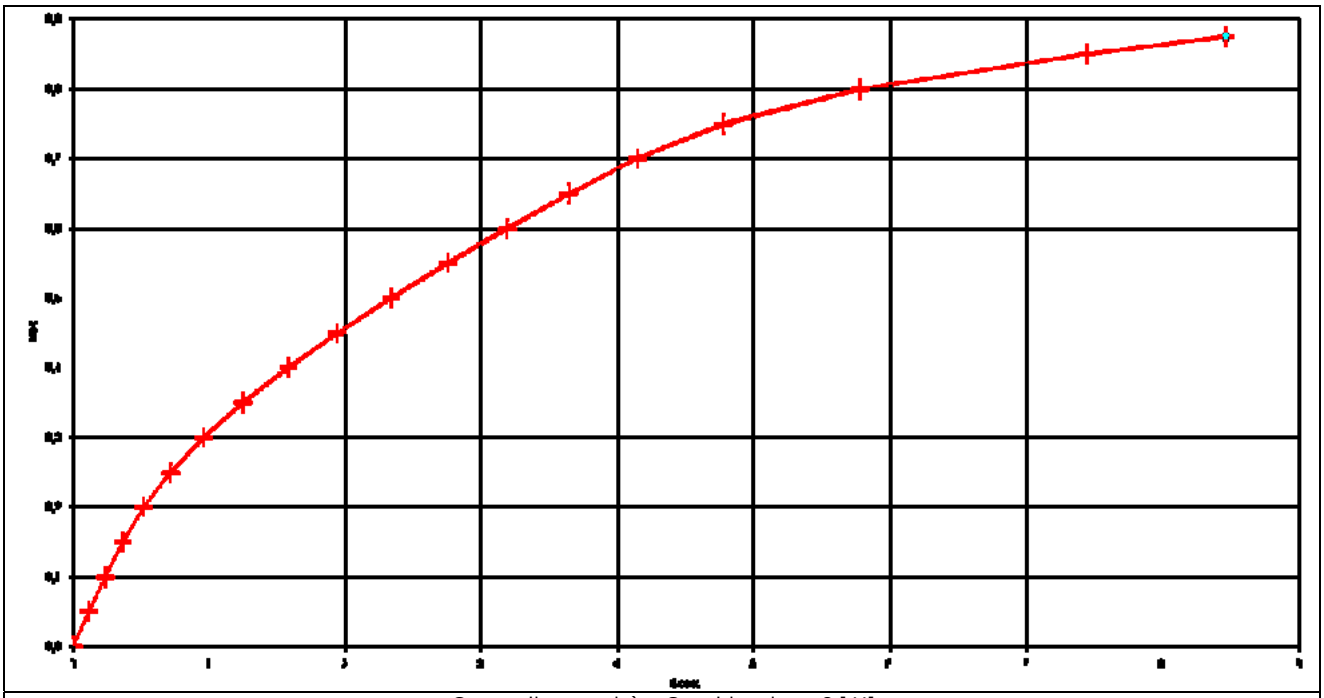
Capacità in termini di spostamento e vulnerabilità per i vari stati limite

Rotazione alla corda SLCO 6,092cm	ag/g 0,577
Rotazione alla corda SLU 5,058cm	ag/g 0,481
Rotazione alla corda SLD 1,808cm	ag/g 0,172
Rottura a taglio di aste in c.a. 3,715cm	ag/g 0,352
Rottura dei nodi di telai in c.a. 6,092cm	ag/g 0,577
Superamento dello spostamento di interpiano 3,715cm	ag/g 0,353

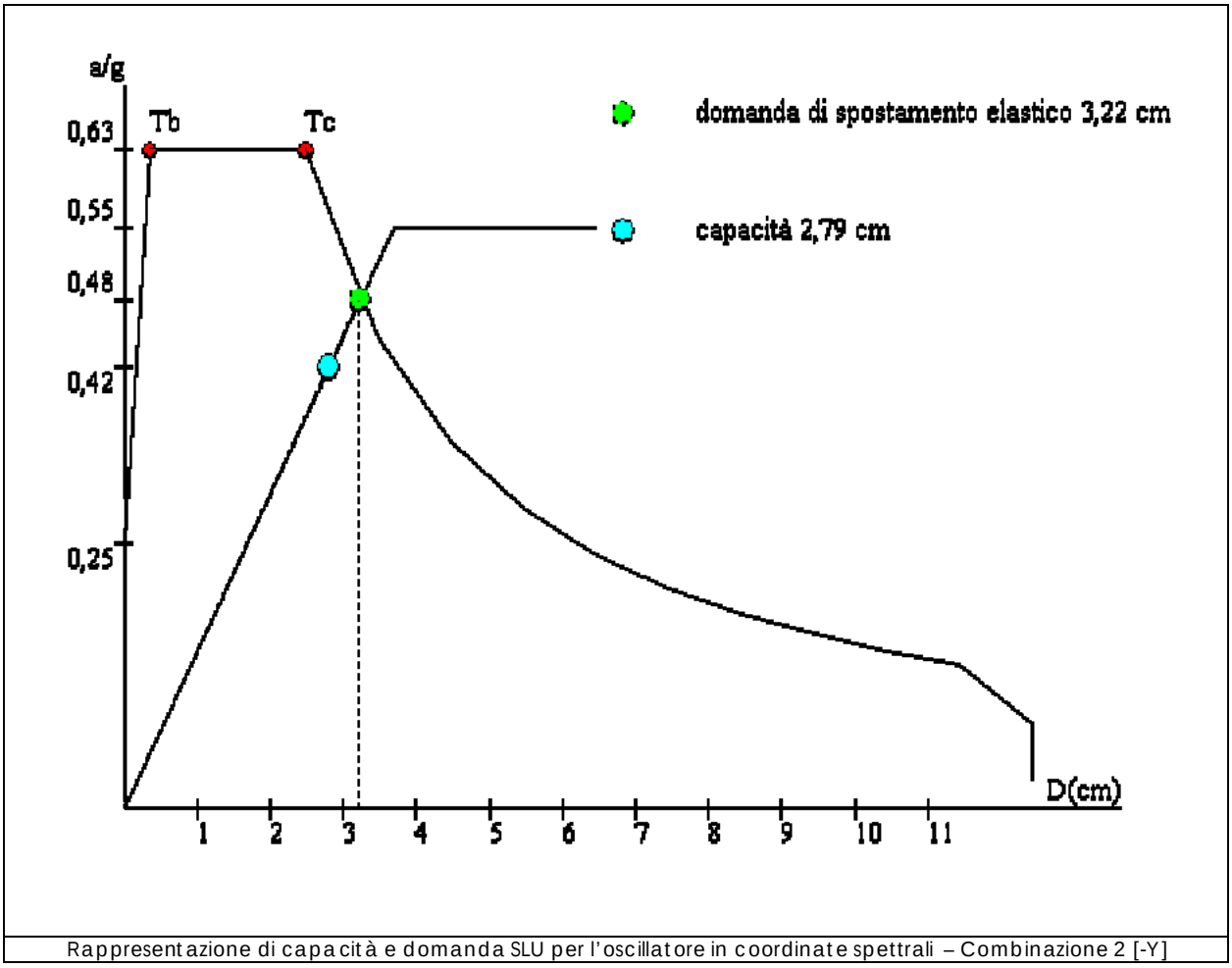
Modello con forze proporzionali alle masse- combinazione n. 2 [-Y]



Modello deformato – Combinazione 2 [-Y]



Curva di capacità – Combinazione 2 [-Y]



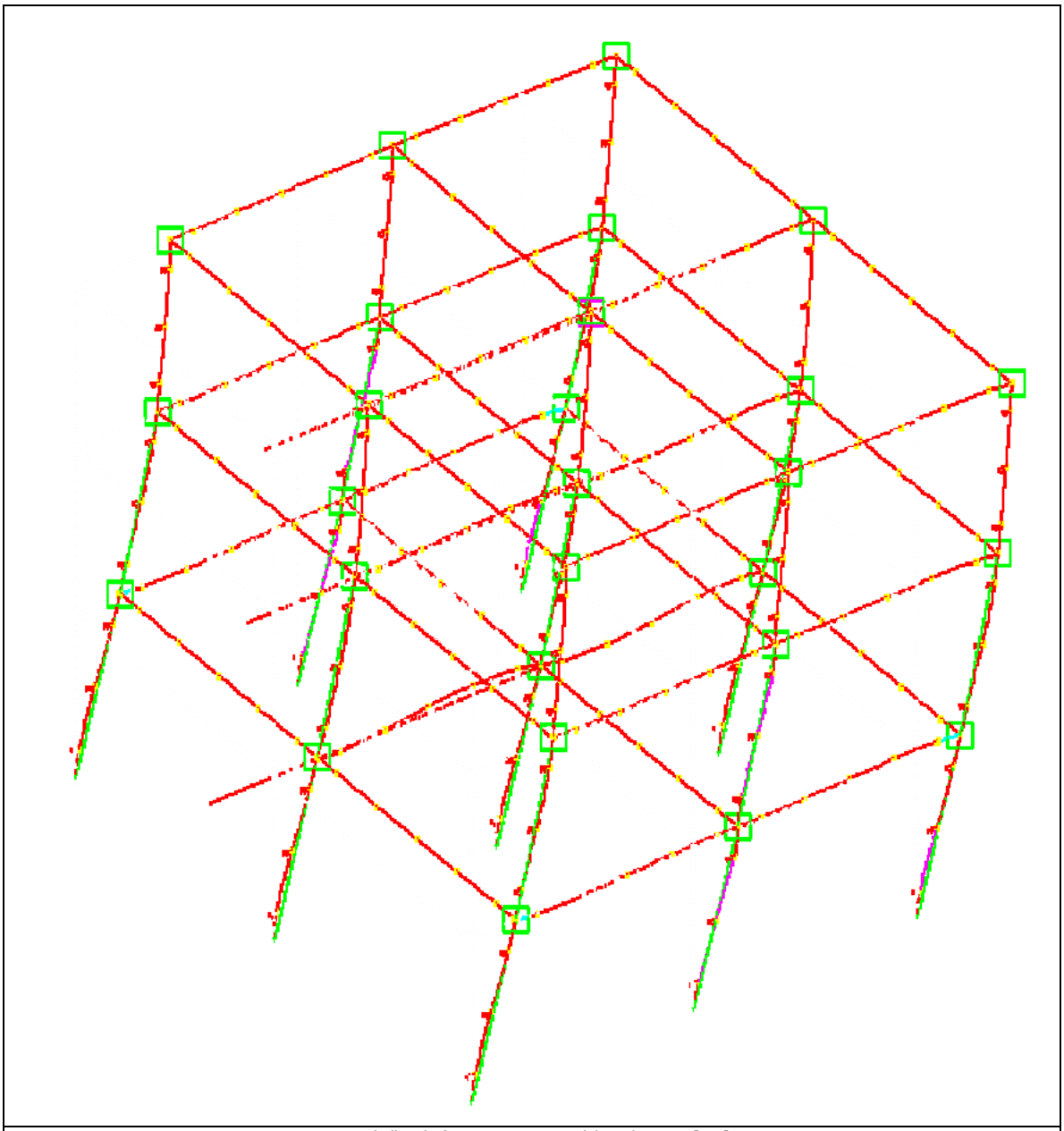
Rappresentazione di capacità e domanda SLU per l'oscillatore in coordinate spettrali – Combinazione 2 [-Y]

Somma(Mi*Fi)	139,5 (daN*s^2/cm)
Coefficiente di partecipazione	1,306
Periodo di vibrazione dell'oscillatore bilineare equivalente	0,518 s
K* (rigidezza dell'oscillatore bilineare)	20521,387 daN/cm
Fbu	98562,398 daN
Q* SLU	0,875
Spostamento di risposta SLU	4,203
Capacità di spostamento SLU	3,647
Moltiplicatore delle forze che produce lo spostamento di risposta SLU	0,705
Q* SLD	0,350
Spostamento di risposta SLD	1,681
Capacità di spostamento SLD	3,189
Moltiplicatore delle forze che produce lo spostamento di risposta SLD	0,414
Massima accelerazione al suolo SLU	0,217*g
Massima accelerazione al suolo SLD	0,190*g

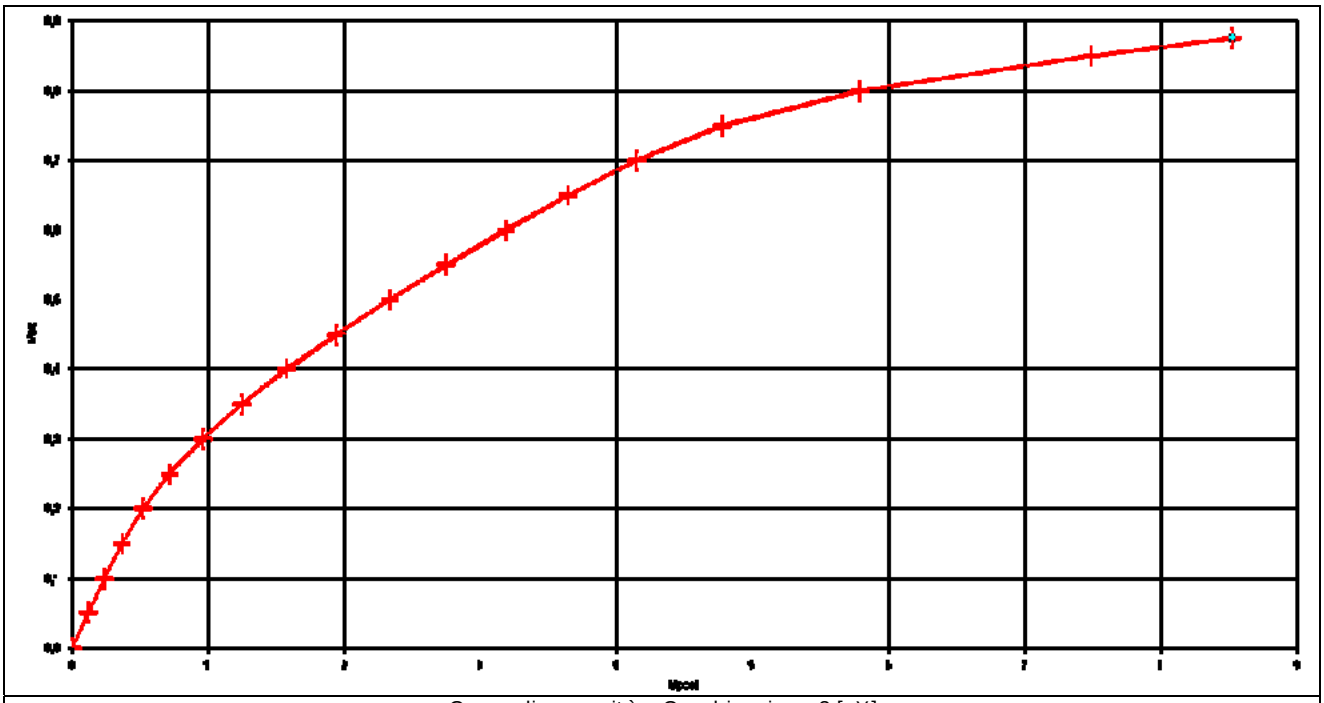
Capacità in termini di spostamento e vulnerabilità per i vari stati limite

Rotazione alla corda SLCO 8,464cm	ag/g 0,503
Rotazione alla corda SLU 8,464cm	ag/g 0,503
Rotazione alla corda SLD 7,443cm	ag/g 0,443
Rottura a taglio di aste in c.a. 3,647cm	ag/g 0,217
Rottura dei nodi di telai in c.a. 8,464cm	ag/g 0,503
Superamento dello spostamento di interpiano 3,189cm	ag/g 0,190

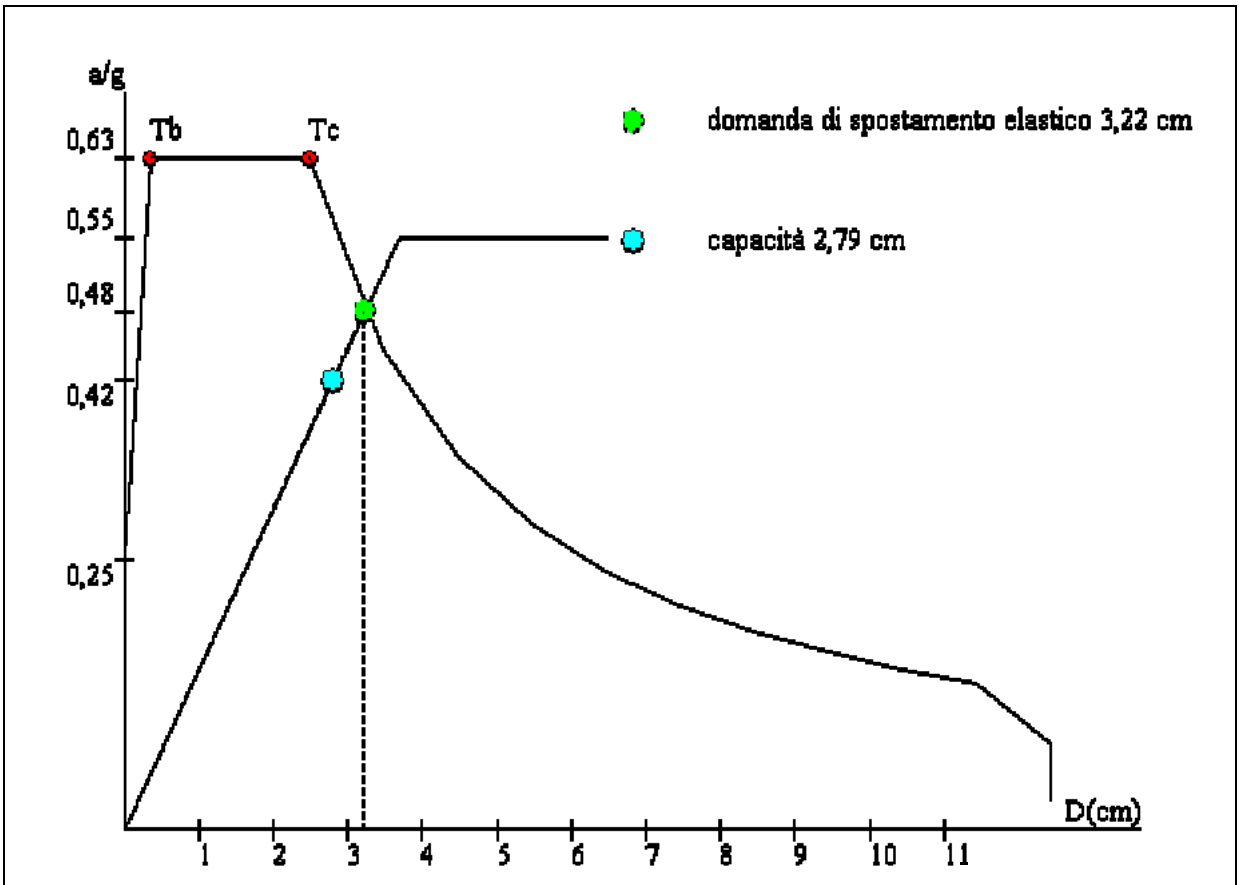
Modello con forze proporzionali alle masse- combinazione n. 3 [+Y]



Modello deformato – Combinazione 3 [+Y]



Curva di capacità – Combinazione 3 [+Y]



