

Corso di aggiornamento

Progettazione strutturale sulla base
delle normative più recenti

Elementi strutturali e collegamenti in acciaio

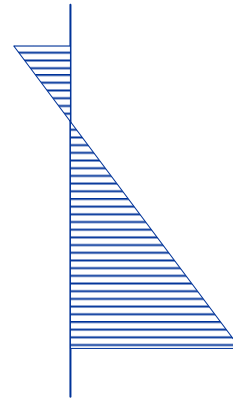
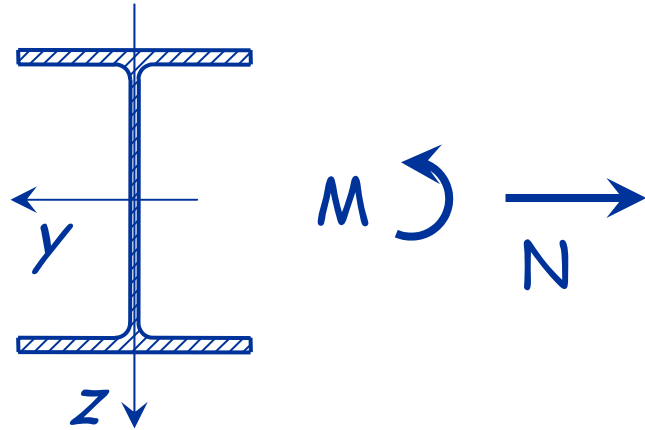
Villa Redenta, Spoleto

25-27 settembre 2008

Aurelio Ghersi

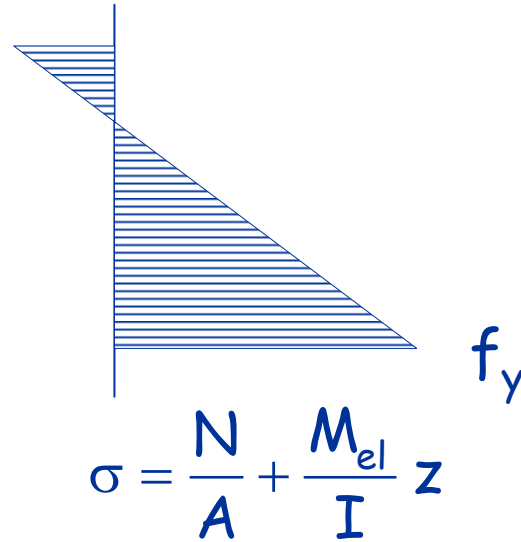
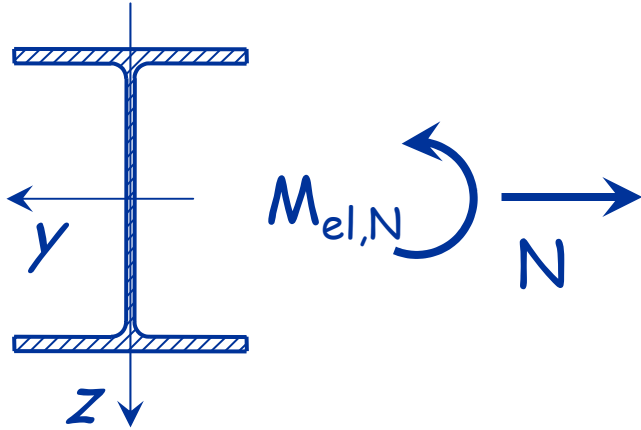
Flessione composta
tensoflessione

Comportamento ultimo



$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{I} z$$

Comportamento ultimo



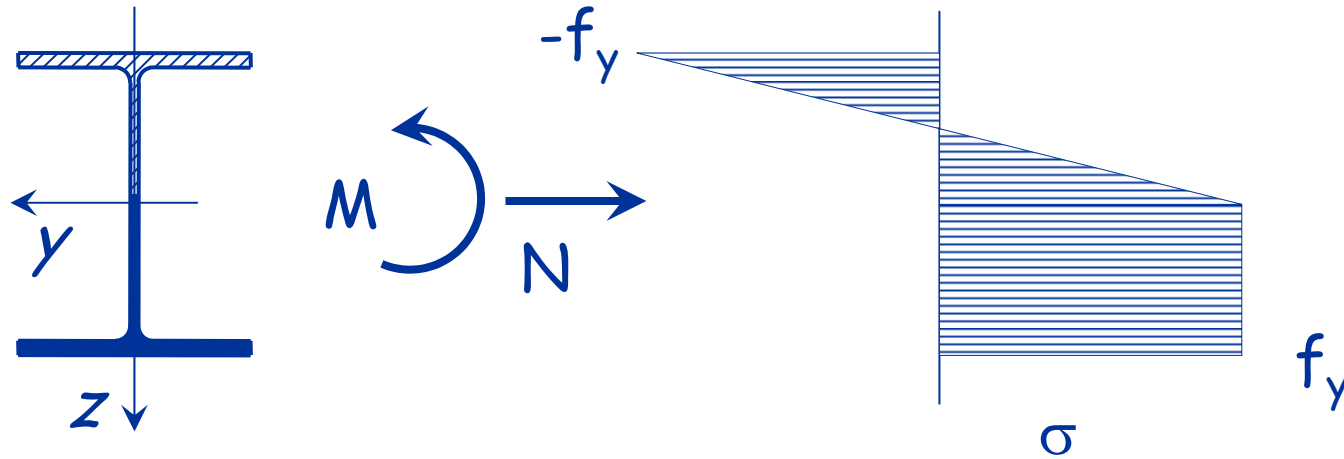
Per calcolare $M_{el,N}$:

$$f_y = \frac{N}{A} + \frac{M_{el,N}}{W_{el}}$$



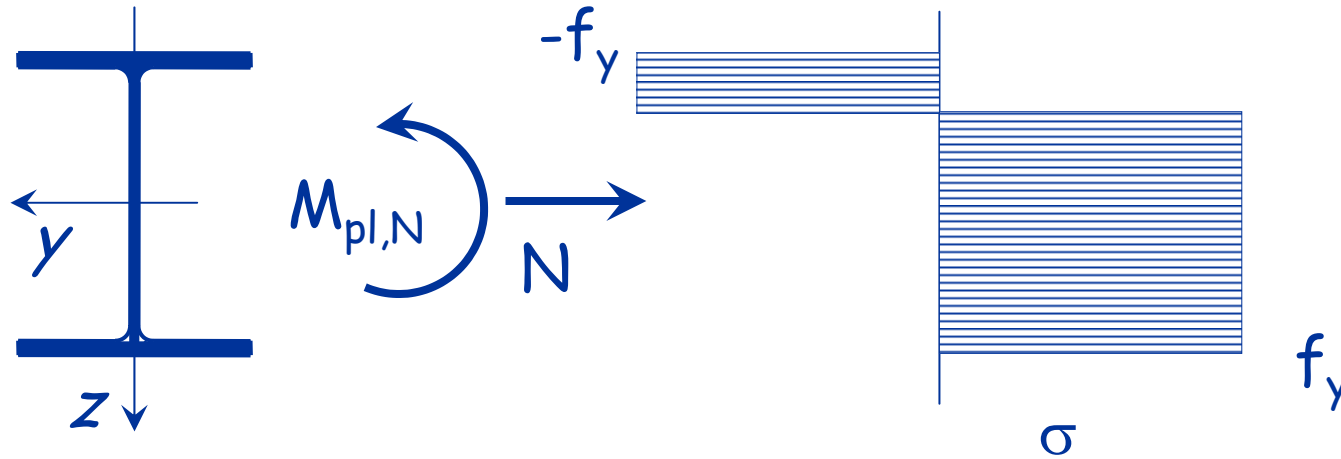
$$M_{el,N} = \left(f_y - \frac{N}{A} \right) W_{el}$$

Comportamento ultimo



Incrementando il momento flettente le deformazioni plastiche si propagano fino alla completa plasticizzazione della sezione

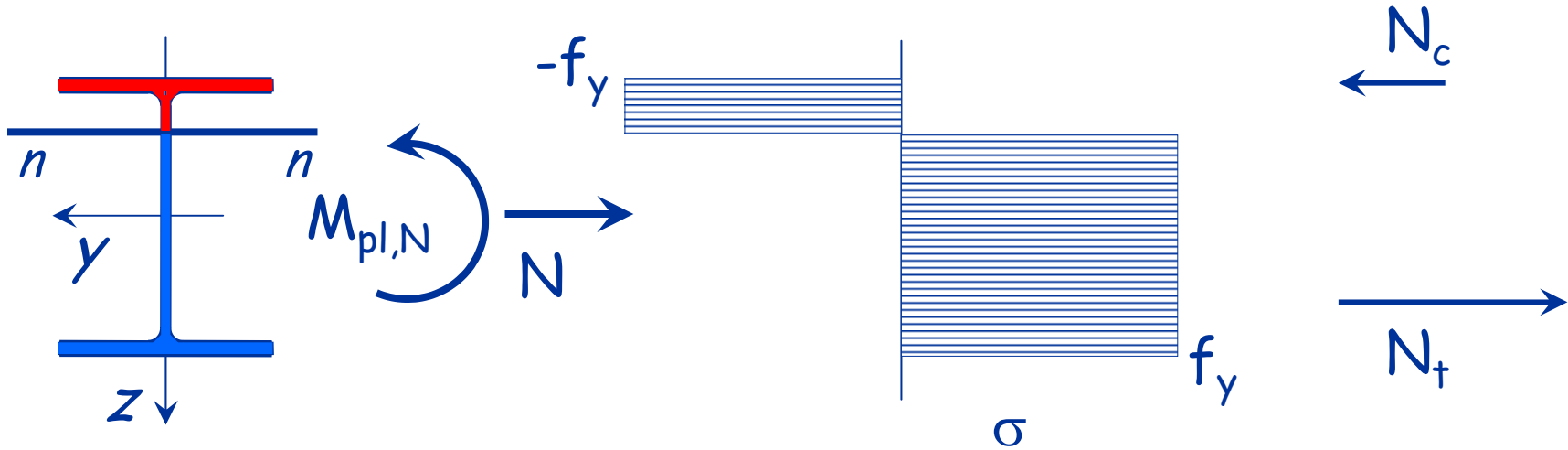
Comportamento ultimo



Per calcolare $M_{pl,N}$:

- 1 - Bisogna prima determinare la posizione dell'asse neutro;
- 2 - Imponendo l'equilibrio alla rotazione rispetto all'asse baricentrico si determina $M_{pl,N}$

Comportamento ultimo



1 - Determinazione dell'asse neutro

$$N_c + N_t = N_{pl,N}$$

(equilibrio alla traslazione)

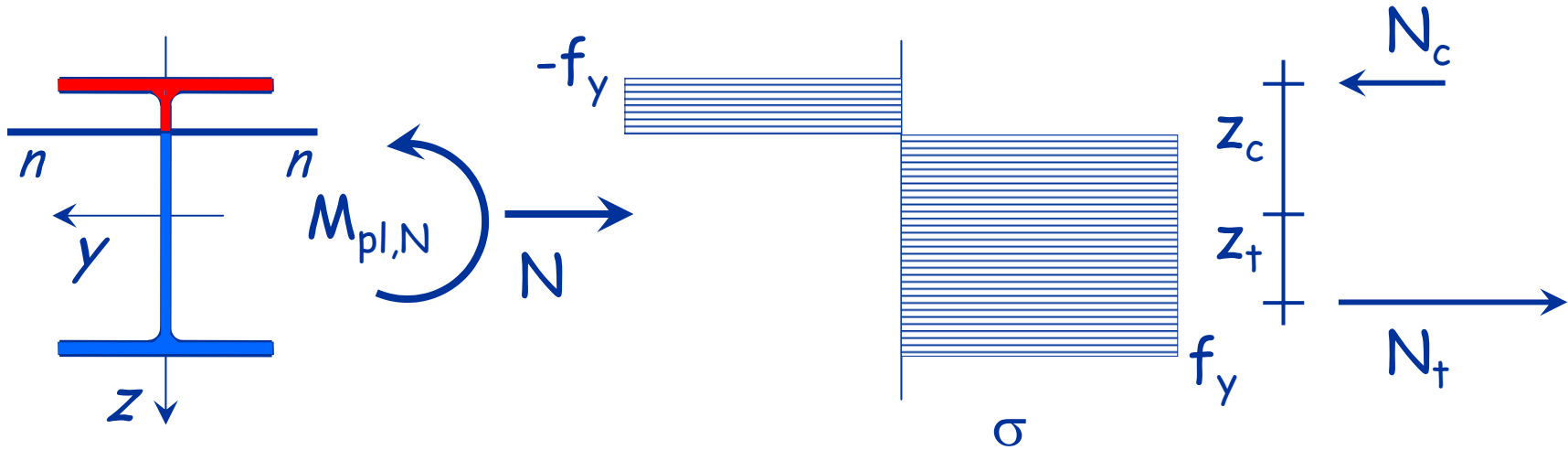


Asse neutro

$$N_c = -f_y A_c$$

$$N_t = f_y A_t$$

Comportamento ultimo



2 - Calcolo di $M_{pl,N}$

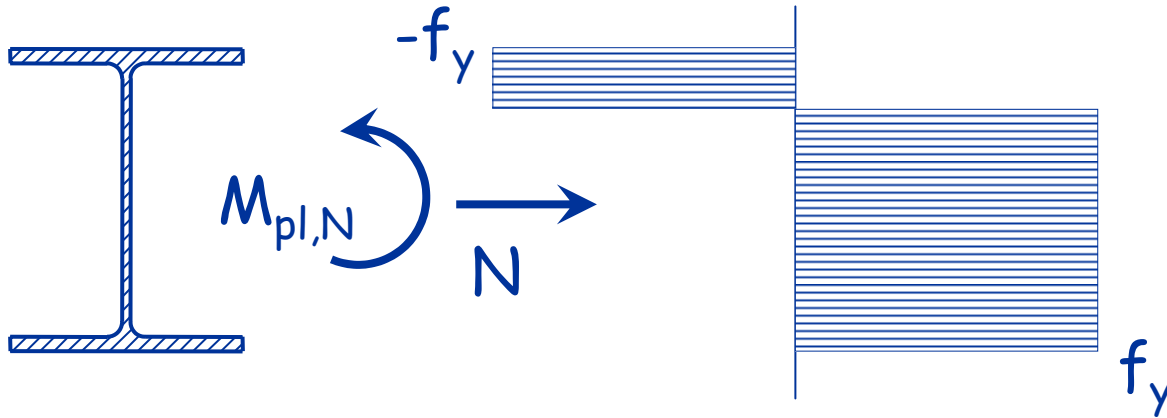
$$M_{pl,N} = N_t z_t - N_c z_c = f_y (A_t z_t - A_c z_c)$$

