Corrosione delle Strutture in Calcestruzzo armato: analisi delle problematiche, diagnosi e prevenzione

Corrosione ed effetti strutturali: Modelli strutturali e Previsionali

Gian Piero Lignola

Ordine degli Ingegneri della provincia di Napoli

Napoli
27 Febbraio 2013

Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura (Di.St.), Università degli Studi di Napoli "Federico II"

Effetti strutturali del degrado

Nel tempo il calcestruzzo può perdere le sue caratteristiche protettive

1. L'alcalinità del calcestruzzo può essere neutralizzata dall'anidride carbonica proveniente dall'ambiente esterno (***carbonatazione***);
2. Ioni cloruro possono raggiungere le armature (tenore critico di cloruri è dell'ordine di 0,4÷1% del contenuto in peso di cemento) e rompere localmente il film protettivo.

Le principali conseguenze della corrosione sono:

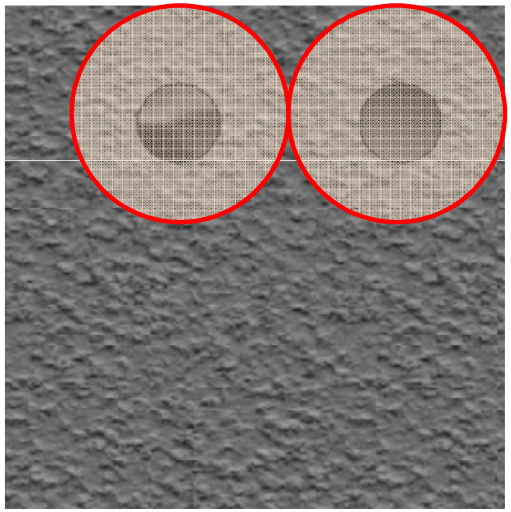
Riduzione della sezione delle barre

Riduzione della sezione di barra
Eventuale interruzione della barra per pitting
Riduzione dell'aderenza delle barre

Fessurazione del calcestruzzo

Aumento della v_{corr}
Distacco del copriferro
Riduzione della sezione

Effetti strutturali del degrado



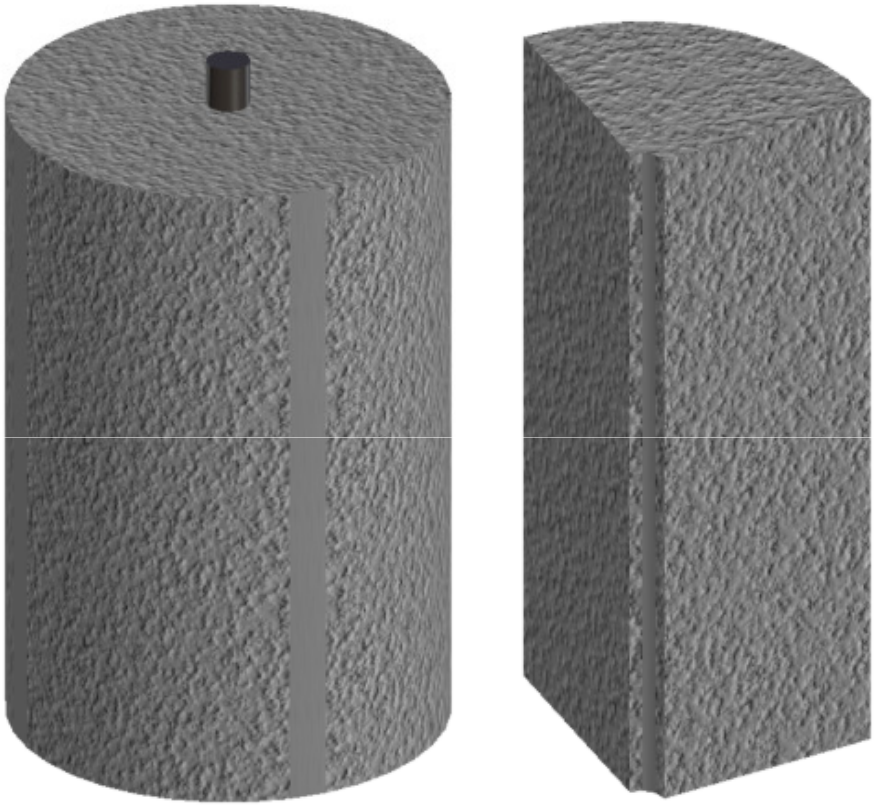
Si è dimostrato che, a scopo di simulazione, è possibile considerare geometrie cilindriche rappresentative delle sezioni rettangolari (usualmente realizzate) se la distanza tra le barre è tale che l'area di influenza delle pressioni tra due barre consecutive sia al massimo tangente.

Sulla base di tale risultato iniziale, sono stati effettuati studi su sezioni cilindriche volte ad indagare:

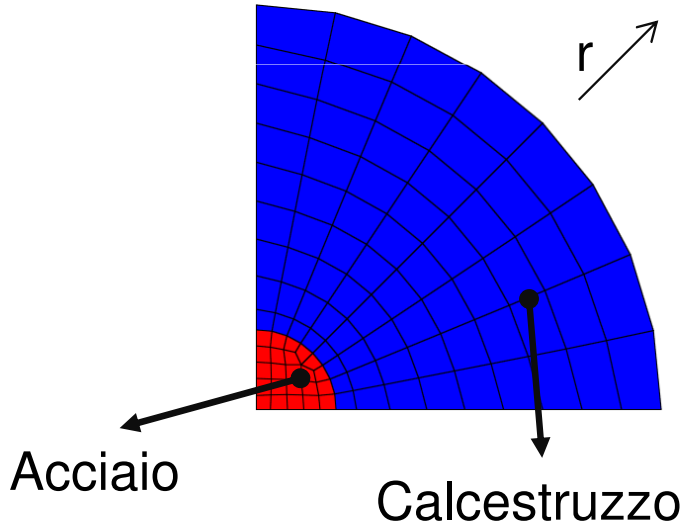
1. **La riduzione della sezione della barra**;
2. La conseguente **fessurazione del calcestruzzo** dovuta all'espansione dell'ossido;
3. Il **distacco del copriferro**;
4. La conseguente **alterazione** delle condizioni di **aderenza ed ancoraggio**.

