

Corso di aggiornamento professionale

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

Parma

27-28 maggio 2016

Aurelio Ghersi

07 - Analisi pushover

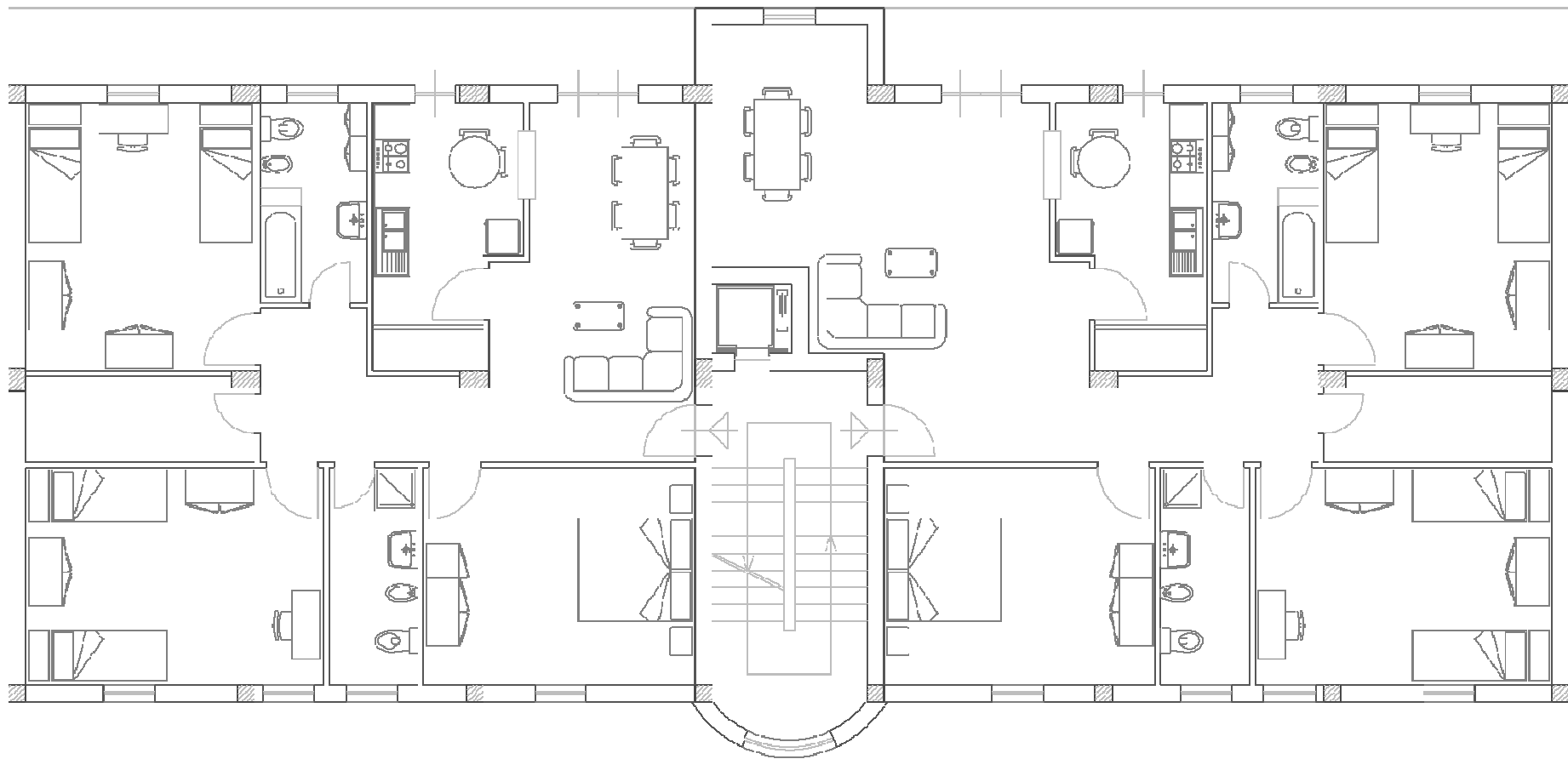
Analisi pushover

- 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
- La fase preliminare di indagine, volta a determinarne le caratteristiche, è stata affrontata in altra sede
(corsi su Edifici esistenti in c.a.:
Parma 2010, Imola maggio 2013, Spoleto 2015 e
anni precedenti)
- L'analisi lineare di questa struttura è stata
riepilogata in precedenza

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

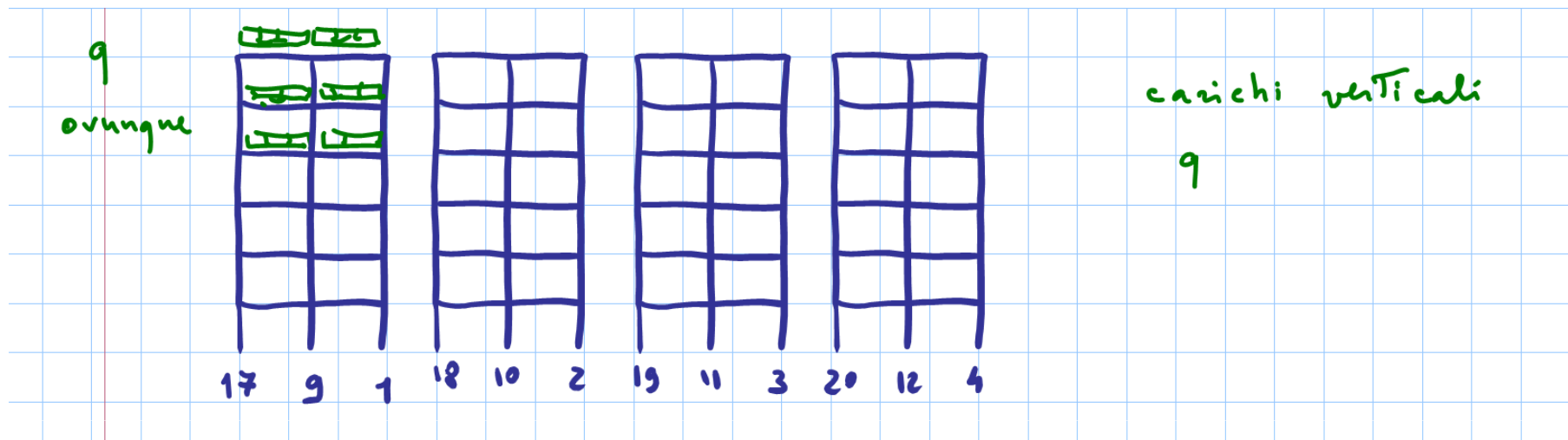
| | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|----|----|---|
| 133 | 134 | 135 | 136 | 137 | 138 | 139 | 140 | | | | |
| 141 | 142 | 143 | 144 | 145 | 146 | 147 | 148 | | | | |
| 149 | 150 | 151 | 152 | 153 | 154 | 155 | 156 | | | | |
| 157 | 158 | 159 | 160 | 161 | 162 | 163 | 164 | | | | |
| 165 | 166 | 167 | 168 | 169 | 170 | 171 | 172 | | | | |
| 173 | 174 | 175 | 176 | 177 | 178 | 179 | 180 | | | | |
| 17 | 9 | 1 | 18 | 10 | 2 | 19 | 11 | 3 | 20 | 12 | 4 |