$$N_c = -f_y A_c$$

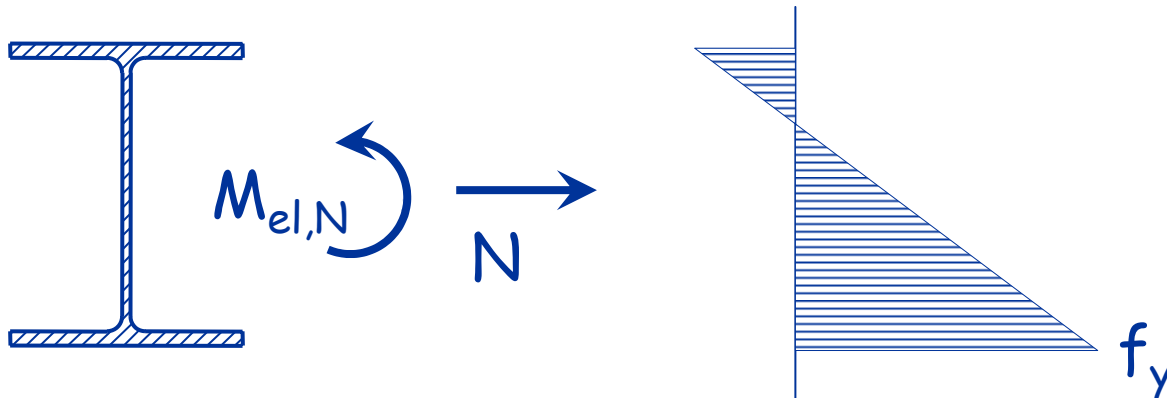
$$N_t = f_y A_t$$

Verifica - stato limite ultimo

Classe 1 e 2

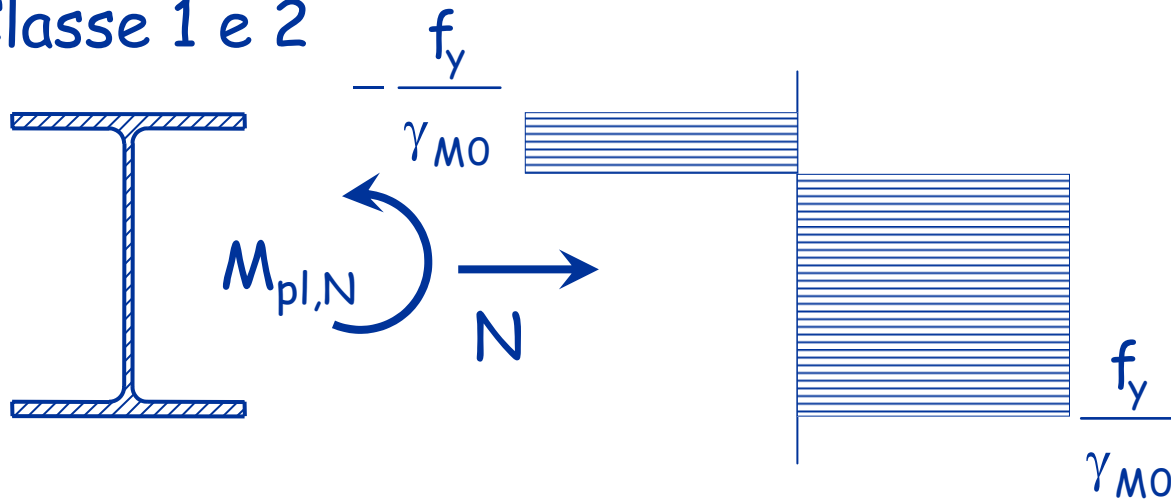


Classe 3



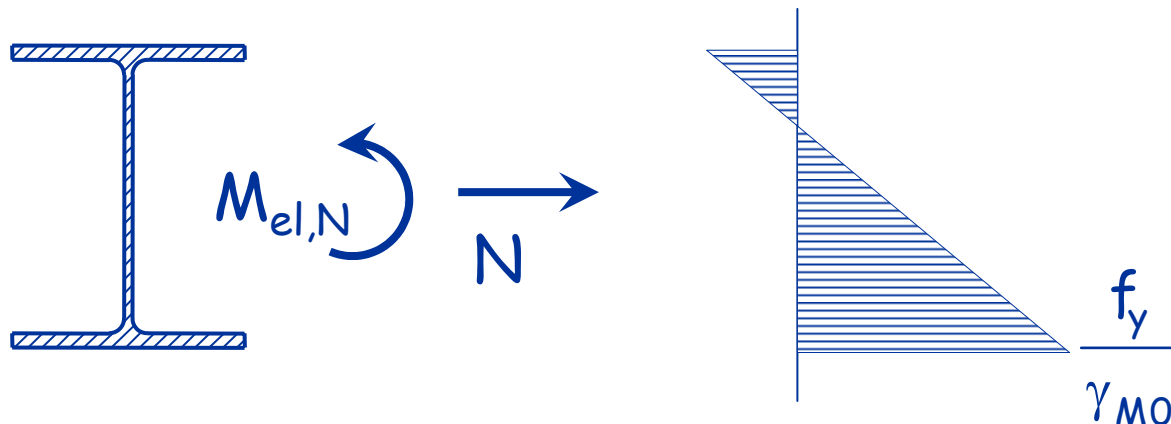
Verifica - stato limite ultimo

Classe 1 e 2



$$M_{Ed} \leq M_{pl,N,Rd}$$

Classe 3



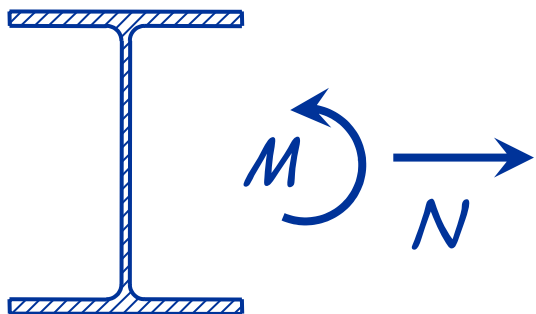
$$M_{Ed} \leq M_{el,N,Rd}$$

Domini di resistenza - stato limite ultimo

Dominio di resistenza, o curva di interazione = insieme delle coppie M - N per cui si ottiene lo stato limite ultimo della sezione

Per ricavare una coppia M - N del dominio

Sezione



Si assegna una posizione dell'asse neutro

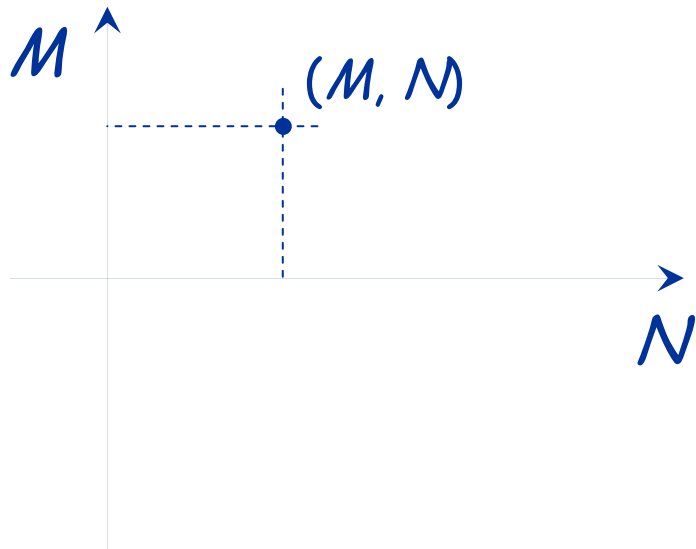
Si determina N

Si determina M ($M_{pl,N}$ o $M_{el,N}$)

Domini di resistenza - stato limite ultimo

Dominio di resistenza, o curva di interazione = insieme delle coppie M - N per cui si ottiene lo stato limite ultimo della sezione

Per ricavare una coppia M - N del dominio



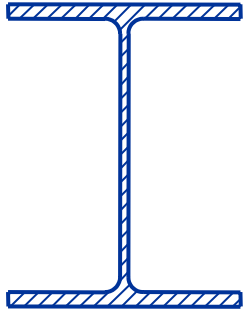
Si assegna l'asse neutro

Si determina N

Si determina M ($M_{pl,N}$ o $M_{el,N}$)

e si riporta la coppia $M - N$ nel diagramma

Domini di resistenza - stato limite ultimo per sezioni di classe 1 e 2

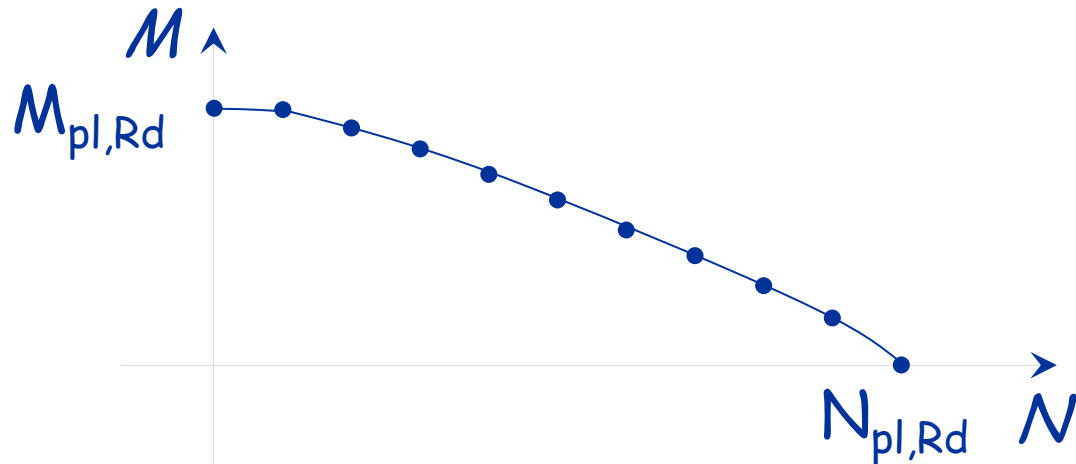


Per $N = 0$

$$M = M_{pl,Rd}$$

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}}$$

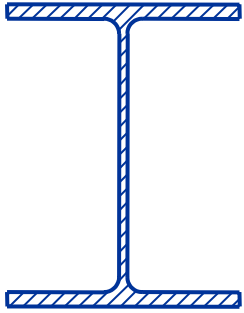


Per $N = N_{pl,Rd}$

$$M = 0$$

Vedere anche foglio Excel "Domini MN"

Domini di resistenza - stato limite ultimo per sezioni di classe 1 e 2

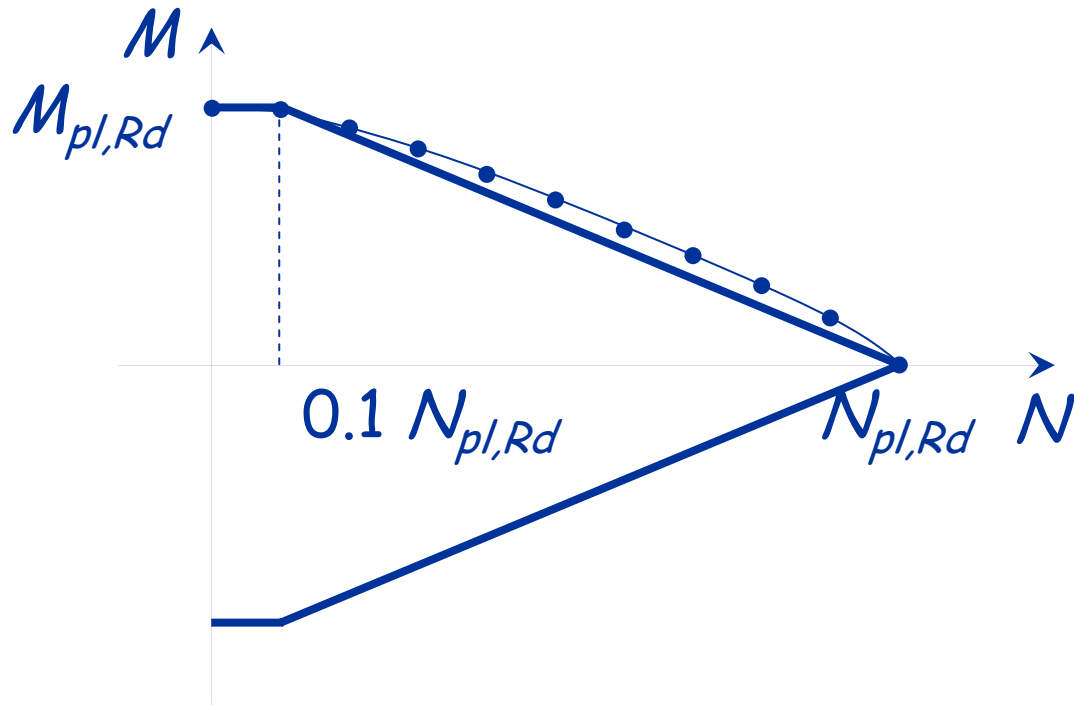


$$M_{pl,N,Rd} = M_{pl,Rd}$$

$$N \leq 0.1 N_{pl,Rd}$$

$$M_{pl,N,Rd} = 1.11 M_{pl,Rd} \left(1 - \frac{N}{N_{pl,Rd}} \right)$$

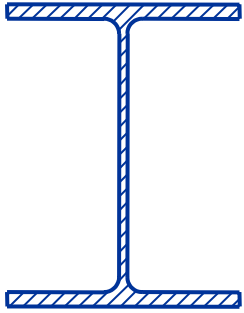
$$N > 0.1 N_{pl,Rd}$$



$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}}$$

Domini di resistenza - stato limite ultimo per sezioni di classe 1 e 2

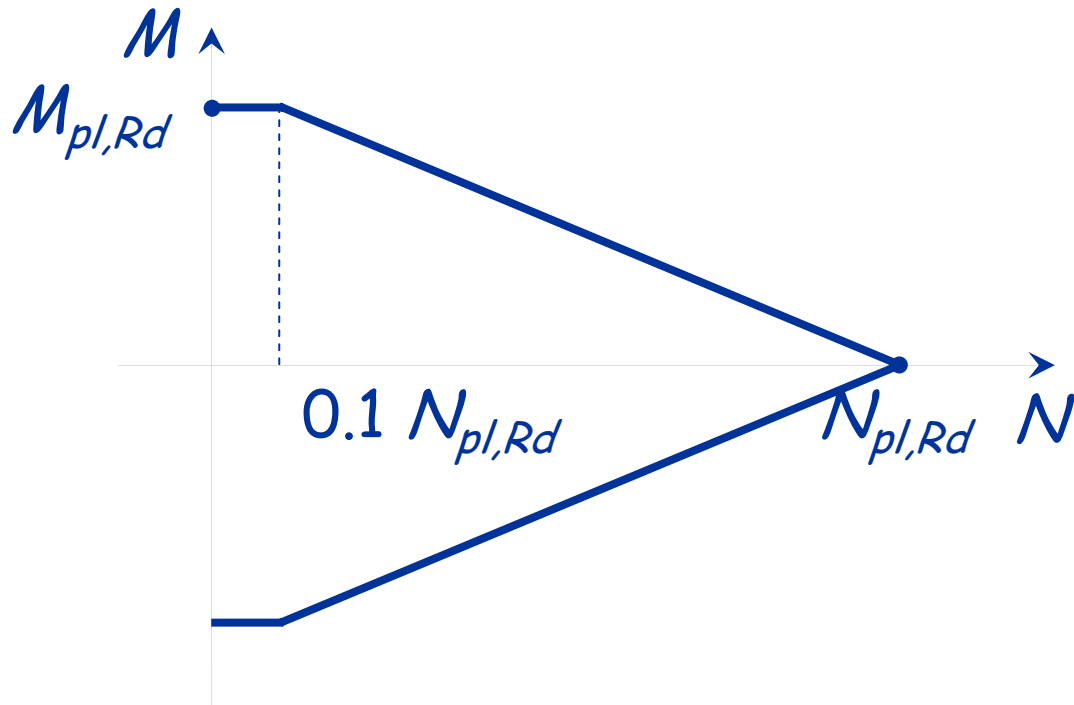


$$M_{pl,N,Rd} = M_{pl,Rd} \quad N \leq 0.1 N_{pl,Rd}$$

$$N \leq 0.1 N_{pl,Rd}$$

$$M_{pl,N,Rd} = 1.11 M_{pl,Rd} \left(1 - \frac{N}{N_{pl,Rd}} \right) \quad N > 0.1 N_{pl,Rd}$$

