

Corso di aggiornamento professionale

**Valutazione della vulnerabilità sismica
di edifici esistenti in c.a.**

Parma

27-28 maggio 2016

Aurelio Ghersi

09 - Analisi dei risultati e giudizio sulla struttura
(per schema assegnato)

Cosa abbiamo e quanto è affidabile?

Cosa abbiamo?

- Risposta della struttura (caratteristiche di sollecitazione, formazione di cerniere, deformazioni plastiche) ad una qualsiasi intensità del sisma

Quanto affidabile?

- I valori dipendono dalla distribuzione di forze assegnata
- La corrispondenza con accelerazione sismica dipende dal criterio utilizzato
- E tutto dipende dallo schema (geometria, resistenze) ipotizzato

Come procedere?

1. Esaminare i risultati per capire come si comporta la struttura man mano che cresce l'accelerazione sismica:

- Formazione progressiva di cerniere plastiche
- Rischio di rottura a taglio di pilastri, travi, nodi
- Progredire delle deformazioni plastiche (in particolare, riferimento alla rotazione alla corda e quindi allo spostamento di interpiano)

Un utile termine di paragone è costituito dall'analisi lineare con valutazione dei ρ (rapporto domanda su capacità)

Come procedere?

2. Valutare come cambia la risposta per lo schema assegnato:

- Cambiando la distribuzione di forze applicate o il modo di effettuare la pushover
- Cambiando il criterio di correlazione tra spostamenti ed accelerazione sismica
- Cambiando la formulazione per valutare la rotazione alla corda ultima

Come procedere?

3. Valutare come cambia la risposta al variare dello schema:
 - Per la possibile variazione di resistenza delle singole sezioni
 - Per la modifica dello schema, ad esempio per l'inserimento delle tamponature

1. Esame dei risultati per capire come si comporta la struttura man mano che cresce l'accelerazione sismica

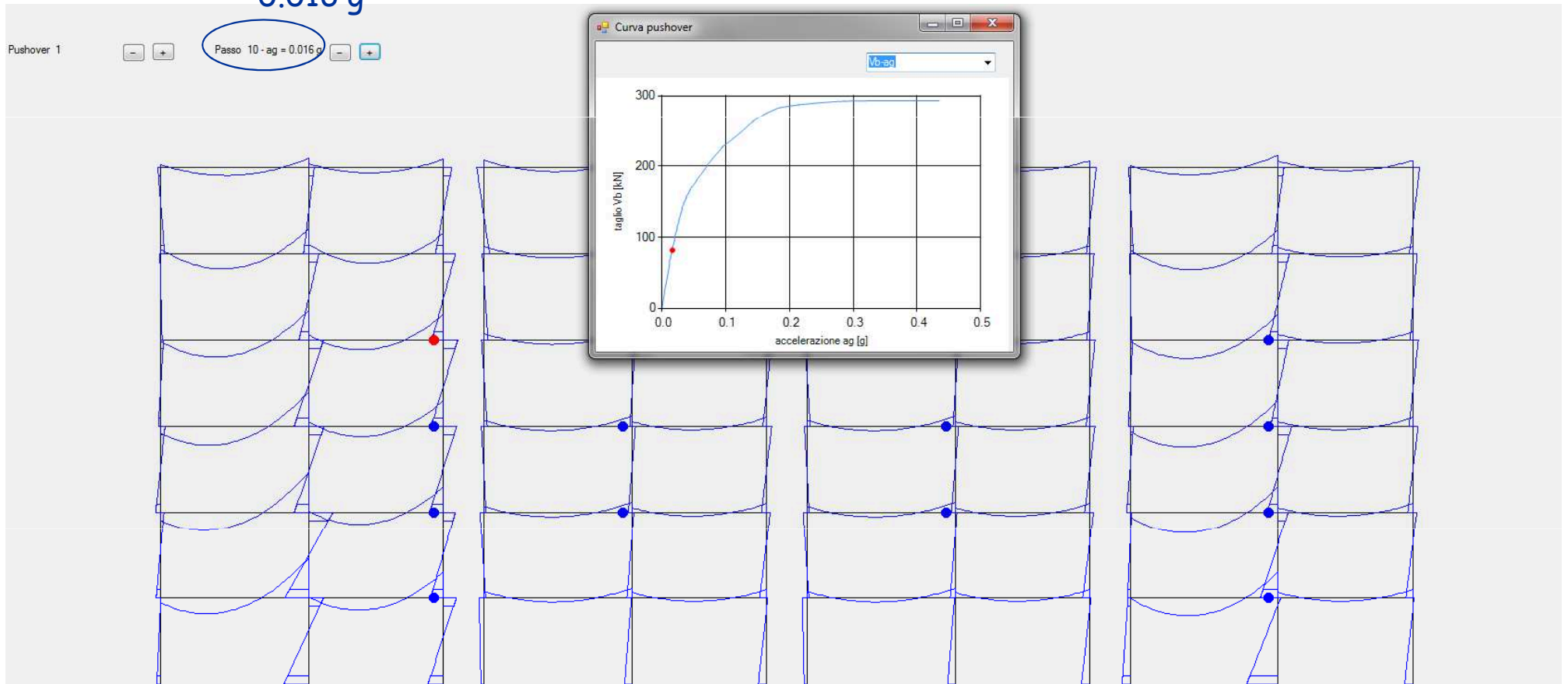
Formazione progressiva delle cerniere plastiche e di rotture a taglio

In particolare, controllare se:

- Le cerniere si formano prima nelle travi o nei pilastri
- Ci sono aste in cui le cerniere si formano precocemente (può avvenire ad esempio per aste corte)
- Se e quando si hanno rotture fragili
- Chiedersi sempre se i valori ottenuti corrispondono al comportamento fisico che ci si aspetta dalla struttura
- Confrontarlo col comportamento indicato dall'analisi lineare con valutazione dei p (rapporto domanda su capacità)

