

Corsi di aggiornamento
Progettazione strutturale
e Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni

9. Vulnerabilità e rischio sismico di edifici esistenti in c.a.

14 – Analisi pushover

Villa Redenta, Spoleto, 22-24 novembre 2018
Aurelio Ghersi

Analisi pushover

- Analisi non lineare che mostra il comportamento di una struttura soggetta ad una distribuzione crescente di forze orizzontali
 - Occorre applicare preliminarmente i carichi verticali agenti sulla struttura (valori per la condizione sismica)
Si effettua in genere una analisi lineare, ritenendo che sotto i carichi di esercizio la struttura sia in campo elastico
 - A questi si somma l'effetto di una distribuzione di forze orizzontali, scalate in maniera via via crescente
Questo effetto si valuta con analisi non lineare
 - Si ottengono così indicazioni sul progressivo stato della struttura (sollecitazioni, spostamenti, ecc.)

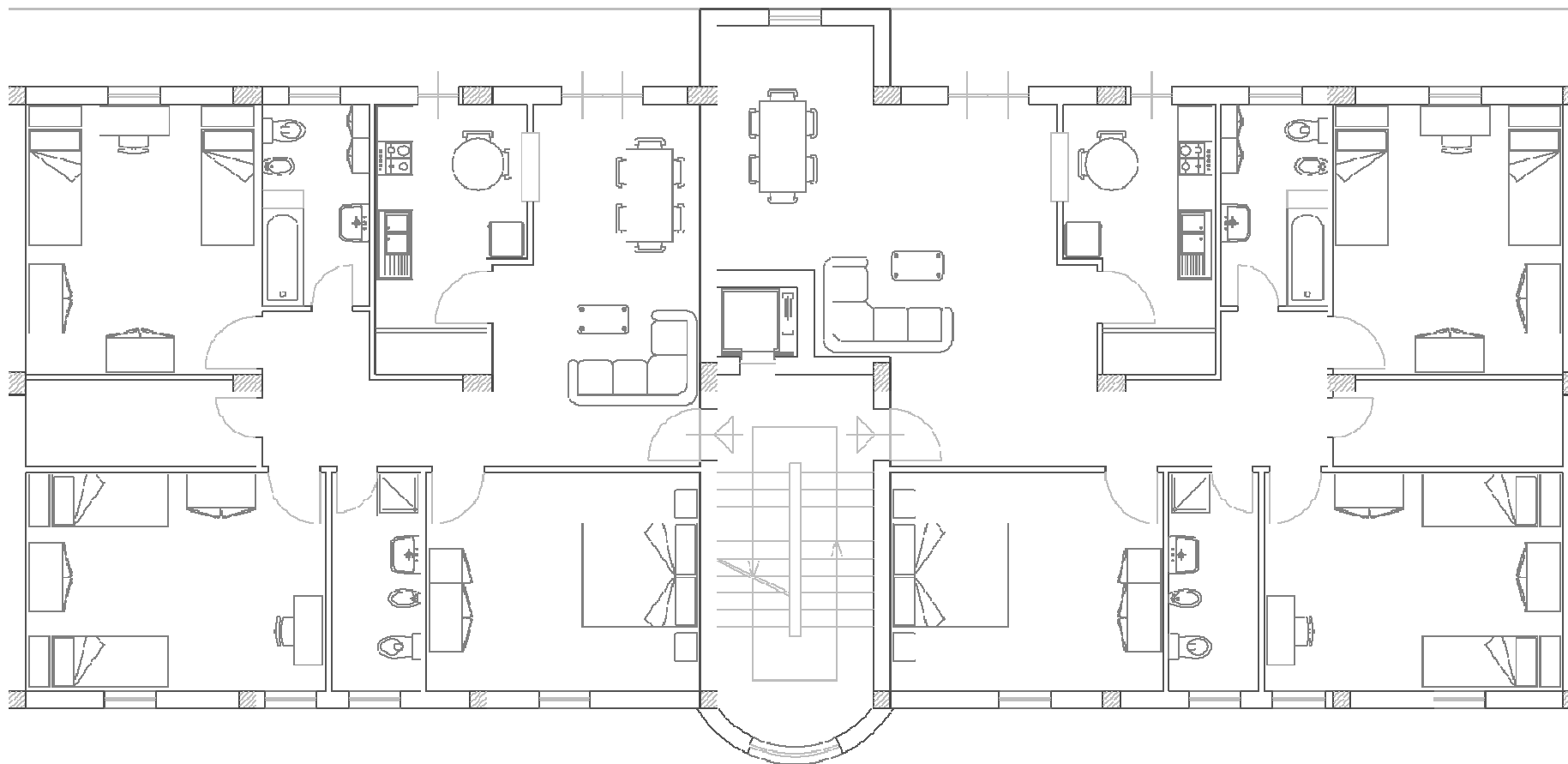
Esempio

- Si considera come esempio un edificio progettato per soli carichi verticali negli anni '70

Nota:

- È un edificio simile, ma diverso da quello di cui ho presentato finora l'analisi
- La fase preliminare di indagine e l'analisi lineare di questa struttura si possono trovare nel mio sito con riferimento ai corsi 2017

Pianta architettonica dell'edificio



Piano tipo

Schema geometrico insieme dei telai – direzione y

1,2,3	4,5,6	7,8,9	10	11	12	13	14	15	16,17,18	19,20,21	22
23..25	26..28	29..31	32	33	34	35	36	37	38..40	41..43	44
45..47	48..50	51..53	54	55	56	57	58	59	60..62	63..65	66
67..69	70..72	73..75	76	77	78	79	80	81	82..84	85..87	88
89..91	92..94	95..97	98	99	100	101	102	103	104..106	107..109	110
111..113	114..116	117..119	120	121	122	123	124	125	126..128	129..131	132
17	9	1	18	10	2	19	11	3	20	12	4

Numerazione delle aste verticali

Nota: alcuni pilastri sono stati divisi in tre parti, per un successivo inserimento di diagonali che simulano l'effetto delle tamponature

Schema geometrico

insieme dei telai – direzione y

133	134
141	142
149	150
157	158
165	166
173	174

17 9 1

135	136
143	144
151	152
159	160
167	168
175	176

18 10 2

137	138
145	146
153	154
161	162
169	170
177	178

19 11 3

139	140
147	148
155	156
163	164
171	172
179	180

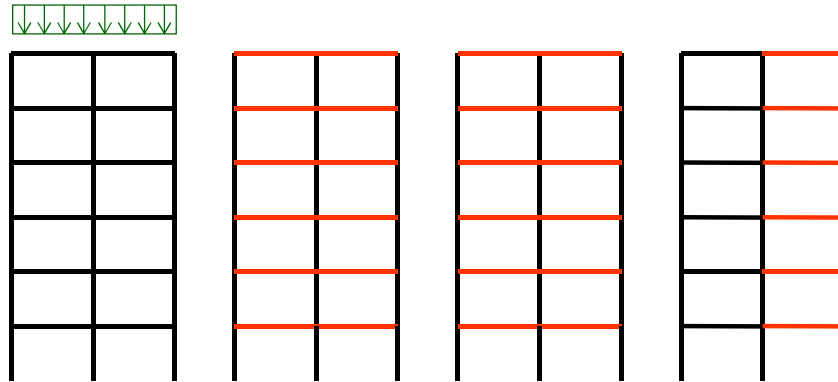
20 12 4

Numerazione delle aste orizzontali

Pushover

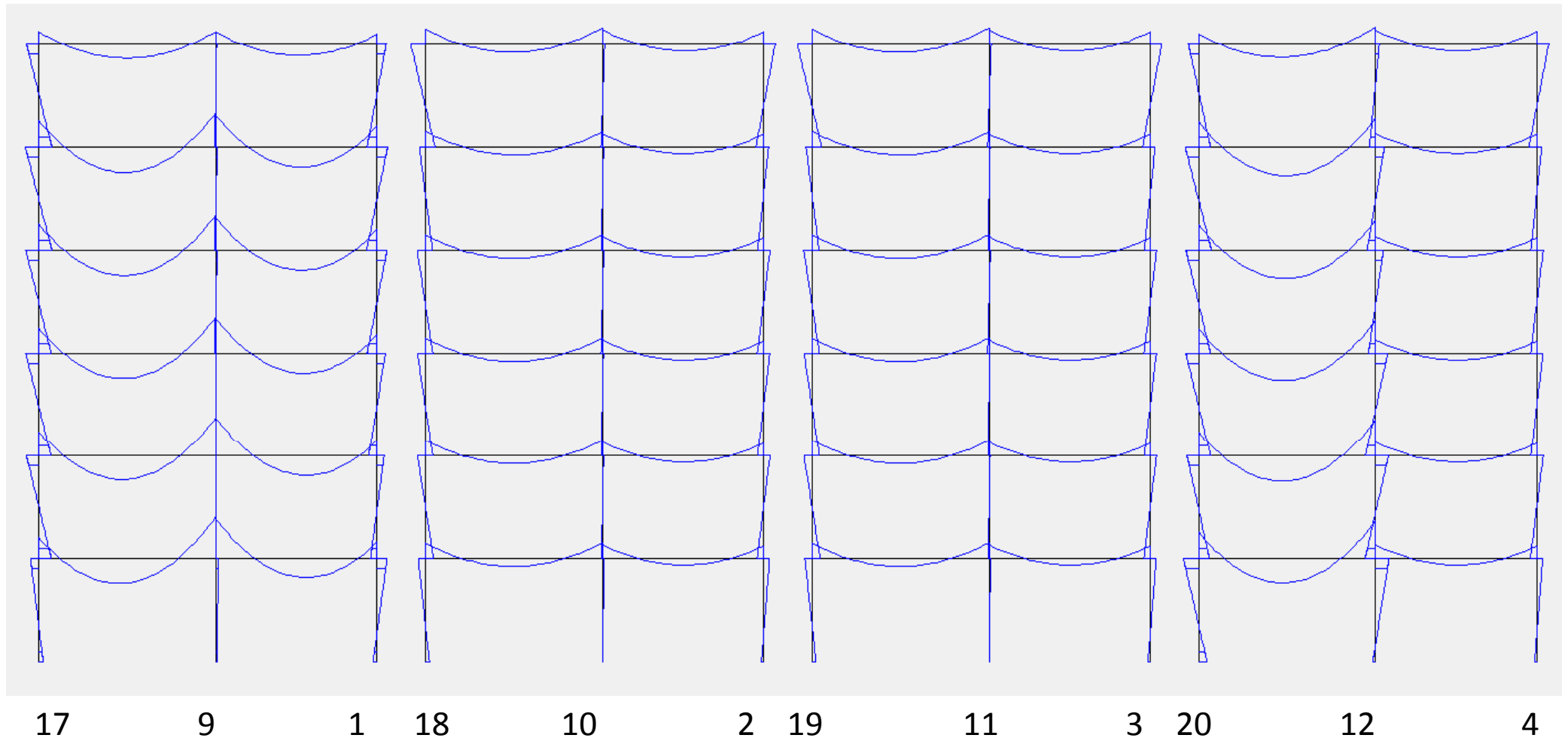
esempio – direzione y

- Carichi verticali
 - A tutte le travi si applica il carico verticale corrispondente alle condizioni sismiche $g_k + \psi_2 q_k$



