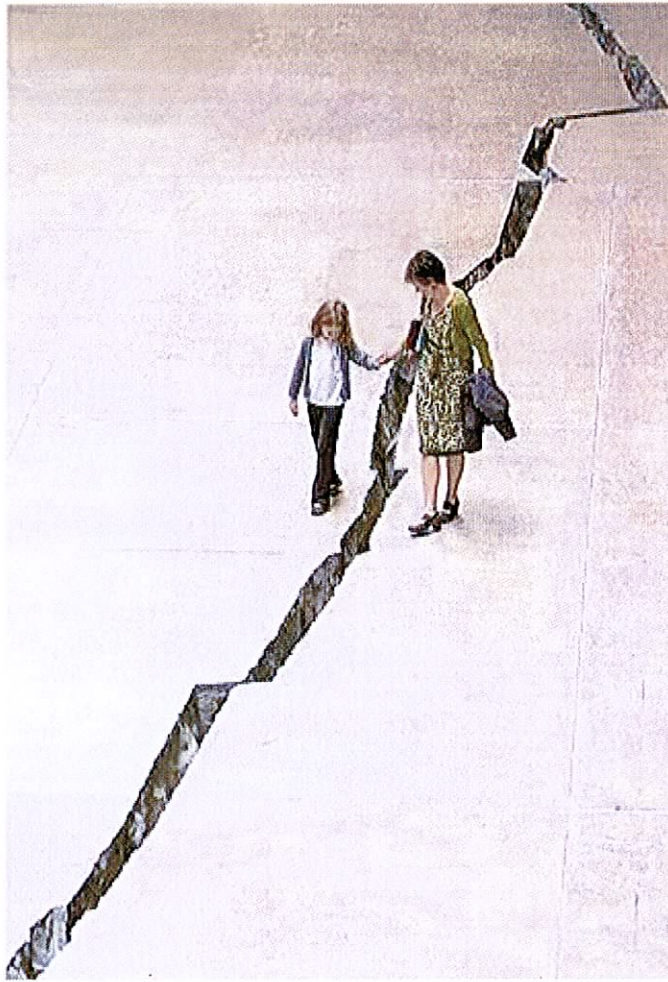


## LIMITAZIONE AMPIEZZA DI FESSURA



**Doris Salcedo - Fessura lunga 167 metri sul pavimento del museo Tate Modern di Londra**

## ALCUNE TIPOLOGIE DI FESSURE

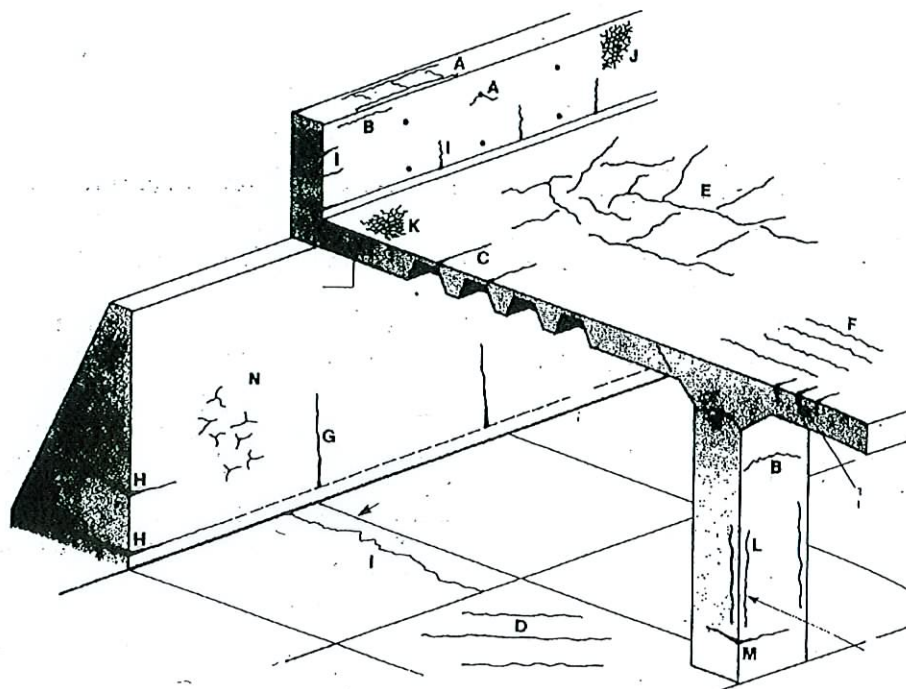


Fig. 3. Schema delle diverse tipologie di fessure.

Tabella 2. Classificazione delle fessure intrinseche.

tipo e/o causa		posizione usuale	tempo di apparizione
sudorazione (bleeding)	A	sopra le armature	10 minuti ÷ 3 ore
	B	testa delle colonne	
	C	cambio sezione	
ritiro plastico (evaporazione rapida)	D	sulle diagonali	30 minuti ÷ 6 ore
	E	casuali	
	F	sopra le armature	
contrazioni termiche (calore di idratazione)	G	pareti spesse	1 giorno ÷ 3 mesi
	H	solette spesse	
ritiro eccessivo	I	elementi spessi con giunti inefficienti	mesi e settimane
irregolarità (casceforme impermeabili)	J	calcestruzzo a vista	1 ÷ 7 giorni talvolta molto più tardi
	K	solette	
corrosione delle armature	L	in corrispondenza	> 2 anni
	M	delle armature	
reazioni alcali-inerti	N	parti umide	> 5 anni

(Cosenza, Pece)

# ALCUNE TIPOLOGIE DI FESSURA

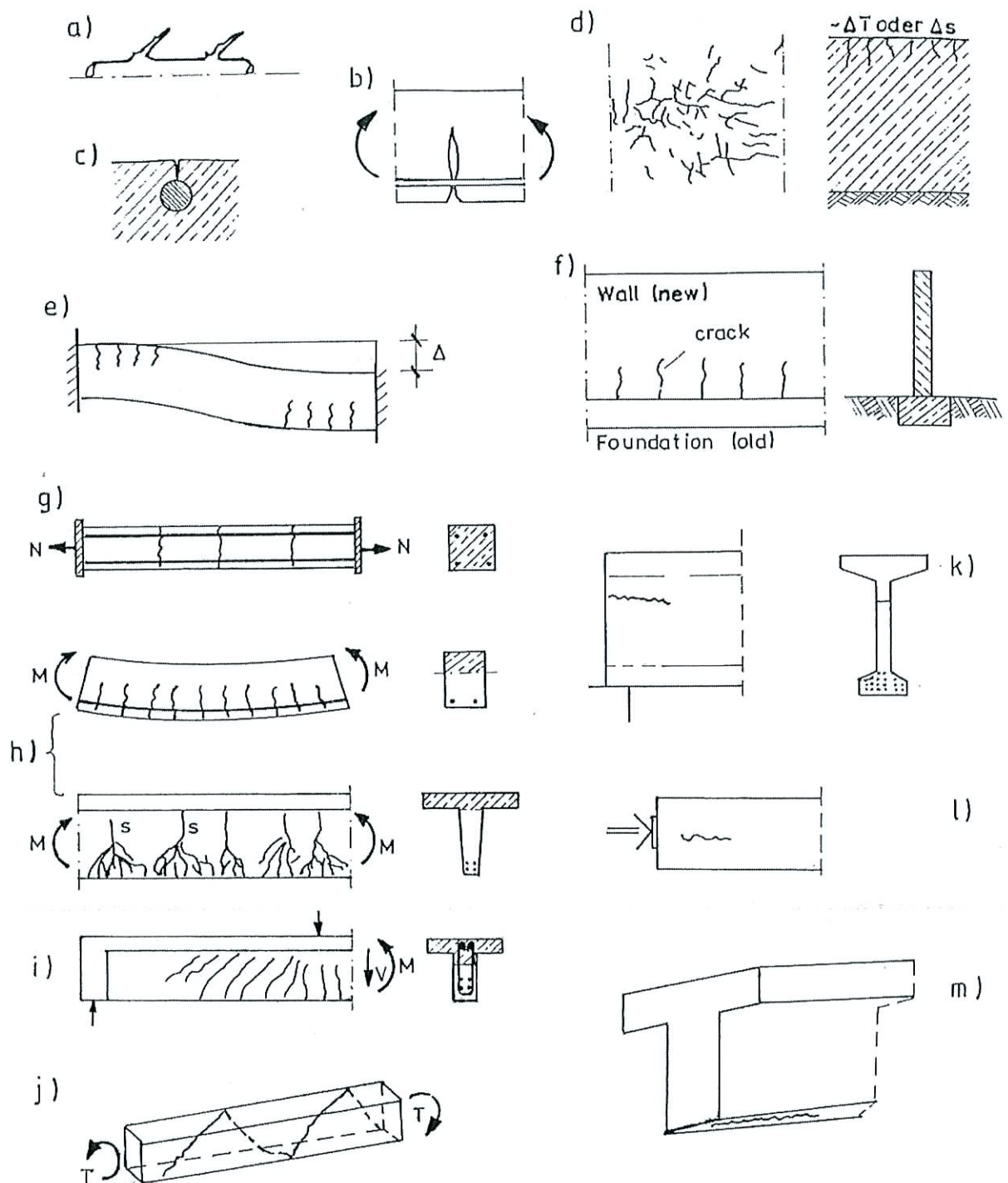


Fig. 4.3-3: Types of cracks in concrete structures [extended from Leonhardt (1976a)]

