



*Materiali ed Approcci Innovativi per il Progetto in Zona Sismica e la
Mitigazione della Vulnerabilità delle Strutture
Università degli Studi di Salerno – Consorzio ReLUIS,
12-13 Febbraio 2007*

Application of the push-over analysis to plan asymmetric building structures

**Mario DE STEFANO, Barbara PINTUCCHI
Dipartimento di Costruzioni, Università di Firenze**

OGGETTO E FINALITA'

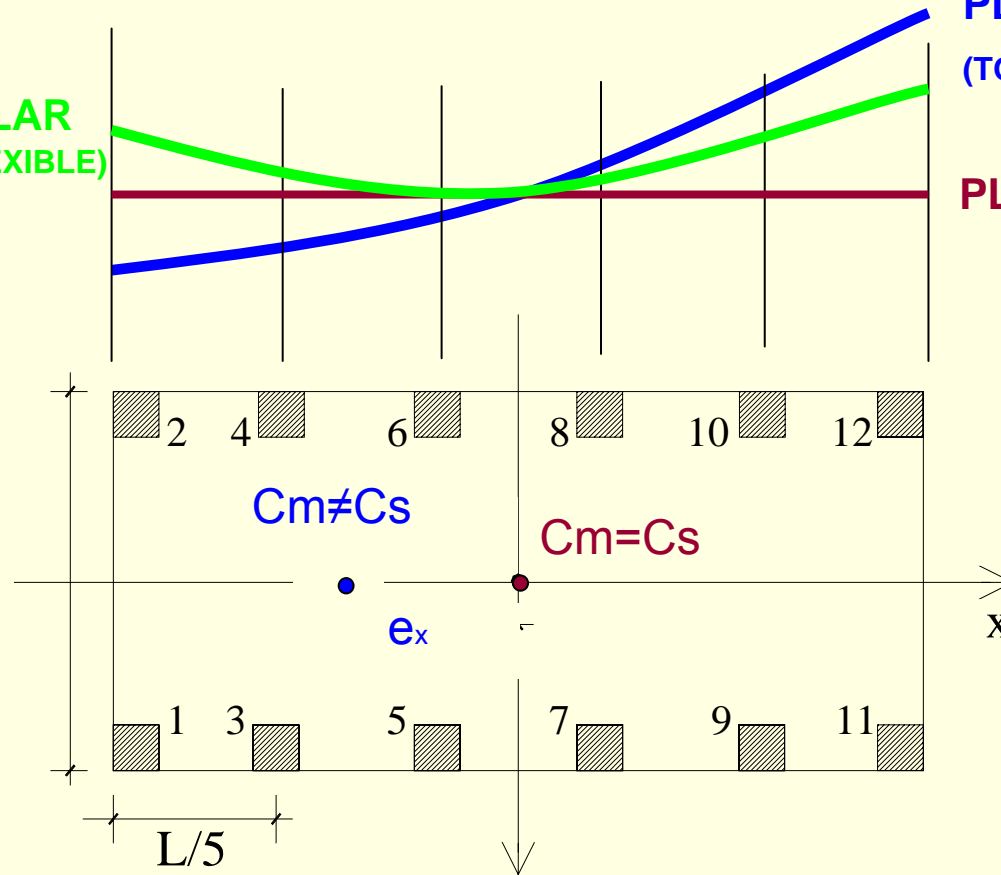
- Negli ultimi venti anni, numerosi metodi semplificati di analisi non-lineare, basati su procedure push-over, sono stati proposti come valida alternativa, per le applicazioni pratiche, alla più onerosa analisi dinamica non lineari.
- L'analisi push-over è stata ampiamente sviluppata soprattutto con riferimento a strutture 2D e tali metodi sono ad oggi sufficientemente consolidati e codificati per analisi strutturali piane.

INVILUPPO SPOSTAMENTI MASSIMI IN PIANTA

PLAN IRREGULAR
(TORSIONALLY FLEXIBLE)

PLAN IRREGULAR
(TORSIONALLY STIFF)

PLAN REGULAR



OGGETTO E FINALITA'

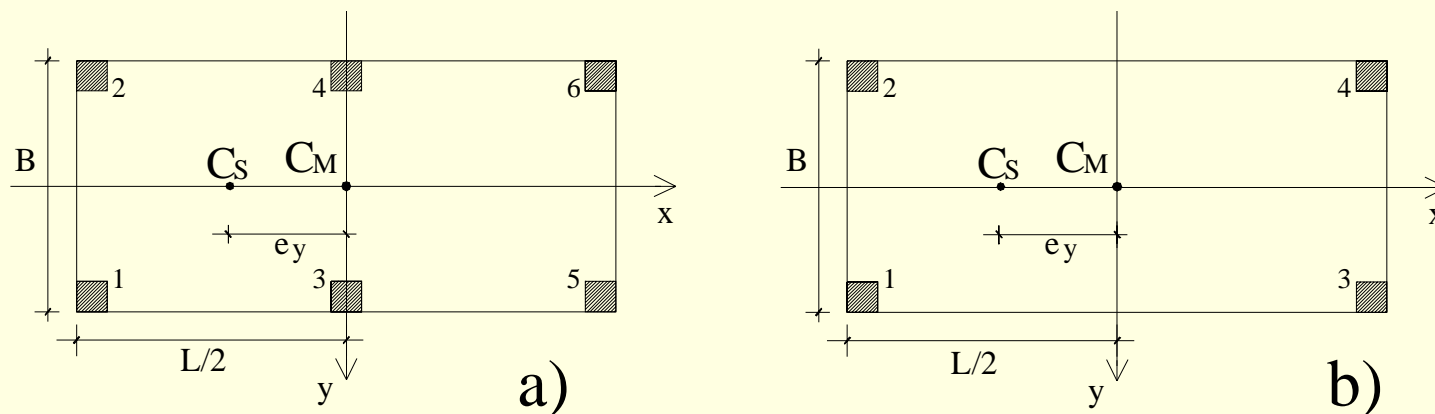
- Recentemente, sono apparsi diversi contributi atti ad estendere i metodi proposti per renderli applicabili a strutture 3D asimmetriche in pianta.
- Tra questi, Fajfar *et al.* (2005) propongono di combinare i risultati ottenuti con un'analisi push-over del modello strutturale 3D ed un'analisi dinamica modale: la push-over fornisce lo spostamento target e la distribuzione di deformazioni lungo l'altezza, l'analisi dinamica lineare associata allo spettro di risposta fornisce la distribuzione in pianta degli incrementi di spostamenti dovuti agli effetti torsionali.
- Ipotesi fondamentale del metodo è che la predizione elastica della **forma** dell'involuppo degli spostamenti in pianta risulti conservativa rispetto all'effettiva risposta non lineare.
- **OBIETTIVO DELLO STUDIO:** Verificare questa assunzione con riferimento a schemi strutturali differenti per numero di elementi resistenti verticali e per valori dei parametri che governano la risposta torsionale inelastica – eccentricità e centrifugazione delle resistenze.