Numerazione delle aste orizzontali

Pushover

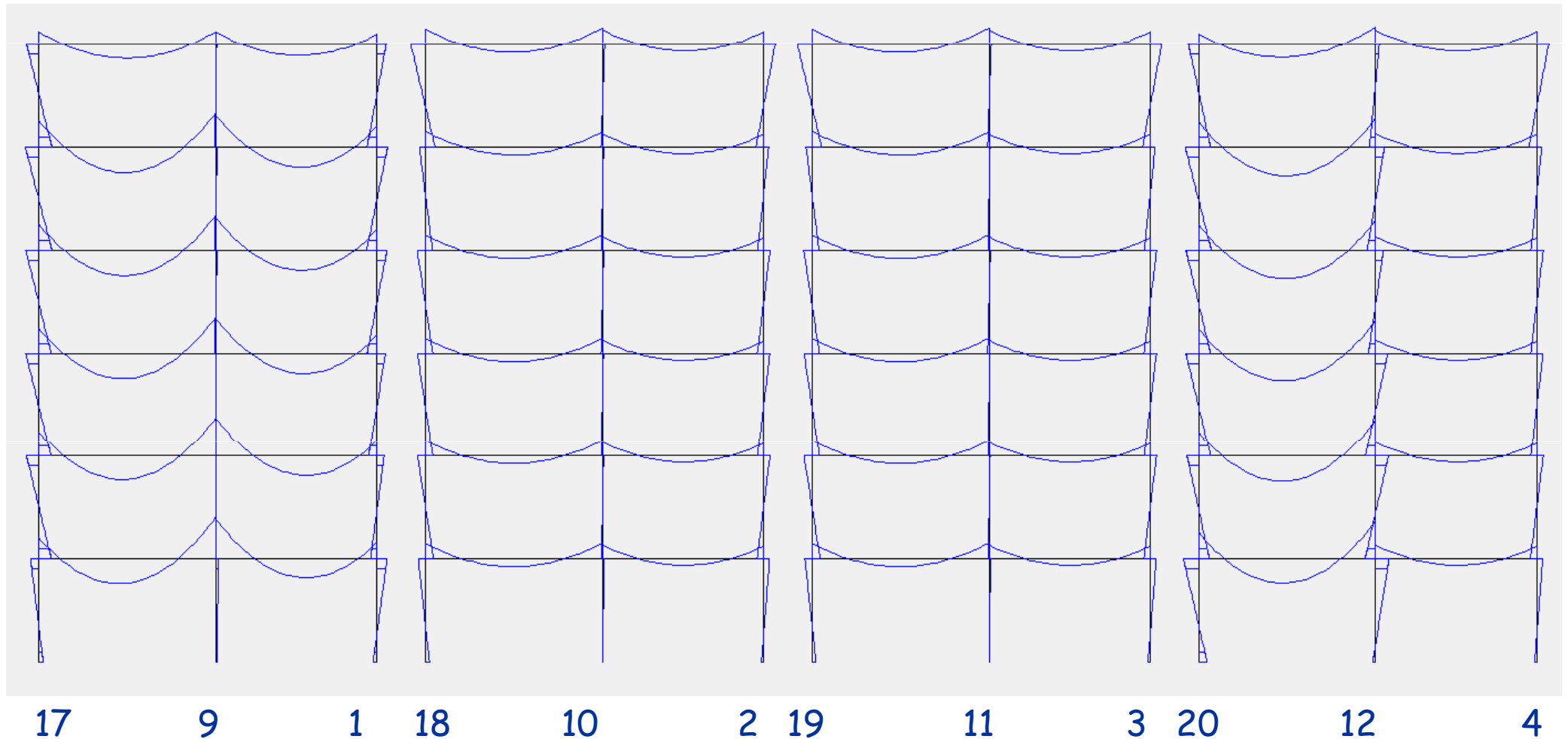
esempio - direzione y

- Carichi verticali



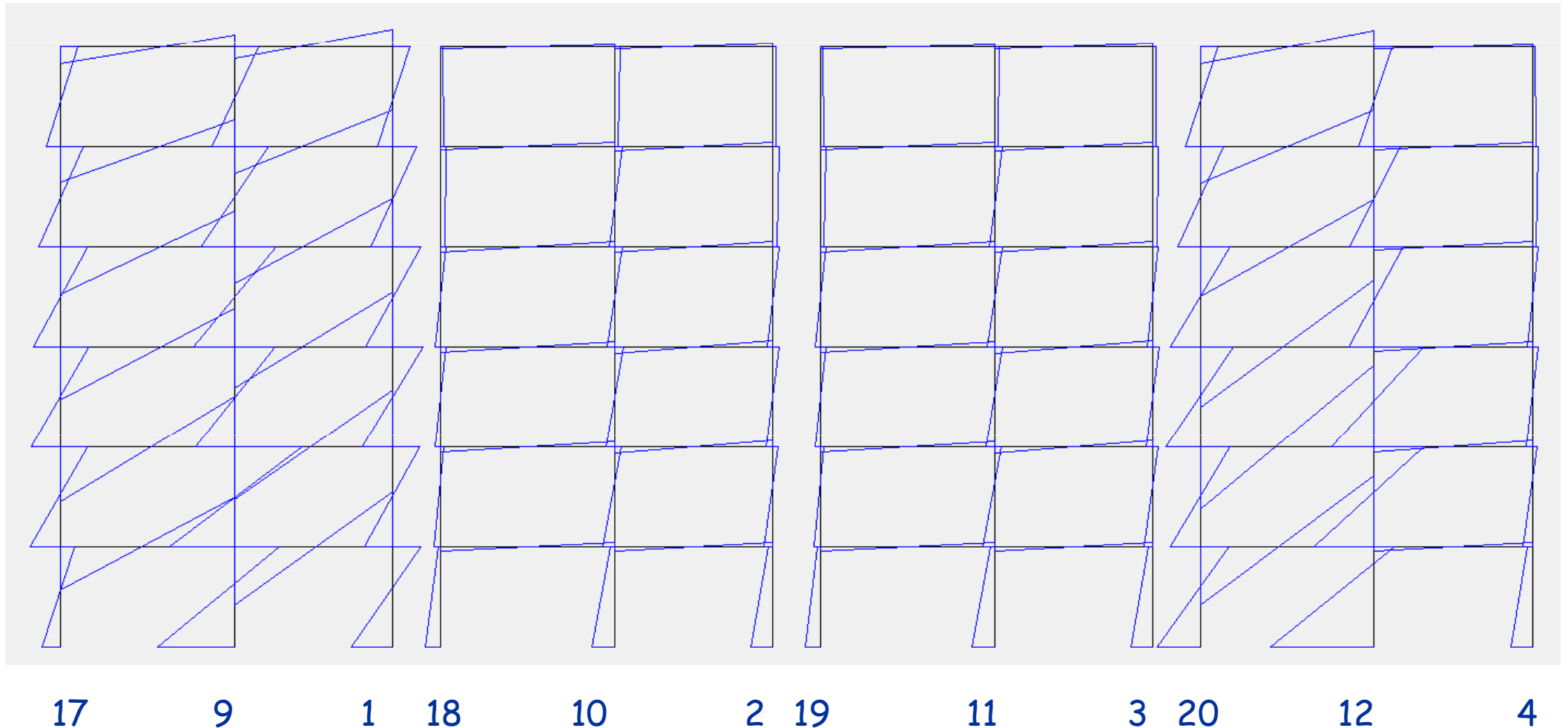
Telai in direzione y, carichi verticali

diagramma del momento flettente



Analisi modale - sisma in direzione y

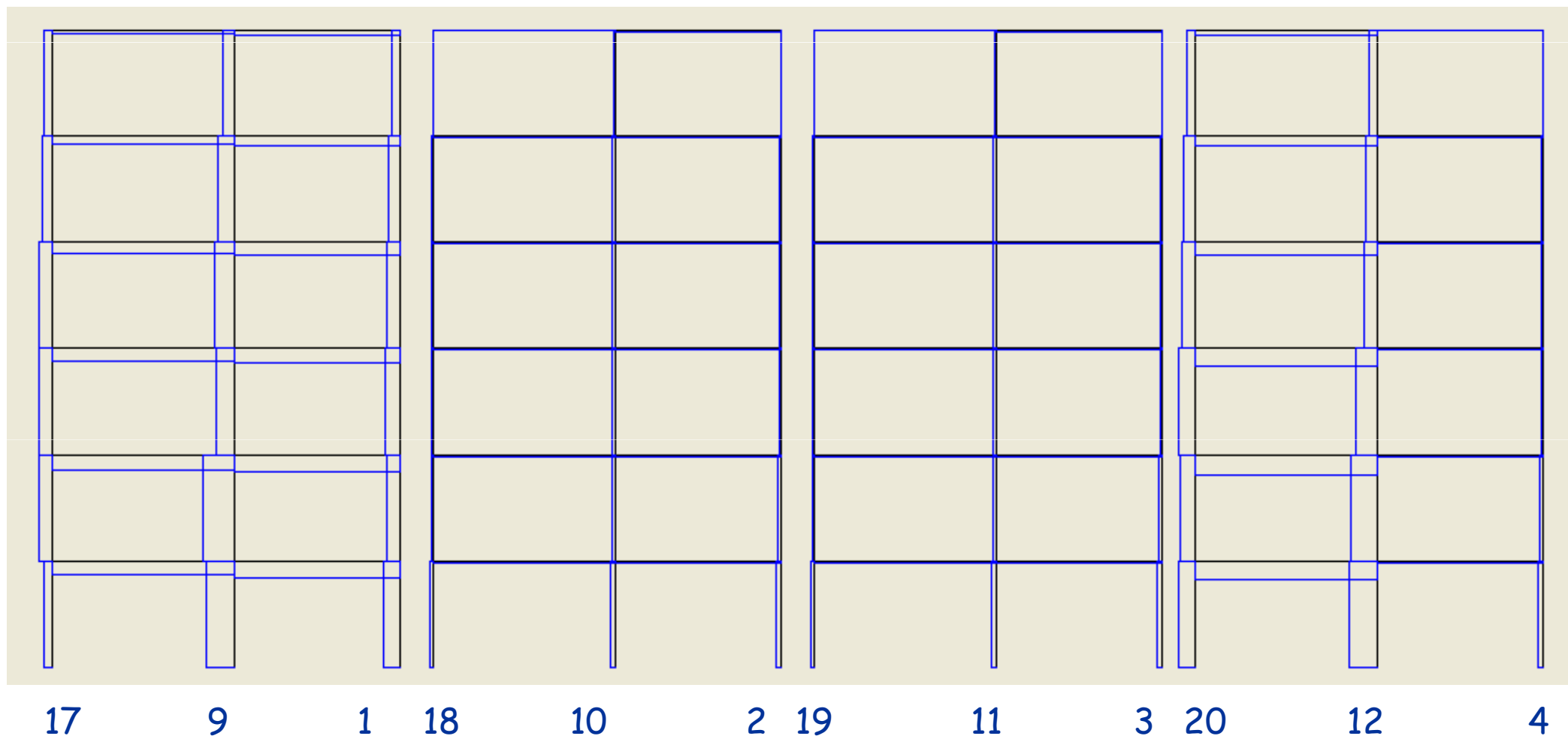
diagramma del momento flettente



Periodo: $T = 1.68 \text{ s}$

Analisi modale - sisma in direzione y

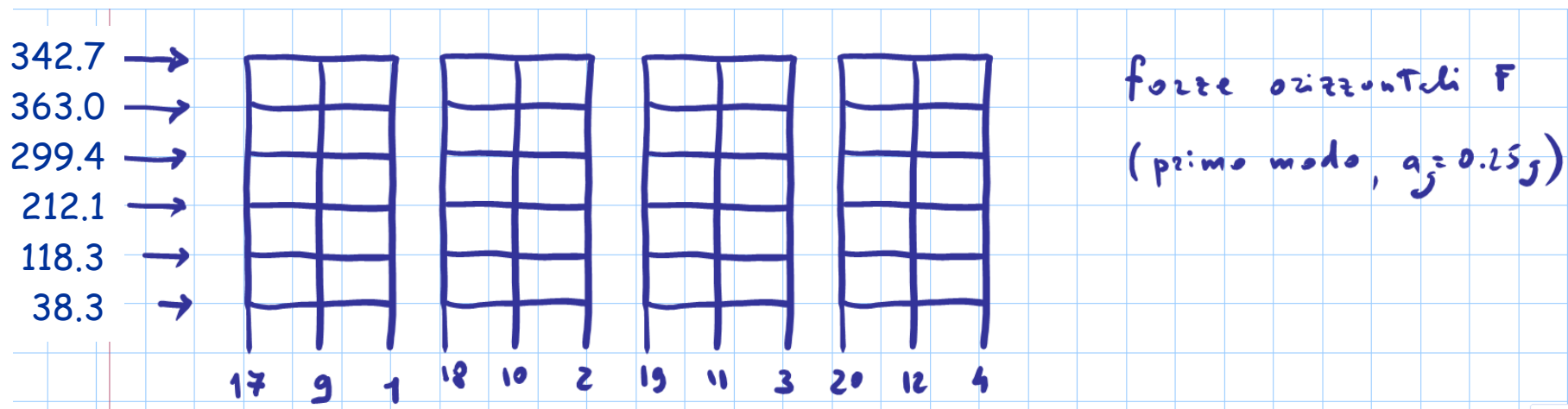
diagramma del taglio



Pushover

esempio - direzione y

- Distribuzione di forze



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

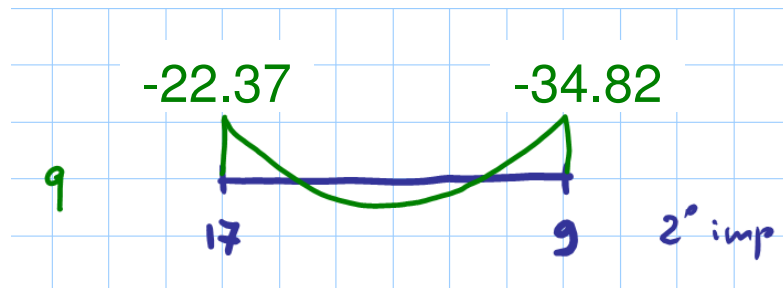
- Le forze usate nell'esempio sono quelle corrispondenti al primo modo

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

Pushover

esempio - direzione y

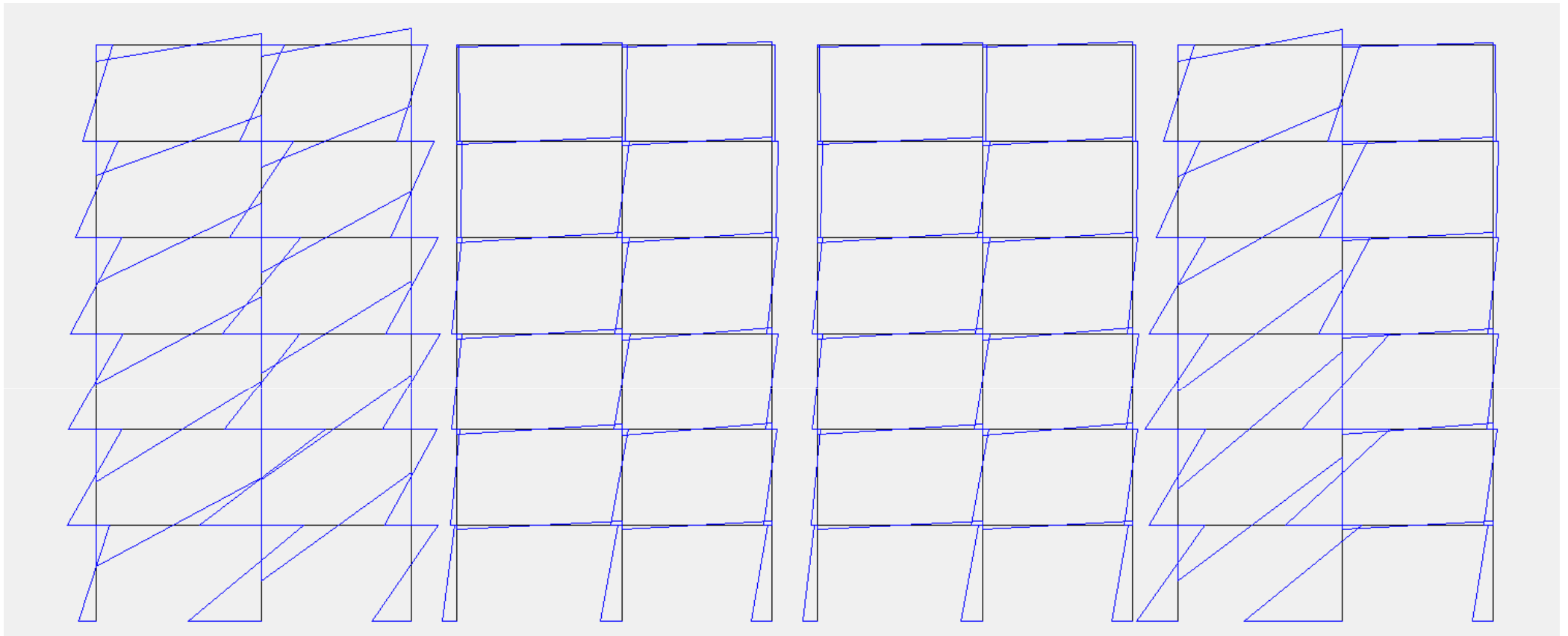
- Carichi verticali:
risolto lo schema si hanno i valori in tutte le aste
Ad esempio, per la trave 17-9, 2° impalcato:



Pushover

esempio - direzione y

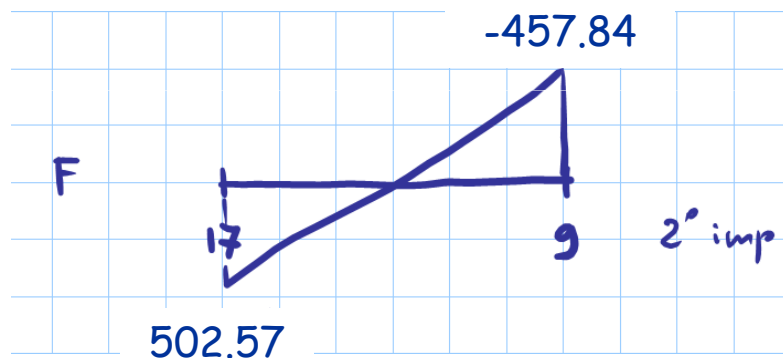
- Primo passo - effetto delle forze orizzontali



Pushover

esempio - direzione y

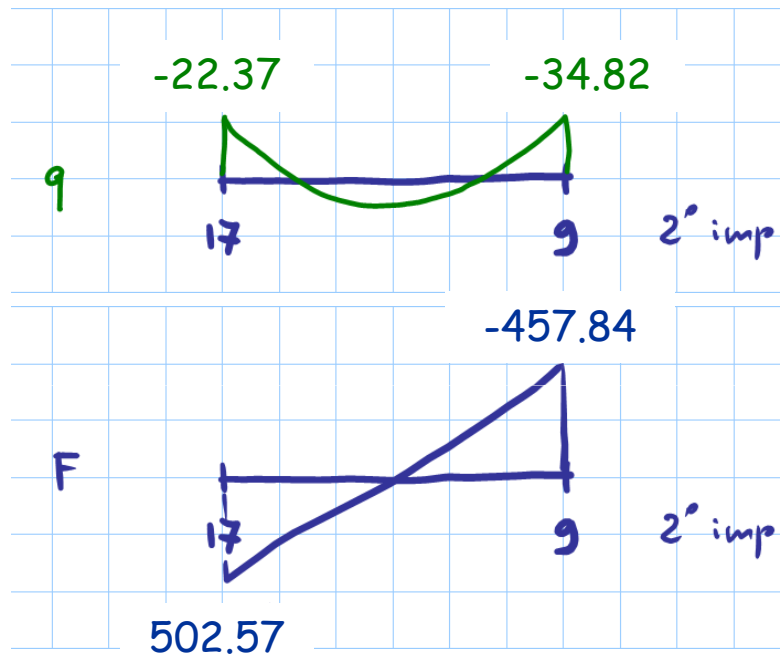
- Primo passo:
applicando le forze allo schema e risolto lo schema
si hanno i valori in tutte le aste
Ad esempio, per la trave 17-9, 2° impalcato:



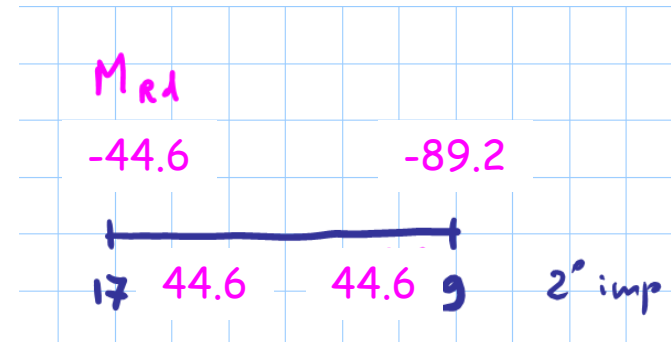
Pushover

esempio - direzione y

- Per questa trave si ha quindi:



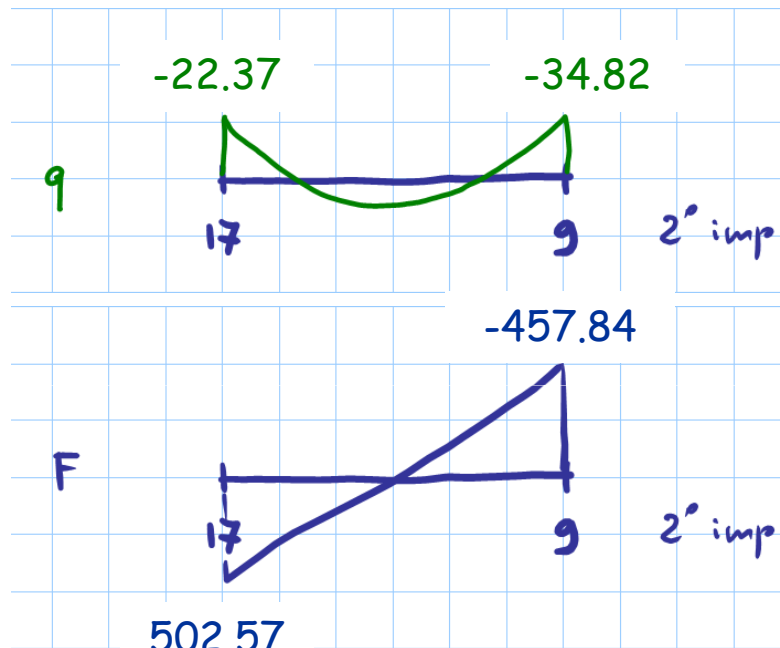
La trave ha come momenti resistenti i valori qui indicati



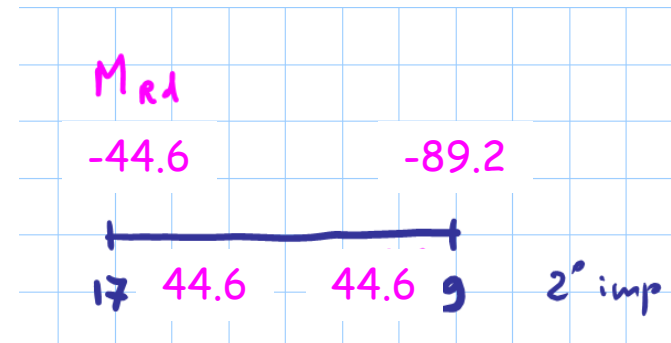
Pushover

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

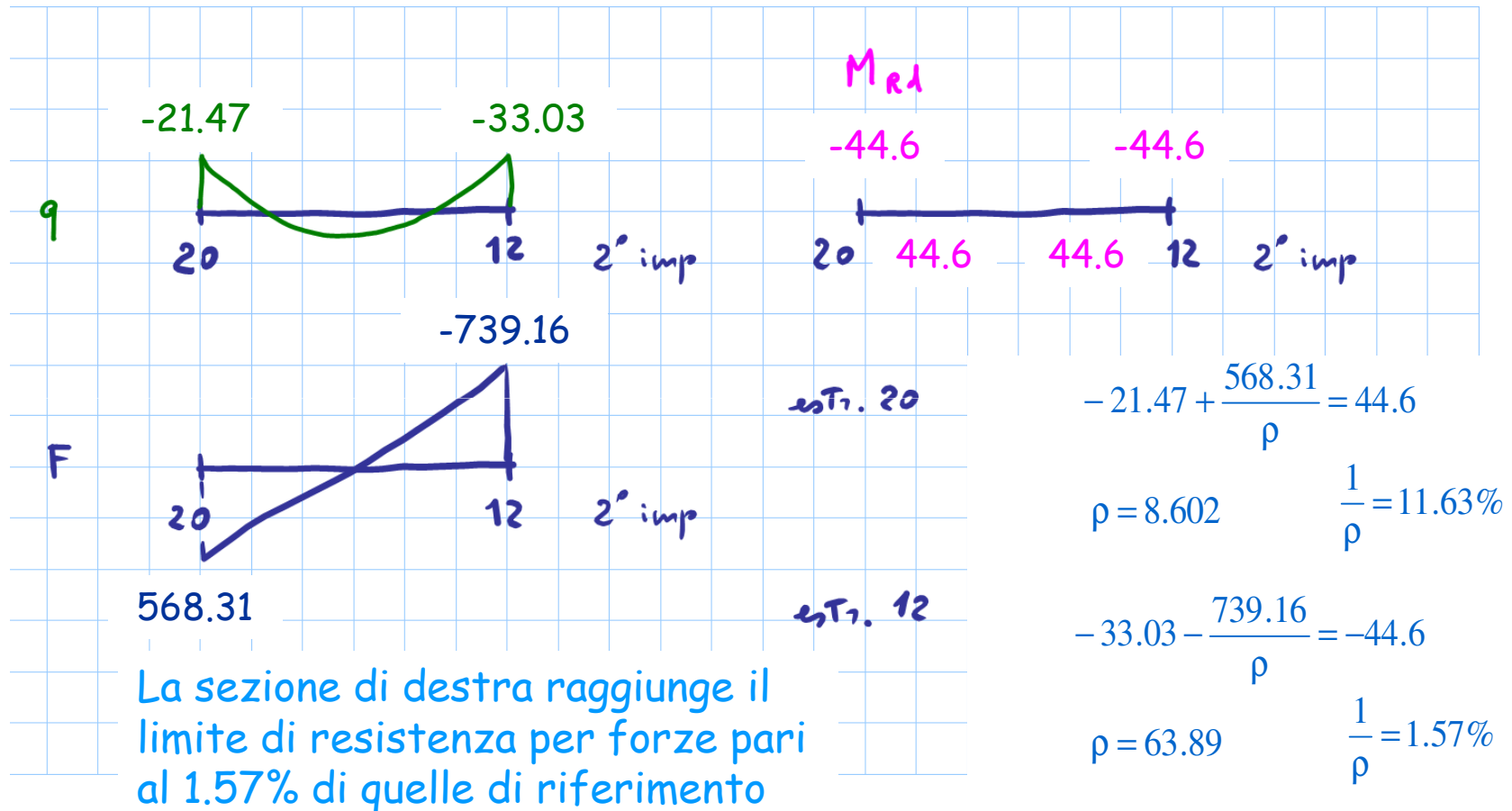


| | | |
|---------------------------|----------------------------------------|----------------------------|
| $\hookrightarrow T_1. 17$ | $-22.37 + \frac{502.57}{\rho} = 44.6$ | |
| | $\rho = 7.504$ | $\frac{1}{\rho} = 13.33\%$ |
| $\hookrightarrow T_1. 9$ | $-34.82 - \frac{457.84}{\rho} = -89.2$ | |
| | $\rho = 8.419$ | $\frac{1}{\rho} = 11.88\%$ |

