

Tecnica delle costruzioni

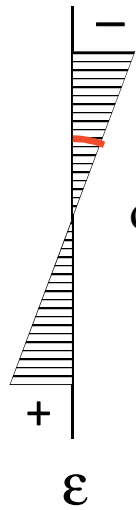
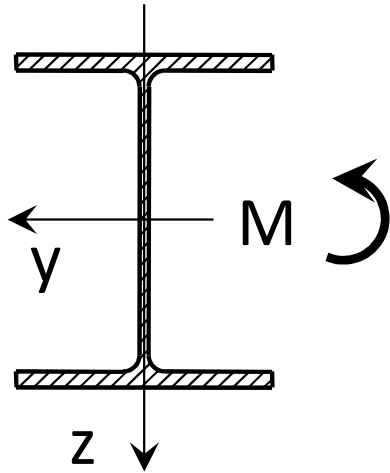
mod. A - Acciaio

Catania, 2019/20

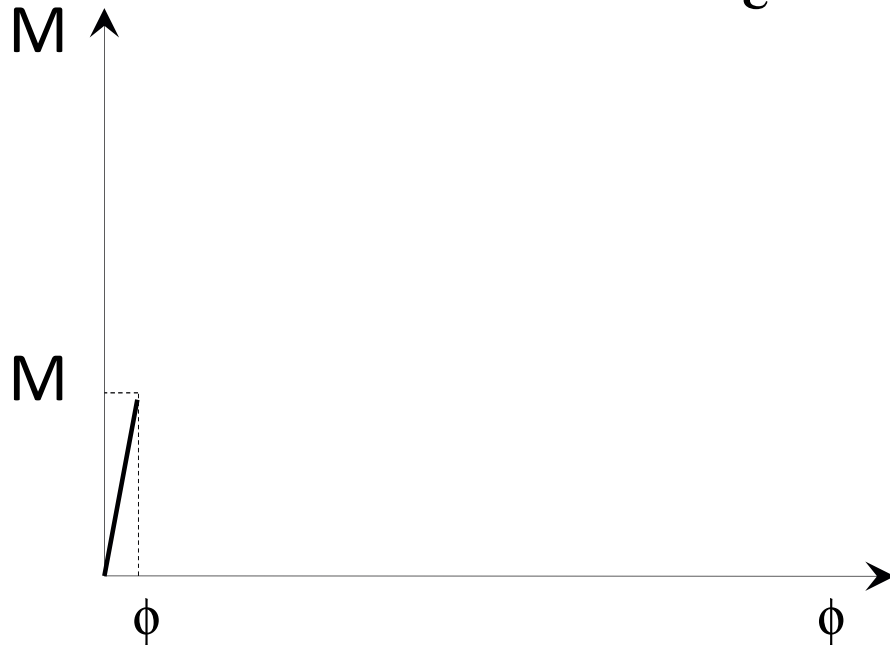
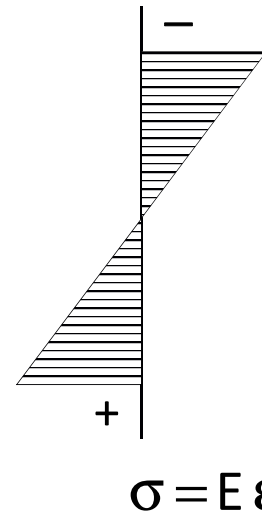
08 – Flessione semplice retta

Aurelio Gheresi

Comportamento al crescere della curvatura



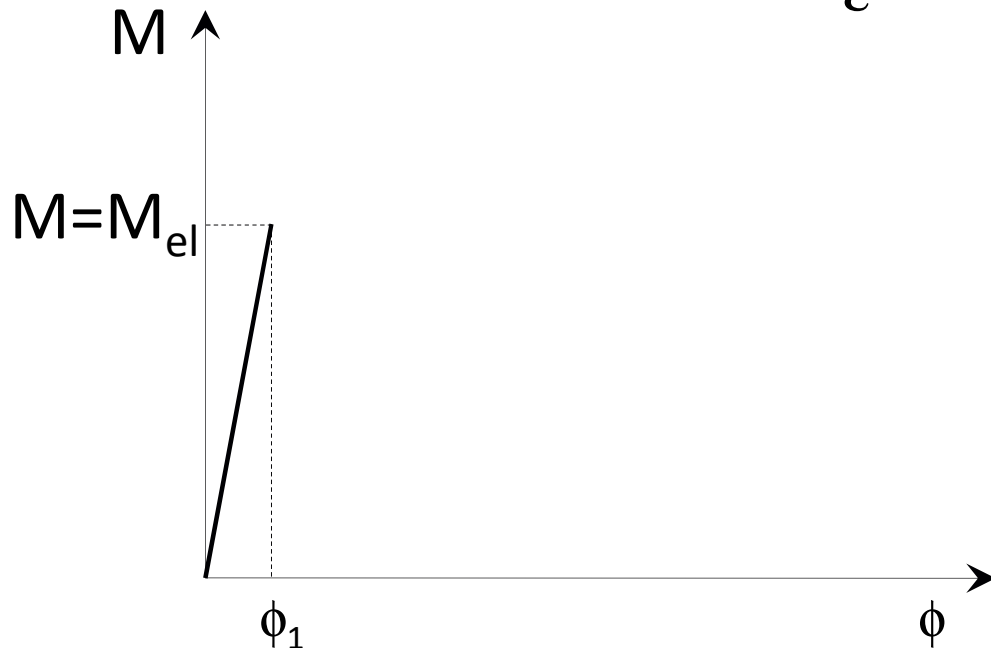
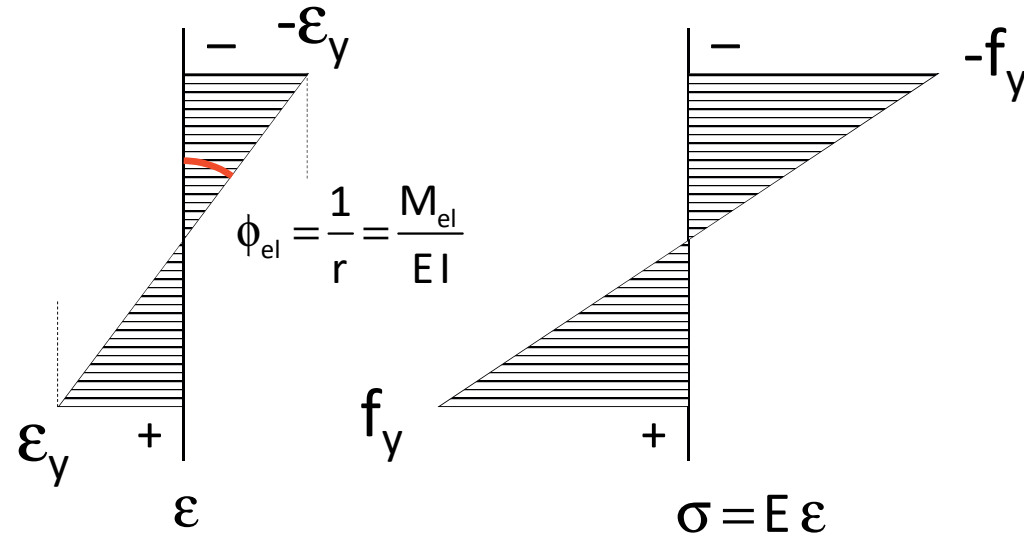
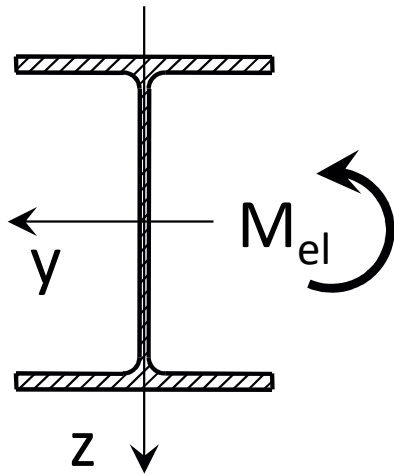
$$\phi = \frac{1}{r} = \frac{M}{EI}$$



$$M = \int \sigma z \, dA$$

$$\phi = \frac{1}{r} = \frac{M}{EI}$$

Comportamento al crescere della curvatura

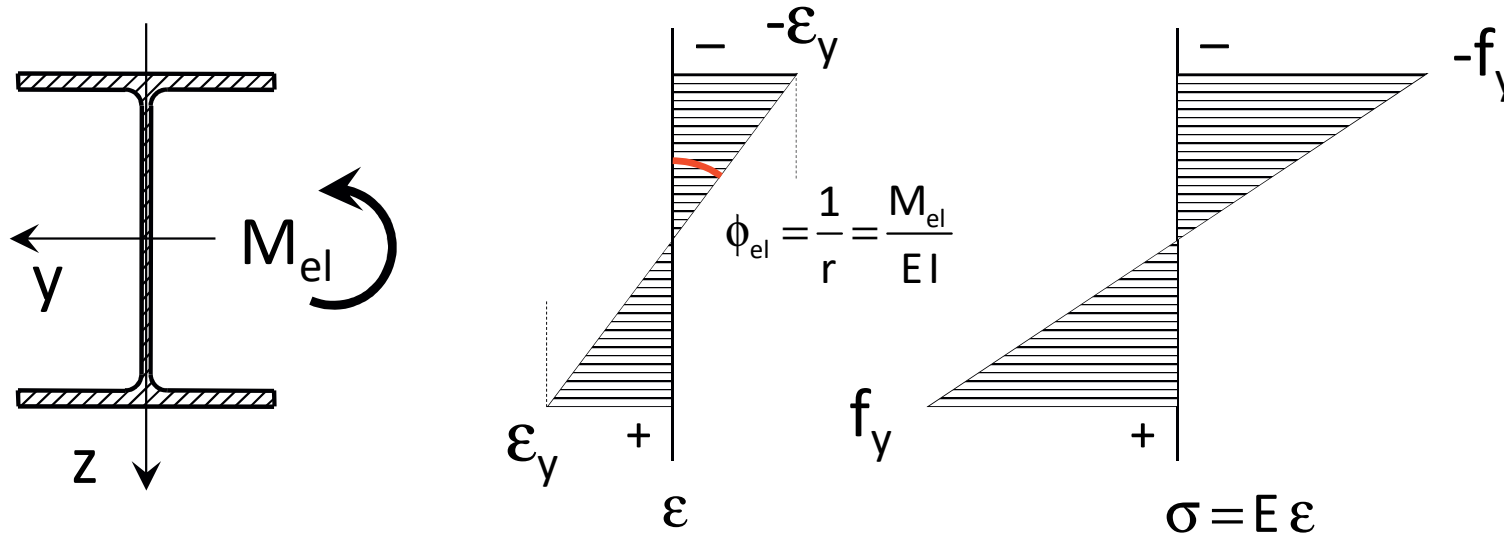


$$M_{el} = \int \sigma z dA = W_{el} f_y$$

Momento di prima plasticizzazione
(o di fine comportamento elastico)

$$W_{el} = \frac{I}{h/2} \quad h = \text{altezza sezione}$$

Comportamento al crescere della curvatura



Esempio:

HE 300 B acciaio S235

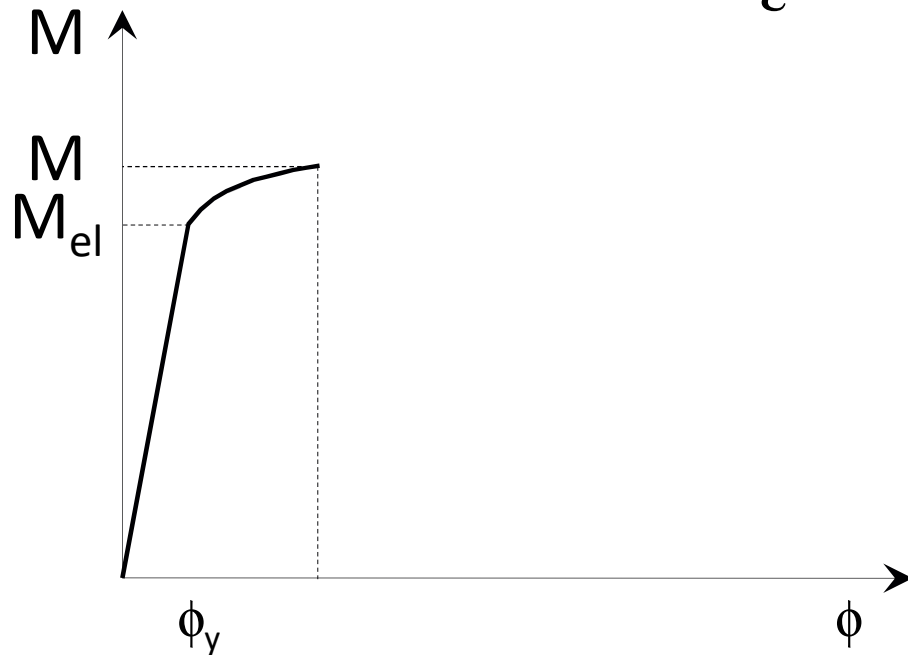
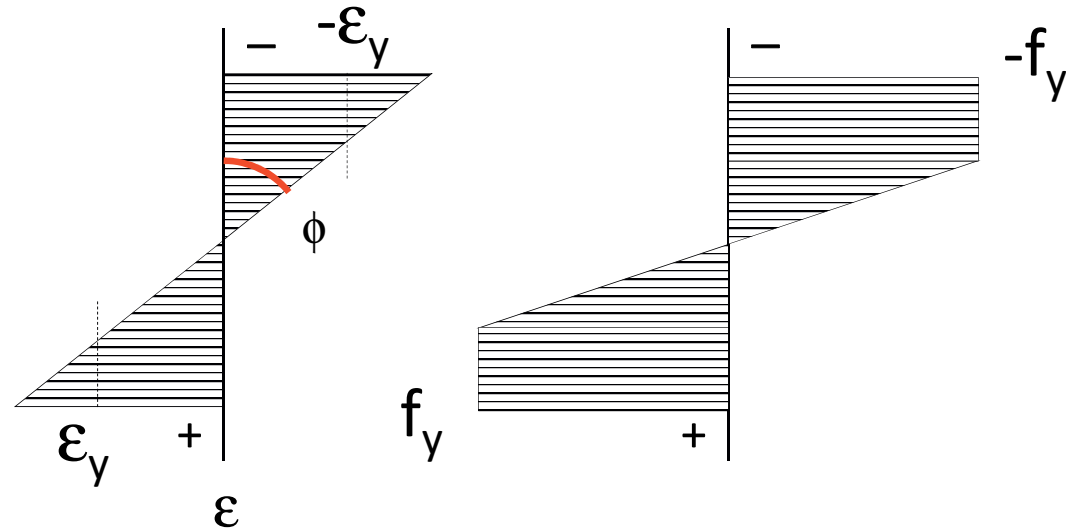
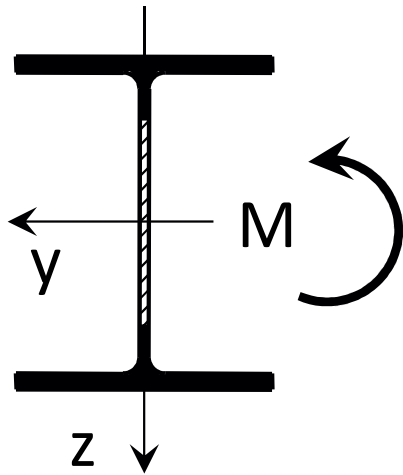
$$W_{el} = 1678 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$M_{el} = \int \sigma z dA = W_{el} f_y$$