ANALISI: Input utilizzato

- I sistemi sono soggetti ad un input orizzontale bi-direzionale.
- Si è utilizzato un insieme di sette paia di componenti orizzontali di registrazioni reali, la cui media ben rappresenta l'azione sismica proposta dall' OPCM 3431, per la zona 1 ed un suolo di tipo B. Gli accelerogrammi sono scalati ad una $PGA = 0.35 g$

ANALISI: SISTEMI CONSIDERATI

- Sistemi mono-simmetrici con eccentricità delle rigidezze, torsio-rigidi.
- Due configurazioni per numero e distribuzione in pianta degli elementi resistenti verticali: 6 e 4 elementi.



- a) Schema rappresentativo di un numero considerevole di strutture reali (a parità di eccentricità e centrifugazione di resistenze e rigidezze, il numero di elementi resistenti non influisce significativamente sulla risposta).
- b) Schema rappresentativo di strutture a pareti perimetrali.

ANALISI: SISTEMI CONSIDERATI

■ Tutti i sistemi presentano le seguenti caratteristiche:

- $\rho/L = 0.33$.
- Periodo traslazionale disaccoppiato T (e quindi rigidezza laterale totale del sistema K) uguale in direzione x e y .
- Ciascun elemento resistente è dotato di ugual rigidezza e resistenza in direzione x e y .
- Il coefficiente di smorzamento viscoso dei primi due modi di vibrare del sistema è assunto pari al 5%.
- Le resistenze laterali totali (in direzione x e y) F_x and F_y sono ricavate dallo spettro di progetto fornito dall' OPCM 3431, per la zona 1 ed un sulo di tipo B, assumendo un valore del fattore di progetto q pari a 4 (impegno plastico medio).
- Nella distribuzione della resistenza totale F_y tra gli elementi verticali, l'eccentricità delle resistenze è assunta pari a quella delle rigidezze $e_r = e_s$.

CASI STUDIO

- Caratteristiche dei sistemi:
- Mono-simmetrici ($e_x = 0$) con eccentricità di rigidezza, dotati di sei elementi resistenti; oltre ai valori dei parametri già forniti:
 - $e_s = E_s / L = 0.1$,
 - $e_r = E_r / L = 0.1$,
- Due varianti di ogni caso studio:
 - $T = 0.4$ s; $T = 0.8$ s.

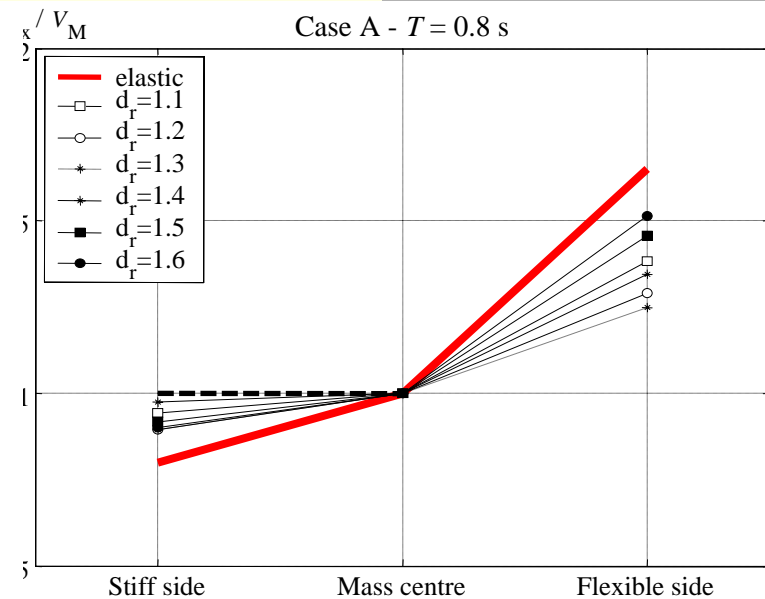
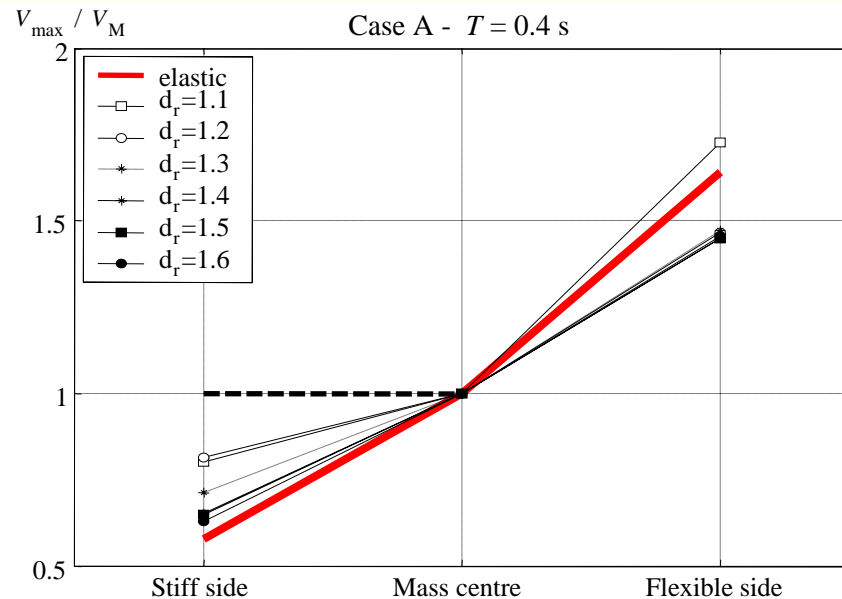
- CASO STUDIO n.1
 - $d_s = 1.2$
 - $d_r = 1.1, 1.2, \dots 1.6$.

- CASO STUDIO n. 2
 - $d_s = 1.6$
 - $d_r = 1.1, 1.2, \dots 1.6$.