Innesco della fessurazione

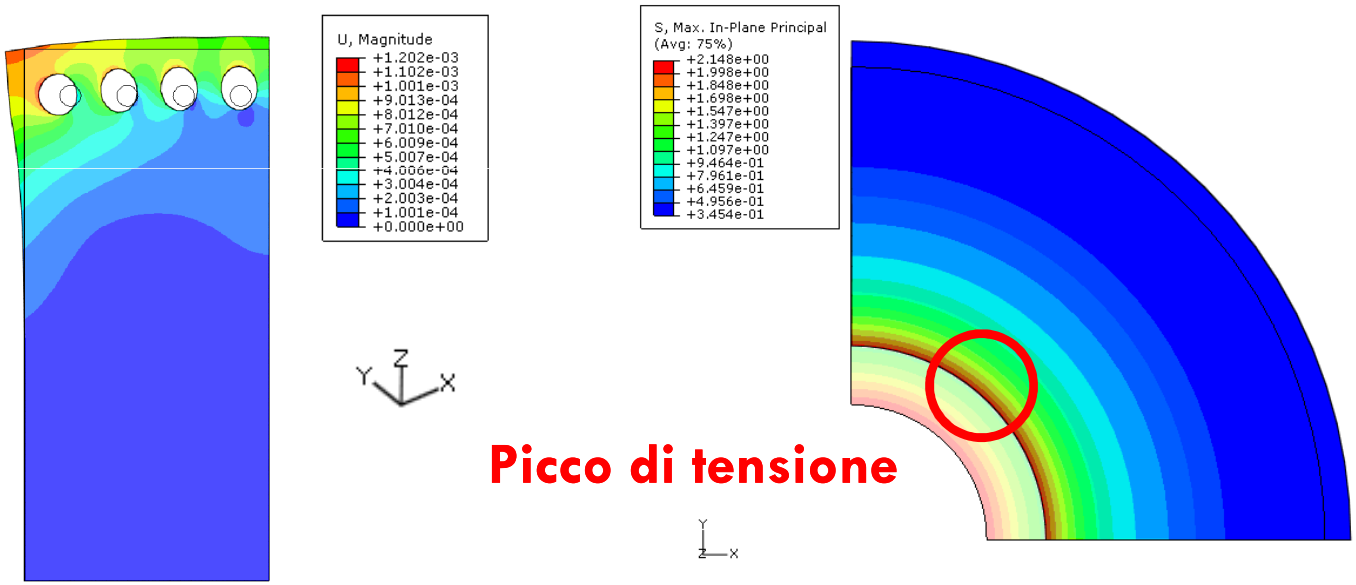
Sono state condotte una serie di analisi FEM 2D e 3D (su geometria cilindrica), sia a spostamento imposto che a pressione imposta, al fine di simulare l'innesco del processo di fessurazione.

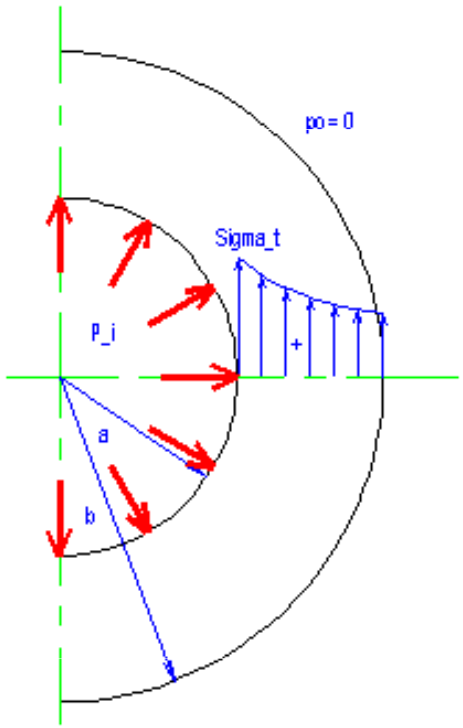


Il processo si innesca, naturalmente, appena le tensioni circonferenziali, σ_θ, superano la resistenza massima a trazione, f_{ctm}, del calcestruzzo.



Innesco della fessurazione



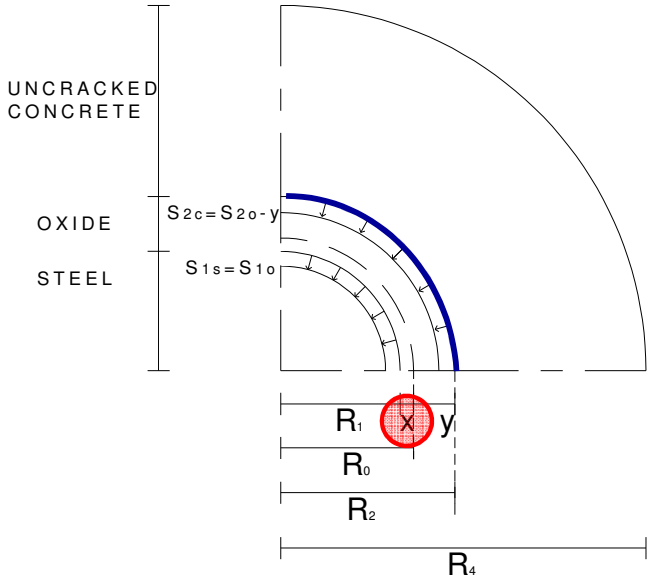


Il picco di tensione si verifica all'interfaccia tra barra e calcestruzzo e si propaga verso l'esterno in relazione alla produzione di ossido che determina l'aumento delle pressioni circonferenziali.

