

**aicap**

**Ass. Italiana Calcestruzzo  
Armato e Precompresso**

**Ordine Ingegneri  
della Provincia  
di Barletta Andria Trani**

**ANDRIA, 6 Giugno 2008**

**LA PROGETTAZIONE DELLE STRUTTURE DI CALCESTRUZZO  
CON LE NUOVE NORME TECNICHE**

**SLU: Taglio - Torsione - Instabilità**

**SLE: Tensioni – Fessurazione - Deformazione**

**Prof. Ing. Marco Menegotto  
Università La Sapienza – Roma**

**Strutture in Calcestruzzo**  
**S.L.U. per Taglio e Torsione**

# ELEMENTI NON ARMATI A TAGLIO

## 4.1.2.1.3.1 – NTC

### *Elementi senza armature trasversali resistenti a taglio*

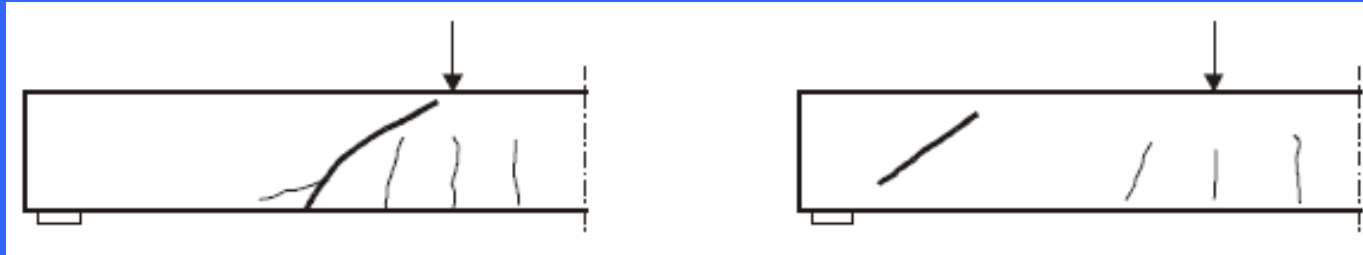
È consentito l'impiego di solai, piastre e membrature a comportamento analogo sprovviste di armature trasversali resistenti a taglio.

Verifica di resistenza (SLU)

$$V_{Rd} \geq V_{Ed}$$

$V_{Ed}$  valore di calcolo dello sforzo di taglio agente

## due modi di rottura



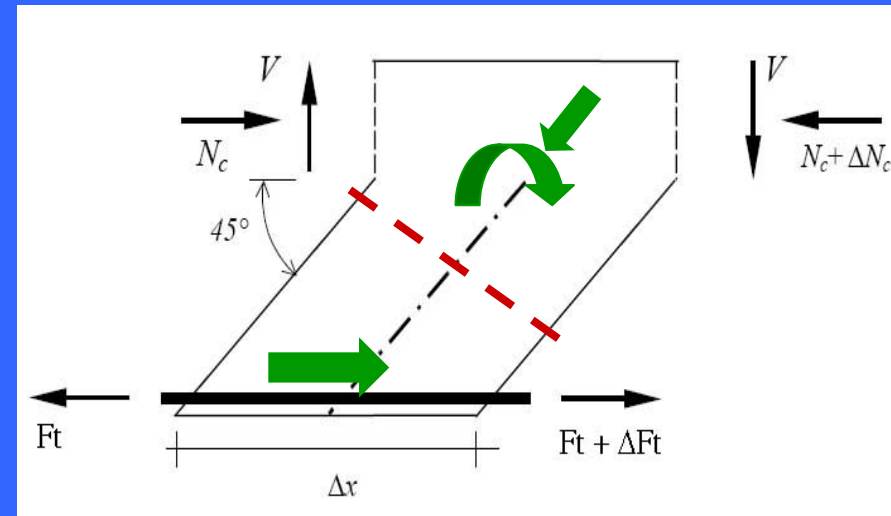
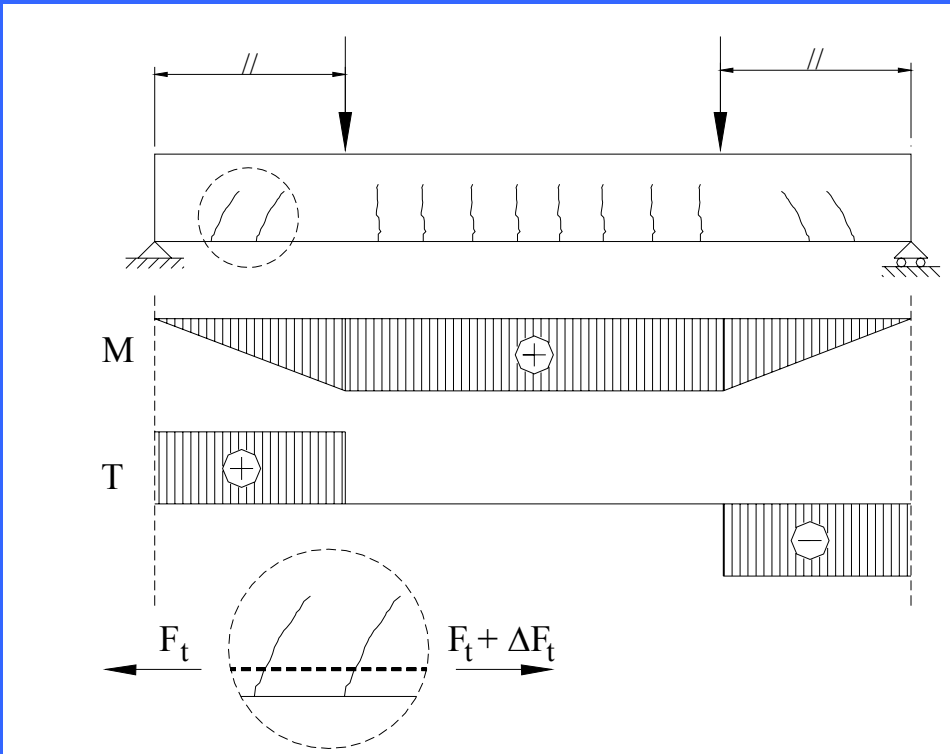
taglio-flessione

taglio-trazione

a) rottura a taglio-flessione – nella zona fessurata per flessione

b) rottura a taglio-trazione – in prossimità dell'appoggio nella zona dove non sono presenti fessure per flessione (**tipica di cap**)

## a) Verifica a taglio-flessione



$\Delta F_t$  produce all'incastro una coppia



## Resistenza di progetto a taglio flessione (4.1.14 – NTC)

$$V_{Rd} = \left[ \frac{0.18}{\gamma_c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + 0.15 \sigma_{cp} \right] b_w d \geq (v_{min} + 0.15 \sigma_{cp}) b_w d$$

$$V_{Rd} \geq \left( 0.035 k^{3/2} \sqrt{f_{ck}} + 0.15 \sigma_{cp} \right) b_w d$$

dove:

**$0.18 / \gamma_c = \tau$  resistente di base (N/mm<sup>2</sup>)**

per azioni persistenti e transitorie  $\gamma_c = 1.5$ ,  $0.18 / \gamma_c = 0.12$

per azioni eccezionali  $\gamma_c = 1.0$ ,  $0.18 / \gamma_c = 0.18$

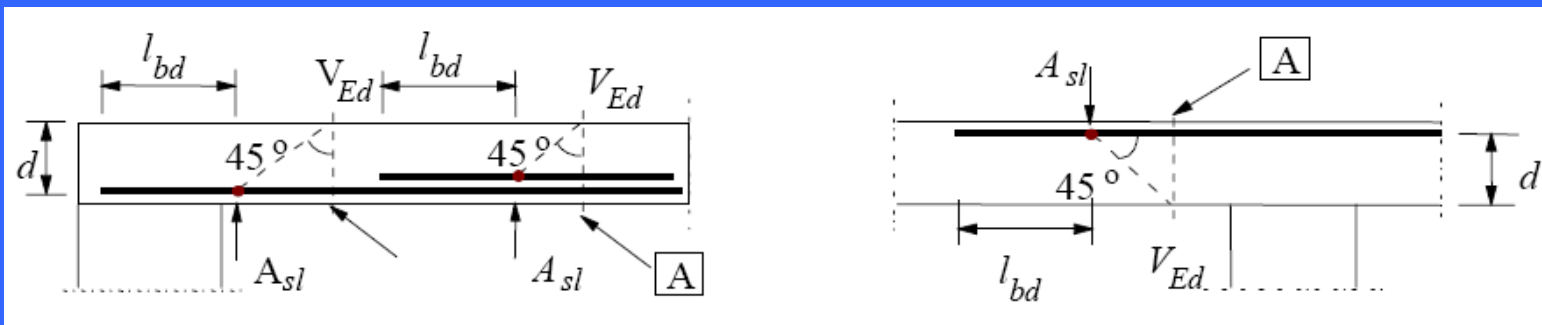
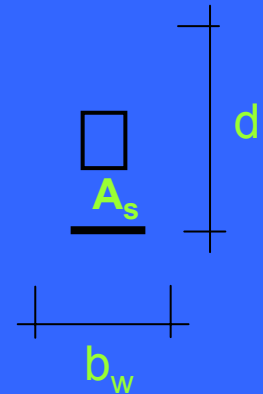
**$\sigma_{cp} \leq 0.2 f_{cd}$**  tensione media di compressione nella sezione

in presenza di **significativi sforzi di trazione**  $V_{Rd}$  è da ritenersi nulla

$b_w$  larghezza minima della sezione in zona tesa (mm)

$k = 1 + \sqrt{(200/d)} \leq 2$  con  $d$  altezza utile della sezione (mm)  
(il coefficiente  $k$  mette in evidenza la minore efficacia dell'ingranamento al crescere dell'altezza utile  $d$ )

$\rho_l = A_s / l_{bd} \leq 0.02$  con  $A_s$  area dell'armatura longitudinale che si estende per non meno di  $l_{bd} + d$  oltre la sezione data,  
(dove  $l_{bd}$  è la lunghezza di ancoraggio)

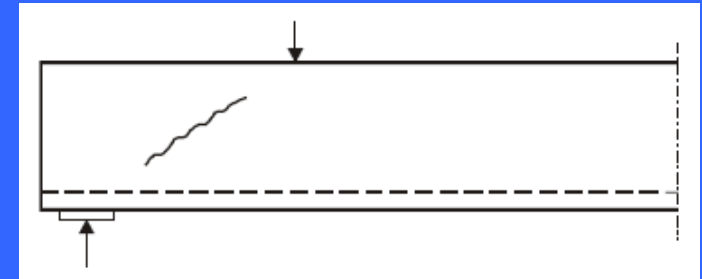
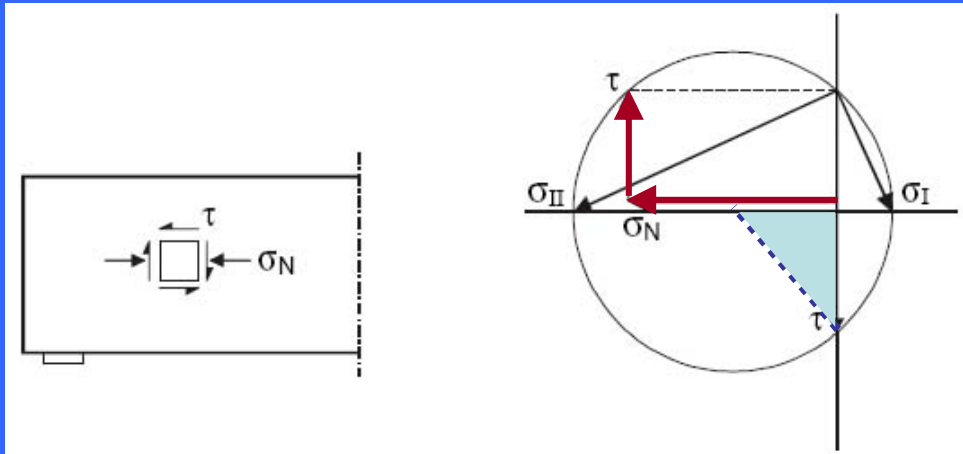




# ... ELEMENTI NON ARMATI A TAGLIO

## b) verifica a taglio-trazione

nelle zone **non fessurate** per flessione (con  $\sigma_{ct}$  non superiori a  $f_{ctd} = f_{ctk}/\gamma_c$ ) di elementi precompressi a campata singola

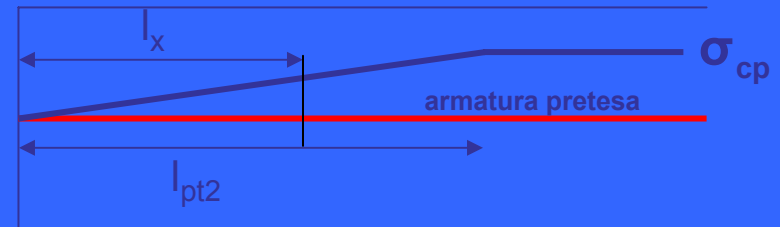


$$\sigma_I = -\frac{\sigma_N}{2} + \sqrt{\left(\tau^2 + \frac{1}{4}\sigma_N^2\right)}$$

essendo  $\tau = \frac{V_{Rd,ct} S}{b_w I}$   $\sigma_N = \alpha_1 \sigma_{cp} = \frac{I_x}{I_{pt2}} \sigma_{cp}$   $\tau^2 + \left(\frac{\sigma_N}{2}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_N}{2} + f_{ctd}\right)^2$

si ottiene

$$V_{Rd,ct} = \frac{I b_w}{S} \sqrt{(f_{ctd})^2 + \alpha_1 \sigma_{cp} f_{ctd}}$$



$$V_{Rd,ct} = 0.7 b_w d \sqrt{(f_{ctd})^2 + \sigma_{cp} f_{ctd}} \quad (4.1.15)\text{-NTC}$$

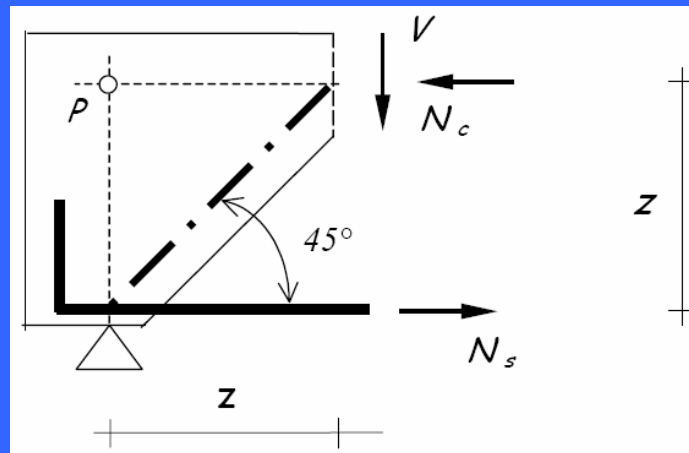
# Verifica a taglio-trazione

## Verifica armature longitudinali

### 4.1.2.1.3.1. - NTC

Le armature longitudinali devono assorbire sforzi derivanti dalla flessione e quelli dovuti all'inclinazione delle fessure rispetto all'asse della trave, assunta pari a  $45^\circ$

in corrispondenza degli appoggi, le armature longitudinali devono assorbire uno sforzo pari al taglio sull'appoggio