CASI STUDIO: PARAMETRO DI RISPOSTA

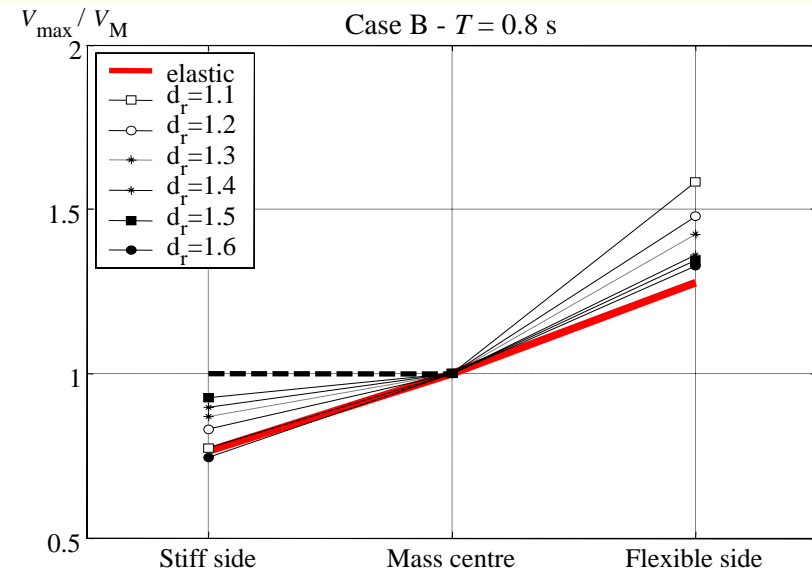
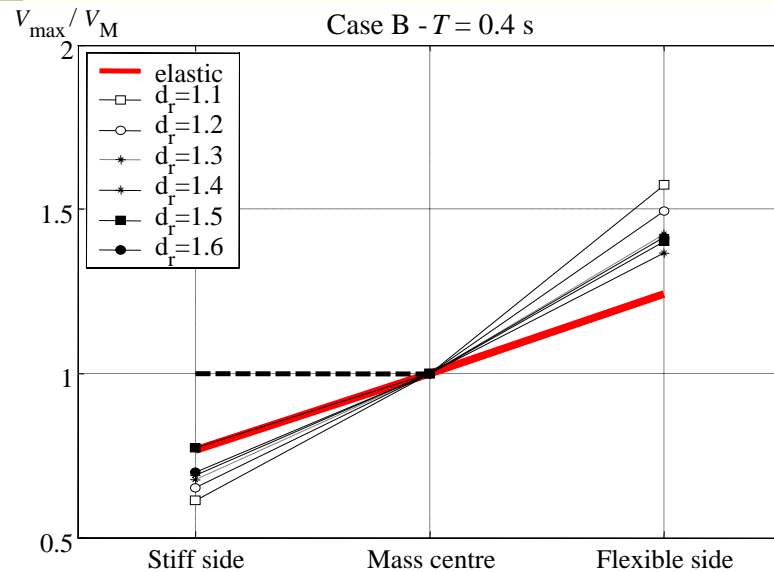
- Il parametro di risposta è lo spostamento laterale.
- Per ciascuno dei casi studio, si rappresenta l'involuppo della distribuzione degli spostamenti massimi in direzione y (V_{\max}), normalizzato allo spostamento (massimo) in direzione y del rispettivo centro di massa (V_M). Si rappresenta il valor medio dei risultati ottenuti dalle analisi numeriche, applicando i sette accelerogrammi considerati.
- L'involuppo degli spostamenti inelastici normalizzati è confrontato con il corrispondente involuppo elastico normalizzato.
- Come ulteriore confronto sul lato rigido, si rappresenta (linea tratteggiata) l'involuppo degli spostamenti normalizzati di valore costante pari all'unità. Si vuole infatti considerare che il metodo push-over modificato proposto da Fajfar et al.(2005) non consente riduzioni sul lato rigido dovuti ad effetti torsionali, in analogia con la cosiddetta "no-reduction rule" della normativa IBC (le forze di progetto sul lato rigido non possono essere minori di quelle previste per la struttura simmetrica equivalente).

1° CASO STUDIO: $d_s = 1.2$



- Sul lato flessibile, l'involuppo degli spostamenti laterali ottenuto con un'analisi elastica fornisce, in genere, una stima conservativa dell'effettiva risposta non lineare.
- Per il lato rigido, l'applicazione della '*no reduction rule*' risulta fondamentale per garantire una stima conservativa.

2° CASO STUDIO: $d_s = 1.6$



- Sistemi caratterizzati da un'elevata centrifugazione delle rigidezze sembrano presentare un'involuppo degli spostamenti inelastici, sul lato flessibile, maggiore della stima ottenuta con un'analisi elastica.
- Sul lato rigido, una riduzione degli spostamenti dovuta al comportamento torsionale non risulta accettabile, confermando l'efficacia della 'no reduction rule' nelle prescrizioni normative.

ANALISI PARAMETRICA

- **PARAMETRI TORSIONALI VARIATI:** I casi studio suggeriscono che la relazione che intercorre tra l'involuppo degli spostamenti inelastico ed elastico di un dato sistema possa dipendere dall'entità della centrifugazione delle rigidezze. L'analisi parametrica svolta è finalizzata a chiarire questo aspetto.
- **PARAMETRI INELASTICI:** I parametri significativi della risposta torsionale inelastica e_r , d_r sono assunti uguali ad e_s ed d_s , rispettivamente. In pratica, tutti i sistemi sono dotati di elementi resistenti verticali con resistenza proporzionale alla propria rigidezza.
- **PARAMETRI DI RISPOSTA:** Spostamento massimo V_{\max} normalizzato allo spostamento massimo del centro di massa V_M . L'elevato numero di analisi non consente di fornire, per ciascun sistema, l'involuppo degli spostamenti: si riporta invece, su due grafici distinti, il rapporto V_{\max}/V_M rispettivamente all'estremo flessibile e a quello rigido. Nel secondo grafico, è rappresentata anche la retta $V_{\max}/V_M = 1$.