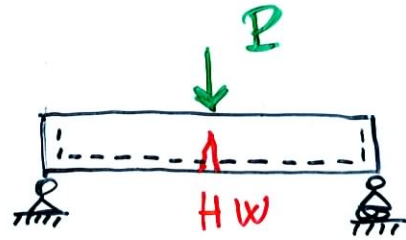
- a) micro-cracks
- c) settlement of plastic concrete
- e) cracks due to diff. settlements
- g) tensile cracks
- i) shear cracks
- k) spalling crack
- m) splitting crack in the anchorage zone

- b) shape of crack
- d) hydration heat or shrinkage cracks
- f) shrinkage cracks in connected members
- h) bending cracks
- j) torsional cracks
- l) bursting crack

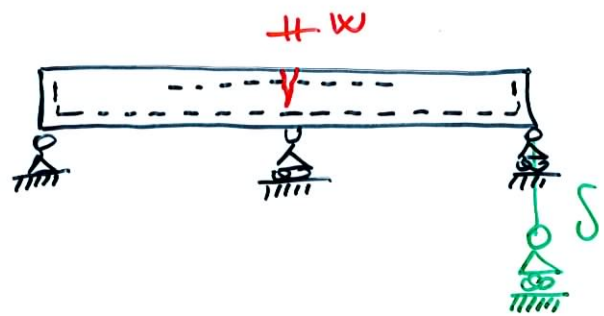
(Balzani)

## ALCUNE TIPOLOGIE DI FESSURE

- AZIONI ESPLICITE



- AZIONI IMPLICITE



NTC calcola  $w$  solamente per azioni  
implicite o esplicite



**CALCOLO  $w$**

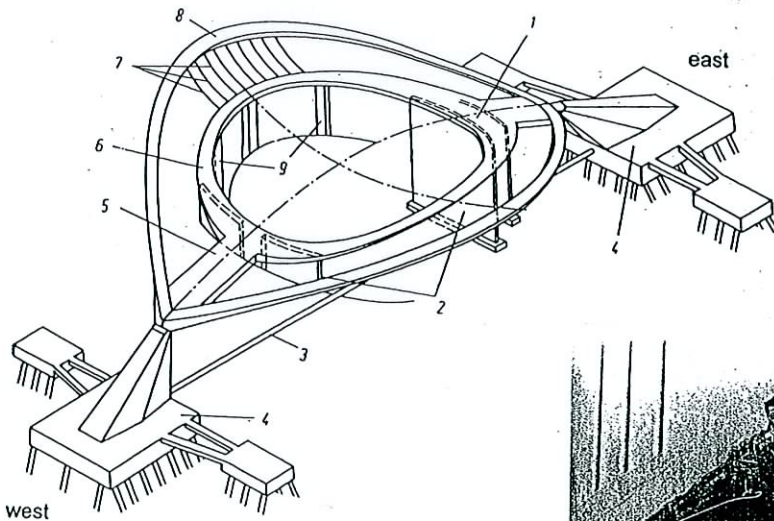


# LIMITAZIONE W SECONDO EC2.

C.A.		C.A.P.
Valori raccomandati di $w_{max}$ (mm)		
Classe di esposizione	Elementi di calcestruzzo armato normale e precompresso con cavi non aderenti	Elementi precompressi con cavi aderenti
	Combinazione di carico quasi-permanente	Combinazione di carico frequente
X0, XC1	0,4 <sup>1</sup>	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 <sup>2</sup>
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3		Decompressione

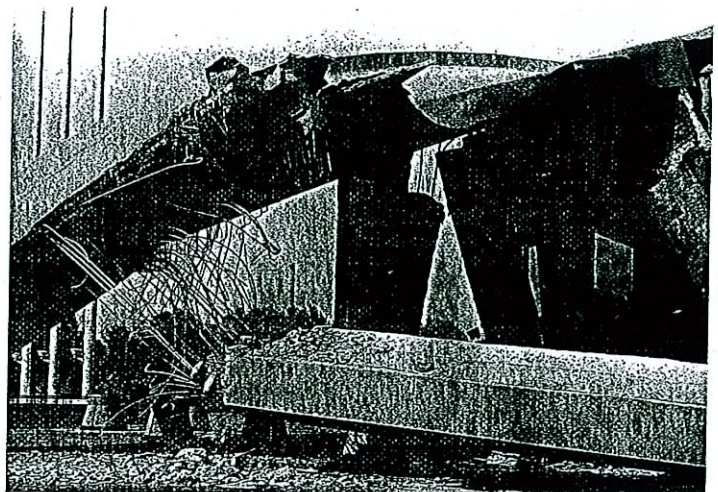
Nota 1 - Per le classi di esposizione X0, XC1, l'ampiezza delle fessure non influenza la durabilità e questo limite è posto per garantire un aspetto accettabile.  
In assenza di requisiti relativi all'aspetto questo limite può essere mitigato.

Nota 2 - Per queste classi di esposizione, inoltre, si raccomanda che la decompressione sia verificata sotto la combinazione di carico quasi-permanente.



Berlin Congress Hall

Nelle strutture in CAP  
il problema della  
fessurazione è più  
importante



## LIMITAZIONE W SECONDO NTC

Tab. 1. Limiti all'ampiezza delle fessure – armatura poco sensibile alla corrosione

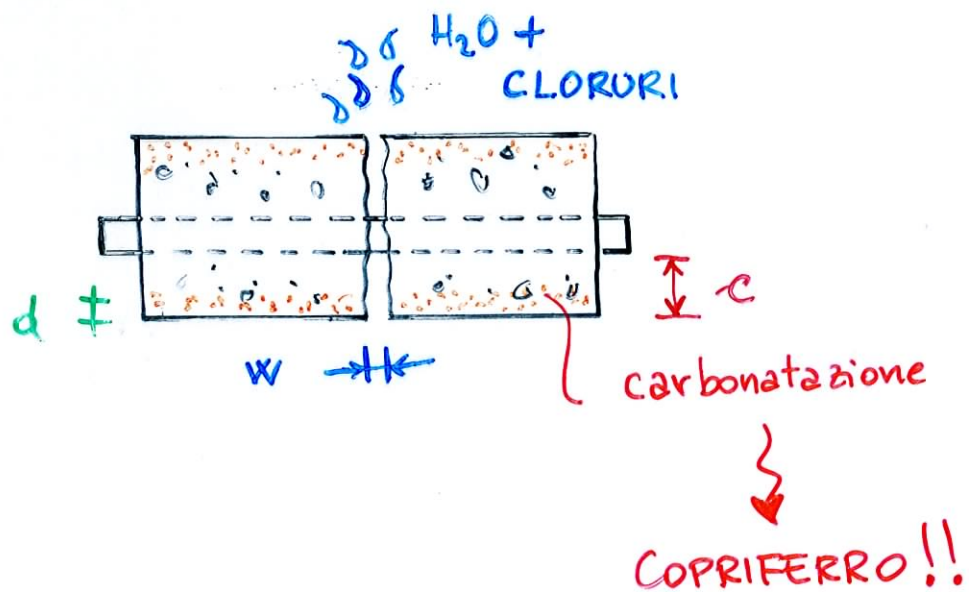
Condizioni ambientali	Combinazione di carico	
	frequente	quasi permanente
Ordinarie: classe X0, XC1, XC2, XC3, XF1	$w_k \leq 0.4 \text{ mm}$	$w_k \leq 0.3 \text{ mm}$
Aggressive: classe XC4, XD1, XS1, XA1, XA2, XF2, XF3	$w_k \leq 0.3 \text{ mm}$	$w_k \leq 0.2 \text{ mm}$
Molto aggressive: classe XD2, XD3, XS2, XS3, XA3, XF4	$w_k \leq 0.2 \text{ mm}$	$w_k \leq 0.2 \text{ mm}$