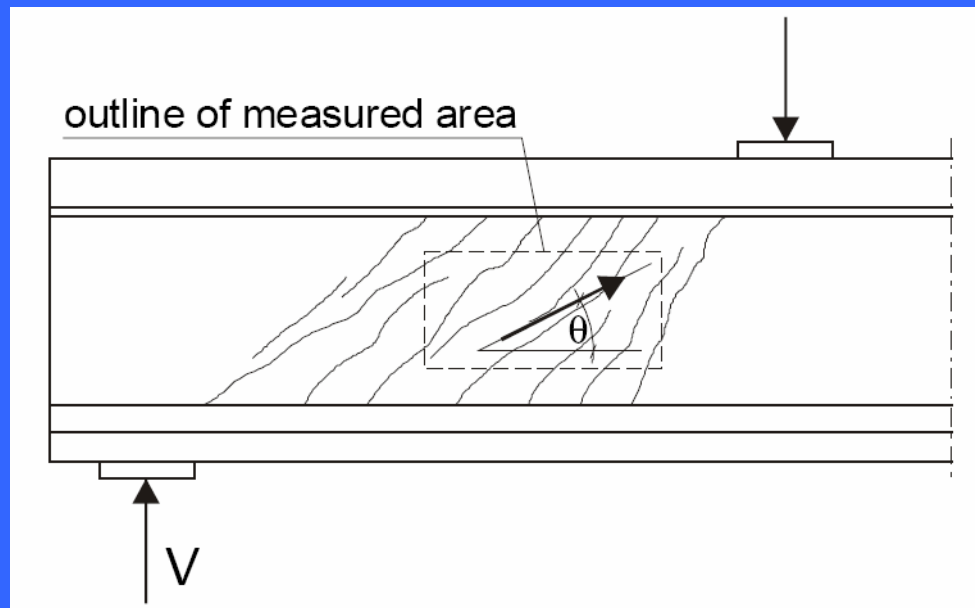
**EC2:** nella zona fessurata per flessione, il diagramma  $M_{Ed}$  va traslato di una distanza  $a_1 = d$  nella direzione sfavorevole.

# ELEMENTI ARMATI A TAGLIO

## Metodo del traliccio ad inclinazione variabile

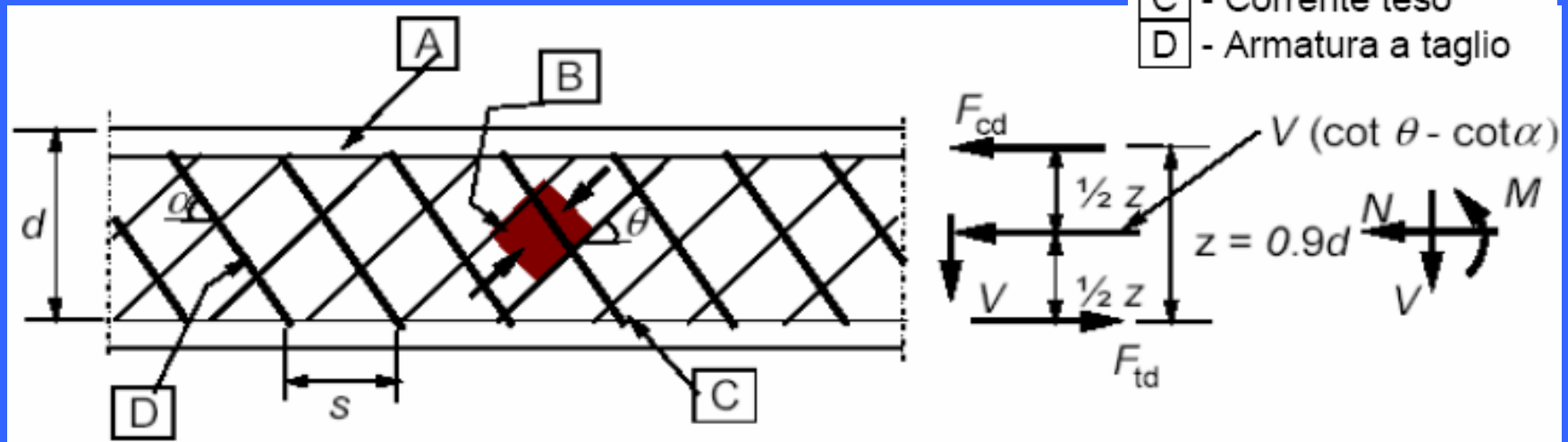
inclinazione dei puntoni variabile tra  $21.8^\circ$  ( $\cot \theta = 2.5$ ) e  $45^\circ$  ( $\cot \theta = 1.0$ )

(prove sperimentali mostrano una graduale riduzione dell'inclinazione delle bielle compresse al crescere del carico)

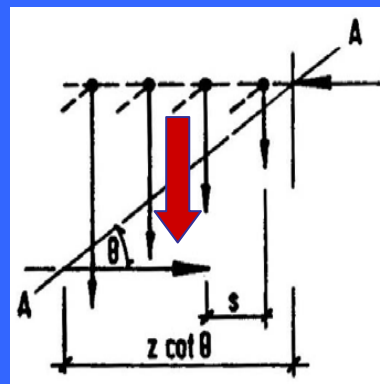
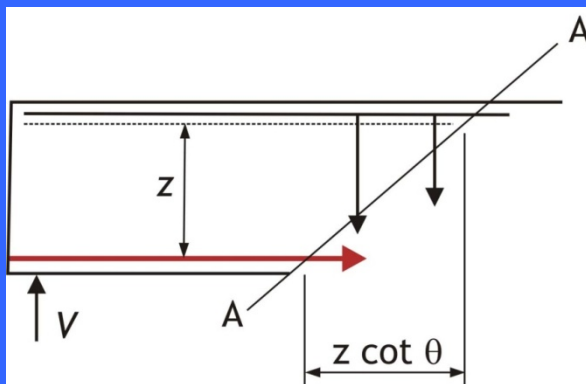


## Modello del traliccio ad inclinazione variabile

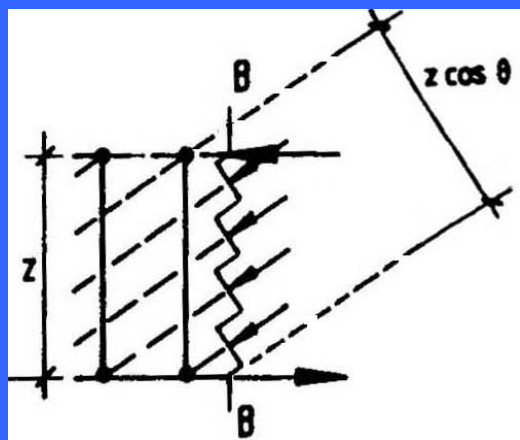
- Forze applicate alle staffe agli estremi superiore ed inferiore
- Trazione è costante su tutta l'altezza
- Staffe e puntoni possono deformarsi indipendentemente
- Si trascura resistenza del calcestruzzo teso
- Allo SLU staffe snervate



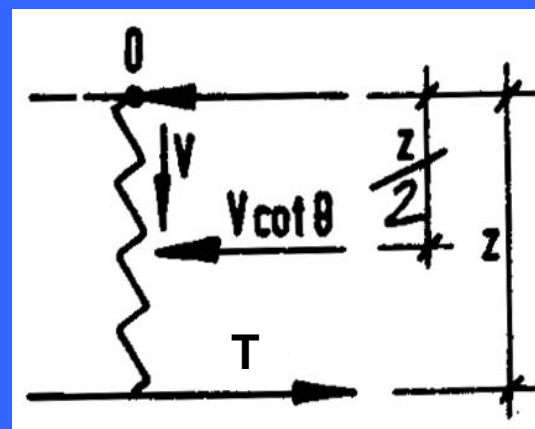
## Equilibrio verticale sez. A-A (parallela al campo di compressione)



## Equilibrio verticale sez. B-B



## Equilibrio a rotazione intorno O



# Modello del traliccio ad inclinazione variabile verifiche

(4.1.20-NTC) La resistenza al taglio della trave è la minore tra

$$V_{Rd} = \min (V_{Rsd}, V_{Rcd})$$

## (4.1.18)-NTC Resistenza a taglio-trazione

(associata alla resistenza a trazione delle armature trasversali)

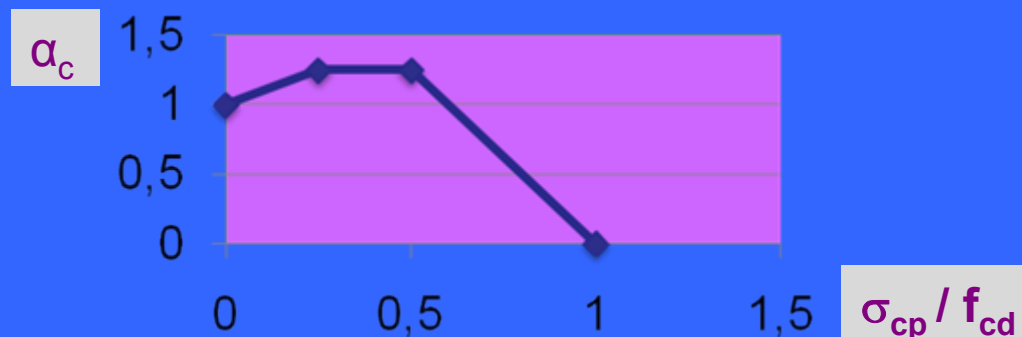
$$V_{Rsd} = 0.9 d (A_{sw} / s) f_{yd} (\cotg \alpha + \cotg \theta) \operatorname{sen} \alpha$$

## (4.1.19)-NTC Resistenza a taglio-compressione

(associata alla resistenza a compressione delle bielle di calcestruzzo)

$$V_{Rcd} = 0,9 d b_w \alpha_c f'_{cd} (\cotg \alpha + \cotg \theta) / (1 + \cotg^2 \theta)$$

$f'_{cd} = 0,5 f_{cd}$  resistenza ridotta del calcestruzzo anima ( $v_1 = 0,5$  )



## *Traslazione sforzi armature longitudinali*

### **4.1.2.1.3.2-NTC**

Le armature longitudinali, dimensionate in base alle sollecitazioni flessionali, dovranno essere prolungate di una misura pari a:

$$a_l = 0,9 d (\text{ctg } \theta - \text{ctg } \alpha) / 2 \geq 0$$

*(il massimo valore di  $a_l$  si ottiene per  $\text{ctg } \theta = 2,5$  e  $\text{ctg } \alpha = 0$  (staffe verticali):*

$$a_{l,max} = 0,9 d \times 2,5 / 2 = 1,125 d$$

## Progetto armature trasversali

Massimo quantitativo di armatura compatibile con la duttilità (si ottiene per  $\cot \theta = 1$  e imponendo  $V_{Rd,s} \leq V_{Rd,max}$ ):

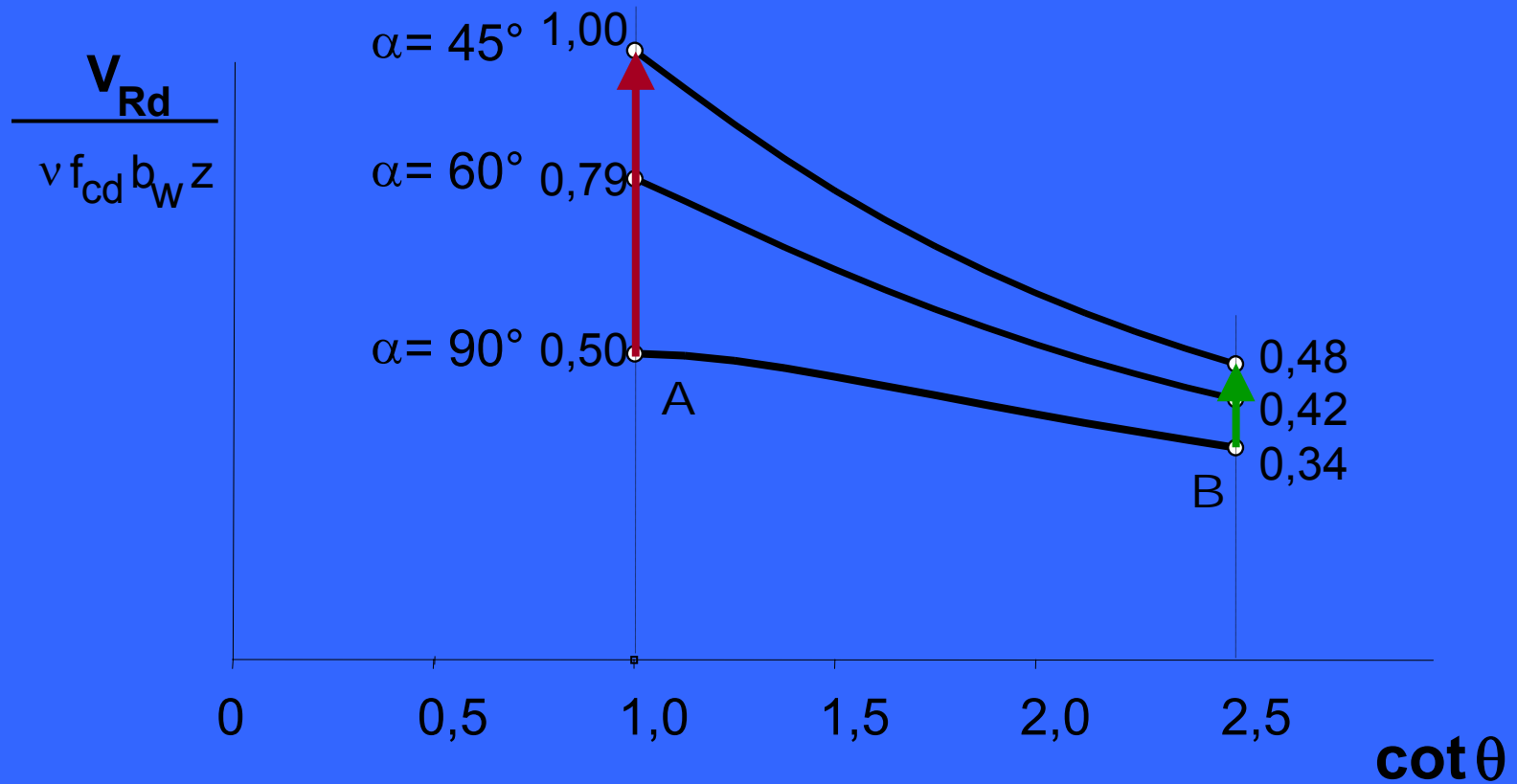
$$\frac{A_{sw,max} f_{ywd}}{b_w s} \leq \frac{1/2 \alpha_{cw} v_1 f_{cd}}{\sin \alpha} \quad (6.12)\text{-EC2}$$

L'utilizzo di armature trasversali inclinate innalza la portanza

	$\alpha = 90^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 45^\circ$
$V_{Rd,max}$ per $\cot \theta = 1,00$	$0,500 (\alpha_{cw} v_1 f_{cd}) b_w z$	$0,788 (\alpha_{cw} v_1 f_{cd}) b_w z$	$1,000 (\alpha_{cw} v_1 f_{cd}) b_w z$
$V_{Rd,max}$ per $\cot \theta = 2,5$	$0,345 (\alpha_{cw} v_1 f_{cd}) b_w z$	$0,425 (\alpha_{cw} v_1 f_{cd}) b_w z$	$0,483 (\alpha_{cw} v_1 f_{cd}) b_w z$



## Taglio resistente delle bielle compresse



passando da  $\alpha = 90^\circ$  a  $\alpha = 45^\circ$

{ per  $\cot \theta = 1,0$   $V_{Rd}$  raddoppia  
per  $\cot \theta = 2,50$  aumenta del 40 %

## *Armatura trasversale minima*

### 4.1.6.1.1-NTC Armatura trasversale minima

1. **sezione complessiva delle staffe non inferiore a**

$$A_{st} = 1,5 b \text{ mm}^2/\text{m}$$

b = spessore minimo dell'anima (mm)

2. **almeno tre staffe al metro** ( $s \leq 333 \text{ mm}$ )

3. **passo non superiore a 0,8 volte l'altezza utile della sezione**

In ogni caso **almeno il 50% dell'armatura** necessaria per il taglio deve essere costituita da **staffe**.