Pushover

esempio - direzione y

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



Pushover

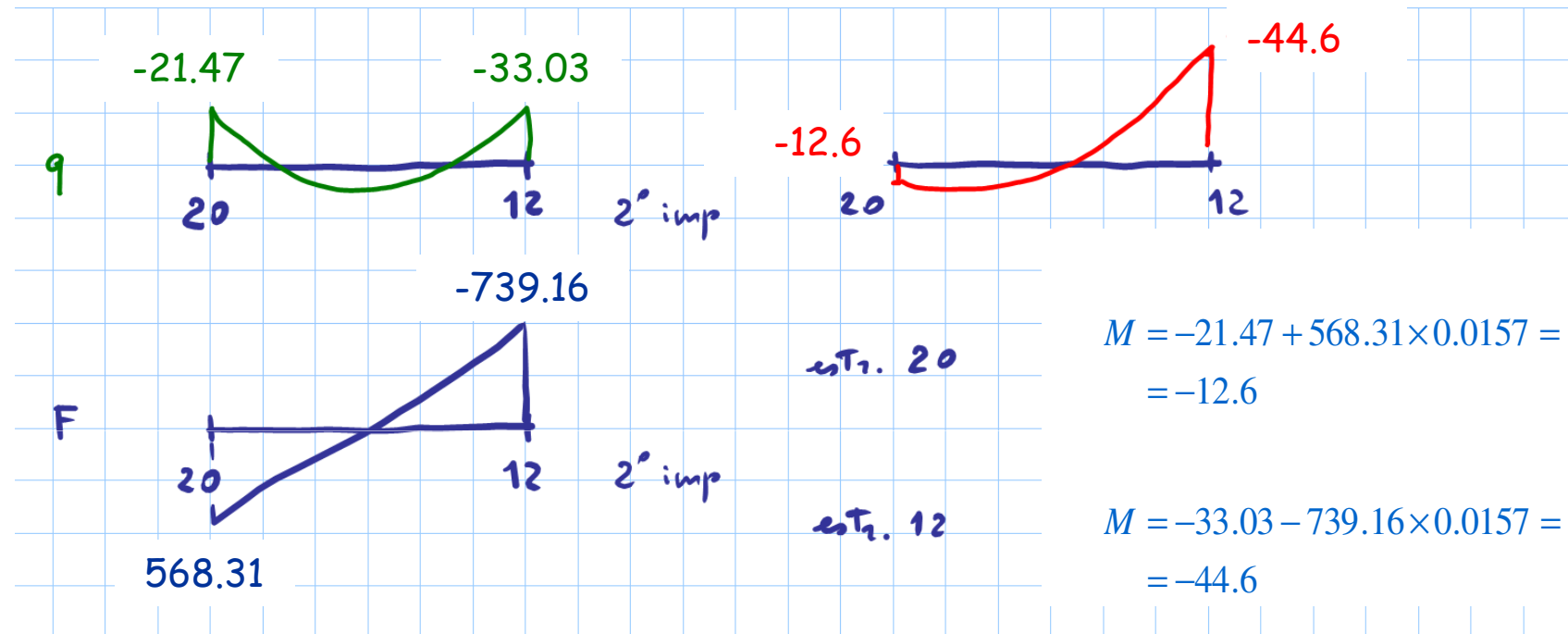
esempio - direzione y

- 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

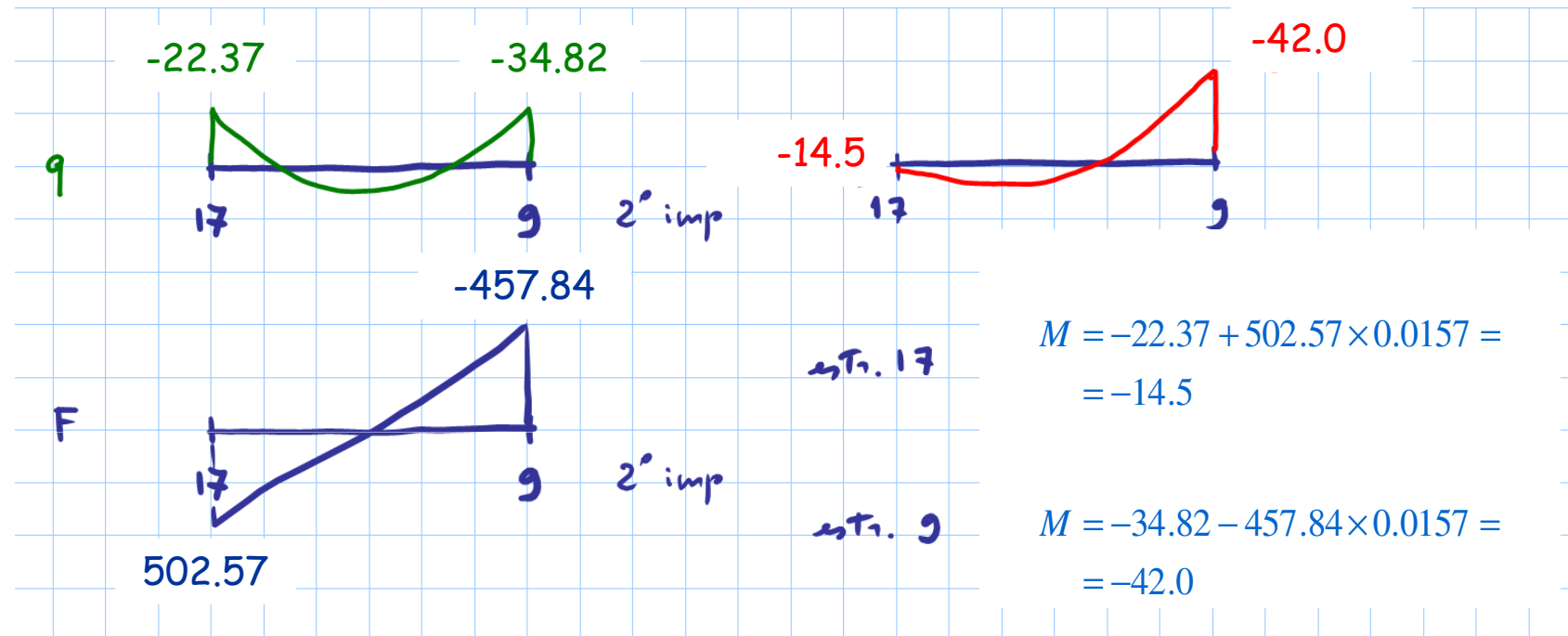


- L'estremo destro si è plasticizzato

Pushover

esempio - direzione y

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

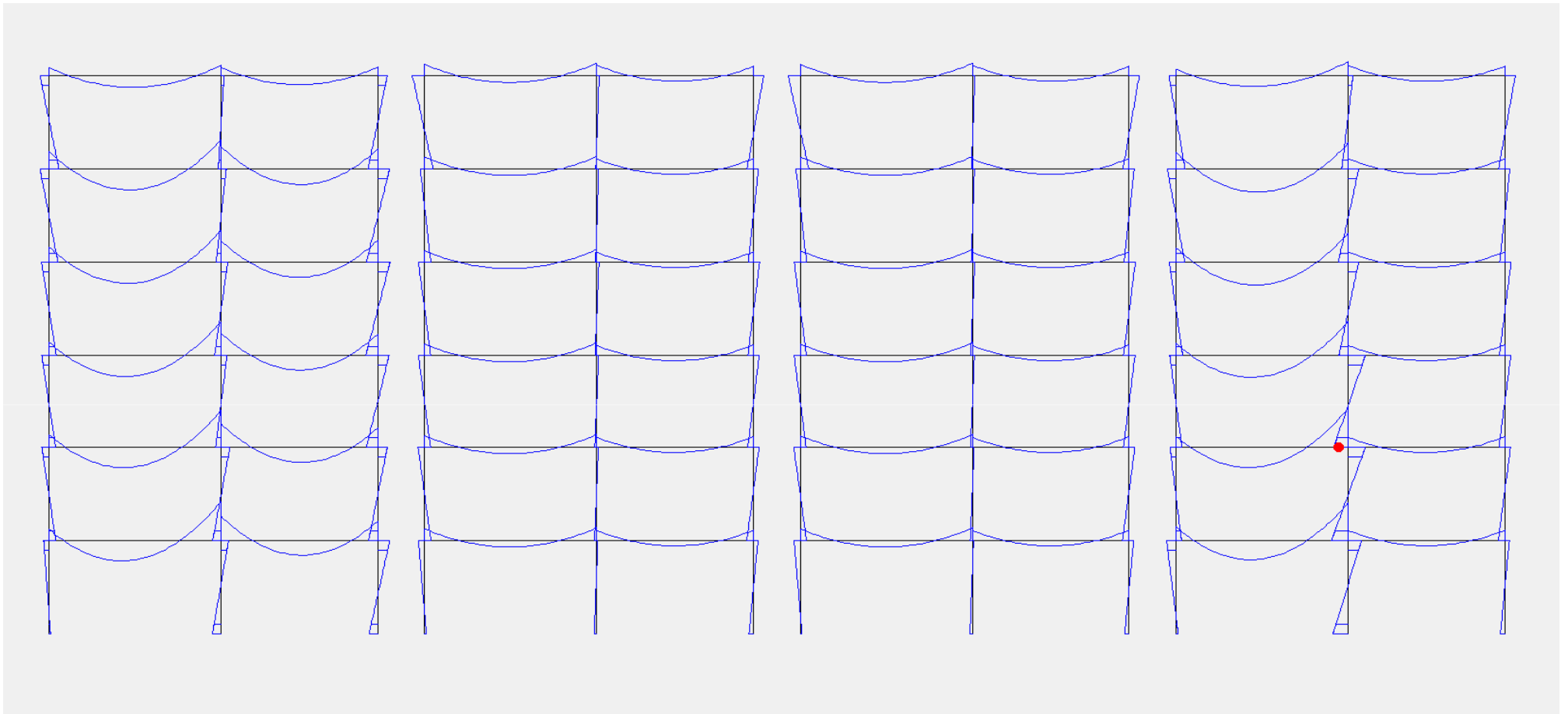


- Entrambi gli estremi sono ancora lontani dal limite

Pushover

esempio - direzione y

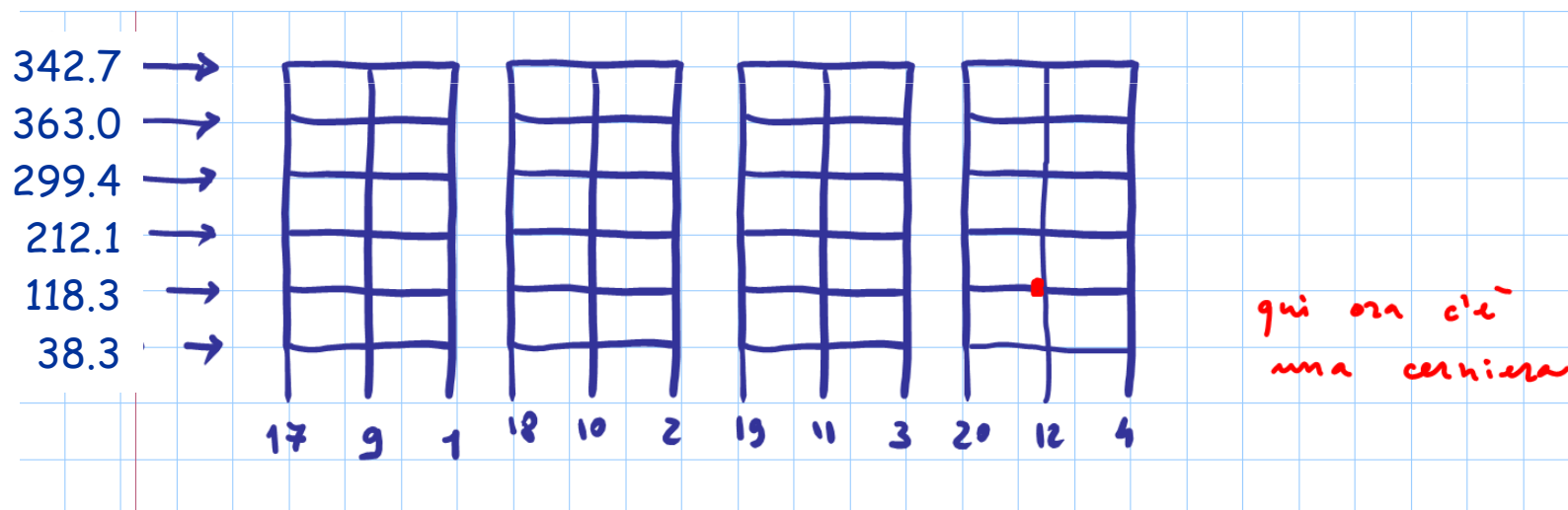
- Questa è la situazione al termine del primo passo