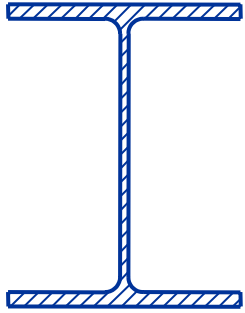
$$N > 0.1 N_{pl,Rd}$$



$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}}$$

Domini di resistenza - stato limite ultimo più preciso, meno cautelativo



$$M_{pl,N,Rd} = M_{pl,Rd}$$

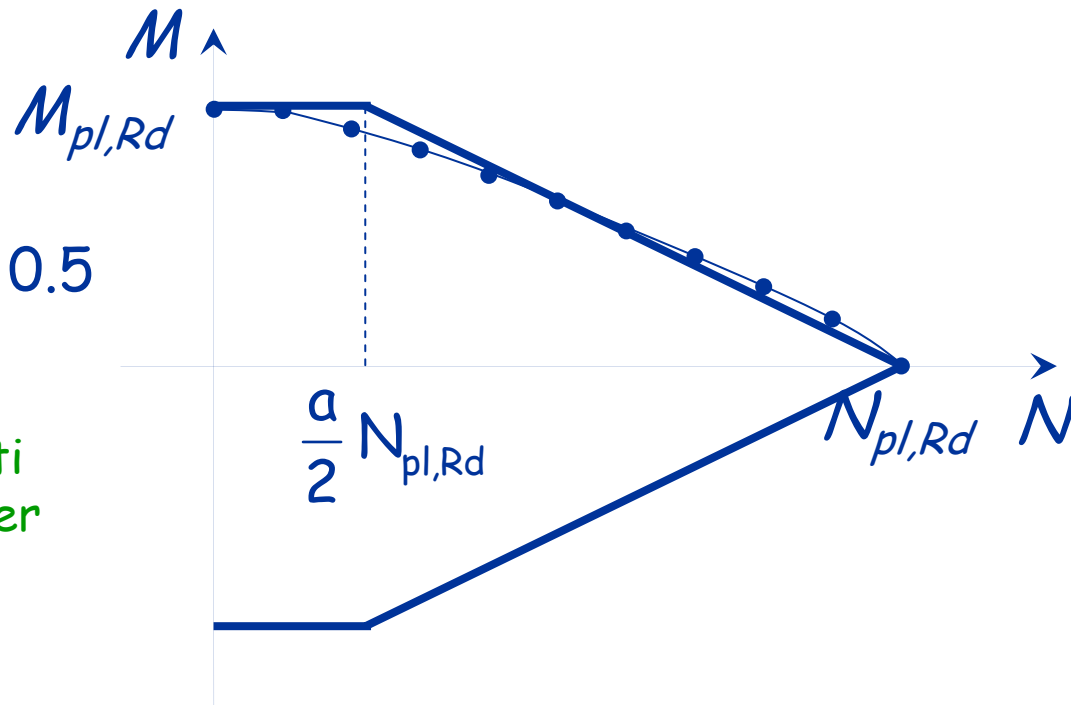
$$N \leq \frac{a}{2} N_{pl,Rd}$$

$$M_{pl,N,Rd} = M_{pl,Rd} \left(1 - \frac{N}{N_{pl,Rd}} \right) (1 - 0.5 a)$$

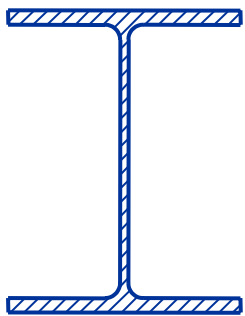
$$N > \frac{a}{2} N_{pl,Rd}$$

$$a = \frac{A - 2 b t_f}{A} \leq 0.5$$

Differenze più forti
per gli IPE, meno per
gli HE



Domini di resistenza - stato limite ultimo per sezioni di classe 3



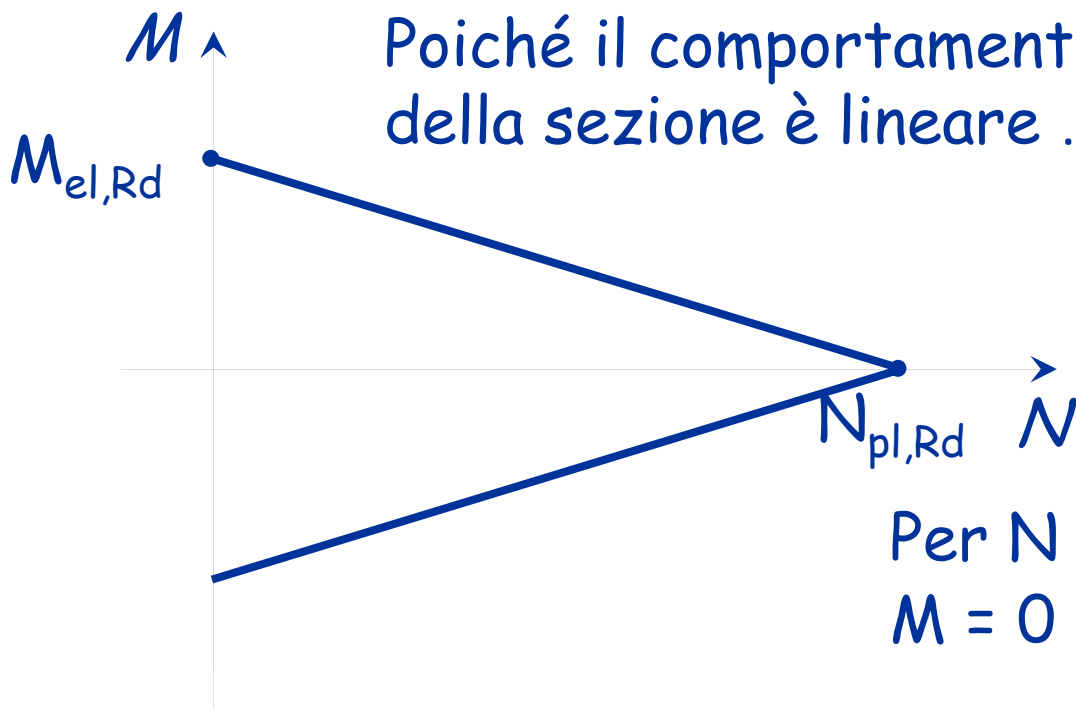
$$M_{el,N,Rd} = M_{el,Rd} \left(1 - \frac{N}{N_{pl,Rd}} \right)$$

Per $N = 0$
 $M = M_{el,Rd}$

$$M_{el,Rd} = \frac{W_{el} f_y}{\gamma_{M0}}$$

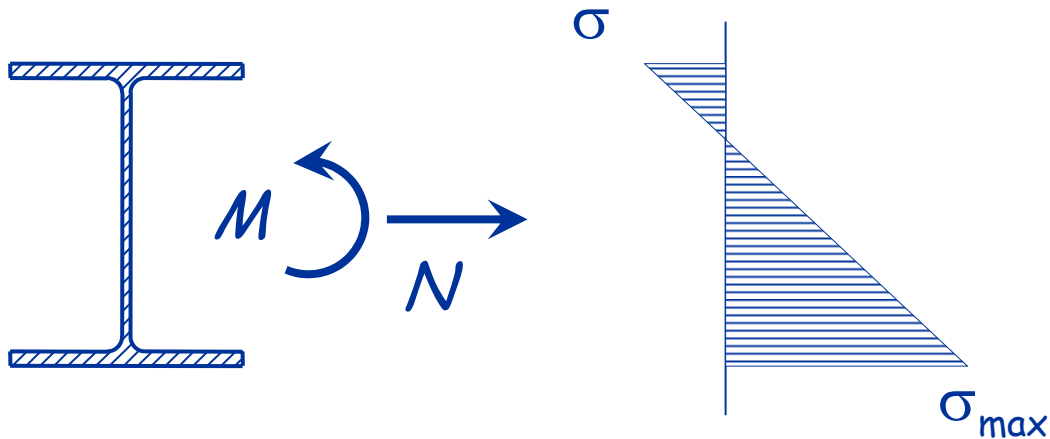
$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}}$$

Poiché il comportamento
della sezione è lineare ...



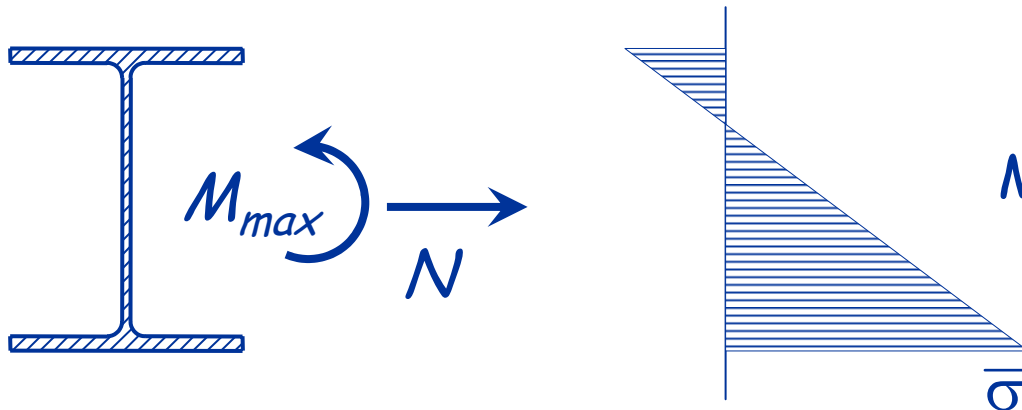
Per $N = N_{pl,Rd}$
 $M = 0$

Verifica - tensioni ammissibili



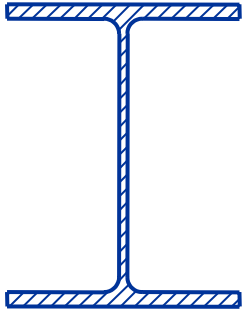
$$\sigma_{\max} = \frac{N}{A} + \frac{M}{W_{el}} \leq \bar{\sigma}$$

oppure



$$M_{\max} = W_{el} \bar{\sigma} \left(1 - \frac{N}{A \bar{\sigma}} \right) \geq M$$

Domini di resistenza - tensioni ammissibili



$$M_{\max, N} = M_{\max} \left(1 - \frac{N}{N_{\max}} \right)$$

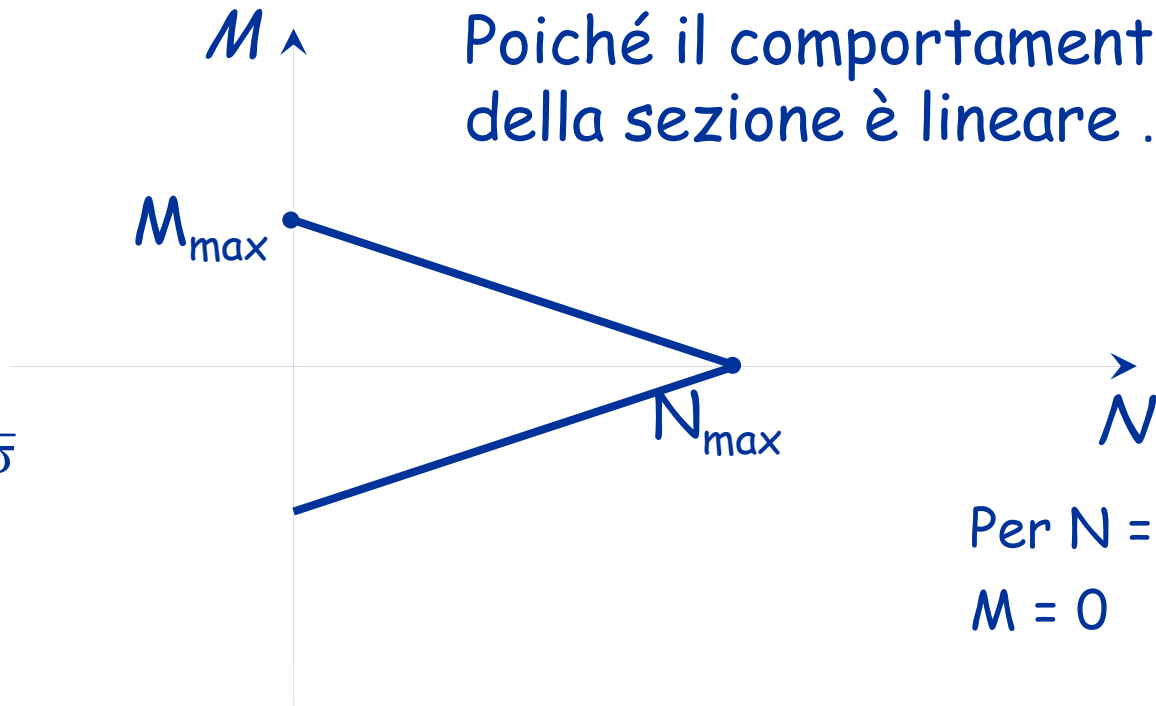
Per $N = 0$

$$M = M_{\max}$$

$$M_{\max} = W_{el} \bar{\sigma}$$

$$N_{\max} = A \bar{\sigma}$$

Poiché il comportamento della sezione è lineare ...