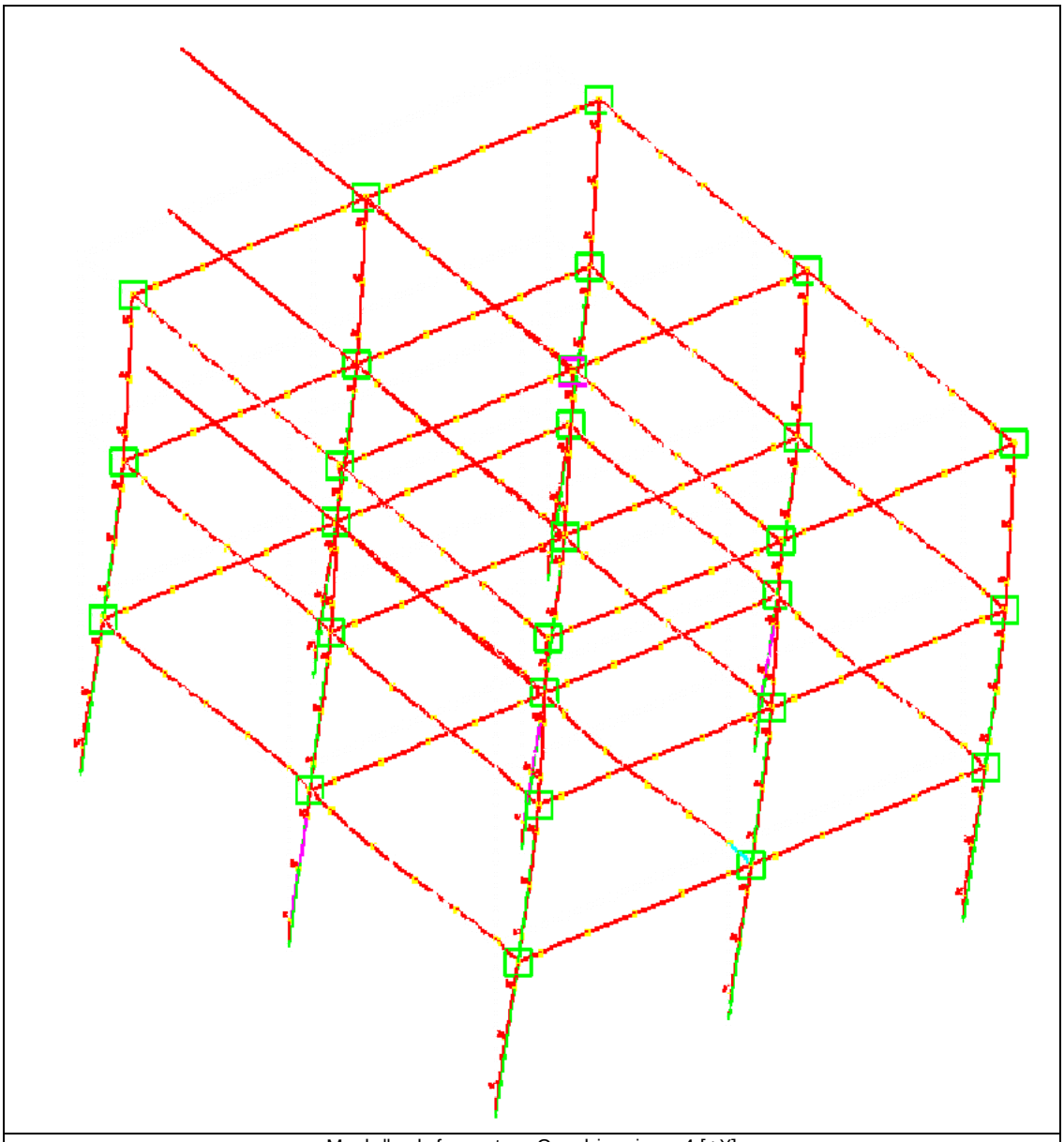
Rappresentazione di capacità e domanda SLU per l'oscillatore in coordinate spettrali – Combinazione 3 [+Y]

Somma(Mi*Fi)	139,5 (daN*s^2/cm)
Coefficiente di partecipazione	1,306
Periodo di vibrazione dell'oscillatore bilineare equivalente	0,518 s
K* (rigidezza dell'oscillatore bilineare)	20502,973 daN/cm
Fbu	98562,398 daN
Q* SLU	0,875
Spostamento di risposta SLU	4,204
Capacità di spostamento SLU	3,645
Moltiplicatore delle forze che produce lo spostamento di risposta SLU	0,705
Q* SLD	0,350
Spostamento di risposta SLD	1,682
Capacità di spostamento SLD	3,187
Moltiplicatore delle forze che produce lo spostamento di risposta SLD	0,414
Massima accelerazione al suolo SLU	0,217*g
Massima accelerazione al suolo SLD	0,190*g

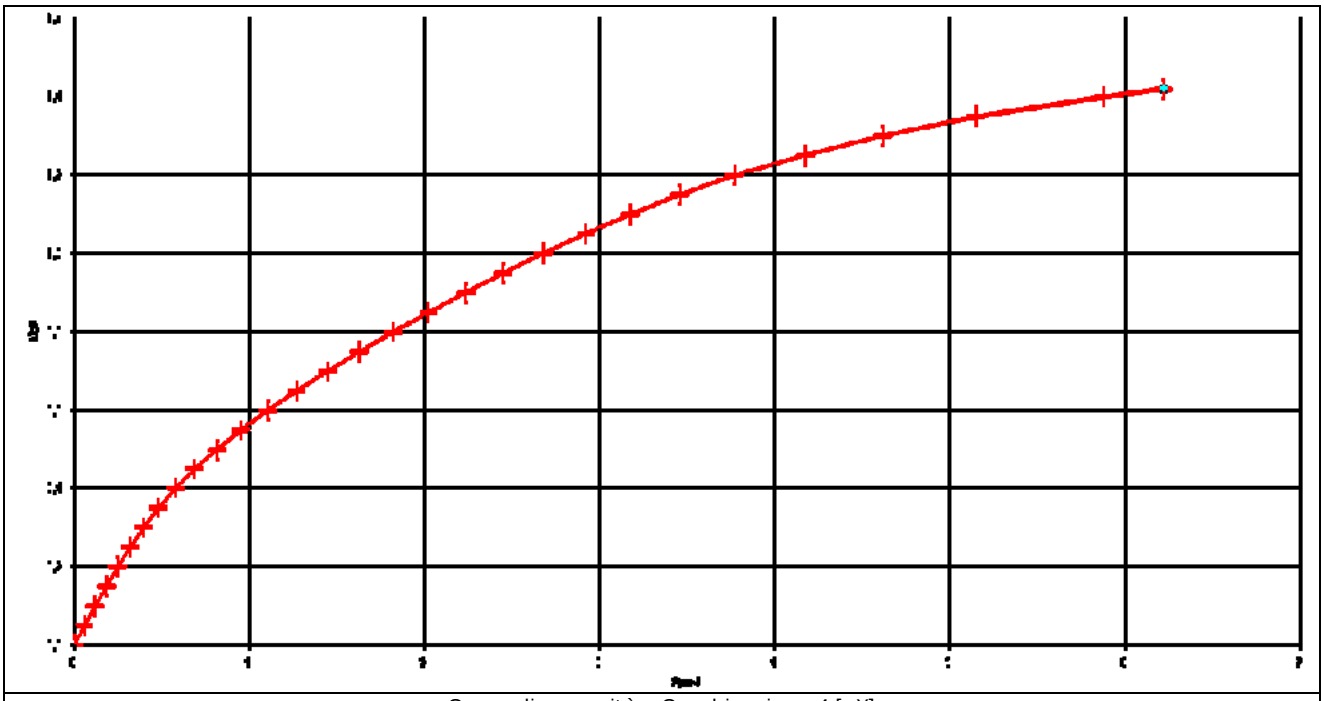
Capacità in termini di spostamento e vulnerabilità per i vari stati limite

Rotazione alla corda SLCO 8,520cm	ag/g 0,507
Rotazione alla corda SLU 8,520cm	ag/g 0,507
Rotazione alla corda SLD 7,488cm	ag/g 0,445
Rottura a taglio di aste in c.a. 3,645cm	ag/g 0,217
Rottura dei nodi di telai in c.a. 8,520cm	ag/g 0,507
Superamento dello spostamento di interpiano 3,187cm	ag/g 0,190

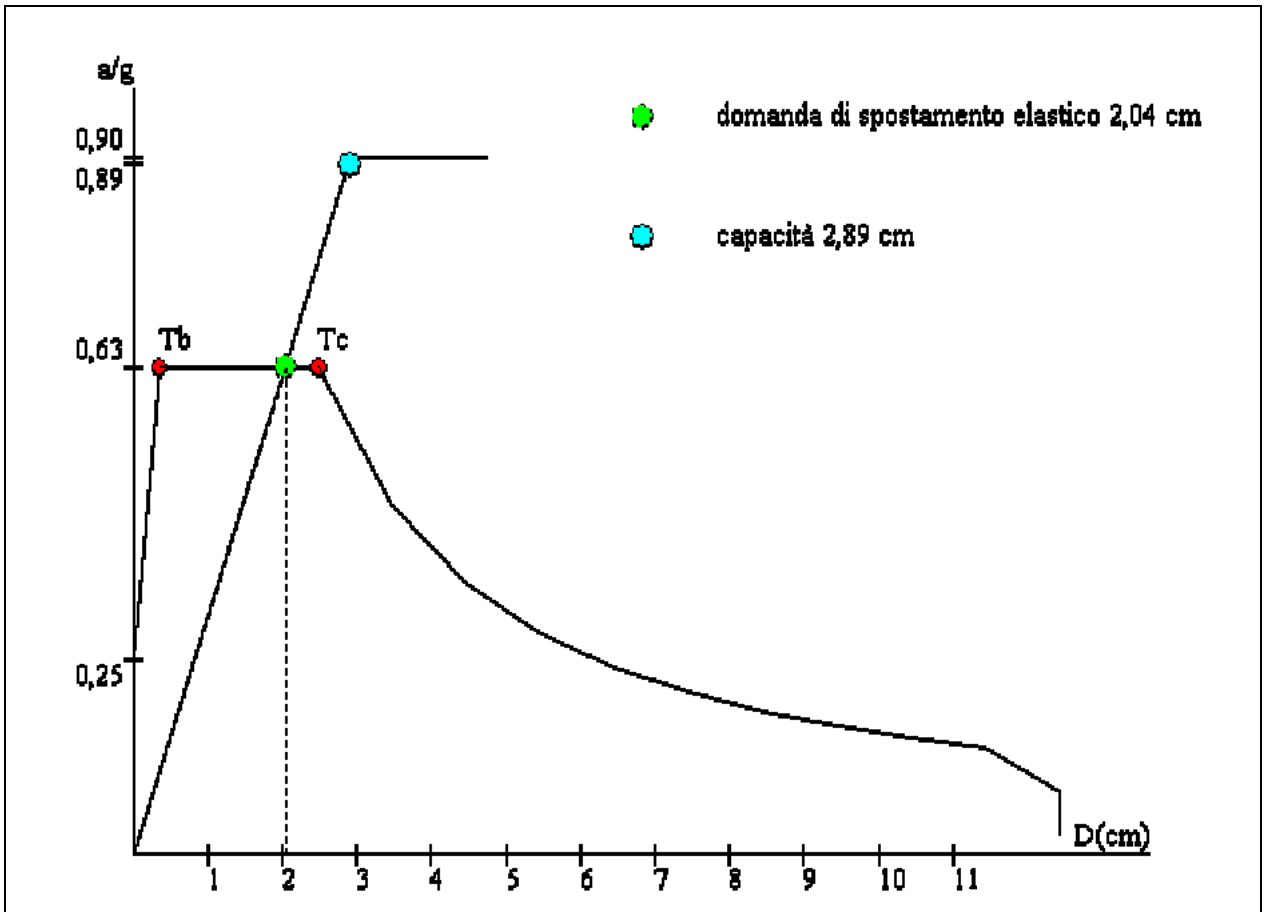
Modello con forze proporzionali alle masse- combinazione n. 4 [+X]



Modello deformato – Combinazione 4 [+X]



Curva di capacità – Combinazione 4 [+X]



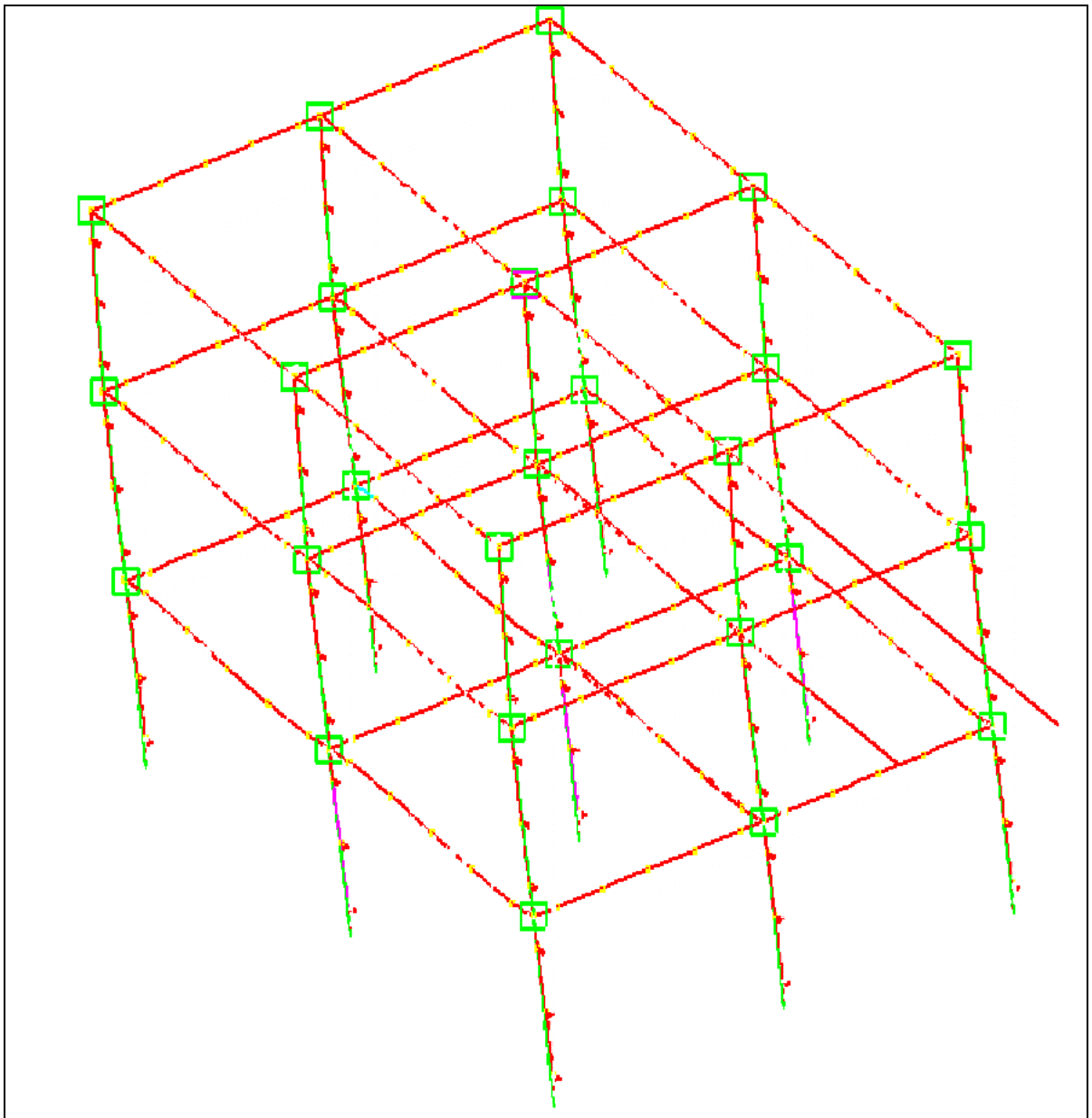
Rappresentazione di capacità e domanda SLU per l'oscillatore in coordinate spettrali – Combinazione 4 [+X]

Somma(Mi*Fi)	139,5 (daN*s^2/cm)
Coefficiente di partecipazione	1,306
Periodo di vibrazione dell'oscillatore bilineare equivalente	0,362 s
K* (rigidezza dell'oscillatore bilineare)	41932,496 daN/cm
Fbu	159952,688 daN
Q* SLU	0,698
Spostamento di risposta SLU	2,664
Capacità di spostamento SLU	3,776
Moltiplicatore delle forze che produce lo spostamento di risposta SLU	0,997
Q* SLD	0,279
Spostamento di risposta SLD	1,065
Capacità di spostamento SLD	1,824
Moltiplicatore delle forze che produce lo spostamento di risposta SLD	0,587
Massima accelerazione al suolo SLU	0,354*g
Massima accelerazione al suolo SLD	0,171*g

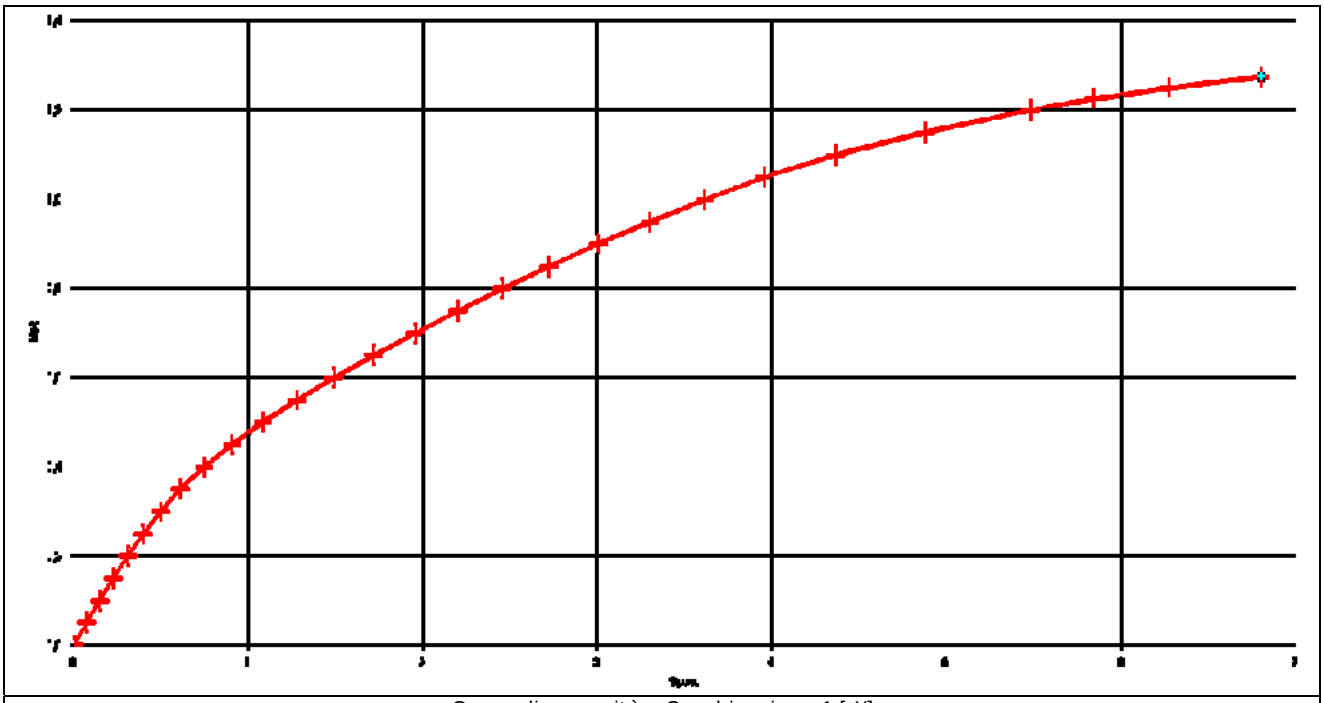
Capacità in termini di spostamento e vulnerabilità per i vari stati limite

Rotazione alla corda SLCO 6,224cm	ag/g 0,581
Rotazione alla corda SLU 4,619cm	ag/g 0,434
Rotazione alla corda SLD 1,824cm	ag/g 0,171
Rottura a taglio di aste in c.a. 3,776cm	ag/g 0,353
Rottura dei nodi di telai in c.a. 6,224cm	ag/g 0,581
Superamento dello spostamento di interpiano 3,458cm	ag/g 0,325

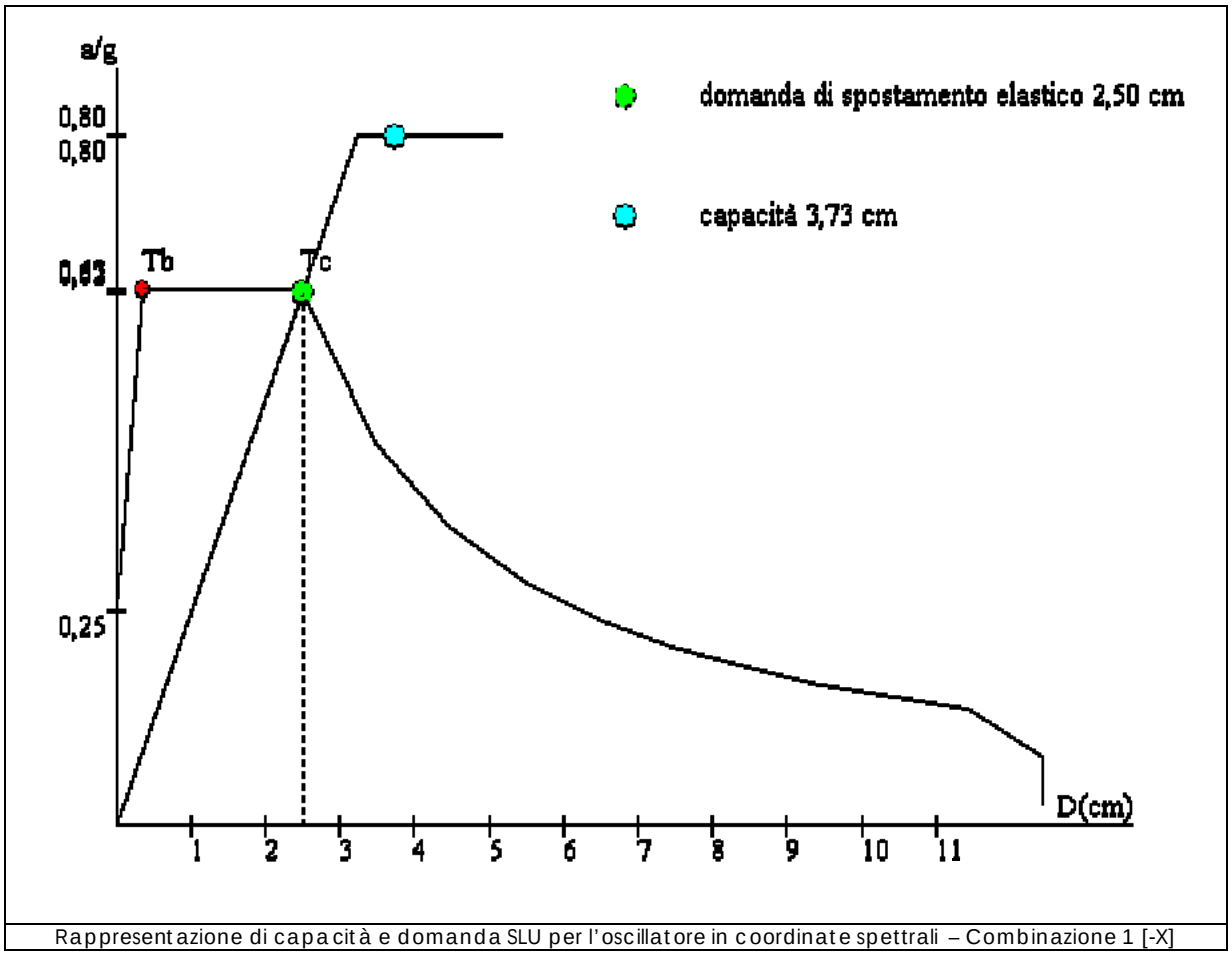
Modello con forze proporzionali agli autovettori - combinazione n. 1 [-X]