Pushover

esempio - direzione y

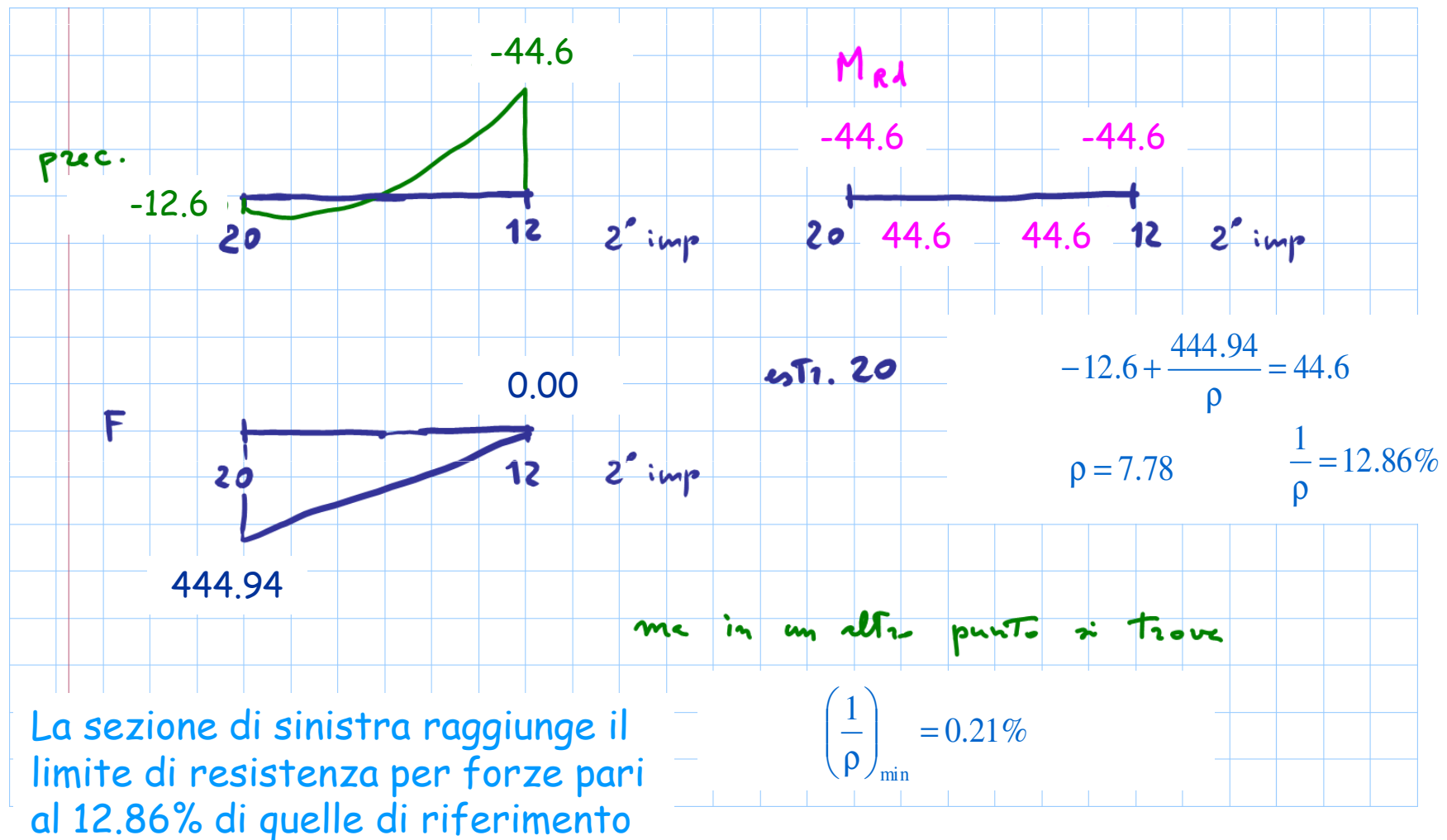
- I valori trovati (corrispondenti ai diagrammi in rosso) sono i valori finali del primo passo, nonché quelli iniziali per il secondo passo
- Nella sezione in cui si è raggiunto il momento resistente M non può crescere. Si mette quindi nello schema una cerniera e si ripete il calcolo



Pushover

esempio - direzione y

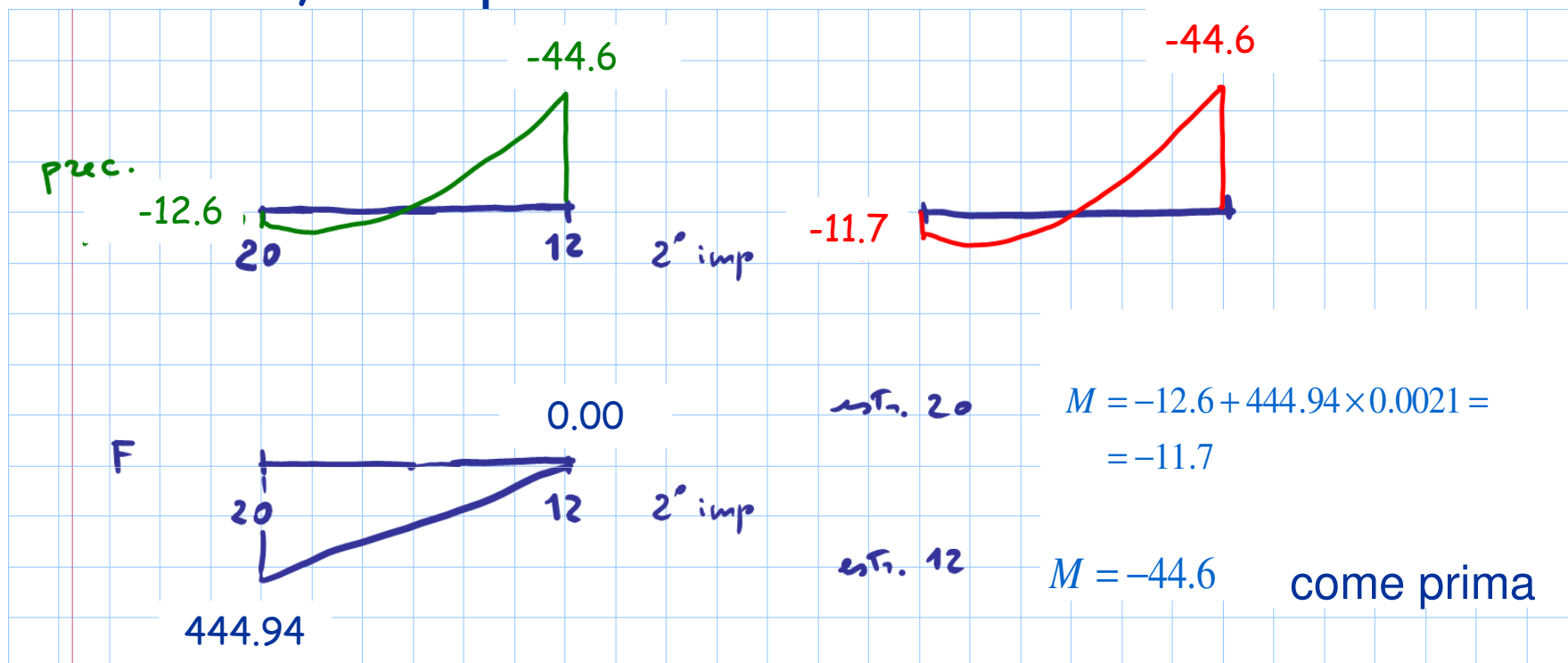
- Secondo passo, per la trave 20-12, 2° impalcato:



Pushover

esempio - direzione y

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

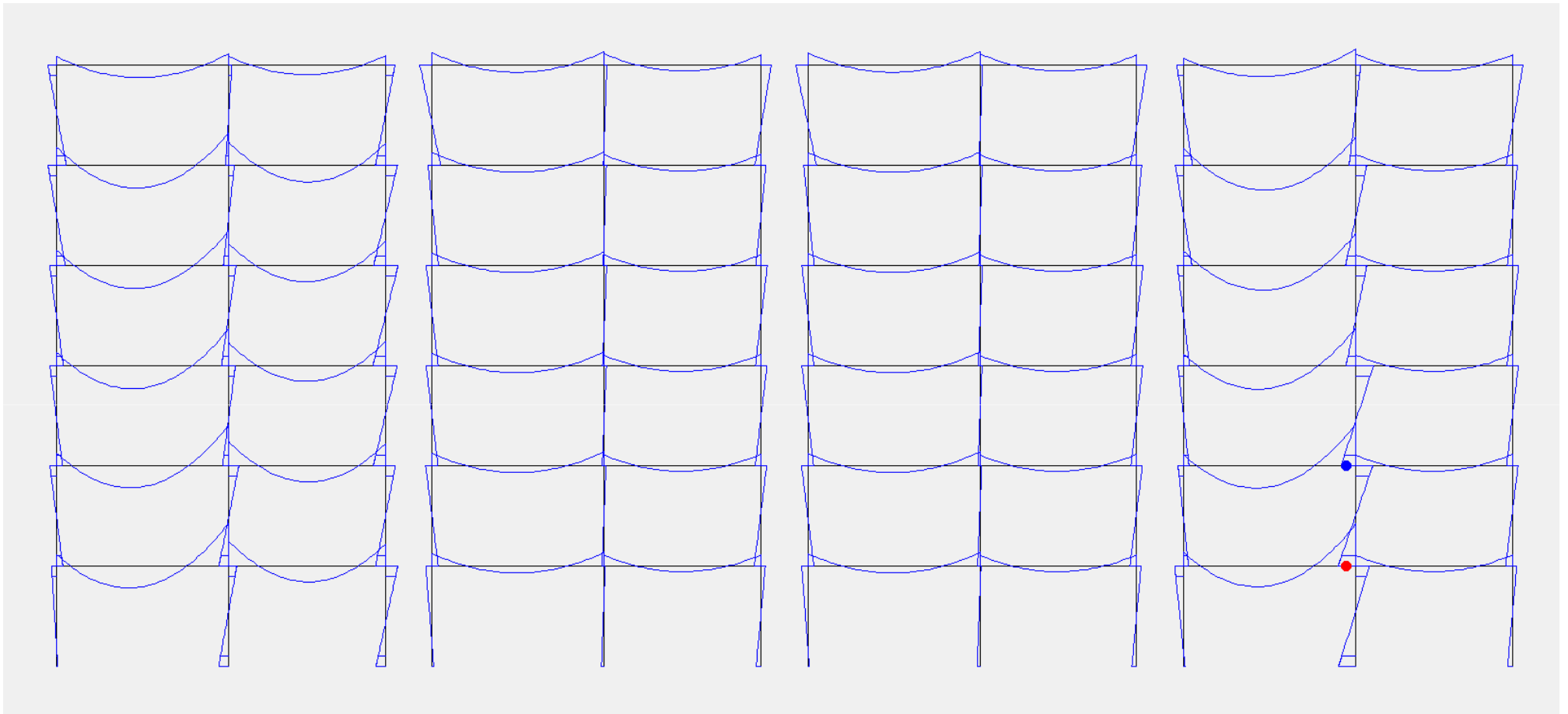


- Si noti che questi (diagramma in rosso) sono i valori che corrispondono a forze pari al $1.57 + 0.21 = 1.78\%$ delle forze di riferimento