## Verifica: Calcolo del taglio resistente

Dati: dimensioni della sezione, armature verticali (staffe), resistenze dei materiali

1. si verifica la duttilità:  
(crisi armatura)

$$\frac{A_{sw,max} \cdot f_{ywd}}{b_w \cdot s} \leq \frac{1}{2} \alpha_{cw} \cdot v_1 \cdot f_{cd} \quad v_1 = 0,5 \quad (\text{NTC})$$

2. si ricava  $\sin \theta$  (e quindi  $\cotg \theta$ ) uguagliando la resistenza a taglio-compressione con quella a taglio-trazione:

$$\sin^2 \theta = \frac{A_{sw} f_{ywd}}{b_w s (\alpha_{cw} v_1 f_{cd})}$$

3. si confronta  $\cot \theta$  con i valori limite del campo di validità

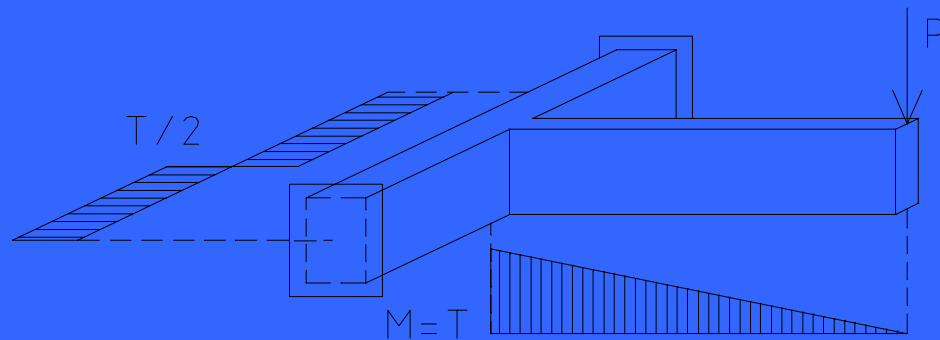
- se  $1 \leq \cot \theta \leq 2,5$ , il taglio resistente si calcola utilizzando indifferentemente l'espressione di  $V_{Rd,max}$  o di  $V_{Rd,s}$
- se  $\cot \theta > 2,5$  ( $\theta < 21,80^\circ$ ) il collasso avviene lato acciaio con bielle compresse integre; in questo caso il taglio resistente è dato dalla resistenza a taglio-trazione calcolata assumendo  **$\cot \theta = 2,5$**

# Verifiche a Torsione

#### 4.1.2.1.4 –NTC Resistenza nei confronti di sollecitazioni torcenti

torsione di equilibrio → verifica di resistenza (SLU)

$$T_{Rd} \geq T_{Ed}$$



torsione di congruenza → (in genere) armature minime

# Schema resistente

## 4.1.2.1.4 –NTC

**schema resistente: traliccio periferico**

forzi di trazione = armature longitudinali e trasversali

forzi di compressione = bielle di calcestruzzo.

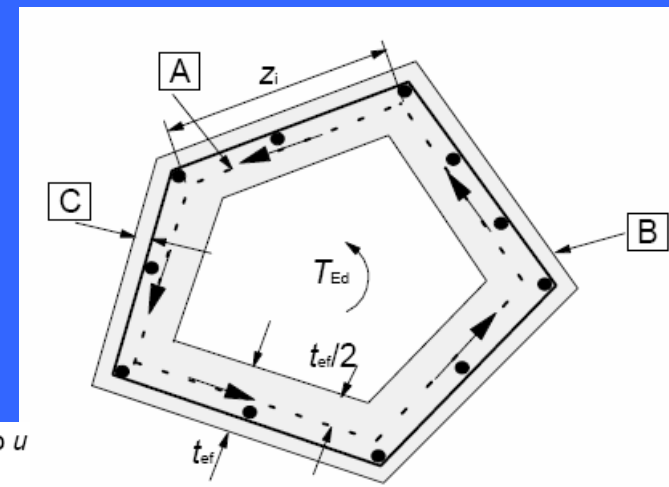
**sezione anulare inscritta:**

stesso contorno  $u$  della sezione data

spessore uniforme  $t = A_c / u$

( $\geq 2$  volte distanza bordo dal centro delle armature)

$A_c$  = area sezione racchiusa dal perimetro  $u$ ,  
senza tenere conto di eventuali cavità



### Legenda

A - Linea media

B - Perimetro esterno della sezione effettiva, di sviluppo  $u$

C - Copriferro

## Resistenza a taglio-compressione dell'i-esimo lato del poligono:

$$V_{Rcd,i} = (\alpha_c f'_{cd}) t z_i \sin\theta \cos\theta$$

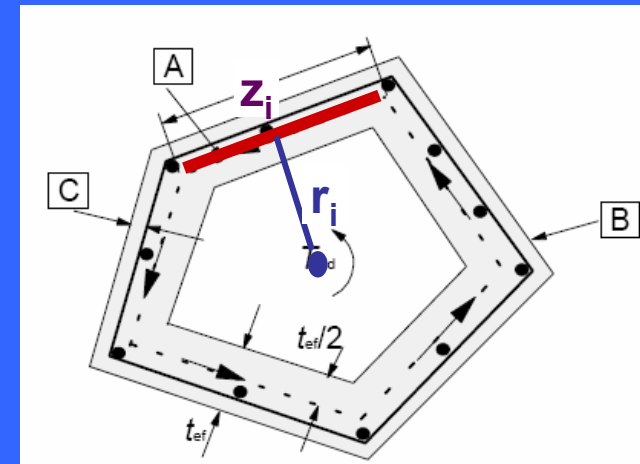
Momento di tutte le forze  $V_{Rcd,i}$  rispetto ad un punto del piano:

$$T_{Rcd} = \Sigma(\alpha_c f'_{cd}) t z_i r_i \sin\theta \cos\theta$$

essendo  $\Sigma z_i r_i = 2A$ ;  $\alpha_c = 1$  (coeff maggiorativo per elementi compressi)

il **momento torcente resistente massimo** assume l'espressione:

$$T_{Rcd} = 2 f'_{cd} t A \sin \theta \cos \theta = 2 A t f'_{cd} \cotg \theta / (1+\cotg^2 \theta)$$



## Resistenza a taglio-trazione (armature trasversali) nell'i-esimo lato del poligono:

$$V_{Rsd,i} = (A_s/s) z_i f_{ywd} \cot \theta$$

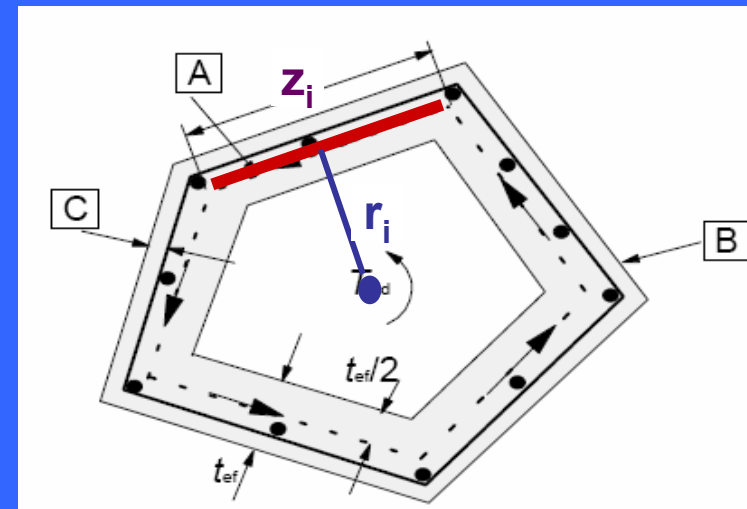
momento di tutte le forze  $V_{Rsd,i}$  rispetto ad un punto qualunque del piano:

$$T_{Rsd} = (A_s/s) f_{yd} \cot \theta \sum z_i r_i$$

il momento torcente resistente delle armature assume l'espressione:

$$T_{Rsd} = 2 A (A_s/s) f_{yd} \cot \theta$$

dove si è utilizzata la relazione  $\sum z_i r_i = 2 A$





## Armature longitudinali

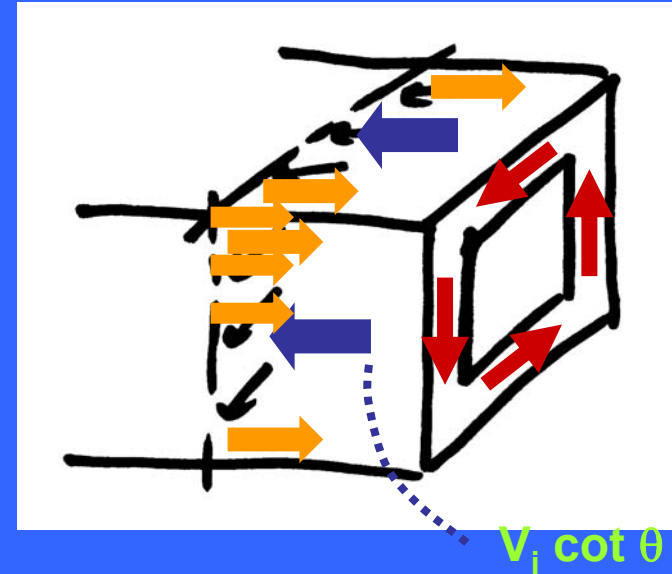
forza sulle armature longitudinali dell'i-esima parete:

$$F_{RI} = V_i \cot \theta$$

$$F_{RI,max} = A_{l,i} f_{yd} = (\sum A_l) f_{yd} z_i / u_m$$

( $u_m$  = perimetro medio del nucleo resistente)

$$V_{i,max} = F_{RI,max} / \cot \theta = (\sum A_l) f_{yd} z_i / (u_m \cot \theta)$$



## Resistenza a torsione con riferimento alle armature longitudinali

imponendo l'equilibrio alla rotazione intorno ad un punto qualsiasi del piano:

$$T_{Rld} = \sum V_{i,max} r_i = (\sum A_l f_{yd}) \sum z_i r_i / (u_m \cot \theta) = 2 A (\sum A_l f_{yd}) / (u_m \cot \theta)$$

## *Resistenza a torsione*

Verifica di resistenza a torsione:

$$T_{Ed} \leq \min (T_{Rcd}, T_{Rsd}, T_{Rld})$$

Dimensionamento armature trasversali:

$$\frac{A_s}{s} = \frac{T_{Ed}}{2A \cot \theta f_{yd}}$$

Dimensionamento armature longitudinali:

$$A_l = \frac{T_{Ed} u_m \cot \theta}{2A f_{yd}}$$

# Sollecitazioni composte V e T

## **NTC - Torsione e taglio**

La resistenza massima di una membratura soggetta a torsione e taglio è limitata dalla resistenza delle bielle compresse di calcestruzzo:

$$T_{Ed} / T_{Rcd} + V_{Ed} / V_{Rcd} \leq 1 \quad (4.1.32)$$

## **dimensionamento delle staffe**

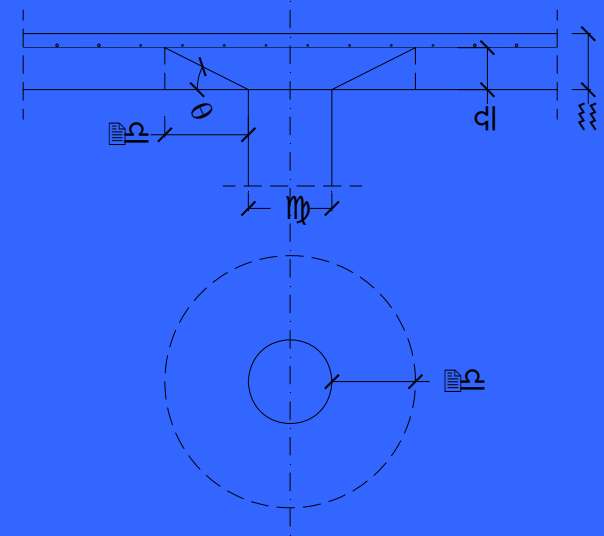
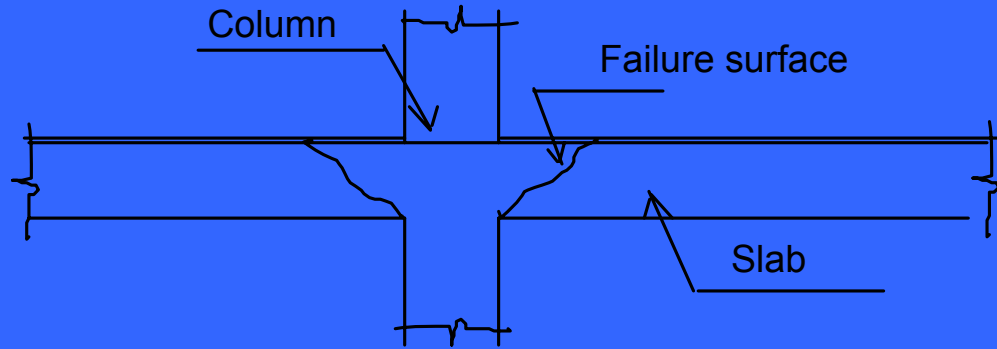
separatamente per la torsione e per il taglio, sommando su ogni lato le aree richieste

**angolo  $\theta$**  delle bielle compresse

**unico valore** per le due verifiche di taglio e torsione

# Punzonamento

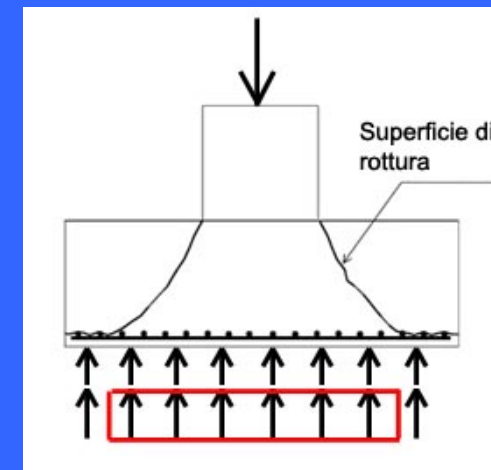
#### 4.1.2.1.3.4 – NTC la resistenza al punzonamento deve essere valutata con formule di comprovata affidabilità



si considera un **perimetro efficace** di piastra distante **2d** dall'impronta caricata, con d altezza utile (media) della piastra stessa

in presenza di armatura, l'intero sforzo allo stato limite ultimo va affidato all'armatura

nel caso di piastre di fondazione si adotteranno opportuni adattamenti del modello sopra citato



## > EC2

tensione taglio-punzonamento sollecitante:  $V_{Ed} = \beta \frac{V_{Ed}}{u_i d}$   
( $\beta$  tiene conto di eventuali eccentricità  
e della posizione del pilastro: interno, d'angolo, ...)