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

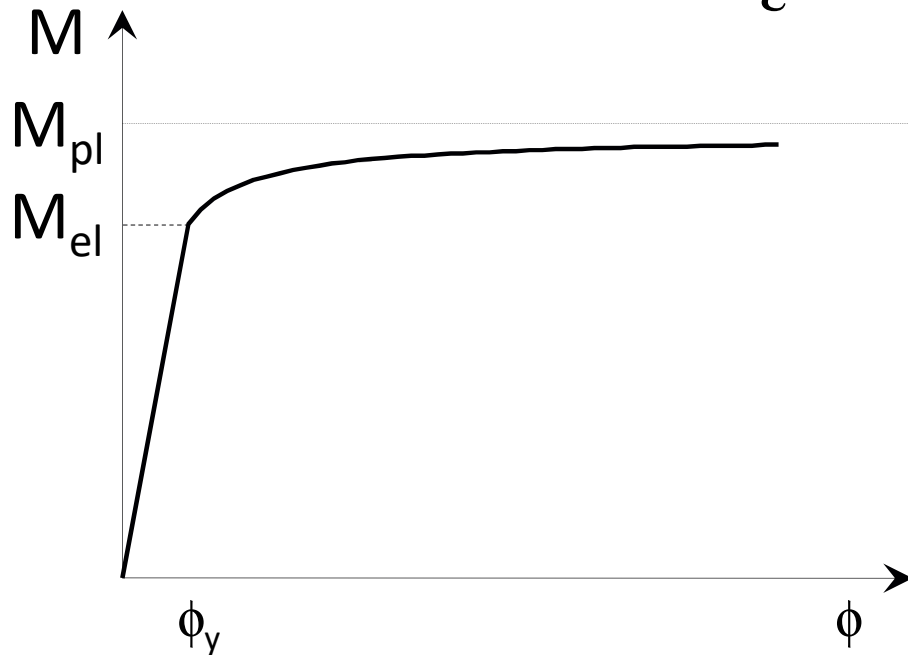
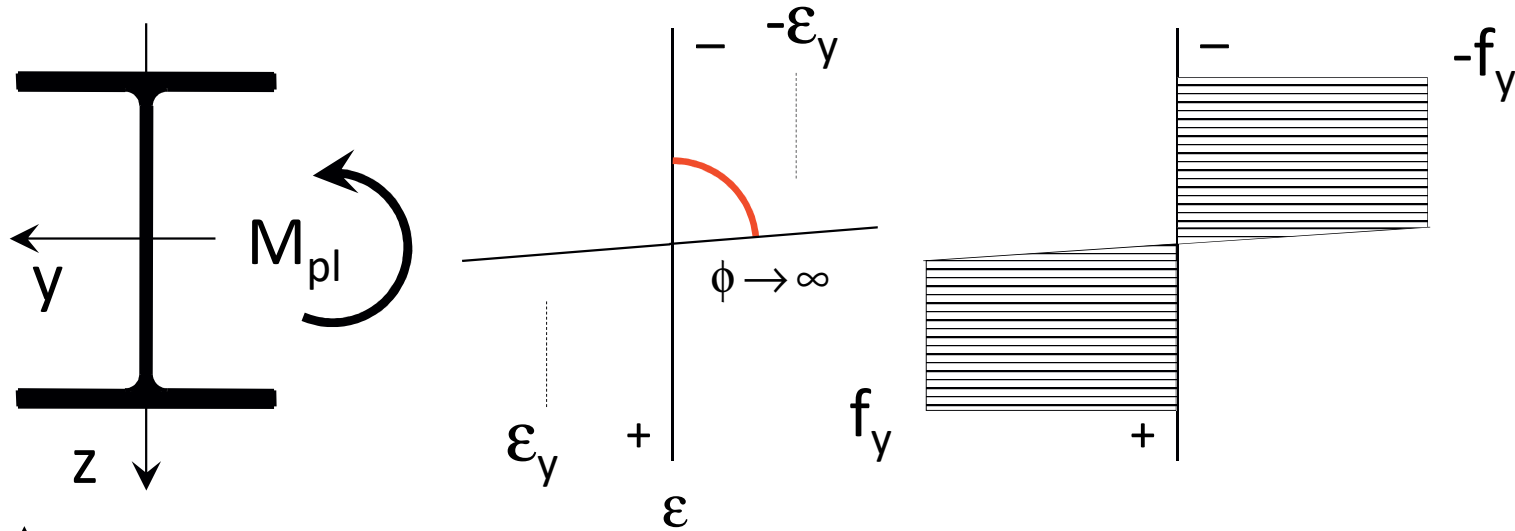
$$M_{el,Rd} = 1678 \times 10^3 \frac{235}{1.05} \times 10^{-6} = 375.6 \text{ kNm}$$

Comportamento al crescere della curvatura



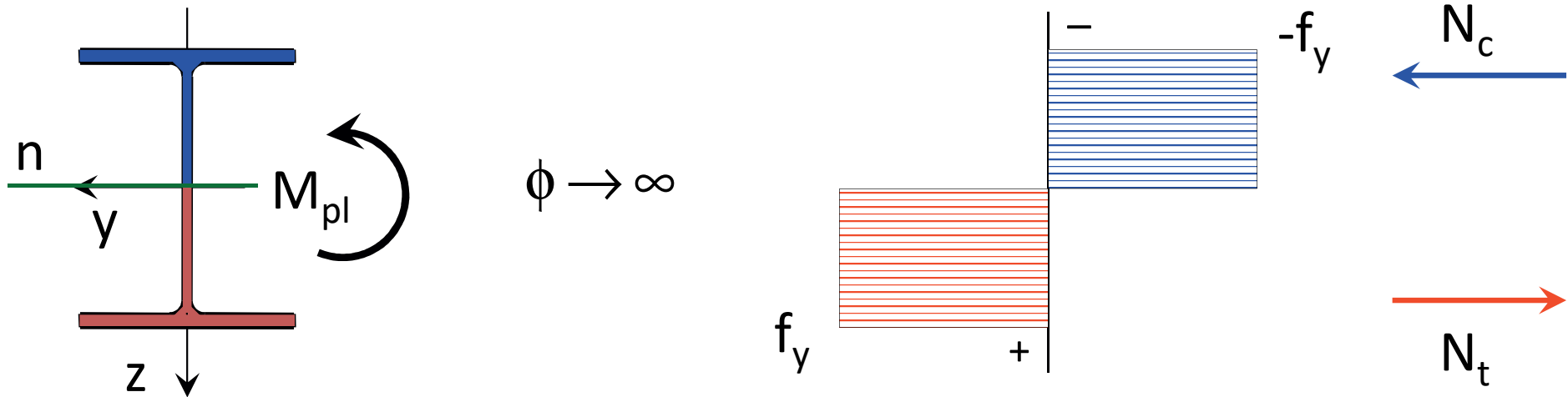
$$M = \int \sigma z \, dA > M_{el}$$

Comportamento al crescere della curvatura



$$M = \int \sigma z dA \rightarrow M_{pl}$$

Comportamento ultimo



Per trovare l'asse neutro:

$$N_c = \int_{\text{compr}} \sigma dA = -f_y A_c$$

$$N_t = \int_{\text{tesa}} \sigma dA = f_y A_t$$

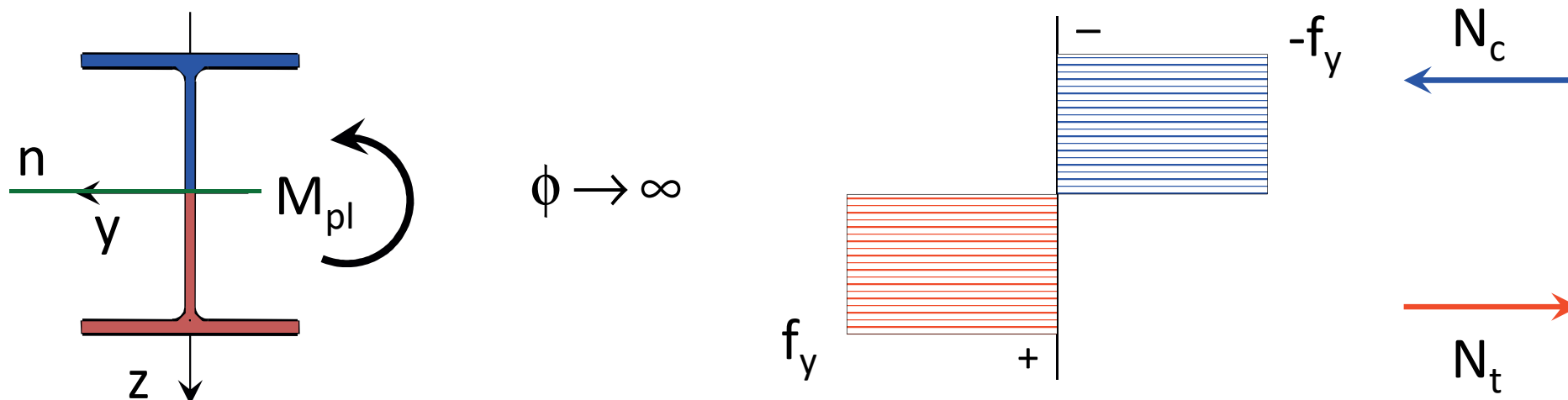
Equilibrio alla traslazione

$$N_c + N_t = 0 \quad \Rightarrow \quad -f_y A_c + f_y A_t = 0$$

$$A_c = A_t$$

L'asse neutro divide la sezione in due parti di area uguale

Comportamento ultimo



Per trovare il valore di M_{pl} :

$$M_{pl} = \int \sigma z dA = \int_{A_c} -f_y z dA + \int_{A_t} f_y z dA$$

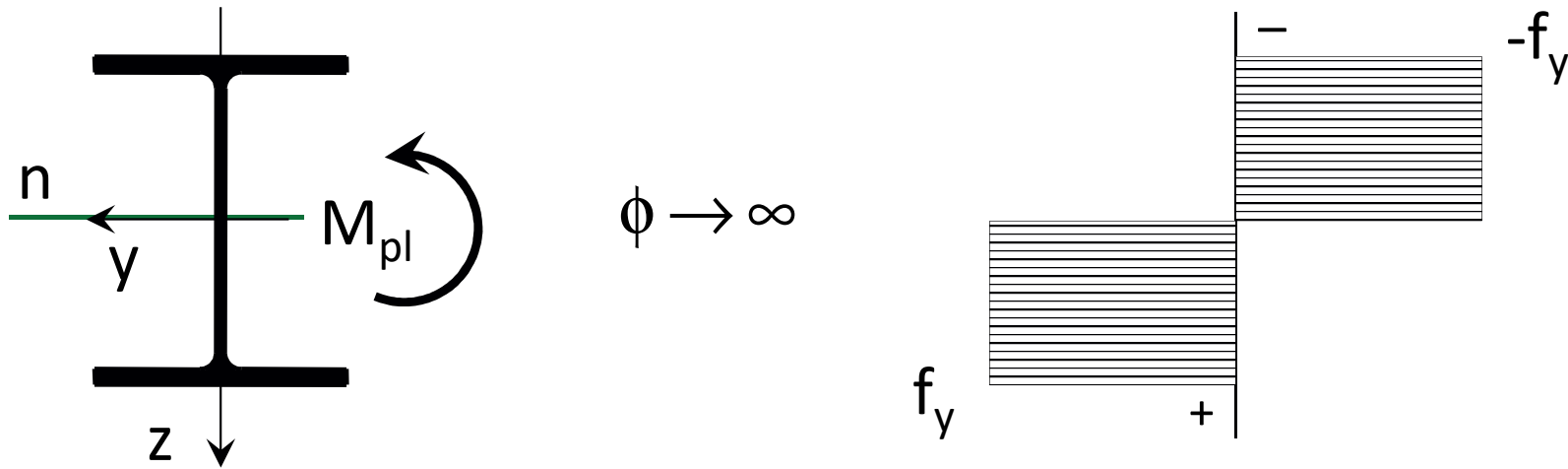
$$\int_{A_c} -f_y z dA = -f_y \int_{A_c} z dA$$

$$\int_{A_t} f_y z dA = f_y \int_{A_t} z dA$$

$$-\int_{A_c} z dA = \int_{A_t} z dA = S_{1/2 \text{ sez}}$$

$$M_{pl} = 2 f_y \int_{A_t} z dA = 2 S_{1/2 \text{ sez}} f_y$$

Comportamento ultimo



$$M_{pl} = 2 f_y \int_{A_t} z \, dA = 2 S_{1/2 \text{ sez}} f_y$$

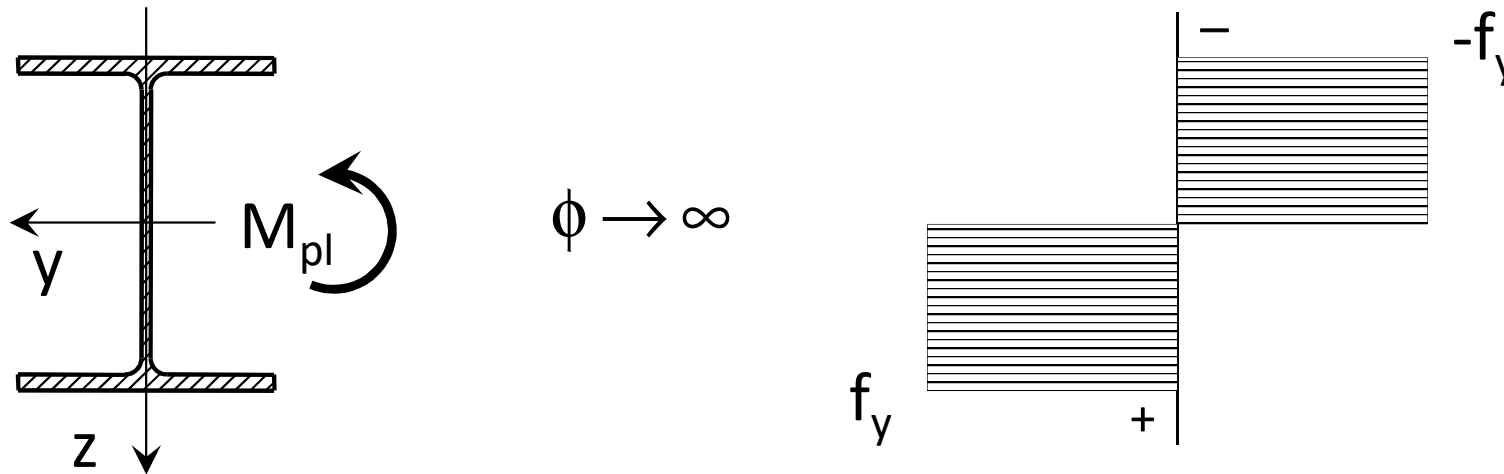
Momento di piena plasticizzazione

$S_{1/2 \text{ sez}}$ momento statico di mezza sezione

$$2 S_{1/2 \text{ sez}} = W_{pl}$$

$$M_{pl} = W_{pl} f_y$$

Comportamento ultimo



Esempio:

HE 300 B acciaio S235

$$W_{pl} = 1869 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$M_{pl} = \int \sigma z dA = W_{pl} f_y$$

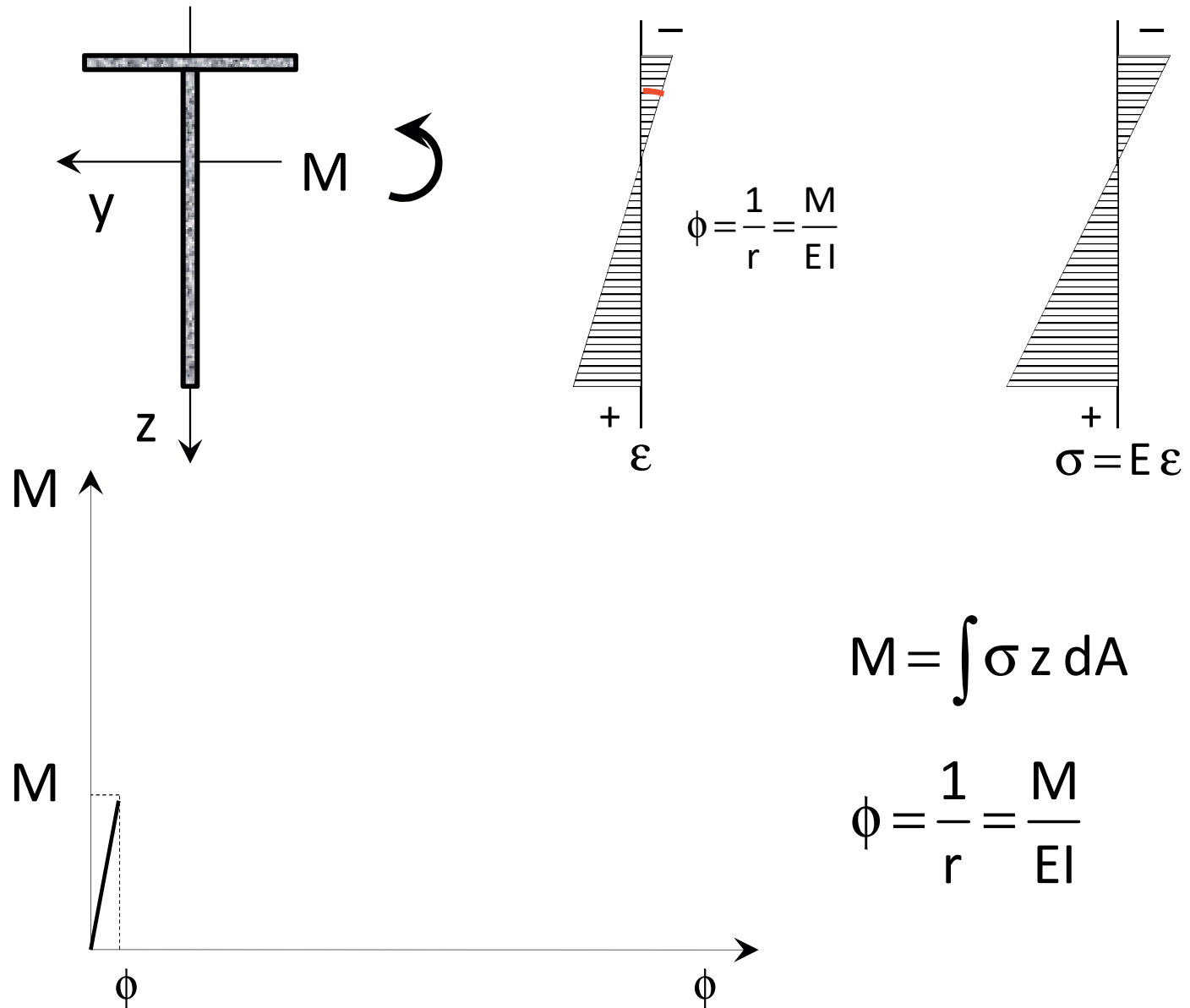
$$M_{pl,Rd} = W_{pl} \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{pl,Rd} = 1879 \times 10^3 \frac{235}{1.05} \times 10^{-6} = 420.5 \text{ kNm}$$