A destra è riportato il diagramma delle pressioni per una sezione trasversale di un campione cilindrico. Esse sono massime all'interfaccia barra/cls e diminuiscono verso l'esterno.

Schema del Modello

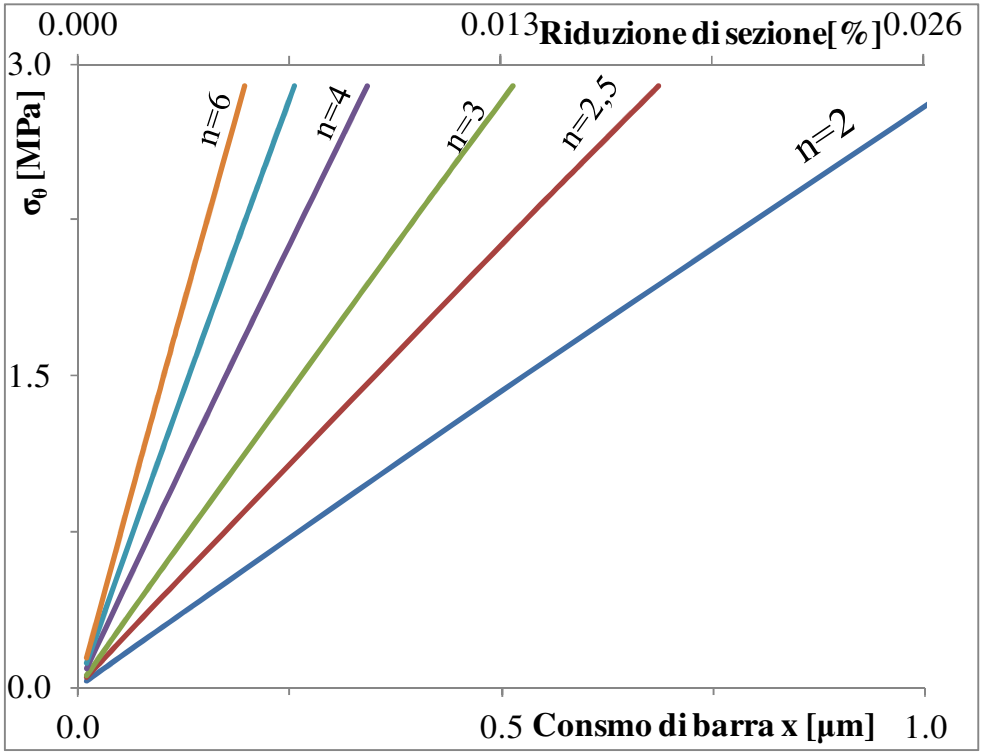
Il processo di innesco della fessura può essere, quindi, simulato con un modello a 3 strati: uno più interno (barra) di raggio iniziale R_0, uno intermedio (ossido) di raggio interno R_0 e raggio esterno R_2 ed uno esterno (calcestruzzo) di raggio interno R_2 e raggio esterno R_4.

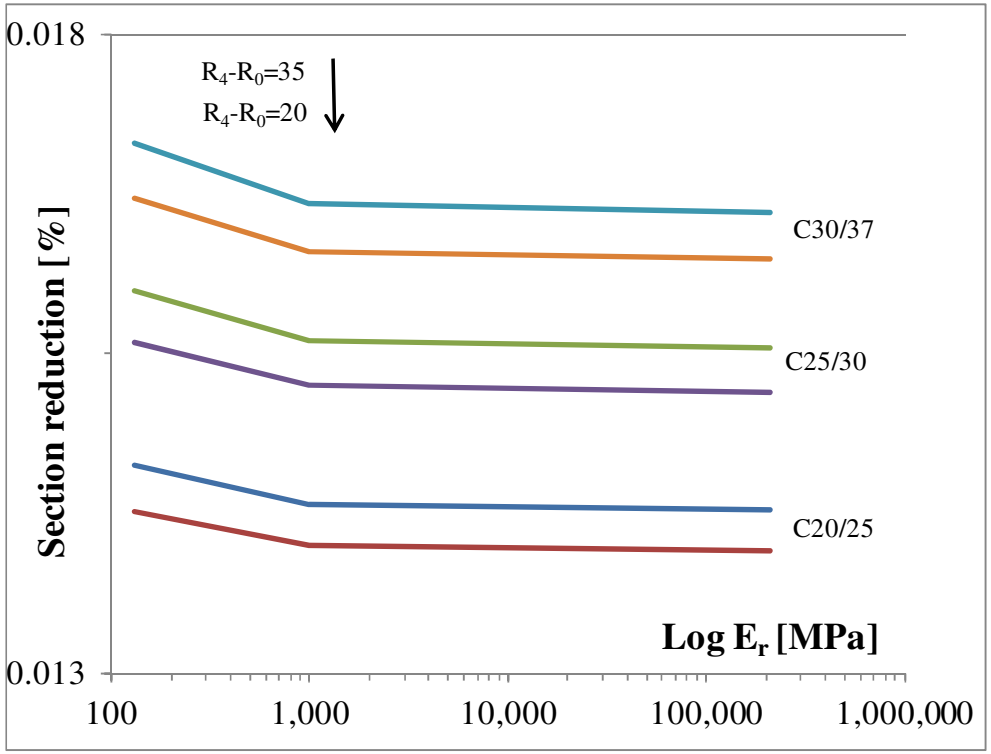


I parametri che maggiormente influenzano il processo di innesco della fessura sono il modulo elastico del calcestruzzo, E_c, il coefficiente di espansione volumetrica dell'ossido, n, ed il diametro della barra, $2R_0$. In particolare, la quantità di barra consumatasi per innescare la fessura, cresce al decrescere di E_c ed n ed al crescere di $2R_0$.