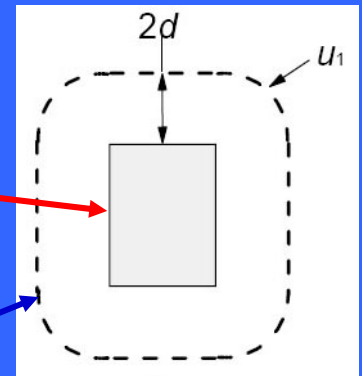
### verifiche:

a) lungo il perimetro del pilastro o dell'area caricata:

$$V_{Ed} < V_{Rd,max} = 0,5 v f_{cd}$$
$$v = 0,5$$

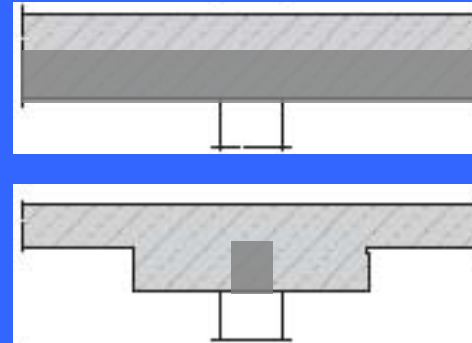
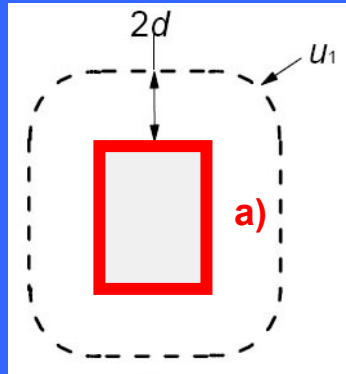
b) lungo il perimetro di verifica posto a distanza  
2d dal pilastro o dall'area caricata:

$$V_{Ed} < V_{Rd,c}$$



$V_{Rd,c}$  è la resistenza a punzonamento di piastre e fondazioni prive di armature a taglio-punzonamento, l'espressione è identica a quella della resistenza a taglio, fatta eccezione per il coefficiente  $k=0.1$

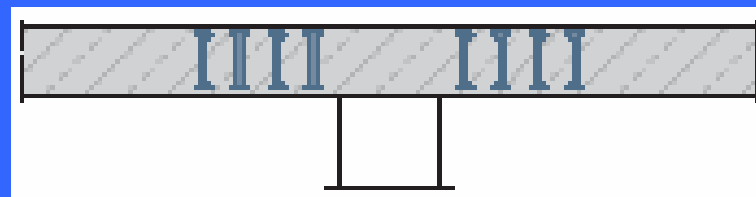
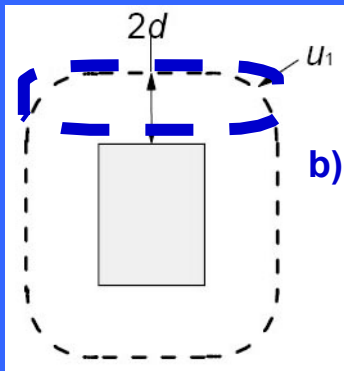
se la condizione a) non è soddisfatta occorre aumentare le dimensioni del pilastro e/o lo spessore della piastra oppure inserire un capitello in testa al pilastro.



Se non è soddisfatta la condizione b) si può procedere come sopra oppure inserire apposite armature a taglio-punzonamento:

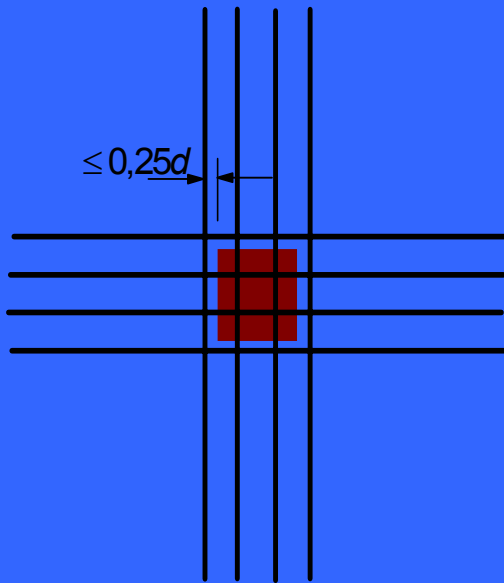
$$V_{Ed} < V_{Rd,cs}$$

(verifica in presenza di armature a taglio-punzonamento)

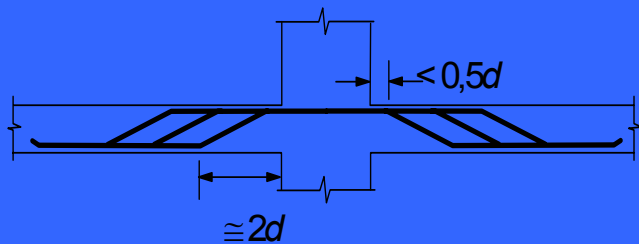


# Armature per taglio – punzonamento

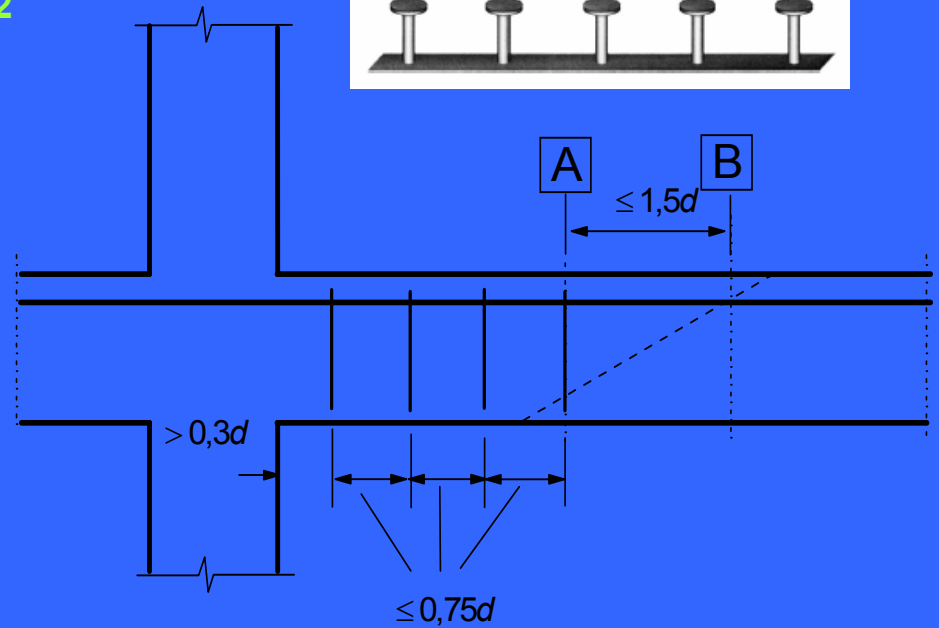
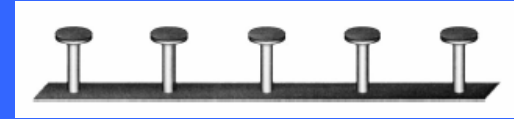
$V_{Rd,cs}$  Resistenza a taglio-punz. in presenza di armature (6.52)-EC2



ferri piegati

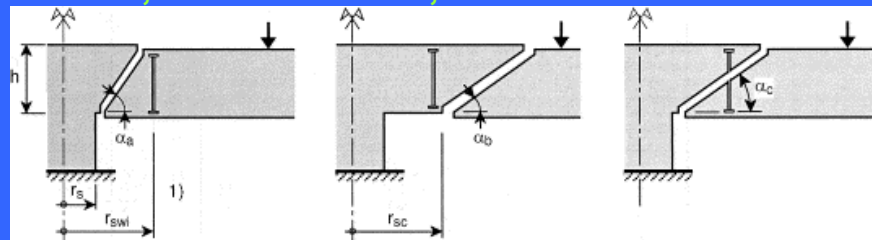


cuciture verticali



<math>< 0,5 d</math>

<math>< 1,5 d</math>



A - perimetro di verifica più esterno che richiede armatura a taglio

B - primo perimetro di verifica entro il quale non è richiesta armatura a taglio



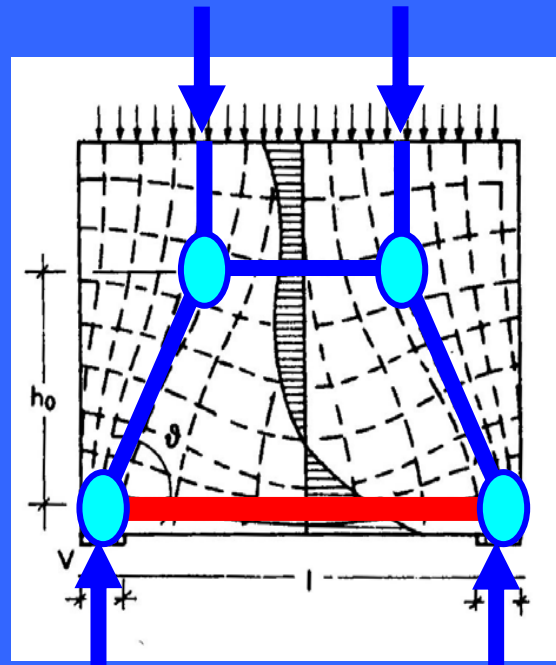
**Modelli**  
**TIRANTI-PUNTONI**  
**(Srut & Tie)**

#### 4.1.2.1.5 – NTC

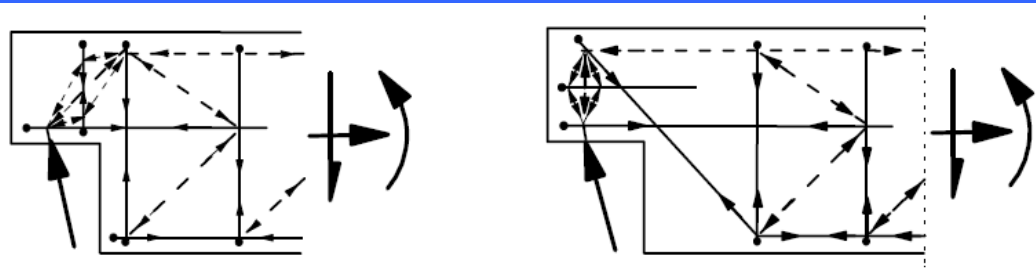
### Resistenza di elementi tozzi, nelle zone diffusive e nei nodi

Per gli elementi per cui non valgono i modelli meccanici semplici, le verifiche di sicurezza possono essere condotte con riferimento a schematizzazioni basate sull'individuazione di tiranti e puntoni

Idealizzazione dello stato di sforzo presente in una membratura o parte di una membratura di c.a. in un insieme di campi tensionali discreti

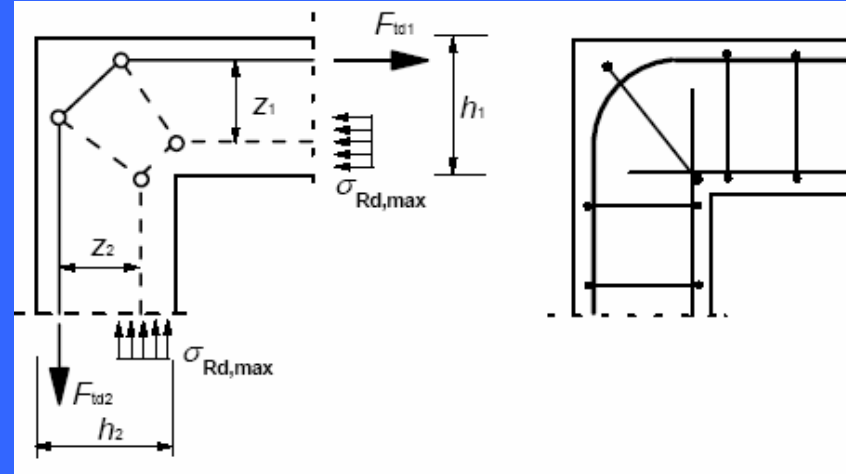


(figure da EC2)

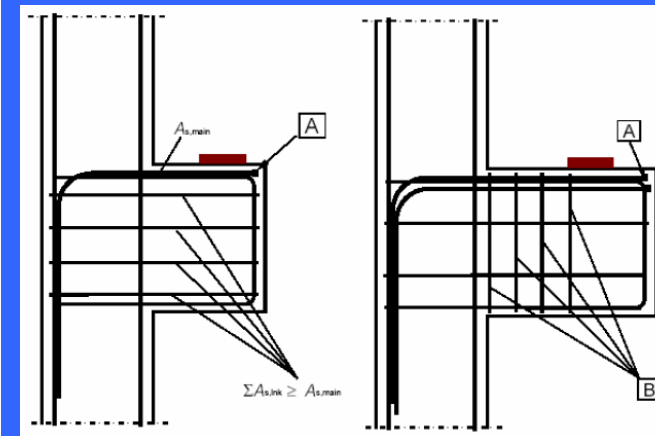
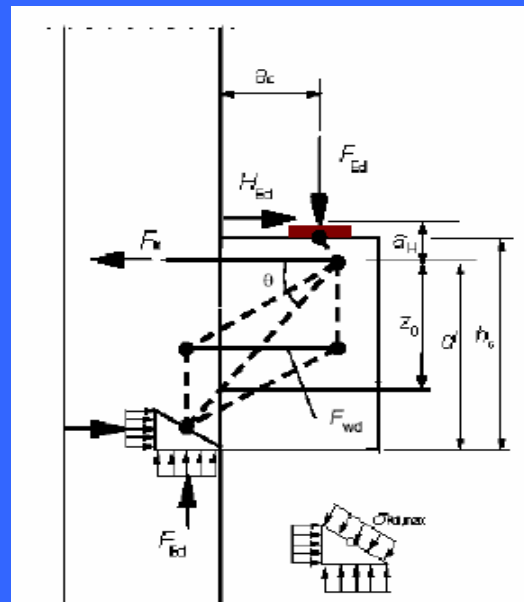
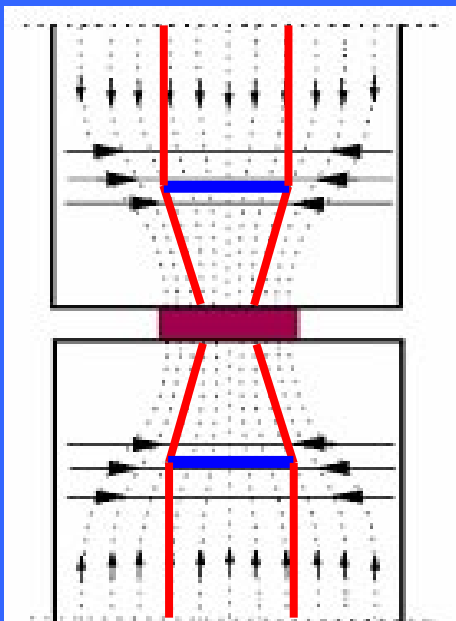