Limiti +  
restrittivi  
EC2

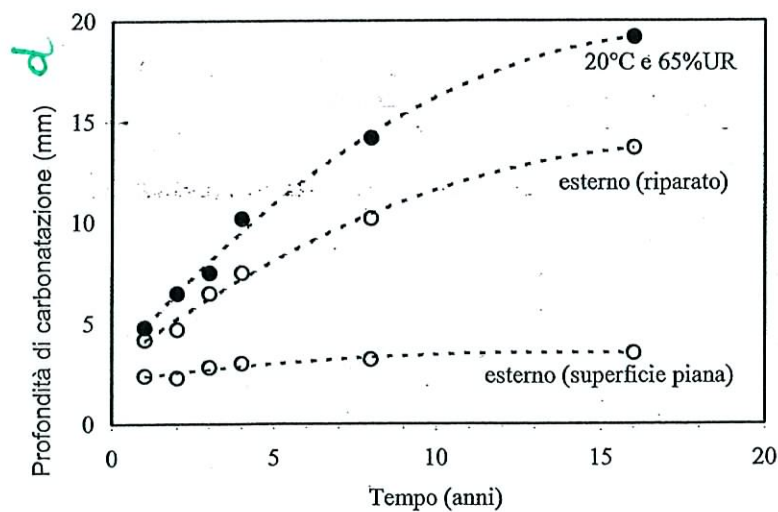
Tab. 2. Limiti all'ampiezza delle fessure – armatura sensibile alla corrosione

Condizioni ambientali	Combinazione di carico	
	frequente	quasi permanente
Ordinarie: classe X0, XC1, XC2, XC3, XF1	$w_k \leq 0.3 \text{ mm}$	$w_k \leq 0.2 \text{ mm}$
Aggressive: classe XC4, XD1, XS1, XA1, XA2, XF2, XF3	$w_k \leq 0.2 \text{ mm}$	decompressione
Molto aggressive: classe XD2, XD3, XS2, XS3, XA3, XF4	formazione fessure	decompressione

## DURABILITA' E ANPIEZZA DI FESSURA

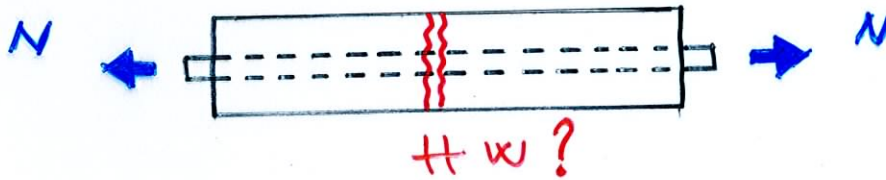


La fessurazione compromette la durabilit  solo in presenza di umidit  (+ carbonatazione o cloruri)





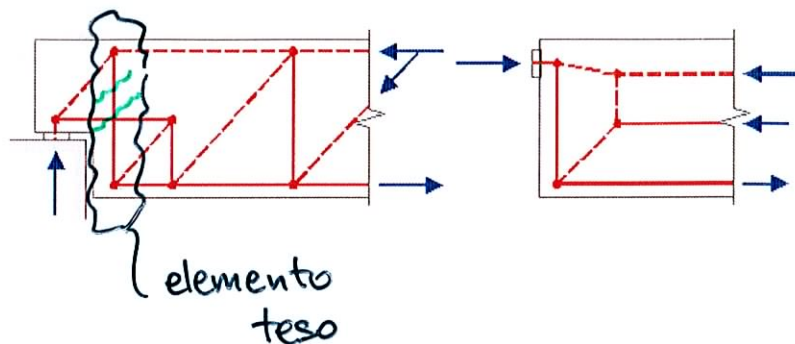
# FESSURAZIONE DI ELEMENTI TESI



- Comprendere il problema fessurazione
- Travi reticolari in c.a.

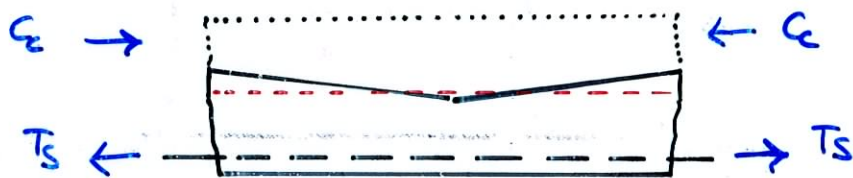
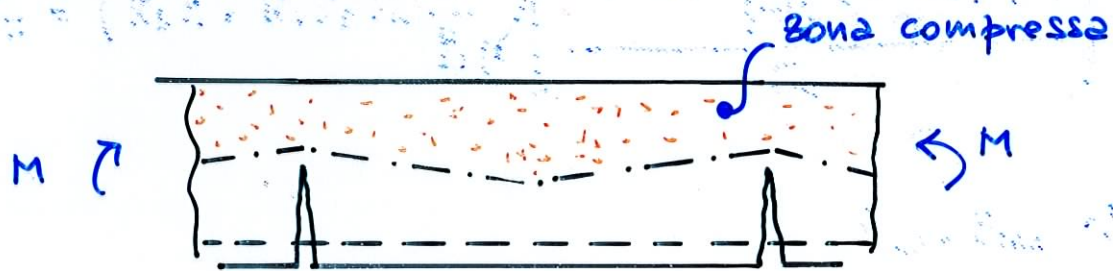


- Elementi tesi di modelli tirante-puntone





## FESSURAZIONE NEGLI ELEMENTI INFLESSI



$A_{c, eff}$

Analizzo le zone tese come se fosse  
un tirante di sezione  $A_{c, eff}$

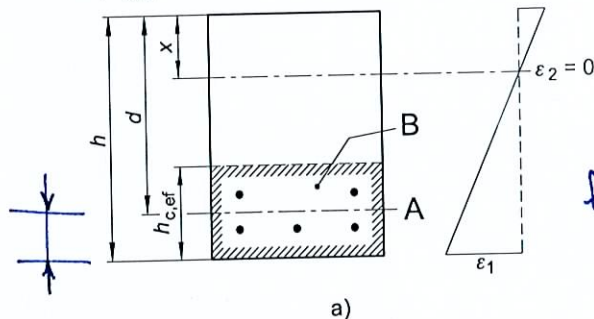
# AREA CALCESTRUZZO EFFICACE

figura 7.1

## Area tesa efficace (casi tipici)

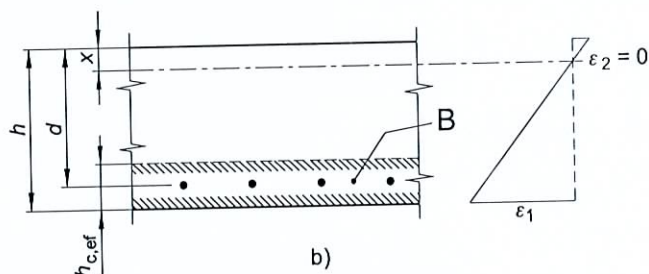
Legenda

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

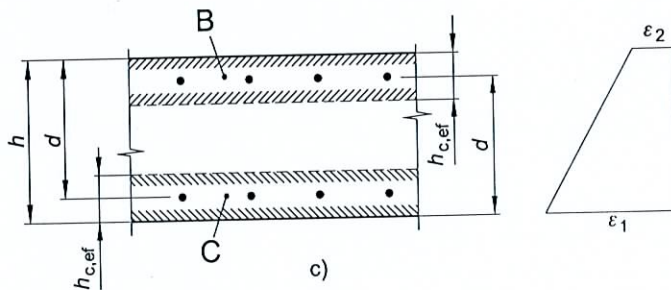


$$h_{c,ef} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2.5(h-d) \\ (h-x)/3 \\ h/2 \end{array} \right\}$$