Telai in direzione y, carichi verticali

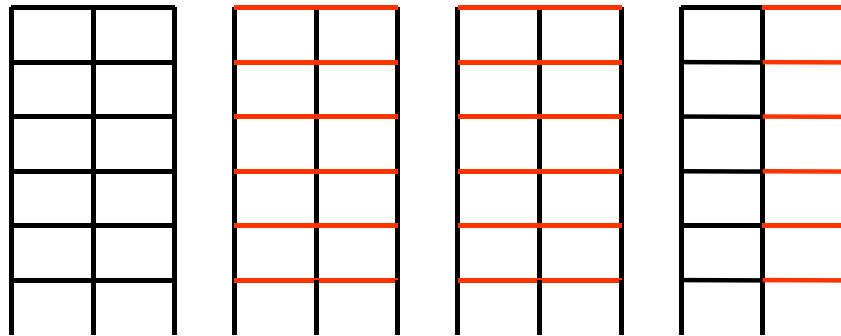
diagramma del momento flettente



Pushover

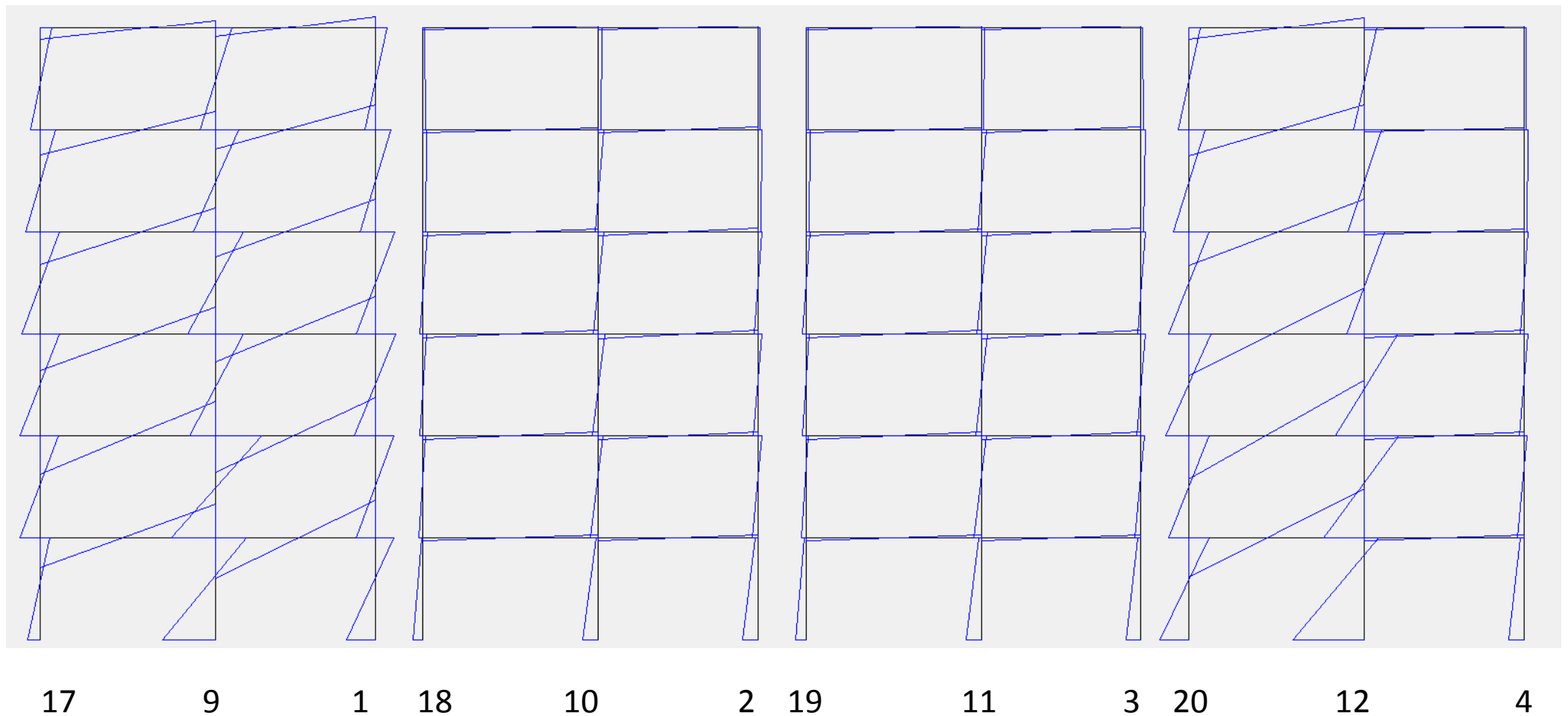
esempio – direzione y

- Analisi modale
 - Si effettua una analisi modale per trovare le forze corrispondenti al primo modo



Analisi modale - sisma in direzione y

diagramma del momento flettente



17

9

1

18

10

2

19

11

3

20

12

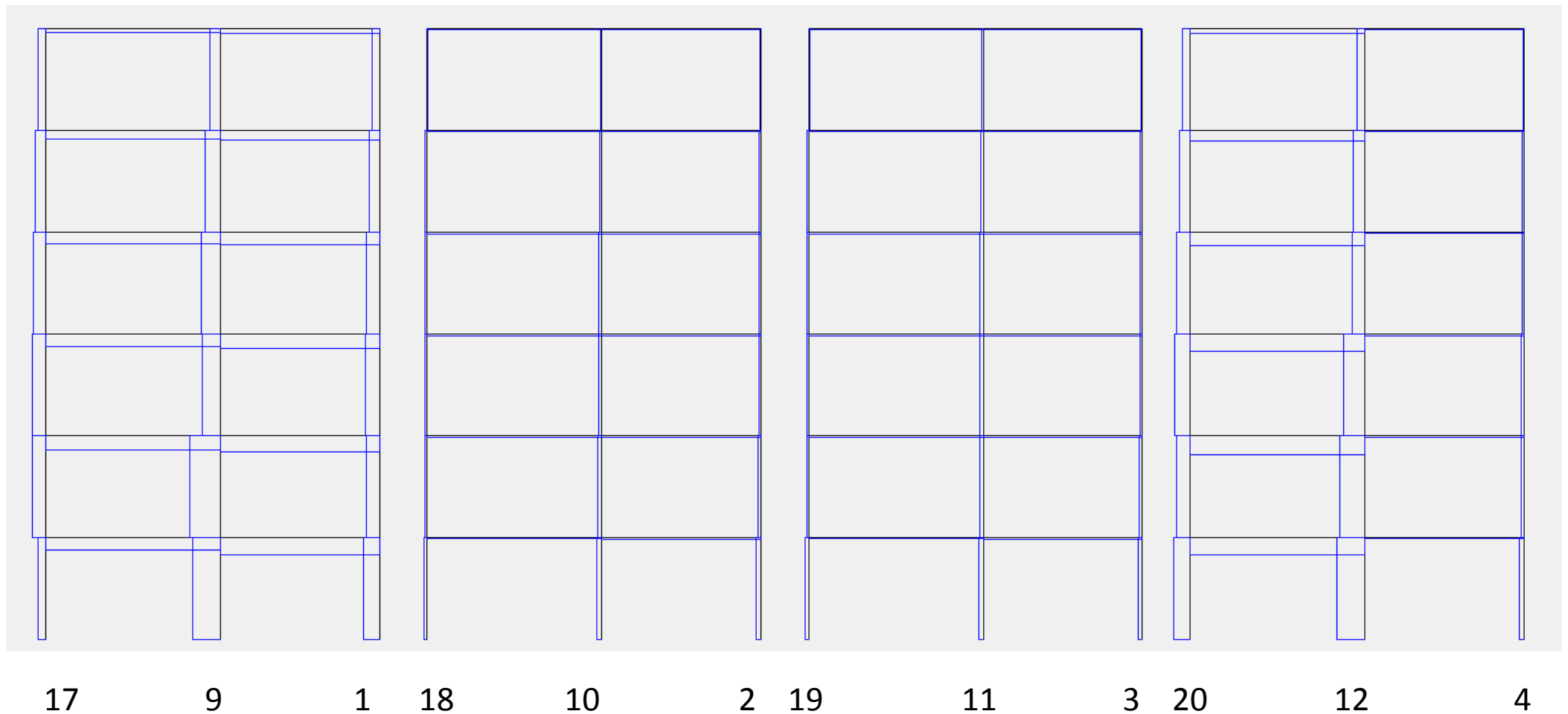
4

Periodo:

$T = 1.68 \text{ s}$

Analisi modale - sisma in direzione y

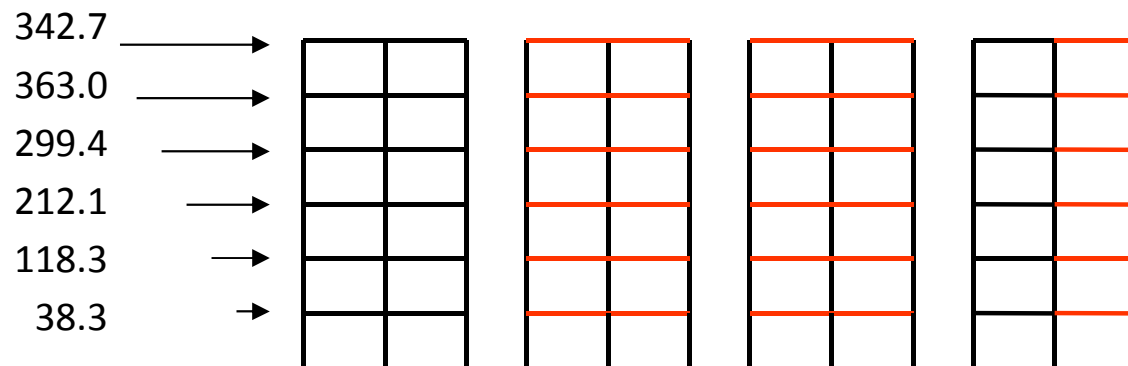
diagramma del taglio



Pushover

esempio – direzione y

- Distribuzione di forze
 - Si sceglie come distribuzione di forze quella del primo modo



$$\sum F_i = 1373.8 \text{ kN}$$

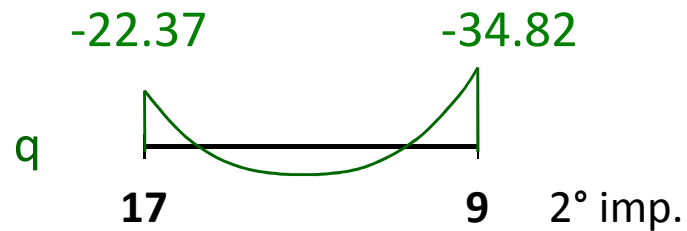
- Le forze usate nell'esempio sono quelle corrispondenti al primo modo