La logica è quella di partire dalla stima della **causa** (consumo di barra, x) e risalire all'**effetto** (innesco della fessura).

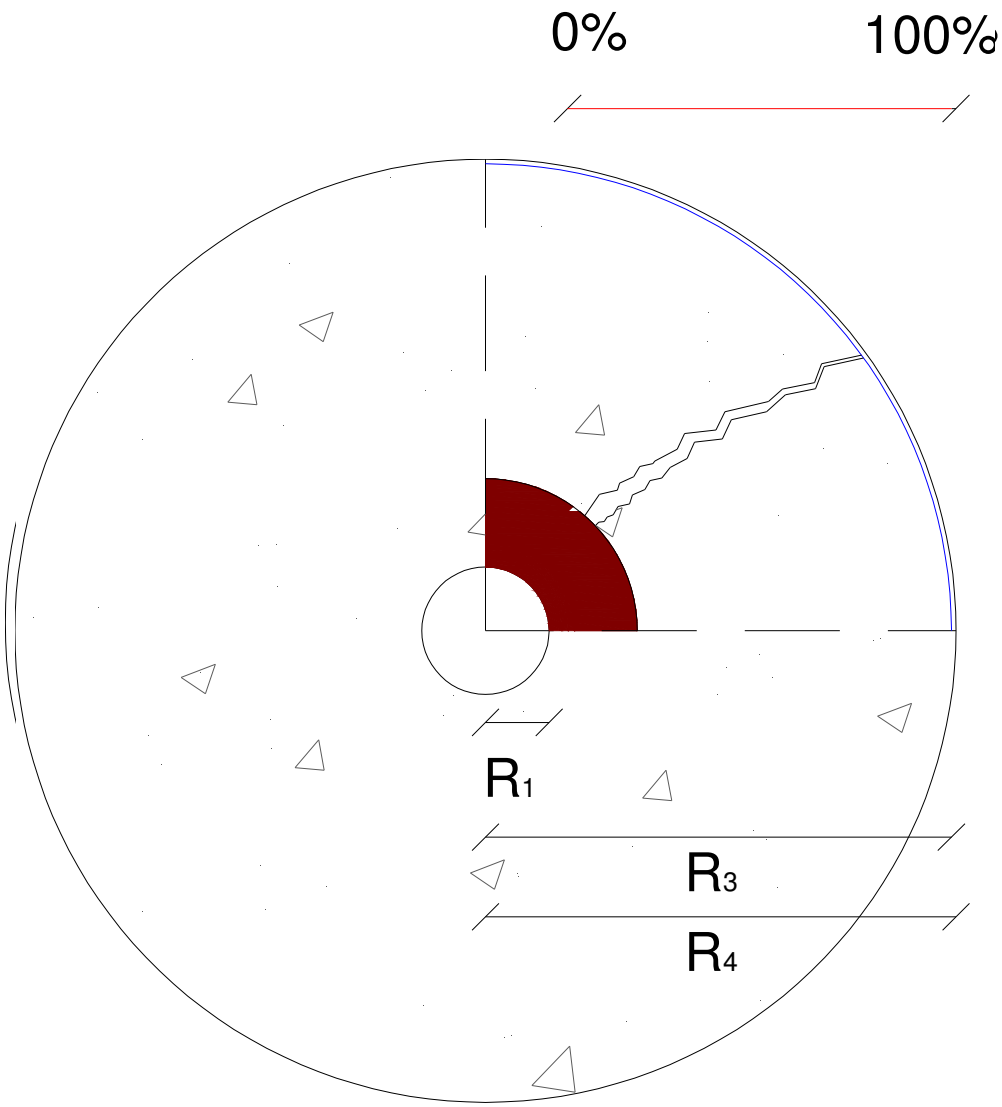
Innesco della fessura
Risultati





È importante sottolineare che i parametri che maggiormente influenzano l'innesco della corrosione sono: il copriferro e la classe di resistenza del calcestruzzo. Mentre lo spessore di copriferro ne ritarda l'inizio, la resistenza del calcestruzzo determina una maggiore resistenza a trazione, per cui devono svilupparsi tensioni circonferenziali superiori.