Formazione progressiva delle cerniere plastiche

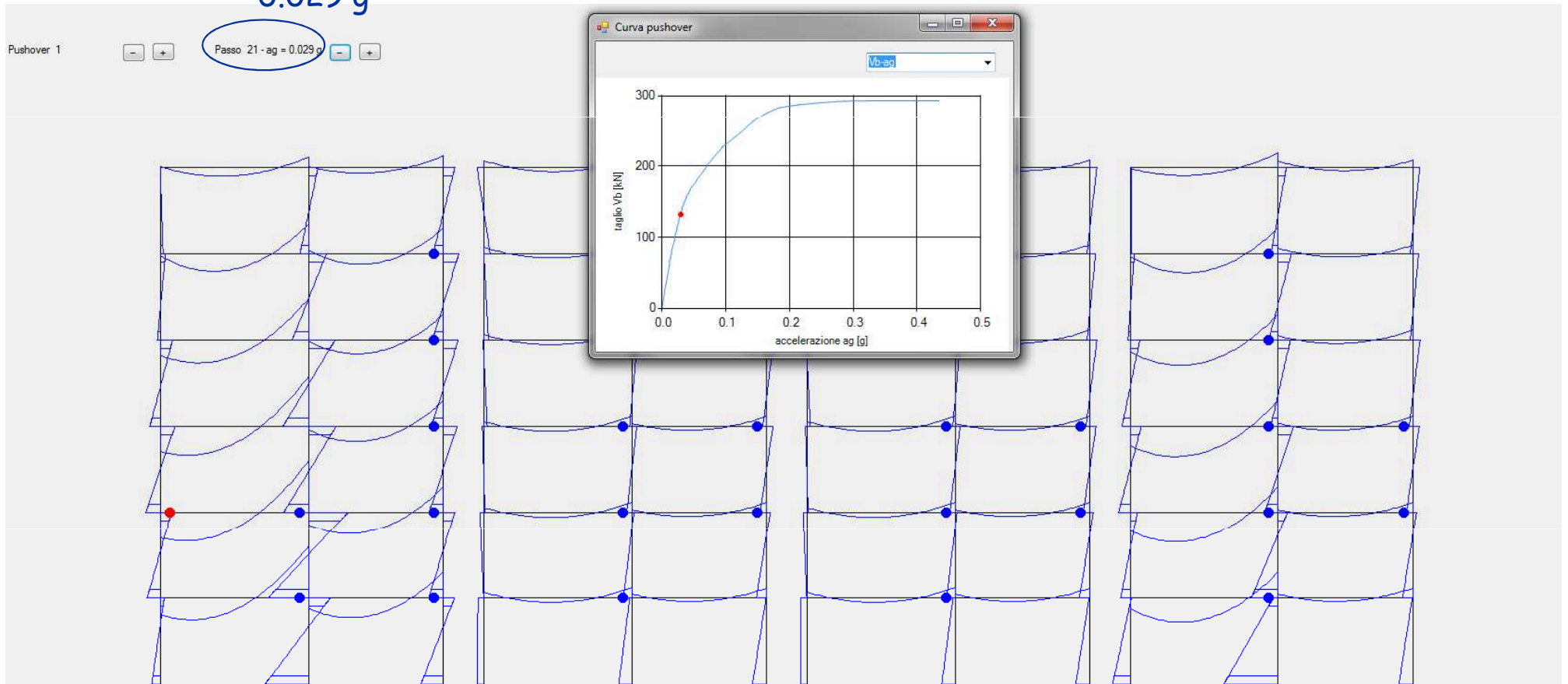
0.016 g



Iniziano a formarsi molto presto cerniere nelle travi (estremo destro, perché si somma effetto dei carichi ed effetto del sisma)

Formazione progressiva delle cerniere plastiche

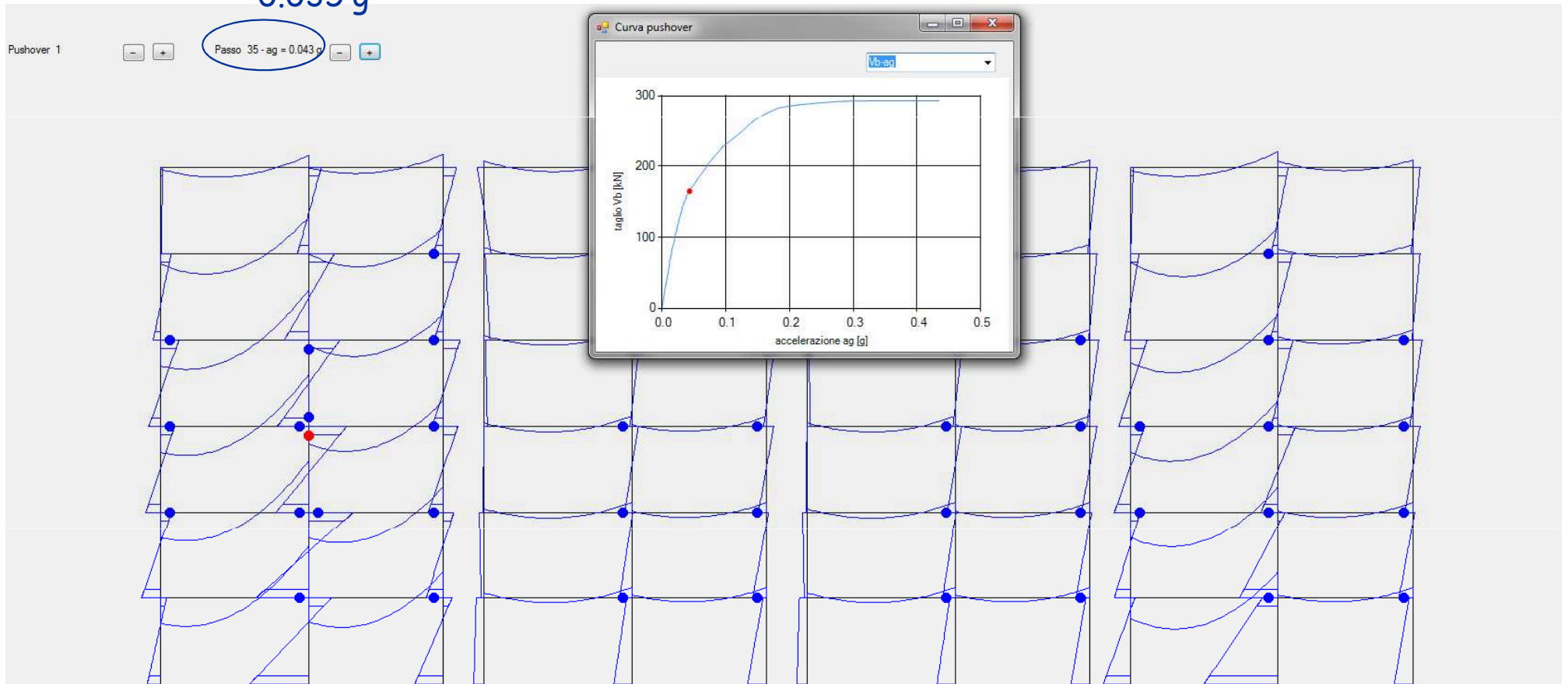
0.029 g



Ancora per accelerazioni molto basse, dopo numerose cerniere nell'estremo destro delle travi iniziano a formarsi cerniere anche nell'estremo sinistro