ANALISI PARAMETRICA:

SISTEMI CON 6 ELEMENTI RESISTENTI

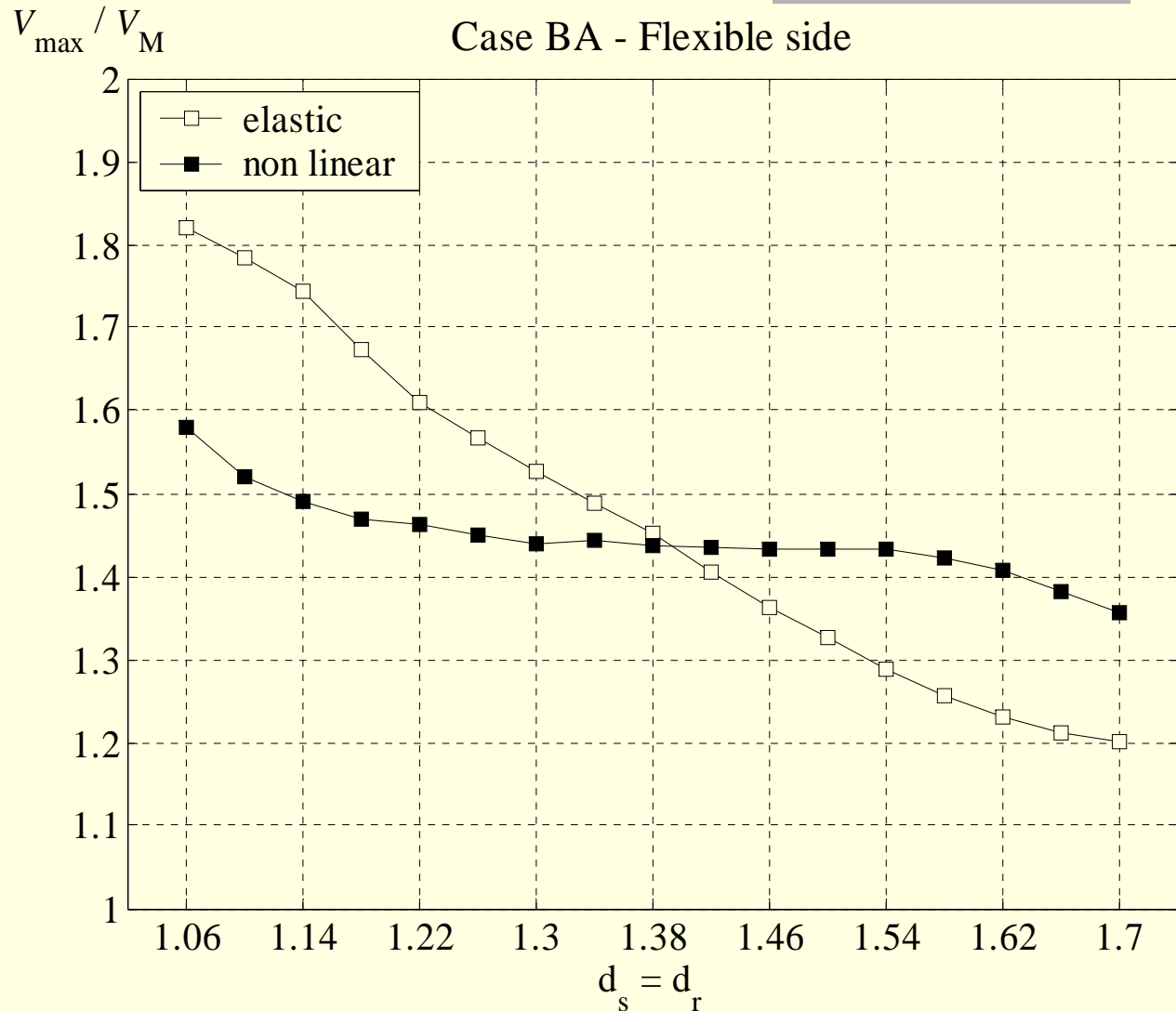
- Sistemi con 17 possibili diversi valori di $d_s = d_r$ ($=1.06, 1.1, 1.14, \dots 1.7$) e tre differenti periodi laterali T .

Case	T [s]	$e_s = e_r$	$d_s = d_r$
BA	0.4	0.1	1.06÷1.7
BB	0.8	0.1	1.06÷1.7
BC	1.2	0.1	1.06÷1.7

RISULTATI (6 Elementi, $T = 0.4s$) :

V_{max}/V_M - LATO FLESSIBILE

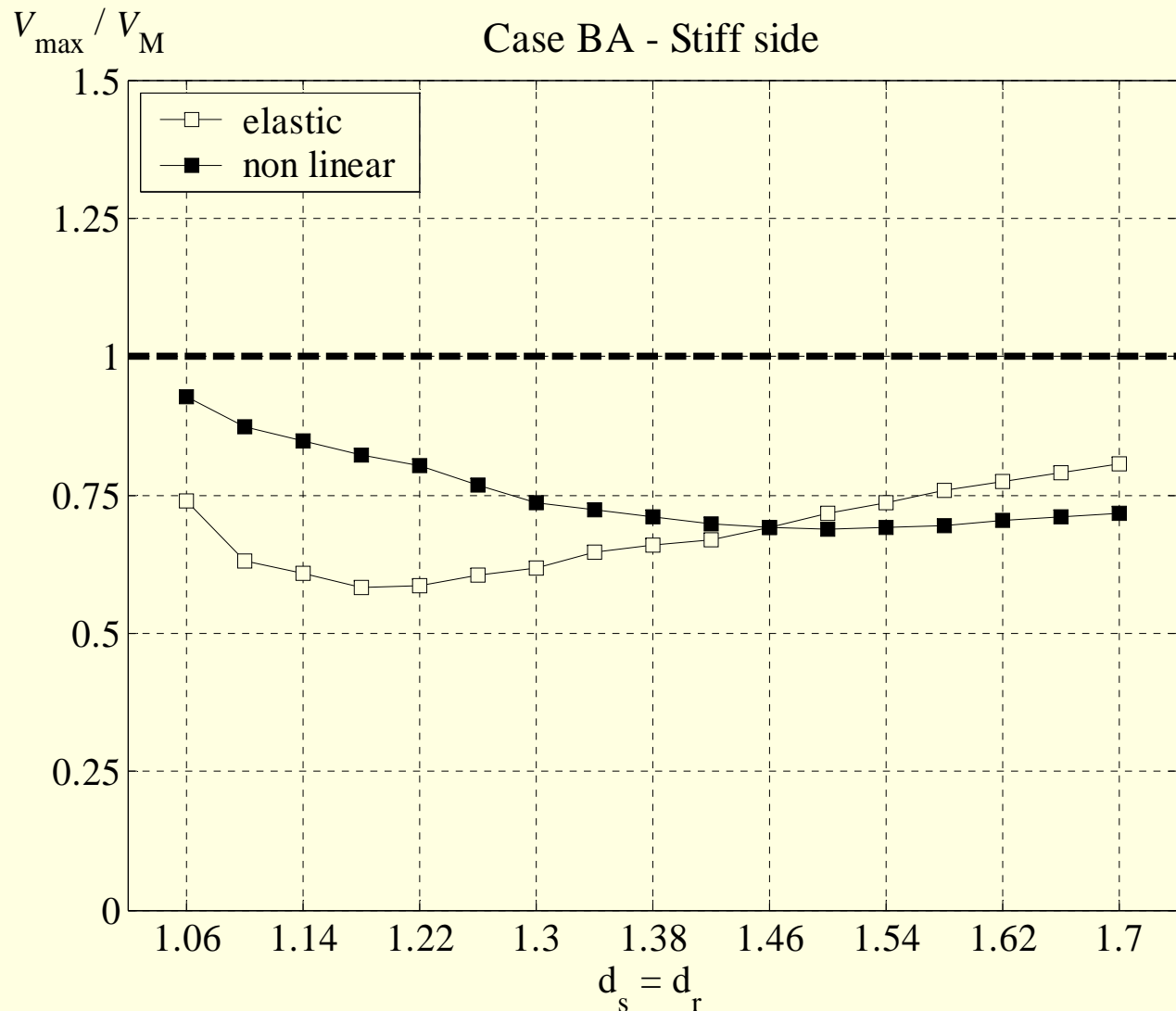
- I risultati hanno un andamento analogo per ogni caso analizzato:
- Per valori di d_s contenuti (strutture moderatamente torsio-rigide), gli spostamenti elastici sono maggiori di quelli non lineari.
- Da un certo valore di d_s in poi, la risposta inelastica è prevalente.