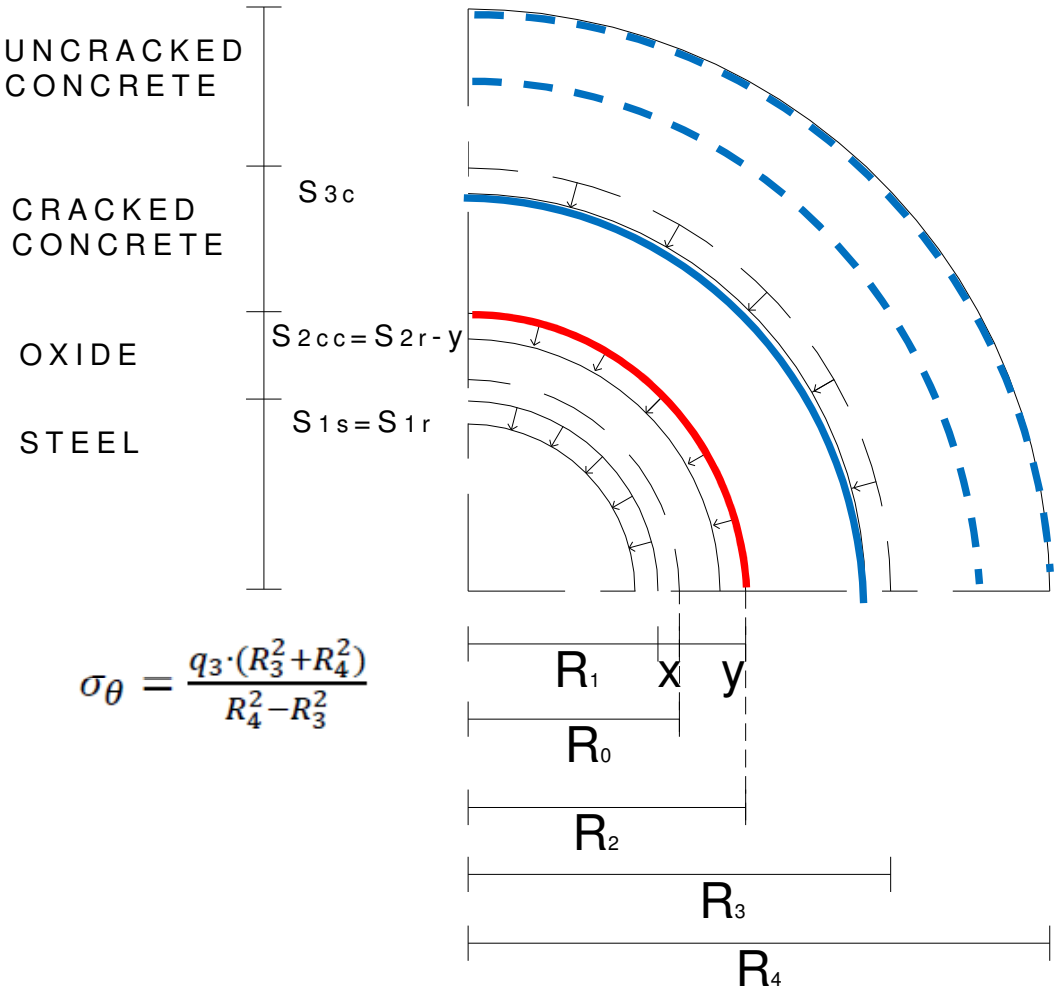
Propagazione della fessura



A seguito dell'innesco, il persistere delle condizioni aggressive, fa continuare il processo di ossidazione. La produzione di ossido voluminoso genera, quindi, l'avanzamento della fessura.

Si verrà a formare, quindi, un ulteriore strato di calcestruzzo fessurato, intermedio tra l'ossido ed il calcestruzzo integro, di raggio interno R_2 e raggio esterno R_3.

Propagazione della fessura
Schema del modello



$$\sigma_\theta = \frac{q_3 \cdot (R_3^2 + R_4^2)}{R_4^2 - R_3^2}$$

Partire dalla stima della **causa** (consumo di barra, x) e risalire all'**effetto** (propagazione della fessura).

Il modello della propagazione è governato da equazioni di continuità, di equilibrio e compatibilità degli spostamenti alle interfacce.

$$R_1 = R_0 - x$$

$$R_2 = R_1 + x + y$$

$$n \cdot (2\pi \cdot R_0 x + \pi \cdot x^2) = \pi \cdot (x + y) \cdot (2 \cdot R_1 + x + y)$$

$$S_{2concrete} = S_{2oxide} - y$$

$$S_{steel} = S_{1oxide}$$

$$S_{steel} = \frac{q_1 \cdot R_1 \cdot (\nu_s + 1) \cdot (1 - 2\nu_s)}{E_s}$$

$$S_{1oxide} = \frac{(1+\nu_o) \cdot R_1}{E_o} \cdot \frac{(1-2\nu_o) \cdot (q_2 \cdot R_2^2 - q_1 \cdot R_1^2)}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{1}{R_1^2} \cdot \frac{(q_2 - q_1) \cdot R_2^2 \cdot R_1^2}{R_2^2 - R_1^2}$$

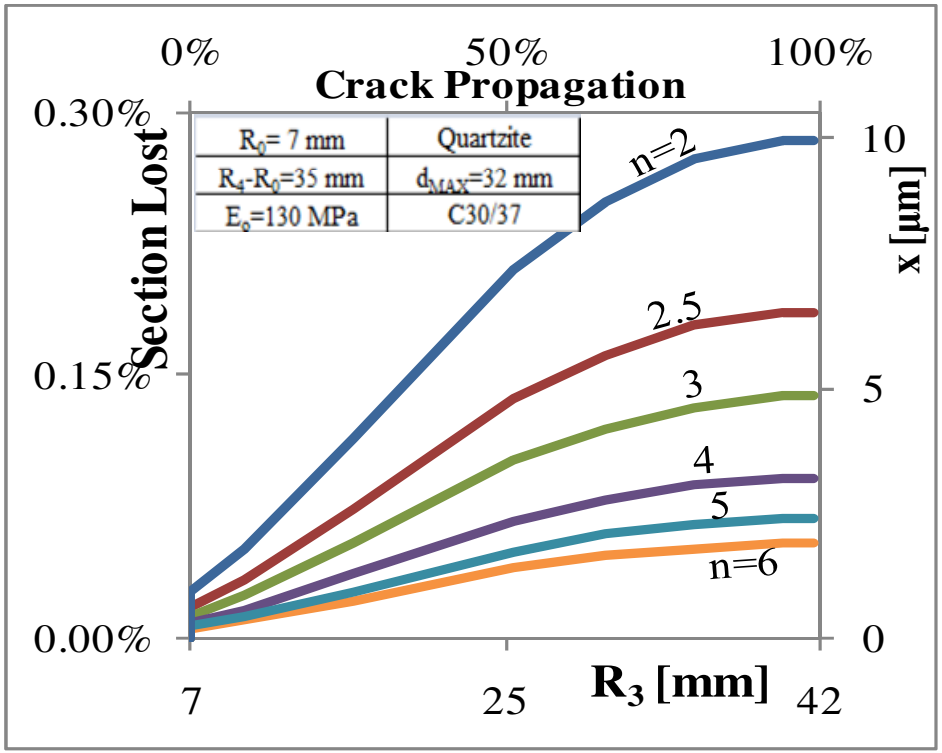
$$S_{2concrete} = \frac{q_2 \cdot R_2 \cdot (\nu_c + 1) \cdot [R_2^2 \cdot (2\nu_c - 1) - R_4^2]}{E_c \cdot (R_4^2 - R_2^2)}$$