Formazione progressiva delle cerniere plastiche

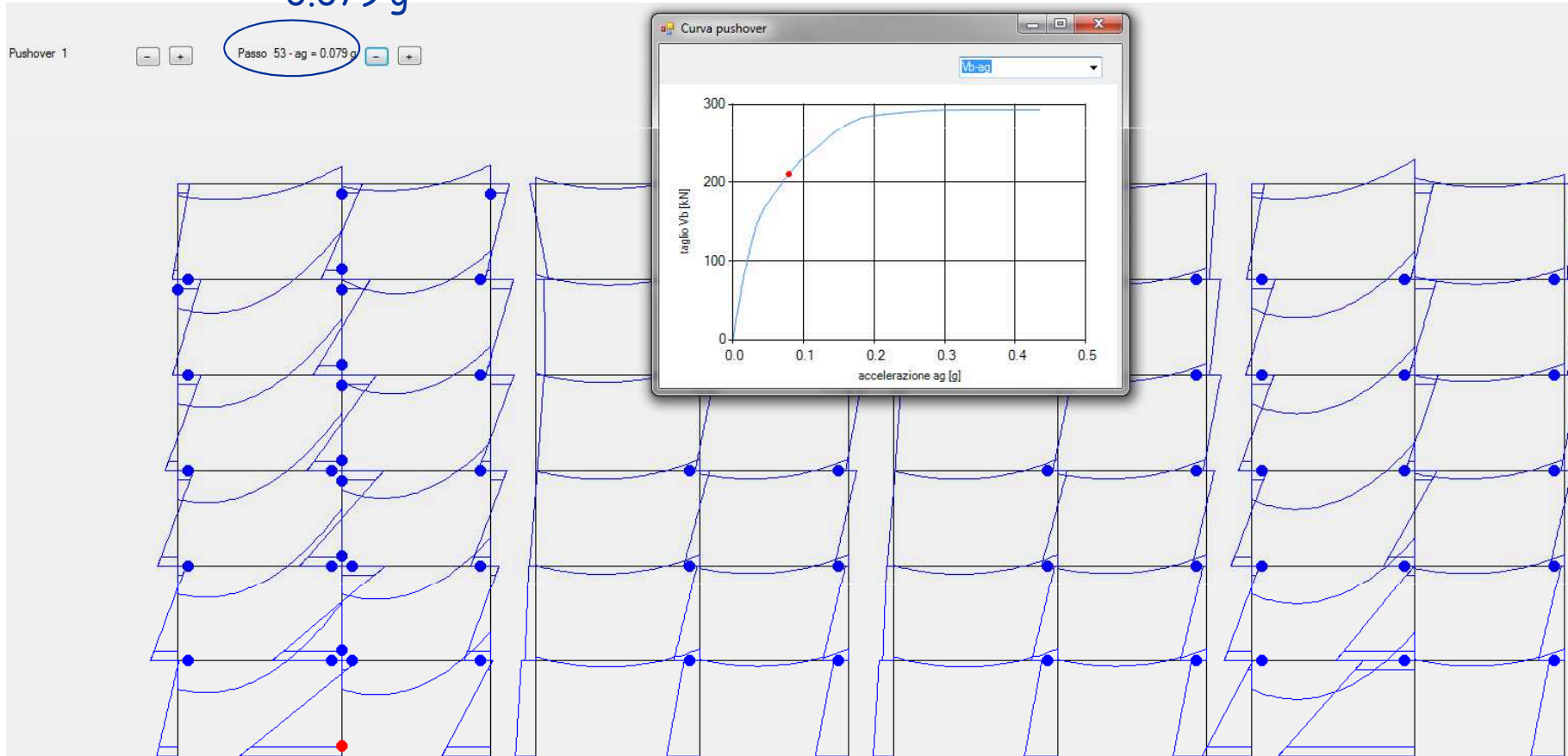
0.035 g



La prima cerniera in un pilastro si forma quando molte travi sono già plasticizzate. L'accelerazione sismica è ancora molto bassa

Formazione progressiva delle cerniere plastiche

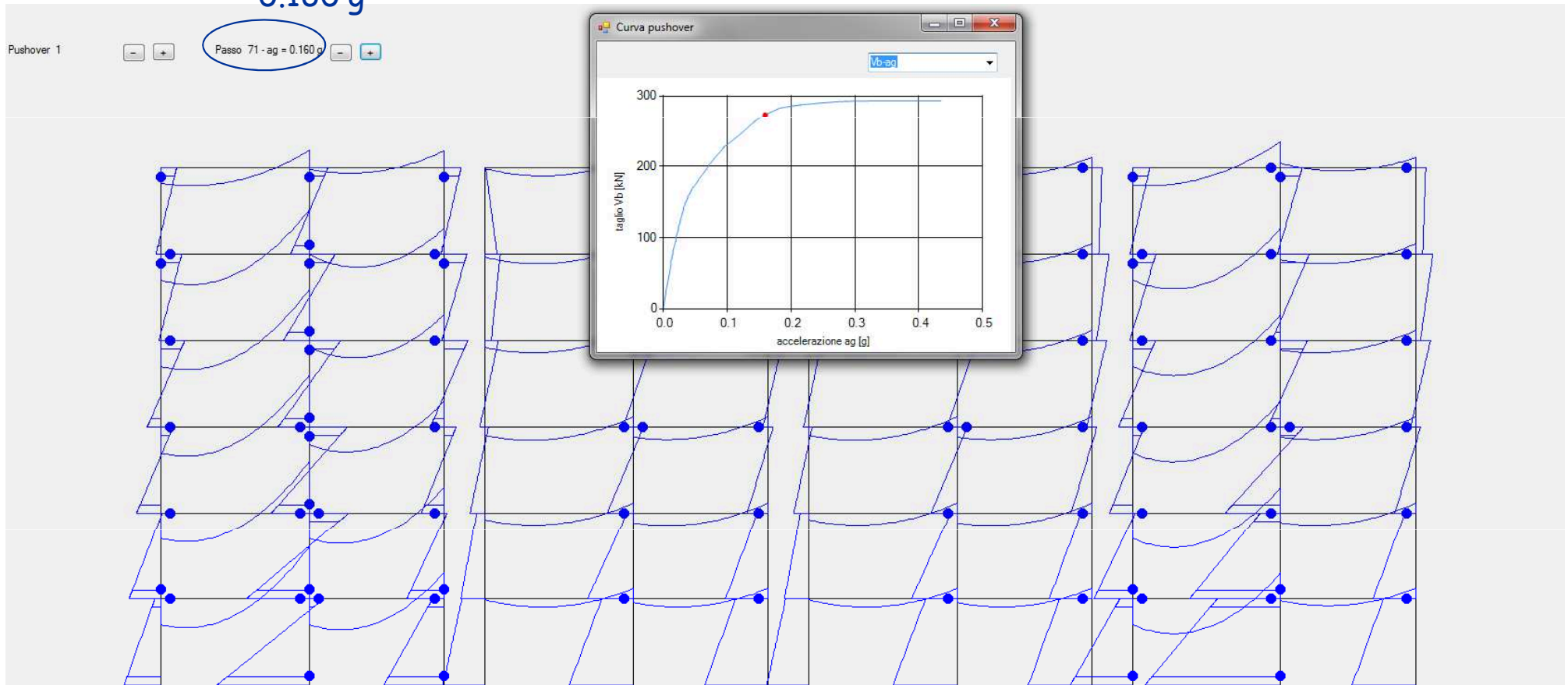
0.079 g



Per un valore di a_g che comincia ad essere significativo (0.079 g) il pilastro 9 è danneggiato a tutti i piani, ma gli altri pilastri sono ancora integri

Formazione progressiva delle cerniere plastiche

0.160 g



Per un valore di a_g pari a 0.16 g la struttura ha raggiunto il 90% della sua capacità (in termini di V_b) ed è danneggiata in maniera diffusa, ma sempre principalmente nelle travi

Formazione progressiva delle cerniere plastiche

Commento

- La struttura ha resistenza molto bassa e quindi inizia a danneggiarsi per valori molto bassi di a_g
Non buono
- Si ha un danneggiamento diffuso delle travi, perché la loro resistenza è particolarmente bassa
- Non si hanno danneggiamenti concentrati in zone particolari
- I pilastri iniziano a danneggiarsi solo dopo che molte travi sono danneggiate
Buono

Comportamento delle aste

duttile o fragile

Commento

- La plasticizzazione delle travi indica un comportamento duttile
Buono
- La plasticizzazione nei pilastri è poco diffusa, ma ne andrebbe controllata la duttilità
Da approfondire
- Non si sono avute rotture a taglio nei pilastri
Buono