Sella Gerber

Angolo di portale



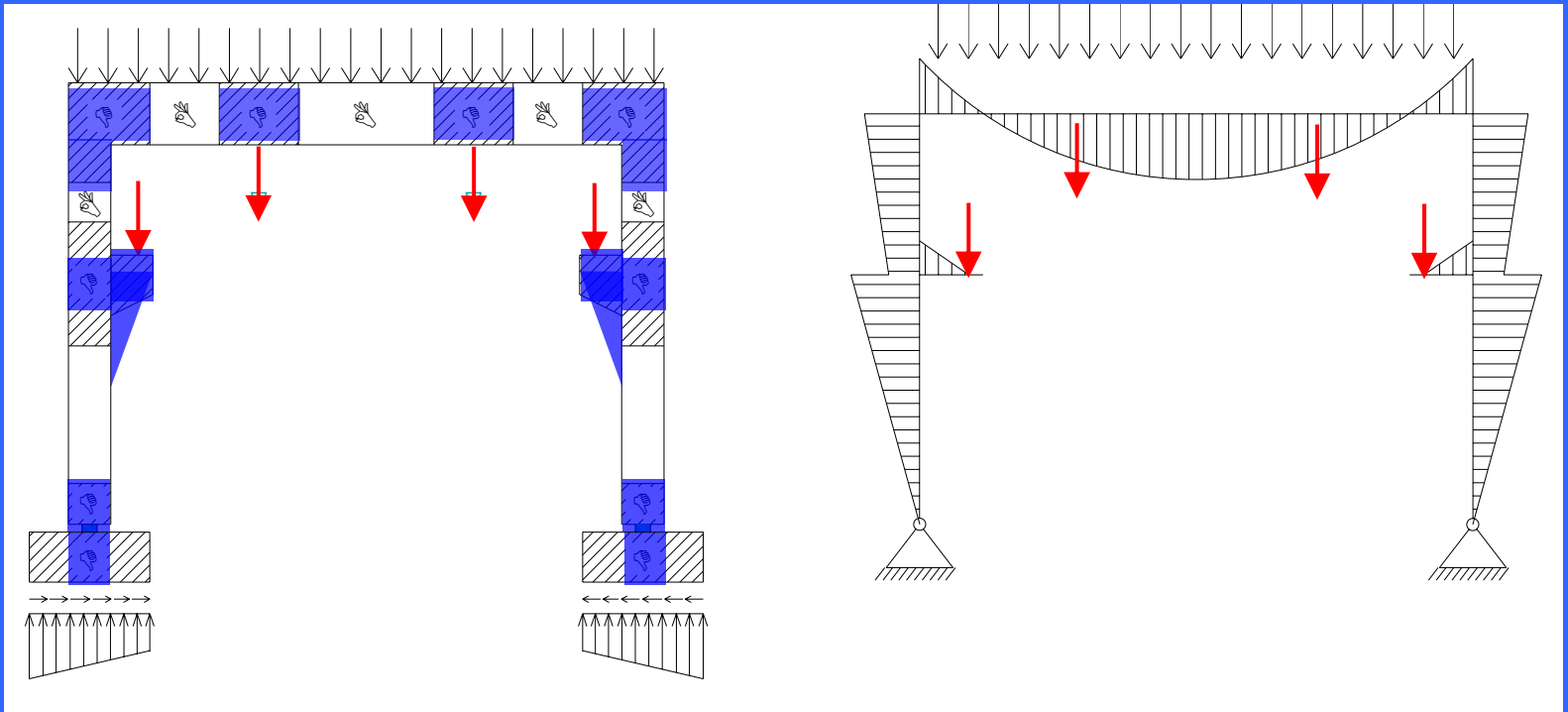
Unioni per forze di compressione



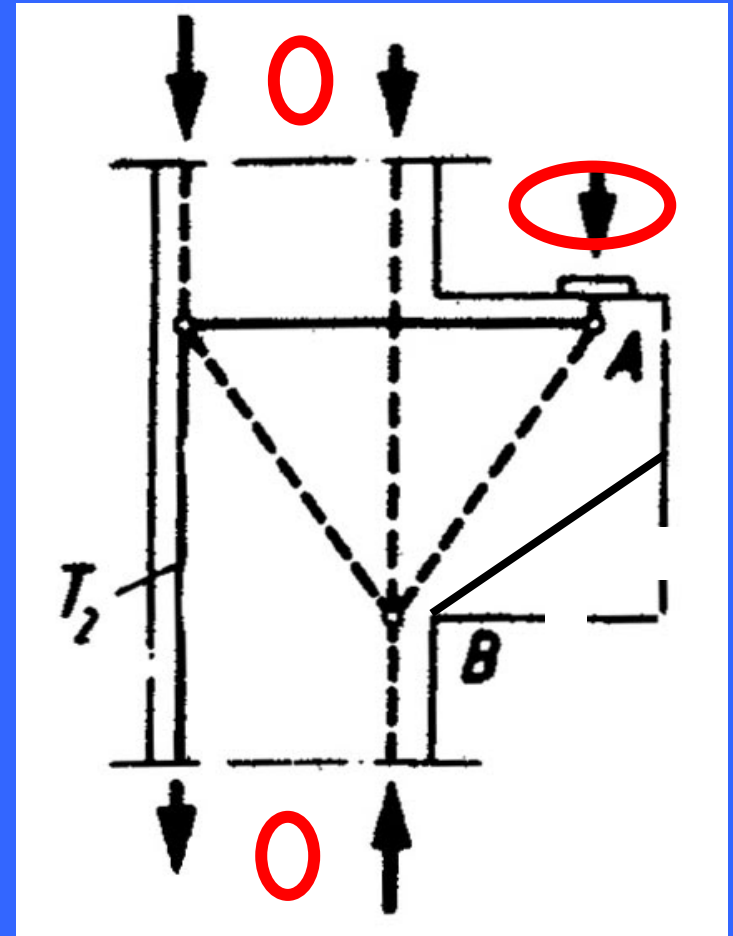
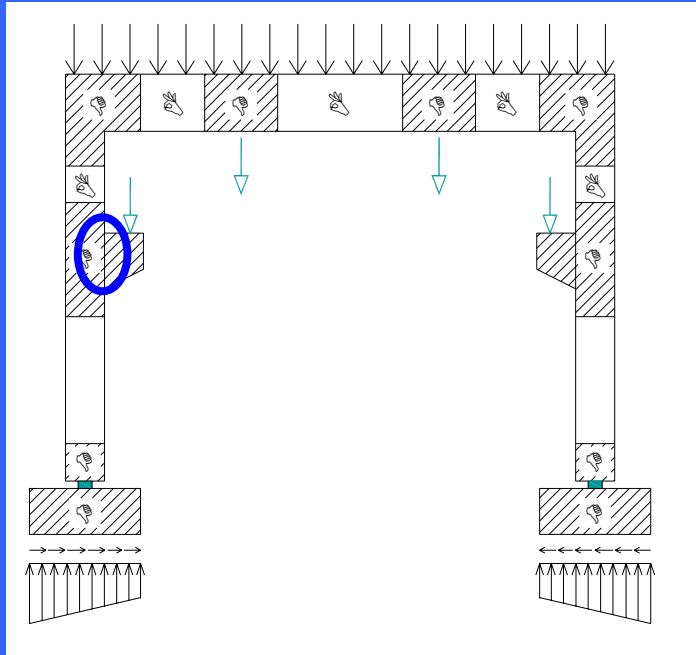
Mensole tozze

# Esempio di identificazione della geometria di un modello S&T

## 1) Regioni "B" di continuità e "D" di discontinuità



- 2) Modello tirante-puntone all'interno di ogni regione "D" dopo aver determinato le forze agenti sul suo contorno

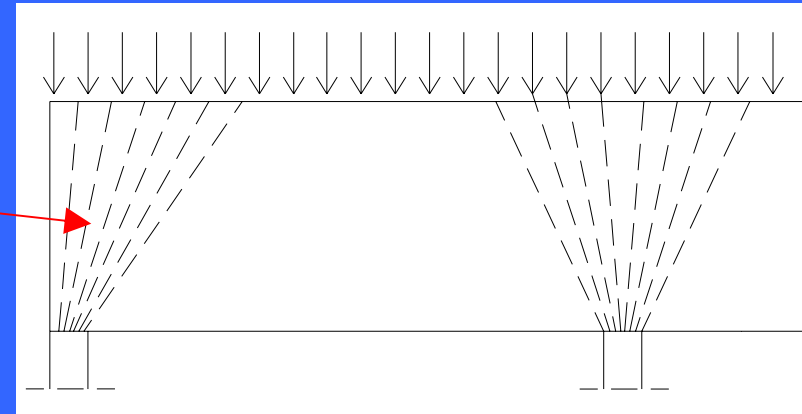
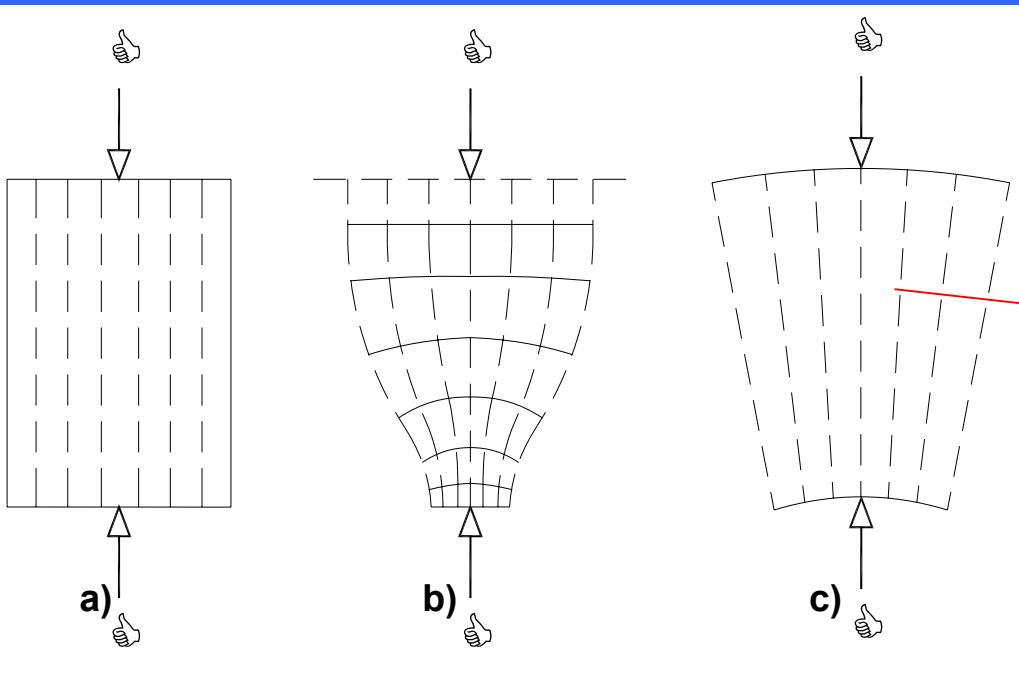


# Verifiche di resistenza dei puntoni

a) paralleli o prismatici

b) a “collo di bottiglia” (zone di applicazione di carichi concentrati)

c) diffusivi a “ventaglio”



$$\sigma_{Rd,max} = f_{cd}$$

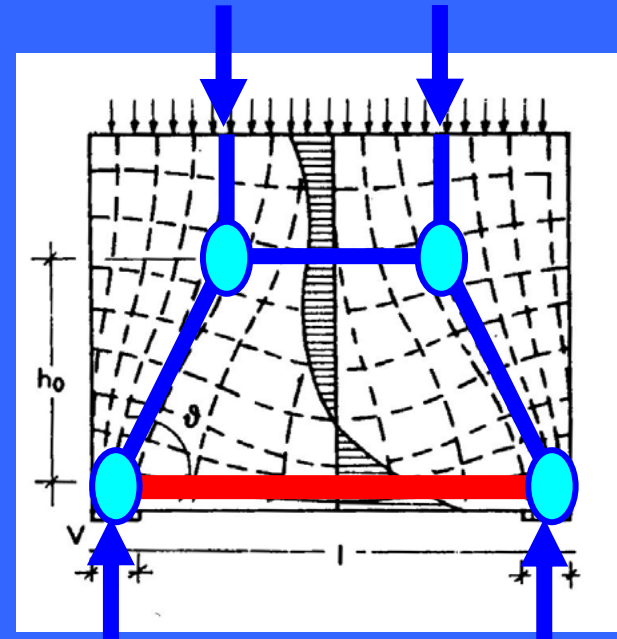
$$\sigma_{Rd,max} = 0,60 v' f_{cd}$$

in presenza di trazioni trasversali

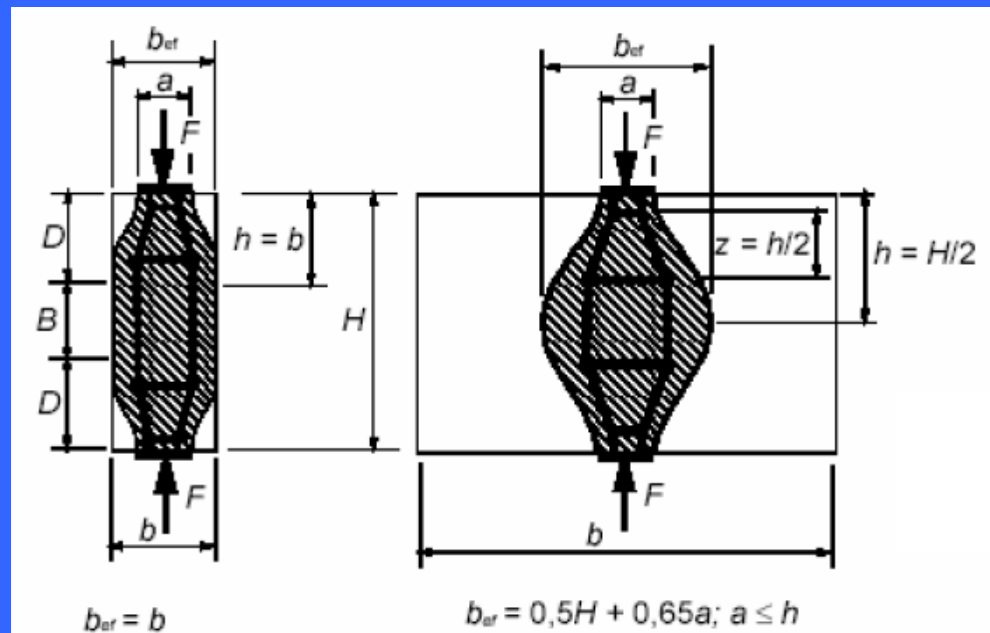
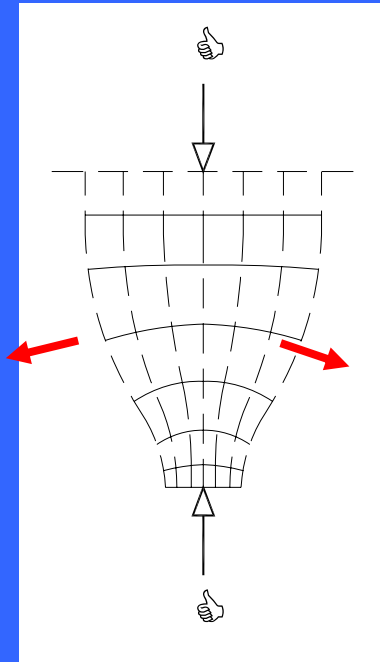
$$v' = (1 - f_{ck}/250)/0,85$$