Modello deformato – Combinazione 1 [-X]



Curva di capacità – Combinazione 1 [-X]



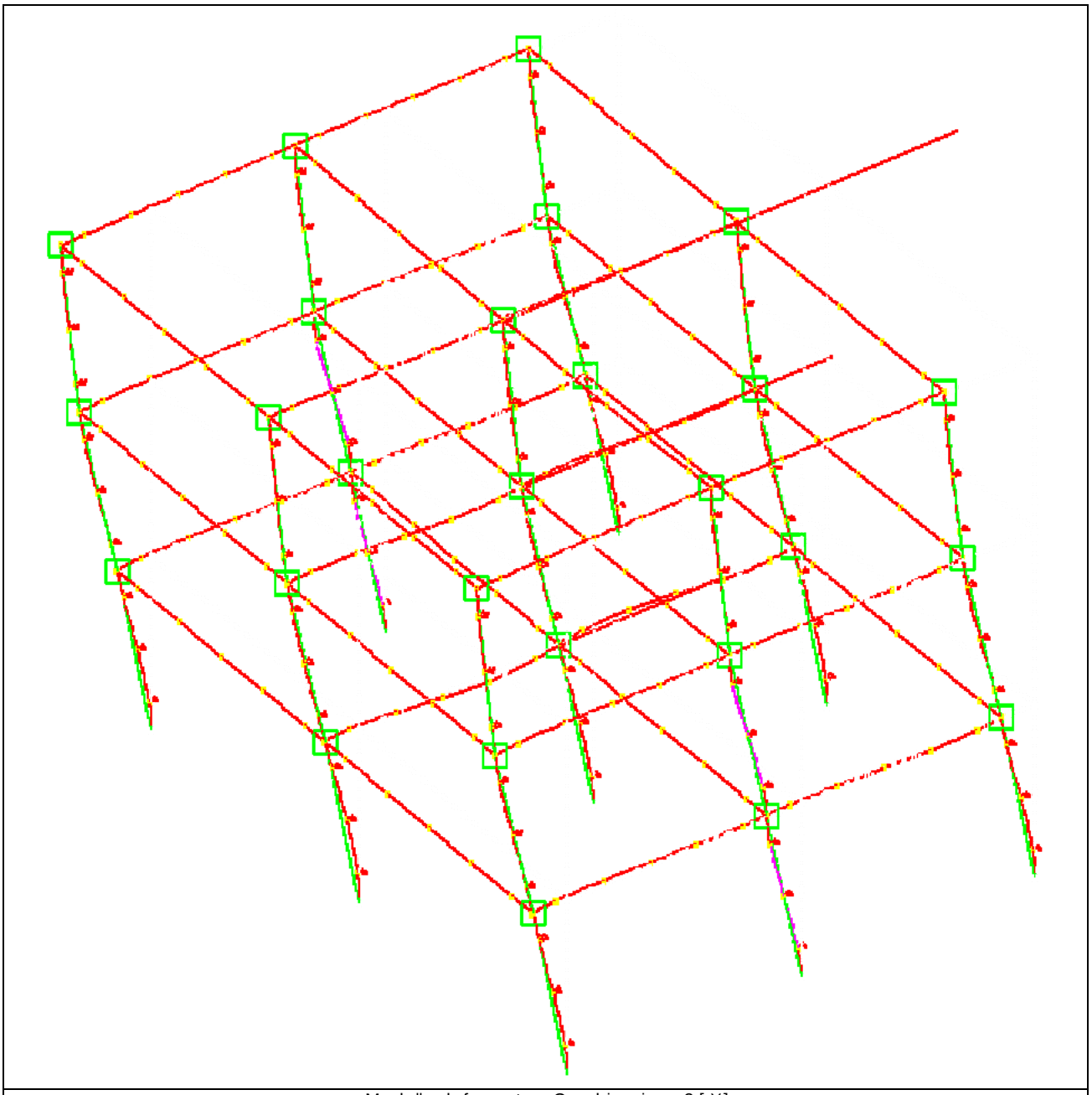
Rappresentazione di capacità e domanda SLU per l'oscillatore in coordinate spettrali – Combinazione 1 [-X]

Somma(Mi*Fi)	139,5 (daN*s^2/cm)
Coefficiente di partecipazione	1,306
Periodo di vibrazione dell'oscillatore bilineare equivalente	0,402 s
K* (rigidezza dell'oscillatore bilineare)	34021,027 daN/cm
Fbu	143619,500 daN
Q* SLU	0,773
Spostamento di risposta SLU	3,264
Capacità di spostamento SLU	4,877
Moltiplicatore delle forze che produce lo spostamento di risposta SLU	0,944
Q* SLD	0,309
Spostamento di risposta SLD	1,306
Capacità di spostamento SLD	1,957
Moltiplicatore delle forze che produce lo spostamento di risposta SLD	0,556
Massima accelerazione al suolo SLU	0,374*g
Massima accelerazione al suolo SLD	0,150*g

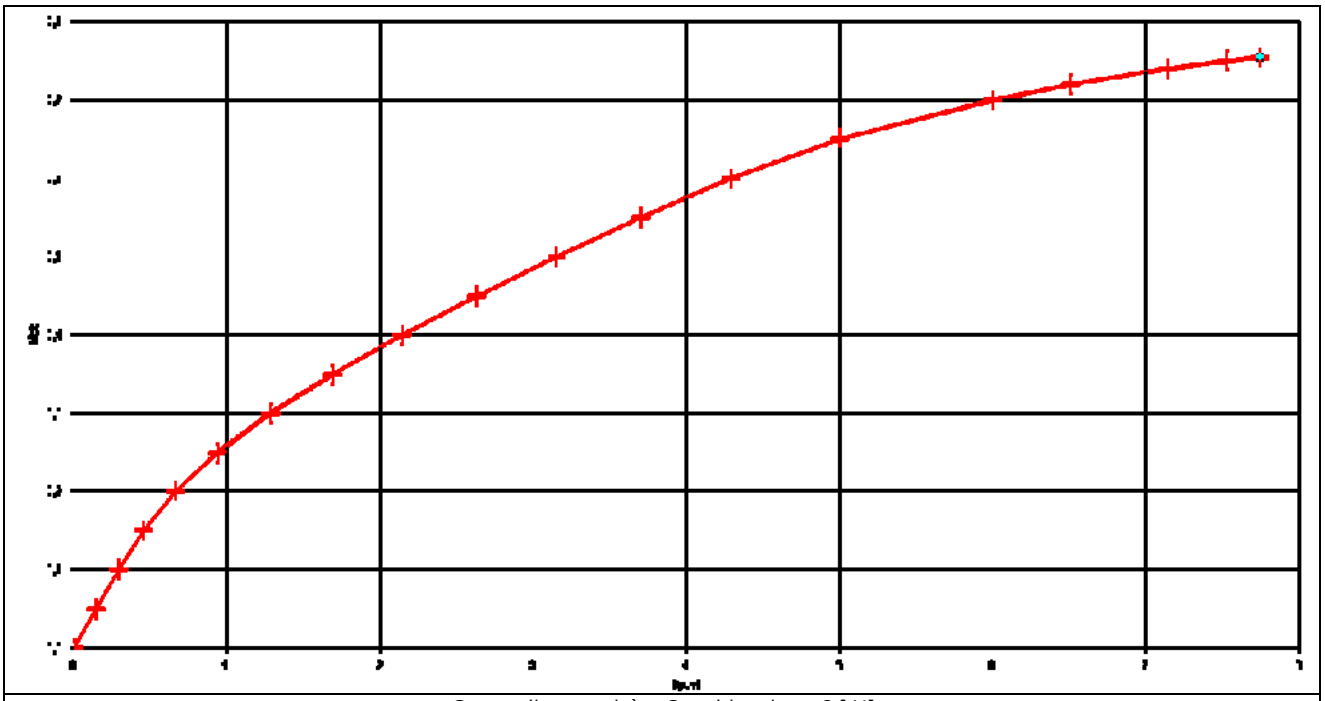
Capacità in termini di spostamento e vulnerabilità per i vari stati limite

Rotazione alla corda SLCO 6,798cm	ag/g 0,521
Rotazione alla corda SLU 4,877cm	ag/g 0,374
Rotazione alla corda SLD 1,957cm	ag/g 0,150
Rottura a taglio di aste in c.a. 4,877cm	ag/g 0,374
Rottura dei nodi di telai in c.a. 6,798cm	ag/g 0,521
Superamento dello spostamento di interpiano 3,617cm	ag/g 0,277

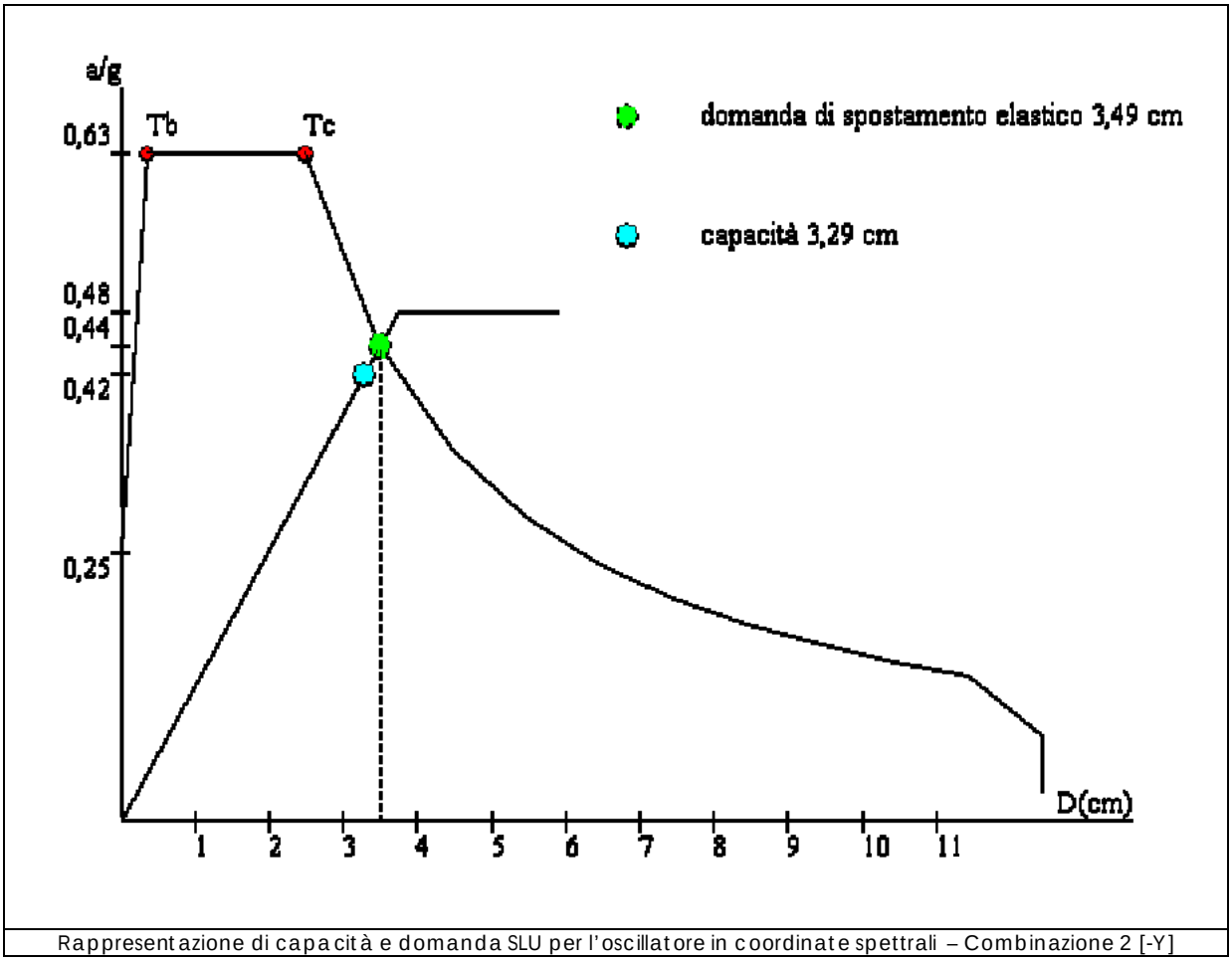
Modello con forze proporzionali agli autovettori - combinazione n. 2 [-Y]



Modello deformato – Combinazione 2 [-Y]



Curva di capacità – Combinazione 2 [-Y]



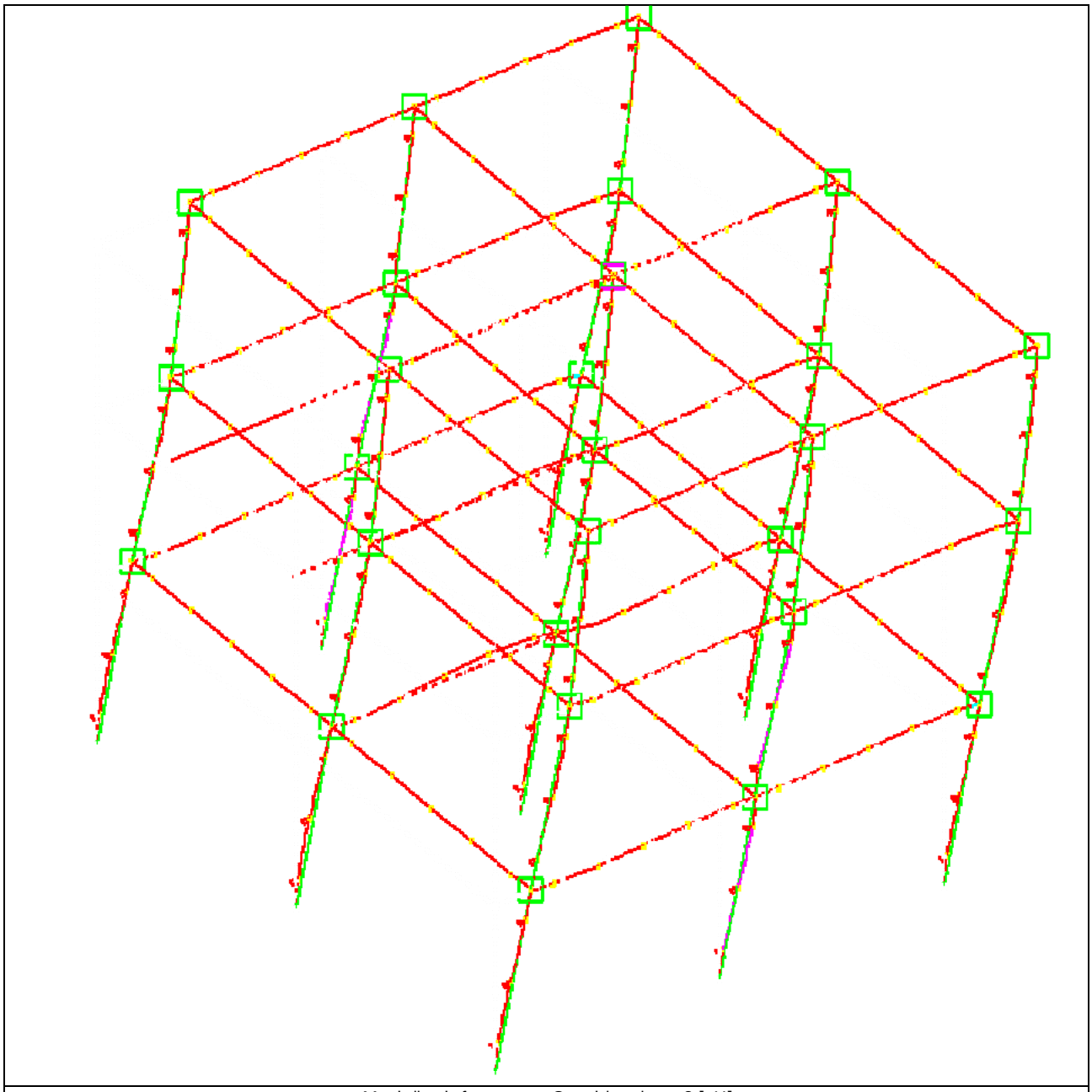
Rappresentazione di capacità e domanda SLU per l'oscillatore in coordinate spettrali – Combinazione 2 [-Y]

Somma(Mi*Fi)	139,5 (daN*s^2/cm)
Coefficiente di partecipazione	1,306
Periodo di vibrazione dell'oscillatore bilineare equivalente	0,562 s
K* (rigidezza dell'oscillatore bilineare)	17419,822 daN/cm
Fbu	85045,273 daN
Q* SLU	0,934
Spostamento di risposta SLU	4,561
Capacità di spostamento SLU	4,290
Moltiplicatore delle forze che produce lo spostamento di risposta SLU	0,619
Q* SLD	0,374
Spostamento di risposta SLD	1,825
Capacità di spostamento SLD	3,153
Moltiplicatore delle forze che produce lo spostamento di risposta SLD	0,365
Massima accelerazione al suolo SLU	0,235*g
Massima accelerazione al suolo SLD	0,173*g

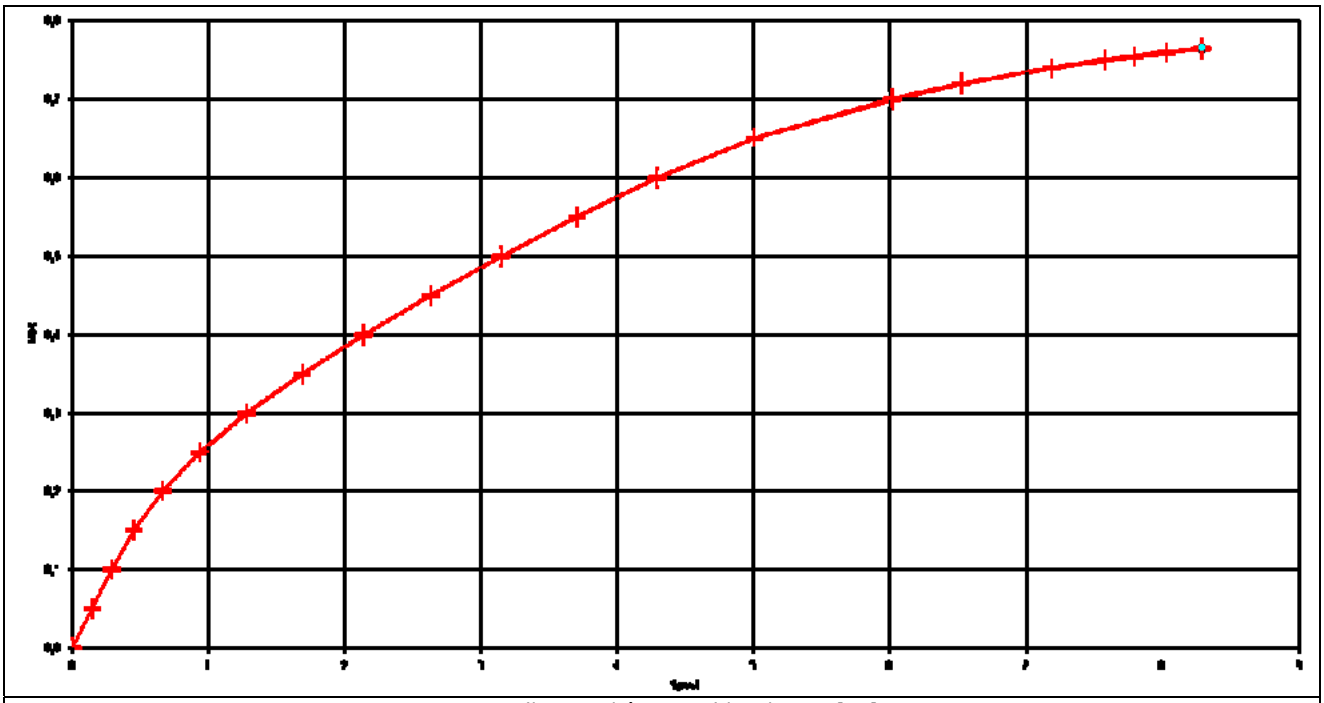
Capacità in termini di spostamento e vulnerabilità per i vari stati limite