Nota: controllo nodi non effettuato, ma si deve fare

Progredire delle deformazioni plastiche

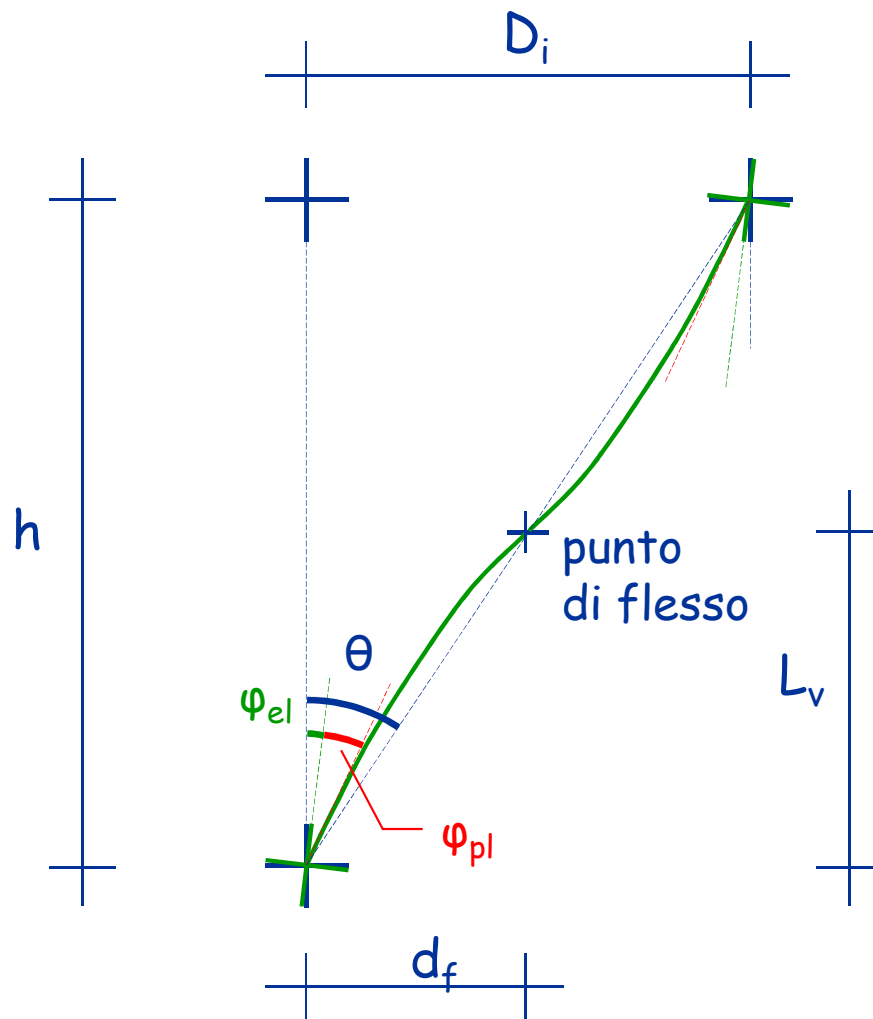
- Le travi sono duttili (salvo rari casi)
- I pilastri possono avere un comportamento fragile (dipende da sezione, armature, ma soprattutto da sforzo normale e resistenza del calcestruzzo)



Occorre controllare la rotazione plastica:

- Rotazione plastica della singola sezione (Controllo locale, più oneroso)
- Rotazione alla corda dei pilastri (Controllo globale, molto più agevole)

Deformazione plastica dei pilastri e rotazione alla corda



θ rotazione rispetto
alla corda

$$\theta = \frac{d_f}{L_v} \cong \frac{d_f}{h/2}$$

Se la situazione è uguale
in testa e al piede

$$\theta = \frac{D_i}{h}$$

$$D_i = \theta h$$

Deformazione plastica dei pilastri e rotazione alla corda

- Se la rotazione elastica dei nodi è molto piccola ed il punto di flesso è circa a metà altezza è molto comodo usare nel giudizio lo spostamento di interpiano D_i , assumendo $D_i = \theta h_{net}$

Perfetto per un primo giudizio rapido

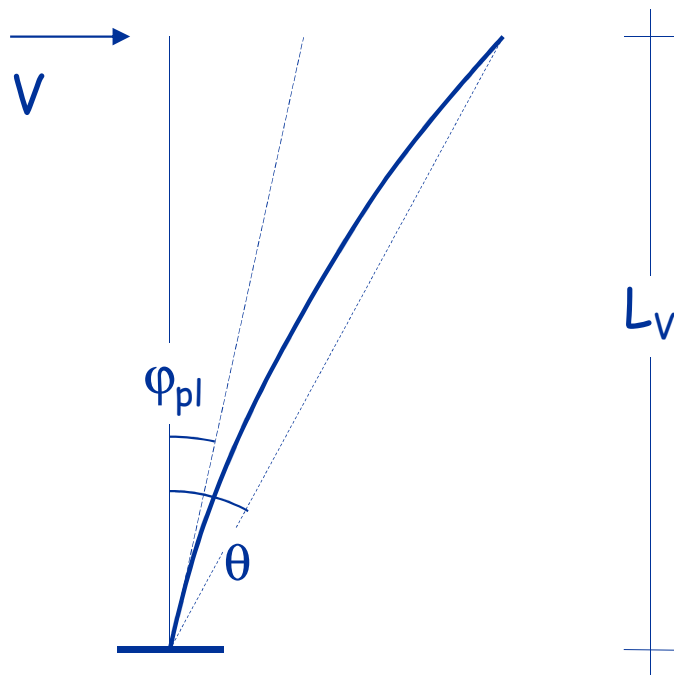
- Se questo non è vero occorre calcolare θ tenendo conto dell'effettivo valore di φ_{el} e L_v
 - Più complicato
 - Più semplice ragionare in termini di φ_{pl} (fornito direttamente dal programma)
 - Occorre conoscere $\varphi_{pl,u}$ o correlarlo a θ_u

Necessario a volte per un giudizio più preciso

Rotazione plastica dei pilastri

valore ultimo

- Può essere calcolata con apposite formule o con programmi (ad esempio RC_NL)
- Può essere messa in relazione al valore ultimo della rotazione alla corda



$$\phi_{pl,u} = \theta_u - \frac{V_u L_v^2}{3EI}$$

Rotazione alla corda

formulazione sperimentale

- Valore limite della rotazione alla corda a collasso (CO, ovvero SLC)

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} 0,016 \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega)} f_c \right]^{0,225} \left(\frac{L_V}{h} \right)^{0,35} 25^{\left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1,25^{100 \rho_d})$$

- Moltiplicare per 0.85 negli elementi non dotati di adeguati dettagli antisismici
- Moltiplicare per 0.75 in presenza di barre lisce o ancoraggi non sufficienti

Da studi di Panagiotakis e Fardis

Rotazione alla corda

formulazione sperimentale - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} 0,016 \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01; \omega)}{\max(0,01; \omega)} f_c \right]^{0,225} \left(\frac{L_V}{h} \right)^{0,35} 25^{\left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1,25^{100 \rho_d})$$

$\gamma_{el} = 1.5$ per gli elementi primari

$$\frac{1}{\gamma_{el}} = 0.6667$$

Rotazione alla corda

formulazione sperimentale - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} 0,016 \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega)} f_c \right]^{0,225} \left(\frac{L_V}{h} \right)^{0,35} 25^{\left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1,25^{100 \rho_d})$$

$$f_c = \frac{f_{cm}}{FC \gamma_c} = \frac{19}{1,2 \times 1,5} = 10,56 \text{ MPa}$$

$$v = \frac{N}{A_c f_c} = \frac{400 \times 10^3}{900 \times 10^2 \times 10,56} = 0,4211$$

$$0,3^v = 0,6023$$

Nota:
La rottura è fragile. Quindi si devono usare come riferimento le resistenze divise per γ

Rotazione alla corda

formulazione sperimentale - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} 0,016 \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega)} f_c \right]^{0,225} \left(\frac{L_V}{h} \right)^{0,35} 25^{\left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1,25^{100 \rho_d})$$

$$\omega = \frac{A_s}{b h} \frac{f_y}{f_c} \quad \omega' = \frac{A'_s}{b h} \frac{f_y}{f_c} \quad \text{per pilastri } \omega = \omega'$$

$$\left[\frac{\max(0.01, \omega')}{\max(0.01, \omega)} f_c \right]^{0.225} = 10.56^{0.225} = 1.6994$$

Rotazione alla corda

formulazione sperimentale - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} 0,016 \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega)} f_c \right]^{0,225} \left(\frac{L_v}{h} \right)^{0,35} 25^{\left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1,25^{100 \rho_d})$$

$$L_v = 135 \text{ cm}$$

$$h = 30 \text{ cm}$$

luce di taglio = distanza dal punto di flesso
(metà della lunghezza netta del pilastro)

$$\left(\frac{L_v}{h} \right)^{0,35} = \left(\frac{135}{30} \right)^{0,35} = 1.6929$$

