

Corso

# Progetto di strutture in zona sismica

Catania

ottobre - dicembre 2016

16 - Edifici con pareti: flessione composta

21 dicembre 2016

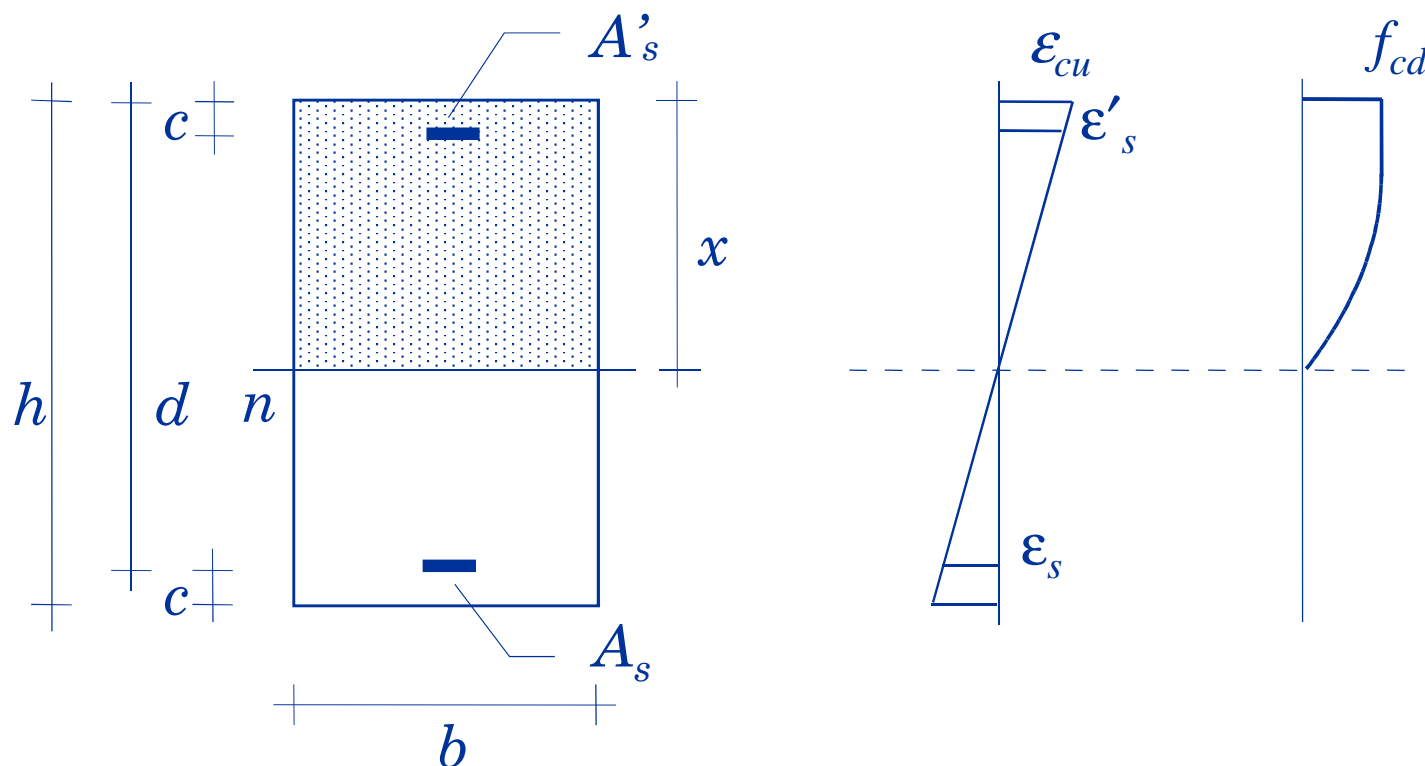
Aurelio Gheresi

# Flessione composta

## brevi richiami

1. Determinare il momento resistente  $M_{N,Rd}$  in funzione dello sforzo normale sollecitante  $N_{Ed}$ 
  - Assegnare un diagramma limite di deformazioni ed il corrispondente diagramma di tensioni
  - Determinare la risultante delle tensioni e quindi  $N$
  - Variare il diagramma di deformazioni in modo da avere  $N = N_{Ed}$
  - Determinare il momento resistente corrispondente a questo diagramma di deformazioni

# Verifica a flessione composta procedimento



Dati:

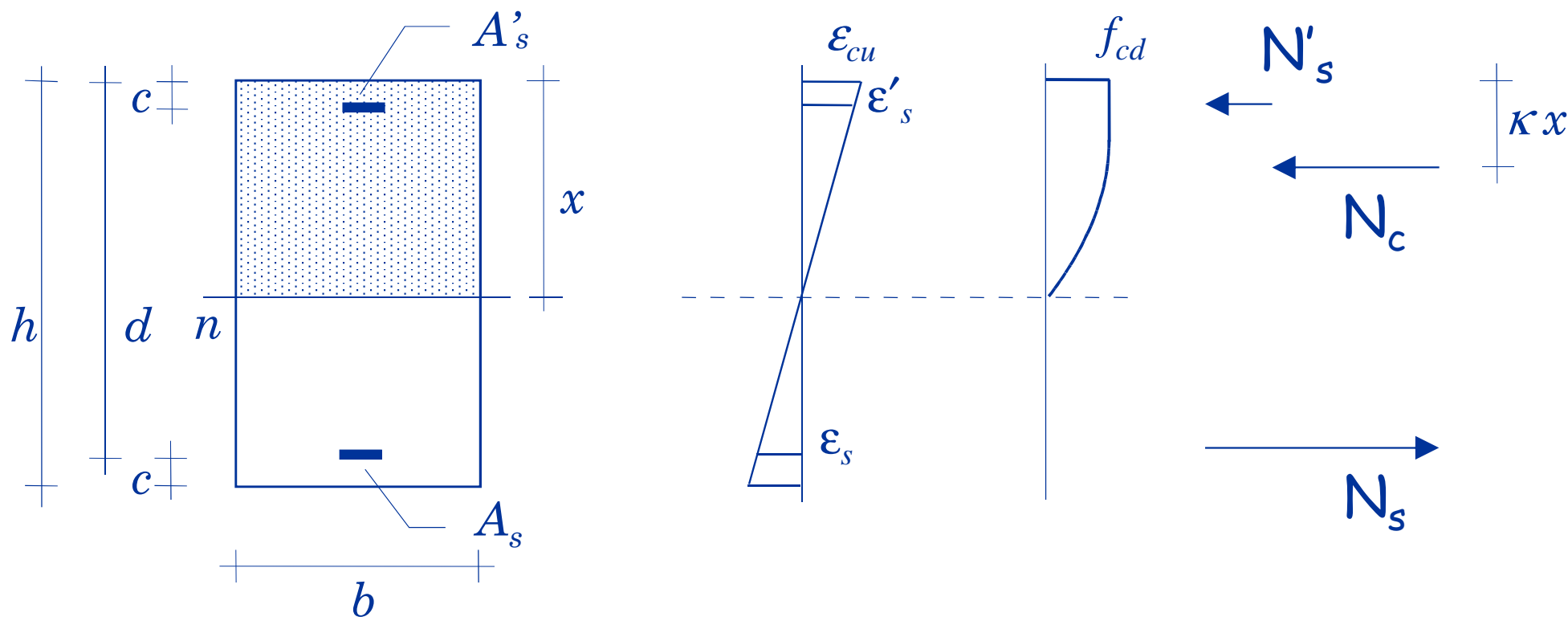
Geometria della sezione  
Armature

Coppia  $M_{Ed}-N_{Ed}$

Incognite:

Posizione dell'asse neutro  
Momento resistente  $M_{Rd}$   
corrispondente a  $N_{Ed}$

# Verifica a flessione composta procedimento



Per trovare l'asse neutro:

$$N_c + N'_s + N_s = N_{Ed}$$

(equilibrio alla traslazione)