Rotazione alla corda SLCO 7,747cm	ag/g 0,425
Rotazione alla corda SLU 7,747cm	ag/g 0,425
Rotazione alla corda SLD 7,747cm	ag/g 0,425
Rottura a taglio di aste in c.a. 4,290cm	ag/g 0,235
Rottura dei nodi di telai in c.a. 7,747cm	ag/g 0,425
Superamento dello spostamento di interpiano 3,153cm	ag/g 0,173

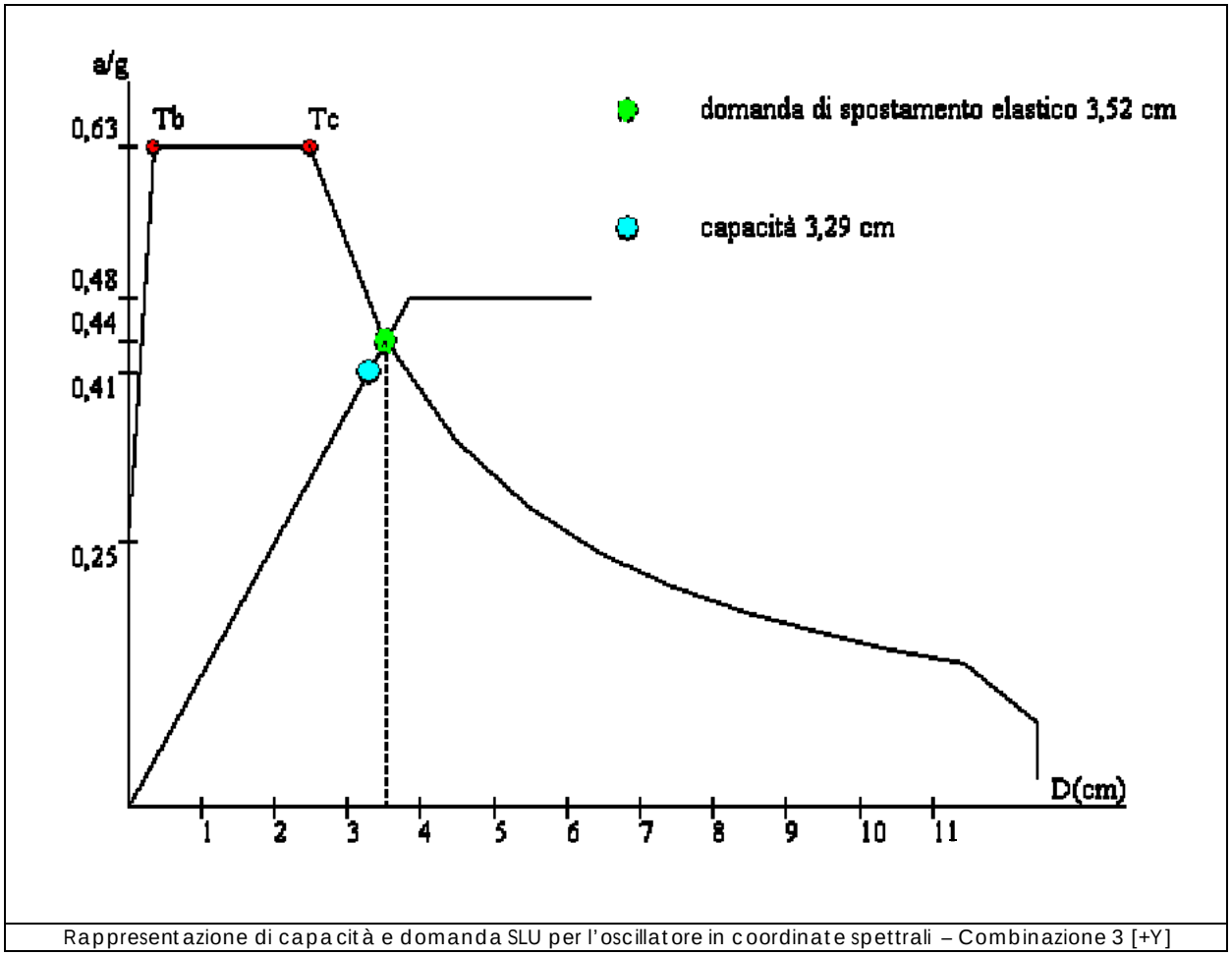
Modello con forze proporzionali agli autovettori - combinazione n. 3 [+Y]



Modello deformato – Combinazione 3 [+Y]



Curva di capacità – Combinazione 3 [+Y]



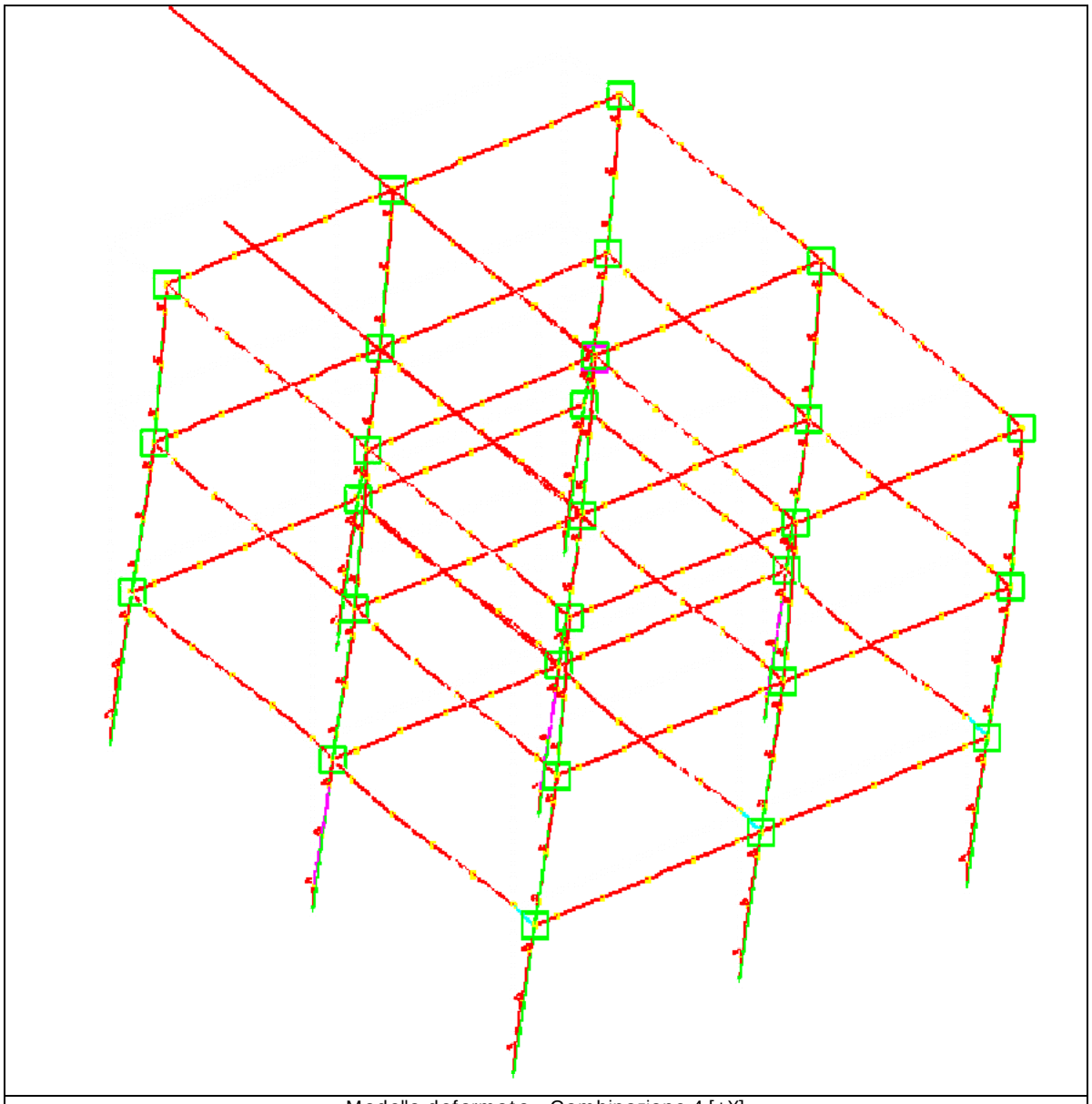
Rappresentazione di capacità e domanda SLU per l'oscillatore in coordinate spettrali – Combinazione 3 [+Y]

Somma(Mi*Fi)	139,5 (daN*s^2/cm)
Coefficiente di partecipazione	1,306
Periodo di vibrazione dell'oscillatore bilineare equivalente	0,567 s
K* (rigidezza dell'oscillatore bilineare)	17127,955 daN/cm
Fbu	86171,695 daN
Q* SLU	0,914
Spostamento di risposta SLU	4,600
Capacità di spostamento SLU	4,293
Moltiplicatore delle forze che produce lo spostamento di risposta SLU	0,622
Q* SLD	0,366
Spostamento di risposta SLD	1,840
Capacità di spostamento SLD	3,151
Moltiplicatore delle forze che produce lo spostamento di risposta SLD	0,367
Massima accelerazione al suolo SLU	0,233*g
Massima accelerazione al suolo SLD	0,171*g

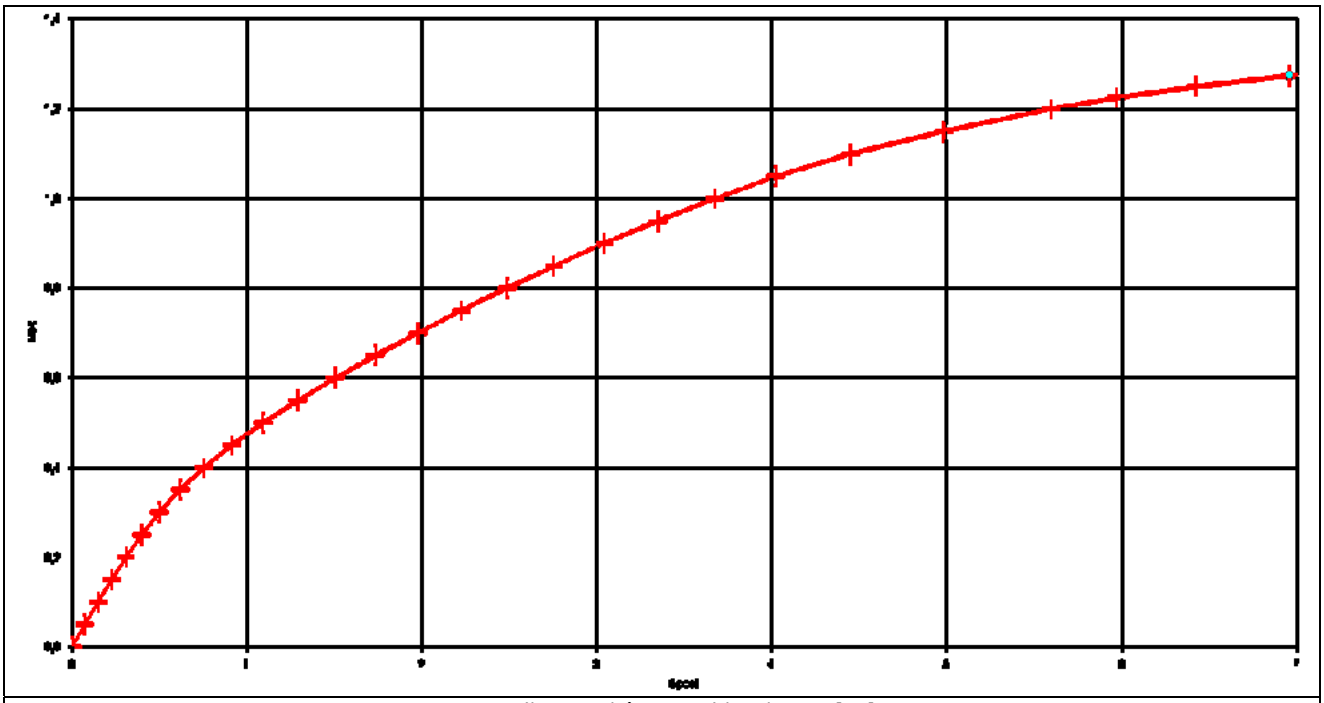
Capacità in termini di spostamento e vulnerabilità per i vari stati limite

Rotazione alla corda SLCO 8,285cm	ag/g 0,450
Rotazione alla corda SLU 8,285cm	ag/g 0,450
Rotazione alla corda SLD 8,285cm	ag/g 0,450
Rottura a taglio di aste in c.a. 4,293cm	ag/g 0,233
Rottura dei nodi di telai in c.a. 8,285cm	ag/g 0,450
Superamento dello spostamento di interpiano 3,151cm	ag/g 0,171

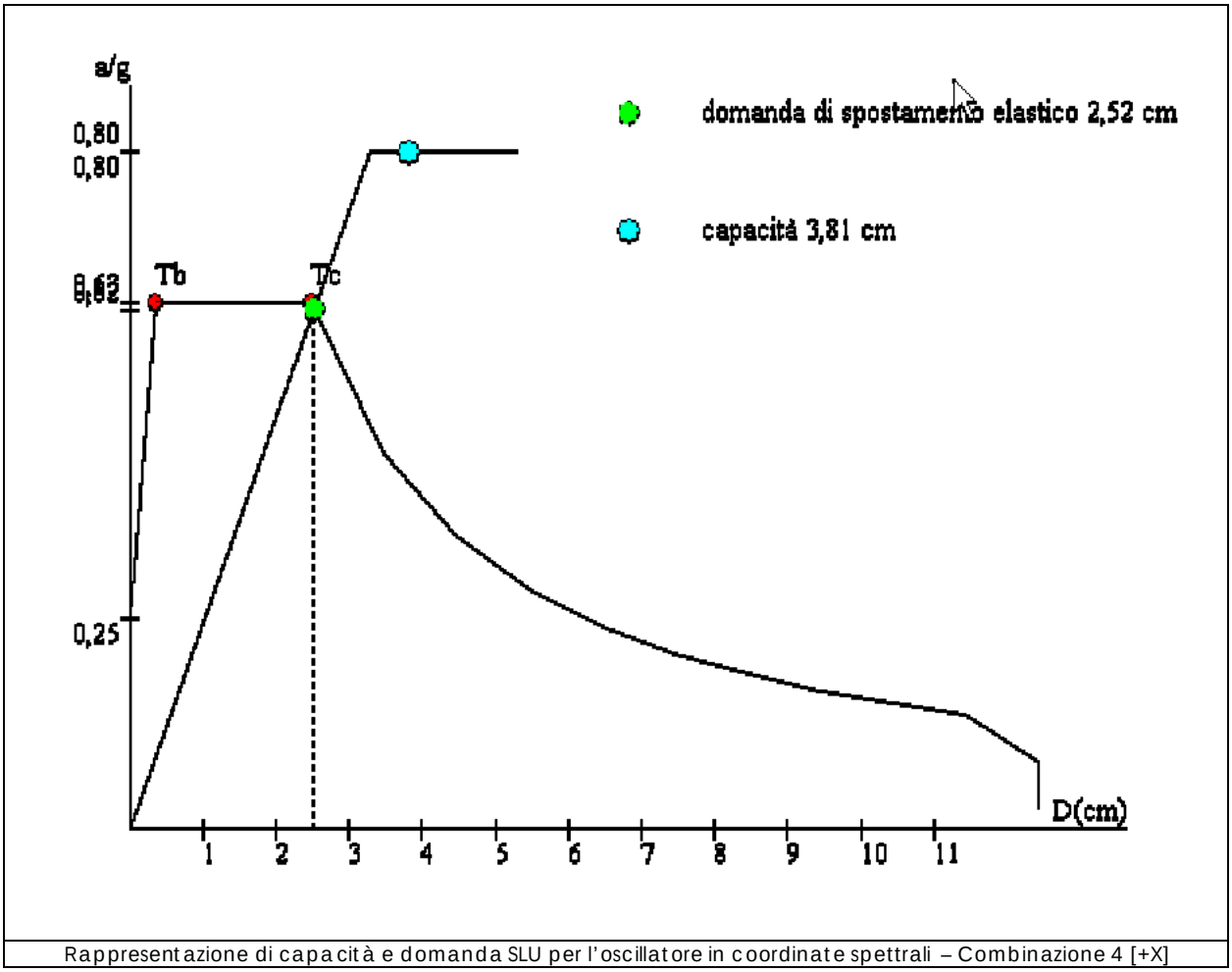
Modello con forze proporzionali agli autovettori - combinazione n. 4 [+X]



Modello deformato – Combinazione 4 [+X]



Curva di capacità – Combinazione 4 [+X]

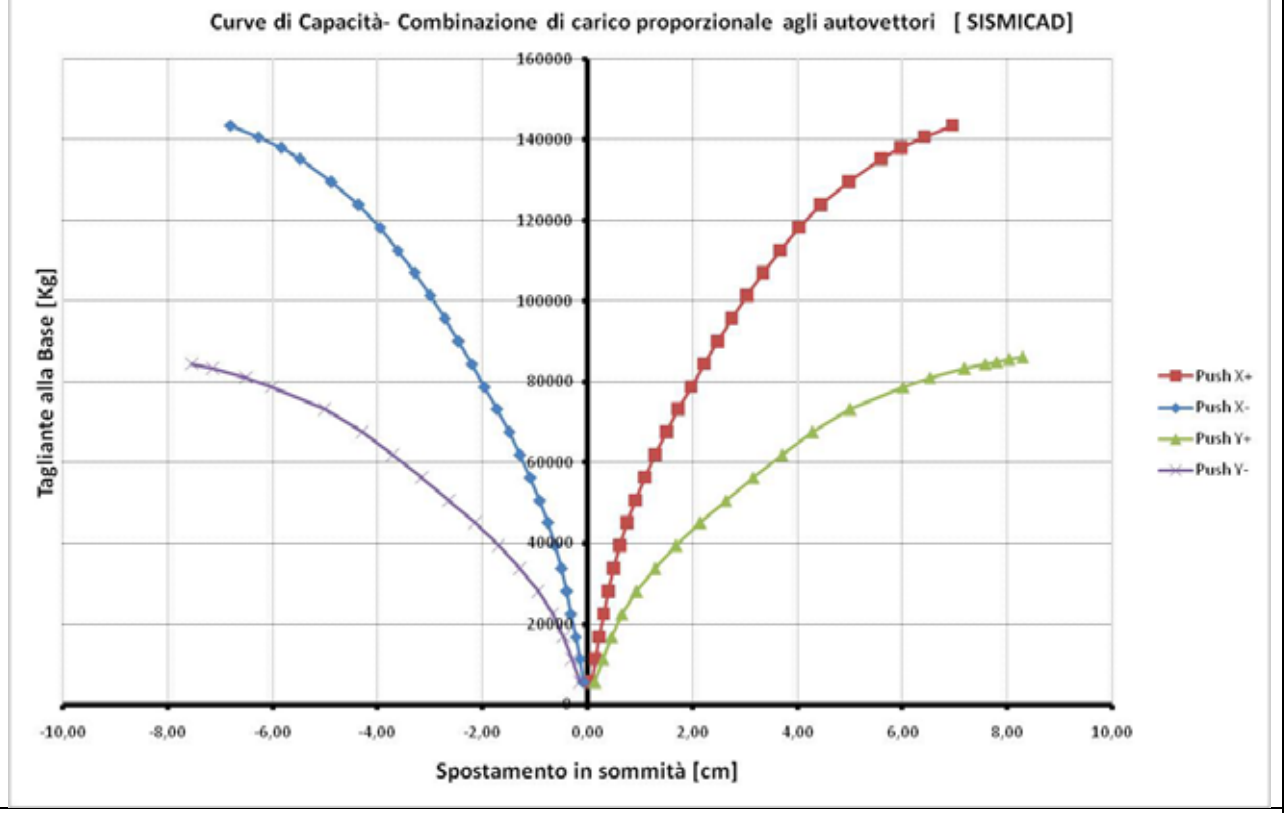


Rappresentazione di capacità e domanda SLU per l'oscillatore in coordinate spettrali – Combinazione 4 [+X]