Rotazione alla corda

formulazione sperimentale - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} 0,016 \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega)} f_c \right]^{0,225} \left(\frac{L_V}{h} \right)^{0,35} 25^{\left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1,25^{100 \rho_d})$$

Contributo delle staffe: per staffatura modesta viene circa 1

$$\rho_{st} = \frac{A_{st} l_{tot,st}}{s b_0 h_0} = \frac{0.2827 \times 88}{25 \times 22 \times 22} = 0.002056$$

Rotazione alla corda

formulazione sperimentale - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} 0,016 \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega)} f_c \right]^{0,225} \left(\frac{L_V}{h} \right)^{0,35} 25^{\left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1,25^{100 \rho_d})$$

Contributo delle staffe: per staffatura modesta viene circa 1

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s'}{3 b_0} \right) \left(1 - \frac{s'}{3 h_0} \right) = \left(1 - \frac{25}{3 \times 22} \right) \left(1 - \frac{25}{3 \times 22} \right) = 0.3859$$

$$\alpha_n = 1 - \sum_n \frac{b_i^2}{6 b_0 h_0} = 1 - 4 \times \frac{22^2}{6 \times 22 \times 22} = 0.3333$$

$$\alpha = \alpha_s \alpha_n = 0.1286$$

Rotazione alla corda

formulazione sperimentale - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} 0,016 \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega)} f_c \right]^{0,225} \left(\frac{L_V}{h} \right)^{0,35} 25^{\left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1,25^{100 \rho_d})$$

Contributo delle staffe: per staffatura modesta viene circa 1

Più precisamente, in questo caso, 1.0248 - lo trascuro

Contributo di ferri piegati - non ce ne sono

Rotazione alla corda

formulazione sperimentale - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} 0,016 \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega)} f_c \right]^{0.225} \left(\frac{L_V}{h} \right)^{0,35} 25^{\left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1,25^{100 \rho_d})$$

- Dotato di adeguati dettagli antisismici: NO (x 0.85)
- Barre lisce o ancoraggi non sufficienti: NO

Quindi, per CO (SLC):

$$\begin{aligned} \theta_{u(DS)} &= 0.85 \times 0.6667 \times 0.0160 \times 0.6023 \times 1.6994 \times 1.6929 = \\ &= 0.015711 \end{aligned}$$

Rotazione alla corda

formulazione analitica

- Valore limite della rotazione alla corda a collasso (CO, ovvero SLC):

Può essere calcolato partendo dalla rotazione della cerniera plastica

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

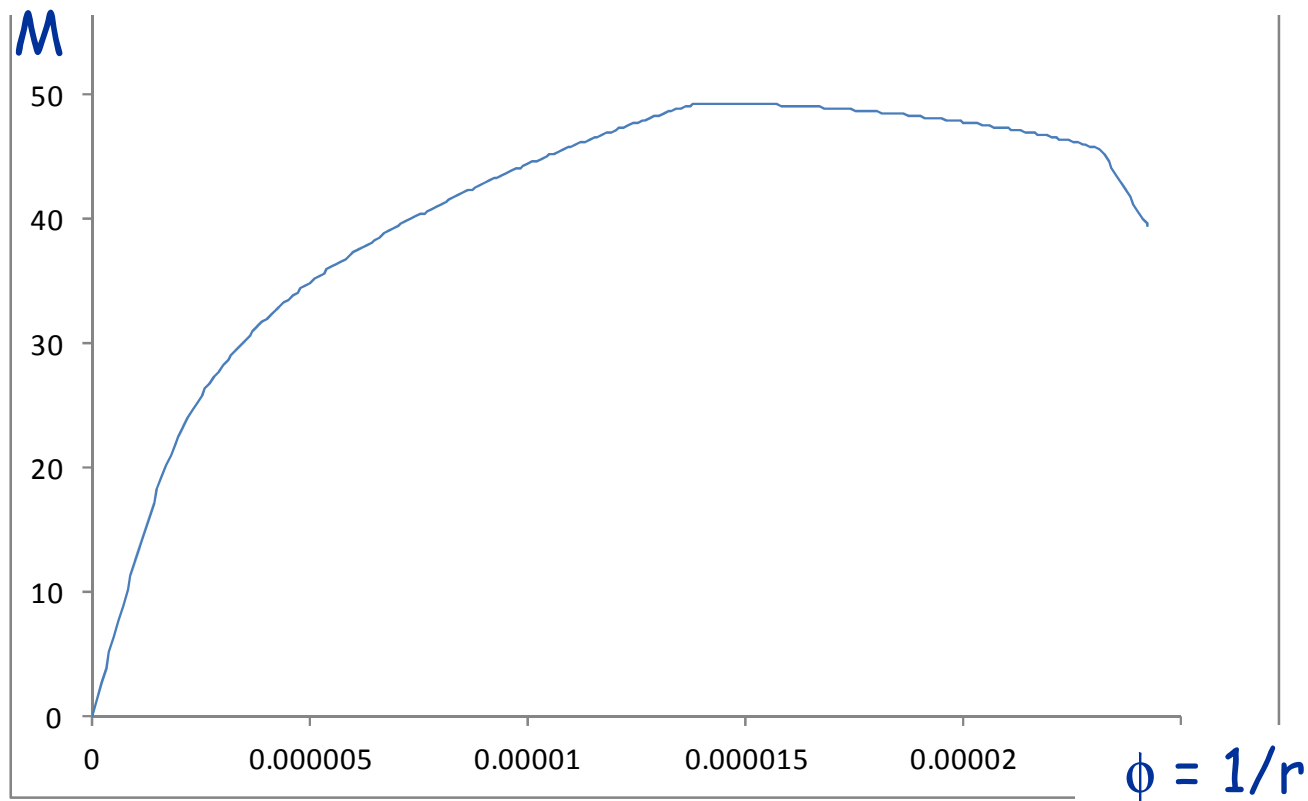
È meno agevole utilizzarla, perché occorre determinare preliminarmente la rotazione ultima della cerniera plastica