Poi calcolare  $M_{Rd}$ , con equilibrio alla rotazione

# Flessione composta

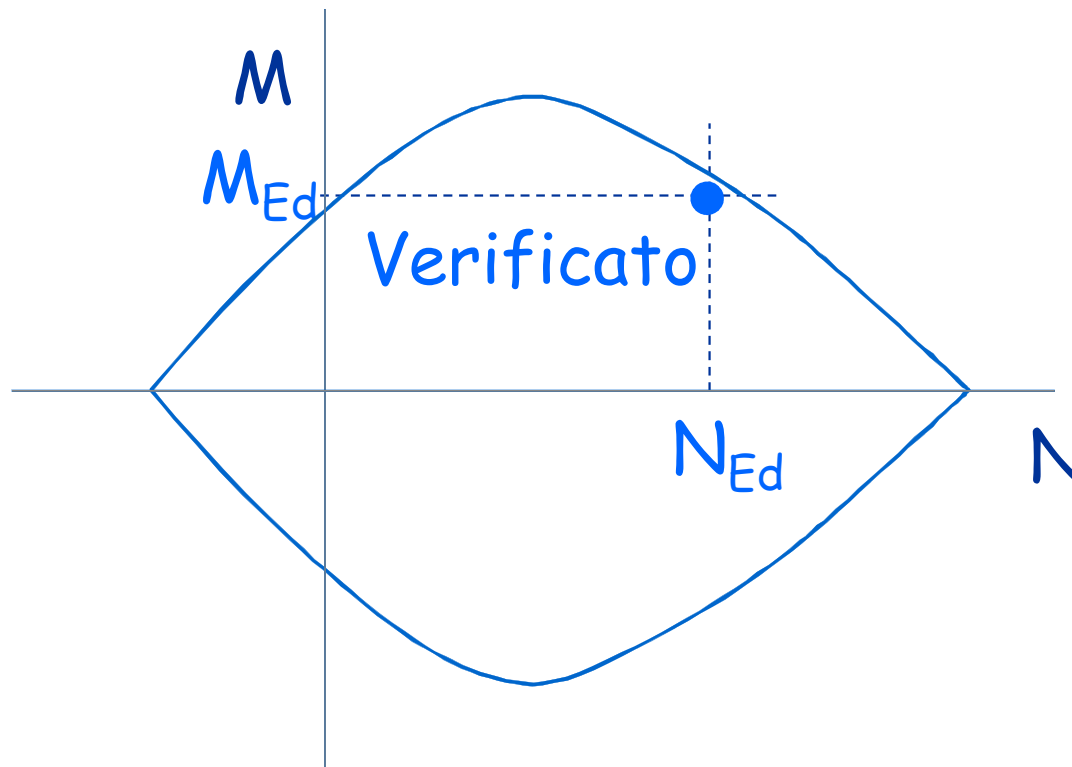
## brevi richiami

2. Determinare il dominio di resistenza (o curva di interazione)  $M_{Rd} - N_{Rd}$

- Assegnare un diagramma limite di deformazioni ed il corrispondente diagramma di tensioni
- Determinare la risultante delle tensioni e quindi  $N_{Rd}$
- Determinare il momento resistente corrispondente a questo diagramma di deformazioni,  $M_{Rd}$
- Variare il diagramma di deformazioni in modo da ottenere tutte le coppie  $M_{Rd} - N_{Rd}$

# Dominio di resistenza per la verifica

- La sezione è verificata se il punto che rappresenta la coppia  $M_{Ed} - N_{Ed}$  è interno al dominio



# Flessione composta

## brevi richiami

### 3. Utilizzare formule approssimate

(vedi A. Ghersi, Il cemento armato, 2010, pag. 306 e seguenti)

$$M_{Rd} = (M_{c,max} + M_{s,max}) \left[ 1 - \left| \frac{N_{Rd} + v_M N_{c,max}}{v_M N_{c,max} + N_{s,max}} \right|^m \right]$$

$$N_{c,max} = A_c f_{cd}$$

$$M_{c,max} = 0.12 A_c h f_{cd}$$

$$N_{s,max} = A_{s,tot} f_{yd}$$

$$M_{s,max} = 0.5 A_{s,tot} (h - 2c) f_{yd}$$

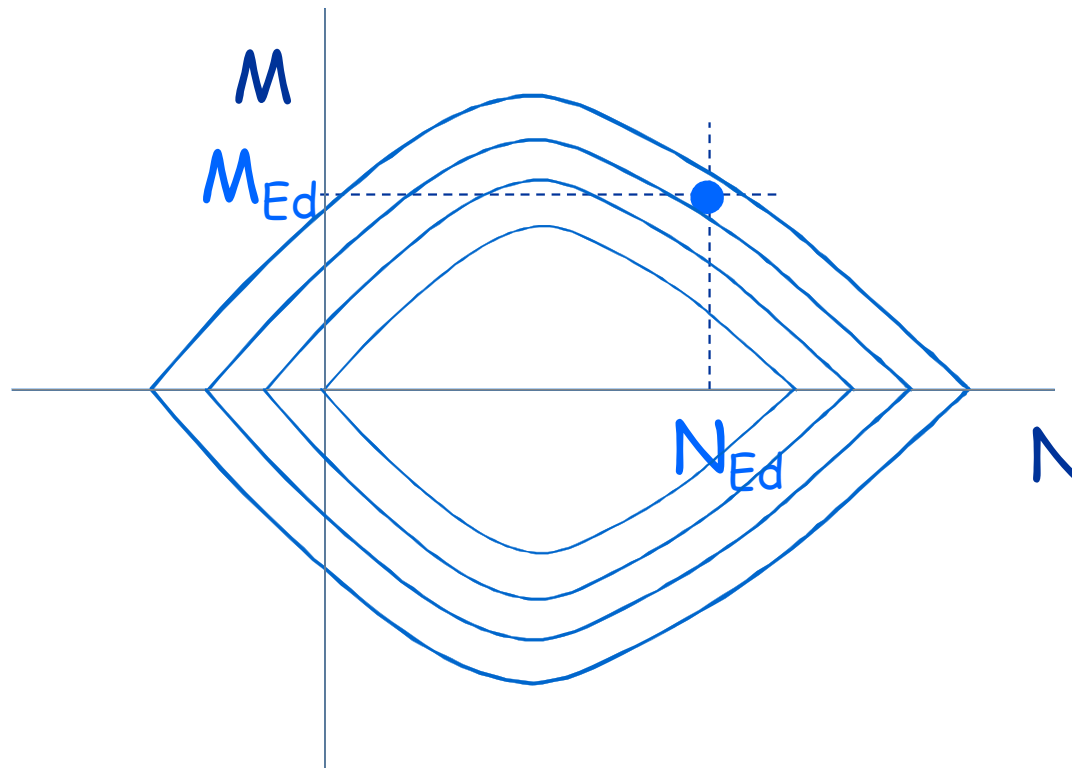
$$v_M = 0.48$$

$$m = 1 + \frac{1}{1 + 2 N_{s,max} / N_{c,max}}$$

per sezione rettangolare con armatura simmetrica  
( $A_s = A'_s$ ;  $A_{s,tot} = 2 A_s$ )

# Dominio di resistenza per il progetto delle armature

- Tracciando il dominio con più curve, che rappresentano diverse quantità di armatura, è possibile determinare l'armatura necessaria per una assegnata coppia  $M_{Ed} - N_{Ed}$





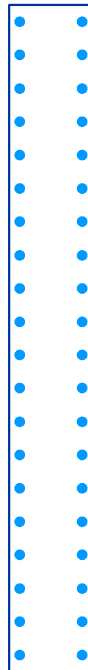
# Flessione composta per le pareti

Cosa cambia?