Nota: poiché le forze devono essere scalate, è la distribuzione (cioè i rapporti) che conta, non i valori in sé

Pushover

esempio – direzione y

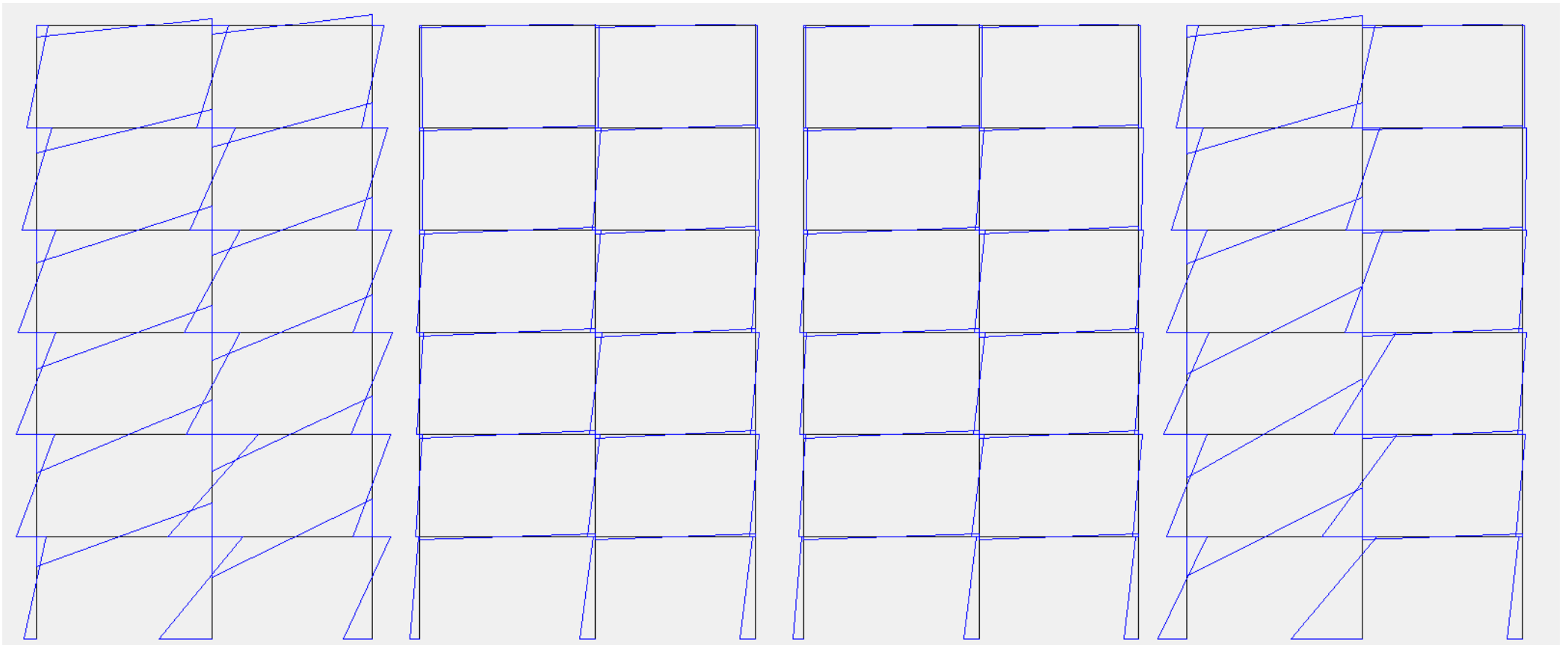
- Carichi verticali:
risolto lo schema si hanno i valori in tutte le aste
Ad esempio, per la trave 17-9, 2° impalcato:



Pushover

esempio – direzione y

- Primo passo – effetto delle forze orizzontali

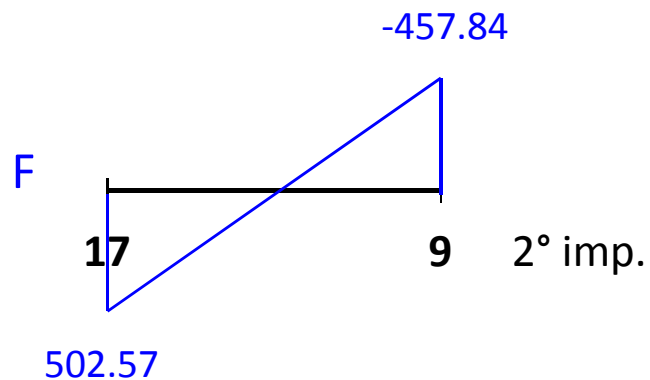


Pushover

esempio – direzione y

- Primo passo:
applicando le forze allo schema e risolto lo schema si hanno i valori in tutte le aste

Ad esempio, per la trave 17-9, 2° impalcato:

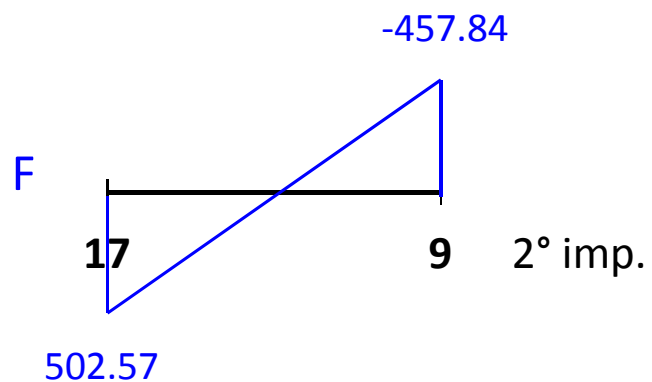
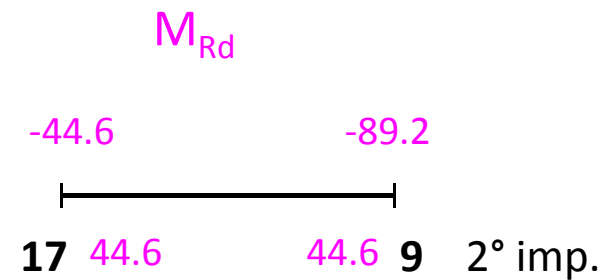
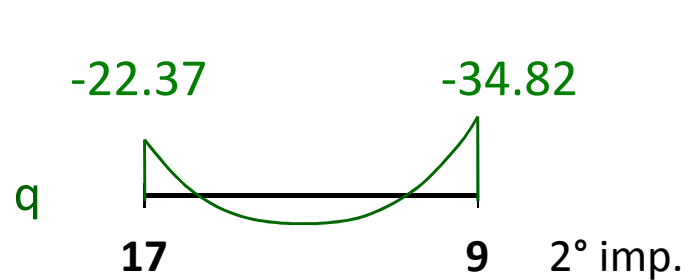


Pushover

esempio – direzione y

- Per questa trave si ha quindi:

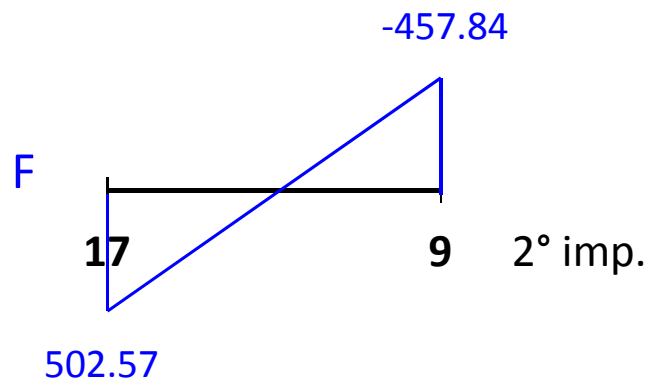
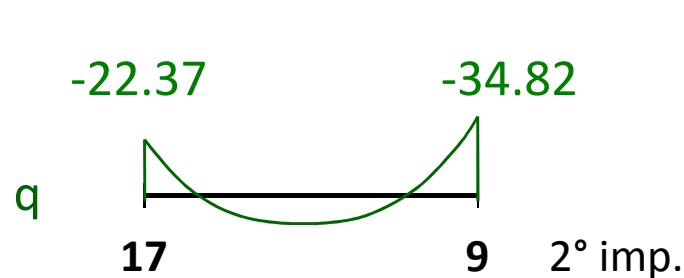
La trave ha come momenti resistenti i valori qui indicati



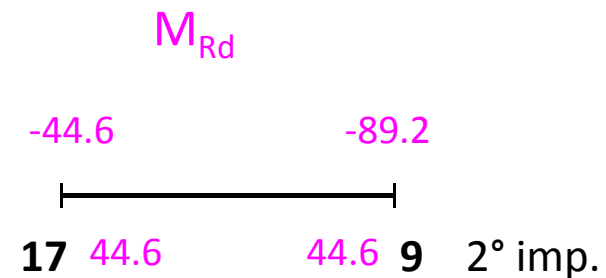
Pushover

esempio – direzione y

- Si può valutare l'aliquota di forza orizzontale che porta la trave al limite di resistenza:



La sezione di destra raggiunge il limite di resistenza per forze pari all'11.88% di quelle di riferimento



estr. 17

$$-22.37 + \frac{502.57}{\rho} = 44.6$$

$$\rho = 7.504 \quad \frac{1}{\rho} = 13.33\%$$

estr. 9

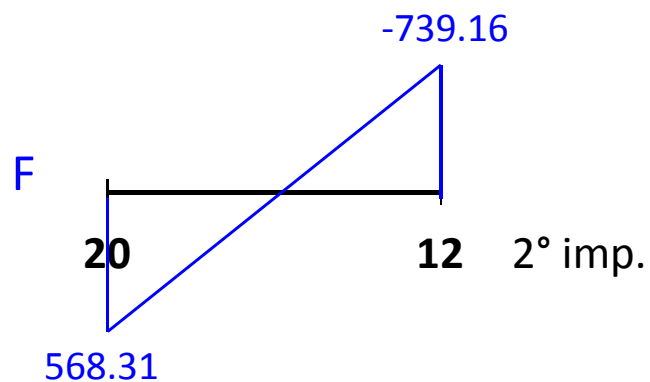
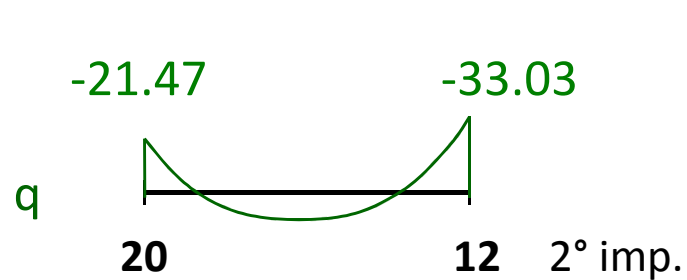
$$-34.82 - \frac{457.84}{\rho} = -89.2$$

$$\rho = 8.419 \quad \frac{1}{\rho} = 11.88\%$$

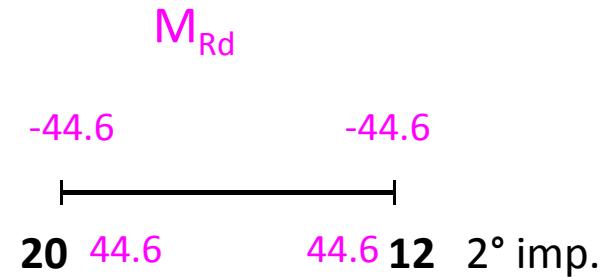
Pushover

esempio – direzione y

- Analogamente, per la trave 20-12, 2° impalcato:



La sezione di destra raggiunge il limite di resistenza per forze pari all'1.57% di quelle di riferimento



estr. 20

$$-21.47 + \frac{568.31}{\rho} = 44.6$$

$$\rho = 8.602 \quad \frac{1}{\rho} = 11.63\%$$

estr. 12

$$-33.03 - \frac{739.16}{\rho} = -44.6$$

$$\rho = 63.89 \quad \frac{1}{\rho} = 1.57\%$$

Pushover

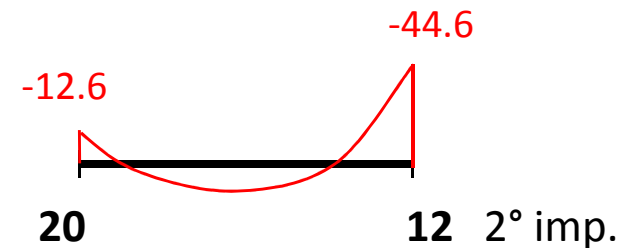
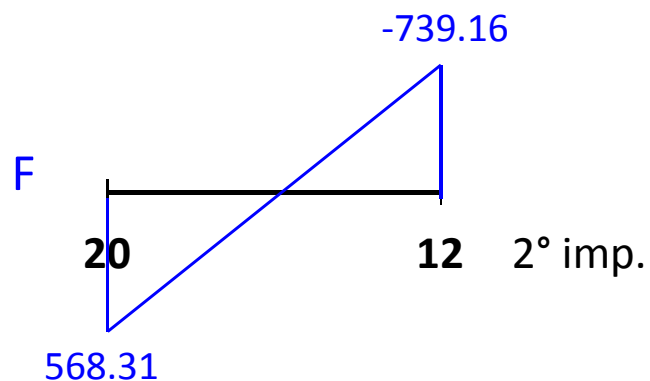
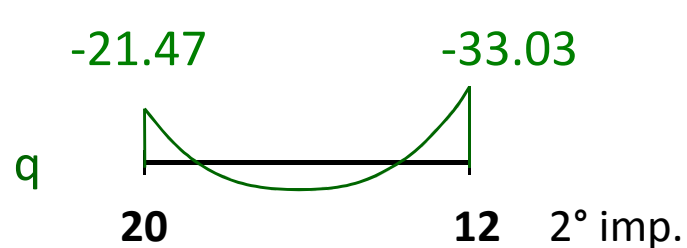
esempio – direzione y

- Esaminando tutte le aste, travi e pilastri, si determina il valore minimo del moltiplicatore che porta al limite una sezione
- Si trova che il valore più piccolo è 1.57%, che porta al raggiungimento del limite di plasticizzazione per la trave 20-12, 2° impalcato

Pushover

esempio – direzione y

- Per questo moltiplicatore (0.0157), nella trave 20-12, 2° impalcato si ha



$$\begin{aligned} \text{estr. 20} \quad M &= -21.47 + 568.31 \times 0.0157 = \\ &= -12.6 \end{aligned}$$

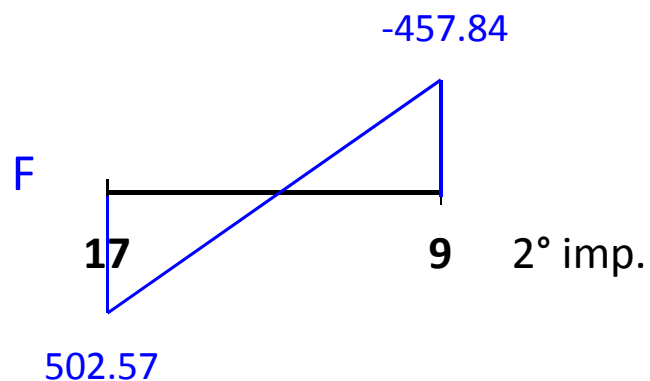
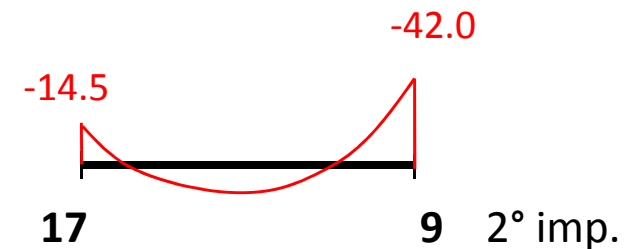
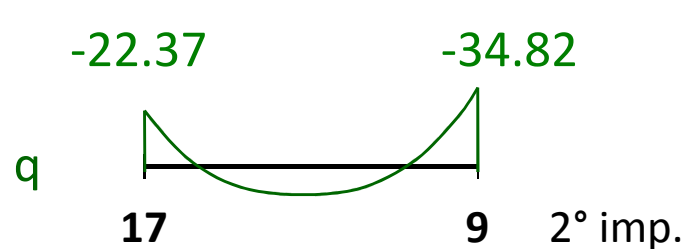
$$\begin{aligned} \text{estr. 12} \quad M &= -33.03 - 739.16 \times 0.0157 = \\ &= -44.6 \end{aligned}$$

- L'estremo destro ha raggiunto il limite di resistenza, quindi si è "plasticizzato"

Pushover

esempio – direzione y

- Per lo stesso moltiplicatore (0.0157), nella trave 17-9, 2° impalcato si ha



$$\begin{aligned} \text{estr. 17} \quad M &= -22.37 + 502.57 \times 0.0157 = \\ &= -14.5 \end{aligned}$$

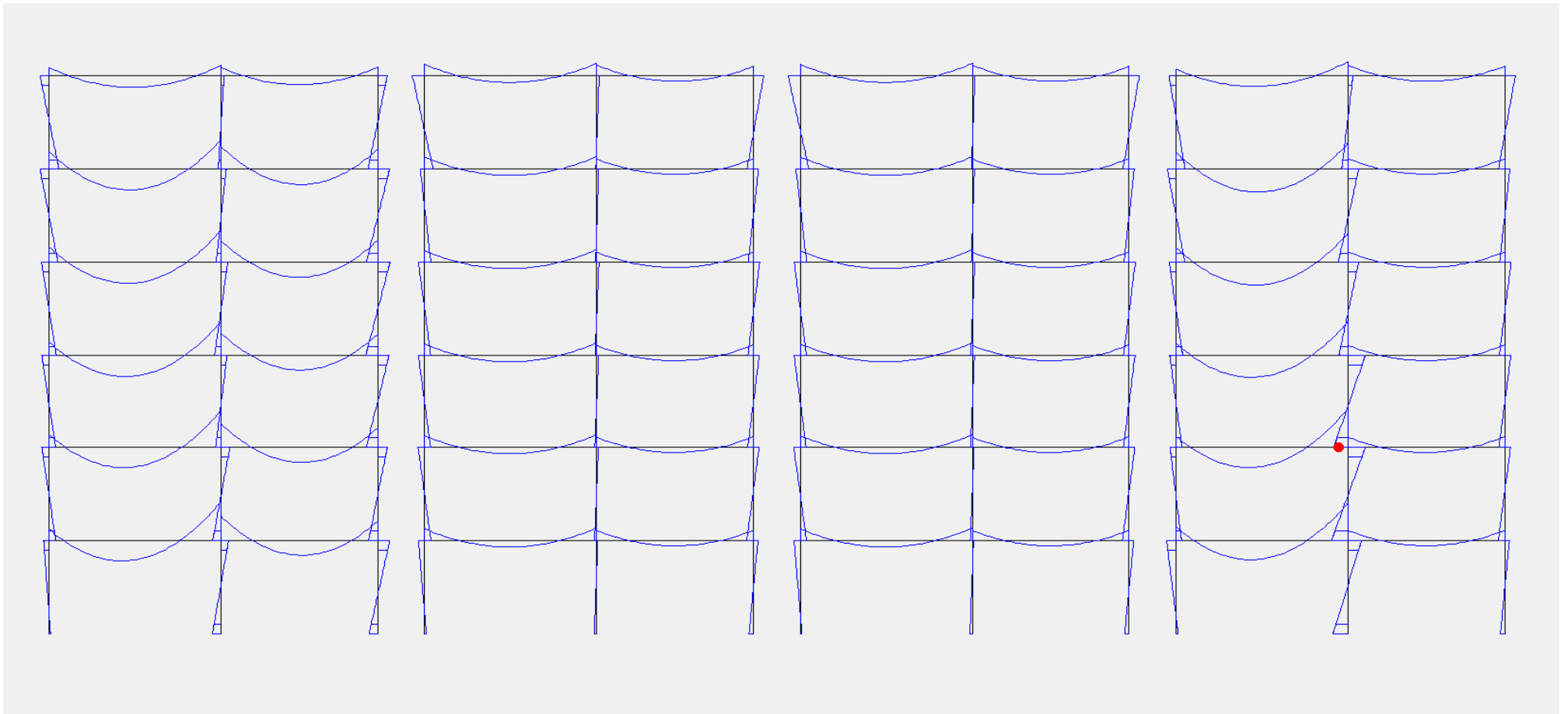
$$\begin{aligned} \text{estr. 9} \quad M &= -34.82 - 457.84 \times 0.0157 = \\ &= -42.0 \end{aligned}$$