Pushover

esempio - direzione y

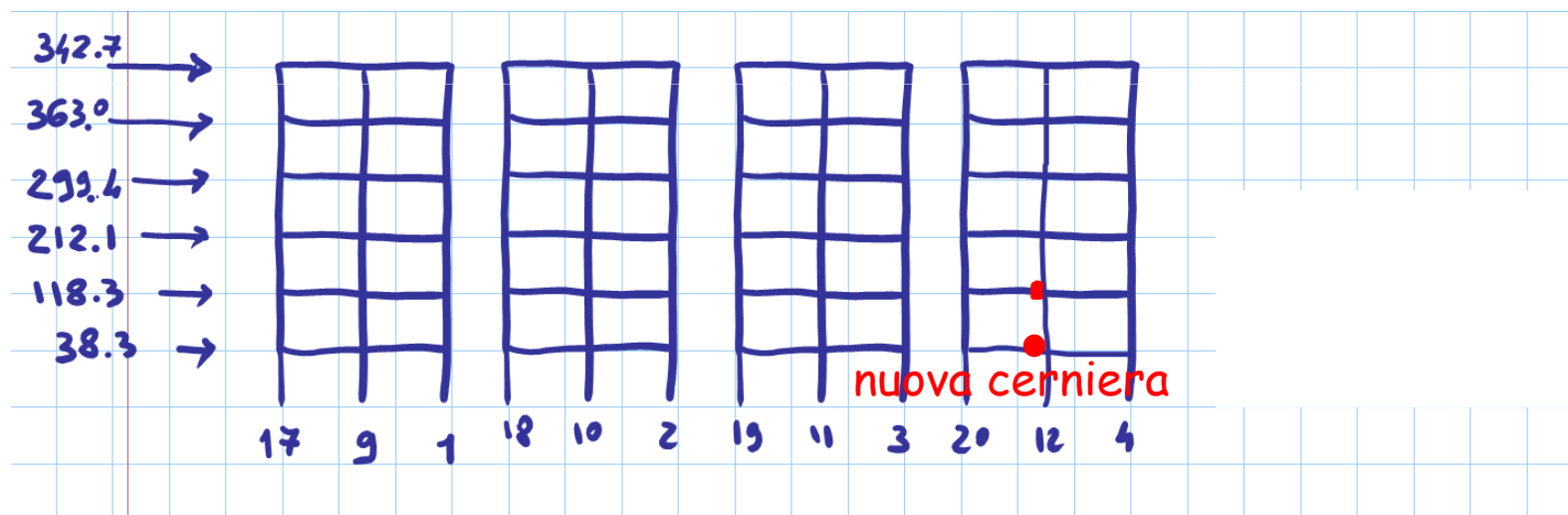
- Questa è la situazione al termine del secondo passo



Pushover

esempio - direzione y

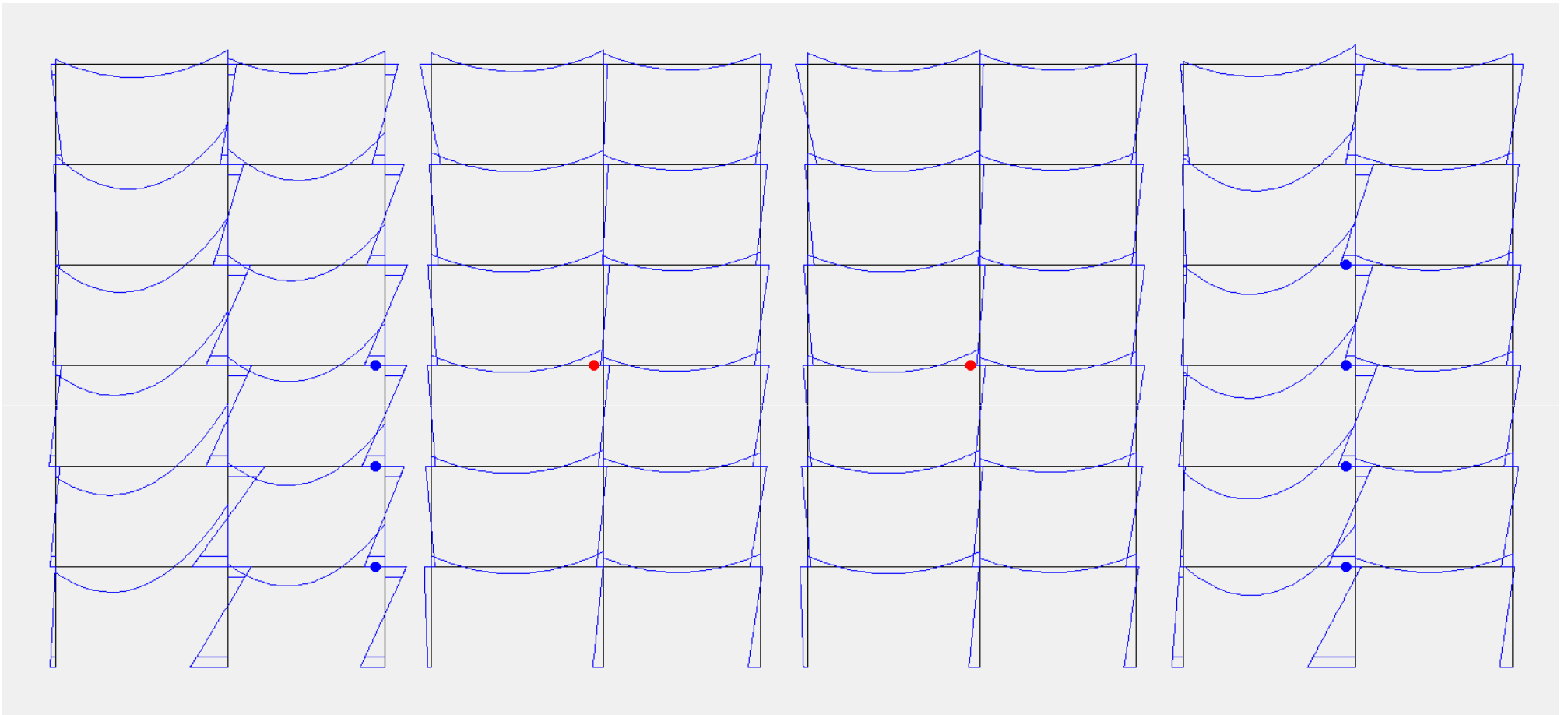
- I valori trovati (corrispondenti ai diagrammi in rosso) sono i valori finali del secondo passo, nonché quelli iniziali per il terzo passo
- Nella sezione in cui si è raggiunto il momento resistente M non può crescere. Si mette quindi nello schema un'altra cerniera e si ripete il calcolo



Pushover

esempio - direzione y

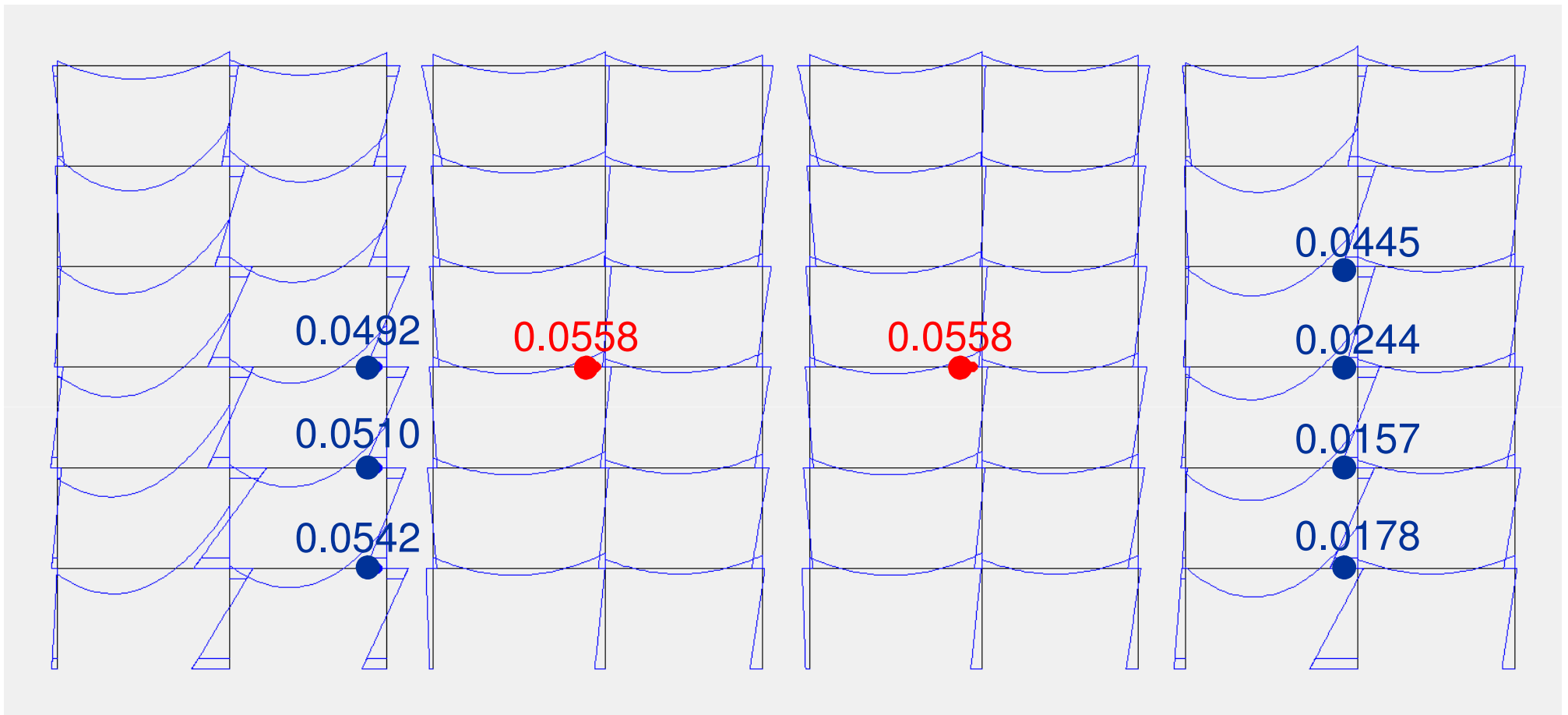
- Questa è la situazione al termine dell'ottavo passo