- L'armatura è costituita da tante barre: occorre decidere come disporle



concentrata  
agli estremi  
(su più strati)



distribuita  
uniformemente



un po' distribuita e  
un po' concentrata

# Distribuzione dell'armatura e proprietà della parete

- Resistenza  
Capacità di portare momento flettente
- Duttilità  
Capacità di deformarsi plasticamente  
Duttilità = rapporto tra curvatura ultima e curvatura allo snervamento dell'armatura tesa
- Influenza della distribuzione dell'armatura:  
Studio di Cardenas e Magura, 1973

# Studio di Cardenas e Magura

Riproduce (analiticamente) il comportamento della parete sotto l'effetto di un momento flettente crescente fino al collasso per valutare

- Momento resistente
- Duttilità disponibile

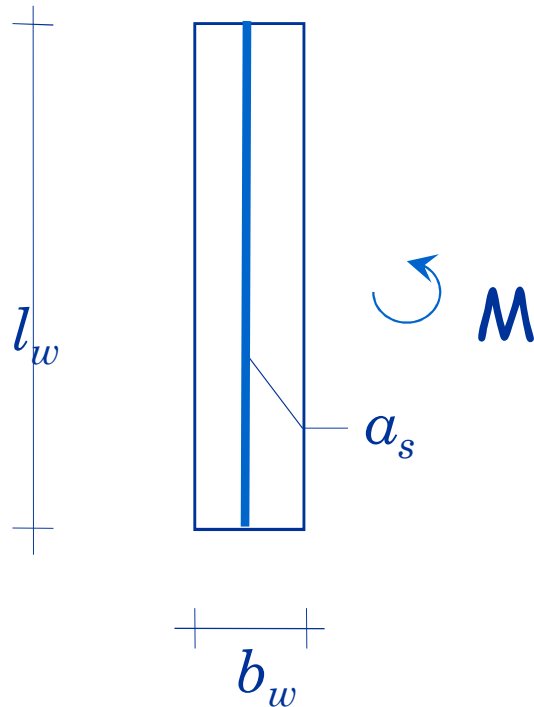
Considera sezioni con diverse quantità d'armatura

Considera due distribuzioni di armature

- Distribuita uniformemente
- Concentrata prevalentemente alle estremità

# Studio di Cardenas e Magura procedimento

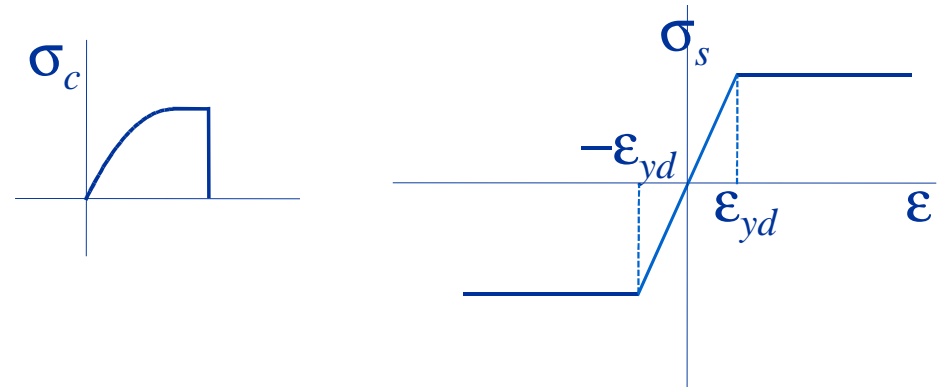
- Si considera nullo lo sforzo normale
- Si fa crescere il momento flettente fino al collasso