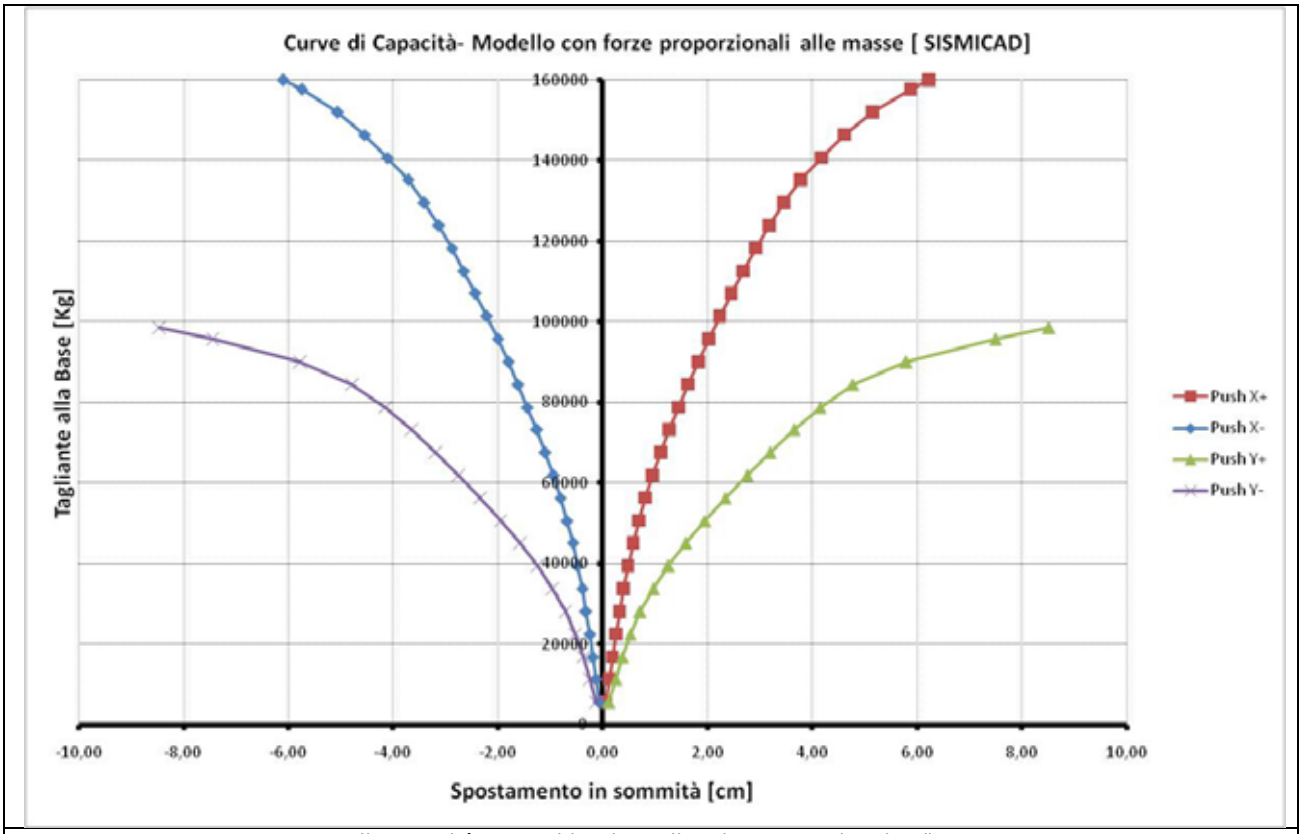
Somma(Mi*Fi)	139,5 (daN*s^2/cm)
Coefficiente di partecipazione	1,306
Periodo di vibrazione dell'oscillatore bilineare equivalente	0,405 s
K* (rigidezza dell'oscillatore bilineare)	33509,227 daN/cm
Fbu	143619,500 daN
Q* SLU	0,767
Spostamento di risposta SLU	3,289
Capacità di spostamento SLU	4,979
Moltiplicatore delle forze che produce lo spostamento di risposta SLU	0,941
Q* SLD	0,307
Spostamento di risposta SLD	1,316
Capacità di spostamento SLD	1,975
Moltiplicatore delle forze che produce lo spostamento di risposta SLD	0,556
Massima accelerazione al suolo SLU	0,378*g
Massima accelerazione al suolo SLD	0,150*g

Capacità in termini di spostamento e vulnerabilità per i vari stati limite

Rotazione alla corda SLCO 6,956cm	ag/g 0,529
Rotazione alla corda SLU 4,979cm	ag/g 0,378
Rotazione alla corda SLD 1,975cm	ag/g 0,150
Rottura a taglio di aste in c.a. 4,979cm	ag/g 0,378
Rottura dei nodi di telai in c.a. 6,956cm	ag/g 0,529
Superamento dello spostamento di interpiano 3,346cm	ag/g 0,254



Curve di Capacità – Combinazione di carico proporzionale agli autovettori



Curve di Capacità – Combinazione di carico proporzionale alle masse

Indicatori di rischio

L'Ordinanza O.P.C.M. 3362 del 08/07/2004 introduce i seguenti indicatori di rischio che pongono a confronto le accelerazioni che producono lo stato limite considerato con quelle rispetto alle quali tale stato limite deve essere soddisfatto:

$$\alpha_u = \frac{PGA_{CO}}{PGA_{2\%}}$$

ovvero in alternativa:

$$\alpha_u = \frac{PGA_{DS}}{PGA_{10\%}} \text{ e } \alpha_e = \frac{PGA_{DL}}{PGA_{50\%}}$$

dove

- **PGA_{CO}** =accelerazione stimata di collasso della struttura;
- **PGA_{DS}** =accelerazione stimata di danno severo;
- **PGA_{DL}** =accelerazione stimata di danno limitato;
- **$PGA_{2\%}$** =accelerazione al suolo attesa con probabilità di occorrenza del 2% in 50 anni;
- **$PGA_{10\%}$** =accelerazione al suolo attesa con probabilità di occorrenza del 10% in 50 anni;
- **$PGA_{50\%}$** =accelerazione al suolo attesa con probabilità di occorrenza del 50% in 50 anni.

Il parametro **a_u** è considerato un indicatore del rischio di collasso, mentre il parametro **a_e** è considerato un indicatore del rischio di inagibilità dell'opera. Valori prossimi o superiori all'unità caratterizzano i casi in cui in cui il livello di rischio è prossimo a quello definito dalle norme, mentre valori bassi, prossimi a zero caratterizzano casi ad elevato rischio.
Nel caso di opere con conseguenze rilevanti in caso di collasso è necessario valutare **a_u** , nel caso di opere di interesse strategico il valore minimo tra **a_e** e **a_u**.

Stato Limite di Collasso (SL-CO) nei confronti del massimo terremoto atteso caratterizzato da una probabilità di occorrenza pari a 2% in 50 anni (T=2475 anni). L'accelerazione di progetto è pari a quelle di base a_g (corrispondente al periodo di ritorno T=475 anni) moltiplicata per 1,5 **[$PGA_{2\%}$ =1,5 x 0,25=0,375]**;

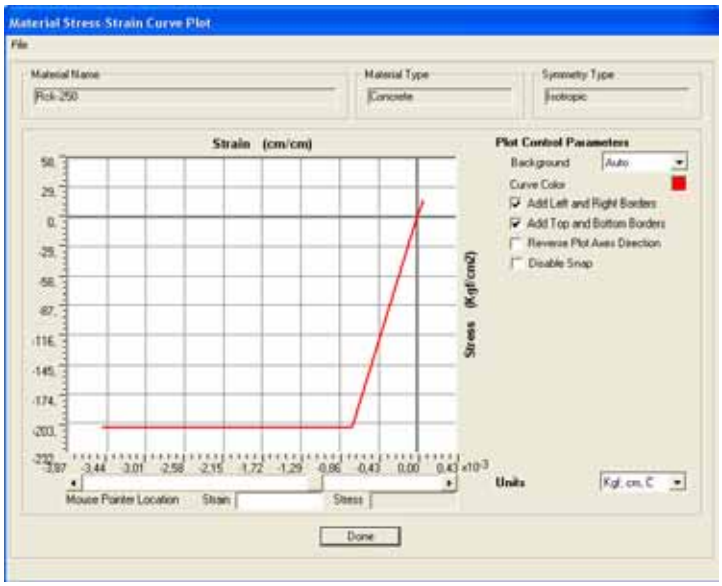
Stato Limite di Danno Severo (SL-DS) nei confronti dell'evento raro caratterizzato da una probabilità di occorrenza pari a 10% in 50 anni (T=475 anni). L'accelerazione di progetto è pari a quella di base a_g **[$PGA_{10\%}$ =1,0 x 0,25=0,25]**.

Stato Limite di Danno Limitato (SL-DL) nei confronti dell'evento frequente caratterizzato da una probabilità di occorrenza pari a 50% in 50 anni (T=95 anni). L'accelerazione di progetto è pari a quella di base a_g (corrispondente al periodo di ritorno T=475 anni) divisa per 2,5 **[$PGA_{50\%}$ 0,25/2,5=0,10]**.

Combinazione di carico proporzionale agli autovettori	**Stato Limite di Collasso (SL-CO)**	$\alpha_u = \frac{PGA_{CO}}{PGA_{2\%}}$
Combinazione 1 [-X]	0,353	0,353/0,375=0,941
Combinazione 2 [-Y]	0,217	0,217/0,375=0,578

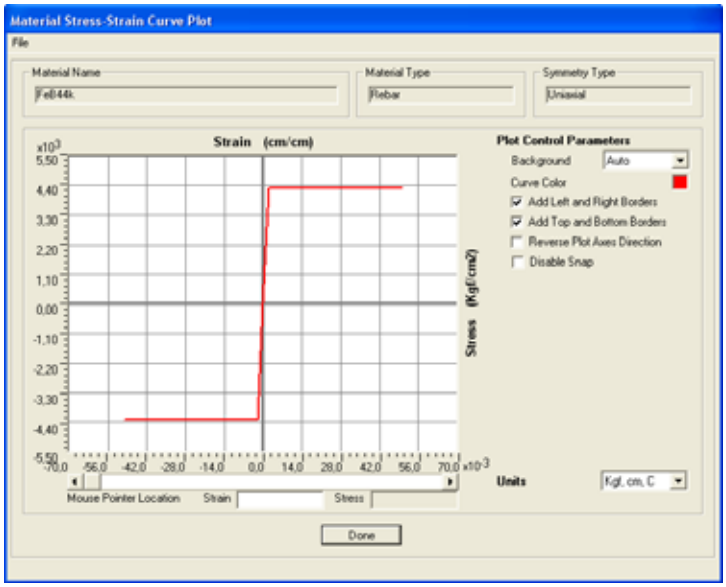
Dati generali
Materiali

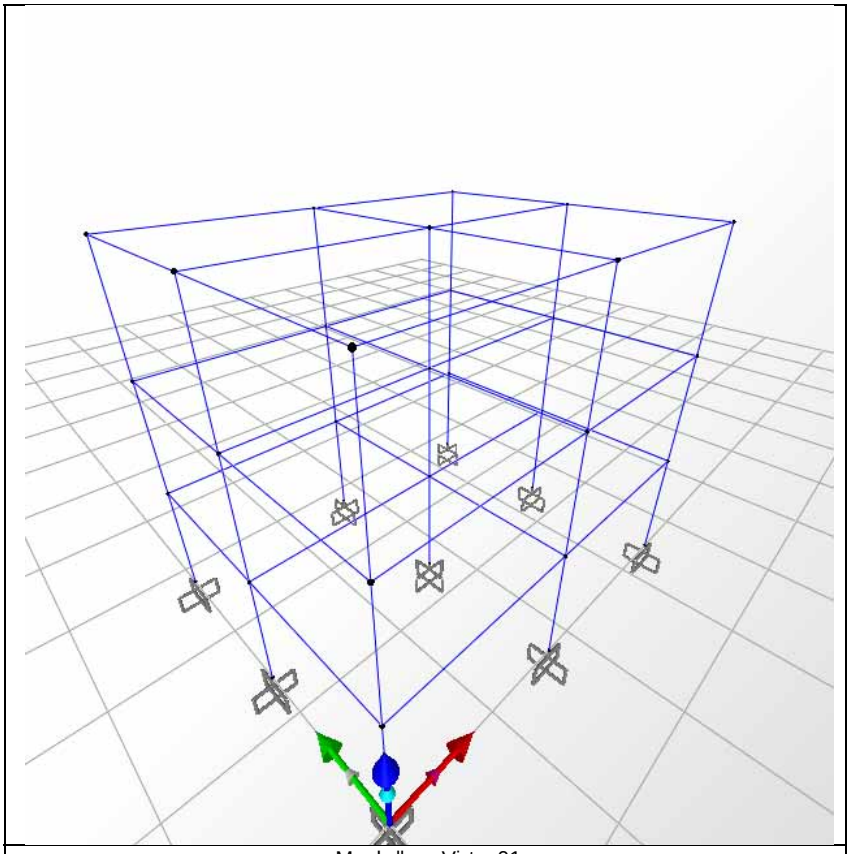
Descrizione	Rck	E	Gamma	Poisson	G	Alfa
RCK250	250	285000	0.0025	0.1	129545.58	0.00001



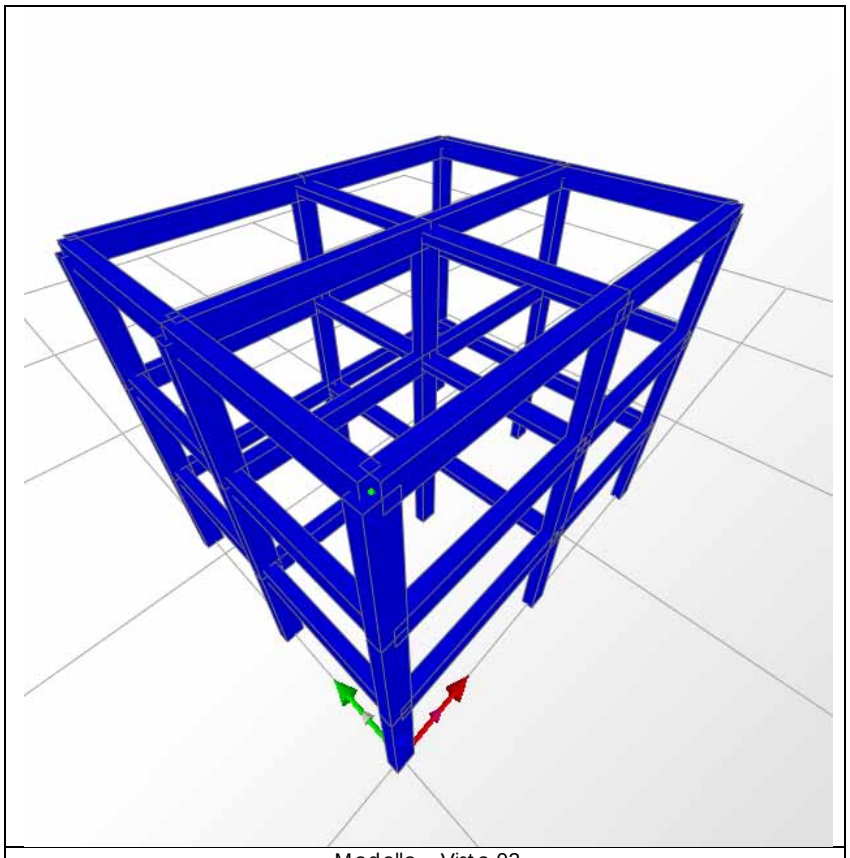
Armature

Descrizione	fyk	Sigma amm.	Tipo	Classe barre	E	Gamma	Poisson	G	Alfa
FeB 44 k aderenza migliorata	4300	2550	Aderenza migliorata	B	2060000	0.00785	0.3	7.92E05	0.000012