- b) Piastra **PIASTRA**  
 B Area tesa efficace,  $A_{c,eff}$



- c) Elemento in trazione **ELEMENTO TESO**  
 B Area tesa efficace di estradosso,  $A_{ct,eff}$   
 C Area tesa efficace di intradosso,  $A_{cb,eff}$



# FESSURAZIONE ELEMENTO TESO

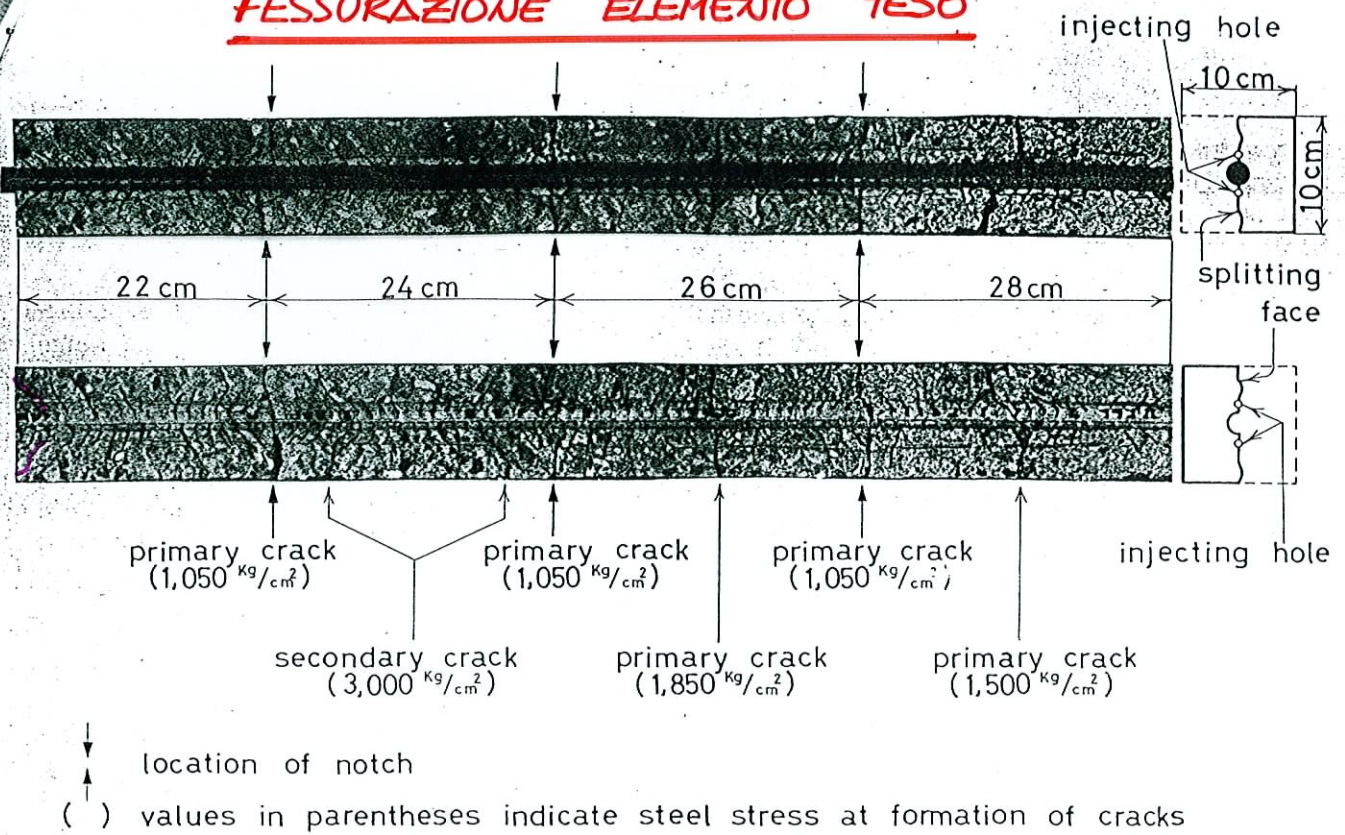


Fig. 2a—Internal crack and secondary crack with 3/4 in. (19 mm) bar, longitudinal splitting face and cross section

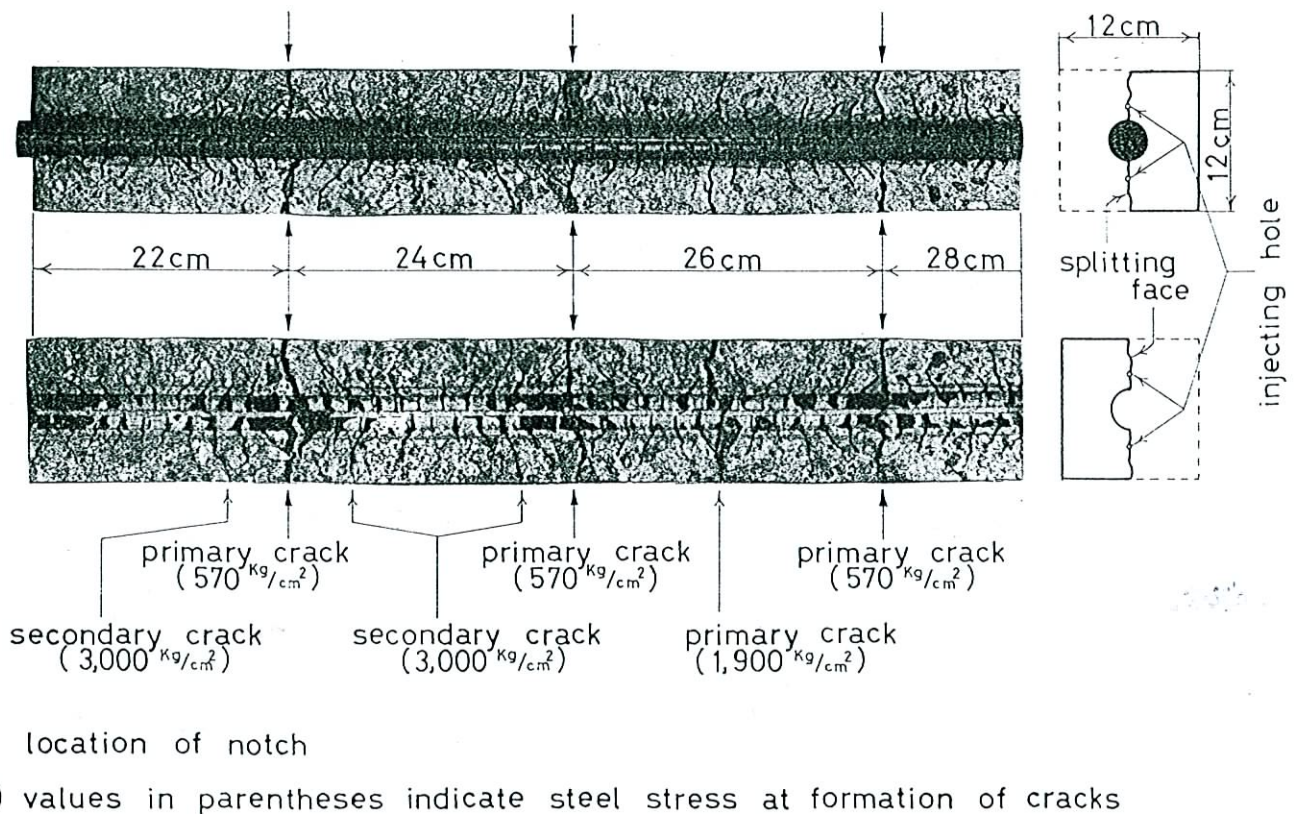
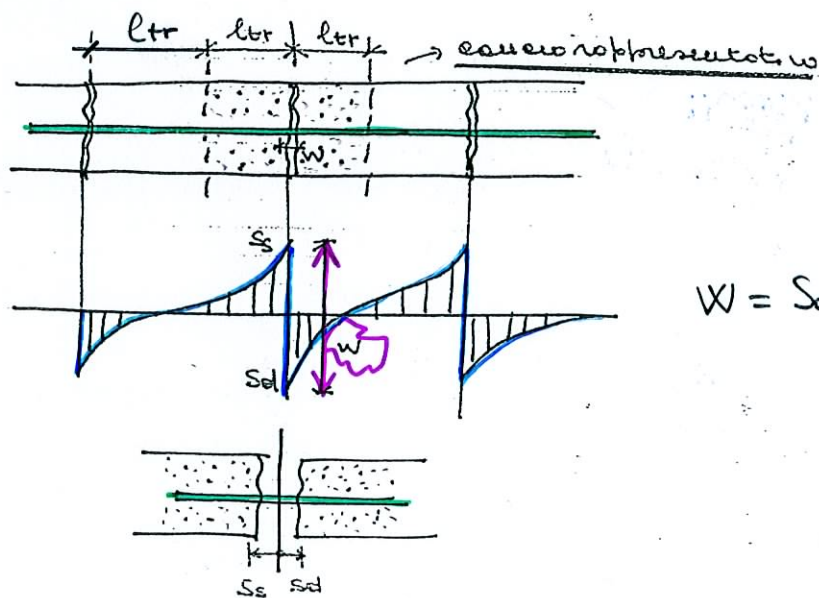