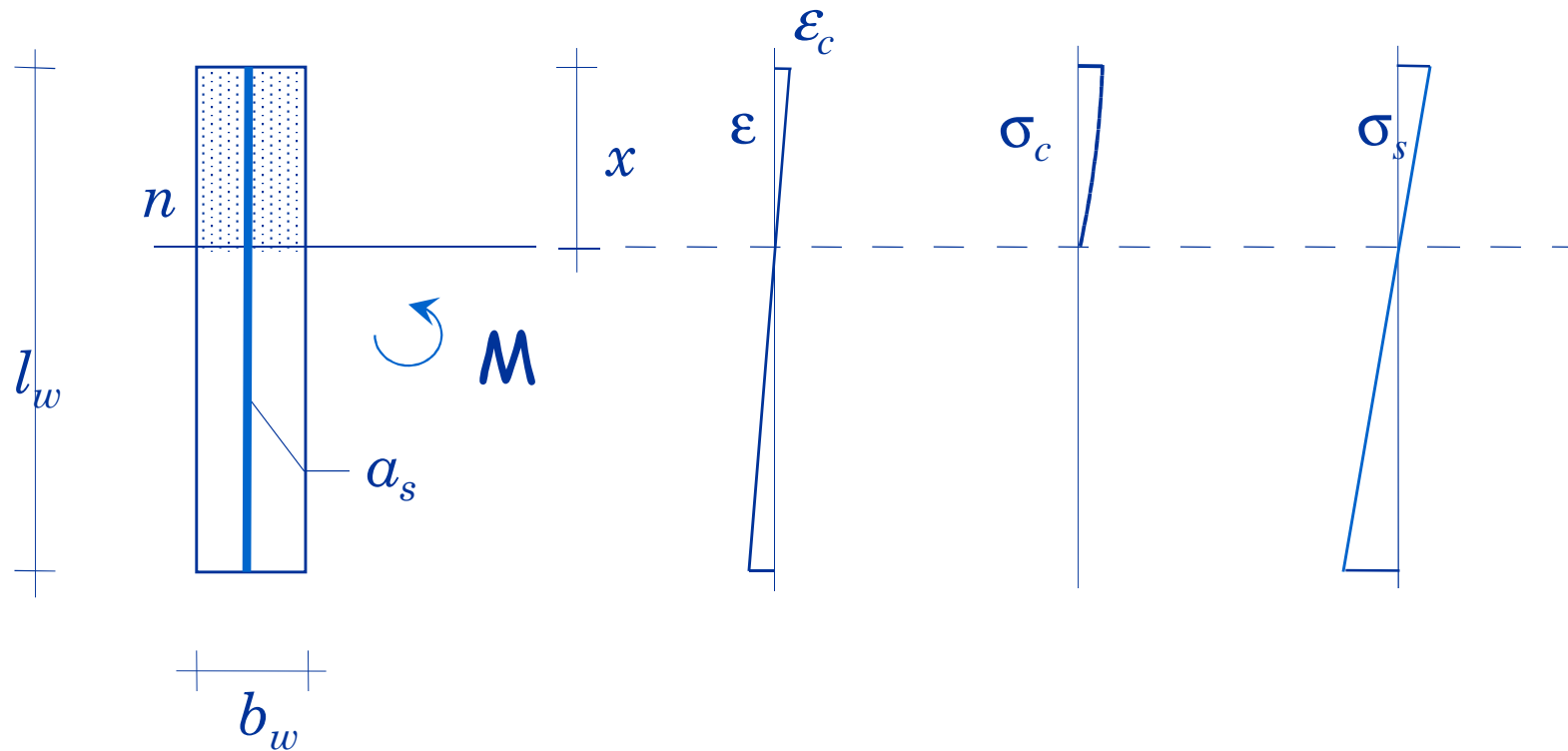
Sezione:  $b_w=20$  cm,  $l_w=500$  cm

Materiali: Calcestruzzo C25/30  
Acciaio B450

Legami  $\sigma$ - $\epsilon$

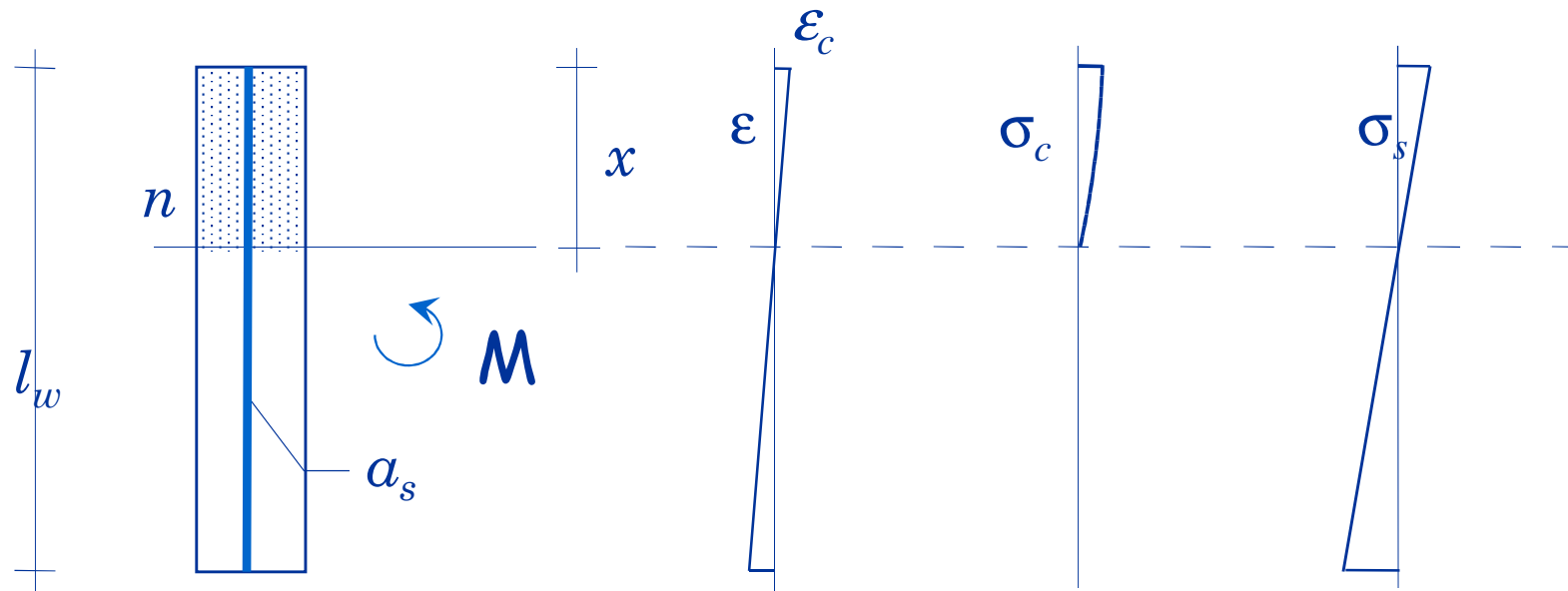


# Studio di Cardenas e Magura procedimento

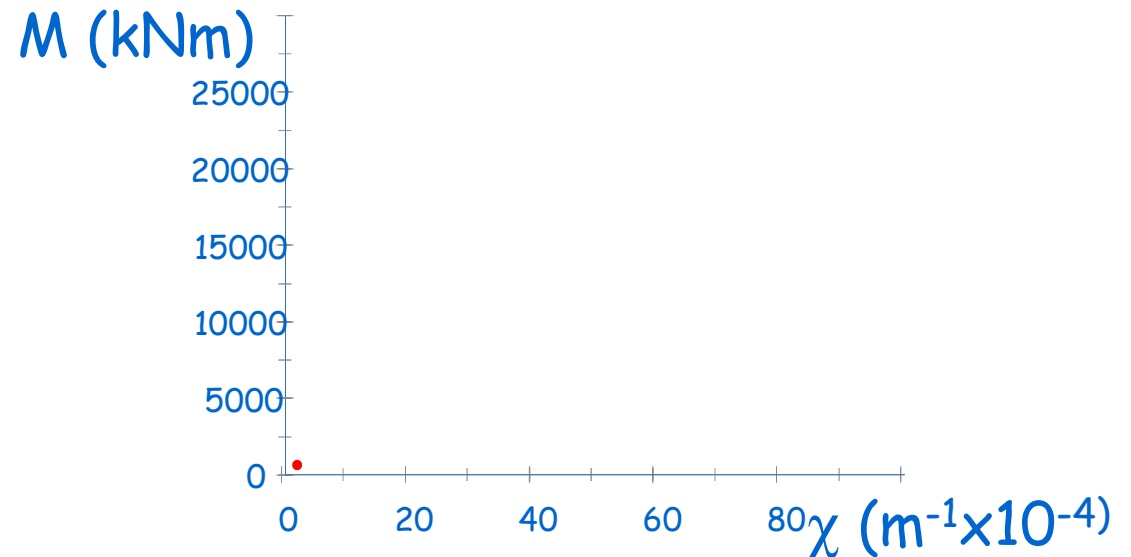


- si assegna  $\epsilon_c$ ;
- si determina  $x$  con equilibrio alla traslazione;
- si calcola il momento  $M$  corrispondente.

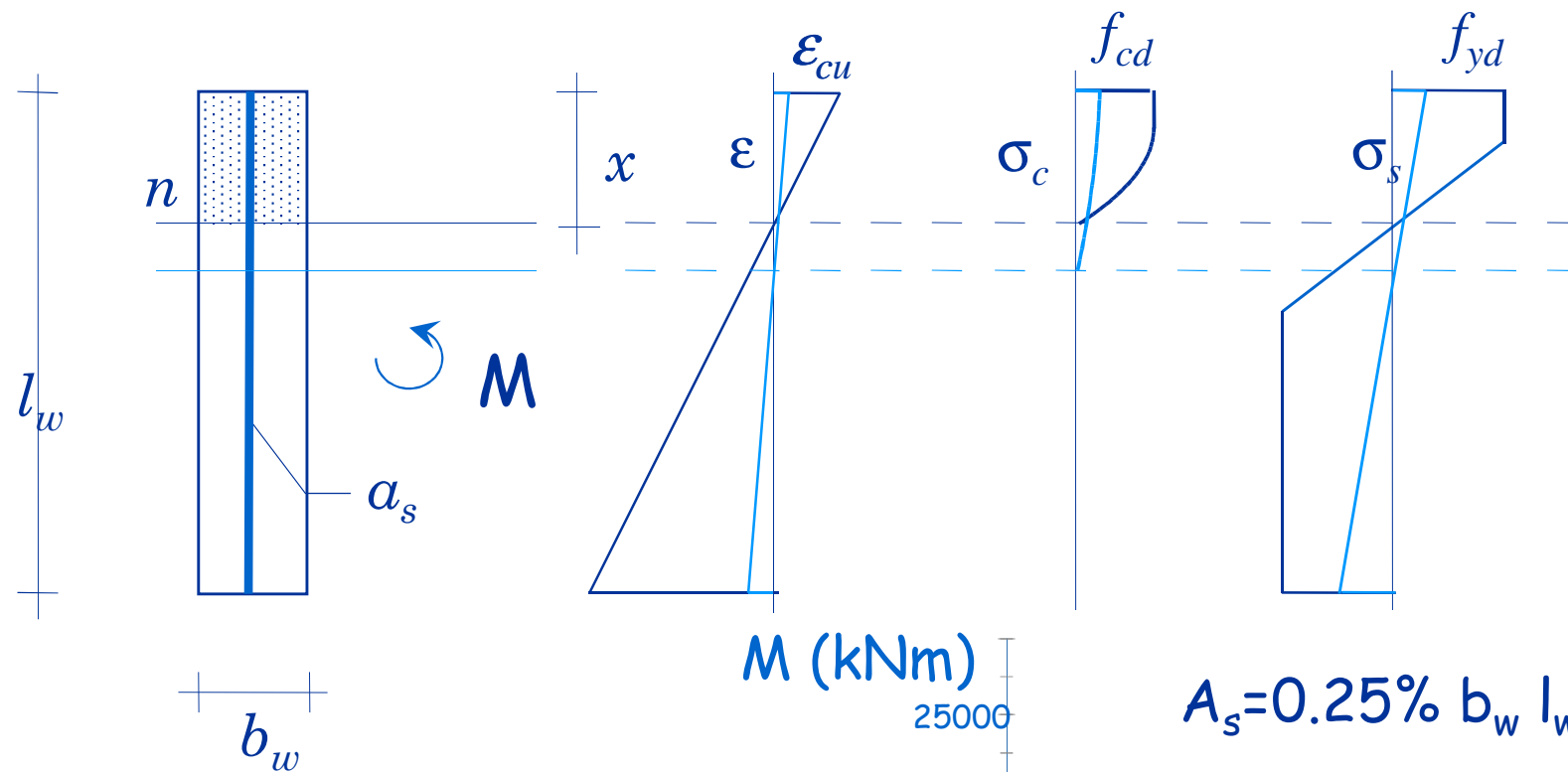
# Studio di Cardenas e Magura procedimento