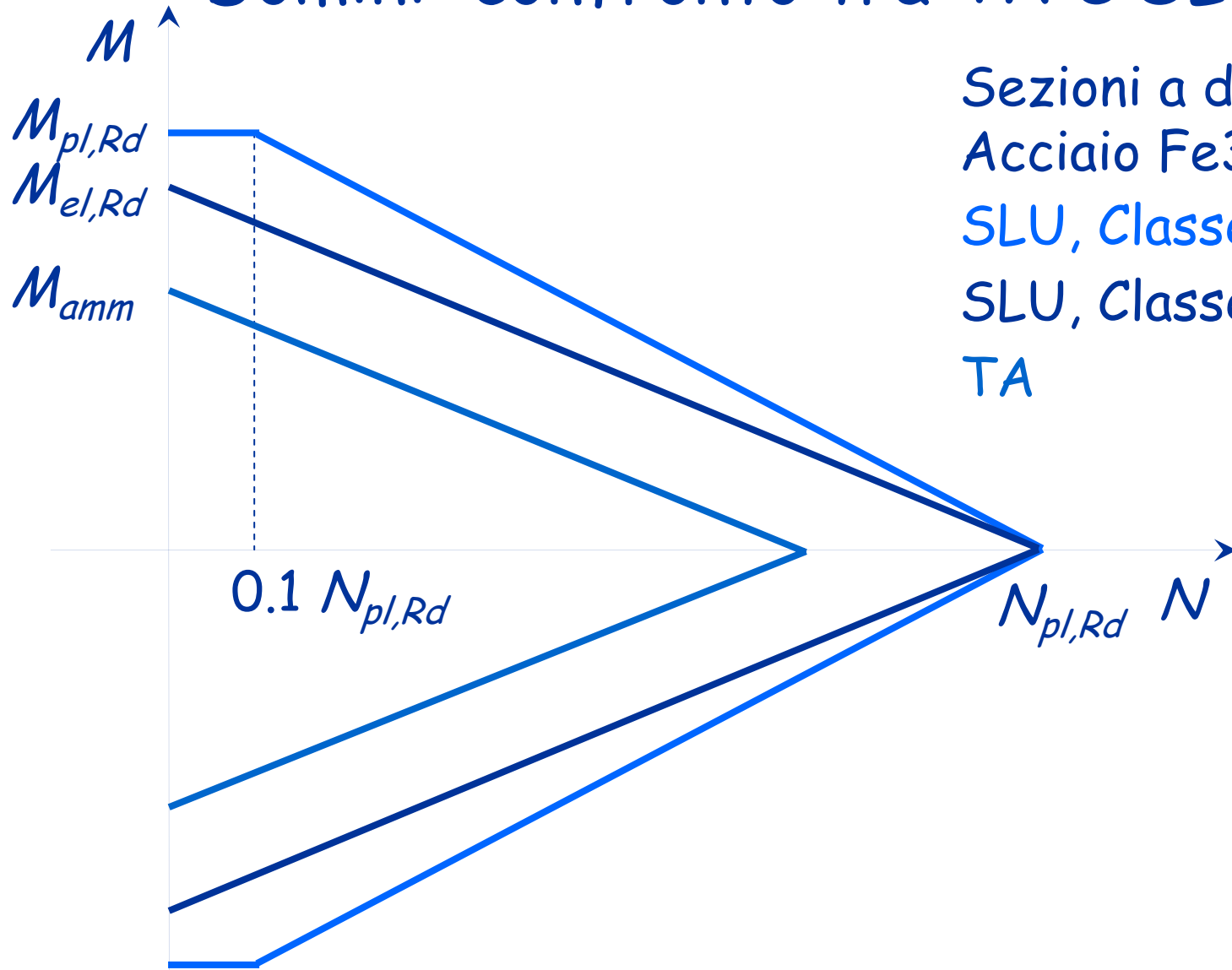
Per $N = N_{\max}$
 $M = 0$

Domini: confronto tra TA e SLU

Il confronto può essere effettuato sovrapponendo i domini ricavati per TA e SLU

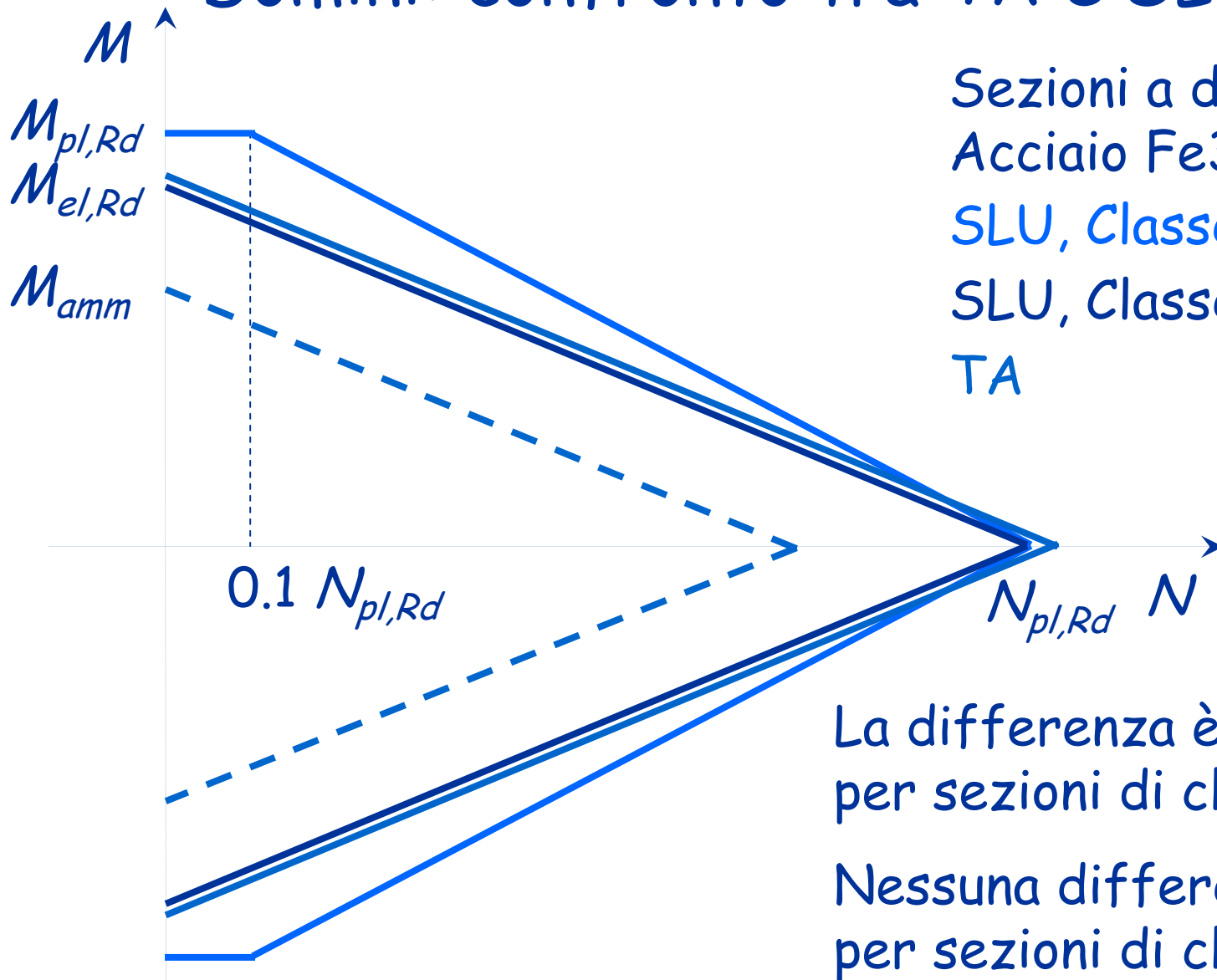
Poiché i carichi allo SLU sono maggiori (di $1.4 \div 1.5$) di quelli alle TA, il dominio relativo alle TA deve essere opportunamente scalato (ad esempio $\times 1,45$)

Domini: confronto tra TA e SLU



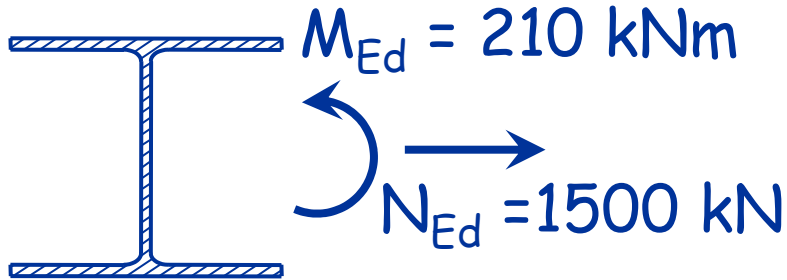
Sezioni a doppio T
Acciaio Fe360
SLU, Classe 1 e 2
SLU, Classe 3
TA

Domini: confronto tra TA e SLU



Esempio

Dati:



Sezione

HEB300

A

149 cm²

W_{pl}

1868 cm³

Acciaio

Fe360

1 - Classe della sezione

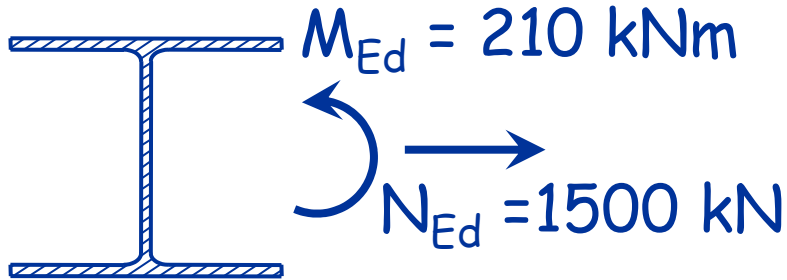
Anima: $\frac{d}{t_w} = \frac{208}{11} = 19 \leq 144 \quad \varepsilon = 144$

Flangia: $\frac{c}{t_f} = \frac{150}{19} = 7.9 \leq 10 \quad \varepsilon = 10$

La sezione appartiene alla classe 1.

Esempio

Dati:



Sezione

HEB300

A

149 cm²

W_{pl}

1868 cm³

Acciaio

Fe360

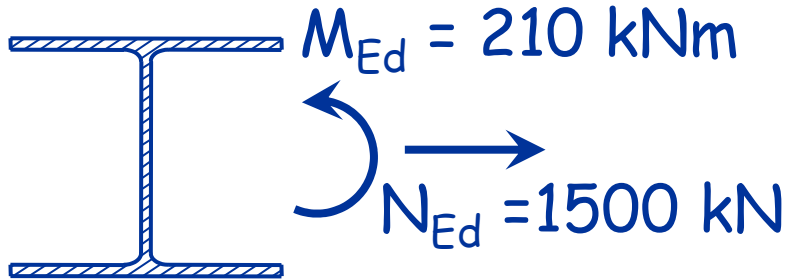
2 - Determinazione di $N_{pl,Rd}$ ed $M_{pl,Rd}$

$$N_{pl,Rd} = \frac{f_y A}{\gamma_{M0}} = \frac{235 \times 149}{1.05 \times 10} = 3334.8 \text{ kN}$$

$$M_{pl,Rd} = \frac{f_y W_{pl}}{\gamma_{M0}} = \frac{235 \times 1868}{1.05 \times 10^3} = 418.1 \text{ kNm}$$

Esempio

Dati:



Sezione	HEB300
Acciaio	Fe360
$N_{pl,Rd}$	3334.8 kN
$M_{pl,Rd}$	418.1 kNm

3 - Determinazione di $M_{pl,N,Rd}$ e verifica

$$N_{Ed} = 1500 \text{ kN} \geq 0.1 N_{pl,Rd} = 333.5 \text{ kN}$$

$$M_{pl,N,Rd} = 1.11 M_{pl,Rd} \left(1 - \frac{N_{Sd}}{N_{pl,Rd}} \right) = 255.3 \text{ kNm} > M_{Ed} = 210.0 \text{ kNm}$$

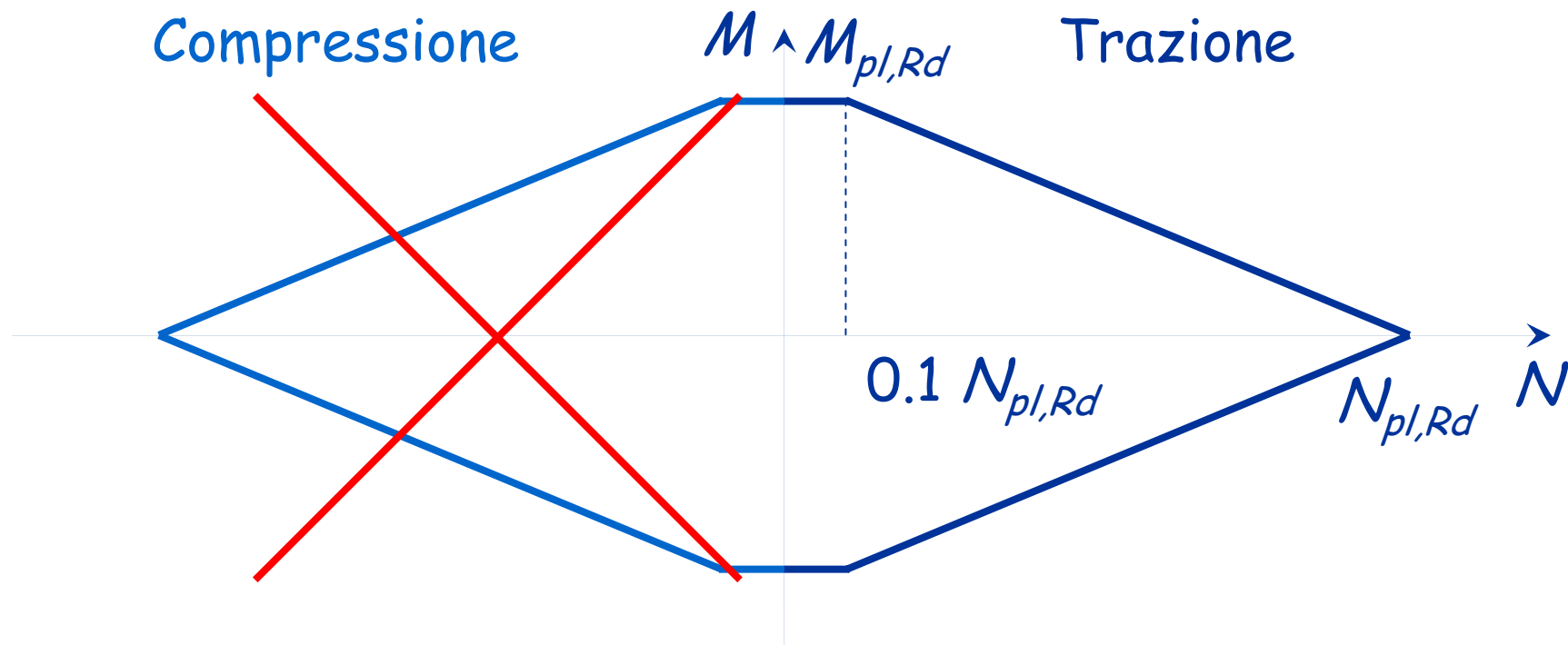
La sezione è verificata

Flessione composta
pressoflessione

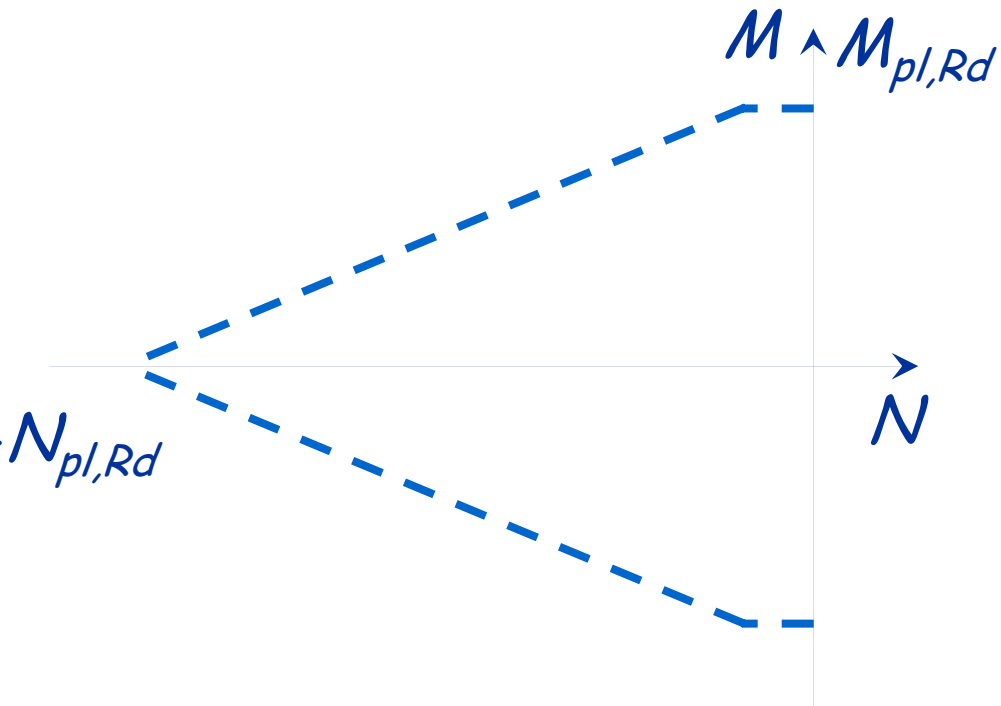
Domini di resistenza - stato limite ultimo

Si possono ottenere semplicemente ribaltando il dominio M-N costruito nel caso di tenso-flessione?