Fig. 2b—Internal crack and secondary crack with 1.26 in. (32 mm) bar, longitudinal splitting face and cross section



# CALCOLO AMPIEZZA DI FESSURA $W$



$$W = S_d + S_s \approx 2S \quad \text{se } S_d = S_s = S$$

$$S = \frac{u_s - u_c}{l_{tr} \cdot E_{cm}} = \frac{l_{tr} \cdot E_{sm}}{l_{tr} \cdot E_{cm}}$$

$$W_m = 2l_{tr} (E_{sm} - E_{cm})$$

~~~~~

distanza fessure medie

$$W_k = 1,7 W_m \quad \text{valore caratt. ampiezza fessura}$$

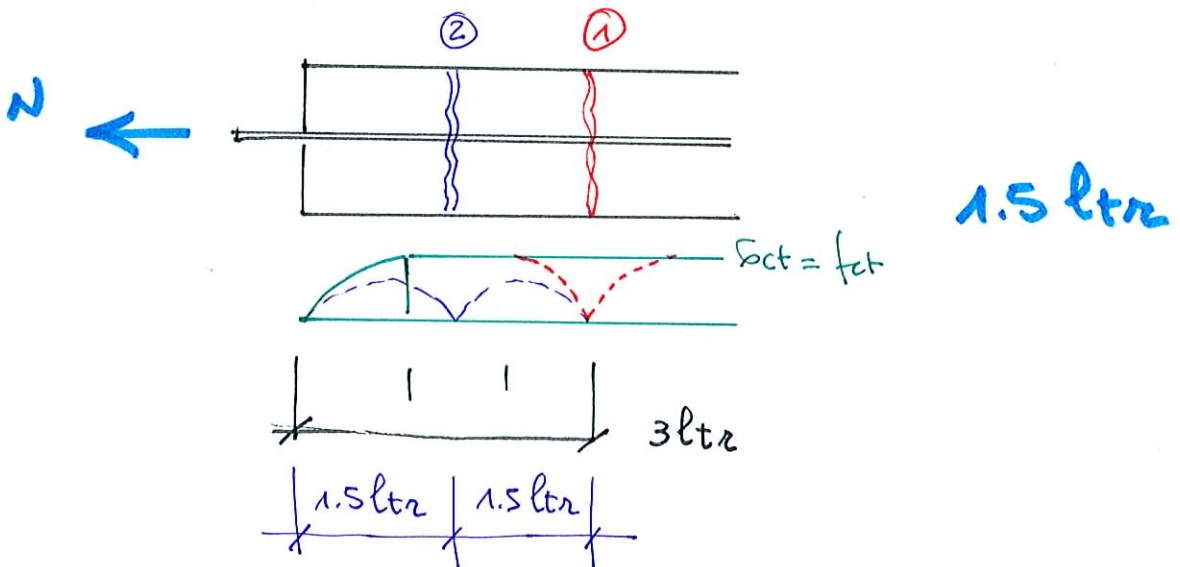
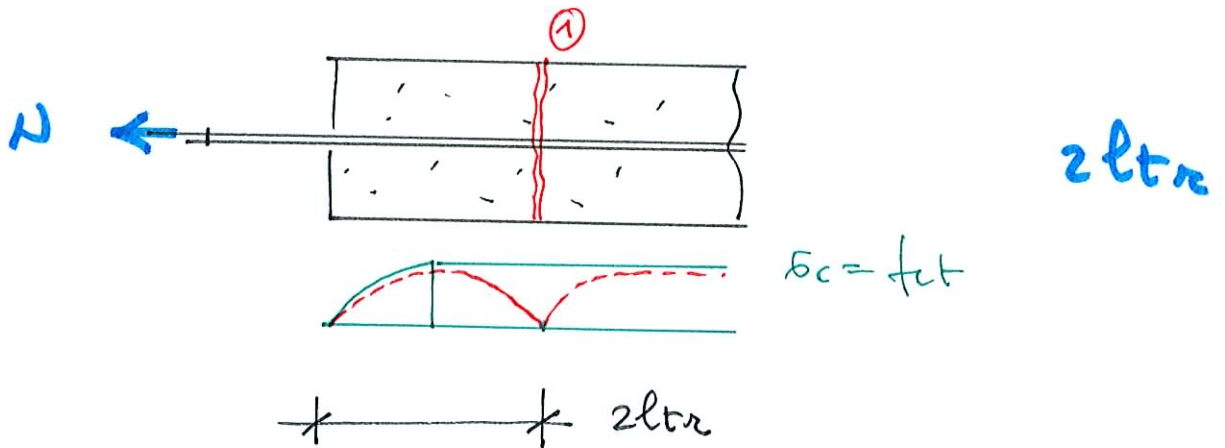
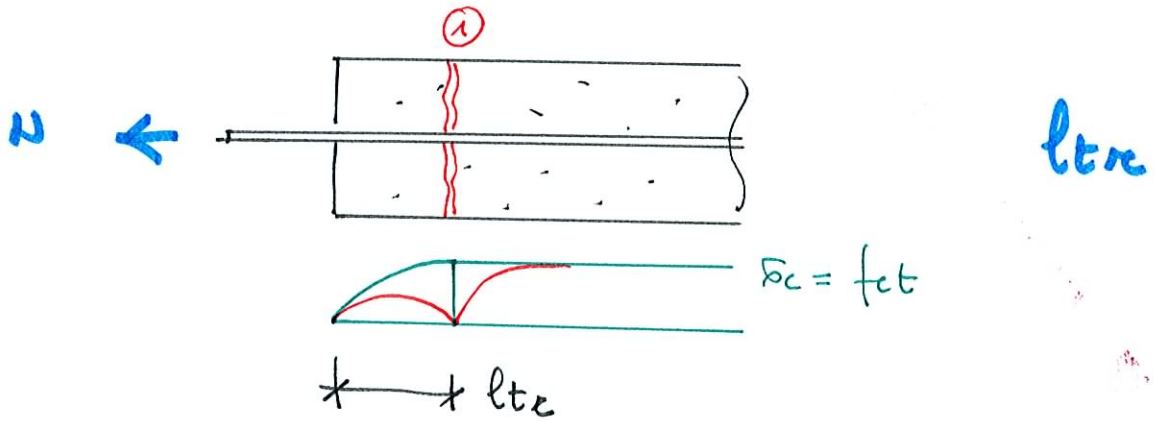
|                                          |
|------------------------------------------|
| $W_k = \sigma_{s,max} (E_{sm} - E_{cm})$ |
|------------------------------------------|

VALORE CARATT.  
AMPIEZZA FESSURA

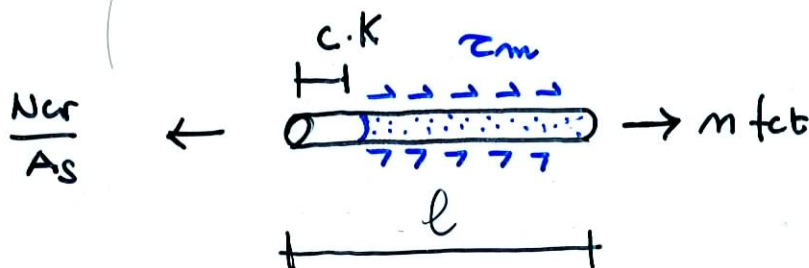
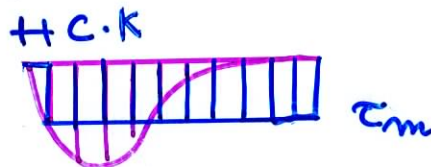
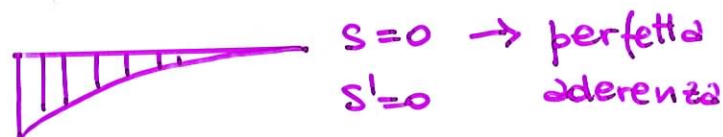
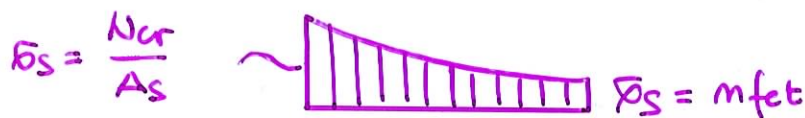
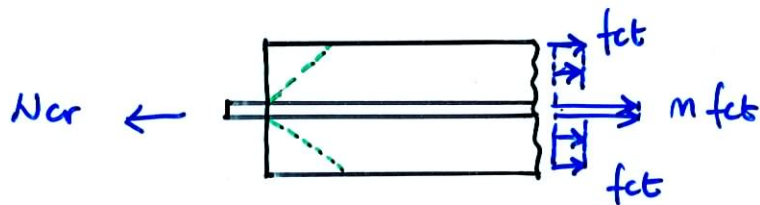
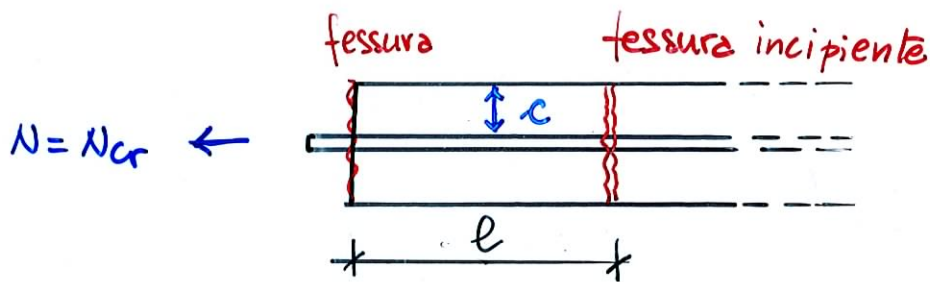
(EC2: 2005)  
(NTC)

# DISTANZA FESSURA $l$

$$l_{tr} \leq l \leq 2l_{tr}$$



# DISTANZA FRA LE FESSURE $l$



$$N_{cr} = fct A_c + m fct A_s = m fct A_s + \tau_m \pi \phi (l - k_c)$$

$$l = k_c + \frac{fct \phi}{4 \tau_m \rho} \quad \rho = \frac{A_s}{A_c}$$



## DISTANZA TRA LE FESSURE : EC2

$$s_{re, max} = k_3 c + \frac{f_{ct}}{4 \tau_m} \frac{\phi}{\rho}$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{k_1 k_2 k_4}$

|                                                       |                            |
|-------------------------------------------------------|----------------------------|
| $s_{re, max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \frac{\phi}{\rho}$ | (EC2: 2005)<br>(CIRCOLARE) |
|-------------------------------------------------------|----------------------------|

$$k_1 = \begin{cases} 0.8 & \text{barre aderenza migliorata} \\ 1.6 & \text{barre lisce} \end{cases}$$

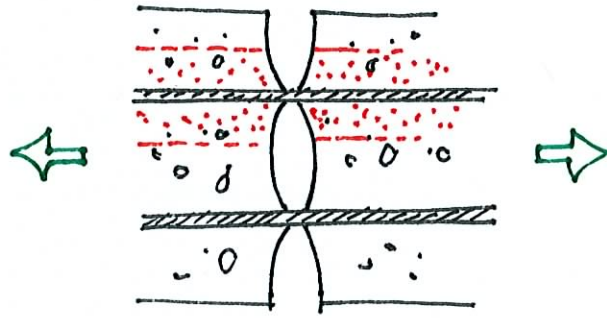
$$k_2 = \begin{cases} 1.0 & \text{trazione pura} \\ 0.5 & \text{flessione} \\ \frac{E_1 + E_2}{2 E_1} & \text{tensoflessione} \end{cases}$$



$$k_4 = 1.7/4 = 0.425$$

$$k_3 = 1.7 \cdot 2 = 3.4$$