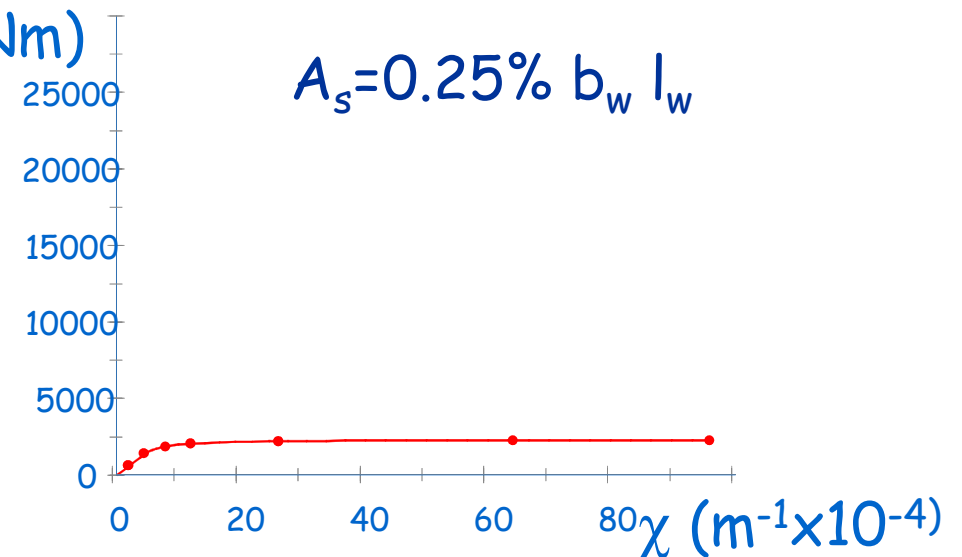
- si calcola  $\chi = \epsilon_c / x$



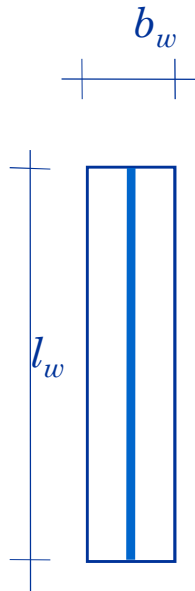
# Studio di Cardenas e Magura procedimento



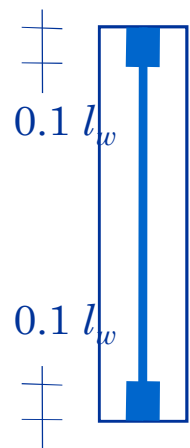
- si calcola  $\chi = \epsilon_c / x$
- si fa crescere  $\epsilon_c$  fino al valore  $\epsilon_{cu} = 3.5 \times 10^{-3}$



# Studio di Cardenas e Magura risultati

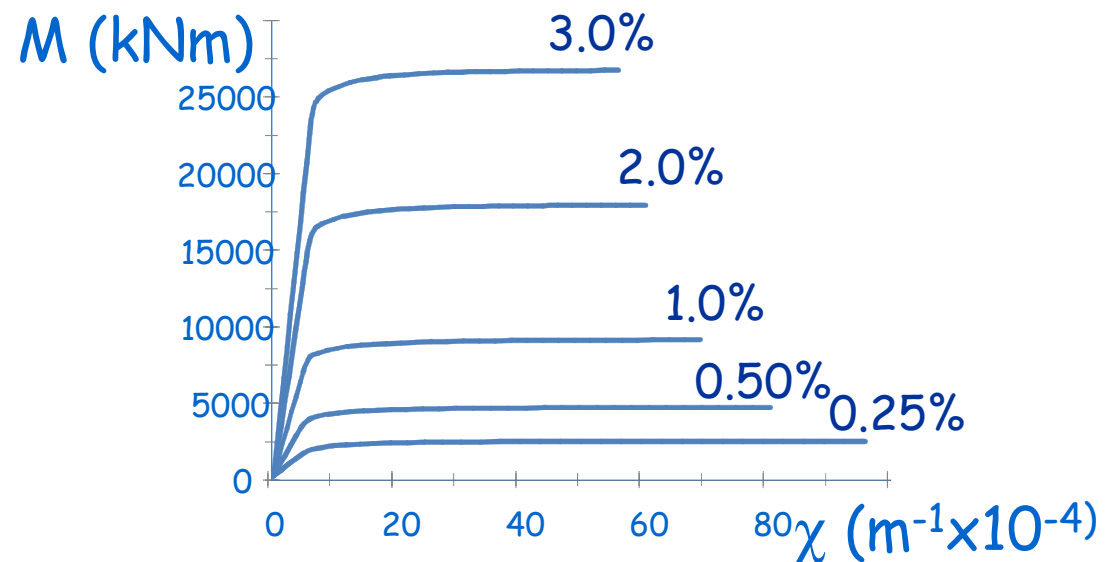
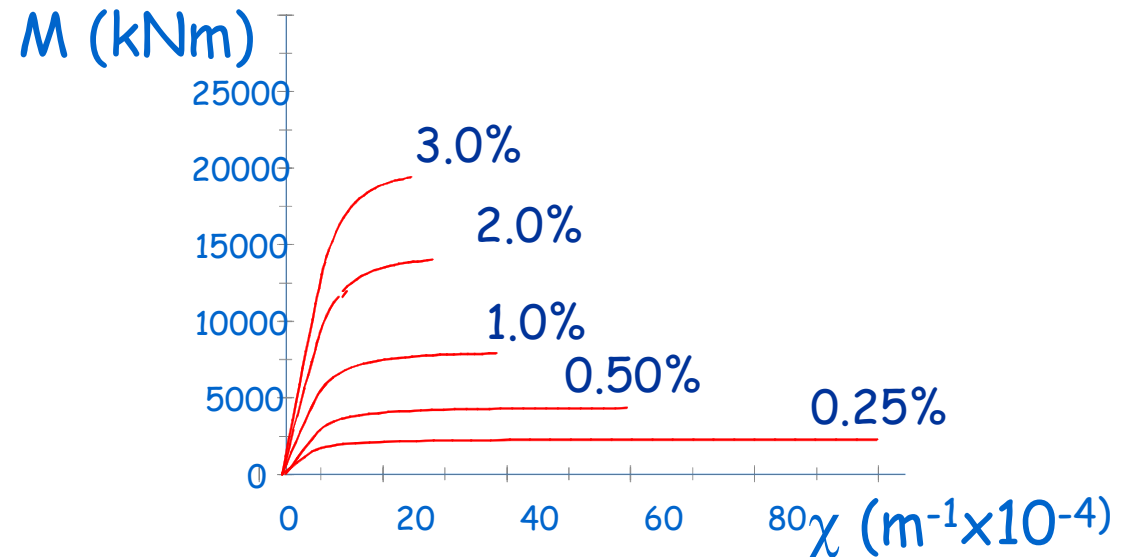