Rotazione alla corda

formulazione analitica - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

- Usando il programma RC_NL



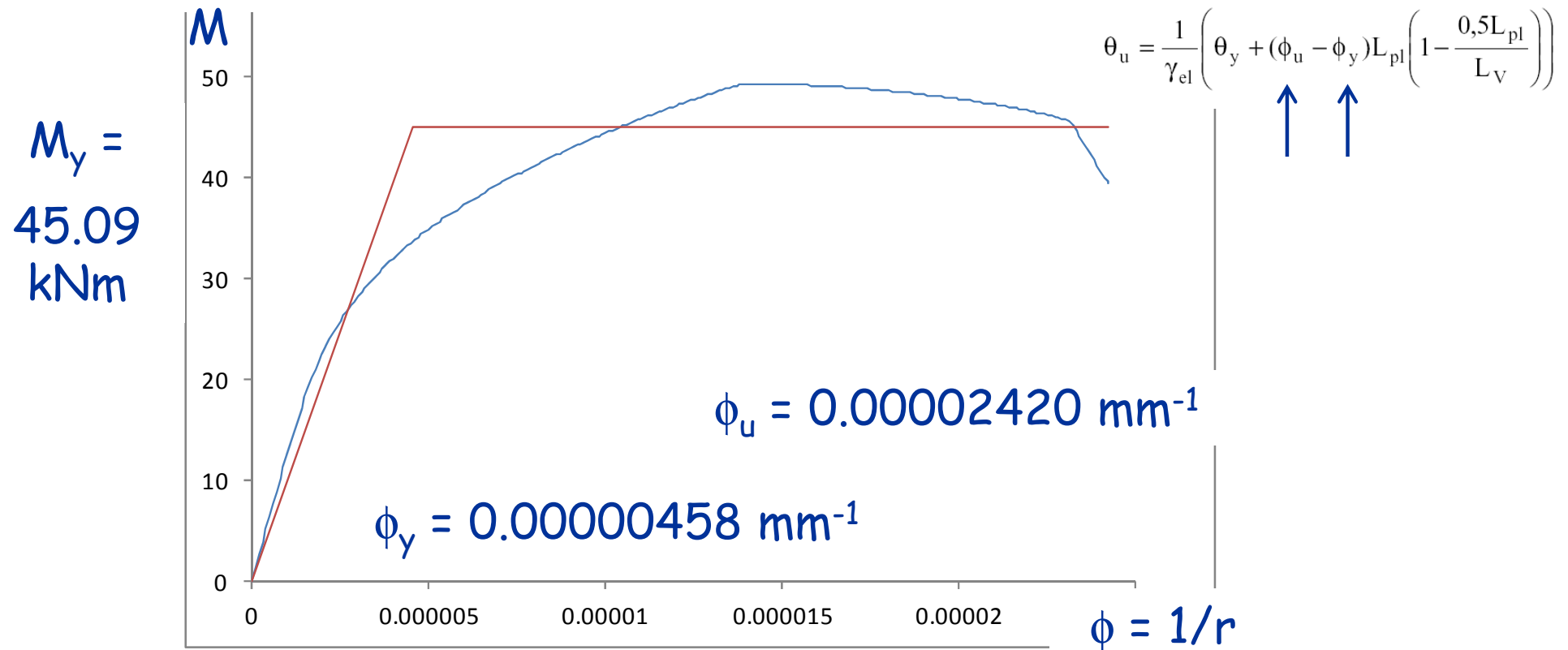
File TelY.xls - foglio rot corda

Rotazione alla corda

formulazione analitica - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

- e sostituendo la curva con una bilatera



Rotazione alla corda

formulazione analitica - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

- $L_v = 135$ cm metà dell'altezza netta del pilastro

- L_{pl} lunghezza della cerniera plastica

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

d_{bL} , diametro delle barre longitudinali = 12 mm

$$f_y = 420/1.2/1.15 = 304.4 \text{ MPa}$$

$$f_c = 19/1.2/1.5 = 10.56 \text{ MPa}$$

si ottiene $L_{pl} = 455.8 \text{ mm}$


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



Rotazione alla corda

formulazione analitica - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

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


- θ_y rotazione alla corda al primo snervamento

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

si ottiene $\theta_y = 0.004423$

Rotazione alla corda

formulazione analitica - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

- γ_{el} coefficiente di sicurezza per elementi primari

$$\gamma_{el} = 1$$

- θ_u rotazione alla corda al collasso

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} \left(\theta_y + (\phi_u - \phi_y) L_{pl} \left(1 - \frac{0,5 L_{pl}}{L_V} \right) \right) = 0.007904$$

Rotazione alla corda

confronto tra formulazioni

	sperim.	analit.
• Rotazione ultima alla corda, per SLC	0.015711	0.007904
• Rotazione ultima alla corda, per SLV (ottenuta moltiplicando $\times 0.75$)	0.011783	0.005366
• Spostamento ultimo alla corda, per SLV (ottenuta moltiplicando per $h_{netta} = 2700 \text{ mm}$)	31.81 mm	16.01 mm

RC_NL 3.0:
20.15 mm

La differenza è veramente forte

Rotazione alla corda

altre formulazioni possibili

- Esistono numerose altre formulazioni, ad esempio

Modello “Zhu et al 2007”

Per la *mediana* si può utilizzare l'espressione:

$$\theta_f = 0.049 + 0.716\rho + 0.120 \frac{\rho_{sx} f_{yw}}{f_c} - 0.042 \frac{s}{h} - 0.070\nu$$

Modello “Haselton et al 2007”

Per la *mediana* si può utilizzare l'espressione:

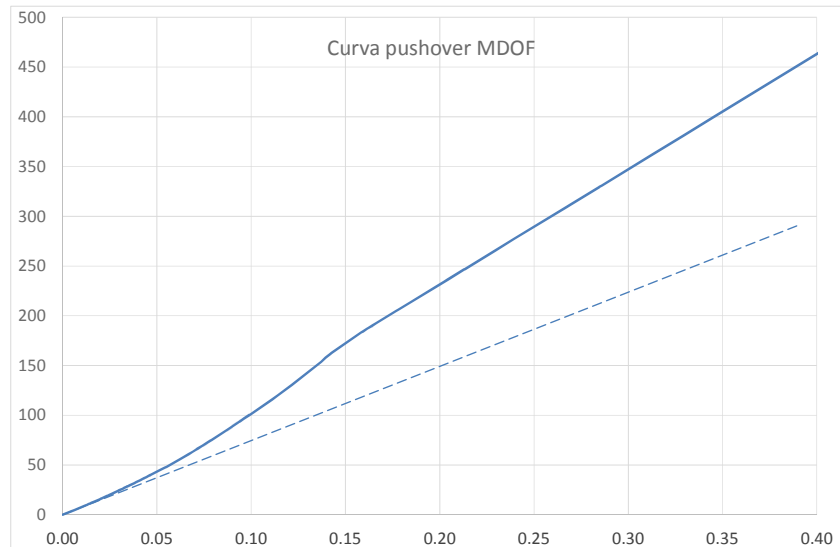
$$\theta_f = 0.14(1 + 0.4\alpha_{sl})(0.19)^{\nu}(0.02 + 40\rho_{sh})^{0.54}(0.62)^{0.01f_c}$$

Quindi qualunque numero deve essere preso solo come una indicazione di massima

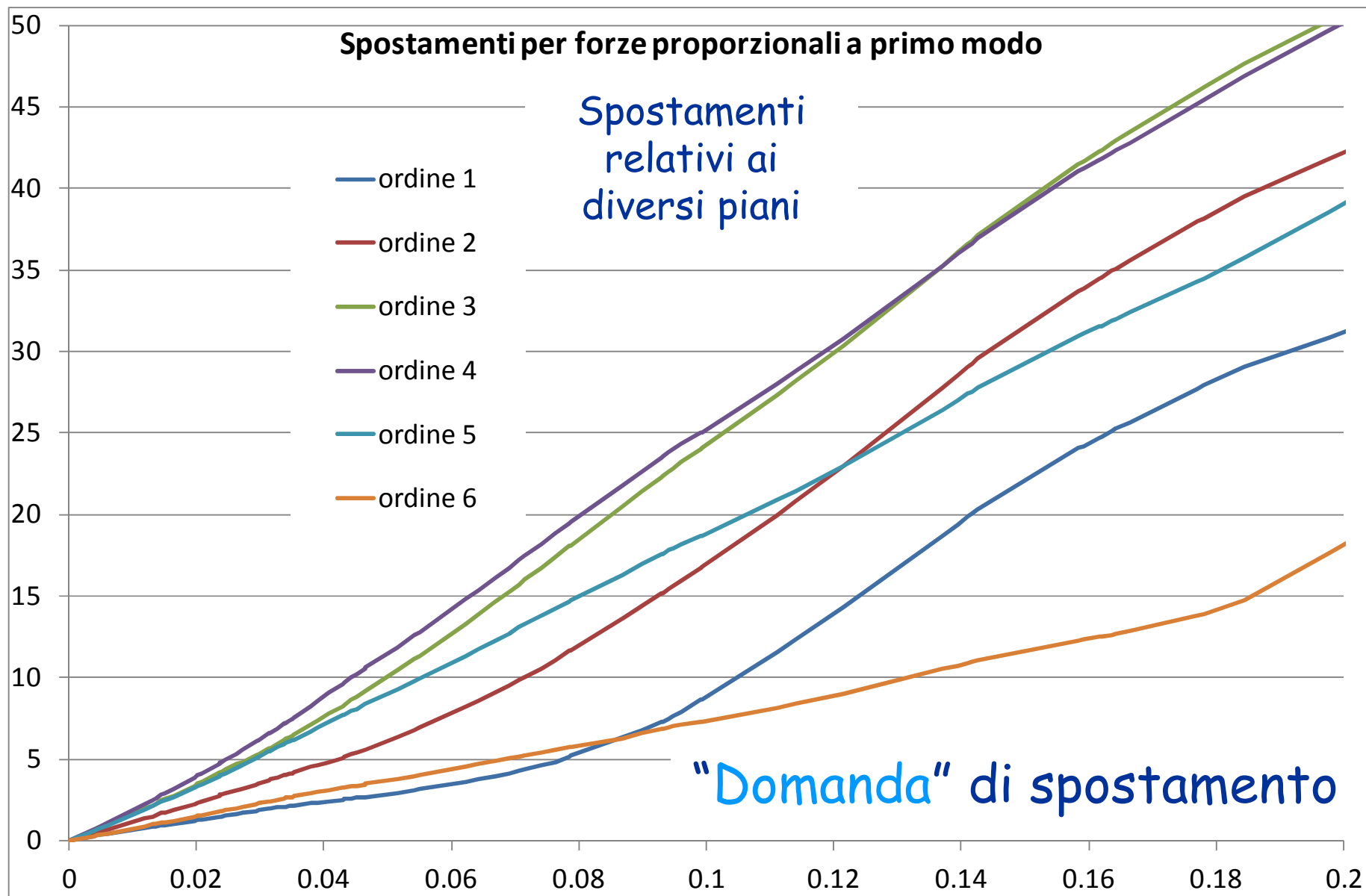
Progredire delle deformazioni plastiche fino alla rottura