RISULTATI (6 Elementi, $T = 0.4s$):

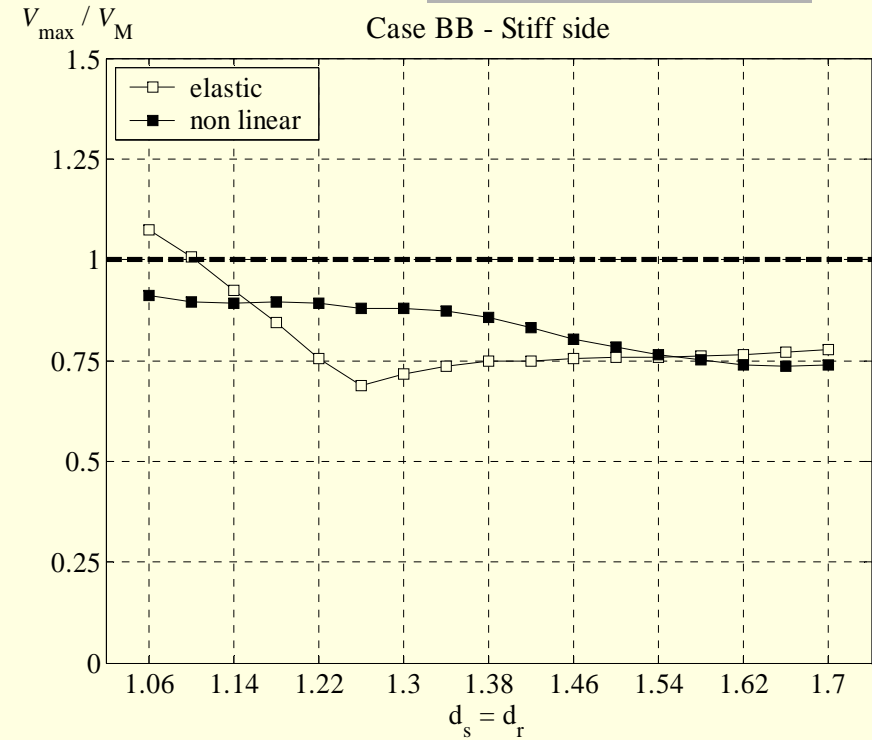
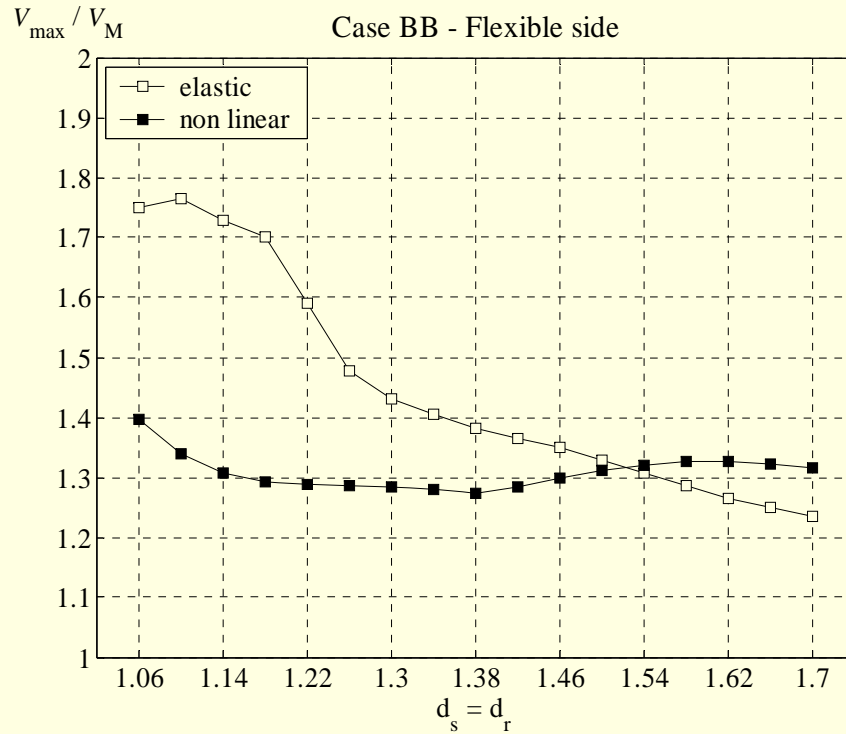
V_{max}/V_M - LATO RIGIDO

I risultati mostrano un andamento non uniforme nei vari casi analizzati: tuttavia, V_{max} risulta sempre minore di V_M , confermando la validità della 'no-reduction rule'.