$A_s$  uniformemente  
distribuita lungo  
la sezione



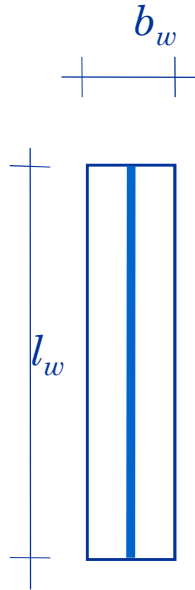
$A_s = 0.25\% b_w l_w$   
uniformemente  
distribuita

Il resto di  $A_s$   
concentrato agli  
estremi

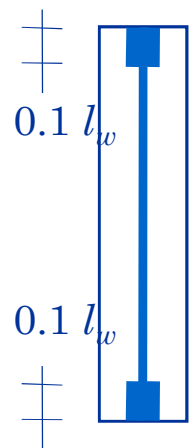




# Studio di Cardenas e Magura risultati

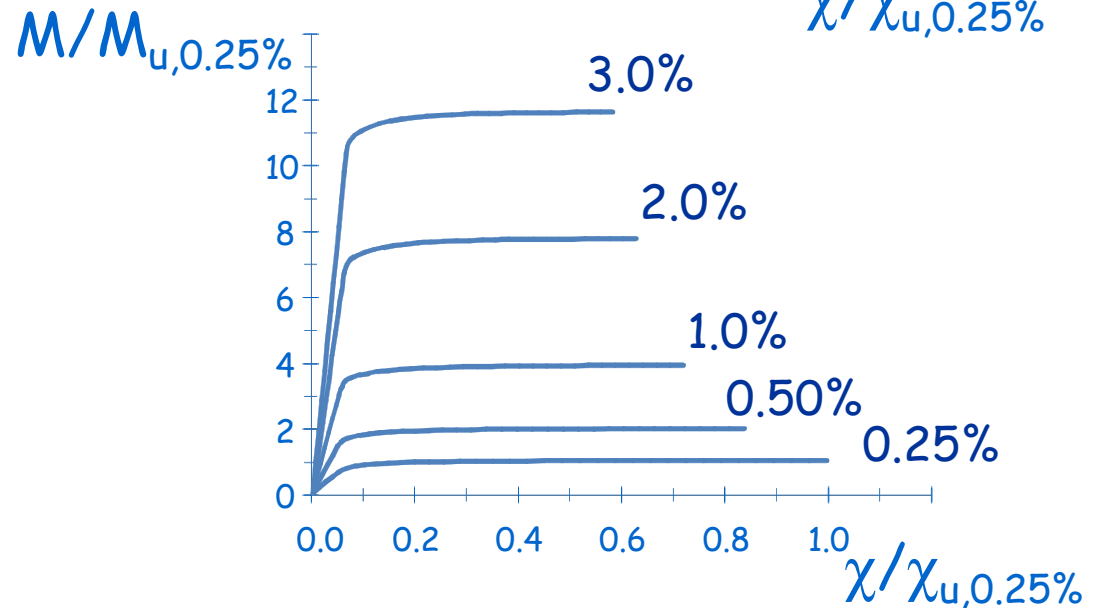
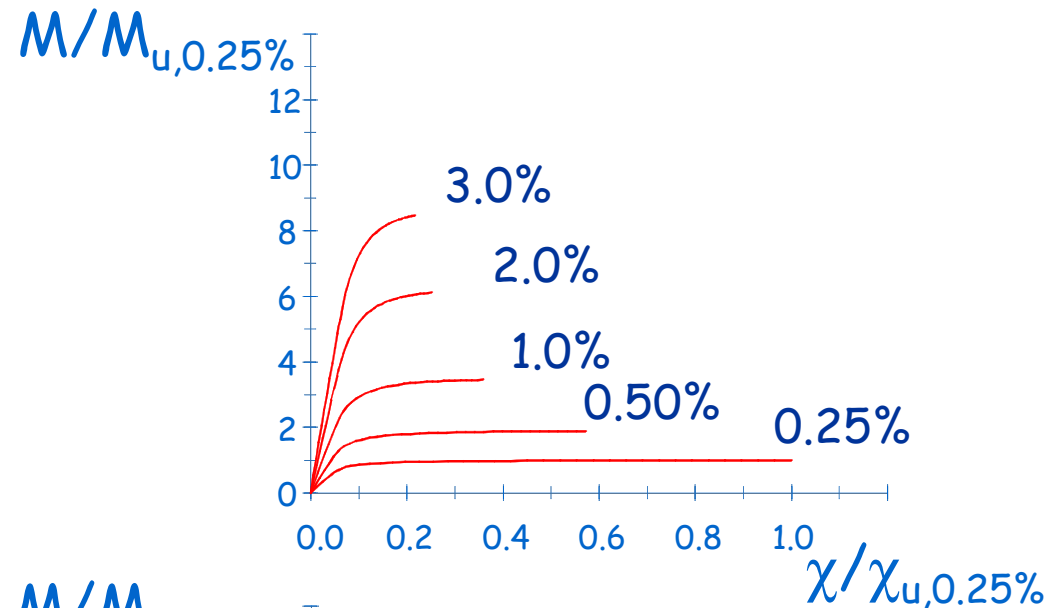


$A_s$  uniformemente  
distribuita lungo  
la sezione



$A_s = 0.25\% b_w l_w$   
uniformemente  
distribuita

Il resto di  $A_s$   
concentrato agli  
estremi



# Studio di Cardenas e Magura

## risultati

- Armatura con distribuzione uniforme
  - Aumentando la quantità di armatura si aumenta il momento resistente ma si riduce pesantemente la duttilità
- Armatura prevalentemente alle estremità
  - A parità di armatura complessiva si ottiene un momento resistente superiore a quella precedente
  - All'aumentare della quantità di armatura la riduzione di duttilità disponibile è inferiore