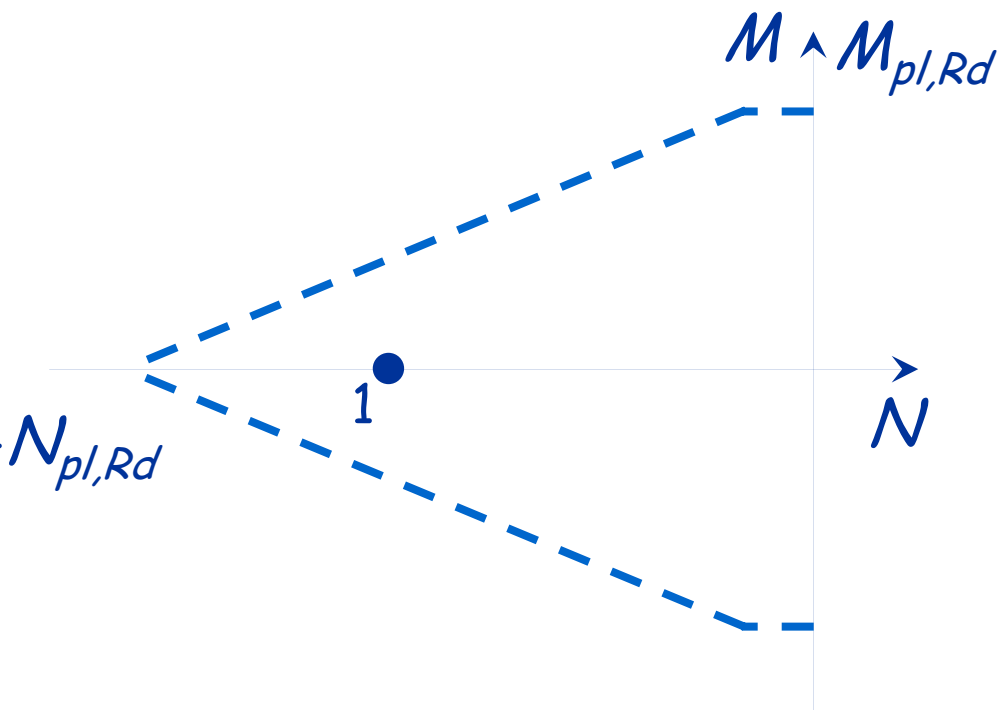
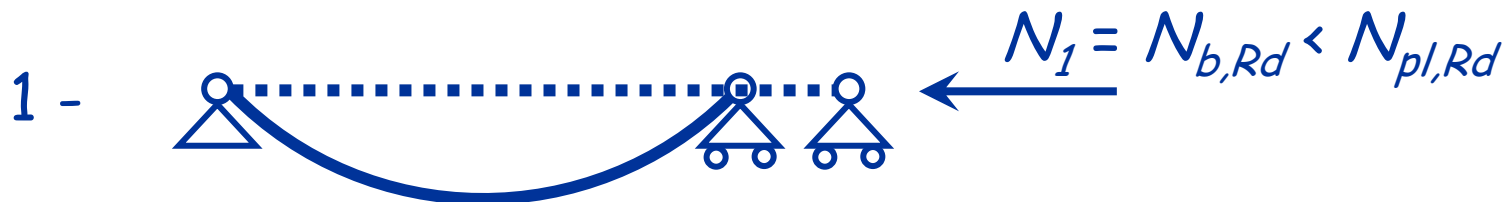
Va bene per la singola sezione, ma per l'asta bisogna tener conto dell'instabilità



Domini di resistenza - stato limite ultimo

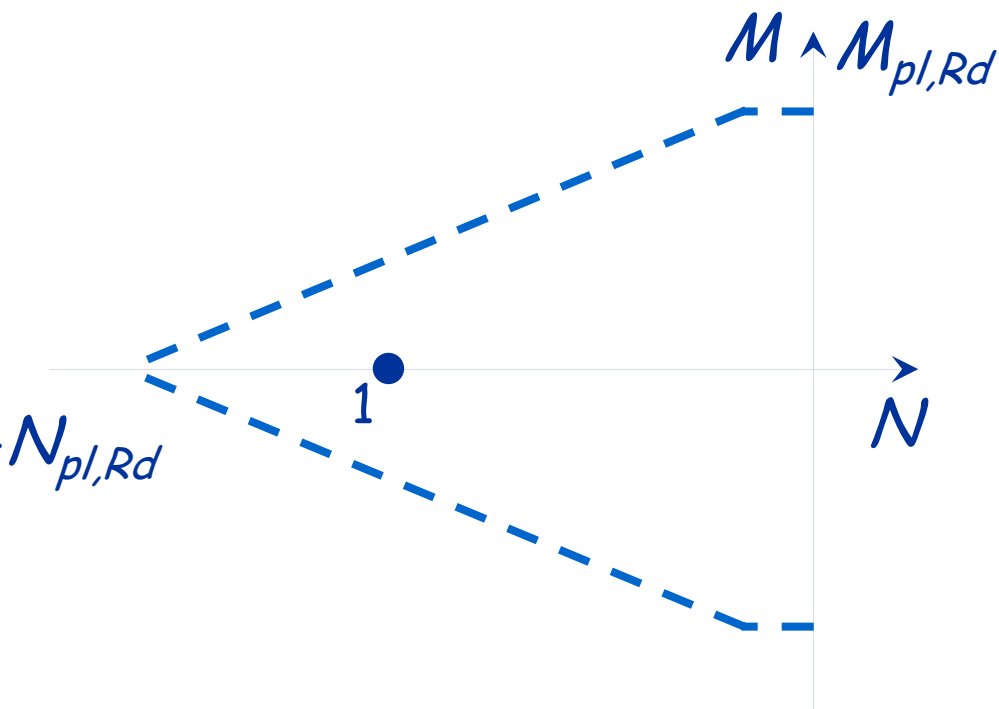


Domini di resistenza - stato limite ultimo



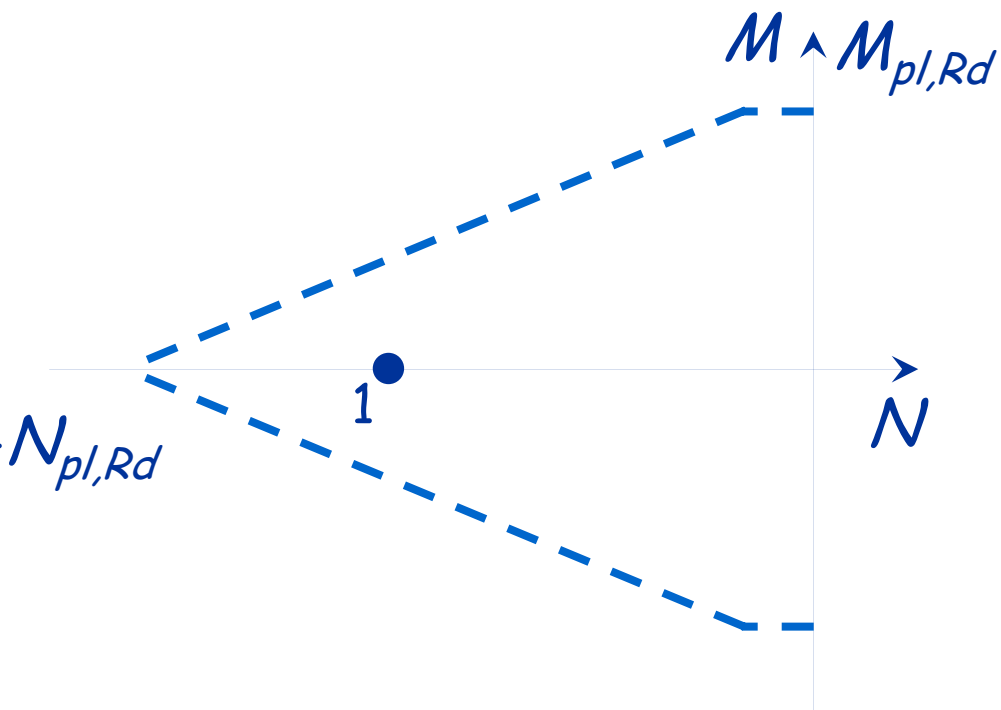
1 - $N_1 = N_{b,Rd}$, $M_1 = 0$

Domini di resistenza - stato limite ultimo



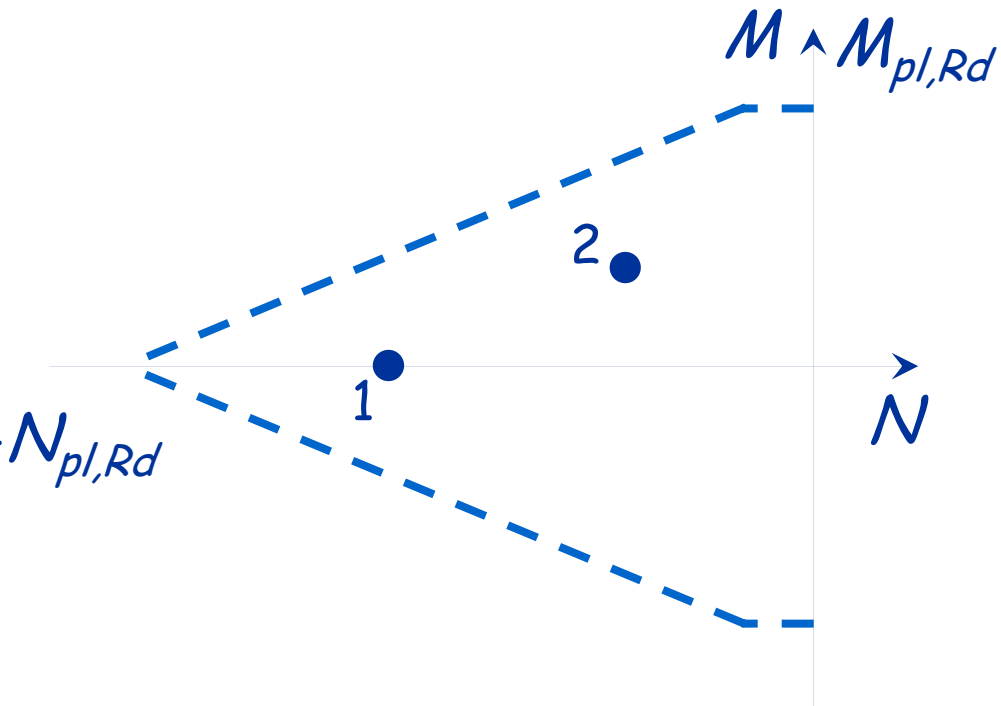
$$1 - N_1 = N_{b,Rd}, M_1 = 0$$

Domini di resistenza - stato limite ultimo



$$1 - N_1 = N_{b,Rd}, M_1 = 0$$

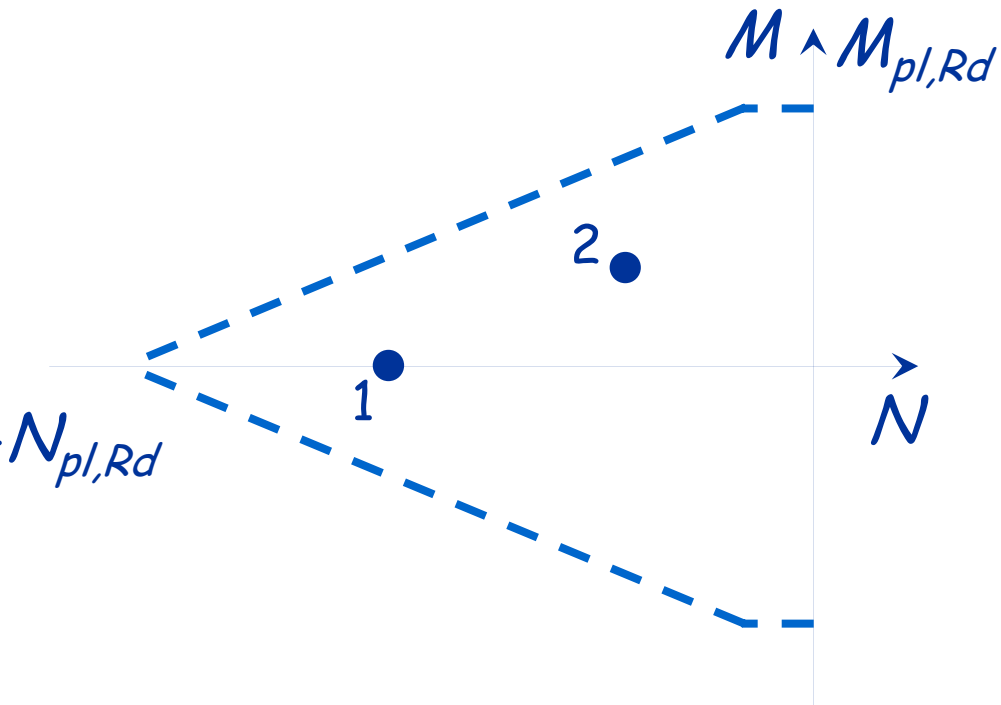
Domini di resistenza - stato limite ultimo



$$1 - N_1 = N_{b,Rd}, M_1 = 0$$

$$2 - N_2 < N_{b,Rd}, M_2 < M_{pl,Rd}$$

Domini di resistenza - stato limite ultimo



1 - $N_1 = N_{b,Rd}$, $M_1 = 0$

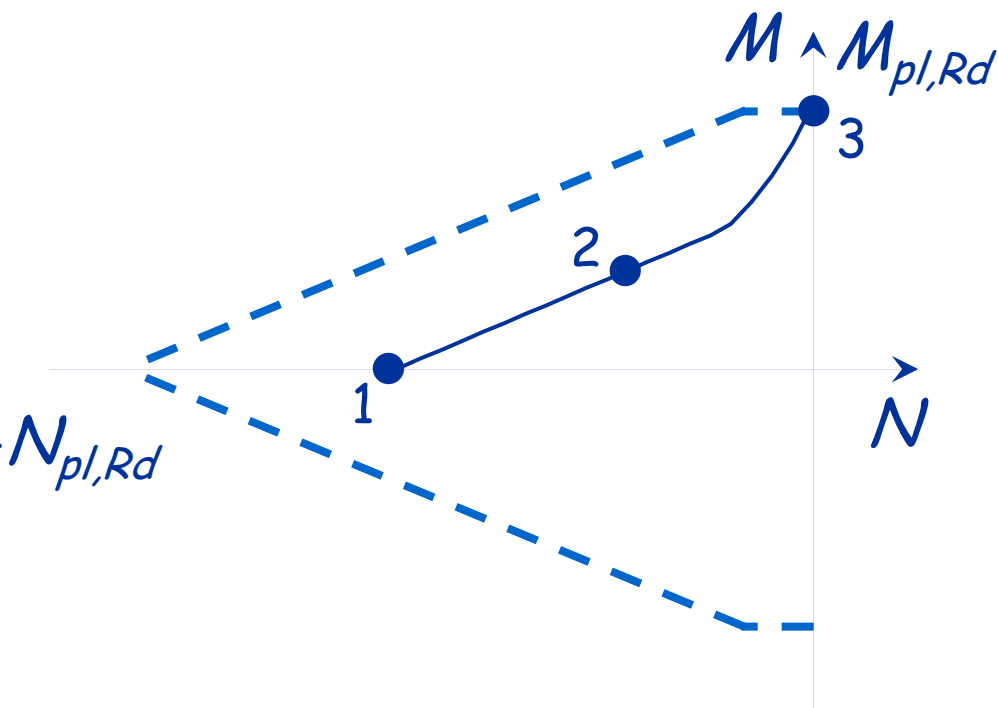
2 - $N_2 < N_{b,Rd}$, $M_2 < M_{pl,Rd}$

Domini di resistenza - stato limite ultimo



$$M_3 = M_{pl,Rd}$$

L'asta si plasticizza e
collassa in assenza di
sforzo normale



$$1 - N_1 = N_{b,Rd}, M_1 = 0$$

$$2 - N_2 < N_{b,Rd}, M_2 < M_{pl,Rd}$$

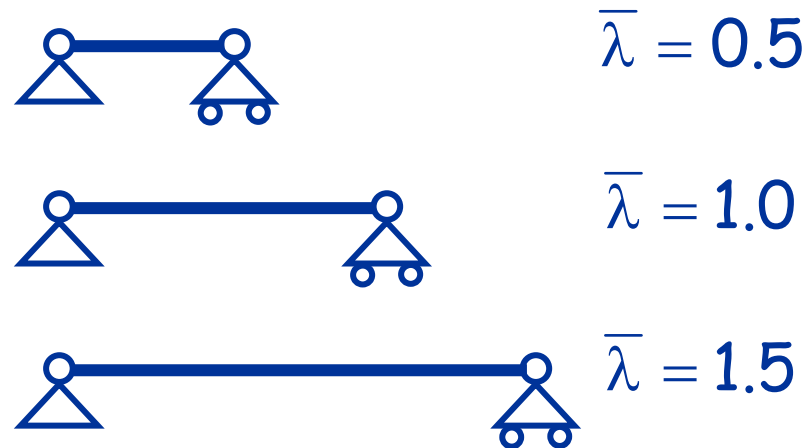
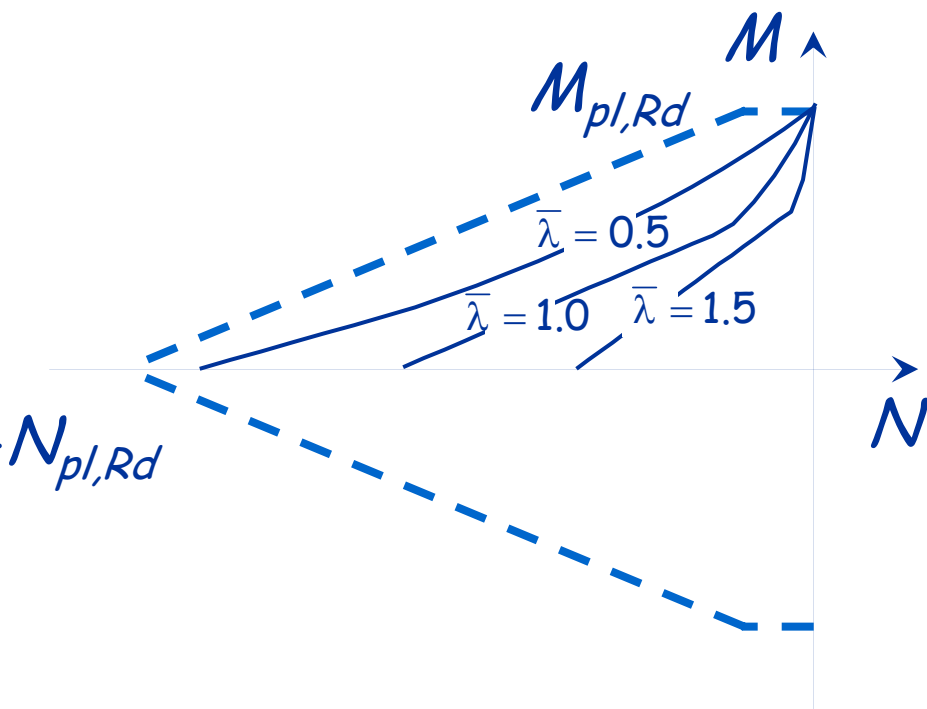
$$3 - N_3 = 0, M_3 = M_{pl,Rd}$$