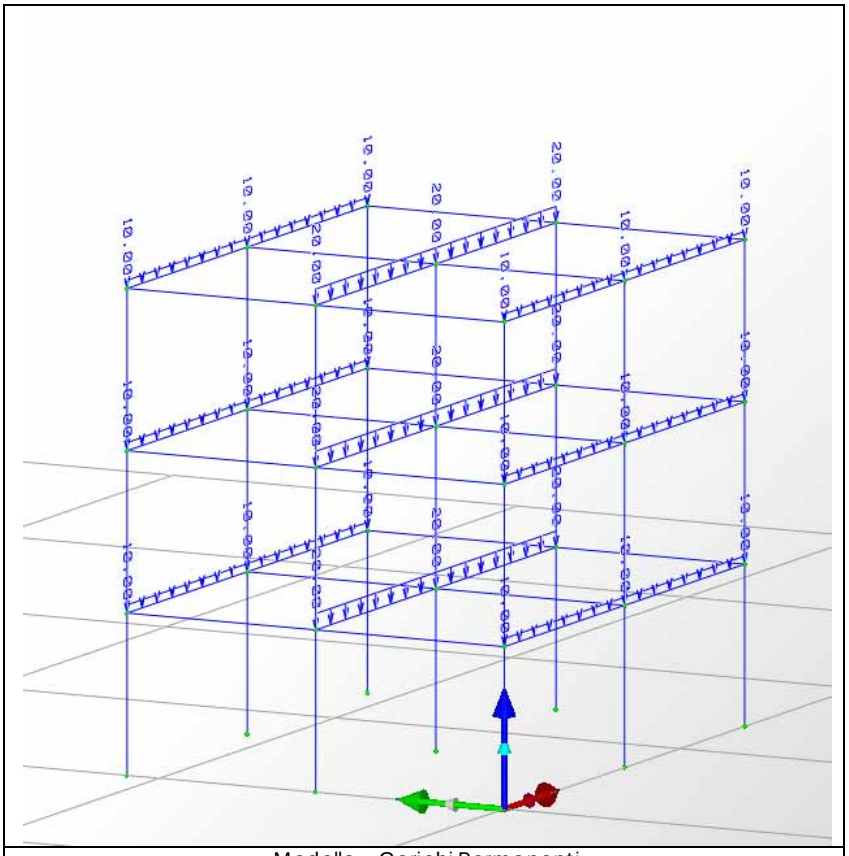




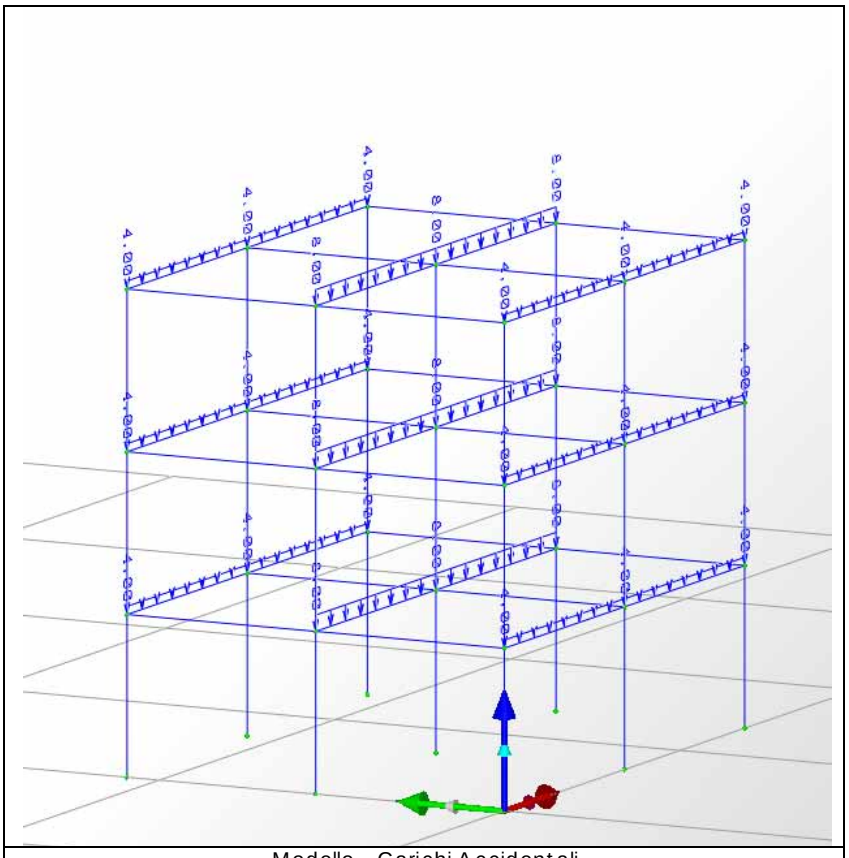
Modello – Vista 01



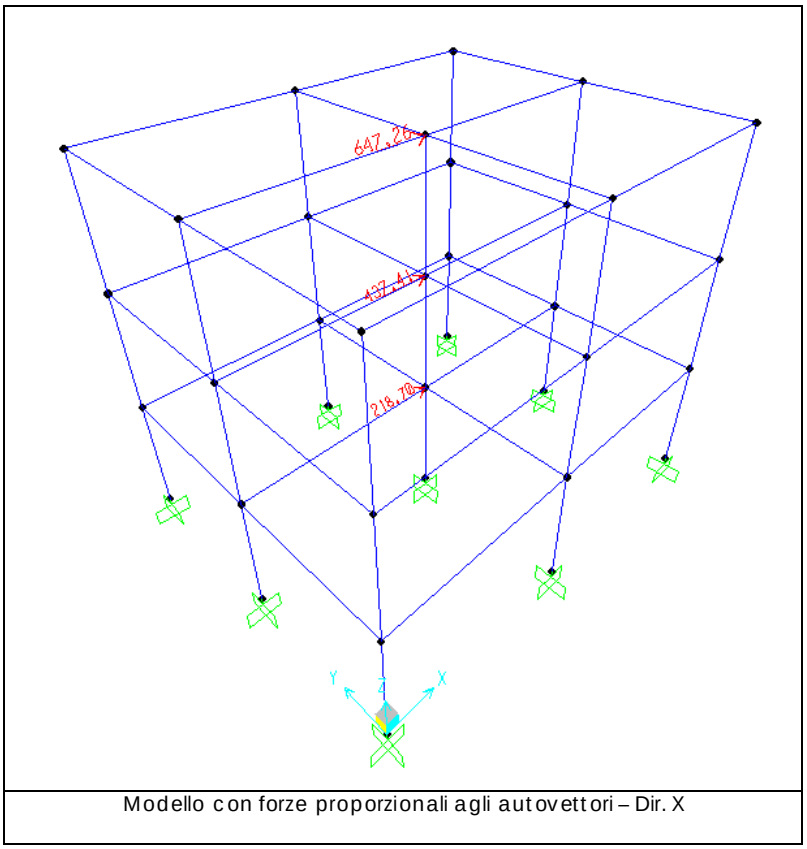
Modello – Vista 02



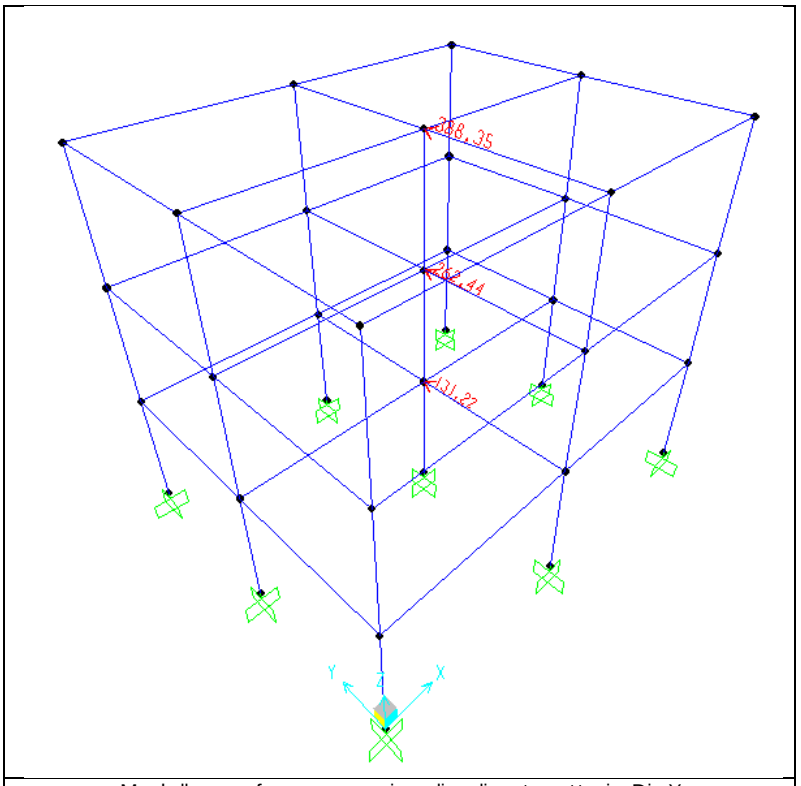
Modello – Carichi Permanenti



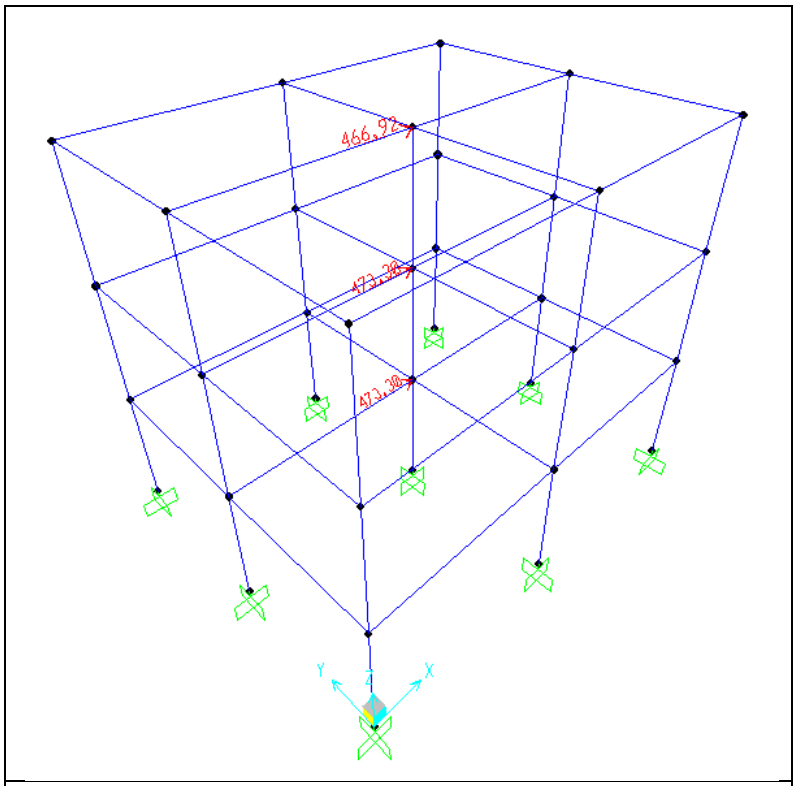
Modello – Carichi Accidentali



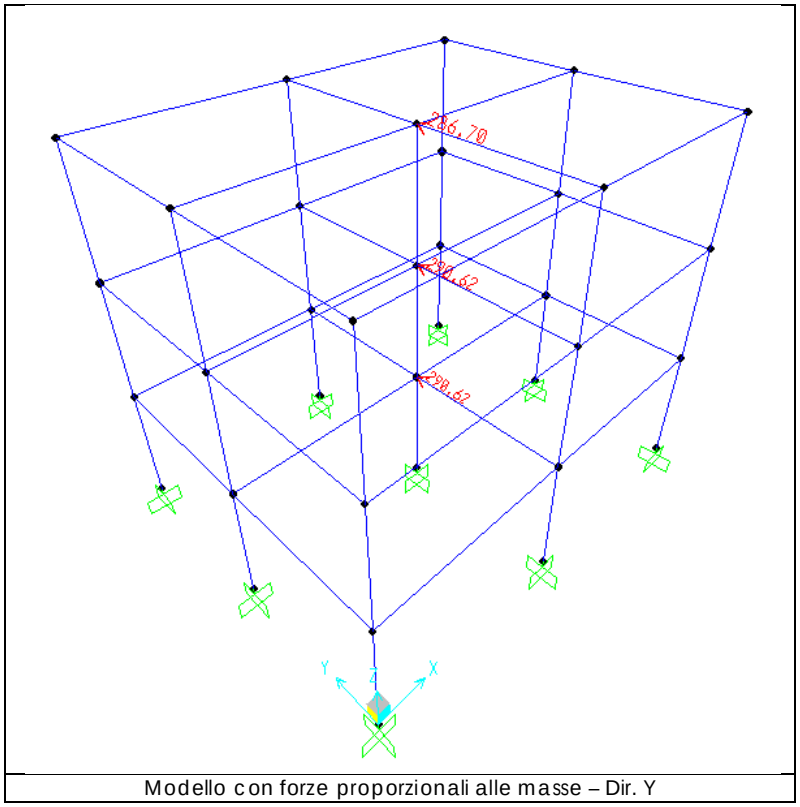
Modello con forze proporzionali agli autovettori – Dir. X



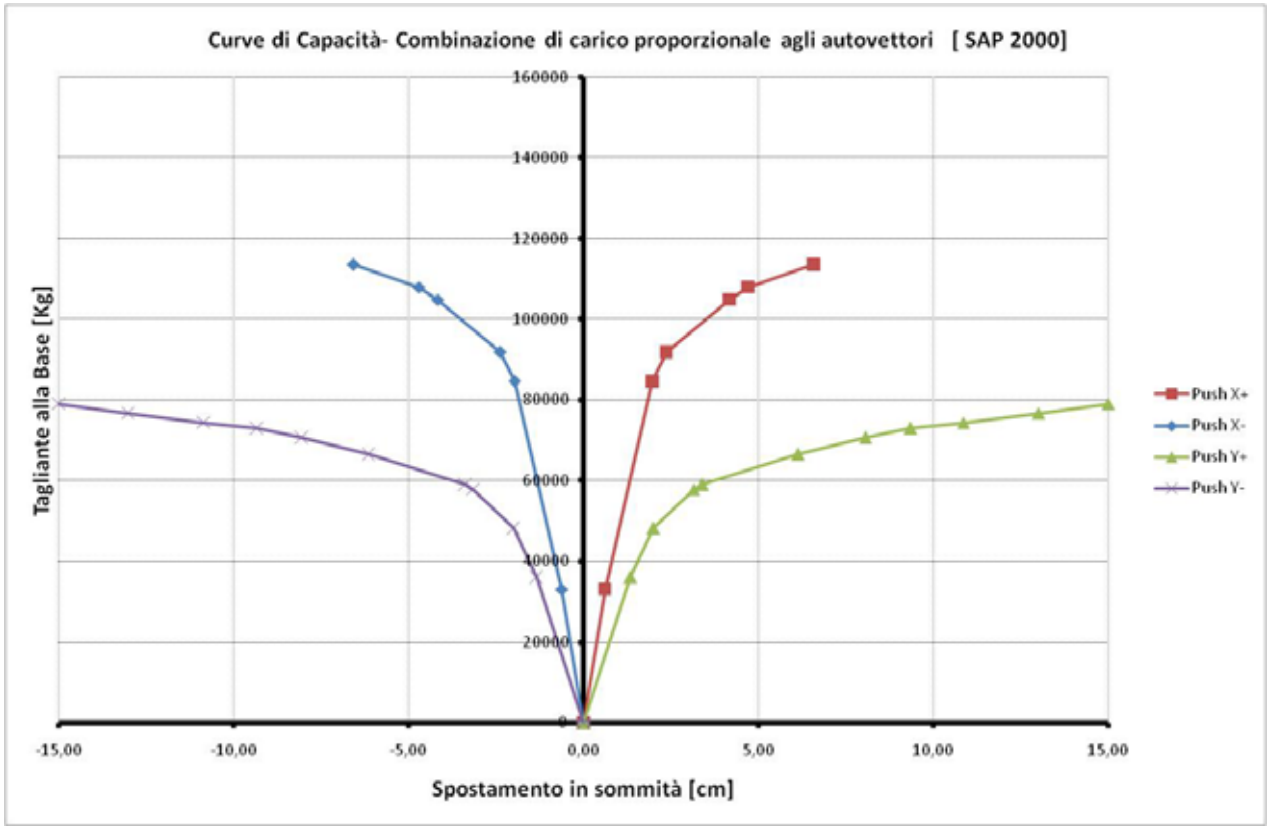
Modello con forze proporzionali agli autovettori – Dir. Y

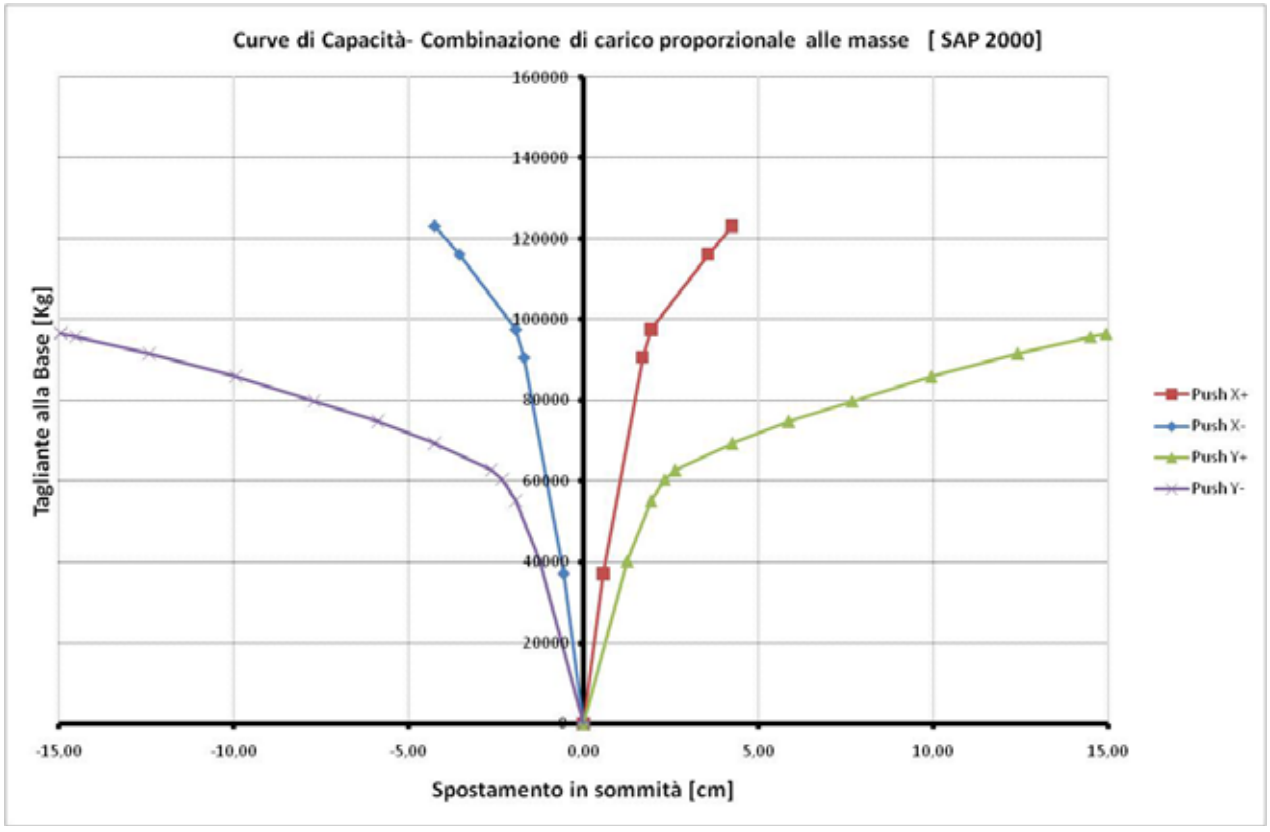


Modello con forze proporzionali alle masse – Dir. X



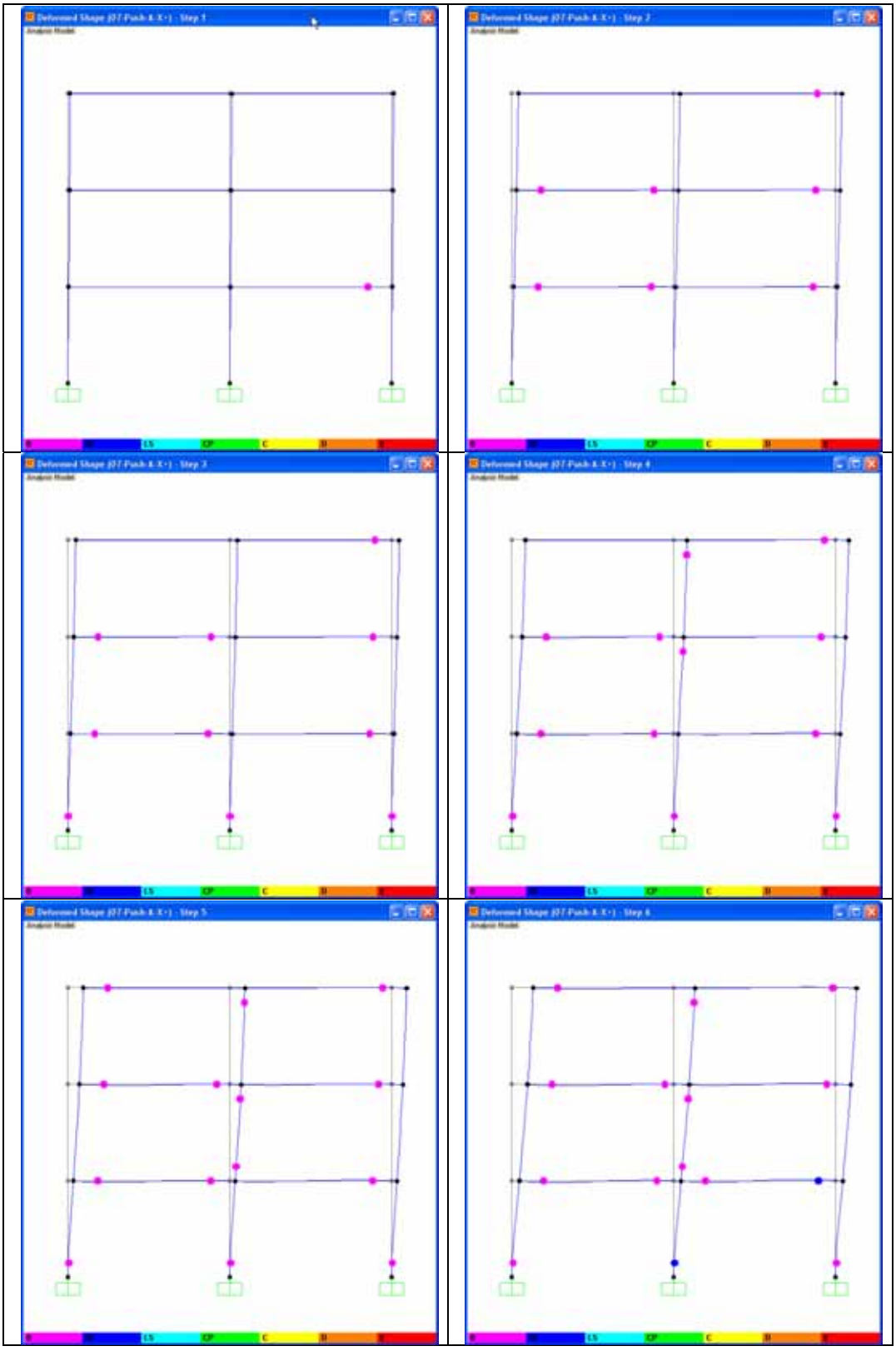
Modello con forze proporzionali alle masse – Dir. Y


Curve di Capacità- Combinazione di carico proporzionale agli autovettori [SAP 2000]
Tagliante alla Base [Kg]
160000
140000
120000
100000
80000
60000
40000
20000
0
-15,00
-10,00
-5,00
0,00
5,00
10,00
15,00
Spostamento in sommità [cm]
Push X+
Push X-
Push Y+
Push Y-


Curve di Capacità- Combinazione di carico proporzionale alle masse [SAP 2000]
Tagliante alla Base [Kg]
160000
140000
120000
100000
80000
60000
40000
20000
0
-15,00
-10,00
-5,00
0,00
5,00
10,00
15,00
Spostamento in sommità [cm]
Push X+
Push X-
Push Y+
Push Y-