- Entrambi gli estremi sono ancora lontani dal limite

Pushover

esempio – direzione y

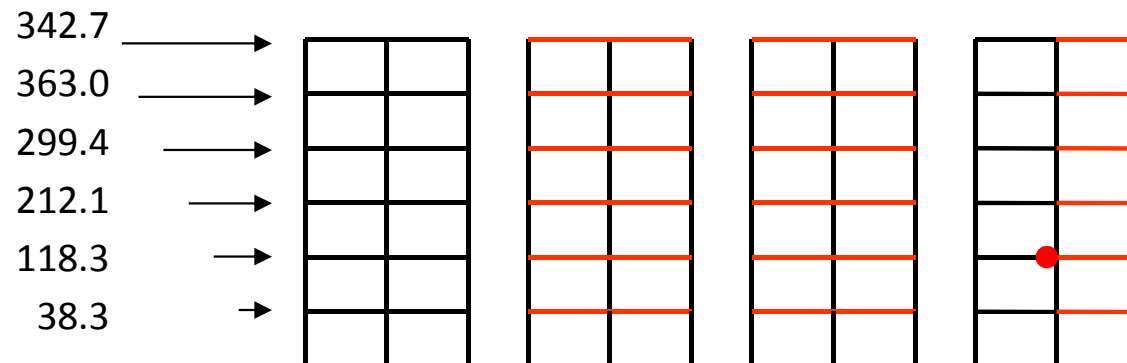
- Questa è la situazione al termine del primo passo



Pushover

esempio – direzione y

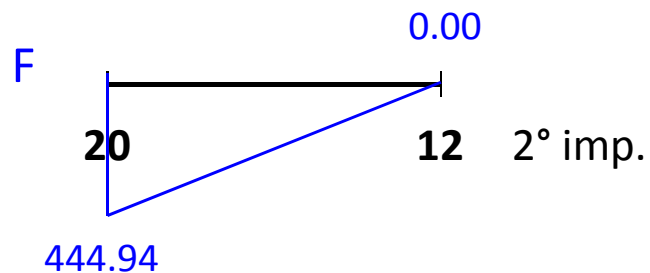
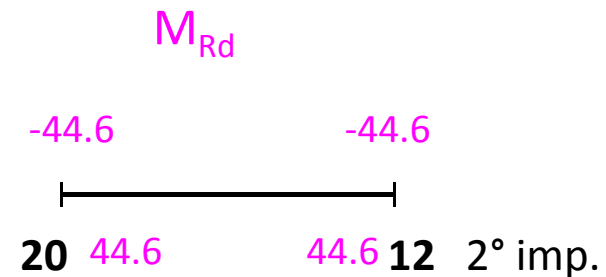
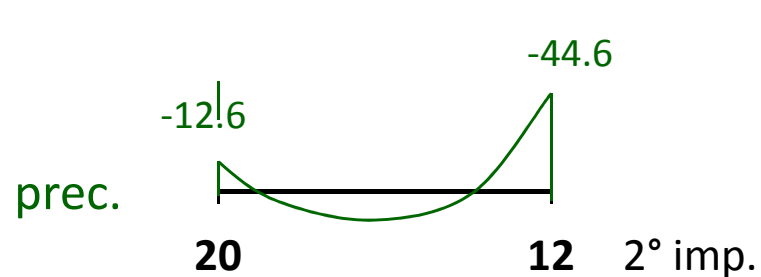
- I valori trovati (corrispondenti ai diagrammi in rosso) sono i valori finali del primo passo, nonché quelli iniziali per il secondo passo
- Nella sezione in cui si è raggiunto il momento resistente M non può crescere. Si mette quindi nello schema una cerniera e si ripete il calcolo



Pushover

esempio – direzione y

- Secondo passo, per la trave 20-12, 2° impalcato:



estr. 20

$$-12.6 + \frac{444.94}{\rho} = 44.6$$

$$\rho = 7.78 \quad \frac{1}{\rho} = 12.86\%$$

La sezione di sinistra raggiunge il limite di resistenza per forze pari al 12.86% di quelle di riferimento

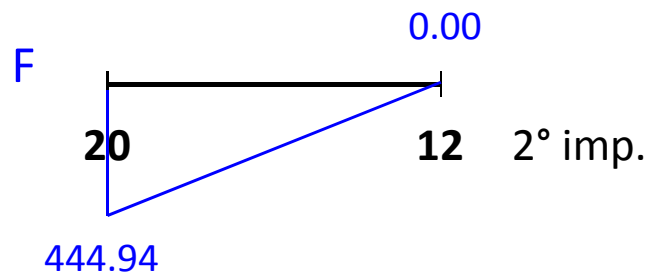
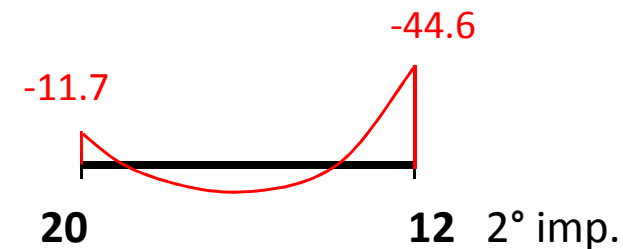
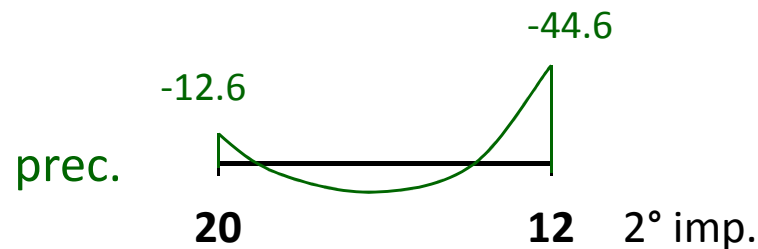
ma in un altro punto si trova

$$\left(\frac{1}{\rho} \right)_{\min} = 0.21\%$$

Pushover

esempio – direzione y

- Per questo moltiplicatore (0.0021), nella trave 20-12, 2° impalcato si ha



estr. 20 $M = -12.6 + 444.94 \times 0.0021 = -11.7$

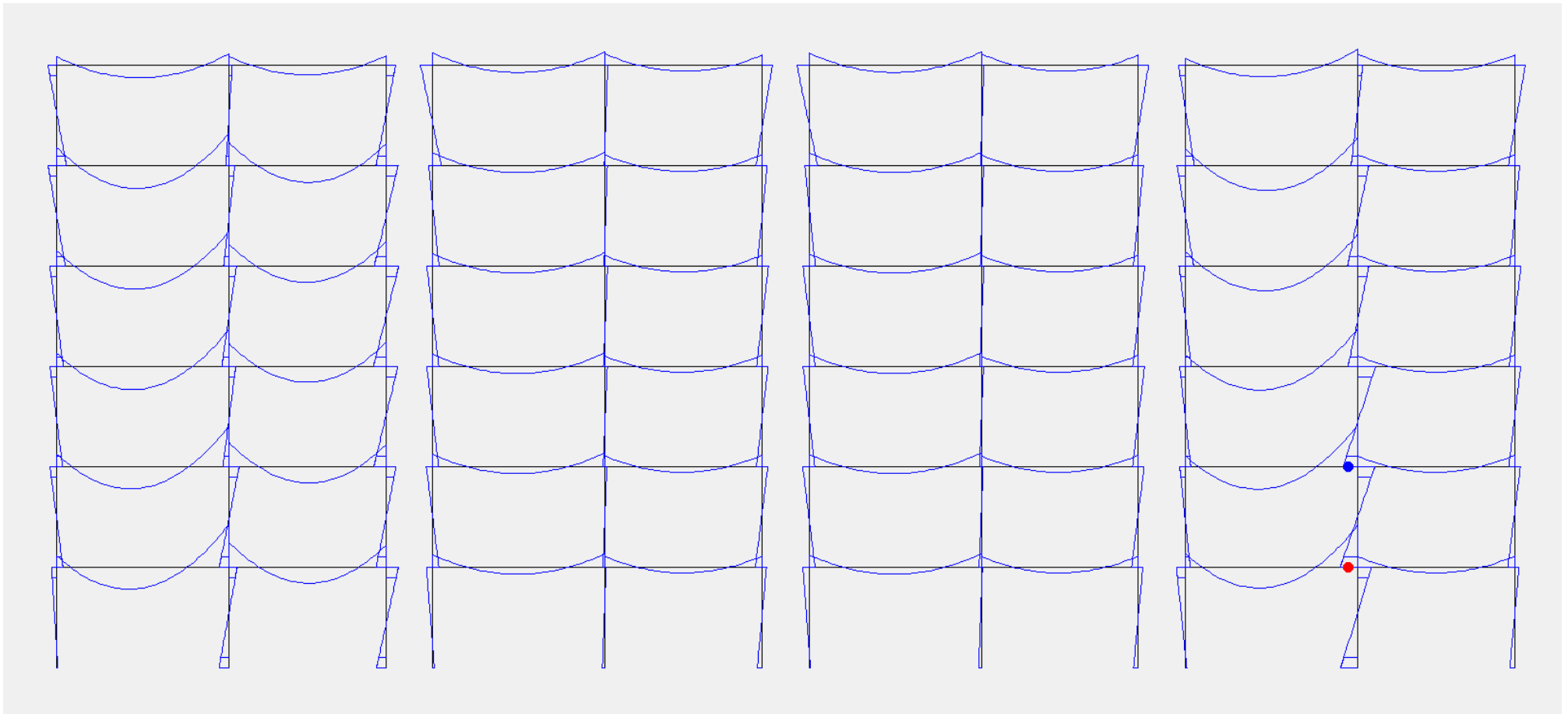
estr. 12 $M = -44.6$ come prima

- Questi valori (diagramma in rosso) sono quelli che corrispondono a forze pari al $1.57 + 0.21 = 1.78\%$ delle forze di riferimento

Pushover

esempio – direzione y

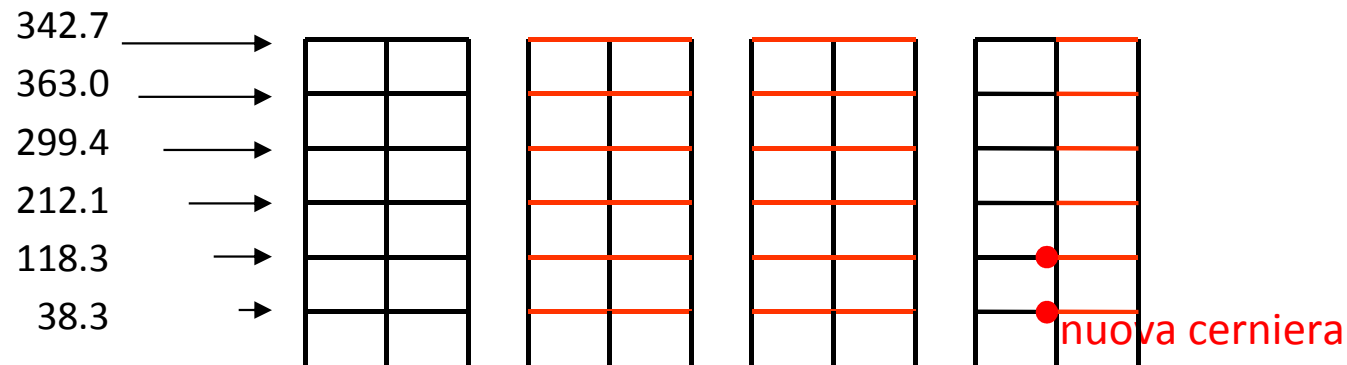
- Questa è la situazione al termine del secondo passo