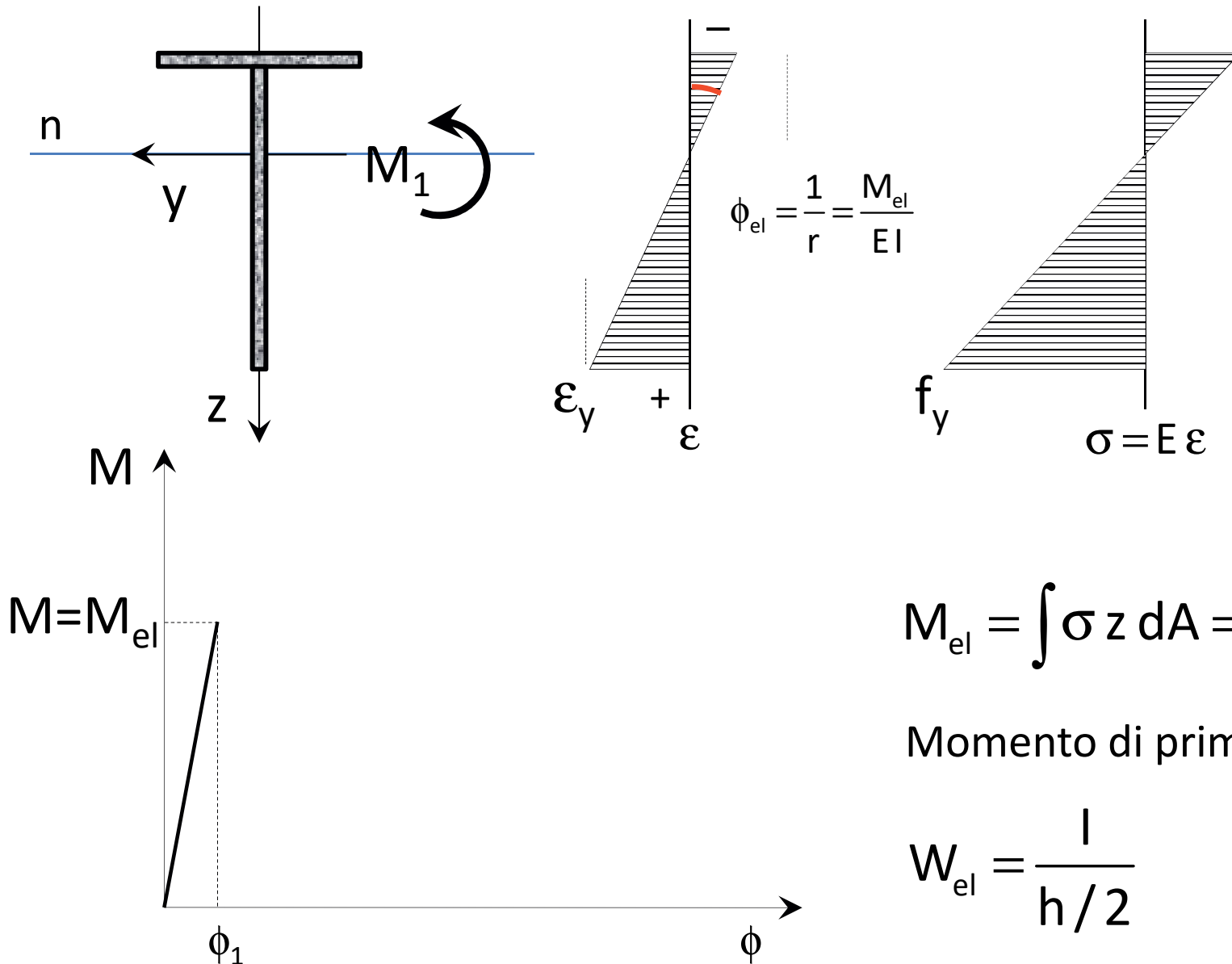
era $M_{el,Rd} = 375.6 \text{ kNm}$

Comportamento

al crescere della curvatura – asta non simmetrica



Comportamento al crescere della curvatura

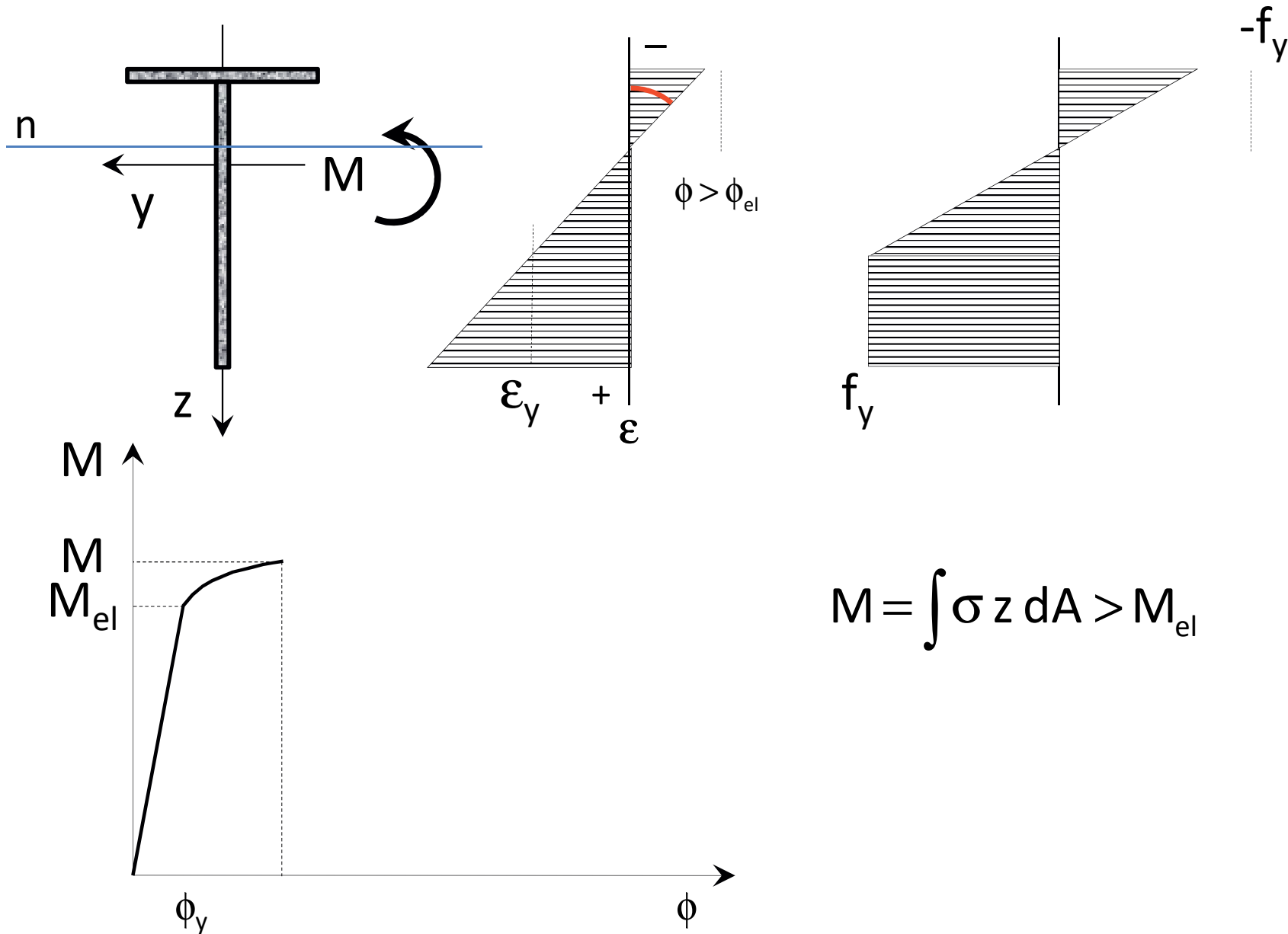


$$M_{el} = \int \sigma z dA = W_{el} f_y$$

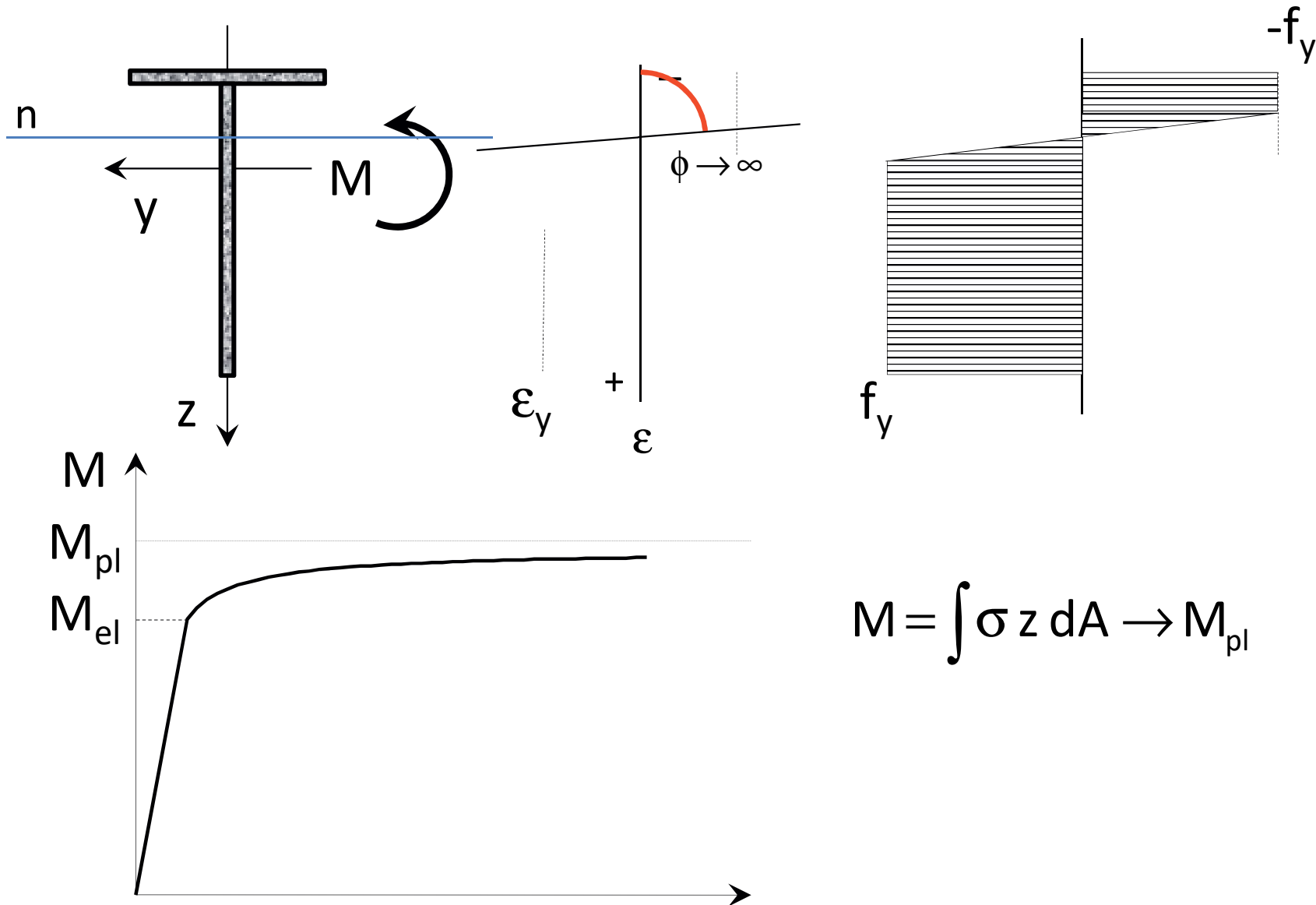
Momento di prima plasticizzazione

$$W_{el} = \frac{I}{h/2} \quad h = \text{altezza sezione}$$

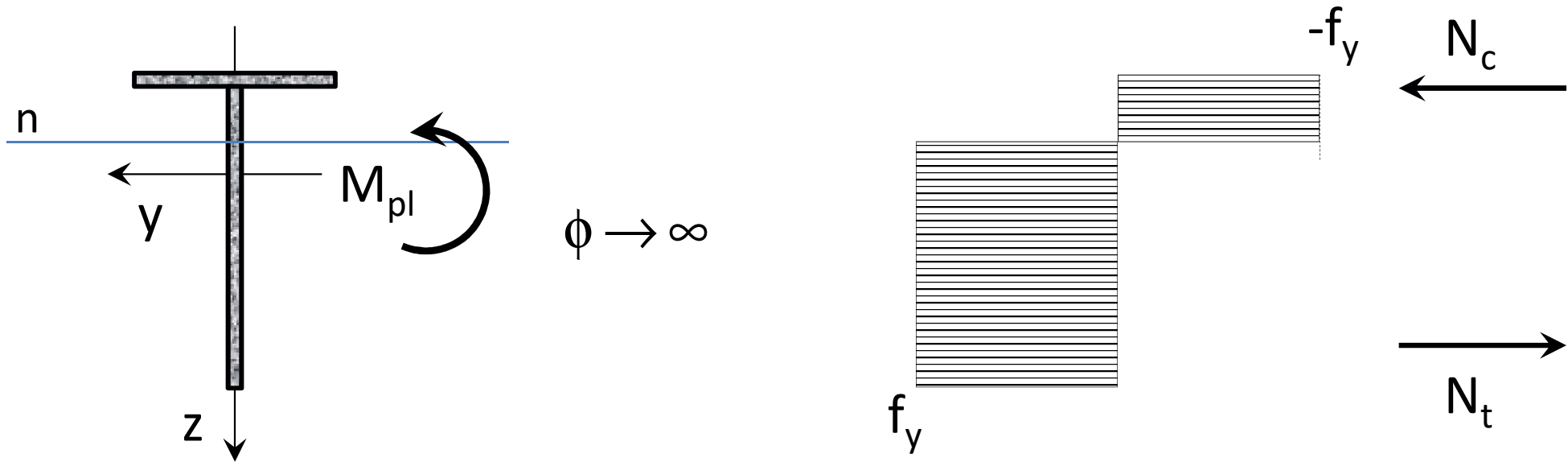
Comportamento al crescere della curvatura



Comportamento al crescere della curvatura



Comportamento al crescere della curvatura



Per trovare l'asse neutro:

$$N_c = \int_{\text{compr}} \sigma dA = -f_y A_c$$

$$N_t = \int_{\text{tesa}} \sigma dA = f_y A_t$$

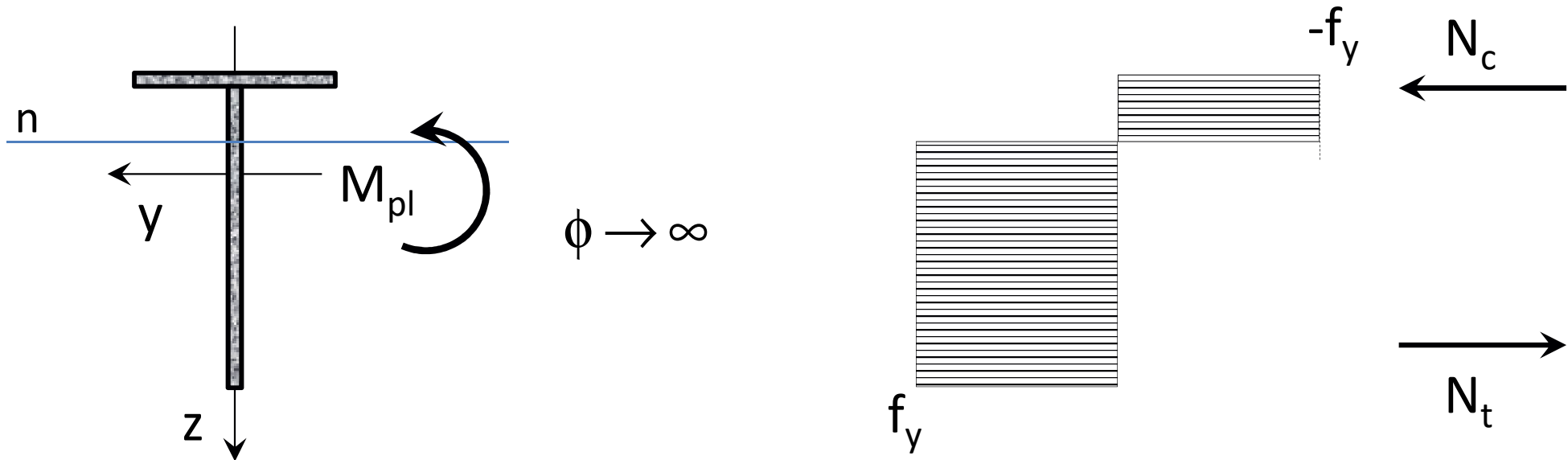
Equilibrio alla traslazione

$$N_c + N_t = 0 \quad \Rightarrow \quad -f_y A_c + f_y A_t = 0$$

$$A_c = A_t$$

L'asse neutro divide la sezione in
due parti di area uguale

Comportamento al crescere della curvatura



Per trovare il valore di M_{pl} :

$$M_{pl} = \int \sigma z dA = \int_{A_c} -f_y z dA + \int_{A_t} f_y z dA$$

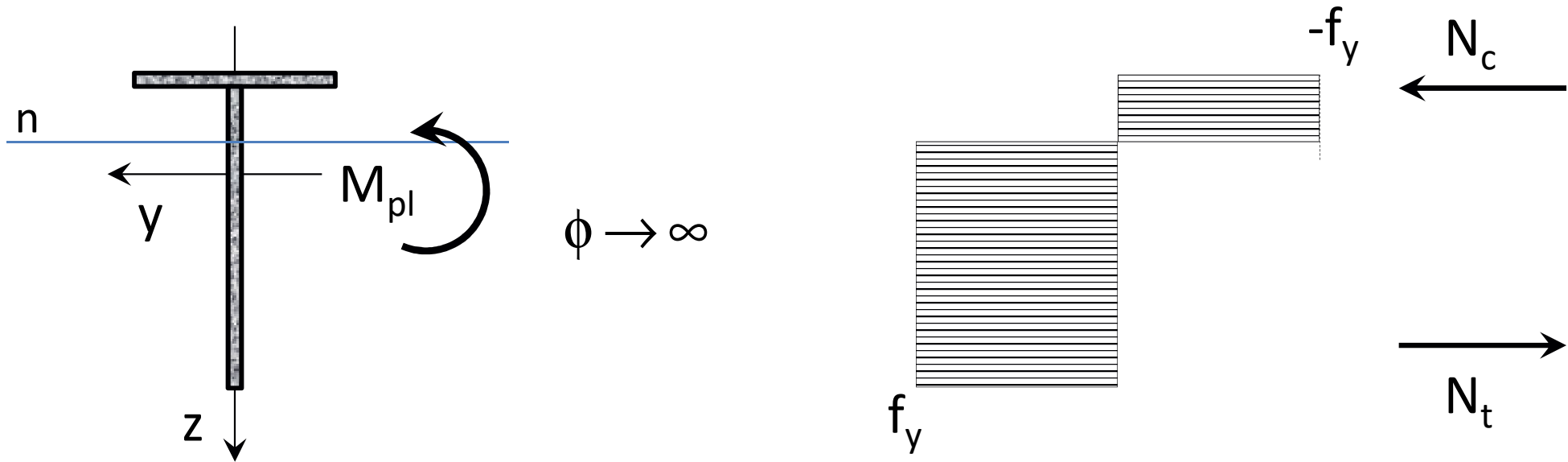
$$\int_{A_c} -f_y z dA = -f_y \int_{A_c} z dA$$

$$\int_{A_t} f_y z dA = f_y \int_{A_t} z dA$$

$$-\int_{A_c} z dA = \int_{A_t} z dA = S_{1/2 \text{ sez}}$$

$$M_{pl} = 2 f_y \int_{A_t} z dA = 2 S_{1/2 \text{ sez}} f_y$$

Comportamento al crescere della curvatura



$$M_{pl} = 2 f_y \int_{A_t} z \, dA = 2 S_{1/2 \text{ sez}} f_y$$

Momento di piena plasticizzazione

$S_{1/2 \text{ sez}}$ momento statico di mezza sezione

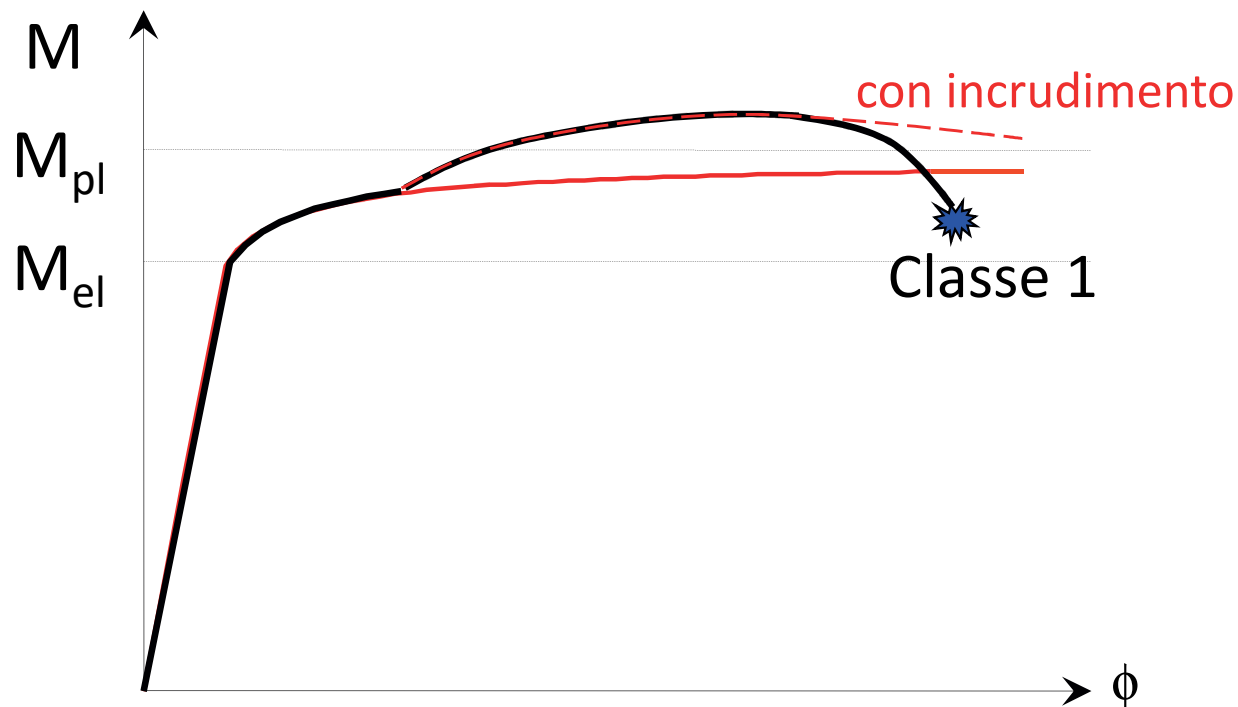
$$2 S_{1/2 \text{ sez}} = W_{pl}$$

$$M_{pl} = W_{pl} f_y$$

Comportamento di aste reali

Classe 1 – L'instabilità locale avviene molto tardi, dopo forti deformazioni plastiche