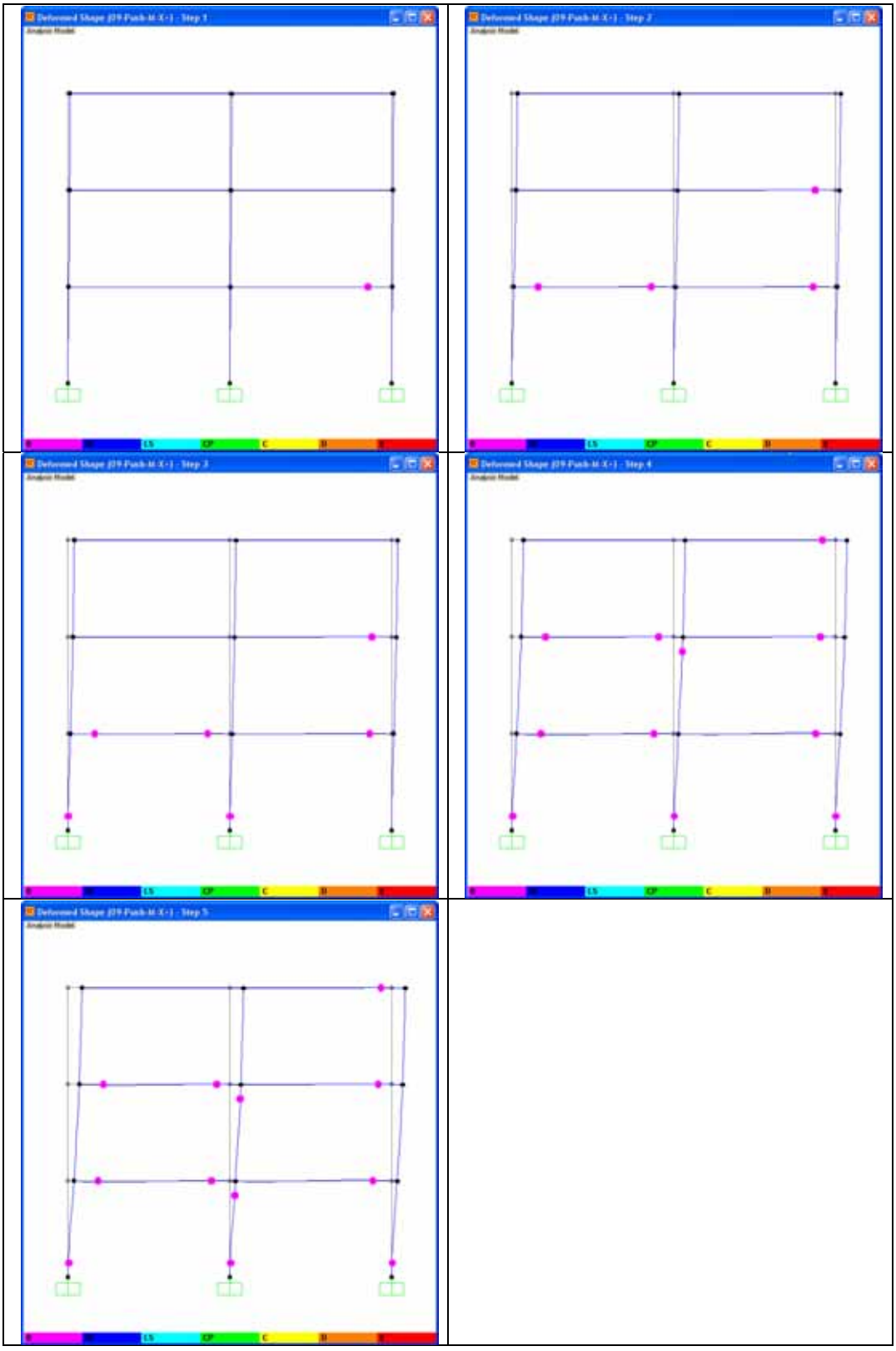
Evoluzione delle cerniere plastiche per il telaio centrale – Direzione X

[Modello con forze proporzionali agli autovettori – Dir. X]



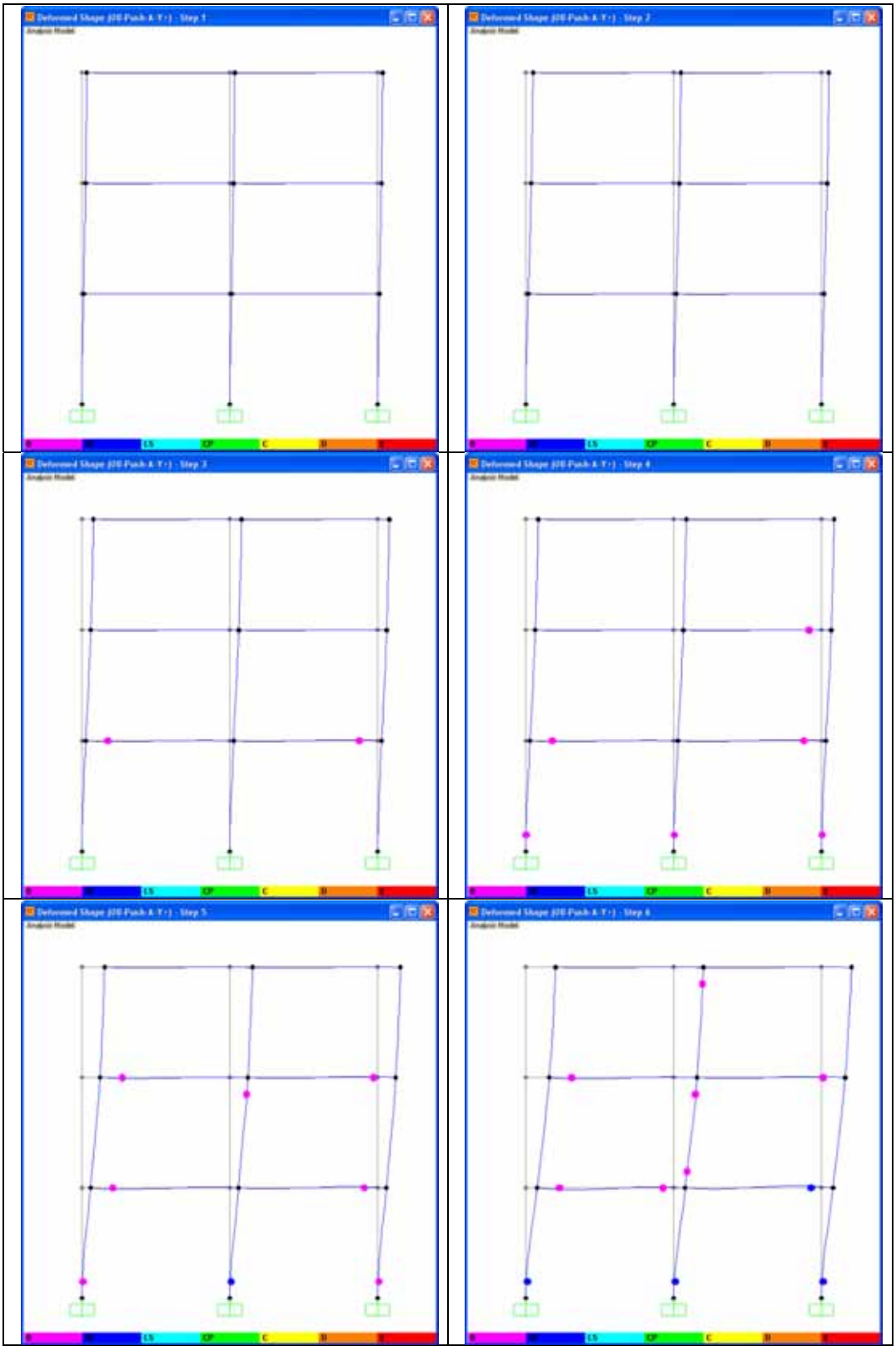
Evoluzione delle cerniere plastiche per il telaio centrale – Direzione X

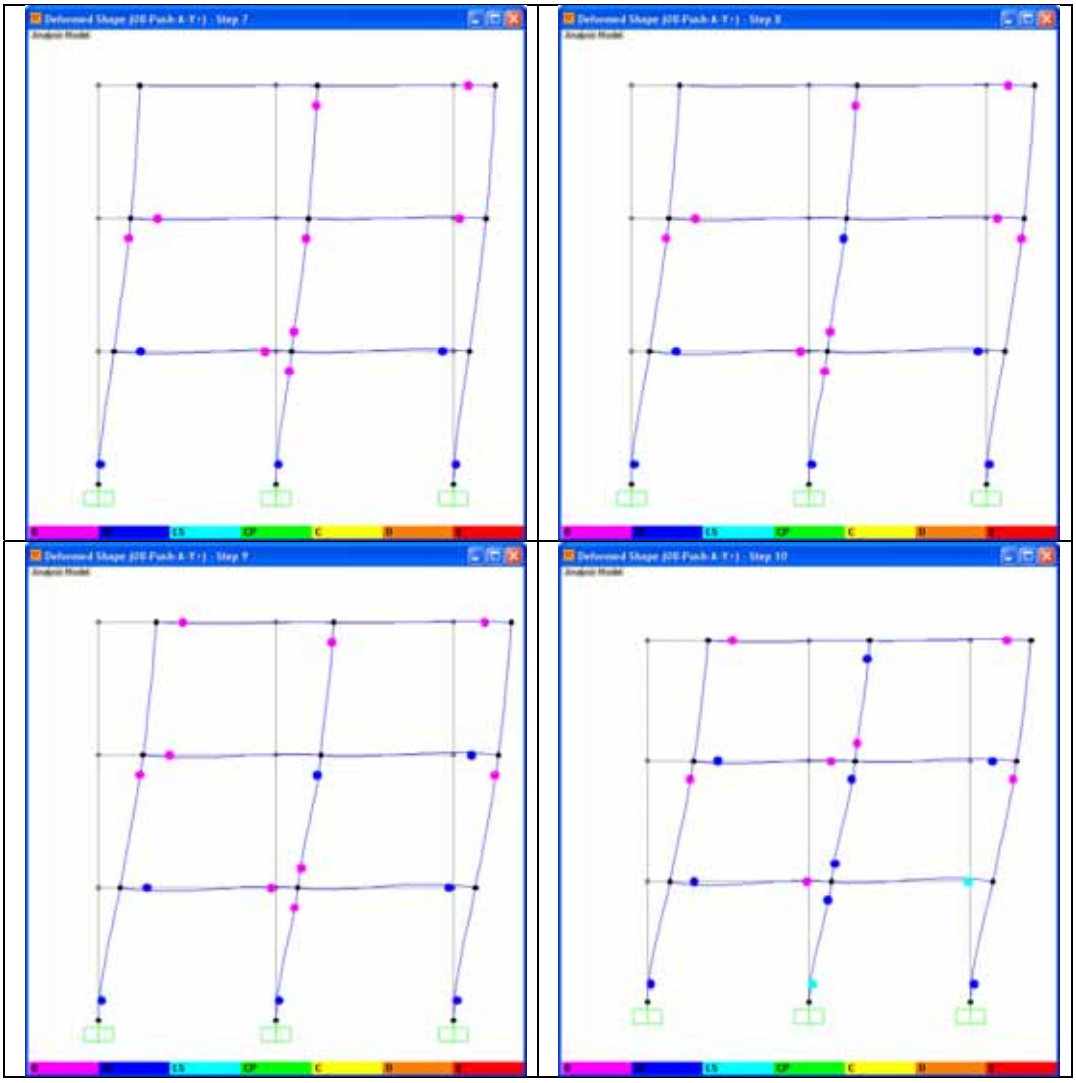
[Modello con forze proporzionali alle masse – Dir. X]



Evoluzione delle cerniere plastiche per il telaio centrale – Direzione Y

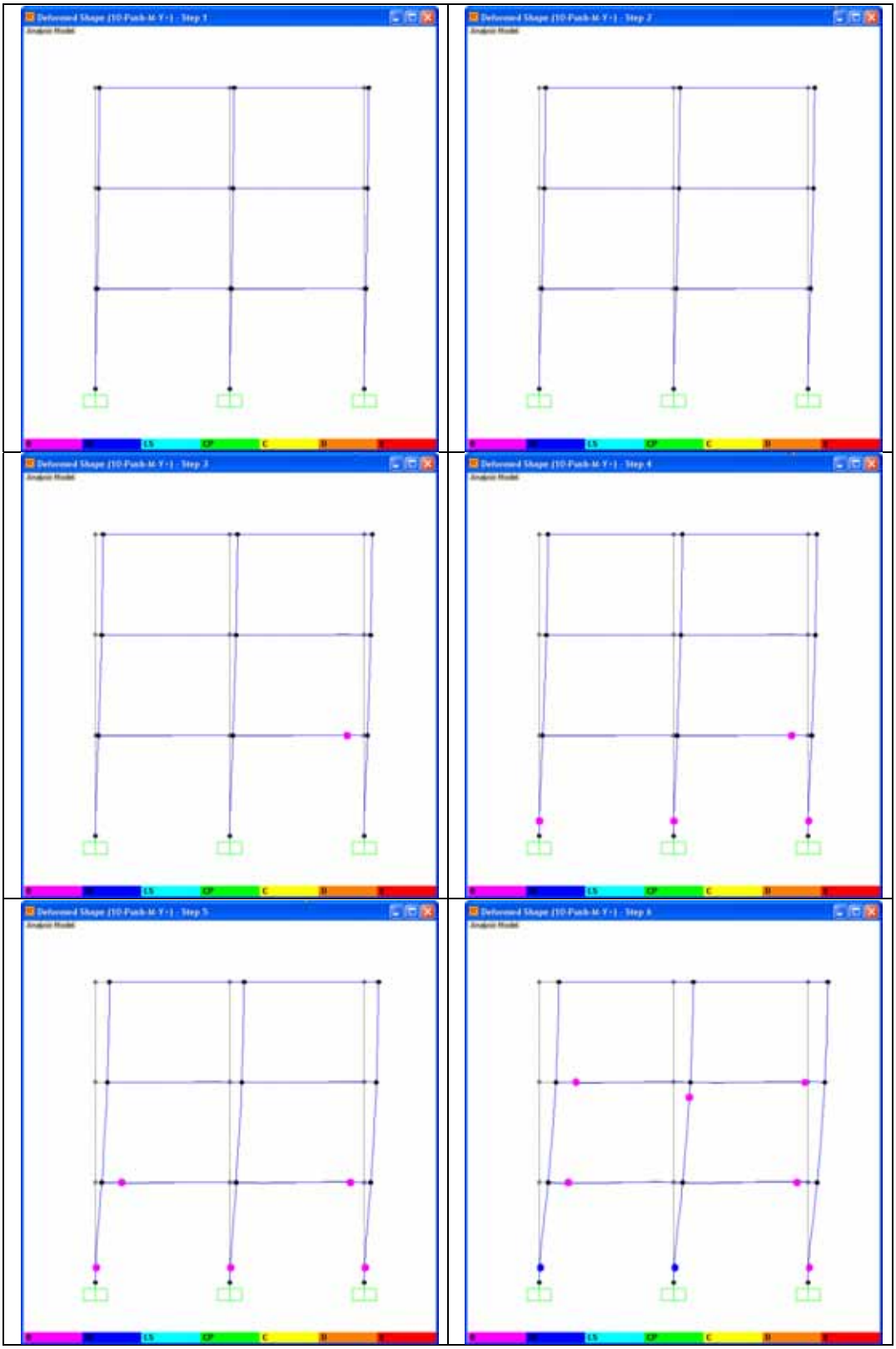
[Modello con forze proporzionali agli autovettori – Dir. Y]

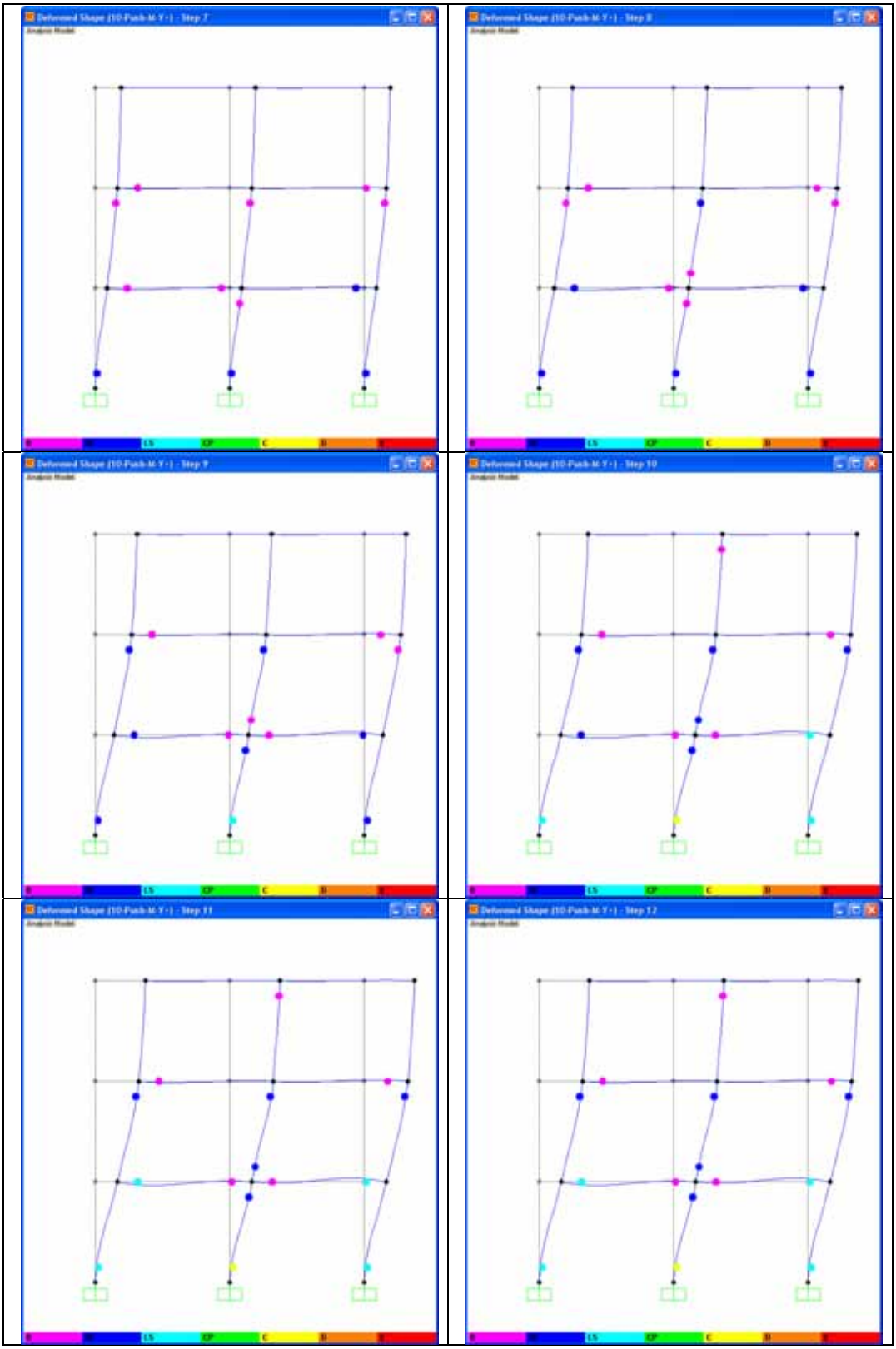




Evoluzione delle cerniere plastiche per il telaio centrale – Direzione Y

[Modello con forze proporzionali alle masse – Dir. Y]





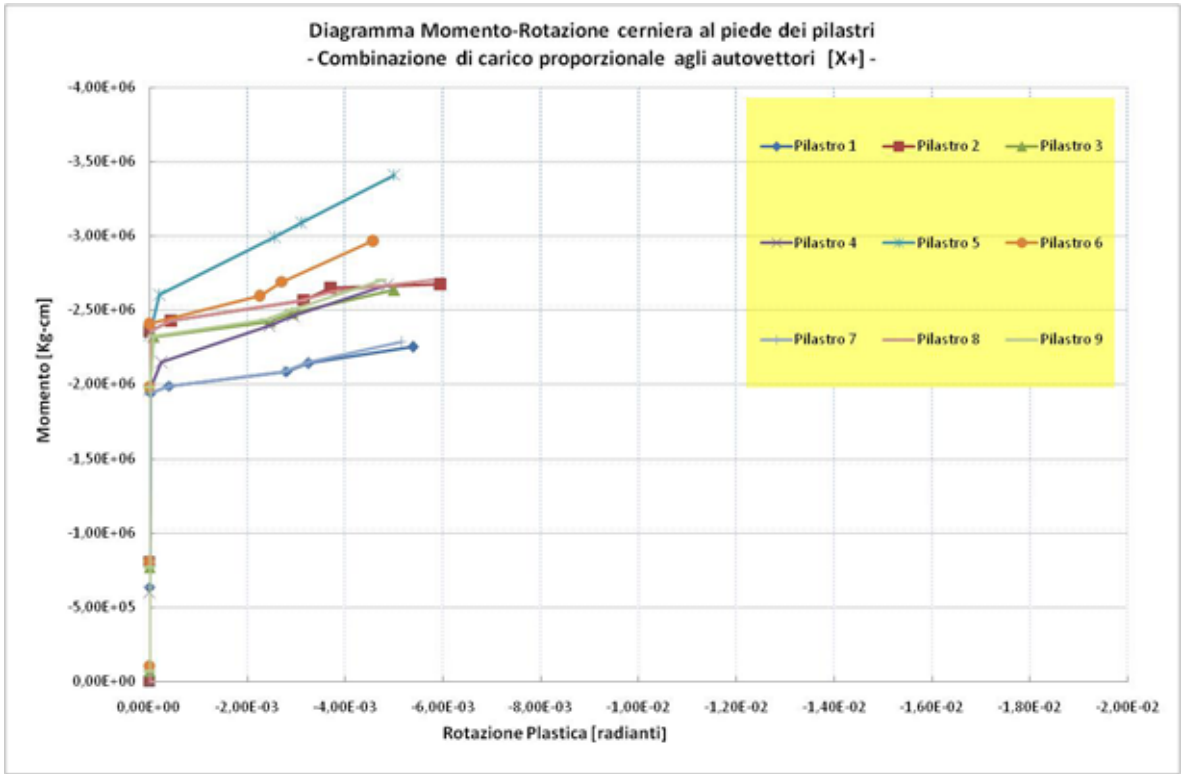


Diagramma Momento-Rotazione cerniera al piede dei pilastri
- Combinazione di carico proporzionale agli autovettori [X+] -
Momento [Kg-cm]
-4,00E+06
-3,50E+06
-3,00E+06
-2,50E+06
-2,00E+06
-1,50E+06
-1,00E+06
-5,00E+05
0,00E+00
0,00E+00
-2,00E-03
-4,00E-03
-6,00E-03
-8,00E-03
-1,00E-02
-1,20E-02
-1,40E-02
-1,60E-02
-1,80E-02
-2,00E-02
Rotazione Plastica [radianti]
Pilastro 1
Pilastro 2
Pilastro 3
Pilastro 4
Pilastro 5
Pilastro 6
Pilastro 7
Pilastro 8
Pilastro 9