Conviene concentrare l'armatura alle estremità

# Indicazioni di normativa

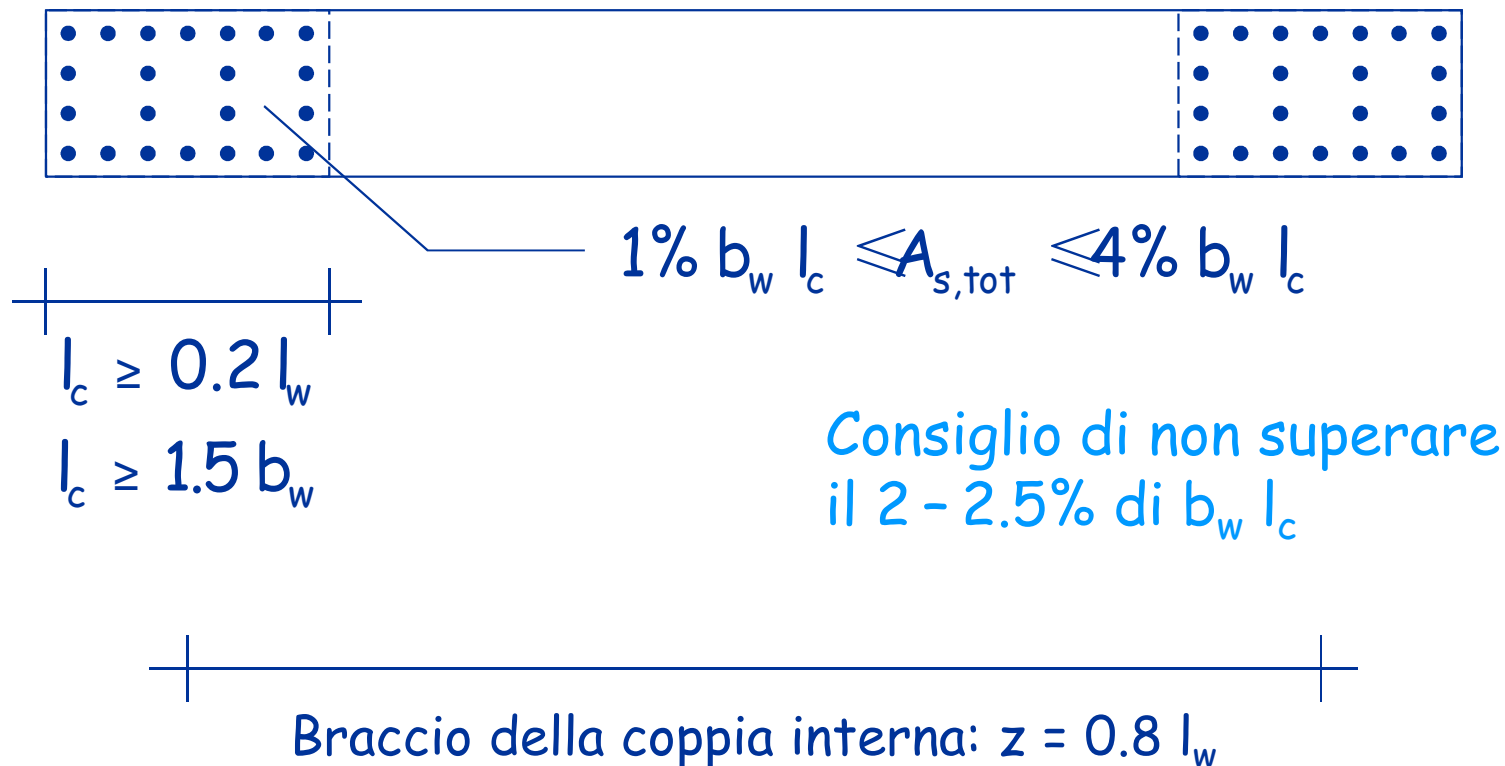
## zone di estremità

- Individuare zone alle estremità della sezione della parete, nelle quali è disposta una buona quantità di armatura longitudinale, ben confinata
  - La zona confinata deve estendersi per un tratto  $l_c$  fino a raggiungere il "punto dove il calcestruzzo non confinato può frantumarsi ed essere espulso per le grandi deformazioni di compressione"  
Eurocodice 8, punto 5.4.3.4.2(6)
  - La zona confinata deve estendersi per un tratto  $l_c$  "pari al 20% della lunghezza  $l_w$  in pianta della parete stessa e comunque non inferiore a 1.5 volte lo spessore della parete"  
NTC08, punto 7.4.6.2.4

# Indicazioni di normativa

## zone di estremità

- Nella zona confinata si deve disporre una armatura longitudinale adeguata



# Indicazioni di normativa

## zone di estremità

- Nella zona critica si individuano alle estremità della parete due zone confinate aventi per lati lo spessore della parete e una lunghezza "confinata"  $l_c$  pari al 20% della lunghezza in pianta  $l$  della parete stessa e comunque non inferiore a 1,5 volte lo spessore della parete. In tale zona il rapporto geometrico  $\rho$  dell'armatura totale verticale, riferito all'area confinata, deve essere compreso entro i seguenti limiti:

$$1\% \leq \rho \leq 4\%$$

# Indicazioni di normativa

## zone di estremità

- Durante il sisma la compressione che le zone confinate della parete devono sostenere ciclicamente è elevata



# Instabilità delle barre



27-02-2010 , Cile



Foto P. Fajfar



# Le staffe si possono aprire o rompere



27-02-2010 , Cile



Foto P. Fajfar



# Disgregamento del nucleo di calcestruzzo



27-02-2010 , Cile



Foto P. Fajfar

# Indicazioni di normativa

## zone di estremità

- Durante il sisma la compressione che le zone confinate della parete devono sostenere ciclicamente è elevata



Per prevenire l'instabilità delle barre delle zone confinate e la disgregazione del nucleo di calcestruzzo occorre disporre una buona staffatura



Nelle zone confinate l'armatura trasversale deve essere costituita da barre di diametro **non inferiore a 6 mm**, disposti in modo da fermare una barra verticale ogni due con un passo non superiore a **8 volte il diametro della barra o a 10 cm**. Le barre non fissate devono trovarsi a **meno di 15 cm** da una barra fissata.

# Indicazioni di normativa

## zone di estremità

- Le prescrizioni valgono per la "zona critica" della parete

### Zona critica

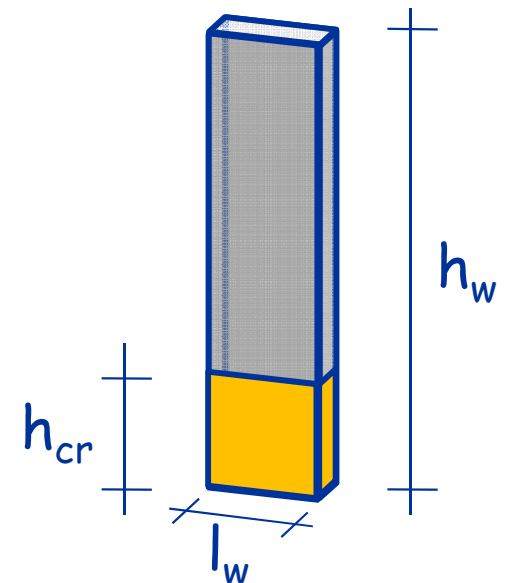
È quella parte della parete che sarà interessata dalle deformazioni plastiche, ovvero ...

... la porzione di parete di altezza  $h_{cr}$  al di sopra dell'incastro

$$h_{cr} = \max (l_w, h_w / 6)$$

$h_{cr} \leq h_{1 \text{ piano}}$  per edifici fino a 6 piani

$h_{cr} \leq h_{2 \text{ piani}}$  edifici con più di 6 piani



# Indicazioni di normativa zone di estremità

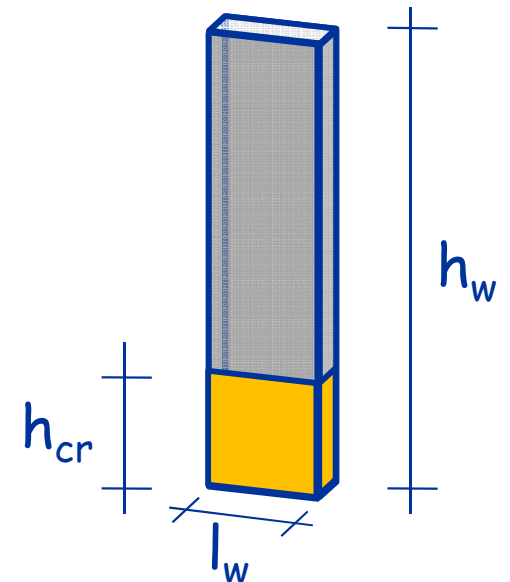
- Le prescrizioni valgono per la "zona critica" della parete

## Zona critica

È quella parte della parete che sarà interessata dalle deformazioni plastiche

## Al di fuori della zona critica

È comunque opportuno tenere presente le indicazioni precedenti, sia pure in maniera più blanda

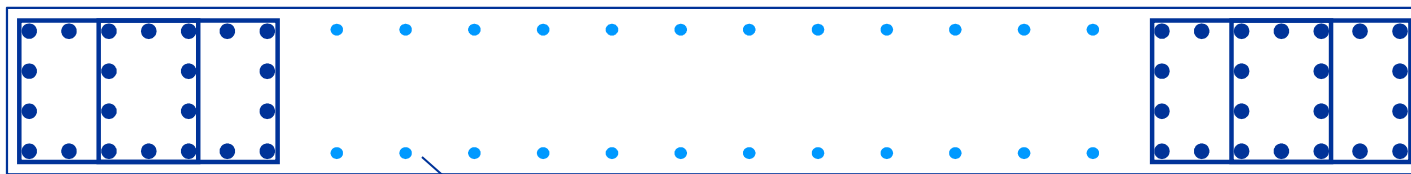


# Indicazioni di normativa

## zona centrale

- Nella rimanente parte della parete, in pianta ed in altezza, vanno seguite le regole delle condizioni non sismiche, con un'armatura minima orizzontale e verticale pari allo 0.2%, per controllare la fessurazione da taglio