Collegando i punti si
ottiene il dominio

Domini di resistenza - stato limite ultimo

Il dominio dipende dalla snellezza dell'asta:

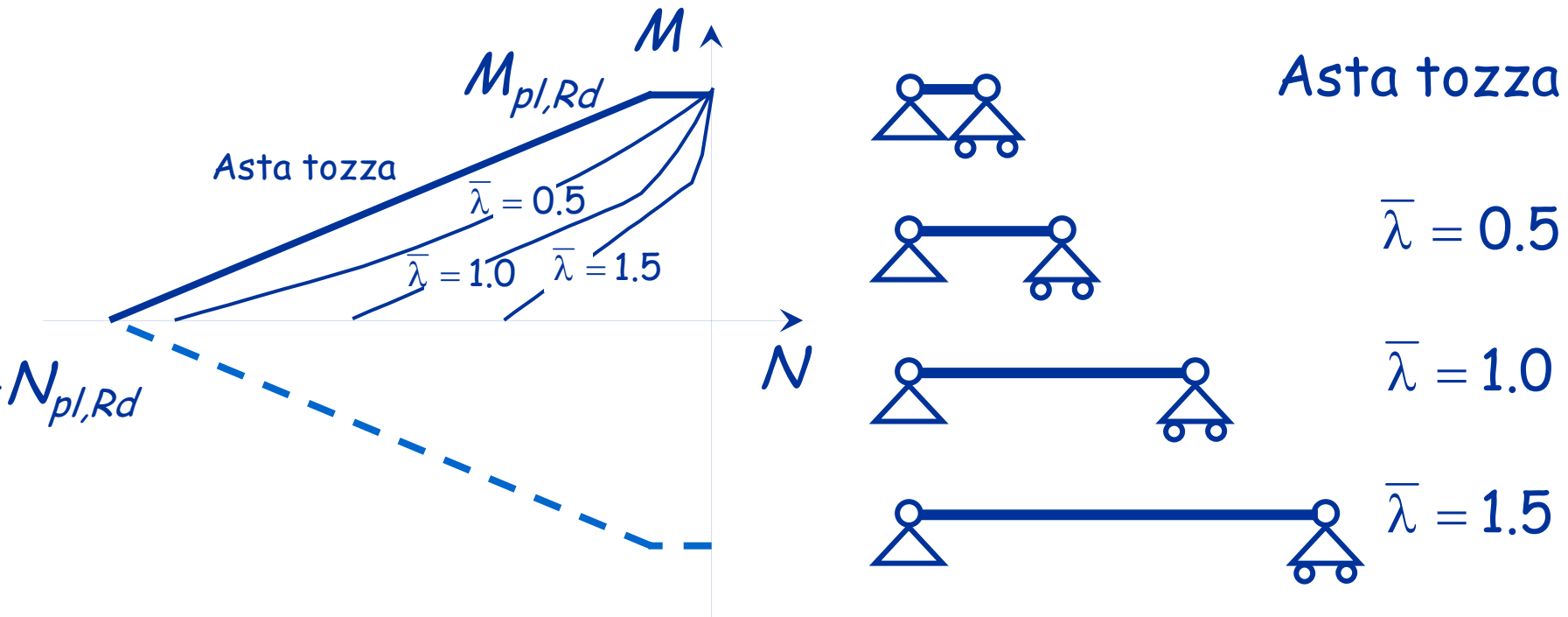
- L'ampiezza del dominio si riduce all'aumentare della snellezza;



Domini di resistenza - stato limite ultimo

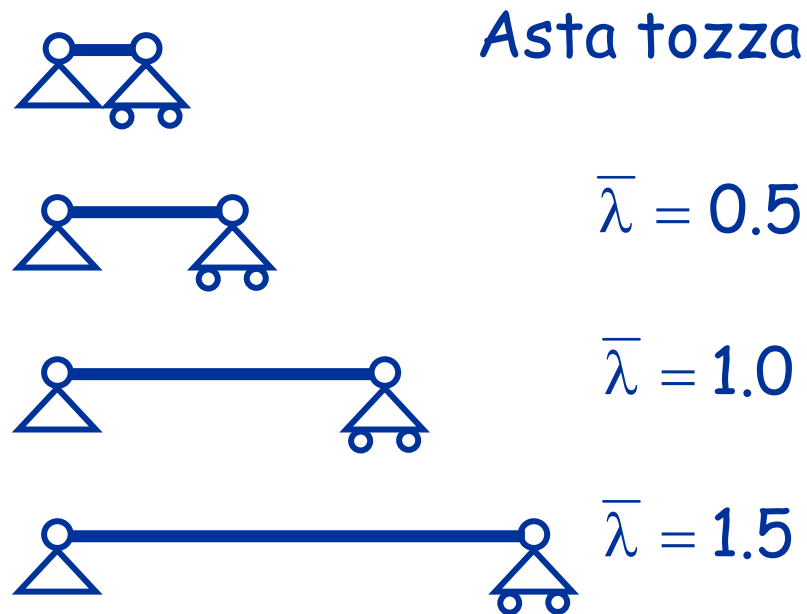
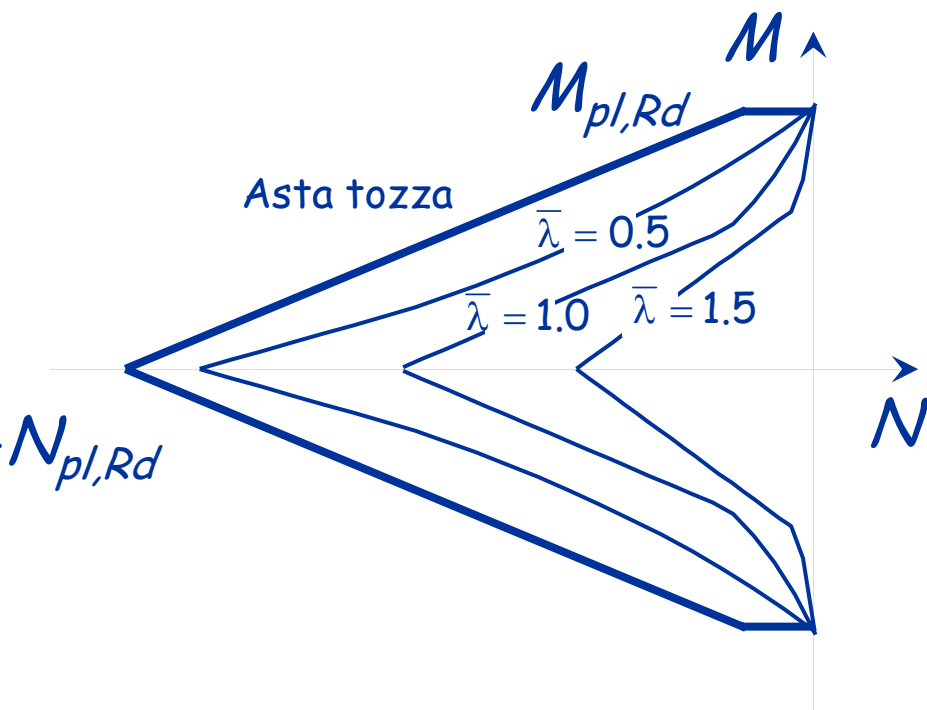
Il dominio dipende dalla snellezza dell'asta:

- Nel caso di aste tozze coincide con quello per tenso-flessione



Domini di resistenza - stato limite ultimo

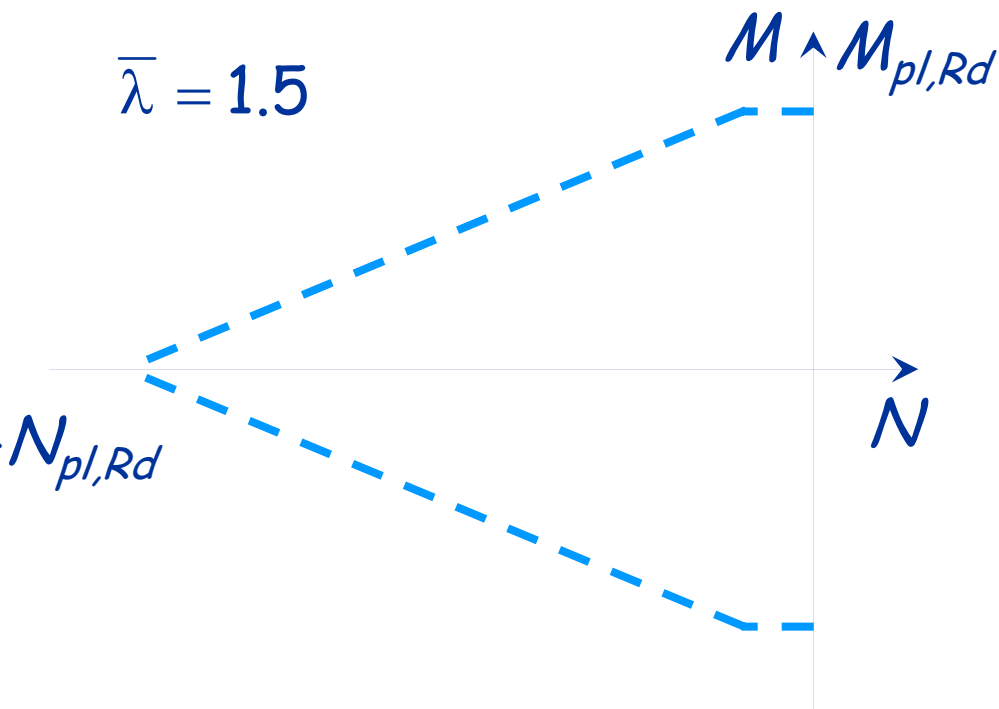
Il dominio è simmetrico per aste con sezione trasversale simmetrica



Domini di resistenza - stato limite ultimo



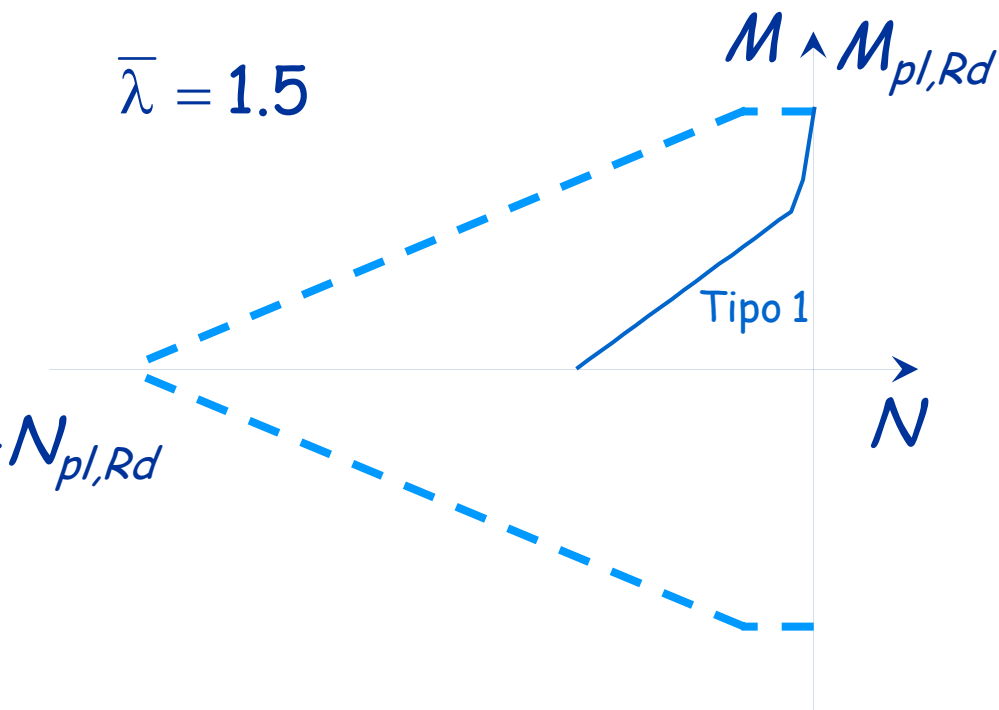
Distribuzione di
momenti tipo 1



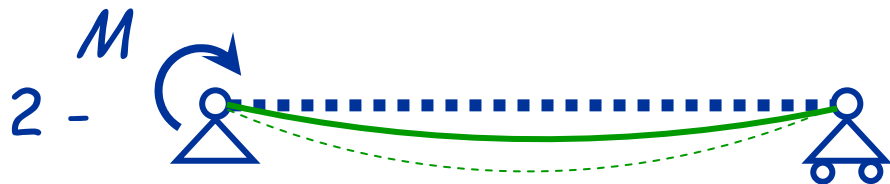
Domini di resistenza - stato limite ultimo