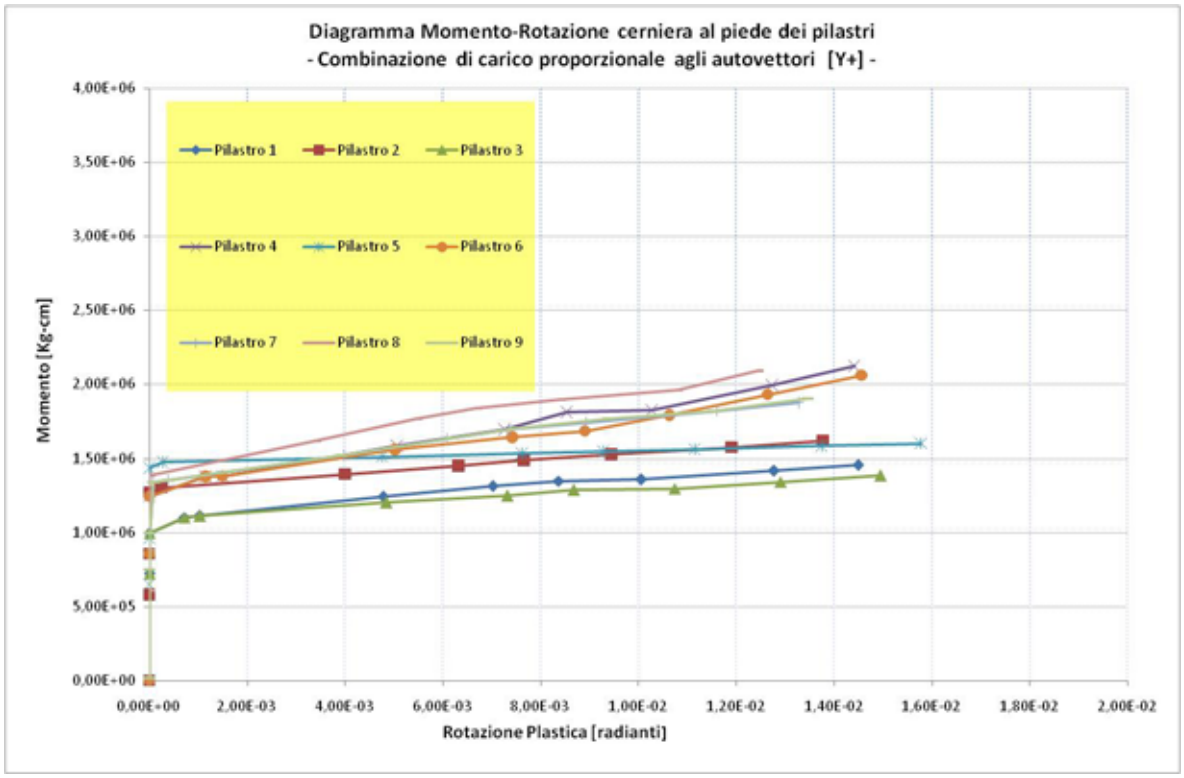


Diagramma Momento-Rotazione cerniera al piede dei pilastri
- Combinazione di carico proporzionale agli autovettori [Y+] -
Momento [Kg-cm]
4,00E+06
3,50E+06
3,00E+06
2,50E+06
2,00E+06
1,50E+06
1,00E+06
5,00E+05
0,00E+00
0,00E+00
2,00E-03
4,00E-03
6,00E-03
8,00E-03
1,00E-02
1,20E-02
1,40E-02
1,60E-02
1,80E-02
2,00E-02
Rotazione Plastica [radianti]
Pilastro 1
Pilastro 2
Pilastro 3
Pilastro 4
Pilastro 5
Pilastro 6
Pilastro 7
Pilastro 8
Pilastro 9

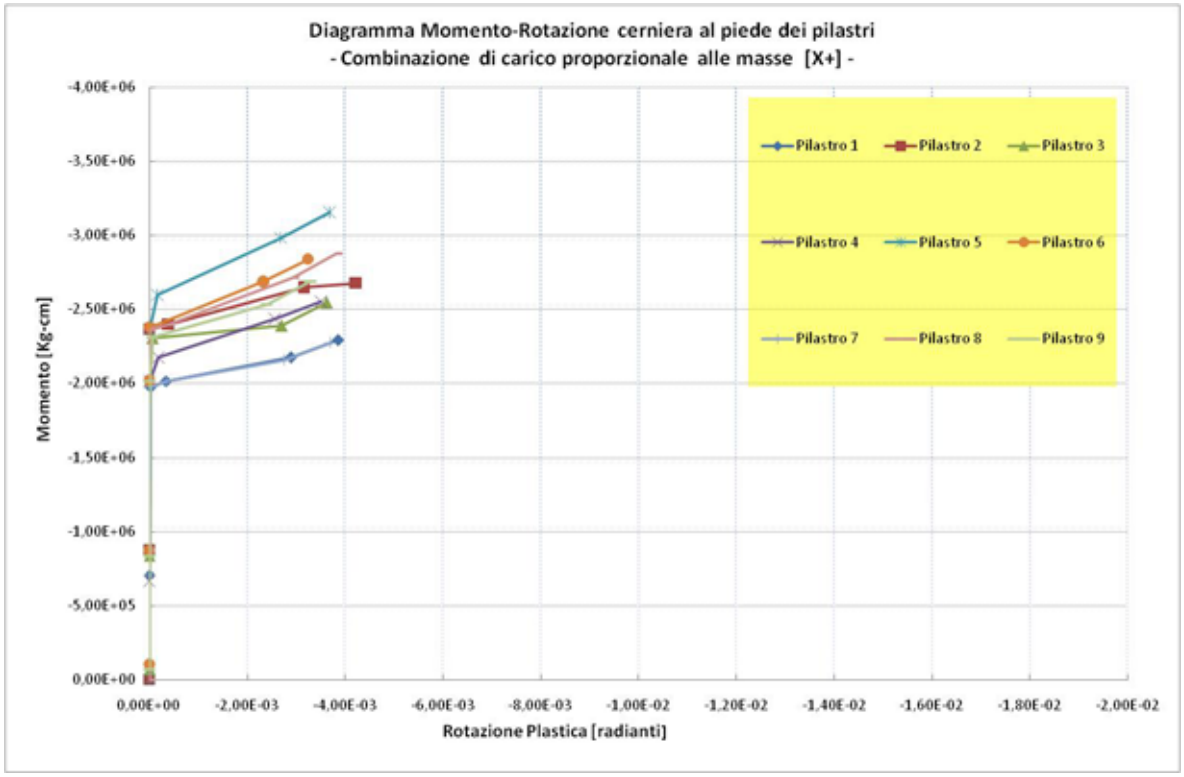


Diagramma Momento-Rotazione cerniera al piede dei pilastri
- Combinazione di carico proporzionale alle masse [X+] -
Momento [Kg-cm]
-4,00E+06
-3,50E+06
-3,00E+06
-2,50E+06
-2,00E+06
-1,50E+06
-1,00E+06
-5,00E+05
0,00E+00
0,00E+00
-2,00E-03
-4,00E-03
-6,00E-03
-8,00E-03
-1,00E-02
-1,20E-02
-1,40E-02
-1,60E-02
-1,80E-02
-2,00E-02
Rotazione Plastica [radianti]
Pilastro 1
Pilastro 2
Pilastro 3
Pilastro 4
Pilastro 5
Pilastro 6
Pilastro 7
Pilastro 8
Pilastro 9

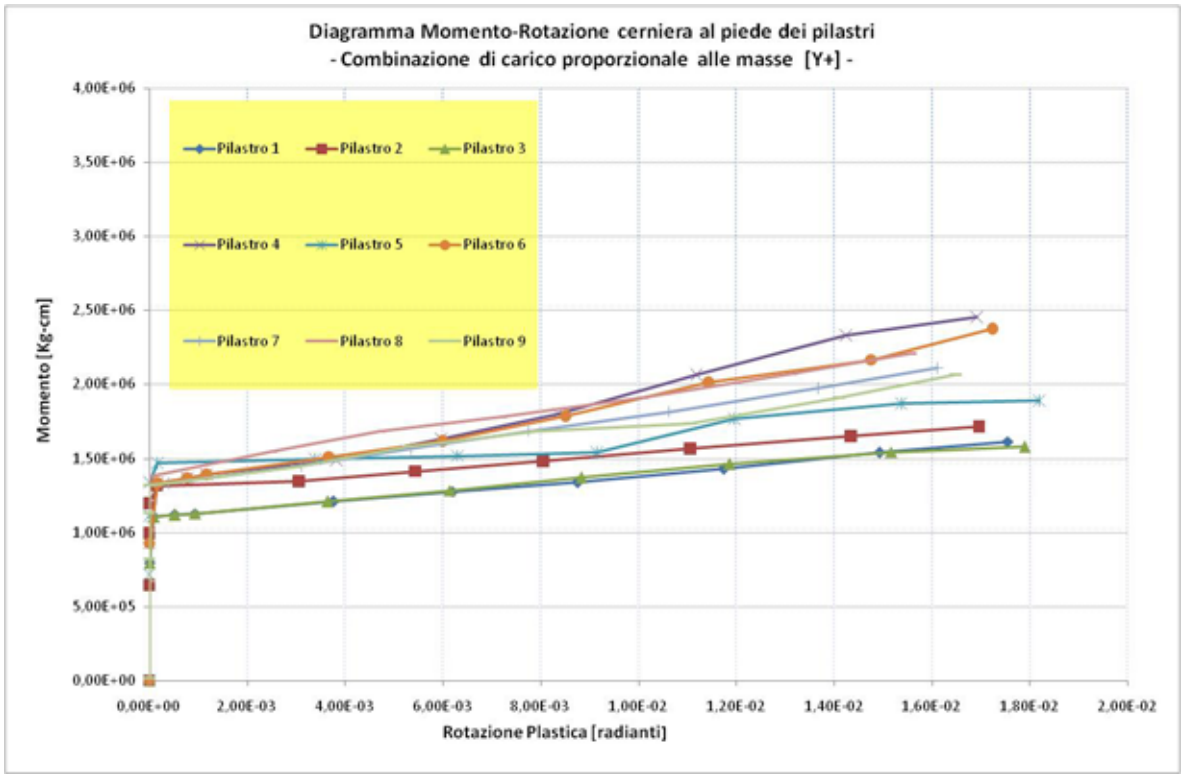
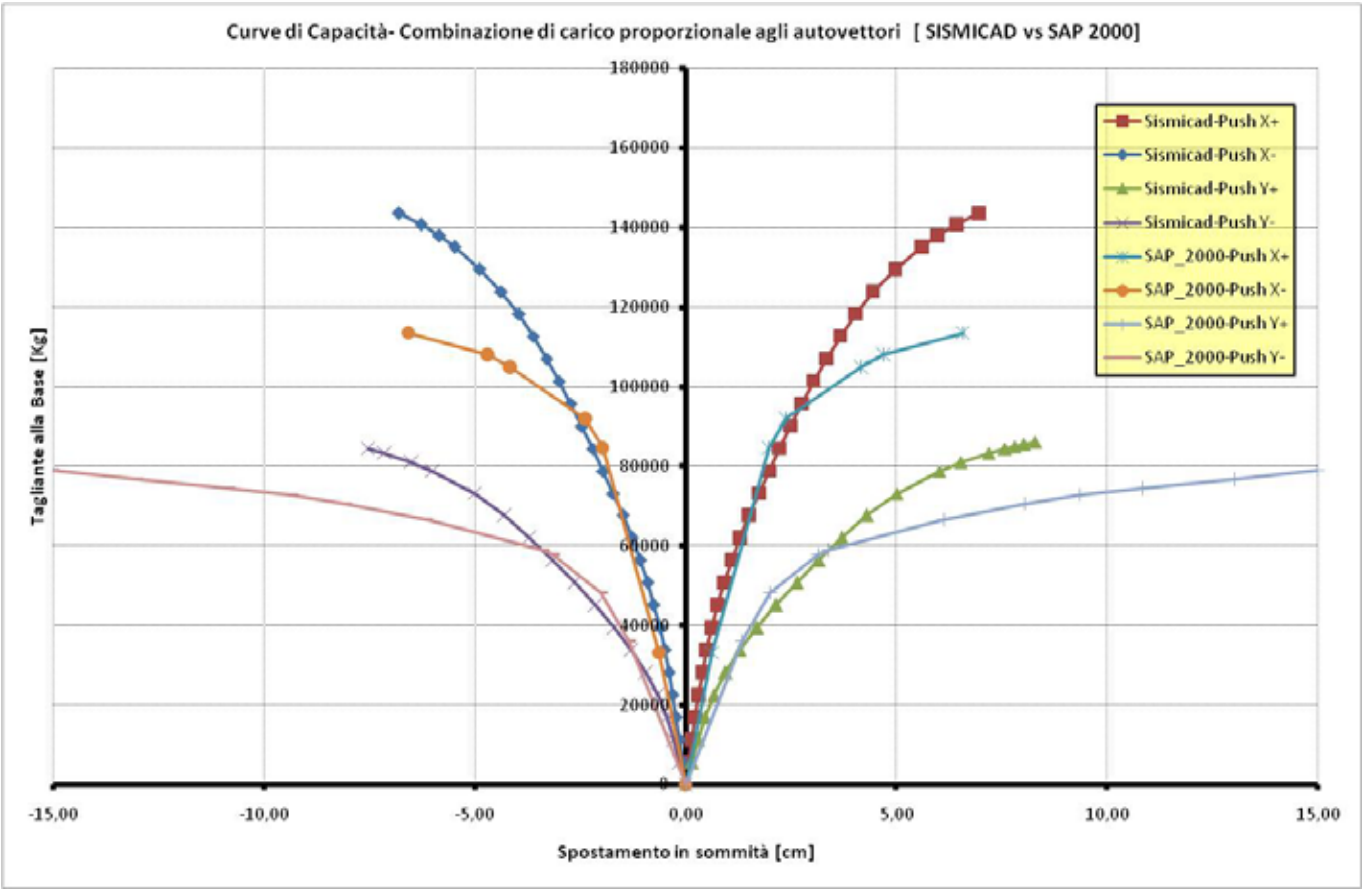
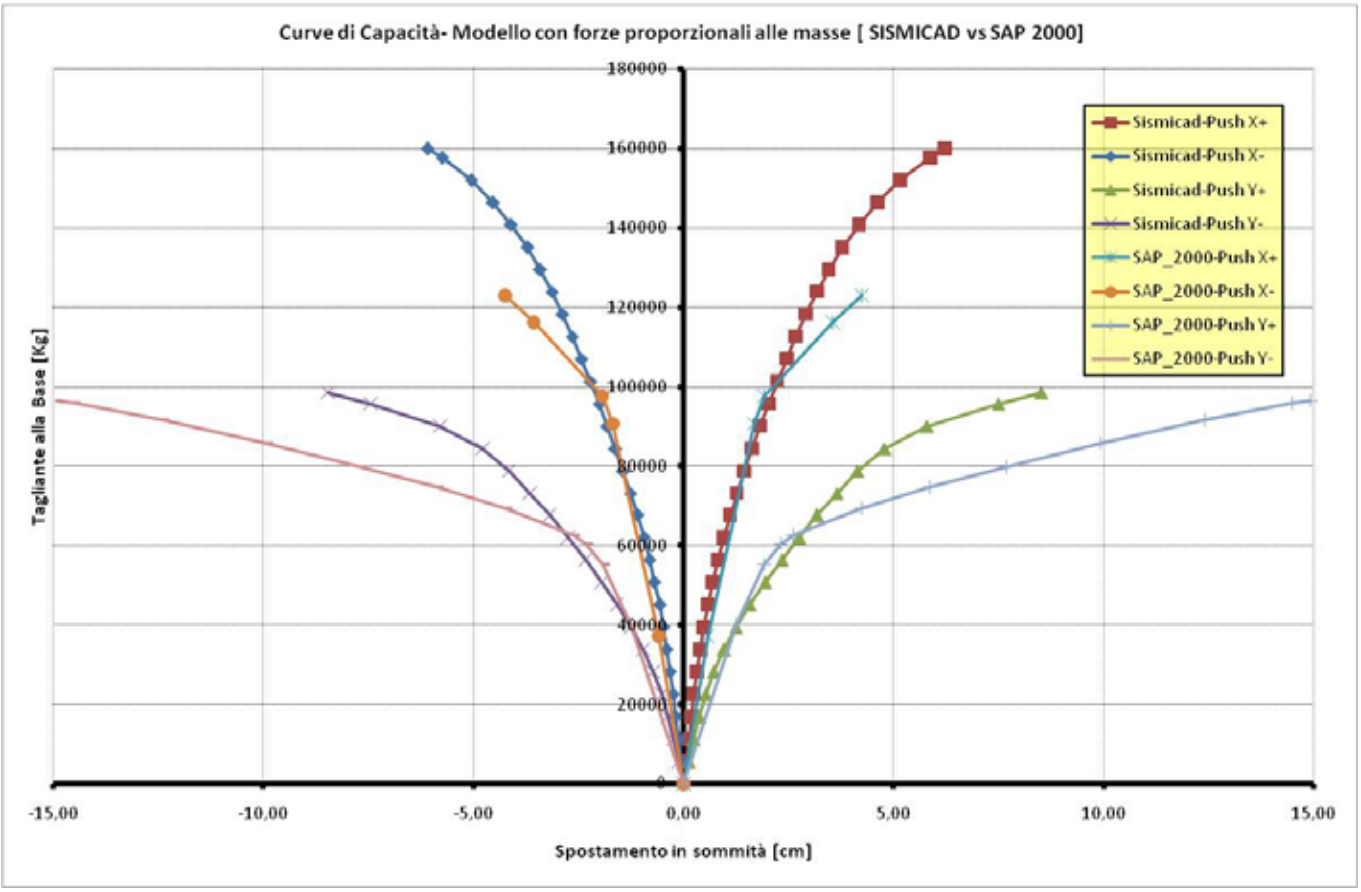


Diagramma Momento-Rotazione cerniera al piede dei pilastri
- Combinazione di carico proporzionale alle masse [Y+] -
Momento [Kg-cm]
4,00E+06
3,50E+06
3,00E+06
2,50E+06
2,00E+06
1,50E+06
1,00E+06
5,00E+05
0,00E+00
0,00E+00
2,00E-03
4,00E-03
6,00E-03
8,00E-03
1,00E-02
1,20E-02
1,40E-02
1,60E-02
1,80E-02
2,00E-02
Rotazione Plastica [radianti]
Pilastro 1
Pilastro 2
Pilastro 3
Pilastro 4
Pilastro 5
Pilastro 6
Pilastro 7
Pilastro 8
Pilastro 9


Curve di Capacità- Combinazione di carico proporzionale agli autovettori [SISMICAD vs SAP 2000]
Tagliante alla Base [Kg]
180000
160000
140000
120000
100000
80000
60000
40000
20000
0
-15,00
-10,00
-5,00
0,00
5,00
10,00
15,00
Spostamento in sommità [cm]
Sismicad-Push X+
Sismicad-Push X-
Sismicad-Push Y+
Sismicad-Push Y-
SAP_2000-Push X+
SAP_2000-Push X-
SAP_2000-Push Y+
SAP_2000-Push Y-


Curve di Capacità- Modello con forze proporzionali alle masse [SISMICAD vs SAP 2000]
Tagliante alla Base [Kg]
180000
160000
140000
120000
100000
80000
60000
40000
20000
0
-15,00
-10,00
-5,00
0,00
5,00
10,00
15,00
Spostamento in sommità [cm]
Sismicad-Push X+
Sismicad-Push X-
Sismicad-Push Y+
Sismicad-Push Y-
SAP_2000-Push X+
SAP_2000-Push X-
SAP_2000-Push Y+
SAP_2000-Push Y-