- Al crescere dell'accelerazione sismica aumentano progressivamente (in maniera non lineare) le rotazioni plastiche
- Si può esprimere un giudizio sintetico guardando gli spostamenti relativi di interpiano

Abbiamo già visto lo spostamento D_t al variare di a_g , ma ora interessa quello di piano, non totale



Progredire delle deformazioni plastiche fino alla rottura



Progredire delle deformazioni plastiche fino alla rottura

- Per conoscere quando avviene la rottura occorre valutare la rotazione ultima alla corda per lo stato limite che stiamo considerando (SLV)
"Capacità" di spostamento
- Uso la formulazione sperimentale perché più agevole da applicare
 - La rotazione ultima dipende dalla sezione e dal materiale, ma anche dallo sforzo normale
 - Lo sforzo normale è dovuto principalmente ai carichi verticali, ma anche alle forze; quindi varia man mano

Nota: indico spostamenti ultimi D_u , anziché θ_u , perché più immediatamente comprensibili

Capacità al variare di N

Esempio:

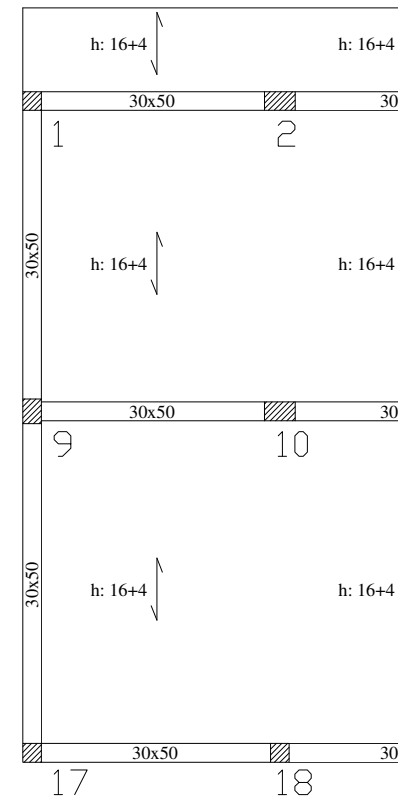
- Pilastro 9, 4° ordine (30x30)
 $N_q = 360.8 \text{ kN} \rightarrow D_u = 33.43 \text{ mm}$

per $a_g = 0.1 g$

$N = 383.3 \text{ kN} \rightarrow D_u = 32.49 \text{ mm}$

lo sforzo normale non è variato di molto
sia perché è interno (in direzione y)
sia perché le travi si plasticizzano

lo sforzo normale non cresce
ulteriormente perché le travi
sono plasticizzate



Capacità al variare di N

Esempio:

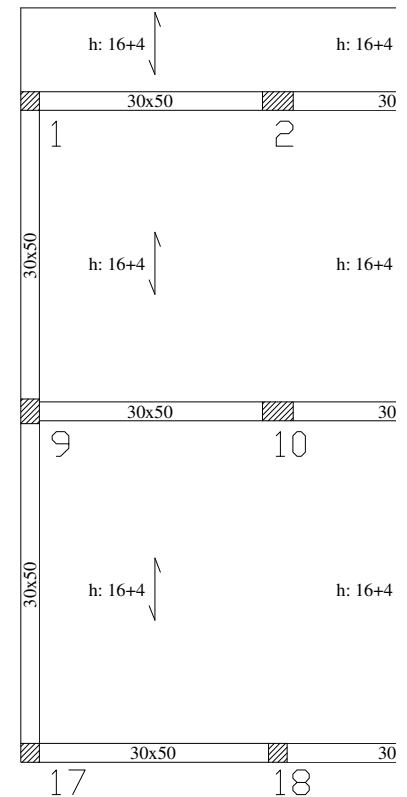
- Pilastro 1, 4° ordine (30x30)
 $N_q = 261.3 \text{ kN} \rightarrow D_u = 37.93 \text{ mm}$

per $a_g = 0.1 g$

$N = 293.3 \text{ kN} \rightarrow D_u = 36.46 \text{ mm}$

la variazione di sforzo normale è modesta
nonostante sia d'angolo perché le travi si
plasticizzano

lo sforzo normale non cresce
ulteriormente perché le travi
sono plasticizzate



Capacità al variare di N

Esempio:

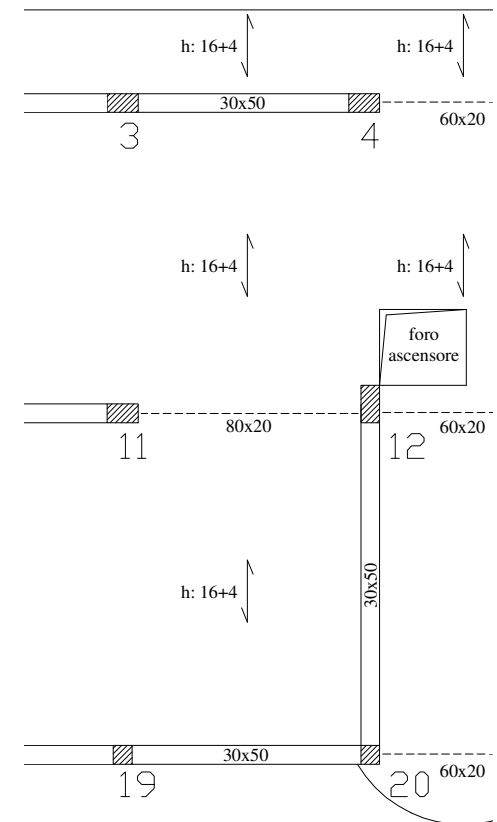
- Pilastro 12, 4° ordine (30x30)
 $N_q = 432.0 \text{ kN} \rightarrow D_u = 30.55 \text{ mm}$