Pushover

esempio – direzione y

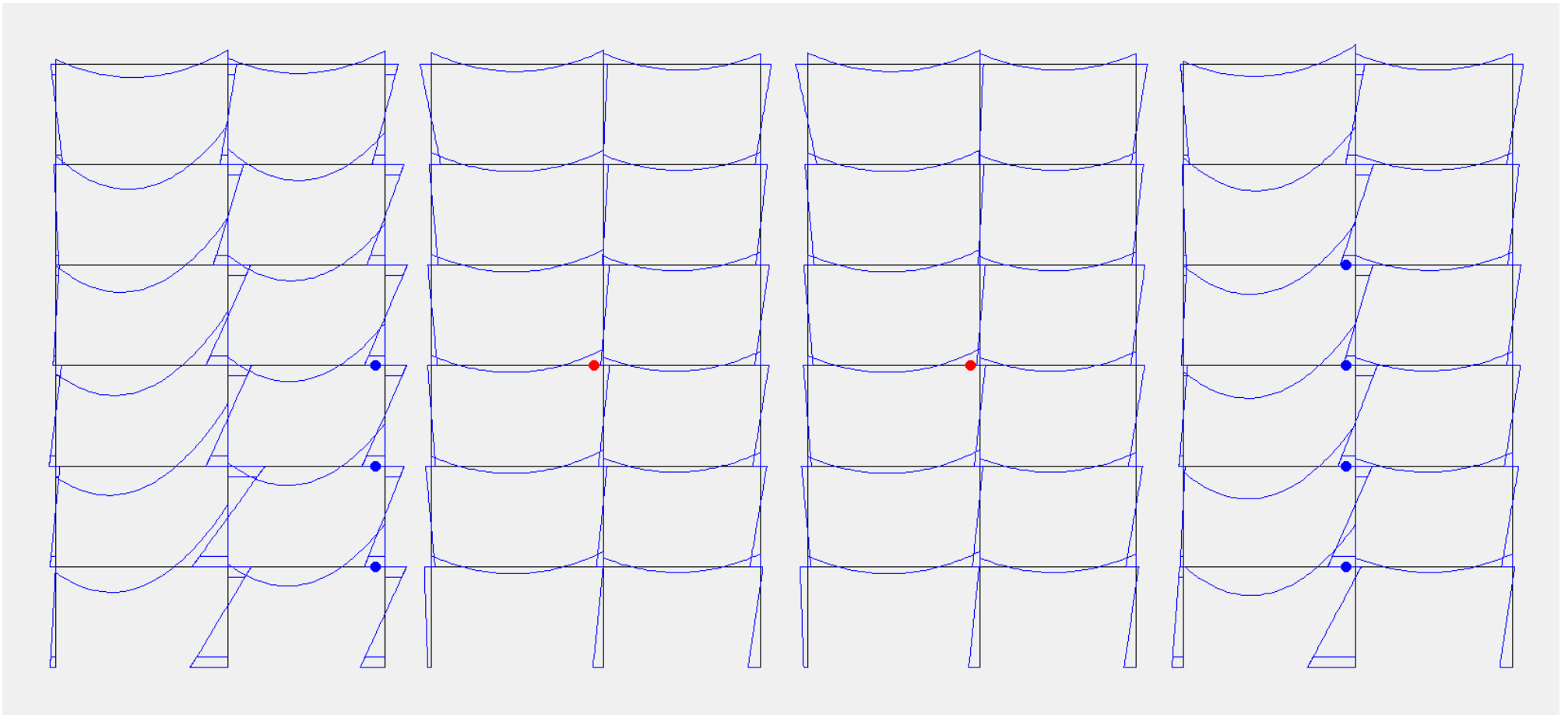
- I valori trovati (corrispondenti ai diagrammi in rosso) sono i valori finali del secondo passo, nonché quelli iniziali per il terzo passo
- Nella sezione in cui si è raggiunto il momento resistente M non può crescere. Si mette quindi nello schema un'altra cerniera e si ripete il calcolo



Pushover

esempio – direzione y

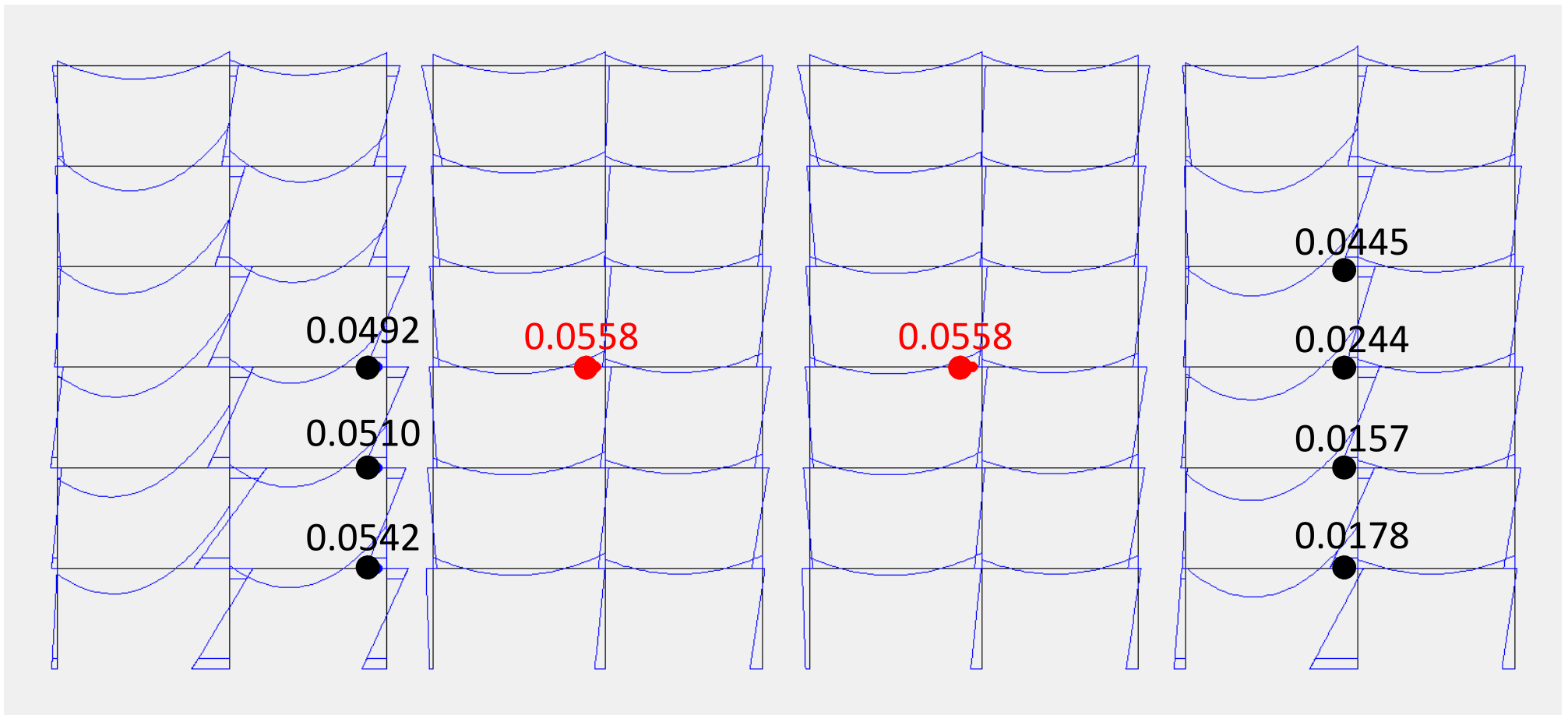
- Questa è la situazione al termine dell'ottavo passo



Pushover

esempio – direzione y

- Questa è la situazione al termine dell'ottavo passo



Applicazione alla struttura in esame

telai in direzione y

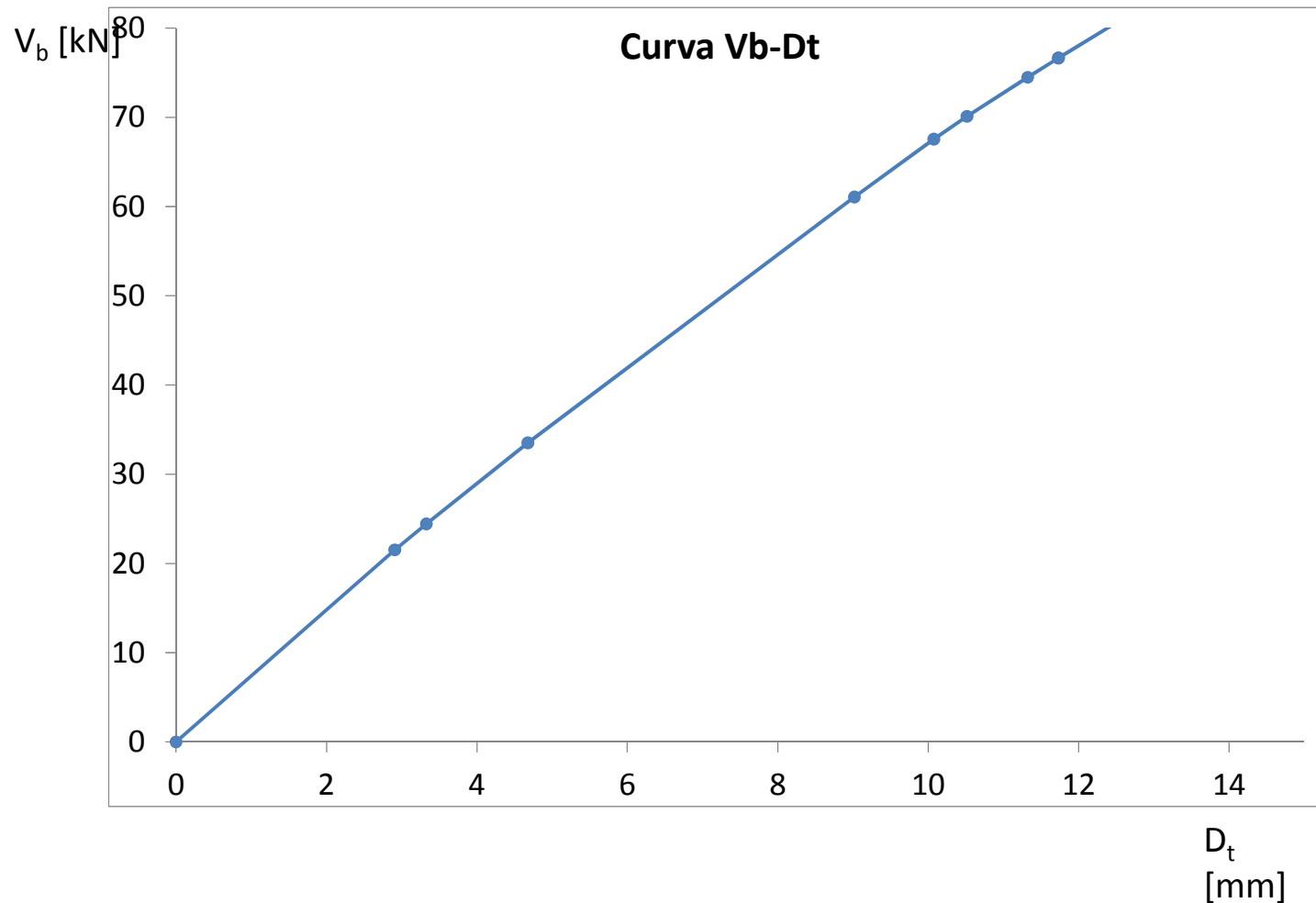
- Riepilogo dei risultati dei primi passi dell'analisi non lineare, fatti in maniera parzialmente manuale, ovvero con l'utilizzo di una analisi lineare e facendo variare via via lo schema