# Verifiche di resistenza dei tiranti

Tiranti del modello tirante-puntone



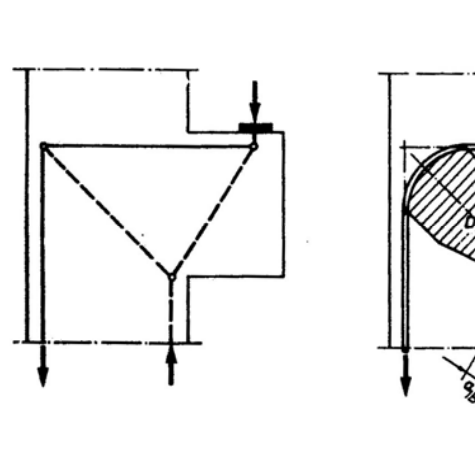
Elementi resistenti alle forze di trazione ortogonali ai puntoni



# Verifiche di resistenza dei nodi (EC2)

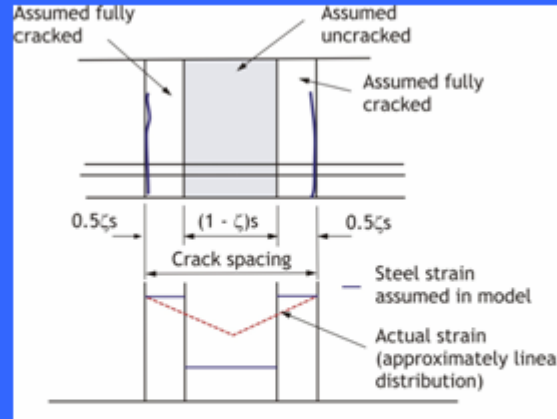
## NODI COMPRESSI

$$\sigma_{1Rd,max} = k_1 \nu' f_{cd}$$

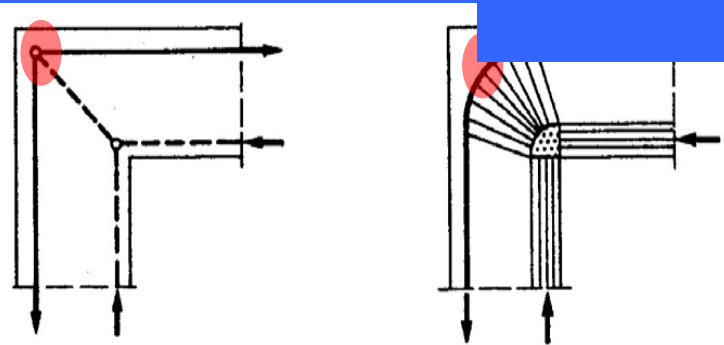
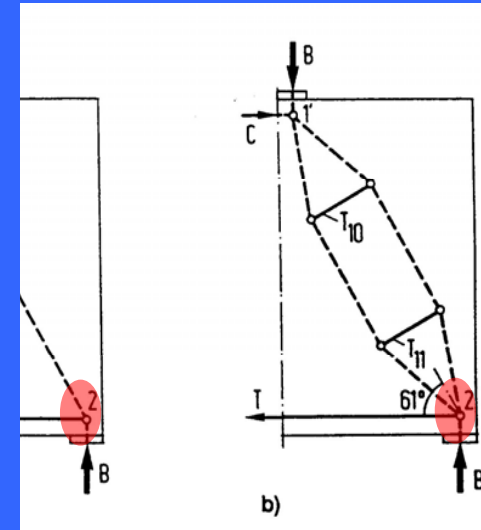


## NODI COMPRESSI-TESI CON TIRANTI IN UNA SOLA DIREZIONE

$$(k_2 = 0,85)$$



una previsione adeguata per elementi inflessi si ottiene considerando il tratto compresso tra due fessure in parte non fessurato (nella zona centrale) e in parte completamente fessurato (nelle zone laterali)



## NODI COMPRESSI-TESI CON TIRANTI IN PIÙ DIREZIONI

$$\sigma_{3Rd,max} = k_3 \nu' f_{cd} \quad (k_3 = 0,75)$$



**SLE**

**STATI LIMITE DI ESERCIZIO**

# ***SLE***

**Stato limite delle tensioni di esercizio (4.1.2.2.5-NTC)**

**Stato limite di fessurazione (4.1.2.2.4-NTC)**

**Stato limite di deformazione (4.1.2.2.2-NTC)**

**(Stato limite di vibrazione)**

**(stato limite di fatica)**

### 4.1.2.2.5.1 Tensione max nel calcestruzzo

La compressione nel cls deve essere limitata per evitare:

- ❖ **fessurazioni longitudinali**
- ❖ **microfessurazione**
- ❖ **elevati livelli di deformazioni viscosse**  
che possano ridurre la funzionalità della struttura

$$\sigma_c \leq 0,60 f_{ck} \quad \text{combinazione di azioni caratteristica}$$
$$(\sigma_c \leq 0,70 f_{ckj} \quad \text{presollecitazione}) \quad (4.1.8.1.4)$$

$$\sigma_c \leq 0,45 f_{ck} \quad \text{combinazione di azioni quasi permanente}$$

**riduzione del 20 %**

per elementi piani (solette, pareti, ...) con  $s \leq 50$  mm

#### 4.1.2.2.5.2 – NTC Stato di tensione nell'acciaio

La trazione nelle barre di armatura deve essere limitata per evitare

- deformazioni anelastiche
- fessurazioni
- deformazioni inaccettabili

$$\sigma_s \leq 0,8 f_{yk} \quad \text{combinazione di azioni caratteristica (4.1.42)}$$

(diversa limitazione alla presollecitazione)

$$\sigma_{spi} \leq 0,75 (0,80) f_{ptk} \quad \sigma_{spi} \leq 0,85 (0,90) f_{p0,1k} \quad (4.1.47)$$

# Verifica di fessurazione

## 4.1.2.2.4 – NTC

Per assicurare la funzionalità e la durata delle strutture è necessario:

realizzare un **sufficiente ricoprimento** delle armature con calcestruzzo di buona qualità e compattezza, bassa porosità e bassa permeabilità

non superare uno **stato limite di fessurazione**

adeguato alle

**condizioni ambientali**

**sollecitazioni**

sensibilità delle armature **alla corrosione**

**esigenze estetiche**

In ordine di severità:

- ***SL decompressione***

la tensione normale di compressione  $> 0$

- ***SL formazione delle fessure***

la tensione normale di trazione nella fibra più sollecitata è:

$$\sigma_t = f_{ctm} / 1,2 \quad (4.1.37-NTC)$$

dove:  $f_{ctm} = 0,30 f_{ck}^{2/3} \leq C50/60$  (11.2.3a-NTC)

$f_{ctm} = 2,12 \ln [1+f_{cm}/10] > C50/60$  (11.2.3b-NTC)

- ***SL ampiezza delle fessure***

il valore limite di apertura della fessura calcolato al livello considerato è pari ad uno dei seguenti valori nominali:

$$w_1 = 0,2 \text{ mm}$$

$$w_2 = 0,3 \text{ mm}$$

$$w_3 = 0,4 \text{ mm}$$

#### 4.1.2.2.4.2 *Combinazioni di azioni*

Si prendono in considerazione le seguenti combinazioni:

combinazioni **quasi permanenti**

combinazioni **frequenti**

#### 4.1.2.2.4.3 Condizioni ambientali

### Tabella 4.1.III – *Descrizione delle condizioni ambientali*

#### **CONDIZIONI AMBIENTALI CLASSE DI ESPOSIZIONE**

Ordinarie	X0, XC1, XC2, XC3, XF1
Aggressive	XC4, XD1, XS1, XA1, XA2, XF2, XF3
Molto aggressive	XD2, XD3, XS2, XS3, XA3, XF4

*Classi di esposizione definite nelle **Linee Guida per il Calcestruzzo Strutturale** del Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici*



## **Nessun rischio di corrosione o attacco**

1. (X0) nessun rischio di corrosione o attacco

## **Rischio di corrosione dell'armatura**

2. (XC) corrosione indotta da carbonatazione
3. (XD) corrosione indotta da cloruri (esclusi quelli dell'acqua di mare)
4. (XS) corrosione indotta da cloruri presenti nell'acqua di mare

## **Attacco del calcestruzzo da parte di agenti esterni**

5. (XF) attacco di cicli gelo/disgelo
6. (XA) attacco chimico

#### 4.1.2.2.4.4 *Sensibilità delle armature alla corrosione*

Le armature si distinguono in due gruppi:

- **armature sensibili** (acciai da presollecitazione)
- **armature poco sensibili** (acciai ordinari)

Per gli acciai zincati e per quelli inossidabili si può tener conto della loro minor sensibilità alla corrosione.

#### 4.1.2.2.4.5 Scelta degli stati limite di fessurazione

Gruppi di Esigenze	Condizioni Ambientali	Combinazione di azioni	Armatura			
			Sensibile		Poco sensibile	
			Stato limite	$w_d$	Stato limite	$w_d$
a	Ordinarie	frequente	ampiezza	$\leq w_2$	ampiezza	$\leq w_3$
		quasi permanente	ampiezza	$\leq w_1$	ampiezza	$\leq w_2$
b	Aggressive	frequente	ampiezza	$\leq w_1$	ampiezza	$\leq w_2$
		quasi permanente	decompressione	---	ampiezza	$\leq w_1$
c	Molto aggressive	frequente	formazione fessure	---	ampiezza	$\leq w_1$
		quasi permanente	decompressione	---	ampiezza	$\leq w_1$

#### 4.1.2.2.4.6 Verifica allo stato limite di ampiezza fessure

valore di calcolo:

$$w_d = 1,7 w_m$$

dove  $w_m$  = valore medio dell'ampiezza delle fessure  
prodotto deformazione media delle barre x distanza media fessure:

$$w_m = \varepsilon_{sm} (-\varepsilon_{cm}) \Delta_{sm}$$

per il calcolo di  $\varepsilon_{sm} \Delta_{sm}$   
criteri consolidati riportati nella letteratura tecnica

## ES.: verifica ampiezza delle fessure (EC2)

Calcolo dell'ampiezza di fessurazione (7.3.4-EC2)

$$w_k = s_{r,max} (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$$

$s_{r,max}$  è il massimo interasse tra le fessure  
se l'interasse tra le armature è inferiore a  $5(c+\varnothing/2)$ :

$$s_{r,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \varnothing / \rho_{p,eff} \quad (7.11-EC2)$$

dove:  $k_1 =$  0.8 barre ad aderenza migliorata  
(il p.to 3.2.2(2)P-EC2 precisa che l'EC2 si riferisce solo a barre ad aderenza migliorata e saldabili)

0.6 barre lisce

$k_2 =$  0.5 flessione  
1.0 trazione pura

$k_3 =$  3.4

$k_4 =$  0.425

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s + \xi_1^2 A'_p}{A_{c,eff}} \quad \leftarrow \rho_{p,eff}$$

percentuale geometrica di armatura all'interno  
dell'area di calcestruzzo efficace

se l'interasse tra le armature è maggiore di  $5(c+\varnothing/2)$ :

$$s_{r,max} = 1.3 (h-x) \quad (7.14-EC2)$$

$\epsilon_{sm}$  è la deformazione media nell'armatura, includendo l'effetto delle deformazioni impresse e l'effetto di "tension-stiffening"

$\epsilon_{cm}$  è la deformazione media del cls tra le fessure

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s}{E_s} \left( 1 - \frac{\sigma_{s,cr}}{\sigma_s} \right) \geq 0.6 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

$\sigma_s$  è la tensione nell'armatura calcolata in sezione fessurata

## Calcolo dell'ampiezza di fessurazione (7.3.4 – EC2)

$$\sigma_{s,cr} = \frac{k_t f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff}) \quad \rho_{p,eff} = \frac{A_s + \xi_1^2 A'_p}{A_{c,eff}}$$

❖  $A_{c,eff}$  è l'area efficace di cls teso attorno all'armatura ordinaria o a quella di precompressione

❖  $A_p$  è l'area di armatura di precompressione all'interno di  $A_{c,eff}$

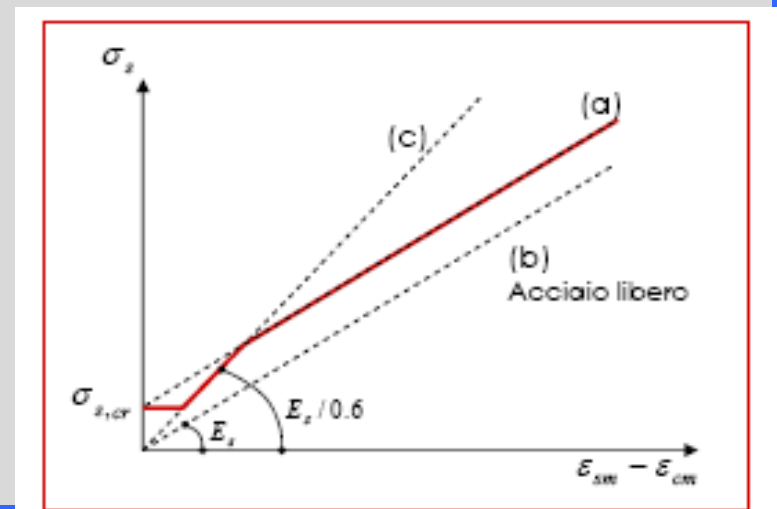
❖  $\xi_1$  è il rapporto modificato della resistenza di aderenza funzione dei diametri di armatura ordinaria e di pretensione

$$\xi_1 = \sqrt{\xi \cdot \frac{\phi_s}{\phi_p}}$$

❖  $k_t = 0.6$  per carichi di breve durata  
 $0.4$  per carichi di lunga durata