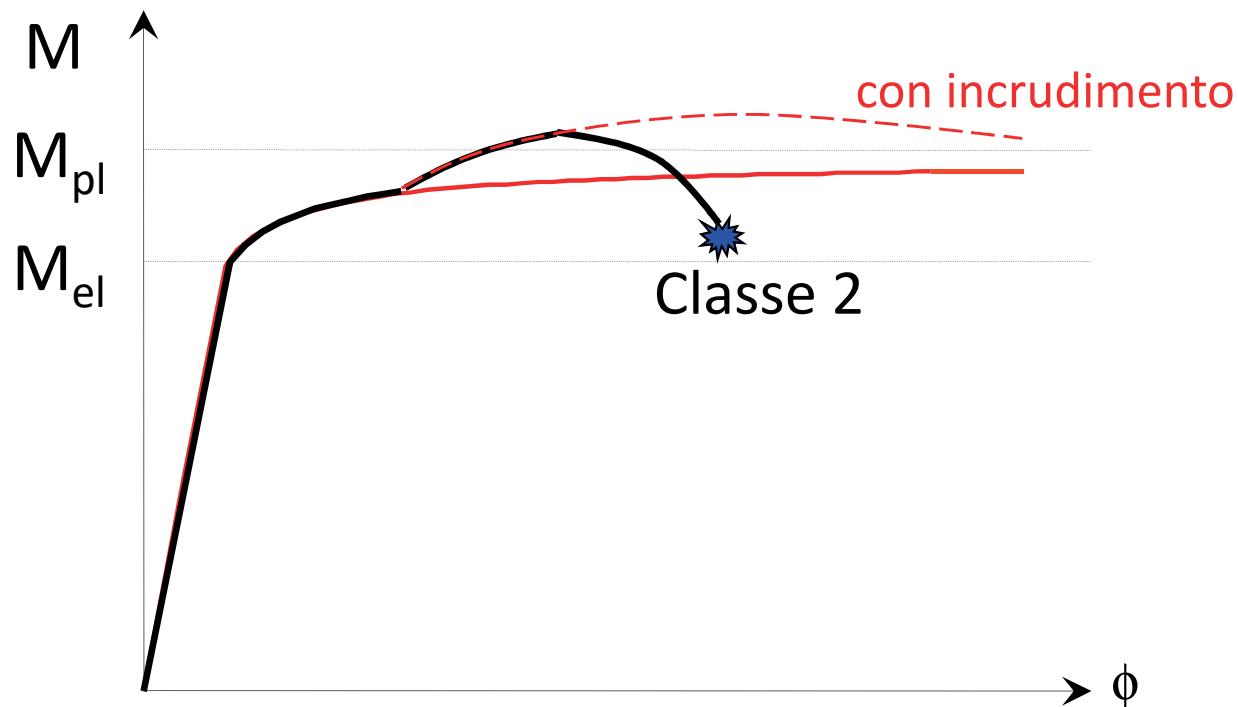
M supera M_{pl} e la sezione è molto duttile



Comportamento di aste reali

Classe 1 – M supera M_{pl} e la sezione è molto duttile

Classe 2 – L'instabilità locale avviene abbastanza tardi, dopo deformazioni plastiche non particolarmente alte
 M supera M_{pl} ma la sezione è meno duttile

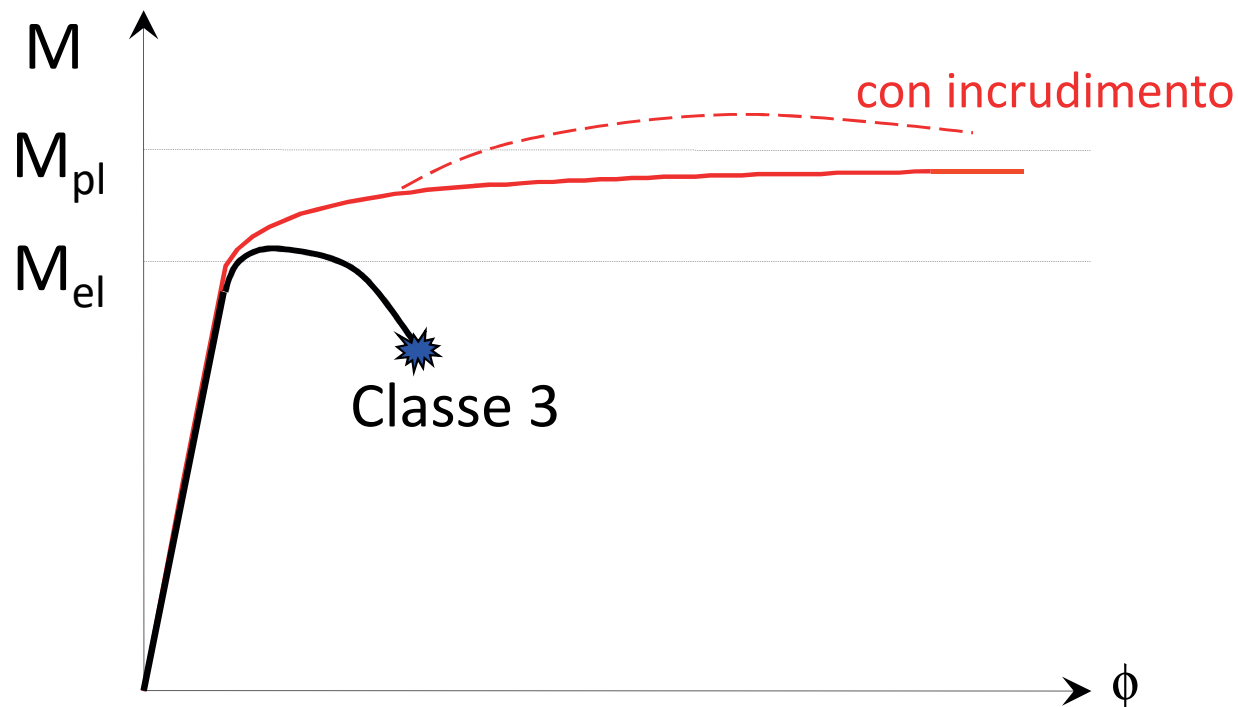


Comportamento di aste reali

Classe 1 – M supera M_{pl} e la sezione è molto duttile

Classe 2 – M supera M_{pl} ma la sezione è meno duttile

Classe 3 – La rottura avviene per $M \approx M_{el}$



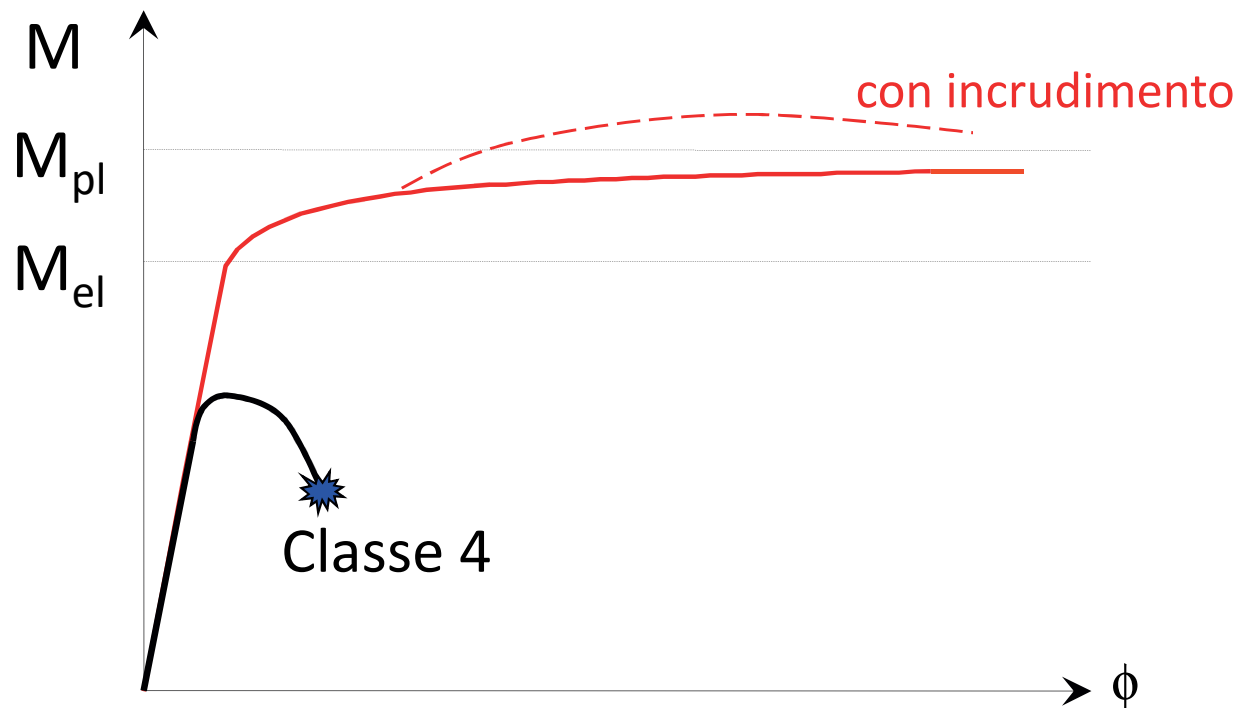
Comportamento di aste reali

Classe 1 – M supera M_{pl} e la sezione è molto duttile

Classe 2 – M supera M_{pl} ma la sezione è meno duttile

Classe 3 – La rottura avviene per $M \approx M_{el}$

Classe 4 – La rottura avviene per $M < M_{el}$



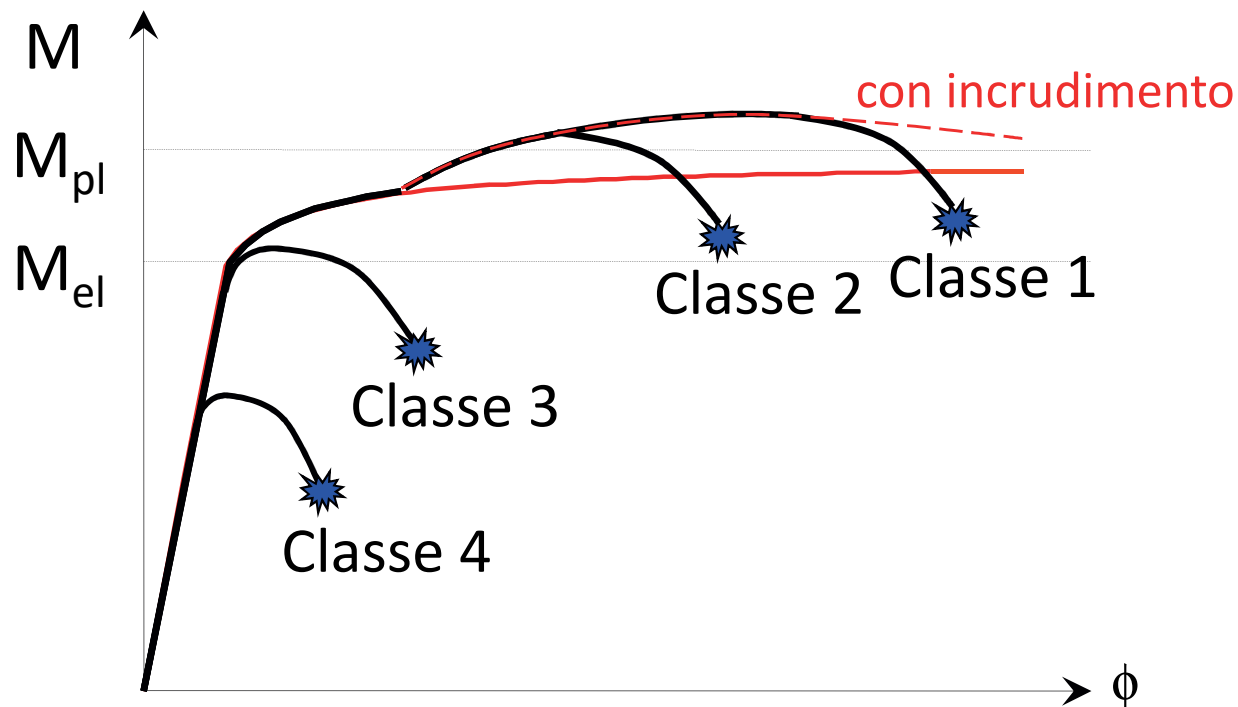
Comportamento di aste reali

Classe 1 – M supera M_{pl} e la sezione è molto duttile

Classe 2 – M supera M_{pl} ma la sezione è meno duttile

Classe 3 – La rottura avviene per $M \approx M_{el}$

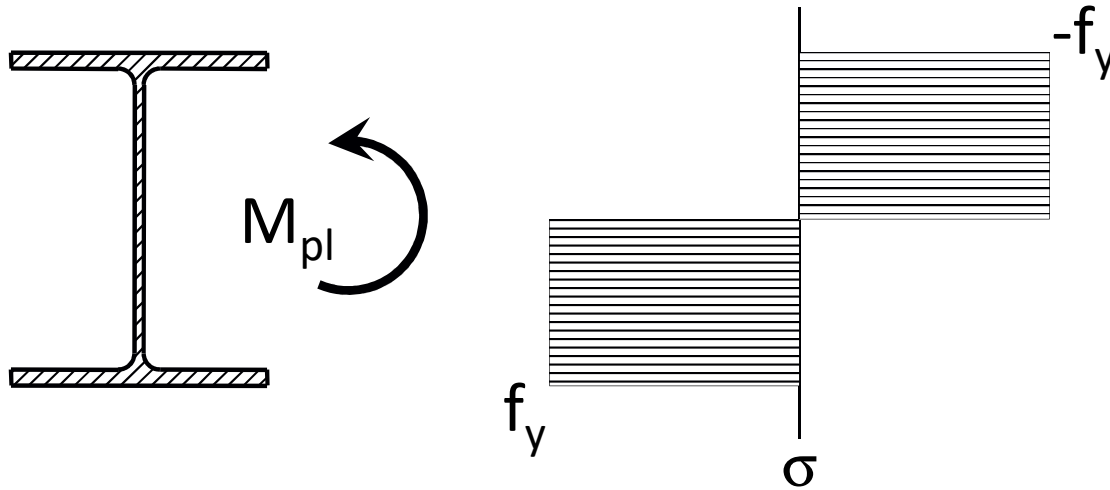
Classe 4 – La rottura avviene per $M < M_{el}$