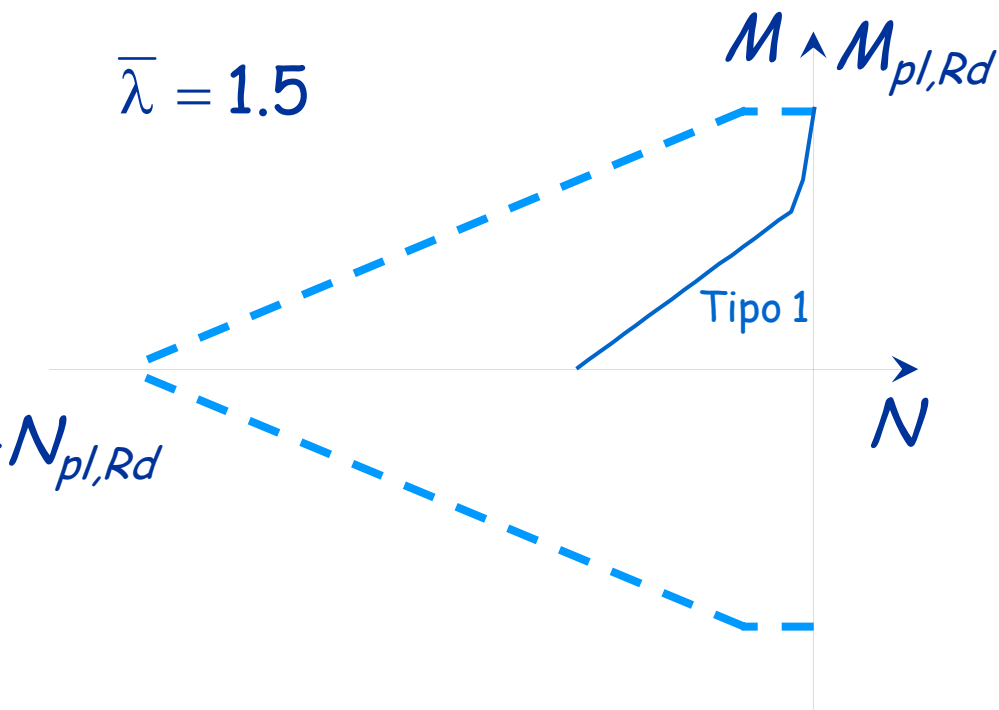
Distribuzione di
momenti tipo 1



Domini di resistenza - stato limite ultimo



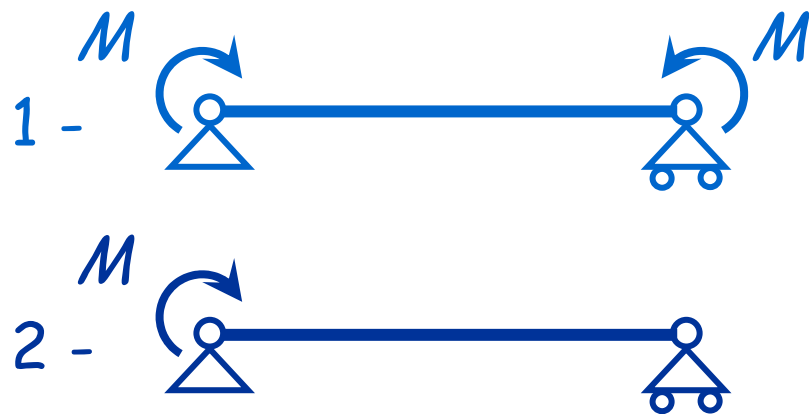
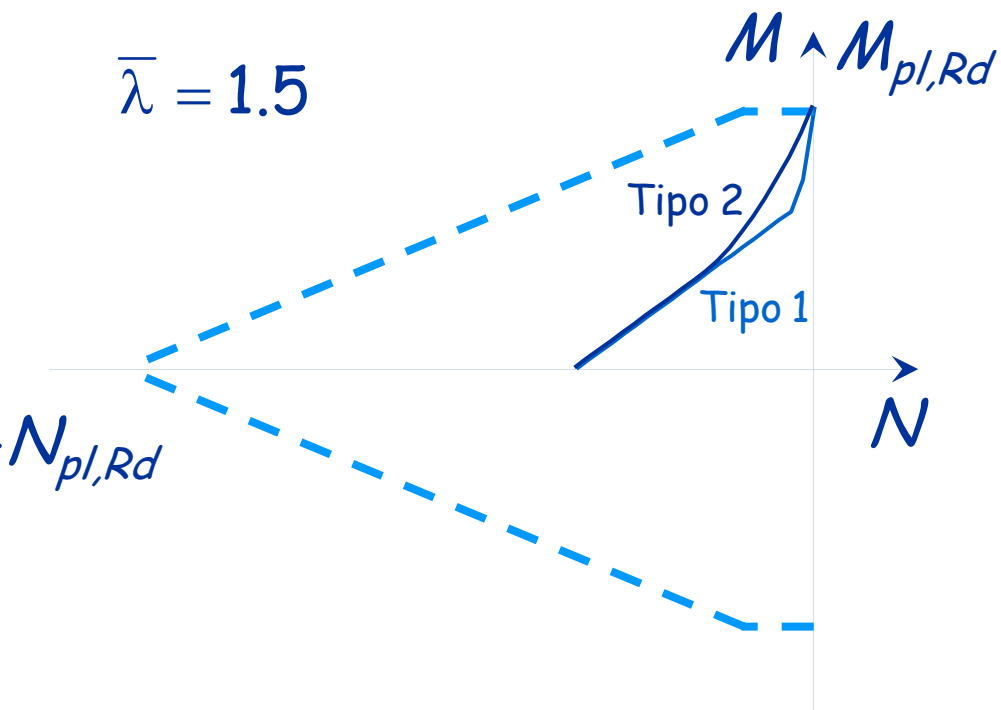
Distribuzione di
momenti tipo 2



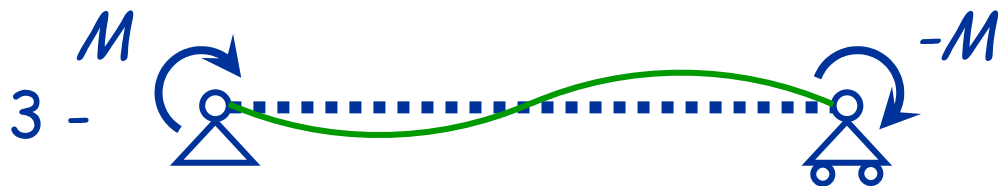
Domini di resistenza - stato limite ultimo



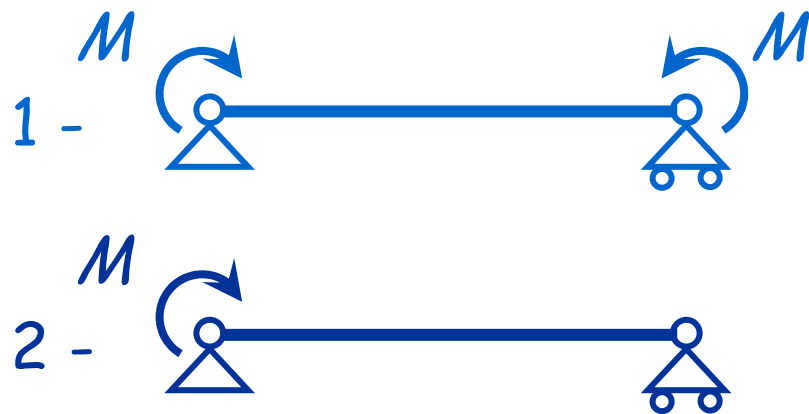
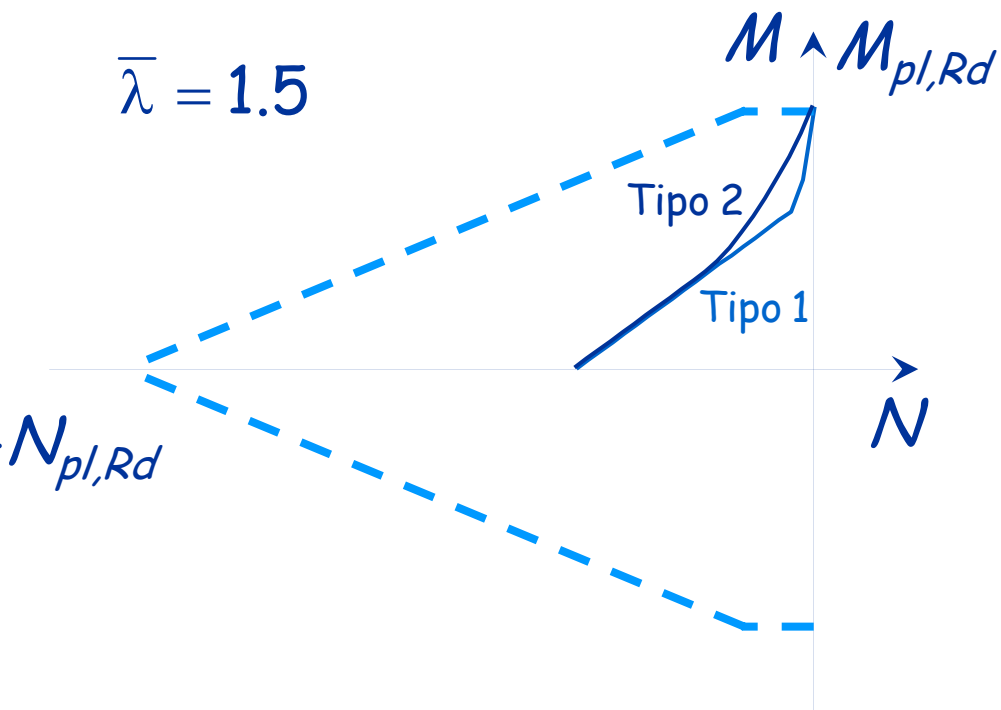
Distribuzione di
momenti tipo 2



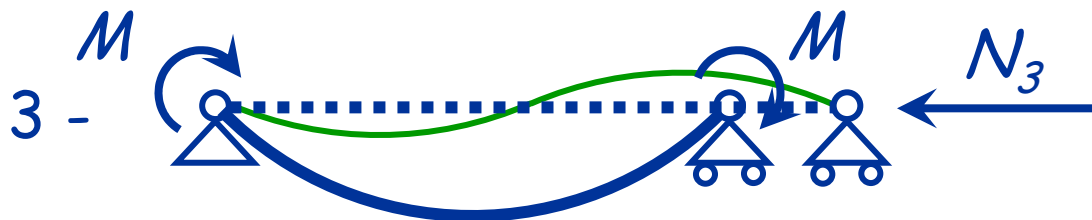
Domini di resistenza - stato limite ultimo



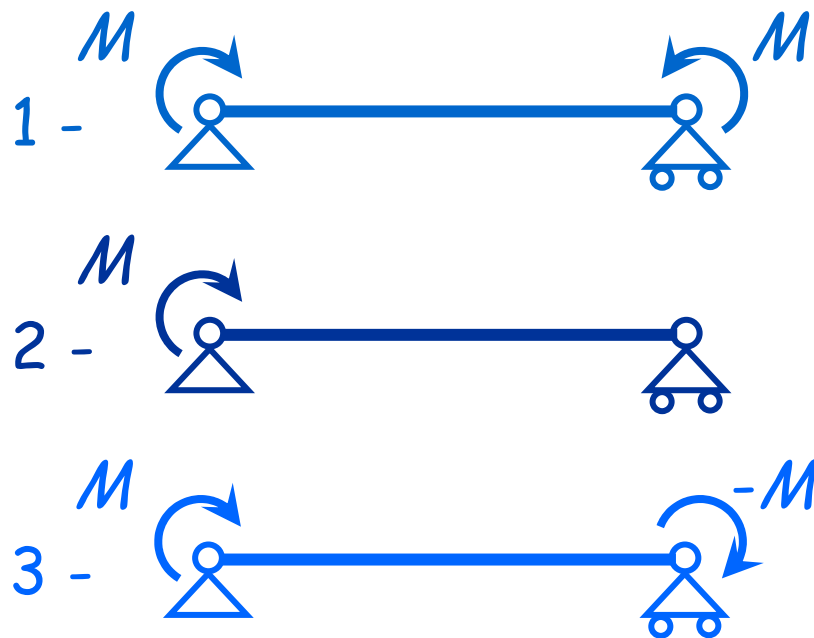
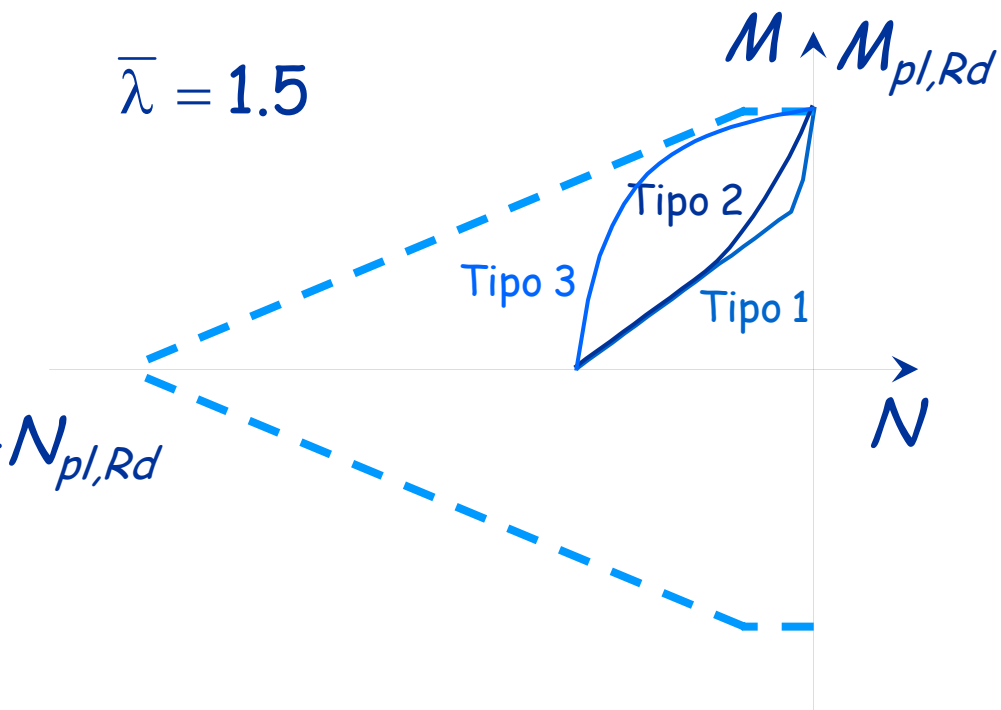
Distribuzione di
momenti tipo 3



Domini di resistenza - stato limite ultimo



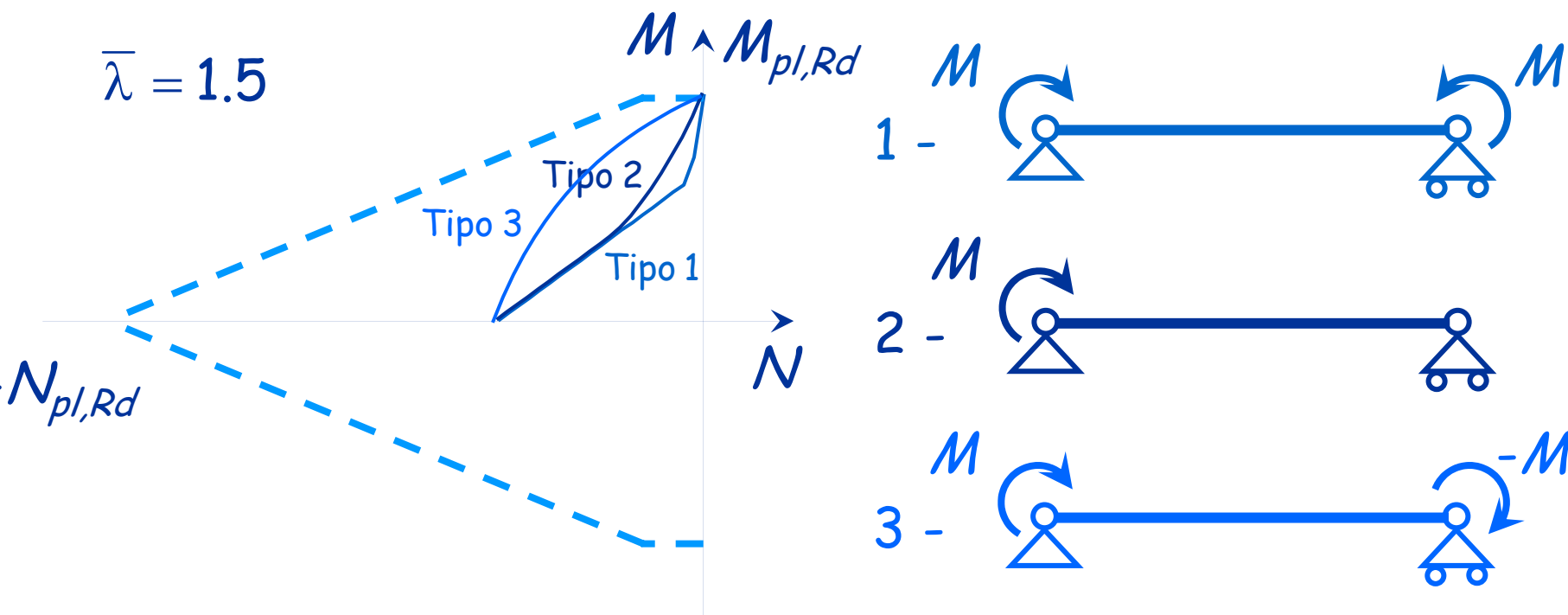
Distribuzione di
momenti tipo 3



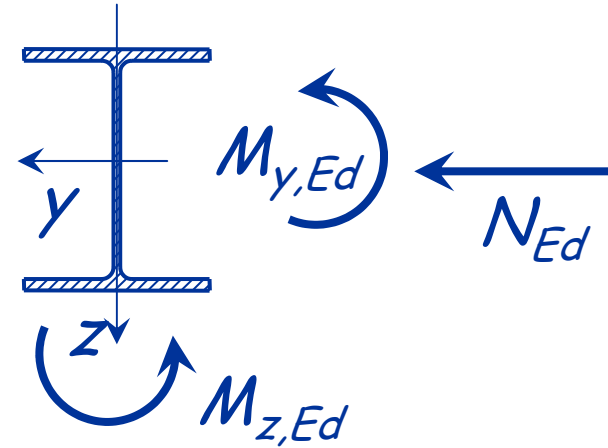
Domini di resistenza - stato limite ultimo

Il dominio dipende dalla snellezza dell'asta:

- L'ampiezza del dominio aumenta passando dal diagramma dei momenti di tipo 1 a quello di tipo 3.