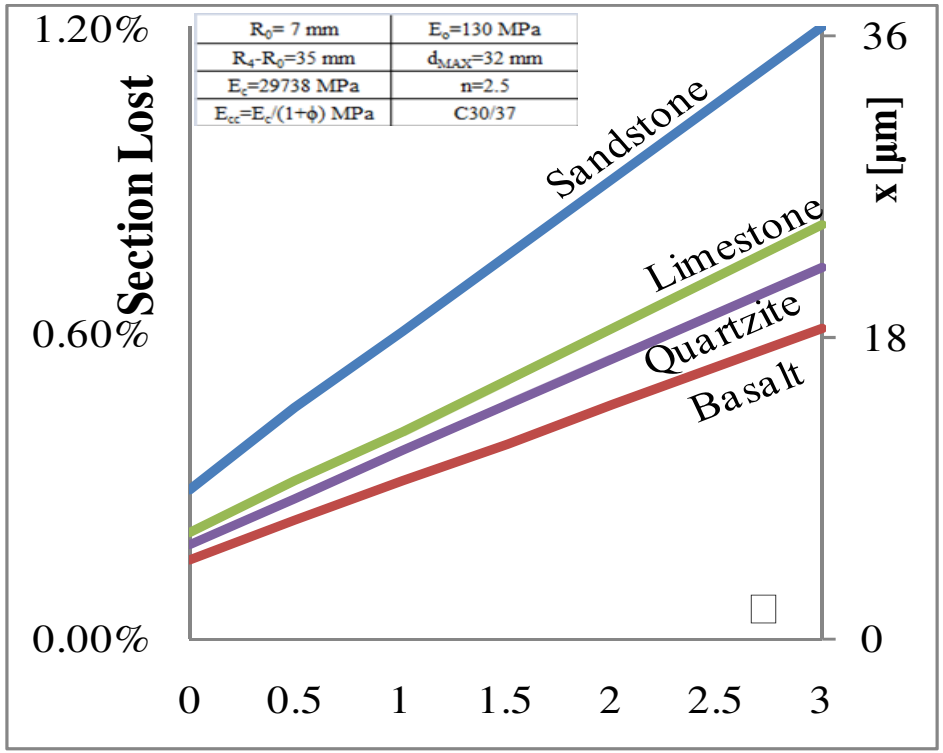
$$S_{2oxide} = \frac{(1+\nu_r) \cdot R_2}{E_o} \cdot \frac{(1-2\nu_o) \cdot (q_2 \cdot R_2^2 - q_1 \cdot R_1^2)}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} \cdot \frac{(q_2 - q_1) \cdot R_2^2 \cdot R_1^2}{R_2^2 - R_1^2}$$

$$S_{2oxide} = \frac{(1+\nu_o) \cdot R_2}{E_c} \cdot \frac{(1-2\nu_o) \cdot (q_2 \cdot R_2^2 - q_1 \cdot R_1^2)}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} \cdot \frac{(q_2 - q_1) \cdot R_2^2 \cdot R_1^2}{R_2^2 - R_1^2}$$

$$S_{3concrete} = \frac{(1+\nu_c) \cdot R_3}{E_c} \frac{(1-2\nu_c) \cdot (q_3 \cdot R_3^2)}{R_4^2 - R_3^2} + \frac{1}{R_3^2} \cdot \frac{-q_3 \cdot R_4^2 \cdot R_3^2}{R_4^2 - R_3^2}$$