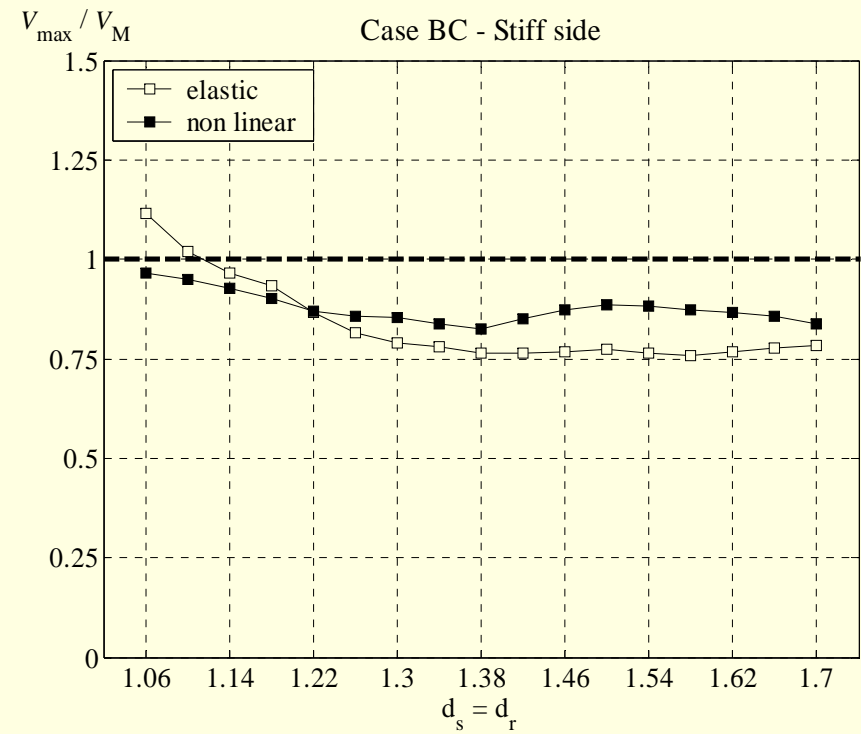
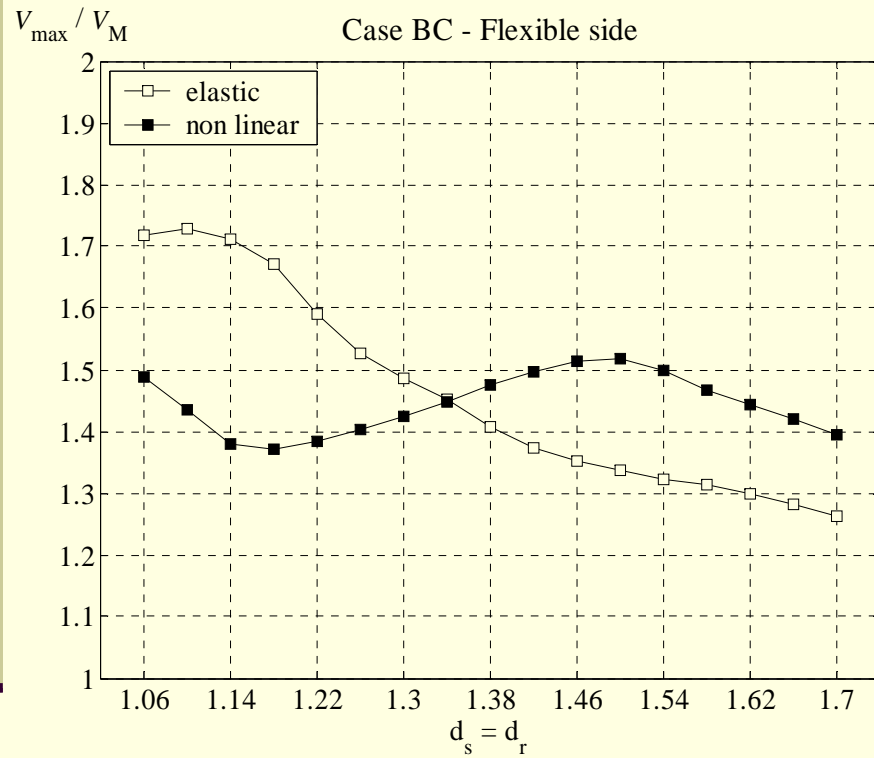


RISULTATI (6 Elementi, $T = 0.8s$):