Verifica – stato limite ultimo

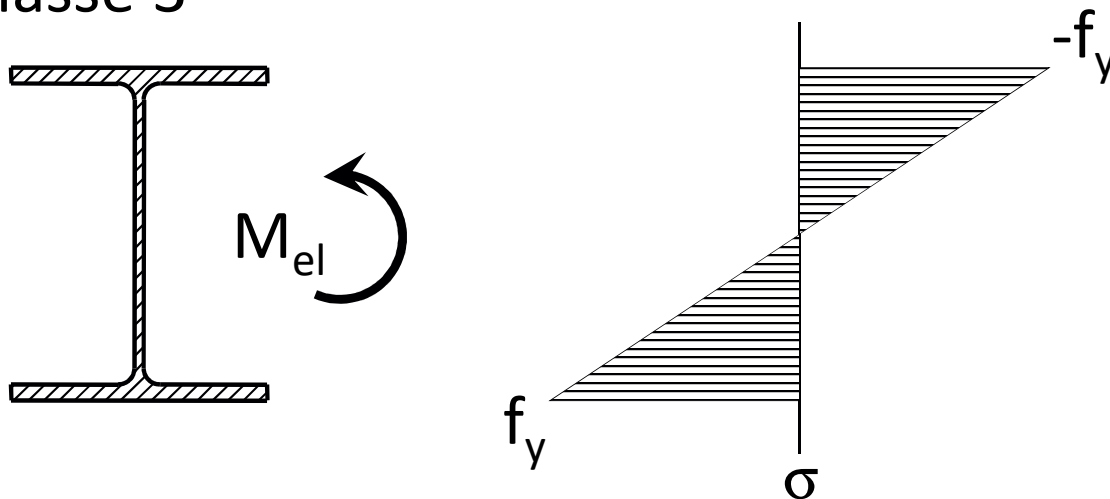
il momento resistente dipende dalla classe del profilo

Classe 1 e 2



$$M_{pl} = W_{pl} f_y$$

Classe 3

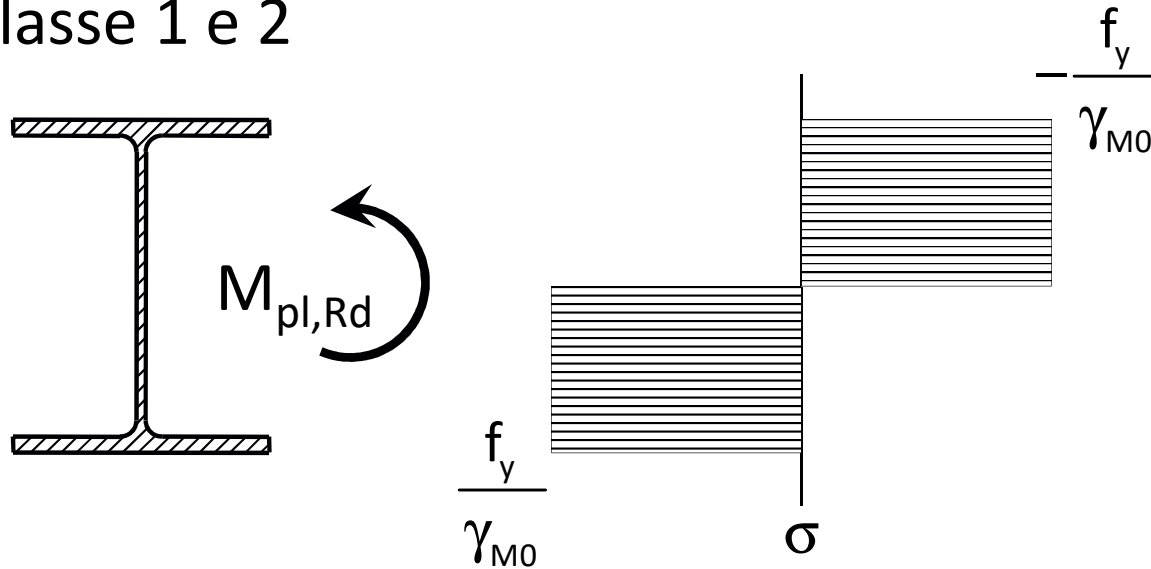


$$M_{el} = W_{el} f_y$$

Verifica – stato limite ultimo

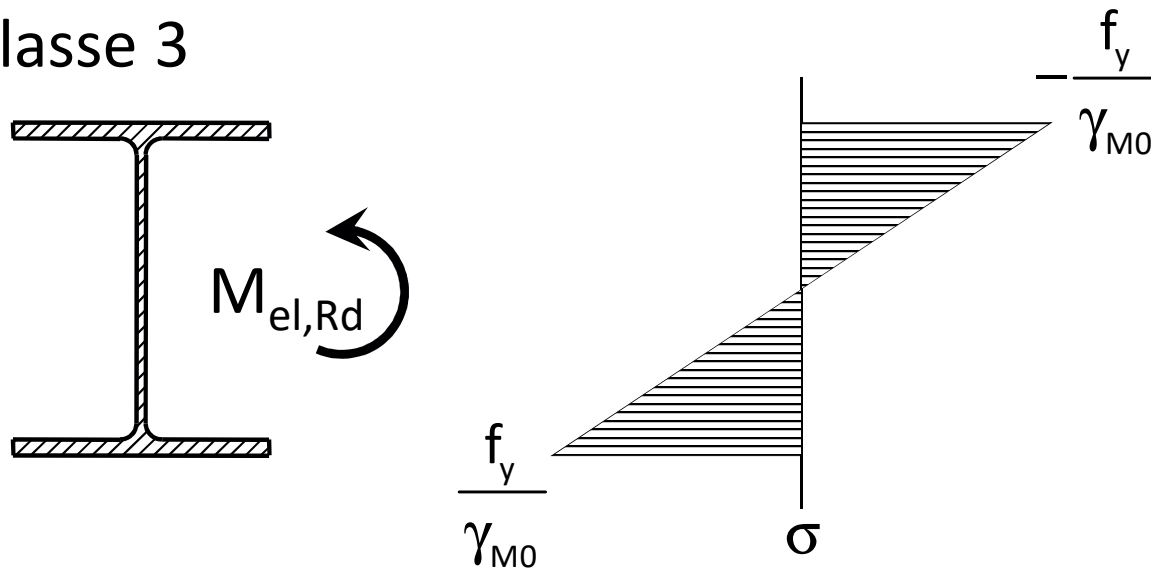
il momento resistente dipende dalla classe del profilo

Classe 1 e 2



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

Classe 3

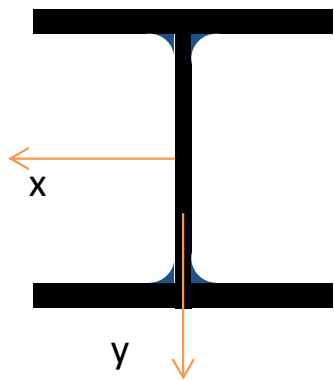


$$M_{Ed} \leq M_{el,Rd} = \frac{W_{el} f_y}{\gamma_{M0}}$$

Esempio

profilato HE

Dati:



HE 240 A

$M_{Ed} = 125 \text{ kNm}$

Acciaio

S235



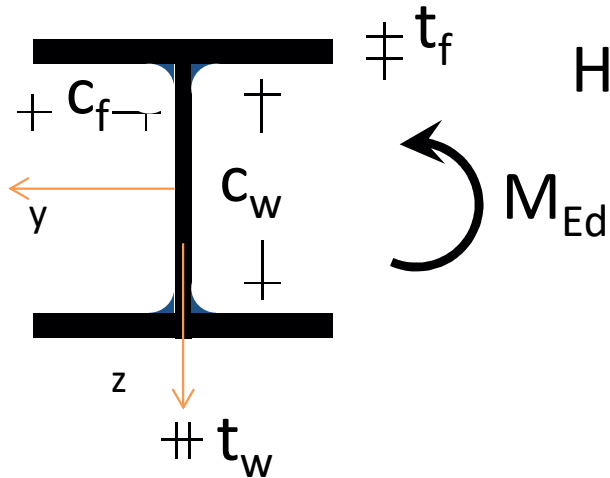
Procedura

- 1 - Si determina la classe del profilato (la peggiore tra quella dell'anima e della flangia).
- 2 - Si calcola il momento resistente M_{Rd} .
- 3 - Si verifica che $M_{Ed} < M_{Rd}$.

Esempio

profilato HE

Dati:



HE 240 A

$$M_{Ed} = 125 \text{ kNm}$$

Acciaio

S235

1 - Classe del profilato

$$c_w = 164 \text{ mm}$$

$$t_w = 7.5 \text{ mm}$$

$$c_f = 95.3 \text{ mm}$$

$$t_f = 12 \text{ mm}$$

Anima: $\frac{c_w}{t_w} = \frac{164}{7.5} = 21.9$

Ala: $\frac{c_f}{t_f} = \frac{95.3}{12} = 7.9$

Parti interne compresse

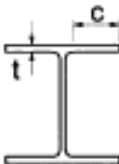

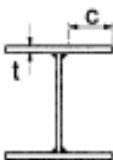
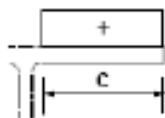
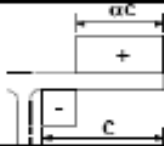
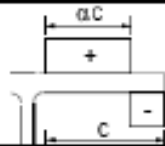
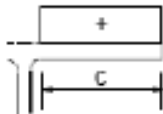
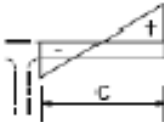
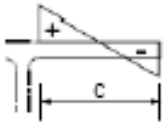
$$\frac{c}{t} \leq 72 \varepsilon$$

				Parti interne compresse		
Classe	Parte soggetta a flessione	Parte soggetta a compressione	Parte soggetta a flessione e a compressione			
Distribuzione delle tensioni nelle parti (compressione positiva)						
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$	quando $\alpha > 0,5: c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ quando $\alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 65\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$	quando $\alpha > 0,5: c/t \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ quando $\alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$			
Distribuzione delle tensioni nelle parti (compressione positiva)						
3	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$	quando $\psi > -1: c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ quando $\psi \leq -1: c/t \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{-\psi}$			
$\varepsilon = \sqrt{235 / f_{yk}}$	f_{yk}	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

*) $\psi \leq -1$ si applica se la tensione di compressione $\sigma \leq f_{yk}$ o la deformazione a trazione $\varepsilon_y > f_{yk}/E$

Parti esterne comprese

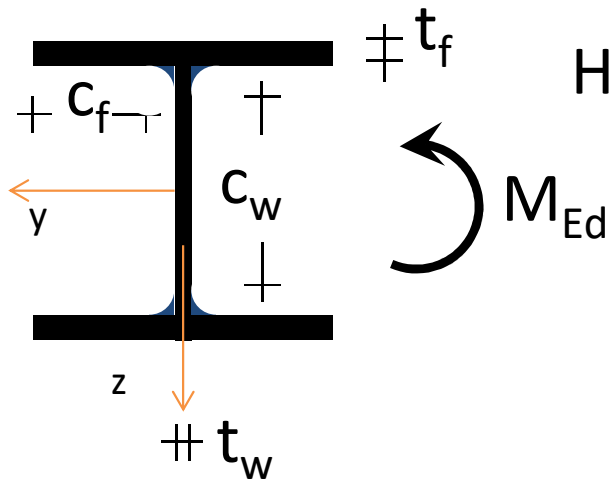
$$\frac{c}{t} \leq 9 \varepsilon$$

Piattabande esterne						
						
Profilati laminati a caldo			Sezioni saldate			
Classe	Piattabande esterne soggette a compressione	Piattabande esterne soggette a flessione e a compressione				
		Con estremità in compressione		Con estremità in trazione		
Distribuzione delle tensioni nelle parti (compressione positiva)						
1	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
2	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
Distribuzione delle tensioni nelle parti (compressione positiva)						
3	$c/t \leq 14\varepsilon$	$c/t \leq 21\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ Per k_σ vedere EN 1993-1-5				
$\varepsilon = \sqrt{235/f_{yk}}$	f_{yk}	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Esempio

profilato HE

Dati:



HE 240 A

$$M_{Ed} = 125 \text{ kNm}$$

Acciaio S235

Il profilato è di classe 1

1 - Classe del profilato

$$c_w = 164 \text{ mm}$$

$$t_w = 7.5 \text{ mm}$$

$$c_f = 95.3 \text{ mm}$$

$$t_f = 12 \text{ mm}$$

$$\text{Anima: } \frac{c_w}{t_w} = \frac{164}{7.5} = 21.9 \leq 72 \varepsilon = 72$$

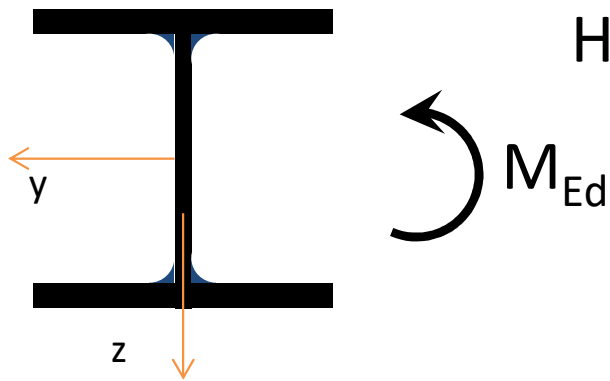
$$(\varepsilon = \sqrt{235 / f_y} = 1)$$

$$\text{Ala: } \frac{c_f}{t_f} = \frac{95.3}{12} = 7.9 \leq 9 \varepsilon = 9$$

Esempio

profilato HE

Dati:



HE 240 A

$M_{Ed} = 125 \text{ kNm}$

Acciaio S235

Il profilato è di classe 1

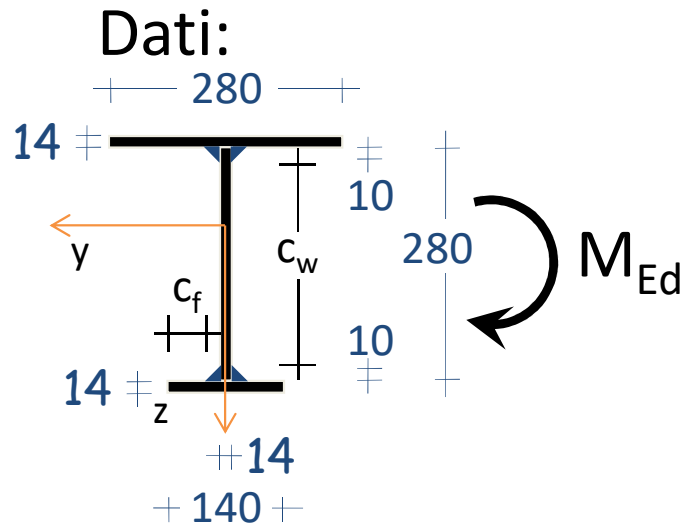
2 e 3 - Momento resistente e verifica

Dal sagomario: $W_{pl,y} = 744.6 \text{ cm}^3$

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{744.6 \times 235}{1.05 \times 10^3} = 166.6 \text{ kNm}$$