Pushover

esempio - direzione y

- Questa è la situazione al termine dell'ottavo passo



Applicazione alla struttura in esame

telai in direzione y

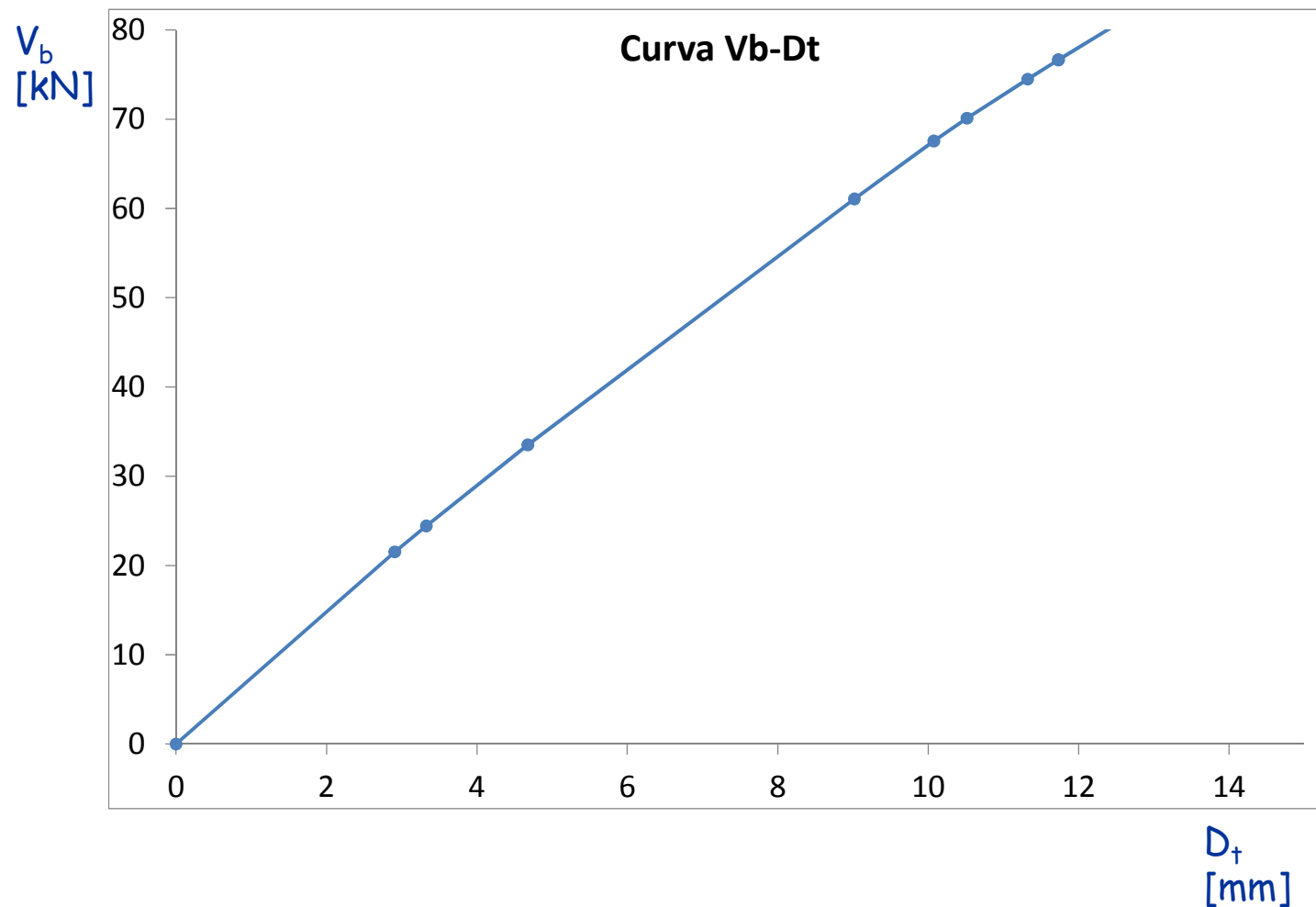
- Riepilogo dei risultati dei primi passi dell'analisi non lineare, fatti in maniera parzialmente manuale, ovvero con l'utilizzo di una analisi lineare e facendo variare via via lo schema

| 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

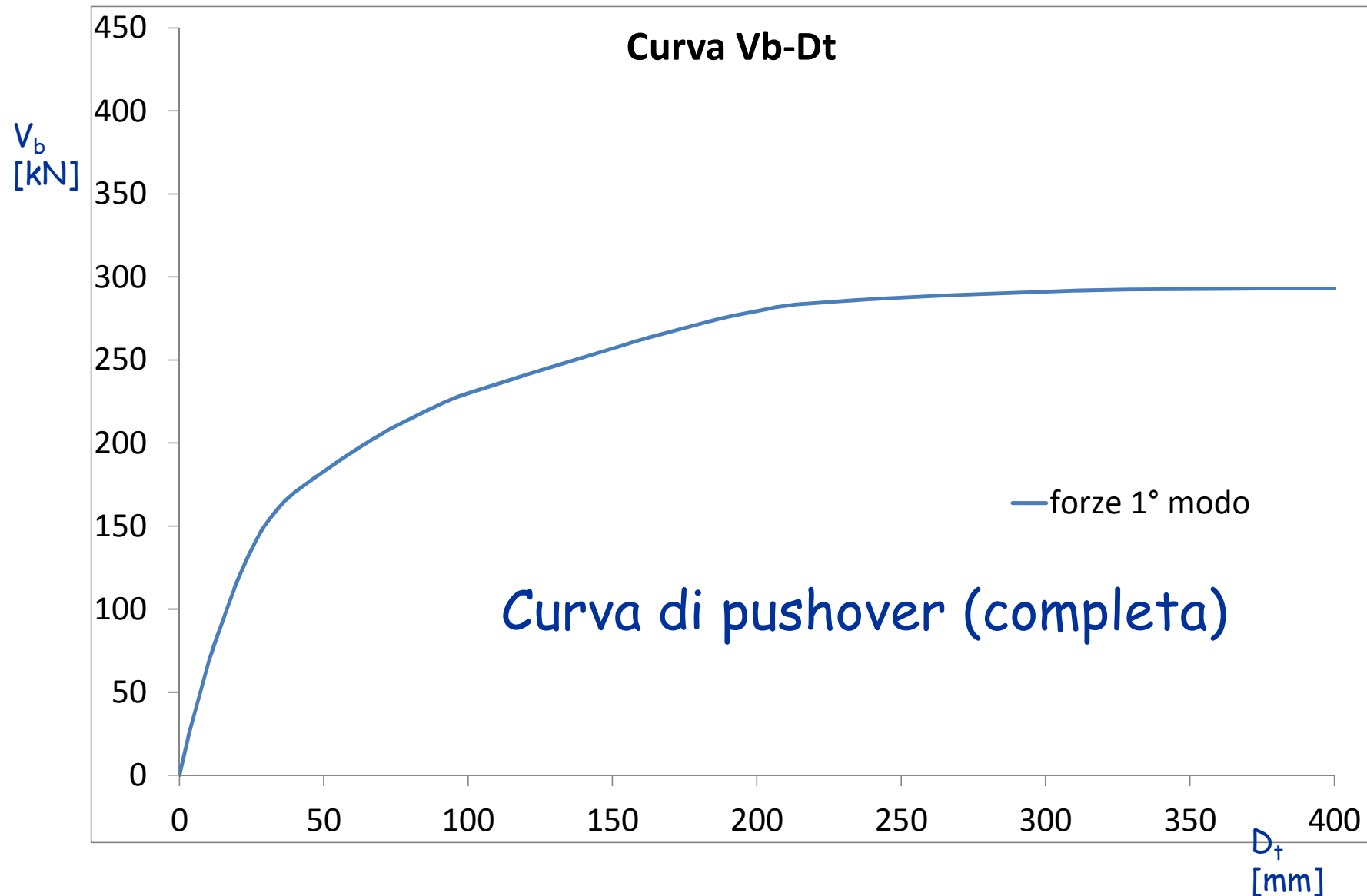
telai in direzione y

Curva di pushover (parte iniziale)