V_{max}/V_M – Lato flessibile e rigido



RISULTATI (6 Elementi, $T = 1.2s$): V_{max}/V_M - lato flessibile e rigido



ANALISI PARAMETRICA: SISTEMI CON 4 ELEMENTI RESISTENTI

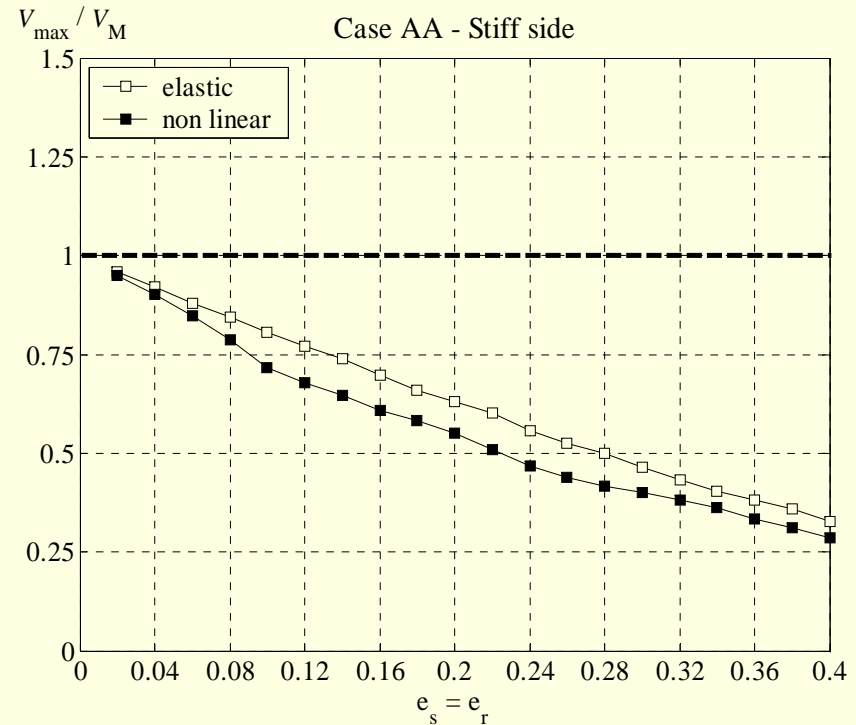
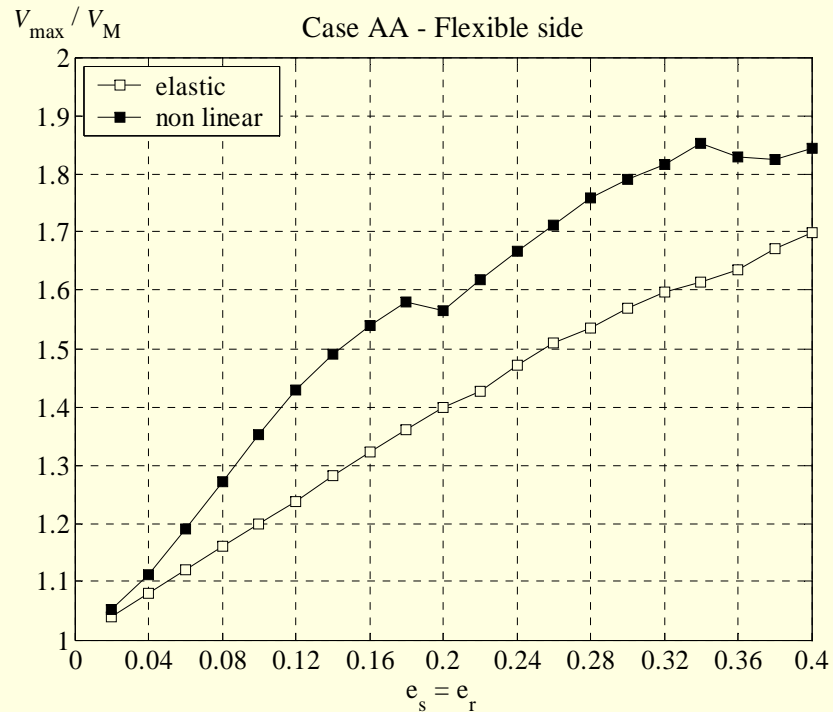
- Lo schema strutturale a 4 elementi resistenti è un caso particolare: Assunto che gli elementi 1 e 2 (3 e 4) siano uguali, qualsiasi distribuzione di rigidezze/resistenze fornisce un'unica coppia di valori e_s/e_r e d_s/d_r , ovvero e e d non sono parametri indipendenti.
- Per questi sistemi una distribuzione di rigidezze/resistenze corrispondente a valori di eccentricità realistici, comporta necessariamente valori elevati del raggio di rigidezze/resistenze.
- Si variano $d_r = d_s$ (1.7, ..1.2) ed $e_r = e_s$ (2%,...40%).

e	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20
d	1.7310	1.7279	1.7227	1.7153	1.7059	1.6942	1.6804	1.6642	1.6457	1.6248
e	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40
d	1.6014	1.5753	1.5465	1.5147	1.4799	1.4417	1.3999	1.3541	1.3040	1.2490

- Casi considerati
- $T = 0.4, 0.8, 1.2$ s:

Case	T [s]	$e_s = e_r$
AA	0.4	0.02÷0.4
AB	0.8	0.02÷0.4
AC	1.2	0.02÷0.4

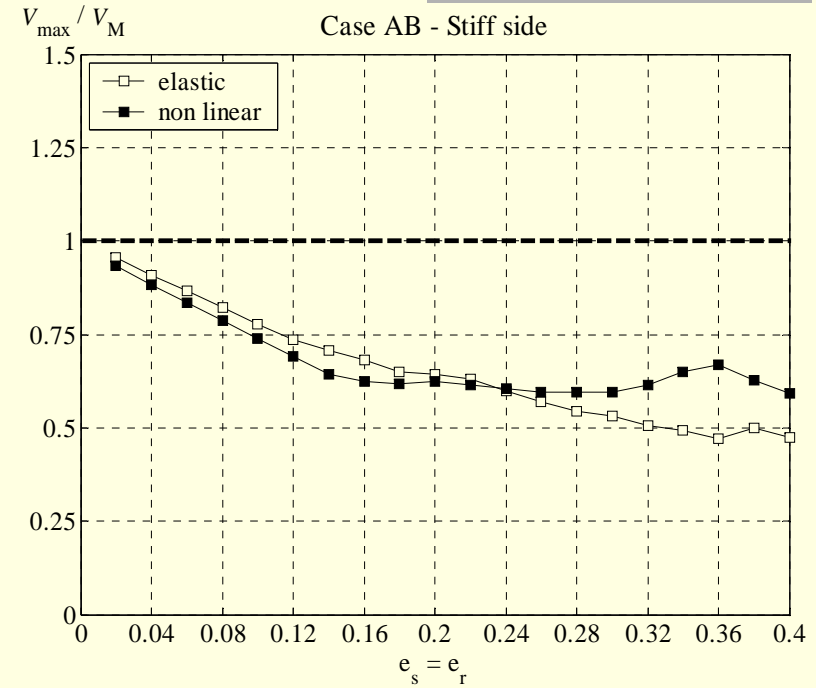
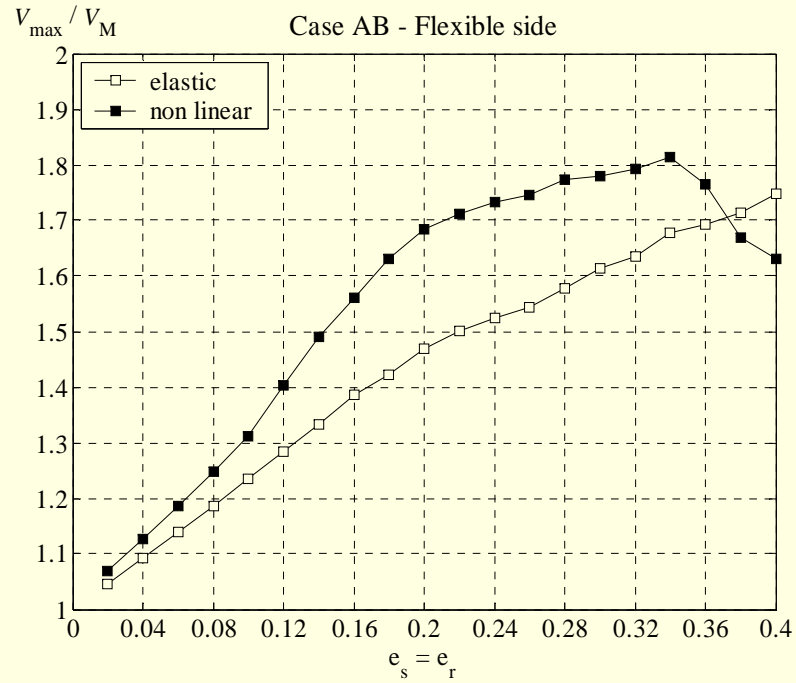
RISULTATI (4 Elementi – $T = 0.4s$): V_{max}/V_M - lato flessibile e rigido