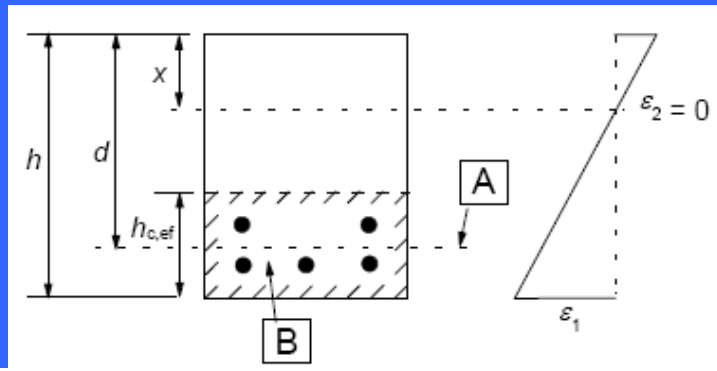
in presenza di sola armatura ordinaria:

$$\sigma_{s,cr} = k_t \frac{f_{ct,eff} (A_{c,eff} + \alpha_e A_s)}{A_s}$$



# Calcolo di $A_{c,eff}$

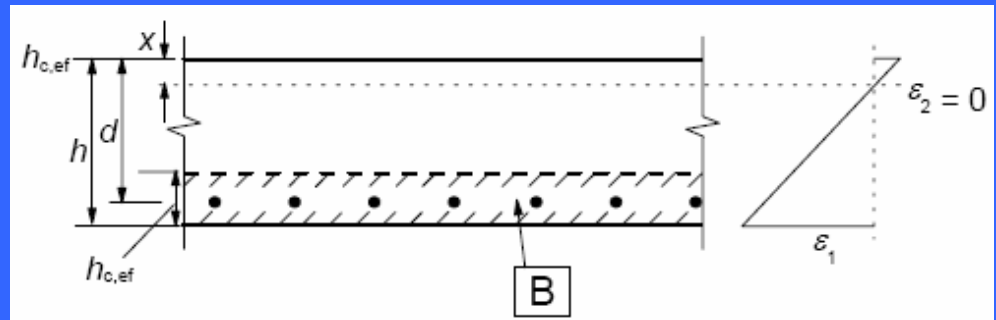
trave



- A** - Livello del baricentro dell'acciaio
- B** - Area tesa efficace,  $A_{c,eff}$

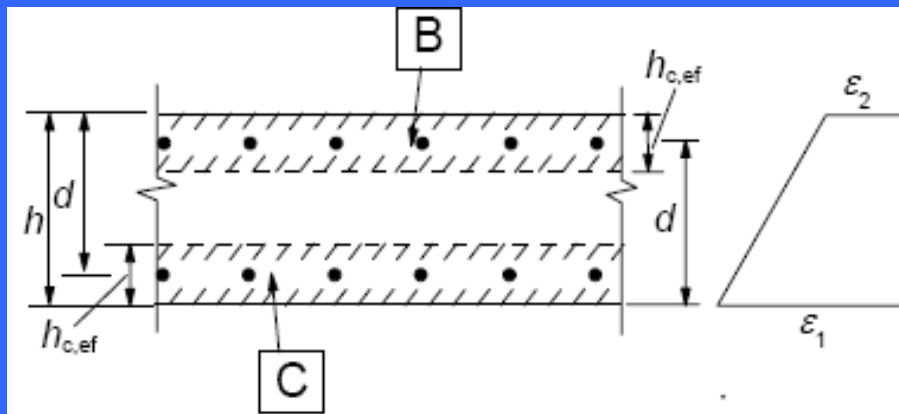
elemento soggetto a trazione

piastra



- B** - Area tesa efficace,  $A_{c,eff}$

$$h_{c,eff} = \min [2,5 (h - d); (h - x) / 3; h / 2]$$



- B** - Area tesa efficace di estradosso,  $A_{ct,eff}$
- C** - Area tesa efficace di intradosso,  $A_{cb,eff}$



#### 4.1.2.2.4.6 - NTC – Verifica di fessurazione senza calcolo diretto

si limita la tensione  $\sigma_s$  di trazione nell'armatura, valutata nella sezione parzializzata per la combinazione di carico pertinente

**il valore limite di  $\sigma_s$  è correlato a:**

**diametro delle barre**

**spaziatura delle barre**

#### C4.1.2.4 - CIRCOLARE - NTC

La verifica dell'ampiezza di fessurazione per via indiretta può riferirsi ai limiti di tensione nell'acciaio d'armatura definiti nelle **Tabelle 4.1.II e 4.1.III.**

La **tensione**  $\sigma_s$  è quella nell'acciaio d'armatura prossimo al lembo teso della sezione e va calcolata nella **sezione parzializzata** per la combinazione di carico pertinente

**Tabella  
C 4.1.II**

Tensione acciaio $\sigma_s$ [MPa]	Diametro massimo $\phi$ delle barre		
	$w_3 = 0,4$	$w_2 = 0,3$	$w_1 = 0,2$
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	-

**Tabella  
C 4.1.III**

Tensione acciaio $\sigma_s$ [MPa]	Spaziatura massima $s$ delle barre		
	$w_3 = 0,4$	$w_2 = 0,3$	$w_1 = 0,2$
160	300	300	200
200	300	250	150
240	250	200	100
280	200	150	50
320	150	100	-
360	100	50	-

# SL di DEFORMABILITÀ

## 4.1.2.2.2 – NTC Verifica di deformabilità

### **limiti di deformabilità:**

congruenti con le prestazioni richieste alla struttura anche in relazione alla destinazione d'uso, con riferimento alle esigenze statiche, funzionali ed estetiche.

### **valori limite:**

commisurati a specifiche esigenze e potranno essere dedotti da ***documentazione tecnica di comprovata validità***

### C4.1.2.3 - CIRCOLARE - NTC

calcolo della deformazione flessionale di solai e travi



integrazione delle curvature tenendo conto della viscosità del calcestruzzo e, se del caso, degli effetti del suo ritiro

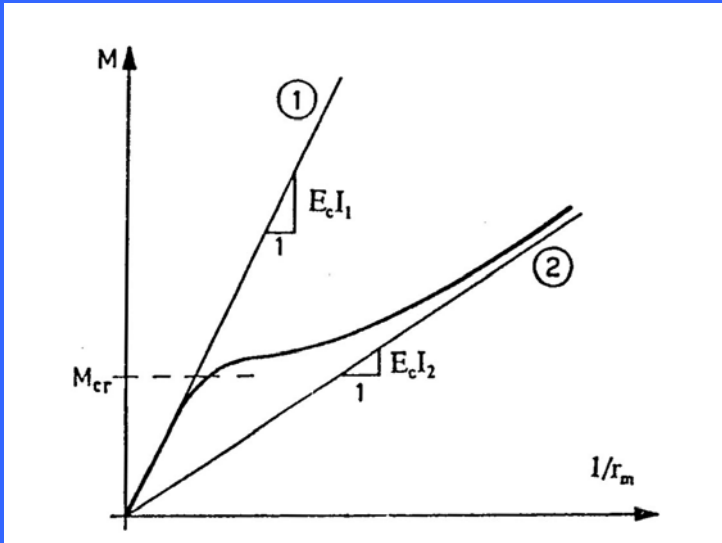
si considerano:

❖ **stato non fessurato** (sezione interamente reagente) per tutte le parti della struttura per le quali, nelle condizioni di carico considerate, le **tensioni di trazione nel calcestruzzo non superano la sua resistenza media  $f_{ctm}$**

❖ **stato fessurato** per le altre parti si fa riferimento allo stato fessurato,

*potendosi considerare l'effetto irrigidente del calcestruzzo teso fra le fessure (“tension stiffening”)*

## Tenuta in conto del tension-stiffening nello stato fessurato

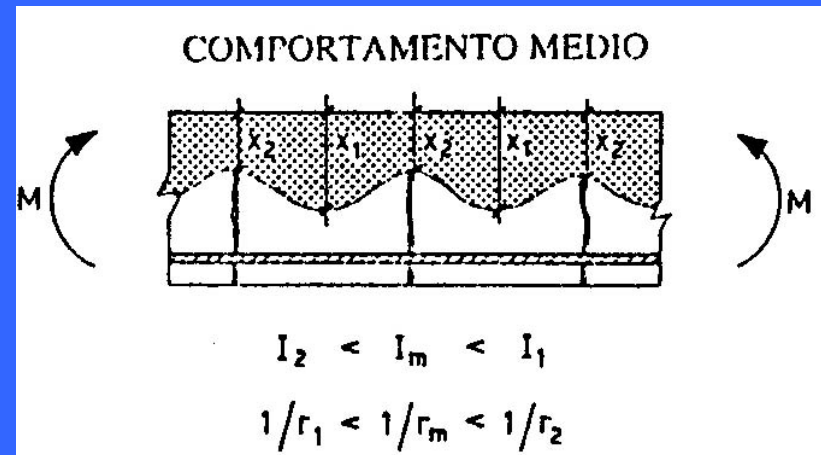


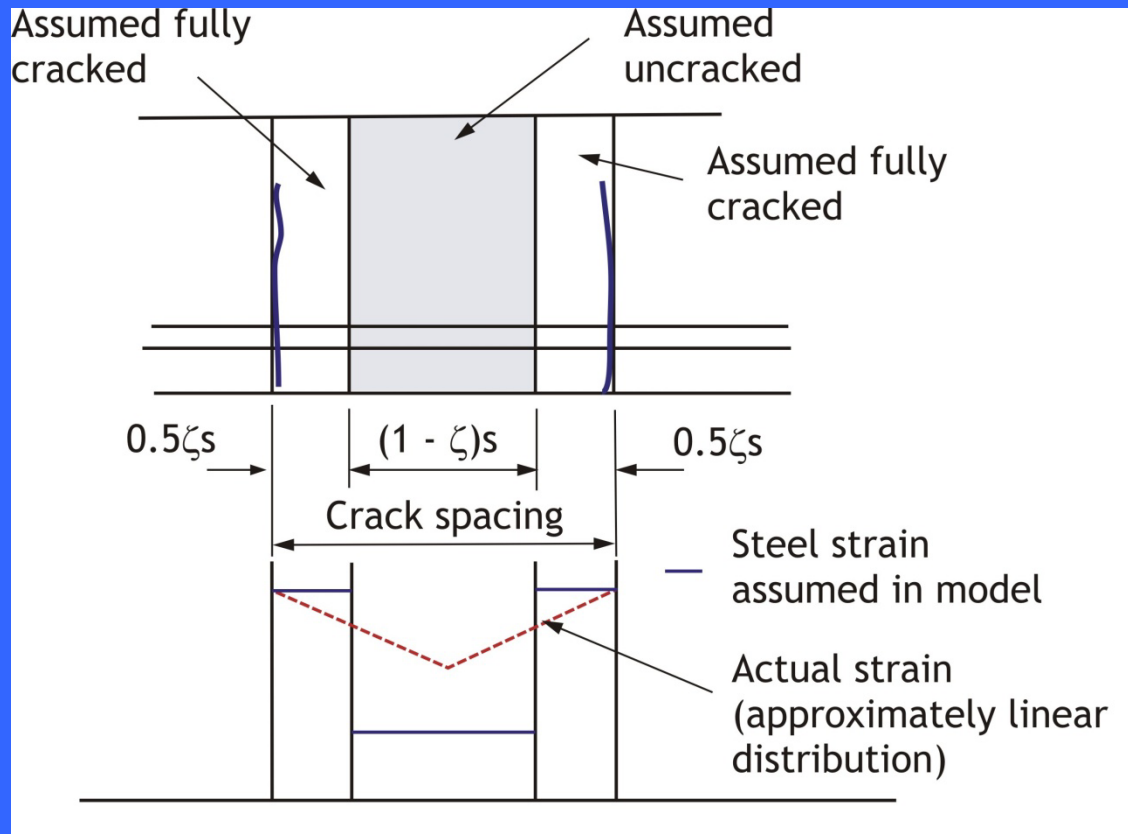
prima della fessurazione, sezione interamente reagente omogeneizzata a cls

dopo la fessurazione, risposta non-lineare

la massima curvatura si avrebbe in una sezione ideale dove si trascura completamente il calcestruzzo teso

tra le fessure la tensione di trazione nel calcestruzzo non si annulla > *tension stiffening*





una previsione adeguata per elementi inflessi si ottiene considerando il tratto compreso tra due fessure in parte non fessurato (nella zona centrale) e in parte completamente fessurato (nelle zone laterali)

## C4.1.2.3 - CIRCOLARE - NTC

### Valori limite

per la **salvaguardia dell'aspetto e della funzionalità** dell'opera le **frecce di travi e solai**, calcolate sotto la condizione quasi permanente dei carichi, non dovrebbero superare il limite di **1/250 della luce**

per l'**integrità delle pareti divisorie e di tamponamento portate**, le frecce di travi e solai, calcolate sotto la condizione quasi permanente dei carichi, non dovrebbero superare il limite di **1/500 della luce**  
*(caso di pareti divisorie in muratura)*

### C4.1.2.3 - CIRCOLARE - NTC

Per travi e solai con luci non superiori a 10 m è **possibile omettere la verifica** delle inflessioni come sopra riportata, ritenendola implicitamente soddisfatta, **se il rapporto di snellezza**  $\lambda = l / h$  tra luce e altezza **rispetta la limitazione:**

$$\lambda \leq K \left[ 11 + \frac{0,0015 \cdot f_{ck}}{\rho + \rho'} \right] \cdot \left[ \frac{500 A_{s,eff.}}{f_{yk} A_{s,calc.}} \right]$$

dove:

$f_{ck}$  è la resistenza del cls in MPa

$\rho$  e  $\rho'$  sono i rapporti d'armatura tesa e compressa

$K$  coefficiente correttivo, che dipende dallo schema strutturale

$A_{s,eff}$   $A_{s,calc}$  armatura tesa effettivamente presente e quella di calcolo nella sezione più sollecitata nella stessa sezione

$f_{yk}$  tensione di snervamento caratteristica dell'armatura (in MPa)

*(esempio) . l.*



**Tabella 4.1.I – Circolare - NTC**

<b>Sistema strutturale</b>	<b>K</b>	<b><math>\lambda_{max}</math> per cls molto sollecitato <math>\rho=1,5\%</math></b>	<b><math>\lambda_{max}</math> per cls poco sollecitato <math>\rho=0,5\%</math></b>
Travi semplicemente appoggiate, piastre incernierate mono o bidirezionali	<b>1,0</b>	<b>14</b>	<b>20</b>
Campate terminali di travi continue o piastre continue monodirezionali o bidirezionali continue sul lato maggiore	<b>1,3</b>	<b>18</b>	<b>26</b>
Campate intermedie di travi o piastre mono o bidirezionali	<b>1,5</b>	<b>20</b>	<b>30</b>
Piastre non nervate sostenute da pilastri (snellezza relativa alla luce maggiore)	<b>1,2</b>	<b>17</b>	<b>24</b>
Mensole	<b>0,4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>
<p>snellezze limite valutate ponendo, nella formula C4.1.13, <math>f_{ck}=30</math> MPa e</p> $\left[ \frac{500A_{s,eff.}}{f_{yk}A_{s,calc.}} \right] = 1$			