passo	1/p	$\Sigma 1/r$	Dt - Do	Vb	sequenza eventi			
0	0	0	0.000	0				
1	1.57%	1.57%	2.907	21.52	cer	171-2		
2	0.21%	1.78%	3.327	24.44	cer	179-2		
3	0.66%	2.44%	4.678	33.52	cer	163-2		
4	2.01%	4.45%	9.018	61.08	cer	155-2		
5	0.47%	4.92%	10.074	67.55	cer	158-2		
6	0.19%	5.10%	10.518	70.1	cer	166-2		
7	0.32%	5.42%	11.322	74.48	cer	174-2		
8	0.16%	5.58%	11.729	76.63	cer	159-2	cer	161-2

Applicazione alla struttura in esame

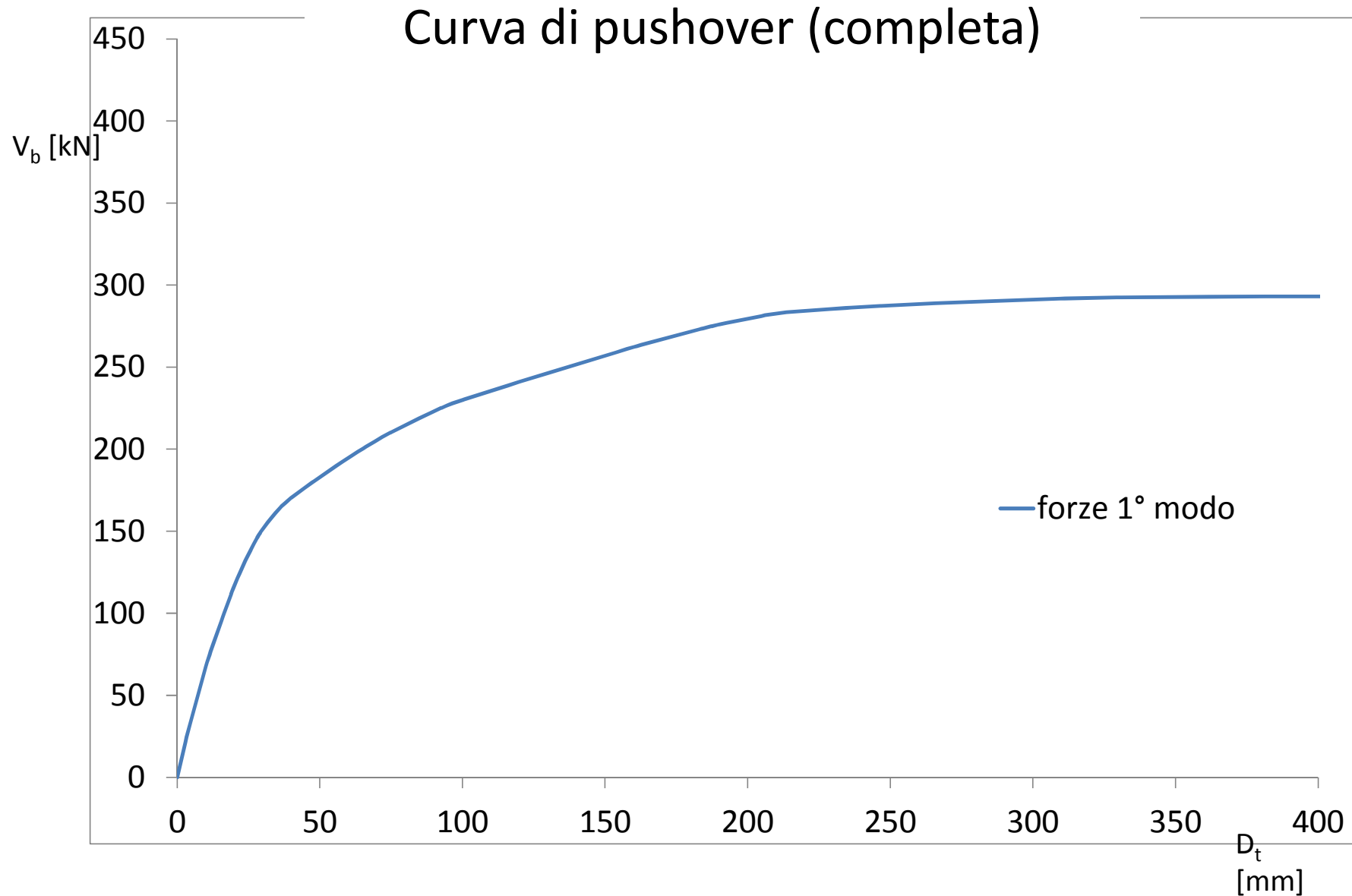
telai in direzione y

Curva di pushover (parte iniziale)



Applicazione alla struttura in esame

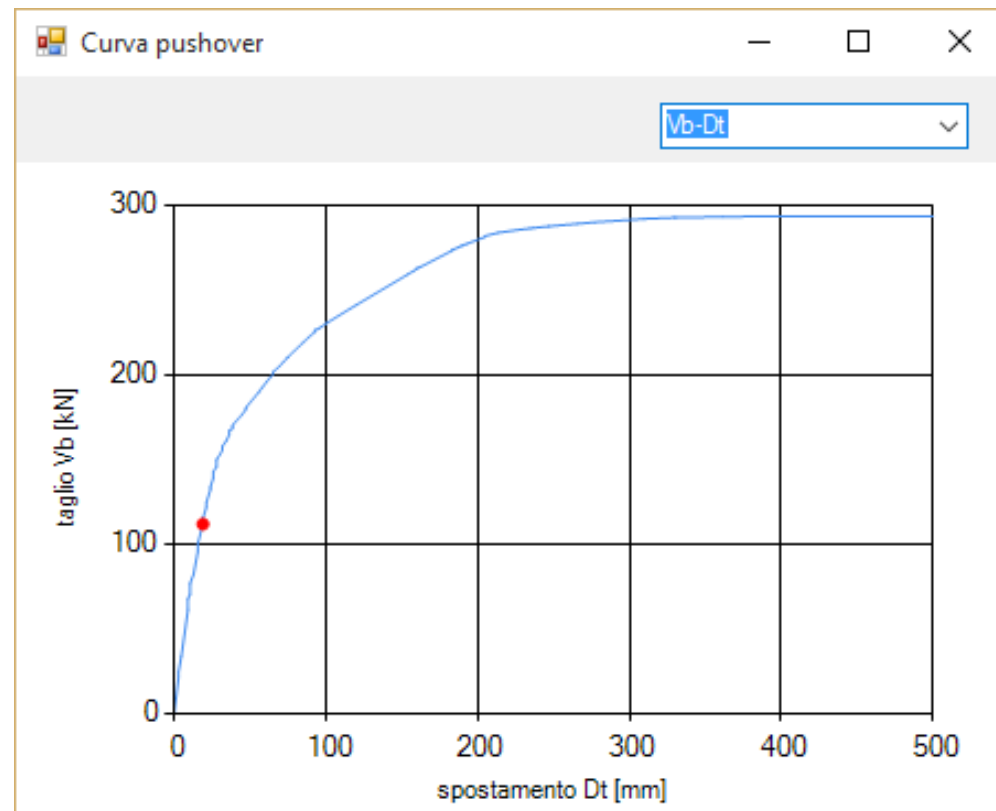
telai in direzione y



Applicazione alla struttura in esame

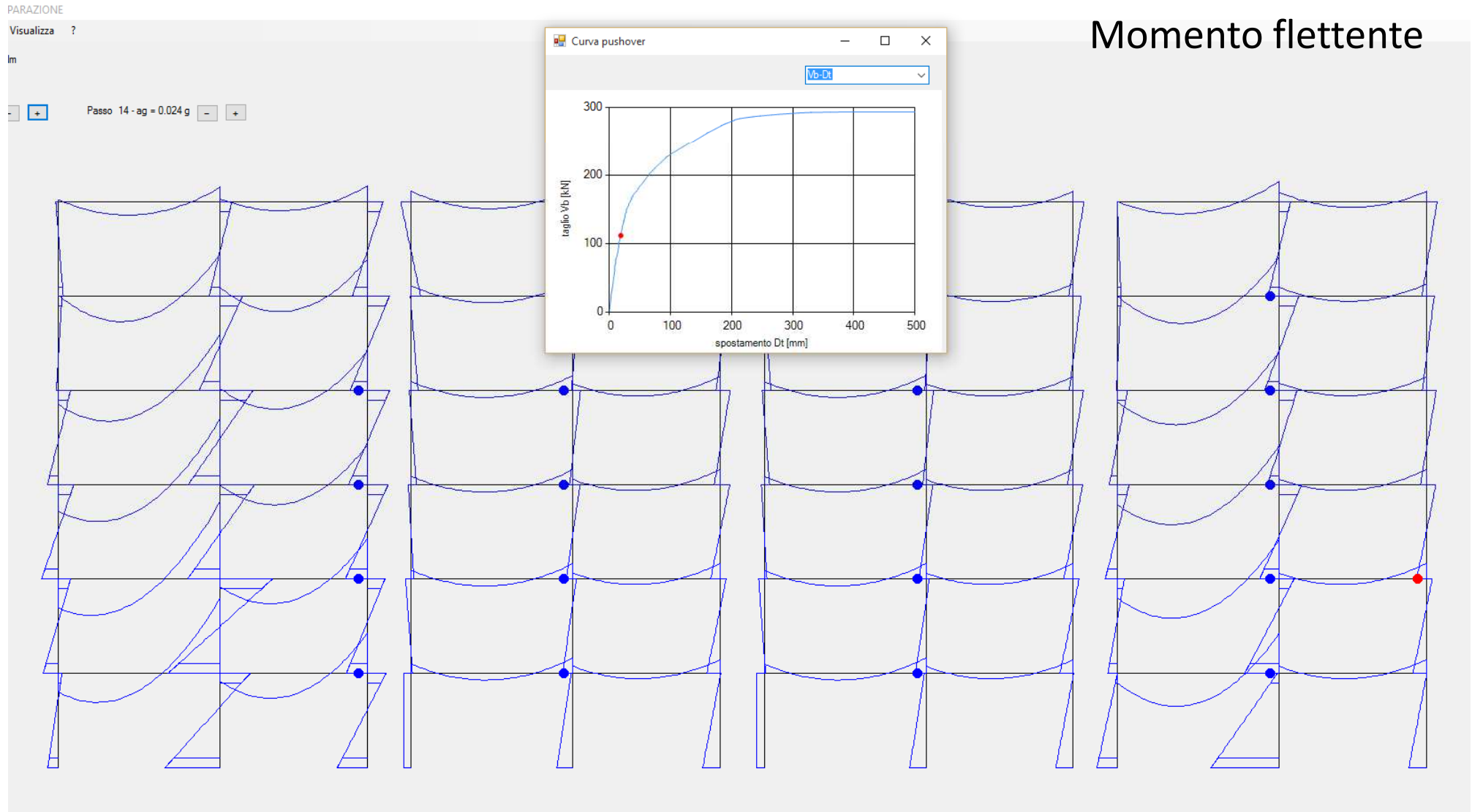
telai in direzione y

- A ciascun punto della pushover corrispondono tante informazioni:

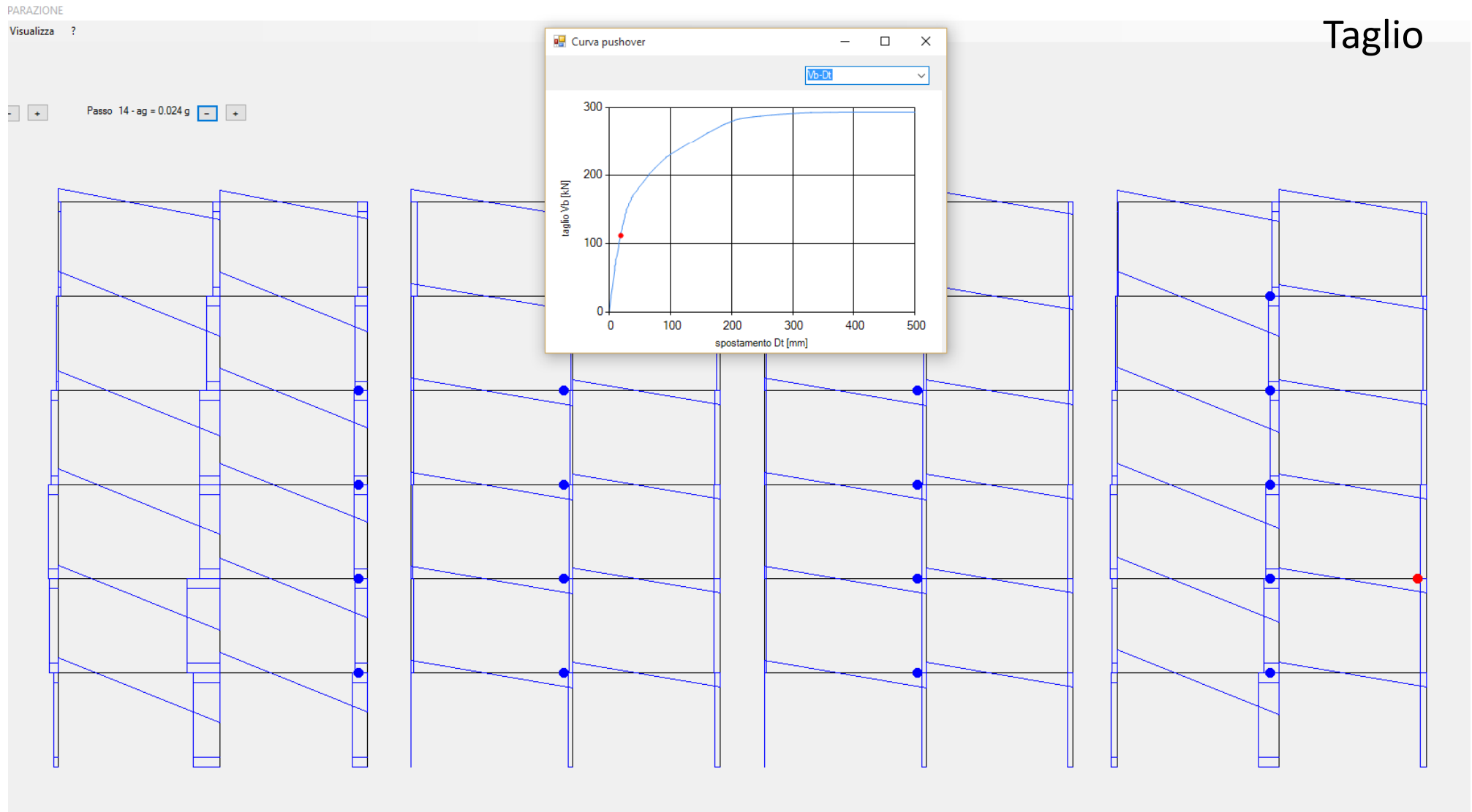


Applicazione alla struttura in esame

telai in direzione y

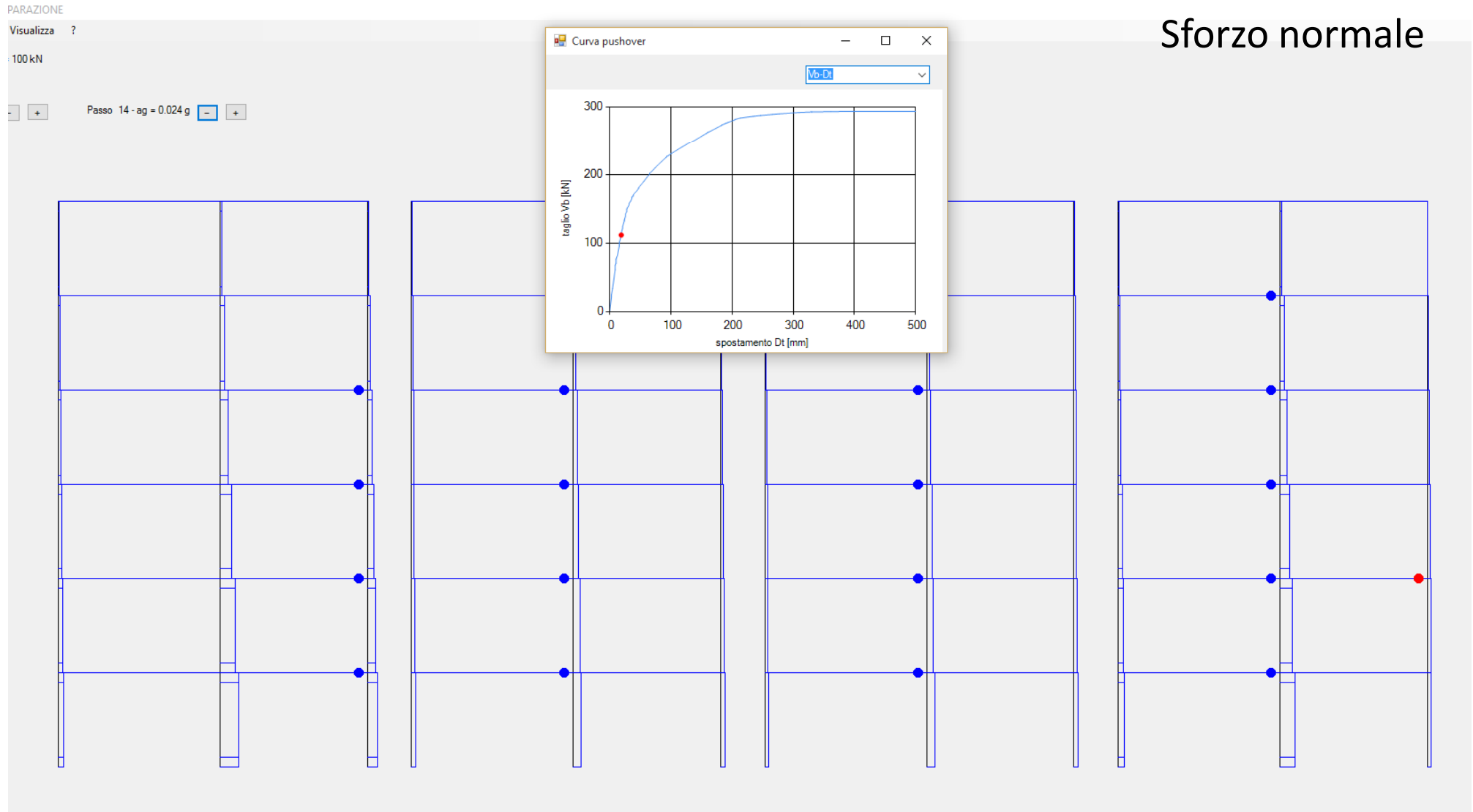


Applicazione alla struttura in esame telai in direzione y



Applicazione alla struttura in esame

telai in direzione y



Applicazione alla struttura in esame

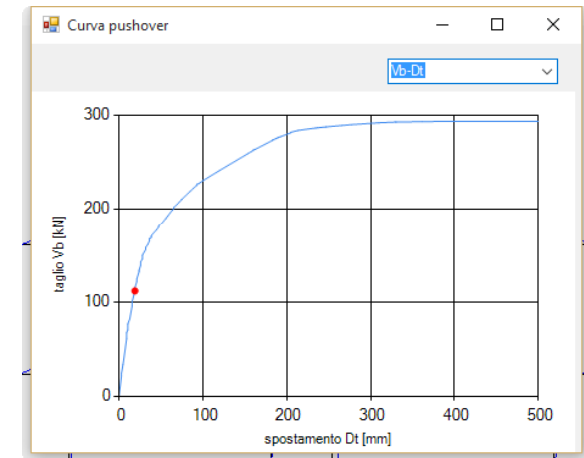
telai in direzione y

E inoltre:

- Spostamento e rotazione dei nodi
- Spostamento assoluto e relativo degli impalcati
- Rotazione plastica delle sezioni plasticizzate

Ed anche:

- Capacità deformativa delle sezioni plasticizzate (che dipende anche da N , che varia durante il processo di carico)



Applicazione alla struttura in esame

telai in direzione y

- L'analisi va ripetuta per una seconda distribuzione di forze (forze proporzionali alla massa)
- Se lo schema non è simmetrico, occorre ripetere l'analisi anche cambiando segno alle forze
- La normativa non specifica niente a proposito di eccentricità accidentali e di combinazione delle due componenti del sisma (ma ho fornito io in precedenza delle indicazioni)

Applicazione alla struttura in esame

telai in direzione y