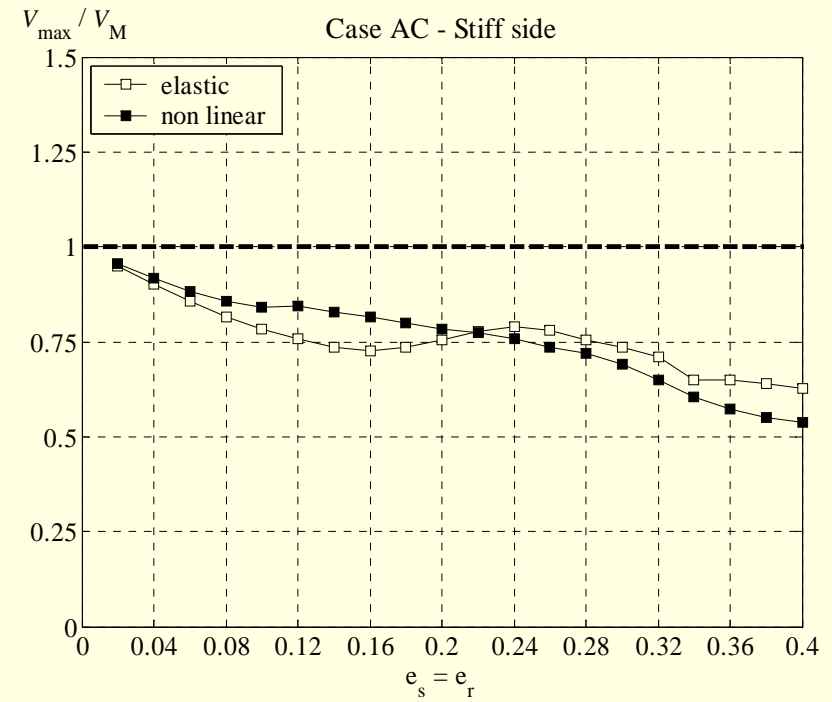
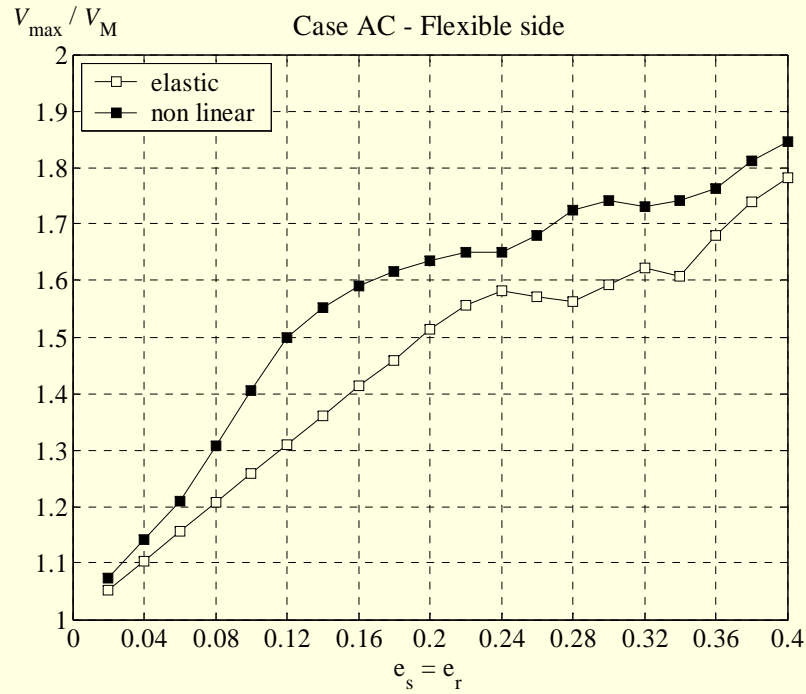
- In questo caso, lo spostamento inelastico all'estremo flessibile risulta sempre maggiore di quello elastico.
- Al lato rigido, i risultati non sono molto significativi: non si riscontrano grandi differenze tra il sistema elastico e quello non lineare.

RISULTATI (4 Elementi – $T = 0.8s$):

V_{max}/V_M - estremo flessibile e rigido



RISULTATI (4 Elementi – $T = 1.2s$): V_{max}/V_M - estremo flessibile e rigido



CONCLUSIONI

Le analisi svolte suggeriscono che:

- LATO FLESSIBILE:

- La distribuzione in pianta della domanda – in termini di spostamenti inelastici – può essere adeguatamente valutata tramite un'analisi elastica solo per sistemi moderatamente torsio-rigidi.
- Per sistemi caratterizzati da un raggio delle rigidezze relativamente elevato, la stima dell'inviluppo degli spostamenti in pianta ottenuta con un'analisi elastica non risulta conservativa.

- LATO RIGIDO:

- Non si evidenzia un trend generale dei risultati, anche se l'inviluppo dei massimi spostamenti in direzione y risulta spesso maggiore di quello valutato con un'analisi elastica.
- I risultati comunque confermano l'efficacia della “no reduction rule”.

Inoltre:

- Per sistemi con un numero elevato di elementi resistenti: in un certo range di valori del raggio delle rigidezze d_s , la stima elastica della domanda di spostamento è conservativa.
- Per sistemi con quattro elementi, l'analisi elastica tende a sottostimare sempre l'entità dell'amplificazione degli spostamenti laterali valutata con l'analisi dinamica inelastica.