Propagazione della fessura
Risultati



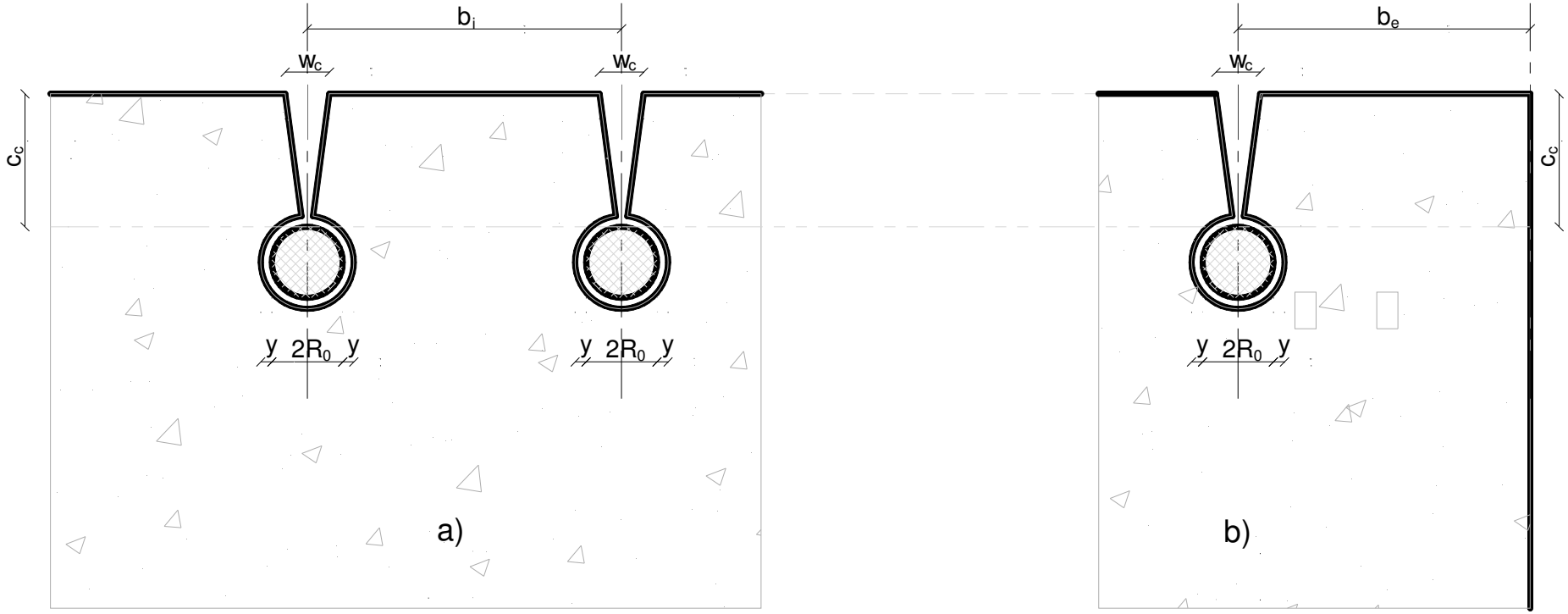


È possibile costruire degli abachi che forniscono il valore di avanzamento della fessura, R_3, in relazione al consumo di barra, x.

I parametri che influenzano la propagazione della fessura sono: lo spessore di copriferro, R_4-R_0, il tipo dell'aggregato ed il creep, ϕ.

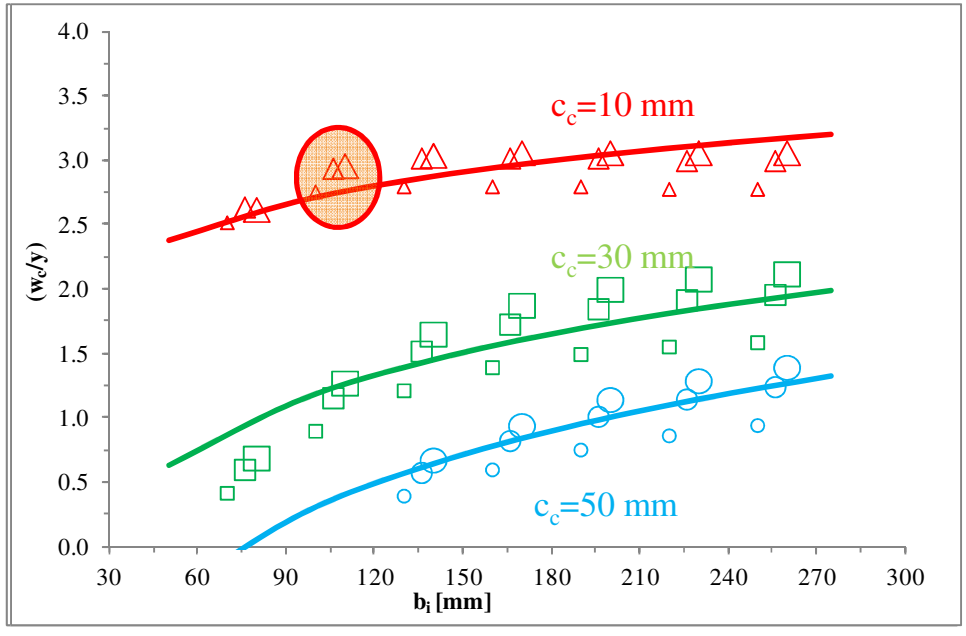
Apertura della fessura
Schema del modello

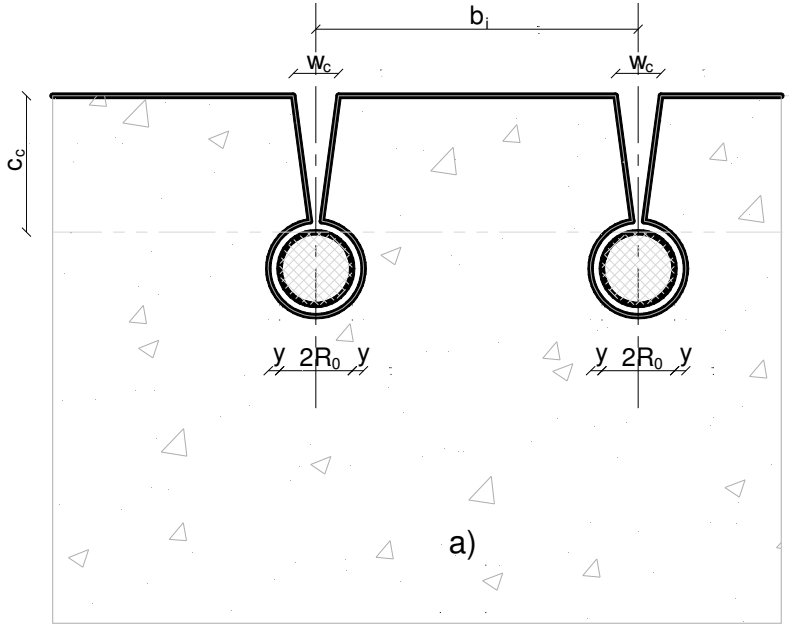
Dopo la propagazione, inizia il processo di apertura della fessura nel copriferro.