Sezione verificata

Esempio – sezione composta



$$M_{Ed} = -250 \text{ kNm}$$

Acciaio S235

1 - Classe della sezione

$$c_w = 260 \text{ mm} \quad t_w = 14 \text{ mm}$$

$$c_f = 53 \text{ mm} \quad t_f = 14 \text{ mm} \quad \text{ala inferiore}$$

Anima:

$$\frac{c_w}{t_w} = \frac{260}{14} = 18.5$$

Ala:

$$\frac{c_f}{t_f} = \frac{53}{14} = 3.8$$

Parti interne compresse

A favore di
sicurezza



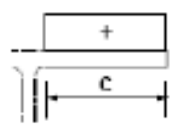
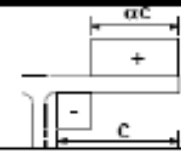
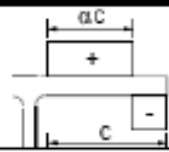
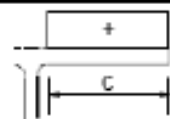
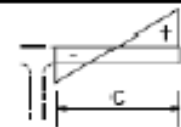
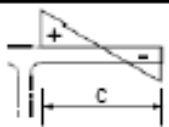
$$\frac{c}{t} \leq 33 \varepsilon$$

				Inflessione intorno all'asse		
				Inflessione intorno all'asse		
Parti interne compresse						
Classe	Parte soggetta a flessione	Parte soggetta a compressione	Parte soggetta a flessione e a compressione			
Distribuzione delle tensioni nelle parti (compressione positiva)						
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$	quando $\alpha > 0,5: c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ quando $\alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$	quando $\alpha > 0,5: c/t \leq \frac{406\varepsilon}{13\alpha - 1}$ quando $\alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$			
Distribuzione delle tensioni nelle parti (compressione positiva)						
3	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$	quando $\psi > -1: c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ quando $\psi \leq -1: c/t \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$			
$\varepsilon = \sqrt{235 / f_{yk}}$	f_{yk}	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

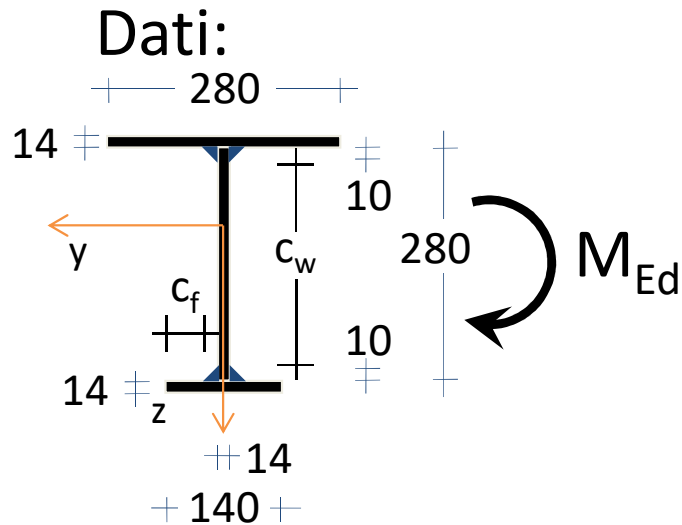
*) $\psi \leq -1$ si applica se la tensione di compressione $\sigma \leq f_{yk}$ o la deformazione a trazione $\varepsilon_y > f_{yk}/E$

Parti esterne comprese

$$\frac{c}{t} \leq 9 \varepsilon$$

Piattabande esterne						
						
Profilati laminati a caldo			Sezioni saldate			
Classe	Piattabande esterne soggette a compressione	Piattabande esterne soggette a flessione e a compressione				
		Con estremità in compressione		Con estremità in trazione		
Distribuzione delle tensioni nelle parti (compressione positiva)						
1	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
2	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
Distribuzione delle tensioni nelle parti (compressione positiva)						
3	$c/t \leq 14\varepsilon$	$c/t \leq 21\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ Per k_σ vedere EN 1993-1-5				
$\varepsilon = \sqrt{235/f_{yk}}$	f_{yk}	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Esempio – sezione composta



$$M_{Ed} = -250 \text{ kNm}$$

Acciaio S235

La sezione è di classe 1

1 - Classe della sezione

$$c_w = 260 \text{ mm} \quad t_w = 14 \text{ mm}$$

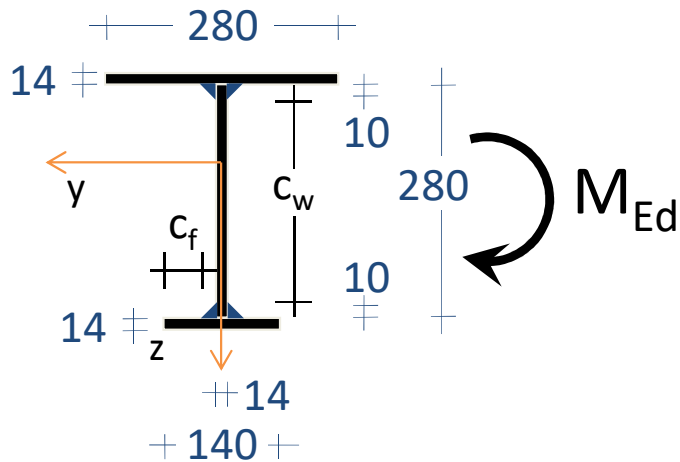
$$c_f = 53 \text{ mm} \quad t_f = 14 \text{ mm}$$

$$\text{Anima: } \frac{c_w}{t_w} = \frac{260}{14} = 18.5 < 33 \varepsilon = 33 \quad (\varepsilon = \sqrt{235 / f_y} = 1)$$

$$\text{Ala: } \frac{c_f}{t_f} = \frac{53}{14} = 3.8 < 9 \varepsilon = 9$$

Esempio – sezione composta

Dati:



$$M_{Ed} = -250 \text{ kNm}$$

Acciaio S235

La sezione è di classe 1

2 - Momento resistente

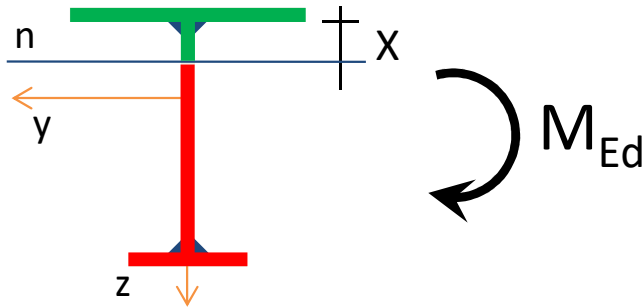
$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$W_{pl} = 2 S_{1/2 \text{ sez}} \quad S_{1/2 \text{ sez}} = \text{momento statico di mezza sezione (parte tesa o compressa)}$$

Bisogna trovare l'asse neutro ed il baricentro

Esempio – sezione composta

Dati:



$$M_{Ed} = -250 \text{ kNm}$$

Acciaio S235

La sezione è di classe 1

2.1 - Asse neutro

Divide la sezione in due parti di area uguale

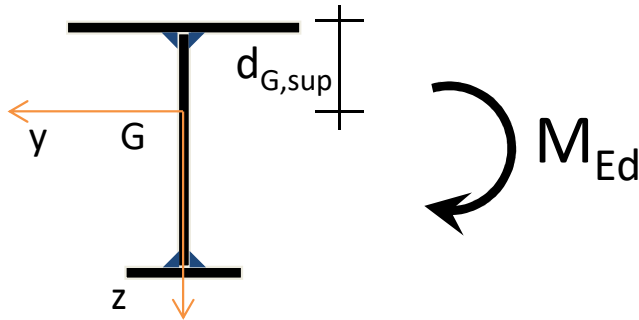
$$A_t = 14 \times 280 + 14 \times X = \frac{A}{2}$$

$$\Rightarrow X = 70 \text{ mm}$$

$$A = 9800 \text{ mm}^2$$

Esempio – sezione composta

Dati:



$$M_{Ed} = -250 \text{ kNm}$$

Acciaio S235

La sezione è di classe 1

2.2 - Baricentro

Calcolo il momento statico della sezione rispetto al bordo superiore:

$$S_{sup} = 1221080 \text{ mm}^3$$

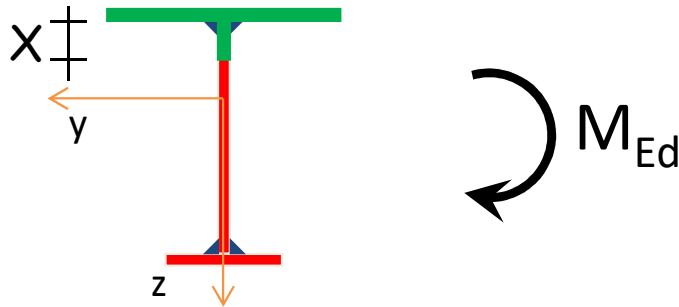


$$d_{G, sup} = 124.7 \text{ mm}$$

$$S_{sup} = A d_{G, sup}$$

Esempio – sezione composta

Dati:



$$M_{Ed} = -250 \text{ kNm}$$

Acciaio S235

La sezione è di classe 1

2.3 - Modulo di resistenza

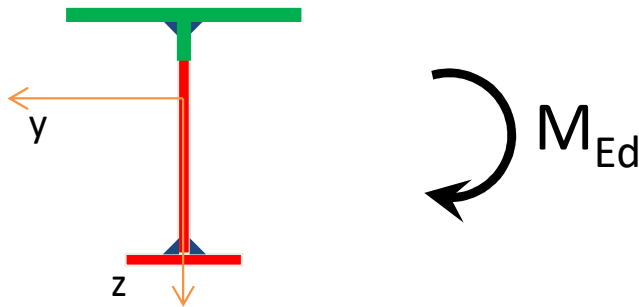
Calcolo il momento statico della parte tesa o della parte compressa rispetto all'asse baricentrico:

$$S_y = 535.1 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl} = 2 S_y = 1070.2 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

Esempio – sezione composta

Dati:



$$M_{Ed} = -250 \text{ kNm}$$

Acciaio S235

La sezione è di classe 1

2.4 - Momento resistente

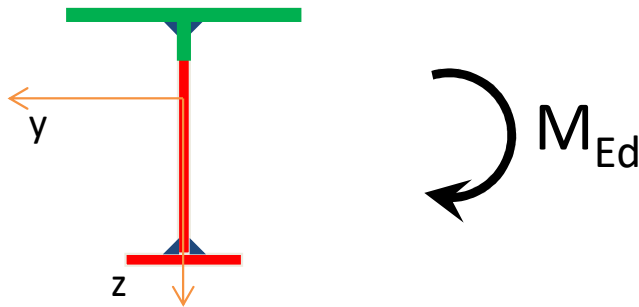
$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1070.2 \times 10^3 \times 235}{1.05} \times 10^{-6} = 239.5 \text{ kNm}$$

$$S_y = 535.1 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl} = 2 S_y = 1070.2 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

Esempio – sezione composta

Dati:



$$M_{Ed} = -250 \text{ kNm}$$

Acciaio S235

La sezione è di classe 1

3 - Verifica

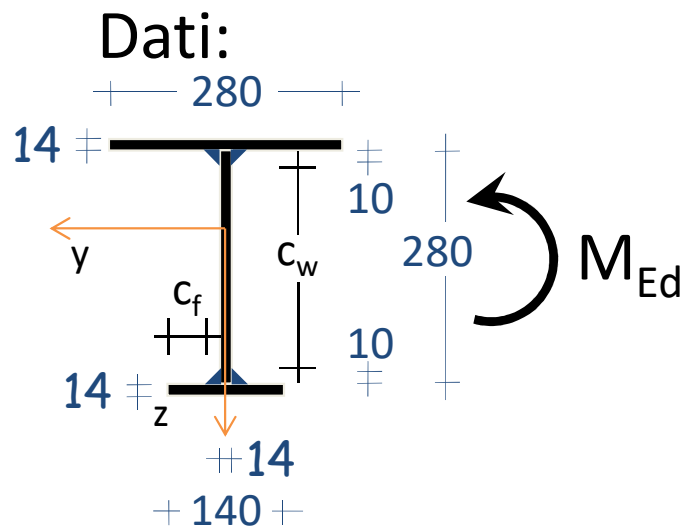
$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1070.2 \times 235}{1.05 \times 10^3} = 239.5 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = 250 \text{ kNm} > M_{Rd} = 239.5 \text{ kNm}$$

La sezione non è verificata

Esempio – sezione composta

se cambiamo il segno del momento flettente



$$M_{Ed} = +250 \text{ kNm}$$

Acciaio S235

1 - Classe della sezione

$$c_w = 260 \text{ mm} \quad t_w = 14 \text{ mm}$$

$$c_f = 123 \text{ mm} \quad t_f = 14 \text{ mm} \quad \text{ala superiore}$$

Anima:

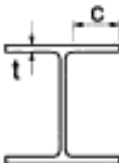
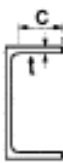
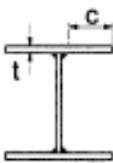
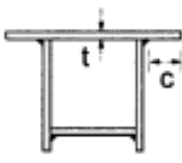
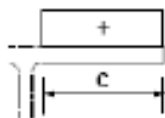
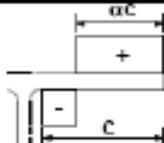
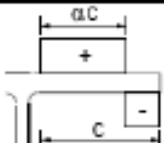
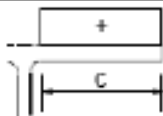
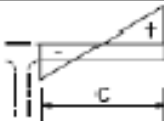
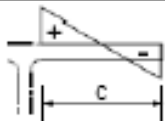
$$\frac{c_w}{t_w} = \frac{260}{14} = 18.5$$

Ala:

$$\frac{c_f}{t_f} = \frac{123}{14} = 8.8$$

Parti esterne comprese

$$\frac{c}{t} \leq 9 \varepsilon$$

Piattabande esterne						
						
Profilati laminati a caldo						
						
			Sezioni saldate			
Classe	Piattabande esterne soggette a compressione	Piattabande esterne soggette a flessione e a compressione				
		Con estremità in compressione		Con estremità in trazione		
Distribuzione delle tensioni nelle parti (compressione positiva)						
1	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
2	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
Distribuzione delle tensioni nelle parti (compressione positiva)						
3	$c/t \leq 14\varepsilon$	$c/t \leq 21\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ Per k_σ vedere EN 1993-1-5				
$\varepsilon = \sqrt{235/f_{yk}}$	f_{yk}	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Poiché l'acciaio è S235 il profilo è ancora di classe 1