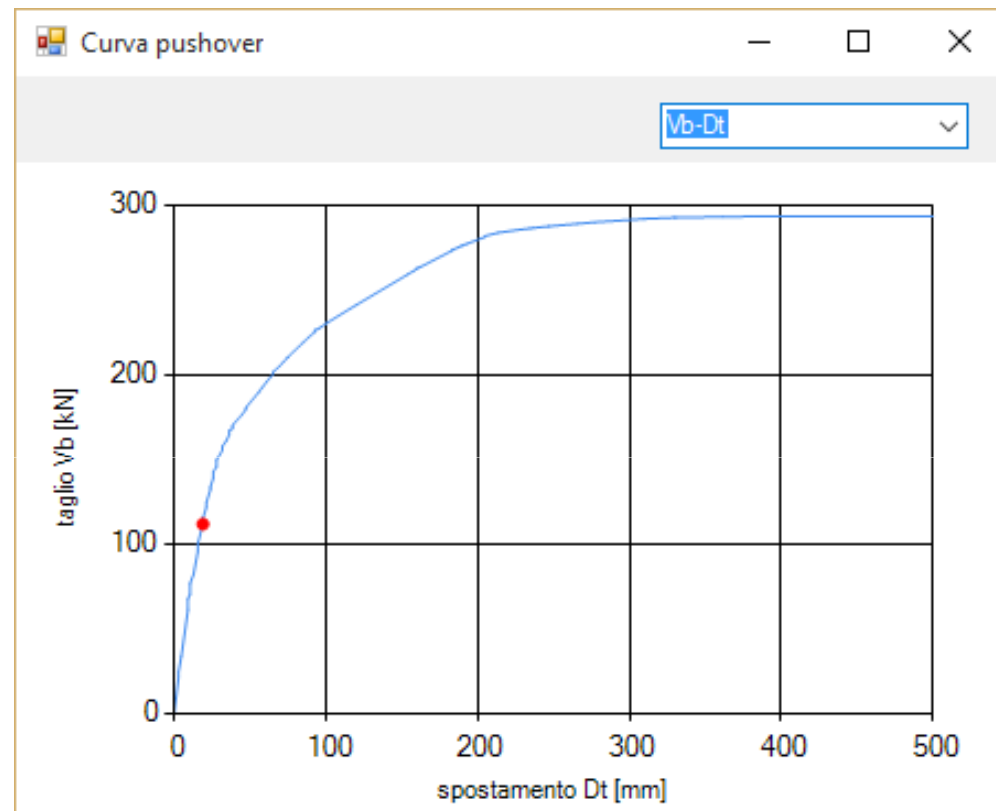
Applicazione alla struttura in esame

telai in direzione y

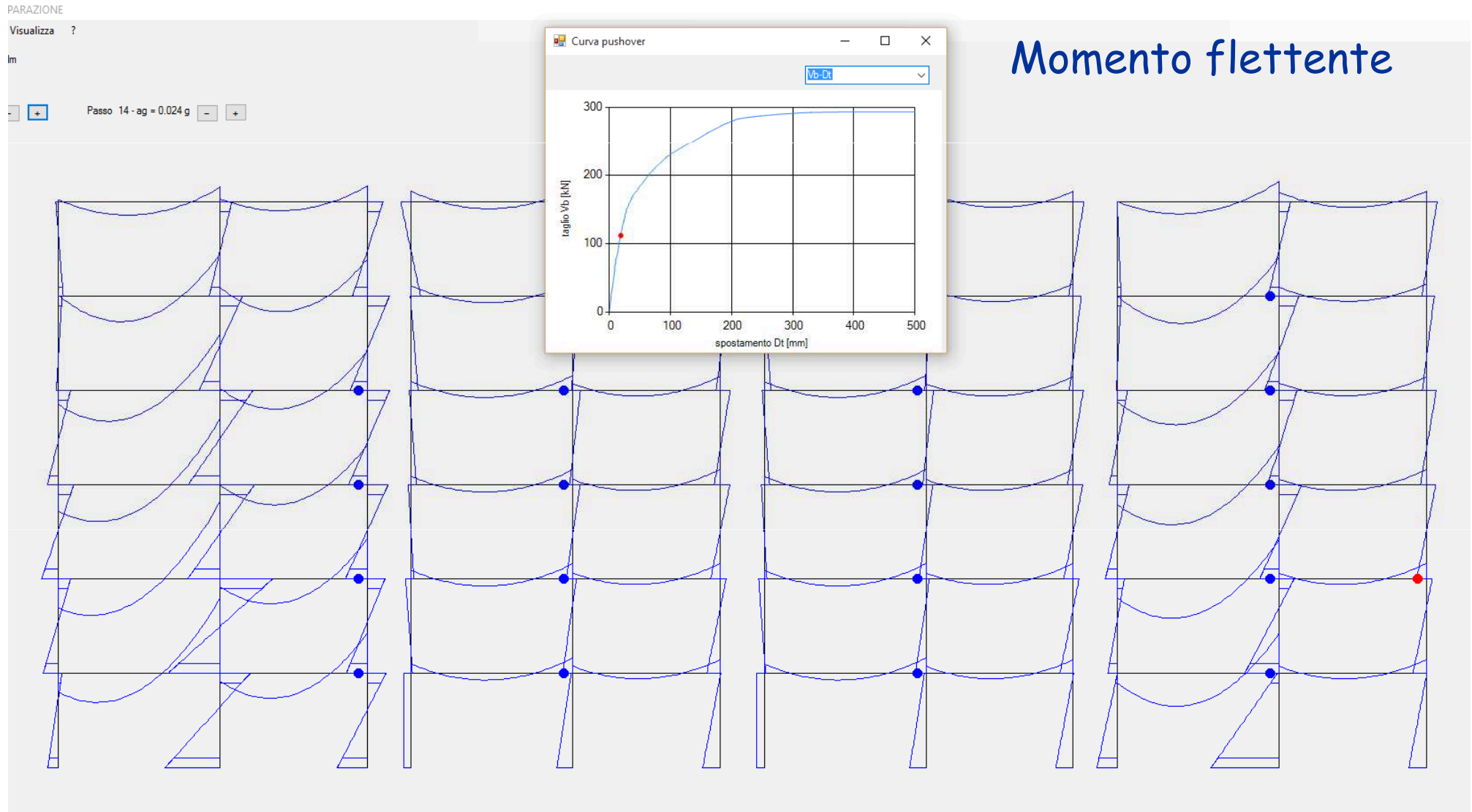


Applicazione alla struttura in esame telai in direzione y

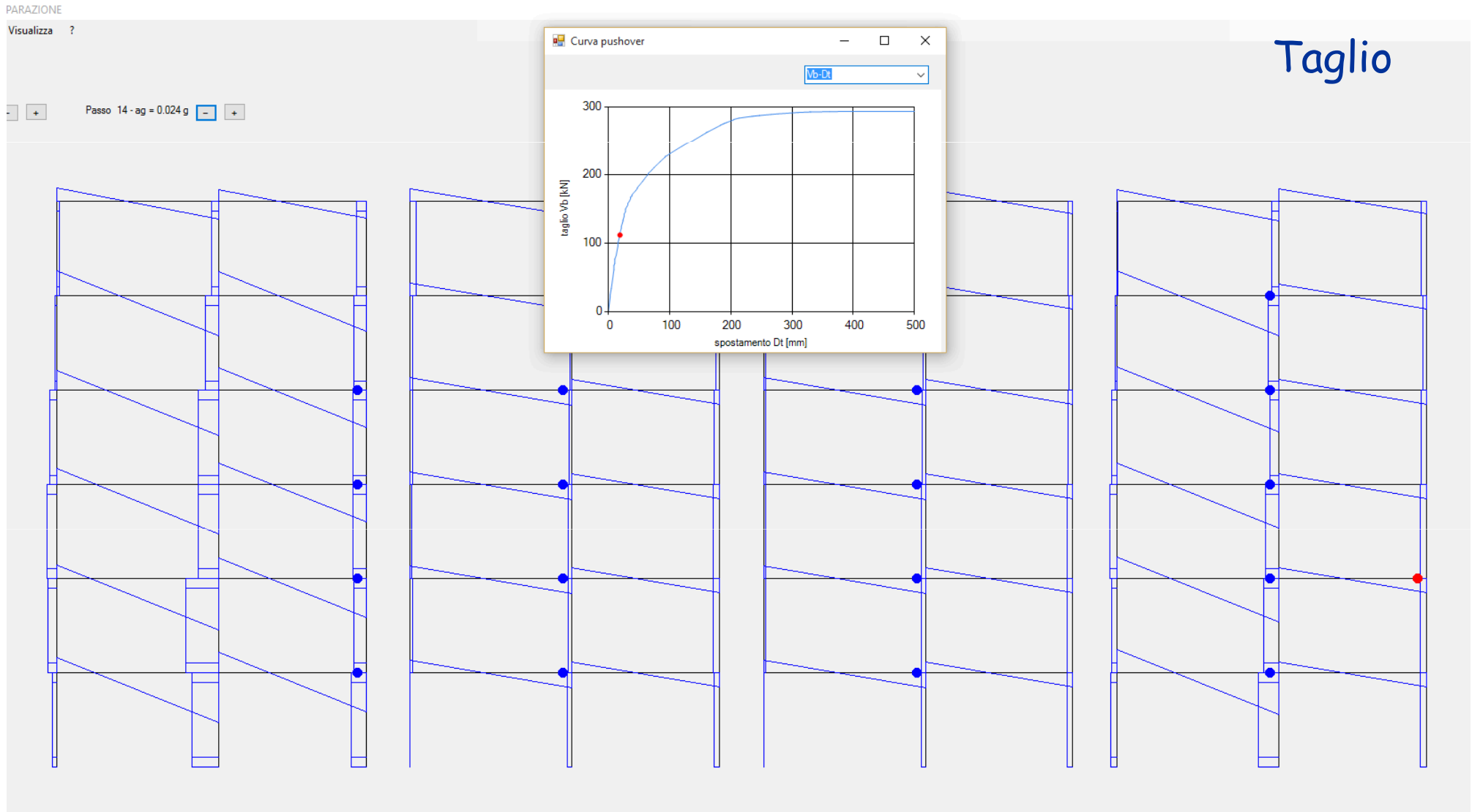
A ciascun punto della pushover corrispondono tante informazioni:



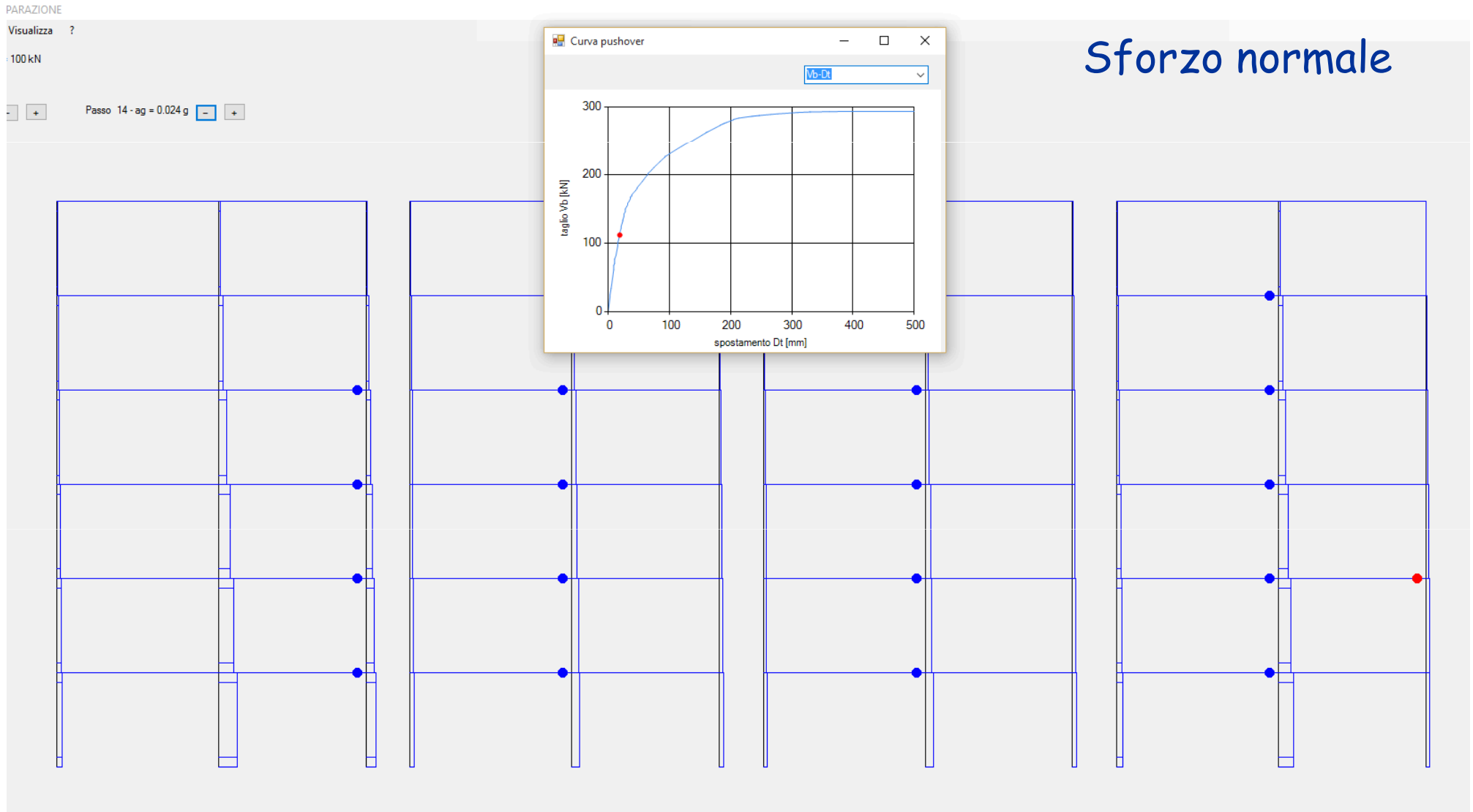
Applicazione alla struttura in esame telai in direzione y



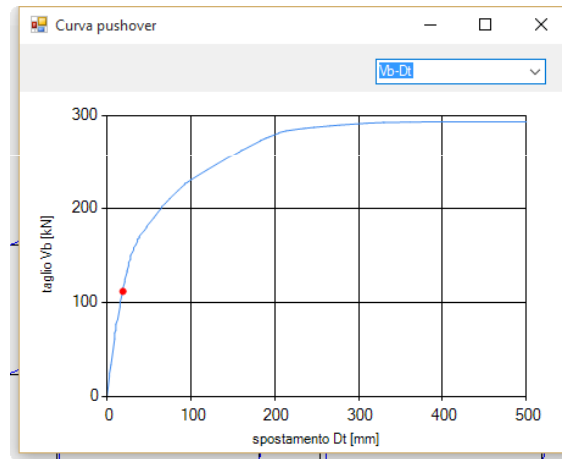
Applicazione alla struttura in esame telai in direzione y



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

Applicazione alla struttura in esame

telai in direzione y