per $a_g = 0.1 g$

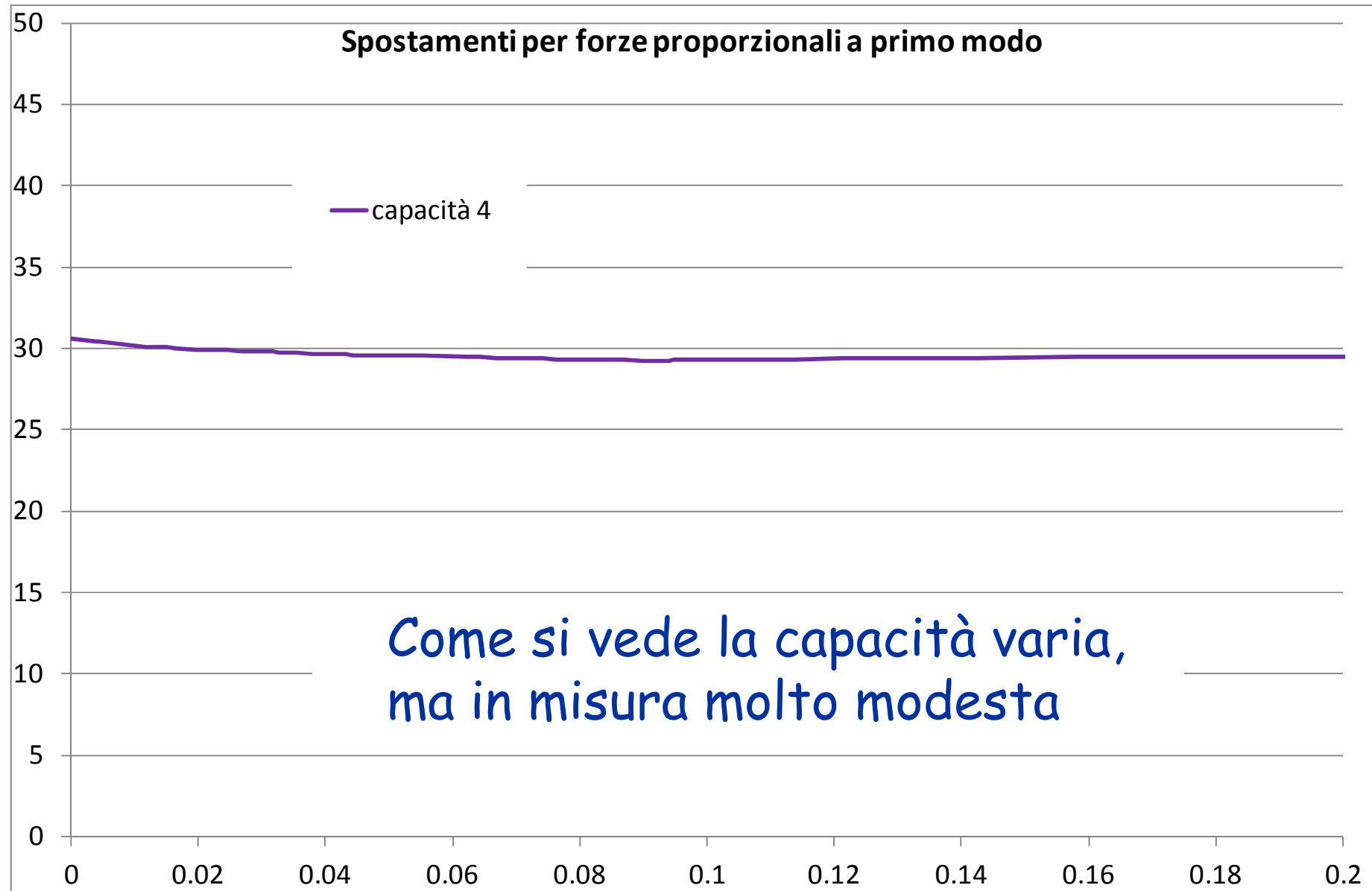
$N = 465.4 \text{ kN} \rightarrow D_u = 29.29 \text{ mm}$

nel 4° ordine è il pilastro col massimo
sforzo normale

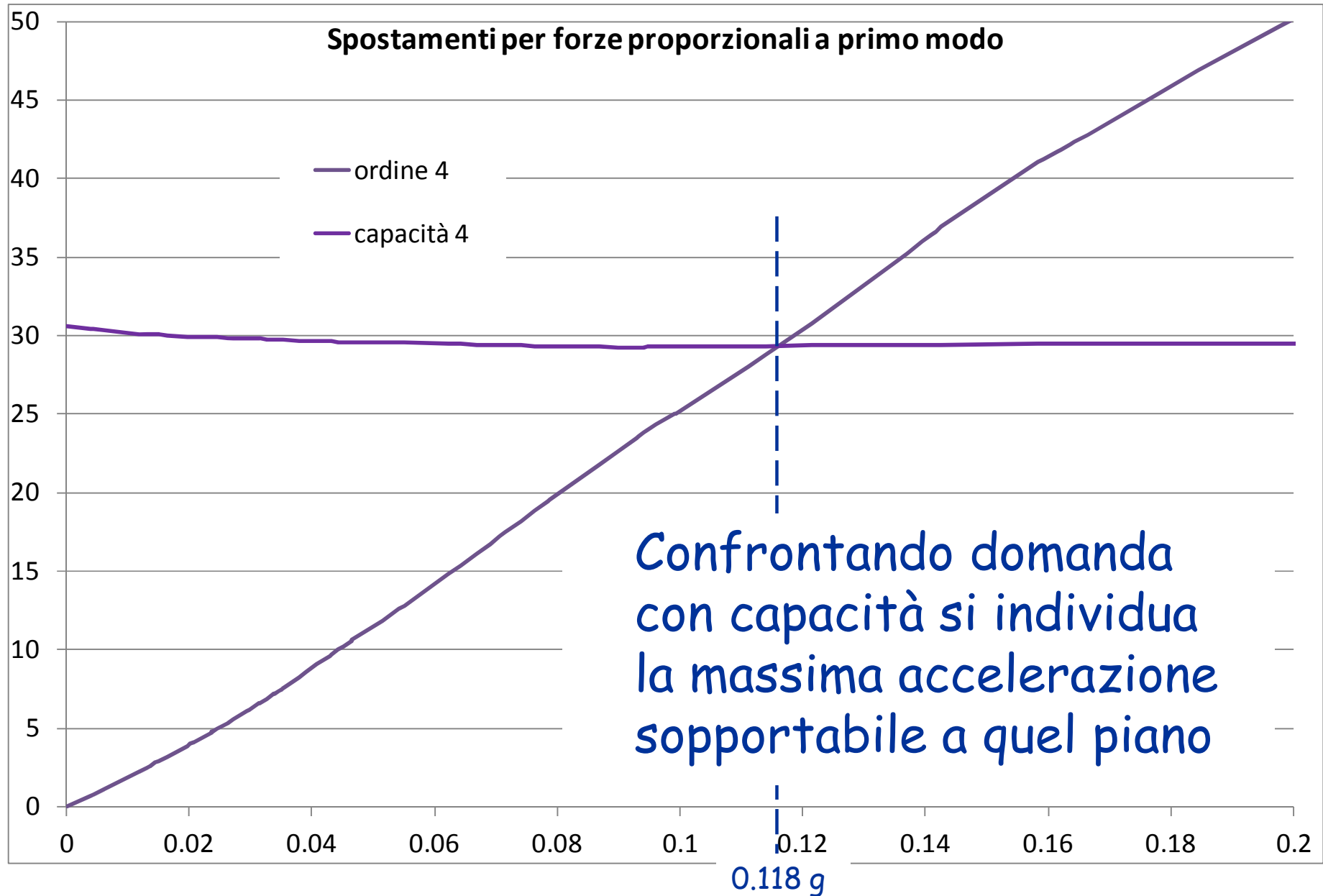
la capacità di spostamento del 4° ordine
è condizionata proprio da questo pilastro



Capacità al variare di N - 4° ordine



Domanda e Capacità al variare di N - 4° ordine



Domanda e Capacità al variare di N - 3° ordine