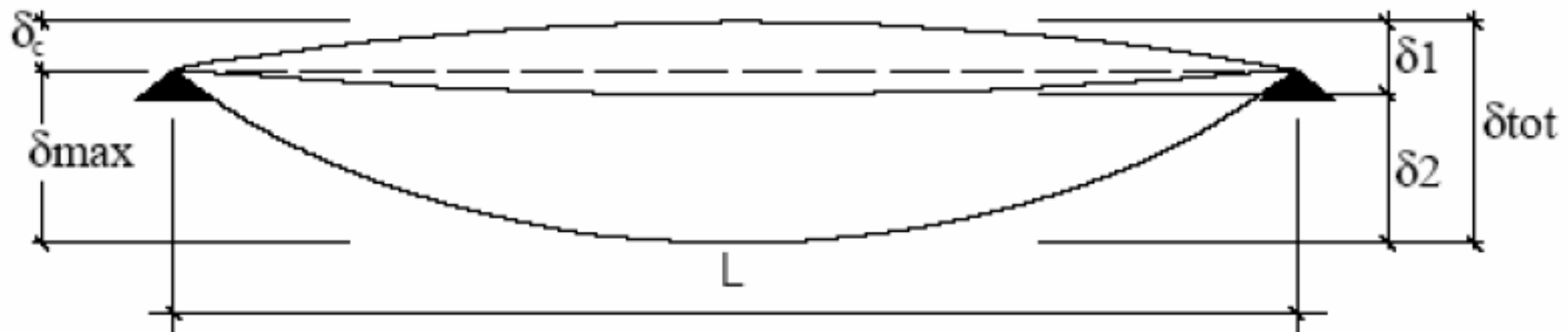
– Il momento resistente non cambia

Se l'acciaio fosse migliore cambierebbe classe

Flessione

Verifica agli stati limite di esercizio

- Il progetto degli elementi inflessi è in genere molto condizionato dalla verifica agli spostamenti



δ_c	monta iniziale
δ_1	spostamento elastico dovuto ai carichi permanenti
δ_2	spostamento elastico dovuto ai carichi variabili
δ_{max}	spostamento finale, depurato dalla monta

Flessione

Verifica agli stati limite di esercizio

- Il progetto degli elementi inflessi è in genere molto condizionato dalla verifica agli spostamenti

Elementi strutturali	Limiti superiori per gli spostamenti verticali	
	$\frac{\delta_{\max}}{L}$	$\frac{\delta_2}{L}$
Coperture in generale	$\frac{1}{200}$	$\frac{1}{250}$
Coperture praticabili	$\frac{1}{250}$	$\frac{1}{300}$
Solai in generale	$\frac{1}{250}$	$\frac{1}{300}$
Solai o coperture che reggono intonaco o altro materiale di finitura fragile o tramezzi non flessibili	$\frac{1}{250}$	$\frac{1}{350}$
Solai che supportano colonne	$\frac{1}{400}$	$\frac{1}{500}$
Nei casi in cui lo spostamento può compromettere l'aspetto dell'edificio	$\frac{1}{250}$	

In caso di specifiche esigenze tecniche e/o funzionali tali limiti devono essere opportunamente ridotti.

Progetto

a) stato limite ultimo

1 - Si assume la classe della sezione (1, 2 o 3)

2 - Invertendo l'espressione di verifica SLU si ottiene la formula di progetto della sezione, con la quale si calcola W_{el} o W_{pl}

Classe 1 e 2:

$$M_{Ed} \leq M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \quad \Rightarrow \quad W_{pl} \geq \frac{M_{Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}$$

Classe 3:

$$M_{Ed} \leq M_{el,Rd} = \frac{W_{el} f_y}{\gamma_{M0}} \quad \Rightarrow \quad W_{el} \geq \frac{M_{Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}$$

Progetto

b) stato limite di esercizio

3 - Invertendo l'espressione di verifica si ottiene la formula di progetto della sezione, con la quale si calcola I

Ad esempio, per trave appoggiata con carico uniformemente distribuito

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{q L^4}{EI}$$

per carichi variabili q_k

$$\delta_2 \leq \frac{L}{k_2} \quad \frac{5}{384} \frac{q_k L^4}{EI} \leq \frac{L}{k_2} \quad \rightarrow \quad I \geq \frac{5 k_2}{384} \frac{q_k L^3}{E}$$

per carichi totali $g_k + q_k$

$$\delta_{\max} \leq \frac{L}{k_{\max}} \quad \frac{5}{384} \frac{(g_k + q_k) L^4}{EI} \leq \frac{L}{k_{\max}} \quad \rightarrow \quad I \geq \frac{5 k_{\max}}{384} \frac{(g_k + q_k) L^3}{E}$$

Progetto

SLU + SLE

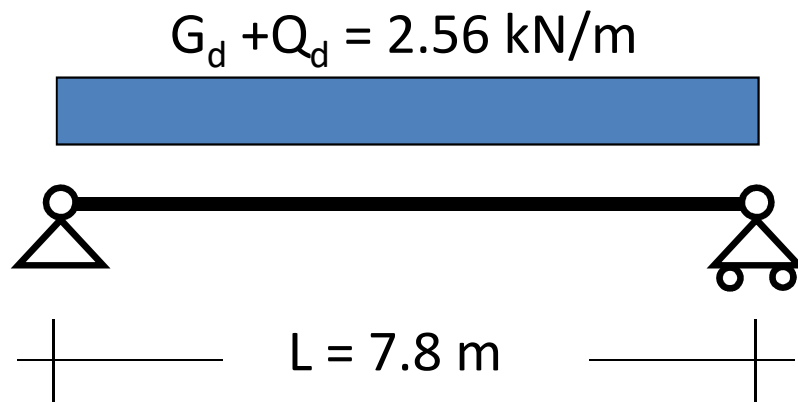
Si sono determinati i valori minimi per l e W_{el} o W_{pl}

4 - Si sceglie il profilato

5 - Si verifica la classe del profilato
(per essere certi di aver preso il W giusto)

Esempio

Dati:



Acciaio S235

$G_k = 0.24 \text{ kN/m}$

$Q_k = 1.50 \text{ kN/m}$

$M_{Ed} = 19.5 \text{ kNm}$

1 - Classe della sezione

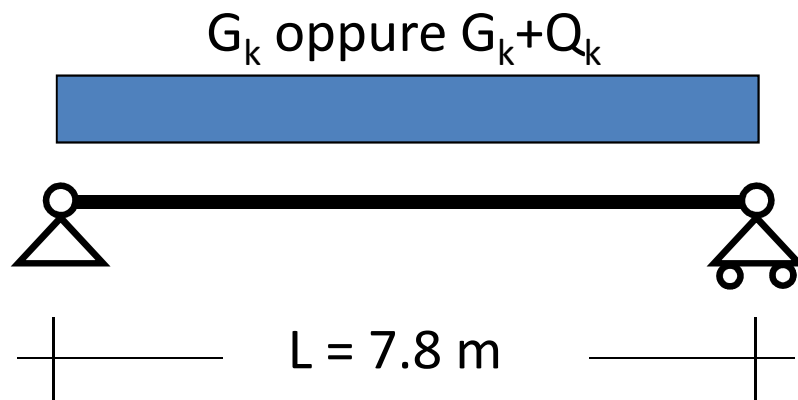
Suppongo che la sezione appartenga alla classe 1 o 2.

2 - Determinazione del modulo plastico

$$W_{pl} \geq \frac{M_{Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} = \frac{19.5 \times 10^6}{235 / 1.05} = 87.1 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

Esempio

Dati:



Acciaio S235

$$G_k = 0.24 \text{ kN/m}$$

$$Q_k = 1.50 \text{ kN/m}$$

Copertura non praticabile

3 - Determinazione del momento d'inerzia ($k_2 = 250$)

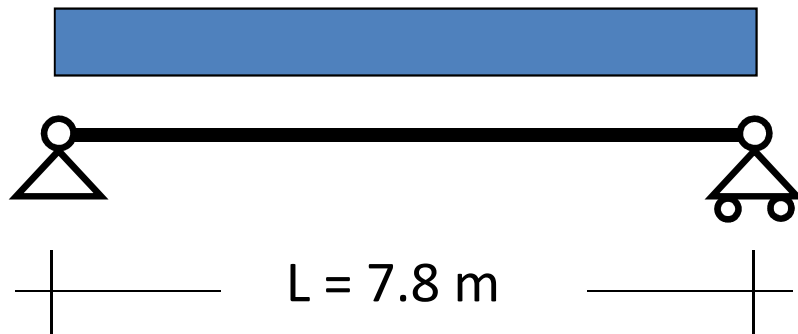
$$I \geq \frac{5 k_2}{384} \frac{q_k L^3}{E} = \frac{5 \times 250}{384} \frac{1.50 \times 7800^3}{210000} = 1103 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

Determinazione del momento d'inerzia ($k_{\max} = 200$)

$$I \geq \frac{5 k_{\max}}{384} \frac{(g_k + q_k) L^3}{E} = \frac{5 \times 200}{384} \frac{1.74 \times 7800^3}{210000} = 1024 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

Esempio

Dati:



Acciaio S235

$$G_k = 0.24 \text{ kN/m}$$

$$Q_k = 1.50 \text{ kN/m}$$

$$W_{pl} \geq 87.1 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$I \geq 1103 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

3 - Scelta della sezione

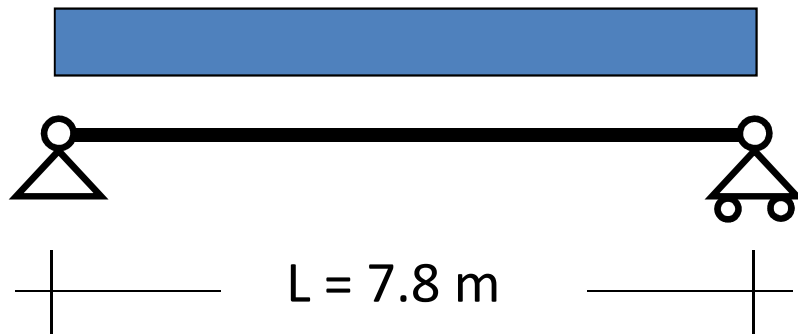
$$\text{HE 120 A: } W_{pl} = 119.5 \times 10^3 \text{ mm}^3 \quad I = 606.2 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

$$\text{HE 160 A: } W_{pl} = 245.1 \times 10^3 \text{ mm}^3 \quad I = 1673 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

Si usa un **HE 160 A**

Esempio

Dati:



Acciaio S235

$$G_k = 0.24 \text{ kN/m}$$

$$Q_k = 1.50 \text{ kN/m}$$

3 - Scelta della sezione

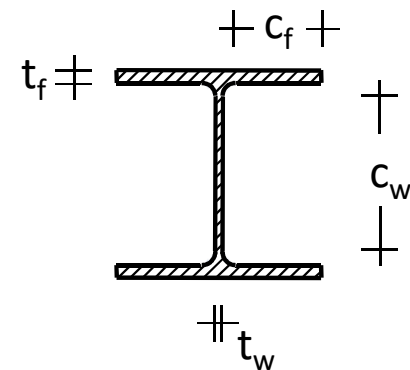
Si usa un **HE 160 A**

$$c_w = 104 \text{ mm}$$

$$t_w = 6 \text{ mm}$$

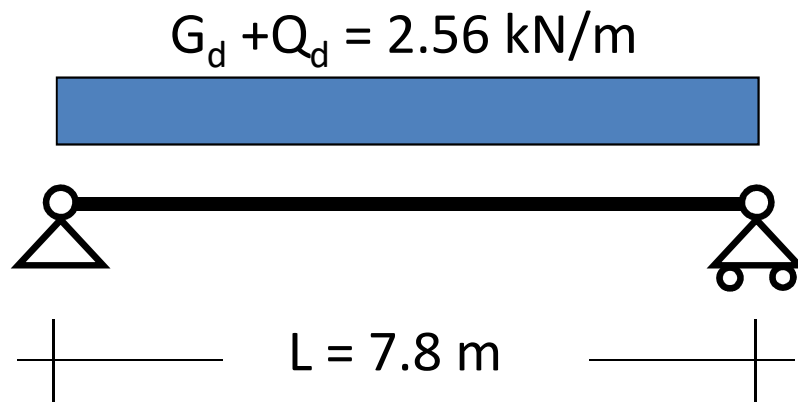
$$c_f = 60.5 \text{ mm}$$

$$t_f = 9 \text{ mm}$$



Esempio

Dati:



Acciaio

S235

Sezione

serie HEA

M_{Ed}

19.5 kNm

W_{pl}

$\geq 87.1 \text{ cm}^3$

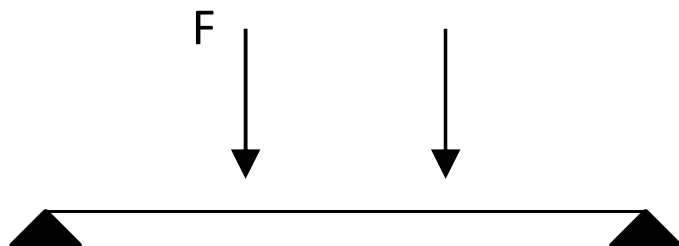
4 - Determinazione della classe della sezione

Anima: $\frac{c_w}{t_w} = \frac{104}{6} = 17.3 \leq 72 \varepsilon = 72$ ($\varepsilon = \sqrt{235 / f_y} = 1$)

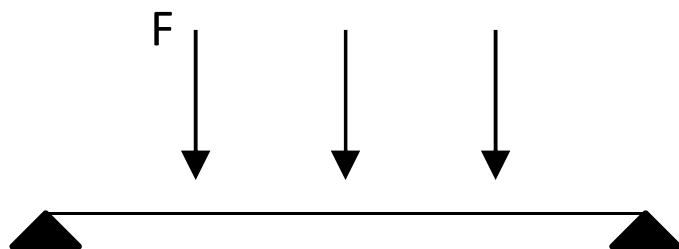
Ala: $\frac{c_f}{t_f} = \frac{60.5}{9} = 6.72 \leq 9 \varepsilon = 9$

La sezione è realmente di classe 1

Frecce in mezzeria per altri schemi



$$\delta = \frac{23}{648} \frac{FL^3}{EI}$$



$$\delta = \frac{19}{384} \frac{FL^3}{EI}$$