## EFFETTO DISTANZA BARRE ARMATURA



Se la spaziatura dell'armatura aderente è maggiore di  $5(c + \phi/2)$  (vedere figura 7.2) oppure se non è presente armatura aderente entro la zona tesa, si può stimare un limite superiore per l'ampiezza delle fessure assumendo una distanza massima tra le fessure:

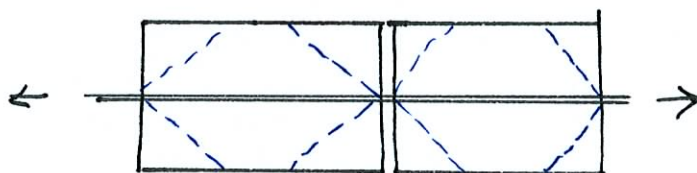
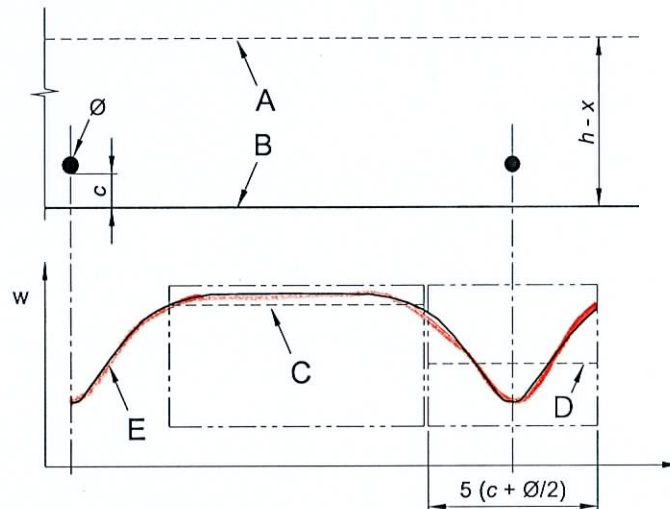
$$S_{r, \max} = 1.3 (h - x)$$

figura 7.2

Ampiezza delle fessure,  $w$ , in corrispondenza della superficie del calcestruzzo in funzione della distanza dalle barre

Legenda

- A Asse neutro
- B Superficie del calcestruzzo teso
- C Distanza tra le fessure prevista dall'espressione (7.14)
- D Distanza tra le fessure prevista dall'espressione (7.11)
- E Ampiezza effettiva della fessura



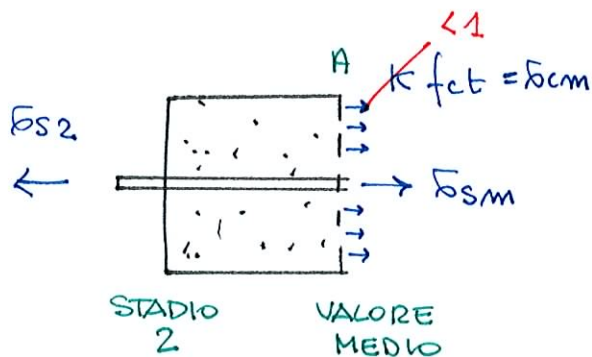
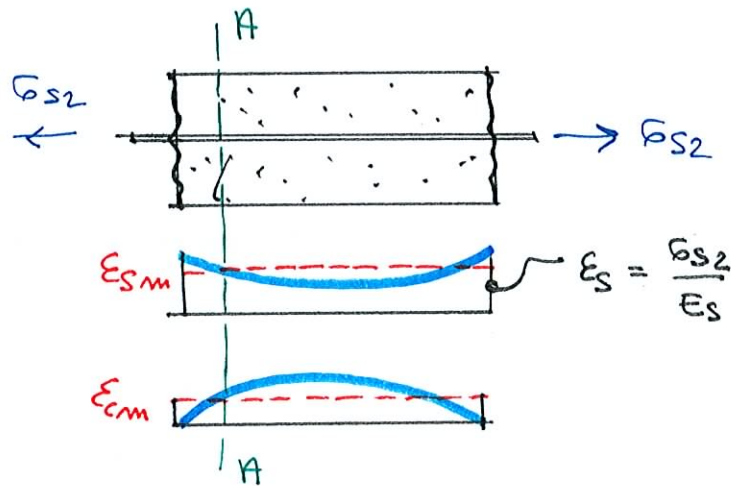
Importanza  
diffusione



**COPRIFERRO**

## CALCOLO $\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$ (EC2)

$\epsilon_{sm}$  ed  $\epsilon_{cm}$   
dipendono  
da aderenza



$$\sigma_{s2} A_s = \sigma_{sm} A_s + k f_{ct} A_c$$

$$\sigma_{sm} = \frac{\sigma_{s2} A_s - k f_{ct} A_c}{A_s}$$

$$\epsilon_{cm} = \frac{\sigma_{cm}}{E_c} = \frac{k f_{ct}}{E_c}$$

$$\epsilon_{sm} = \frac{\sigma_{sm}}{E_s} = \frac{\sigma_{s2}}{E_s} - \frac{k f_{ct}}{E_s} \frac{A_c}{A_s}$$

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_{s2}}{E_s} - \frac{k f_{ct}}{E_s} \left( 1 + \frac{E_s}{E_c} \frac{A_s}{A_c} \right) \frac{A_c}{A_s}$$

$\underbrace{\quad}_m \quad \underbrace{\quad}_g \quad \underbrace{\quad}_{1/g}$

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s}{E_s} - \frac{k_t f_{ct,eff} (1 + m \rho_{eff})}{\rho_{eff} E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

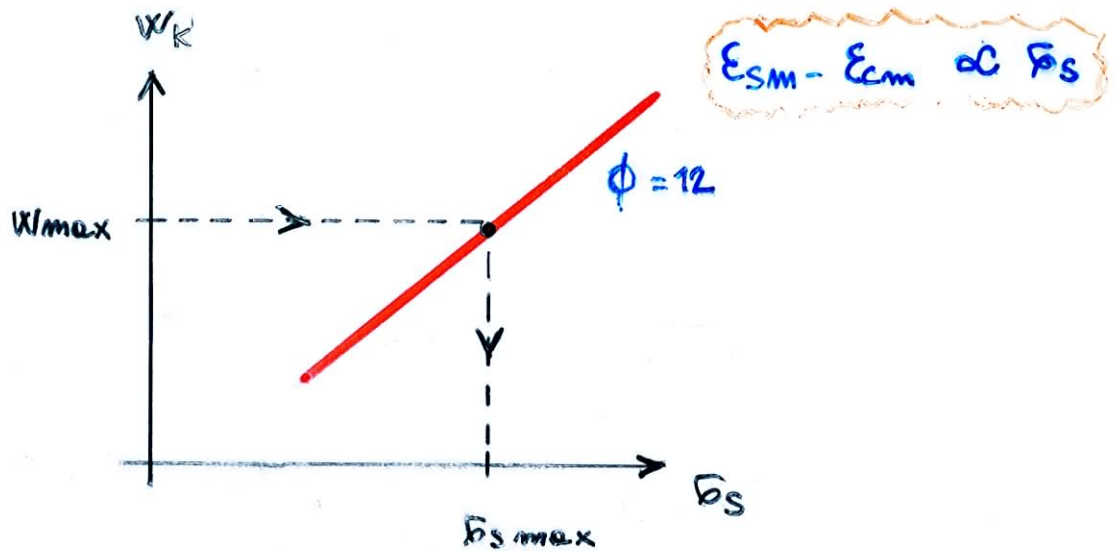
[EC2: 2005]

Nell'espressione non compare direttamente  
la tensione di aderenza  $\tau \rightsquigarrow$  coeff.  $k_t$

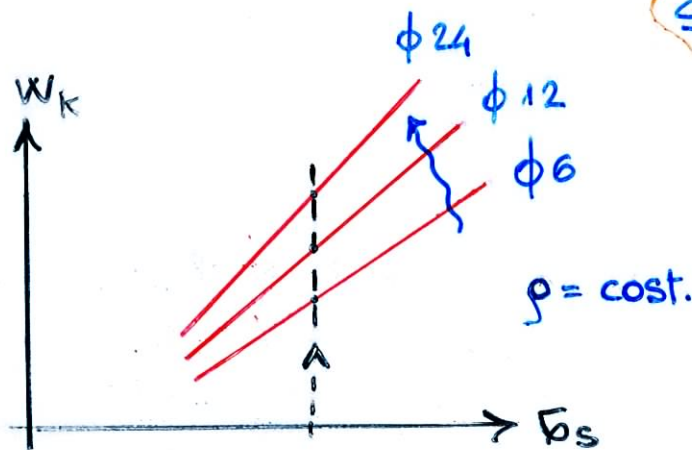


## DIPENDENZA DI $w$ DA $\sigma_s$ E $\phi$

$$w_k = \left( k_3 c + k_1 k_2 k_4 \frac{\phi}{\rho_{eff}} \right) \left[ \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct}}{\rho_{eff}} (1 + \alpha_e \rho_{eff})}{E_s} \right] \quad (EC2: 2005)$$



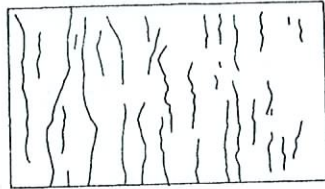
- Per limitare  $w$  devo limitare  $\sigma_s$



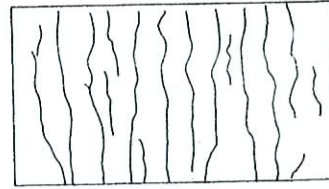
- Per limitare  $w$ , a parità di  $\rho$ , devo usare  $\phi$  piccoli