Verifica - stato limite ultimo



Per sezioni di classe 1 e 2:

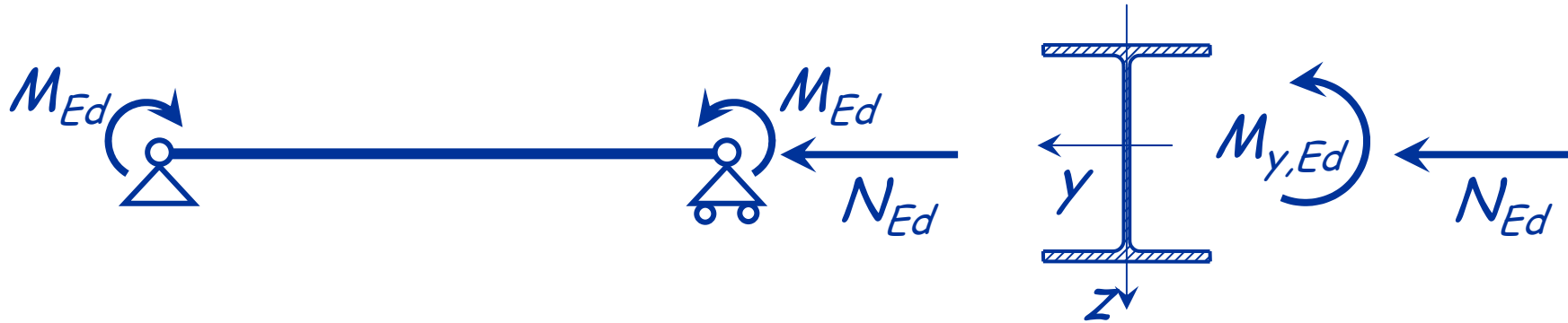
$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} + \frac{k_y M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{k_z M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1$$

$$k_y, k_z \leq 1.5$$

Dipende da:

- snellezza dell'asta;
- diagramma del momento;
- sforzo normale.

Verifica - stato limite ultimo

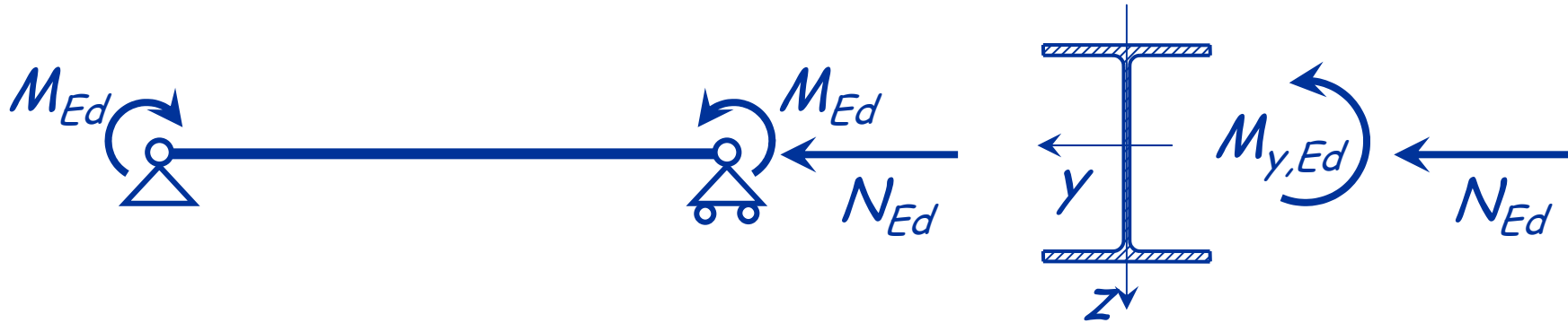


Nel caso più frequente in cui esiste un unico momento flettente:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} + \frac{k_y M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1$$

$$k_y \leq 1.5$$

Verifica - stato limite ultimo



Nel caso più frequente in cui esiste un unico momento flettente:

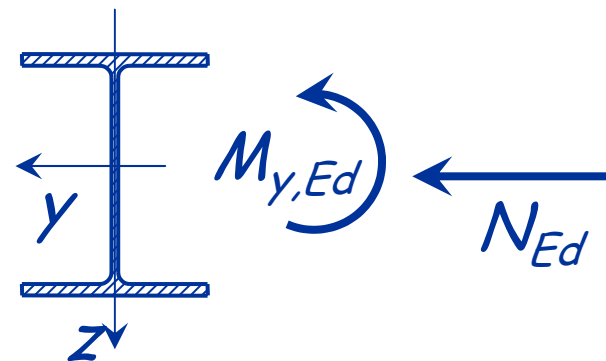
$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd} / k_y} \leq 1$$

$$k_y \leq 1.5$$

Verifica - stato limite ultimo

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{Ed}}{\chi_y A f_y} \leq 1.5$$

$$\mu_y = \bar{\lambda}_y (2 \beta_{My} - 4) + \frac{W_{pl,y} - W_{el,y}}{W_{el,y}} \leq 0.9$$



β_{My} dipende dal diagramma del momento flettente



$$\beta_{My} = 1.8 - 0.7 \psi$$

$$-1 \leq \psi \leq 1$$

N.B. Nel caso di diagramma parabolico o di altra forma esistono relazioni diverse per il calcolo di β_{My}

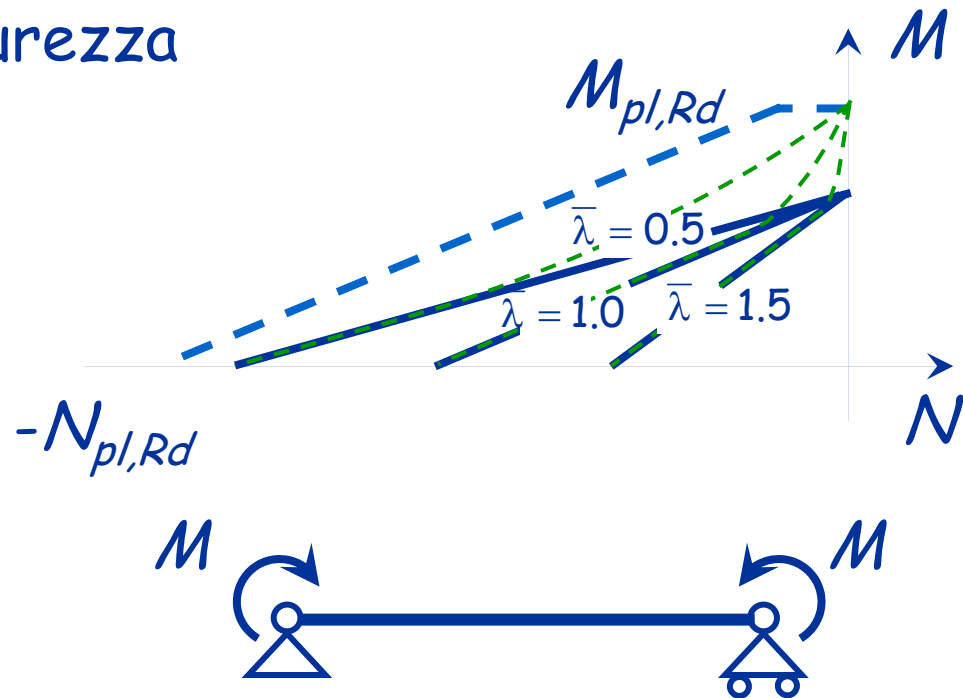
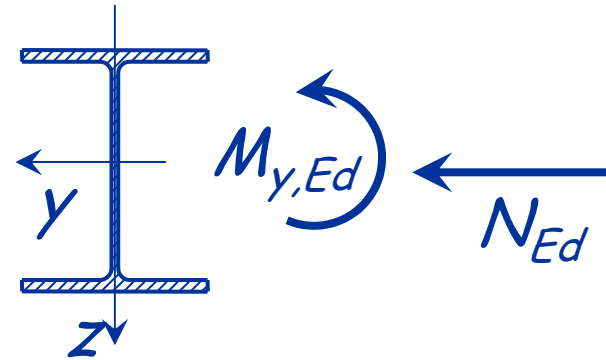
Verifica - stato limite ultimo

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{Ed}}{\chi_y A f_y} \leq 1.5$$

oppure

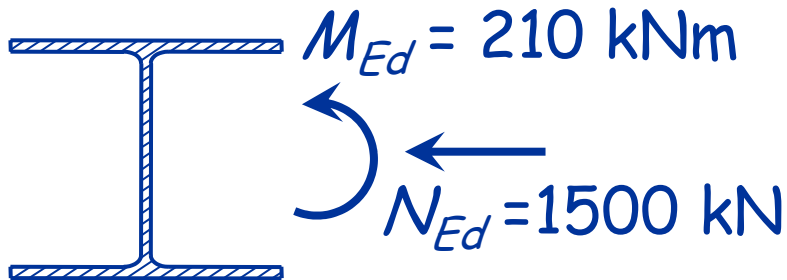
$k_y = 1.5$ a favore di sicurezza

L'approssimazione è accettabile tranne che per aste tozze e per valori modesti dello sforzo normale



Esempio

Dati:



Sezione
Acciaio

HEB300
Fe360



1 - Classe della sezione

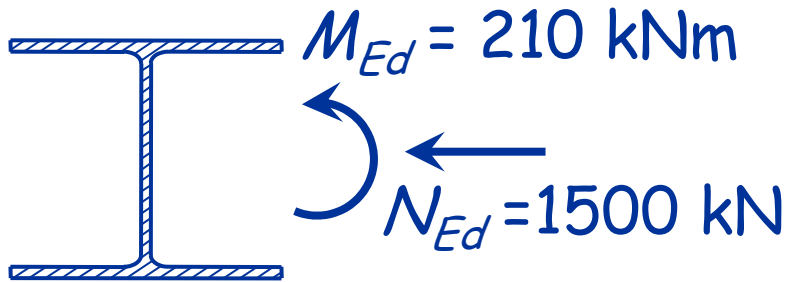
Anima: $\frac{d}{t_w} = \frac{208}{11} = 19 \leq 48 \varepsilon = 48$

Flangia: $\frac{c}{t_f} = \frac{150}{19} = 7.9 \leq 10 \varepsilon = 10$

La sezione appartiene alla classe 1.

Esempio

Dati:



Sezione
Acciaio

HEB300
Fe360



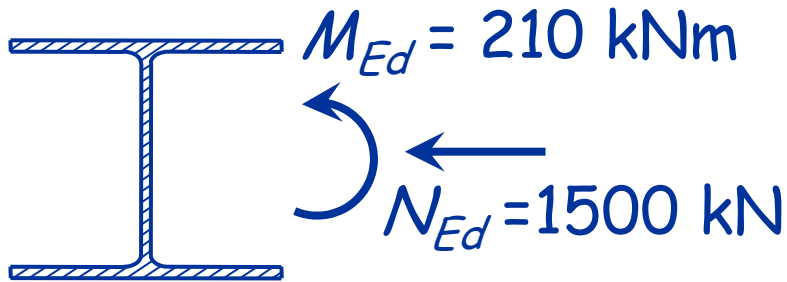
2 - Determinazione di $M_{pl,Rd}$

$$M_{pl,Rd} = 418.1 \text{ kNm}$$

Era già stato determinato

Esempio

Dati:



Sezione
Acciaio

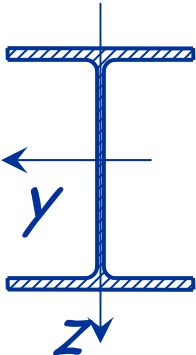
HEB300
Fe360



3 - Determinazione di $N_{b,Rd}$

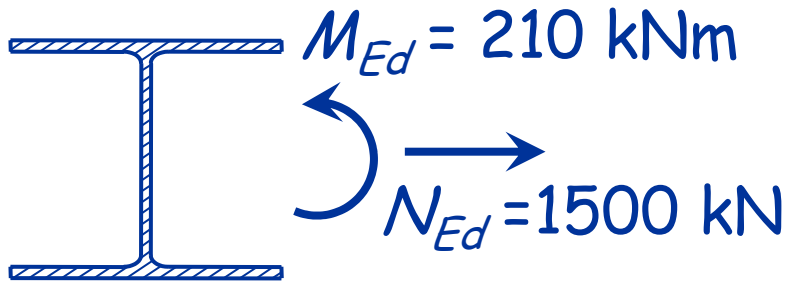
Quale curva dobbiamo utilizzare?

Scelta della curva di instabilità

Sezione trasversale	Limiti	Intorno all'asse	Curva di instabilità
<p>Sezioni laminate ad I</p> 	$h/b > 1.2:$		
		$t_f \leq 40 \text{ mm}$	$y-y$ $z-z$ a b
	$40 \text{ mm} < t_f \leq 100 \text{ mm}$	$y-y$ $z-z$	b c
	$h/b \leq 1.2:$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	$y-y$ $z-z$ b c
		$t_f > 100 \text{ mm}$	$y-y$ $z-z$ d d

Esempio

Dati:



Sezione
Acciaio

HEB300
Fe360



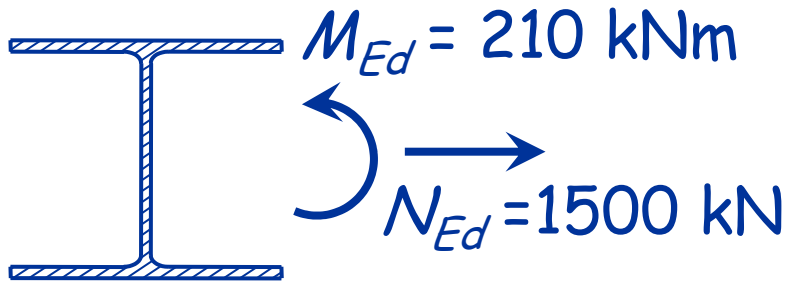
3 - Determinazione di $N_{b,Rd}$

Curva c
 $\bar{\lambda} = 1.0$ \Rightarrow $\chi = 0.5399$

$$N_{b,Rd} = \chi N_{pl,Rd} = 0.5399 \times 3334.8 = 1800.5 \text{ kN}$$

Esempio

Dati:



Sezione
Acciaio

HEB300
Fe360



4 - Verifica

$$k_y = 1.5$$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{b,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{pl,Rd} / k_y} = \frac{1500}{1800.5} + \frac{210}{418.1 / 1.5} = 0.83 + 0.75 \leq 1.58$$

La sezione non è verificata