Questa armatura è sufficiente anche per la fessurazione da flessione nel piano di maggior rigidezza



$$A_s \geq 0.2\% A_c$$

Per flessione nel piano debole è tesa solo una fila di barre ed il minimo sarebbe  $0.15\% A_{c,tesa}$ , ovvero  $0.3\% A_{c,tot}$   
Questa flessione è però in genere trascurabile

# Indicazioni di normativa altre prescrizioni

## Nella zona centrale

- Nella rimanente parte della parete, in pianta ed in altezza, vanno seguite le regole delle condizioni non sismiche, con un'armatura minima orizzontale e verticale pari allo 0.2%, per controllare la fessurazione da taglio

## In tutta la parete

- Le armature, sia orizzontali che verticali, devono avere diametro non superiore ad  $1/10$  dello spessore della parete, devono essere disposte su entrambe le facce della parete, ad un passo non superiore a 30 cm, devono essere collegate con legature, in ragione di almeno nove ogni metro quadrato

Dimensionamento delle pareti  
(controllo in base a flessione)



# Dimensionamento delle pareti

## controllo in base a flessione

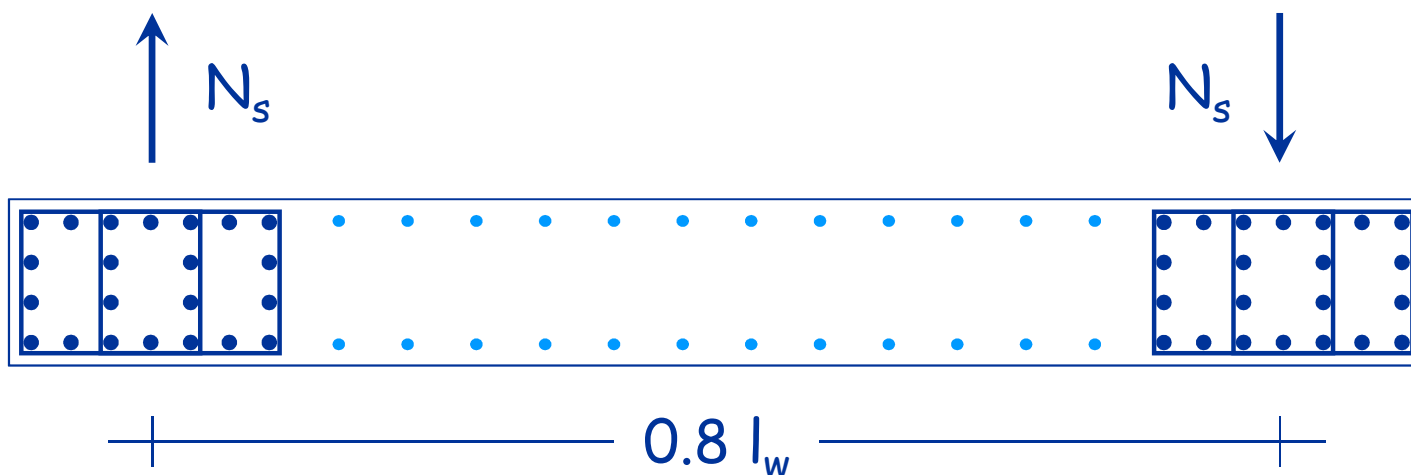
- Il primo dimensionamento delle pareti deve essere fatto a taglio (anche perché il taglio è facilmente prevedibile)
- Fatto questo, occorre stimare il momento flettente (meno immediato) e controllare che le sezioni scelte vadano bene anche a flessione
  - La stima del momento flettente richiede l'uso di modelli semplificati, che si vedranno dopo
  - Una prima verifica del dimensionamento può essere fatta trascurando lo sforzo normale e controllando che la quantità di armatura sia accettabile



# Dimensionamento delle pareti

## controllo in base a flessione

- Il momento flettente può essere portato con una coppia di forze (trazione-compressione) dalle barre poste nelle zone di estremità
- La verifica del calcestruzzo non è rilevante
- Occorre controllare che la quantità di armatura sia compatibile con la sezione

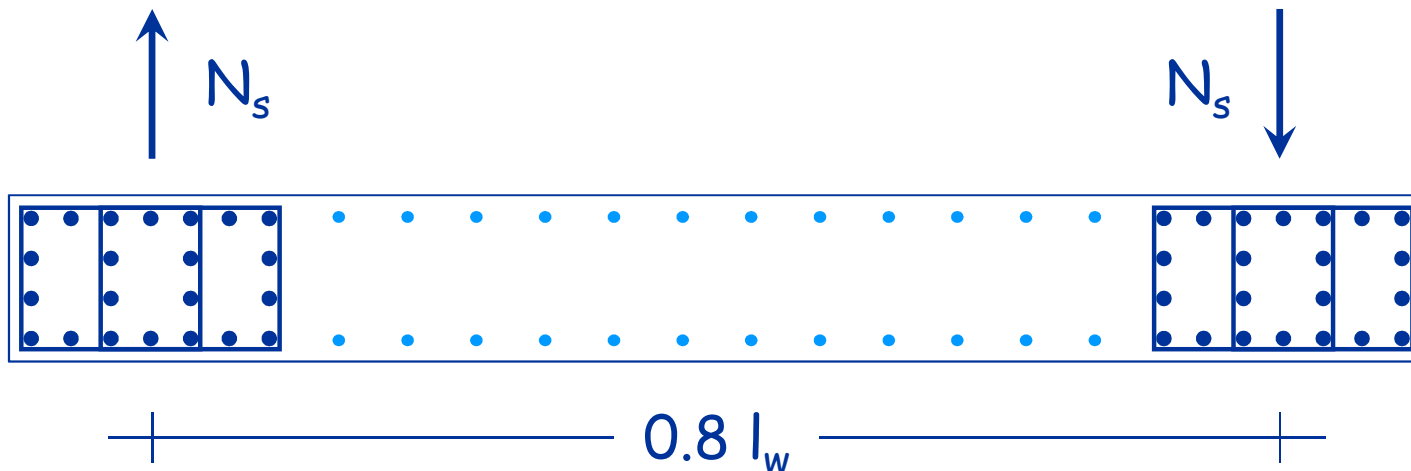


# Dimensionamento delle pareti

## controllo in base a flessione

- Si ottiene  $A_s = \frac{M_{Ed}}{0.8 l_w f_{yd}}$
- Si deve controllare che  $\rho = \frac{A_s}{0.2 l_w b_w} \leq \rho_{max} = 0.040$

(meglio limitare  $\rho$  a  $0.020 \div 0.025$ )



# Dimensionamento delle pareti

## controllo in base a flessione

Esempio:

Sia

- $M_{Ed} = 15000 \text{ kNm}$
- Acciaio B450C ( $f_{yd} = 391.3 \text{ MPa}$ )
- $b_w = 30 \text{ cm}$
- $l_w = 550 \text{ cm}$

Si ottiene

$$A_s = \frac{15000 \times 10}{0.8 \times 5.5 \times 391.3} = 87.1 \text{ cm}^2$$

$$\rho = \frac{87.1}{30 \times 110} = 0.0264 \quad \text{accettabile}$$

Se  $N_{Ed}$  è rilevante  
l'armatura necessaria  
sarà minore

# Dimensionamento delle pareti

## controllo in base a flessione

- La formula di verifica può essere trasformata in formula di progetto della sezione a flessione

da  $A_s = \frac{M_{Ed}}{0.8 l_w f_{yd}}$   $\rho = \frac{A_s}{0.2 l_w b_w} \leq \rho_{max}$

si ottiene  $l_w \geq r_s \sqrt{\frac{M_{Ed}}{b_w}}$  con  $r_s = \sqrt{\frac{1}{0.16 f_{yd} \rho_{max}}}$

ad esempio  $r_s = 0.024$  per B450C e  $\rho_{max} \cong 0.025$