# QUADRO FESSURATIVO : IMPORTANZA % ARMATURA

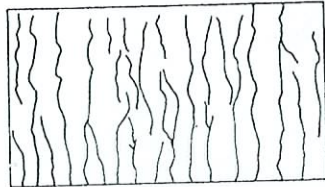
P



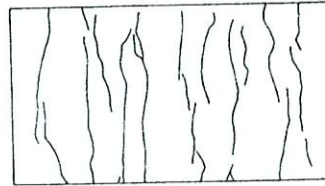
(a) 25 mm (1 in) bars,  $\rho = 2.36\%$



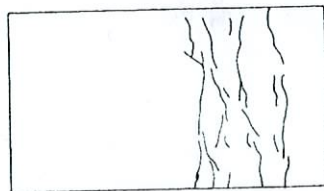
(b) 20 mm (0.79 in) bars,  $\rho = 1.5\%$



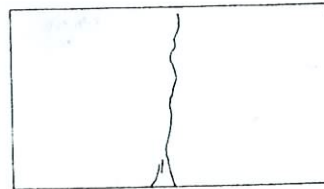
(c) 16 mm (0.63 in) bars,  $\rho = 0.96\%$



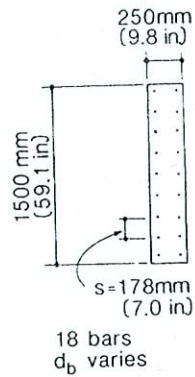
(d) 12 mm (0.47 in) bars,  $\rho = 0.54\%$



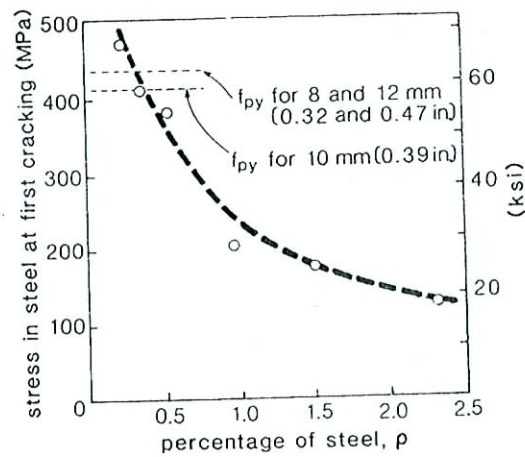
(e) 10 mm (0.39 in) bars,  $\rho = 0.38\%$



(f) 8 mm (0.32 in) bars,  $\rho = 0.24\%$



(g) Specimen details



(h) Stress in reinforcement at onset of cracking

# QUADRO FESSURATIVO

IMPORTANZA

STAFFE

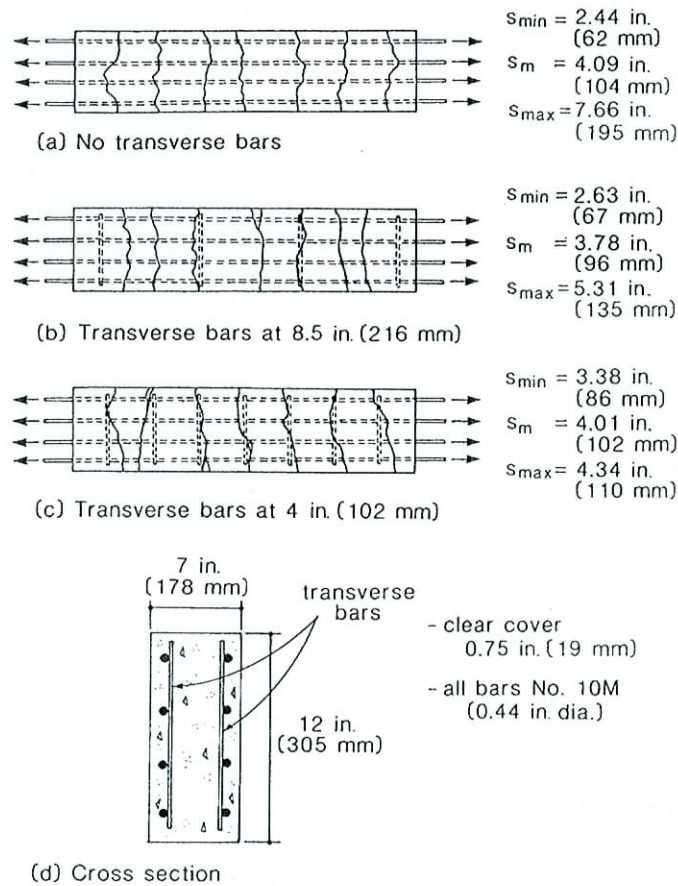


Figure 4-22 Influence of transverse bars on crack spacings. Adapted from Rizkalla, Hwang, and El Shahawi (Ref. 4-14).

IMPORTANZA

DIAMETRO

BARRE

Ø

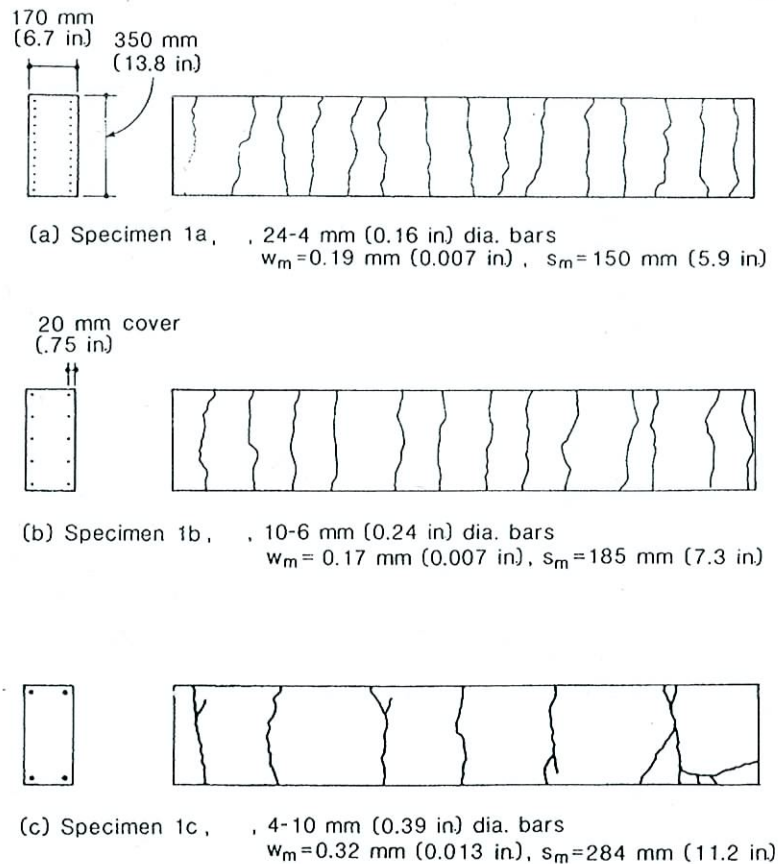
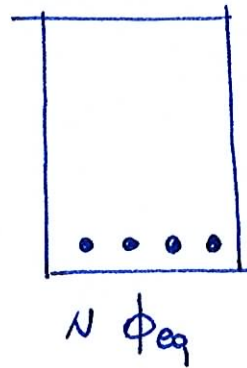
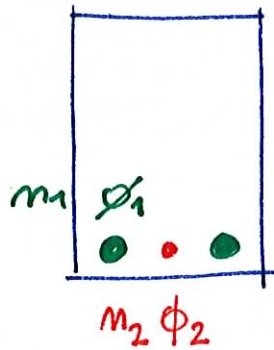


Figure 4-26 Influence of distribution of reinforcement on crack patterns for members with 0.5% reinforcement. Adapted from Falkner (Ref. 4-19).



## DIAMETRO EQUIVALENTE



Area 
$$m_1 \frac{\pi \phi_1^2}{4} + m_2 \frac{\pi \phi_2^2}{4} = N \frac{\pi \phi_{eq}^2}{4} = N \pi \phi_{eq} \frac{\phi_{eq}}{4}$$

Perimetro 
$$m_1 \pi \phi_1 + m_2 \pi \phi_2 = N \pi \phi_{eq}$$

$$\phi_{eq} = \frac{m_1 \phi_1^2 + m_2 \phi_2^2}{m_1 \phi_1 + m_2 \phi_2}$$

# LIMITAZIONE W SENZA CALCOLO DIRETTO

(Circolare)  
(EC 2 : 2005)

prospetto 7.2N

Diametri massimi delle barre  $\phi^*$  per il controllo della fessurazione<sup>1)</sup>

| Tensione nell'acciaio <sup>2)</sup><br>[MPa] | Diametro massimo delle barre [mm] |                |                |
|----------------------------------------------|-----------------------------------|----------------|----------------|
|                                              | $w_k = 0,4$ mm                    | $w_k = 0,3$ mm | $w_k = 0,2$ mm |
| 160                                          | 40                                | 32             | 25             |
| 200                                          | 32                                | 25             | 16             |
| 240                                          | 20                                | 16             | 12             |