**SLU**

**INSTABILITÀ PER DEFORMAZIONE**

#### 4.1.2.1.7.2 – NTC Verifiche di stabilità per elementi snelli

**Limite di snellezza al di sotto del quale non è necessario computare gli effetti del 2° ordine nella verifica**

$$\lambda_{lim} = 15,4 C / \sqrt{\nu} \quad [4.1.33]$$

$$\lambda = l_0 / i$$

$l_0$  = lunghezza libera d'inflessione dell'elemento

$i$  = raggio d'inerzia della sezione

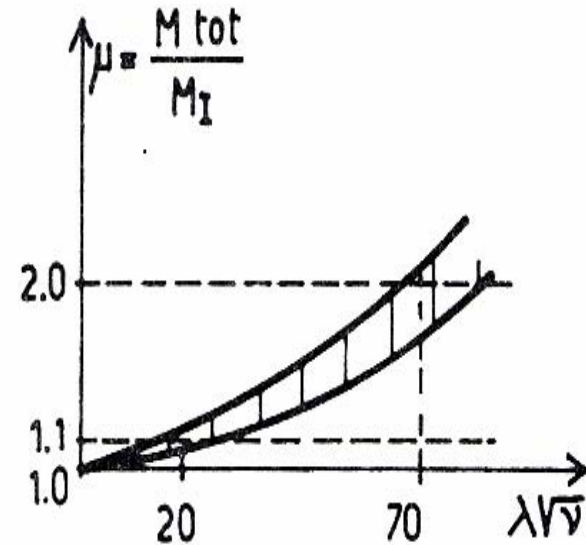
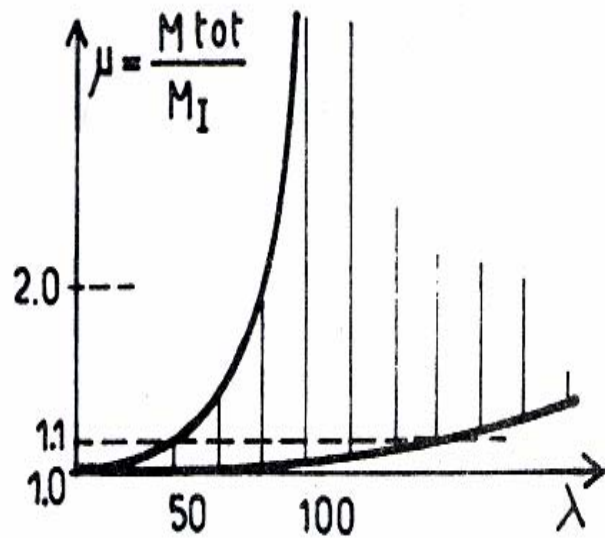
$\nu = N_{Ed} / (Ac f_{cd})$  azione assiale adimensionale

$C = 1,7 r_m$  coefficiente per tener conto della flessione iniziale

$r_m = M_{01} / M_{02}$  rapporto fra i due  $M_0$  alle estremità del pilastro  
positivo se discordie con  $|M_{01}| > |M_{02}|$

eccentricità minima:  $l_0 / 300$

Effetti dell'introduzione della  
*azione assiale adimensionale*  $\nu = N_{Ed} / (Ac f_{cd})$   
 nel limite di snellezza  $\lambda_{lim}$



### 4.1.2.1.7.3 – NTC Metodi di verifica

#### *Analisi elastica lineare*

con

- coefficienti elastici corretti con i contributi del 2° ordine  
espressioni linearizzate in  $N_{ed}$

- rigidezza flessionale ridotta

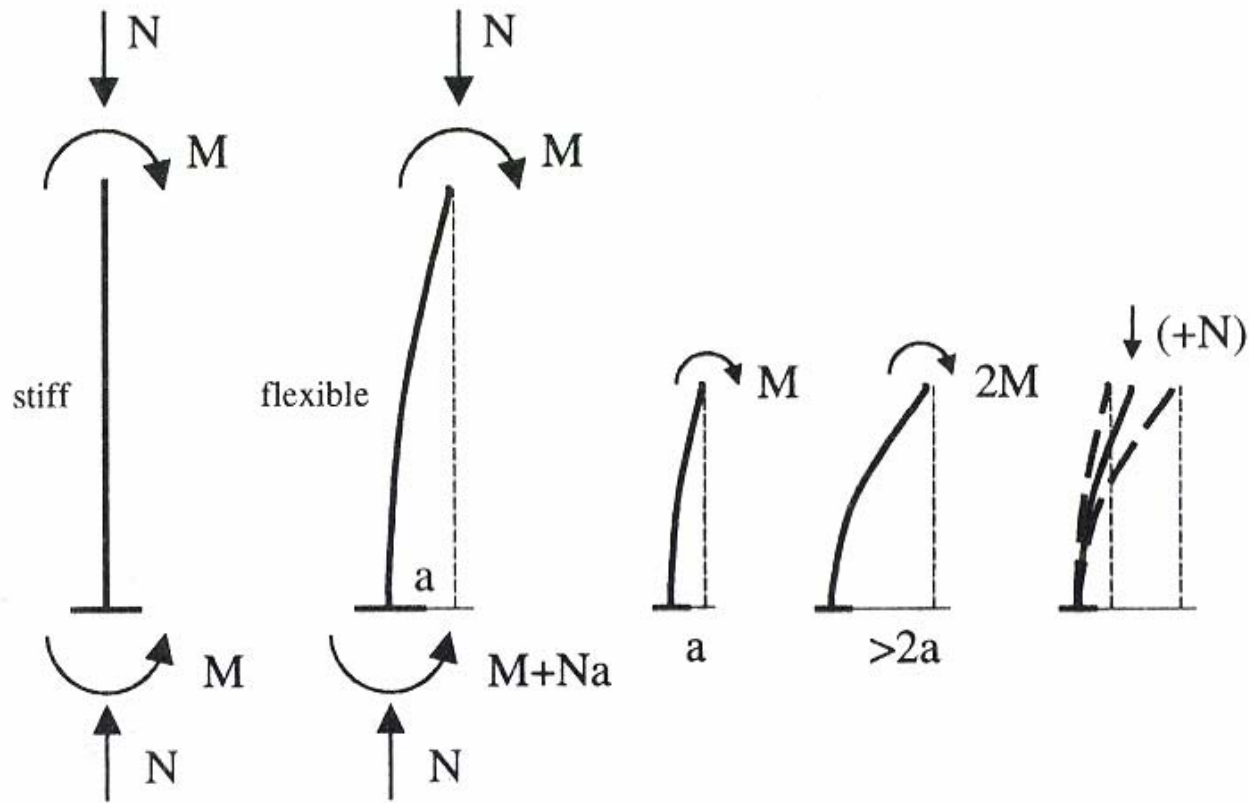
$$EI = 0,3 E_{cd} I_c / (1 + 0,5 \varphi)$$

## ***Analisi non lineare***

**con adeguati modelli non lineari di comportamento dei materiali**

**Oltre al metodo generale basato sull'integrazione numerica delle curvature, si possono utilizzare metodi di elaborazione algebrizzati basati sulla concentrazione dell'equilibrio nelle sezioni critiche – per esempio il metodo della *colonna modello* – per i quali si rimanda a documenti di comprovata validità.**

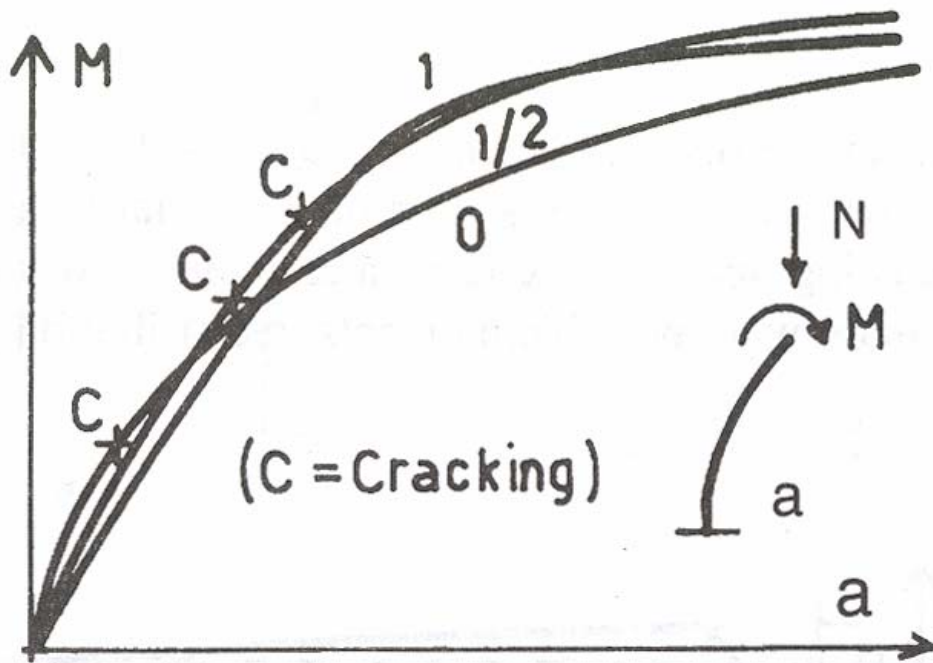
# Effetti delle non linearità *geometrica e meccanica*



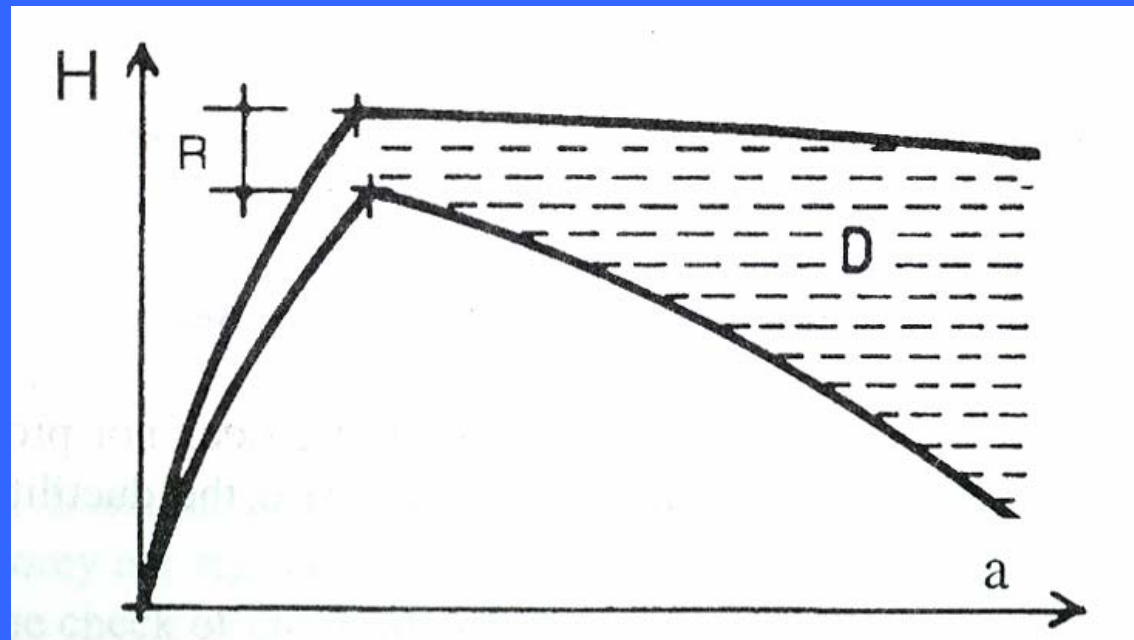
a) Geometric nonlinearity

b) Mechanical nonlinearity

## effetti della precompressione sulla snellezza

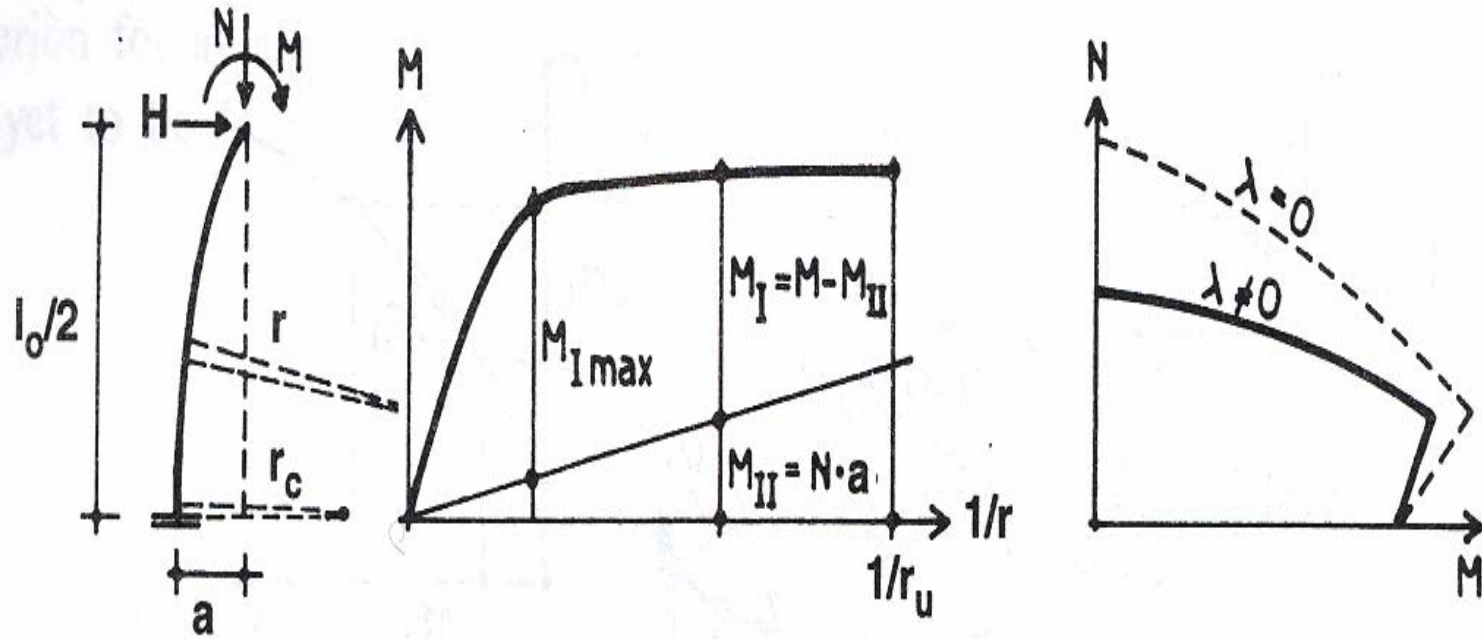


## effetti della snellezza sulla duttilità





# Metodo della *Colonna Modello* e *Diagrammi di Interazione Ridotti*



$$M_{II} \sim N \cdot 0,4 (1/r) H^2$$

# Pressoflessione deviata