| 280                                          | 16                                | 12             | 8              |
| 320                                          | 12                                | 10             | 6              |
| 360                                          | 10                                | 8              | 5              |
| 400                                          | 8                                 | 6              | 4              |
| 450                                          | 6                                 | 5              | -              |

- 1) I valori nel prospetto sono basati sulle seguenti assunzioni:  
 $c = 25$  mm;  $f_{ct,eff} = 2,9$  MPa;  $h_{cr} = 0,5$ ;  $(h \cdot d) = 0,1$  h;  $k_1 = 0,8$ ;  $k_2 = 0,5$ ;  $k_c = 0,4$ ;  $k = 1,0$ ;  $k_t = 0,4$  e  $k' = 1,0$ .  
 2) Sotto la combinazione di carico pertinente.

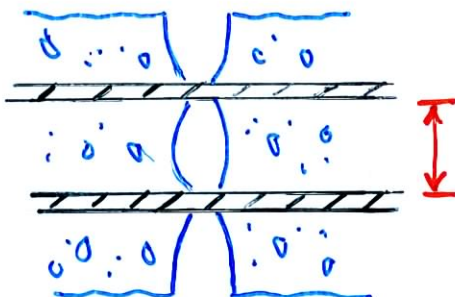
prospetto 7.3N

Spaziatura massima delle barre per il controllo della fessurazione<sup>1)</sup>

| Tensione nell'acciaio <sup>2)</sup><br>[MPa] | Spaziatura massima delle barre [mm] |                |                |
|----------------------------------------------|-------------------------------------|----------------|----------------|
|                                              | $w_k = 0,4$ mm                      | $w_k = 0,3$ mm | $w_k = 0,2$ mm |
| 160                                          | 300                                 | 300            | 200            |
| 200                                          | 300                                 | 250            | 150            |
| 240                                          | 250                                 | 200            | 100            |
| 280                                          | 200                                 | 150            | 50             |
| 320                                          | 150                                 | 100            | -              |
| 360                                          | 100                                 | 50             | -              |

Per le note vedere prospetto 7.2N.

Fisso  $w_k$   
Calcolo  $\sigma_s$   $\rightarrow$  leggo in tabella  $\phi_{max}$



Spaziatura max  
barre d'armatura