Analisi FEM sono state condotte per simulare il processo di apertura della fessura, w_c, sia simulando il processo di corrosione su barre in posizione interna, sia su barre posizionate in angolo. La logica del modello è quella di risalire alla **causa** (consumo di barra, x) partendo dalla valutazione dell'**effetto** (apertura della fessura, w_c).

Apertura della fessura
Modello raffinato barra centrale

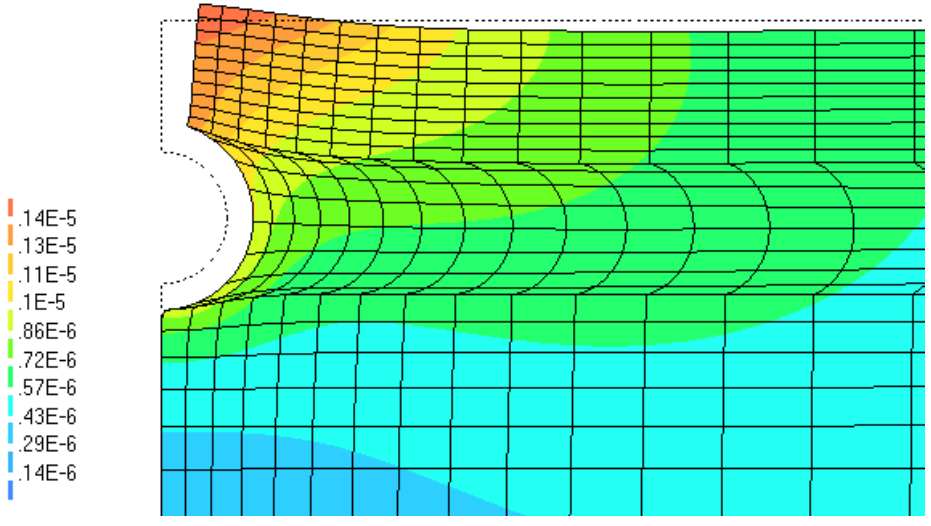




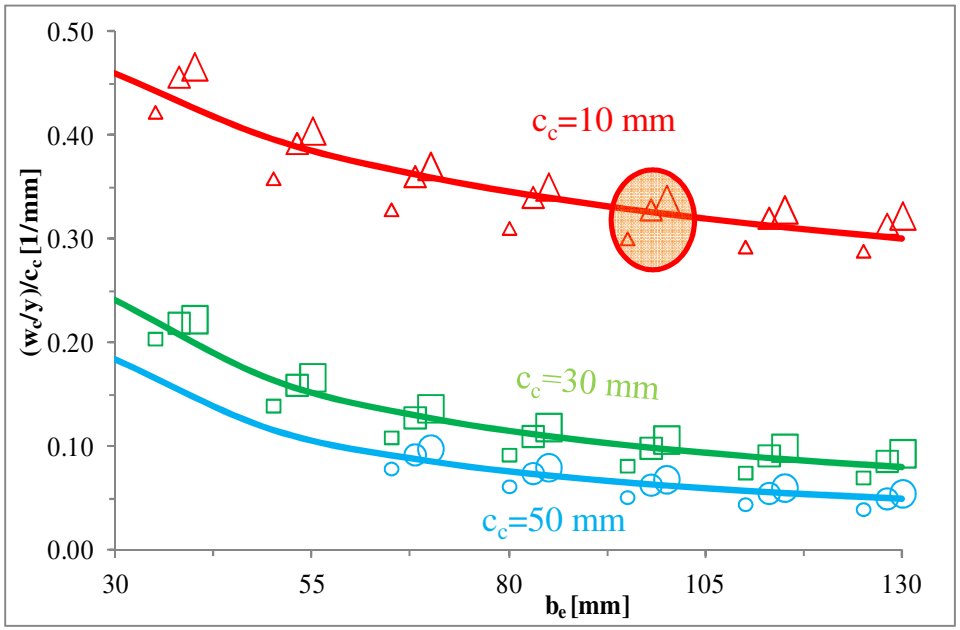
$$\frac{w_c}{y} = (0.37 + 0.013 \cdot c_c) \cdot \ln(c_c) + 1.5 - 0.12 \cdot c_c \qquad (3)$$

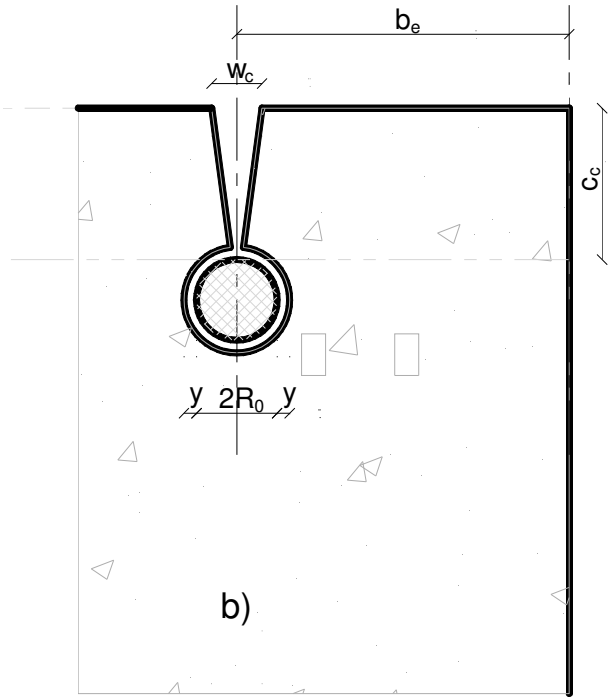
I risultati delle analisi FEM sono stati raggrupati in relazione alla dimensione del copriferro, c_c.

Si nota che, la dipendenza dal raggio della barra , R_0, è trascurabile.



Apertura della fessura
Modello semplificato barra d'angolo

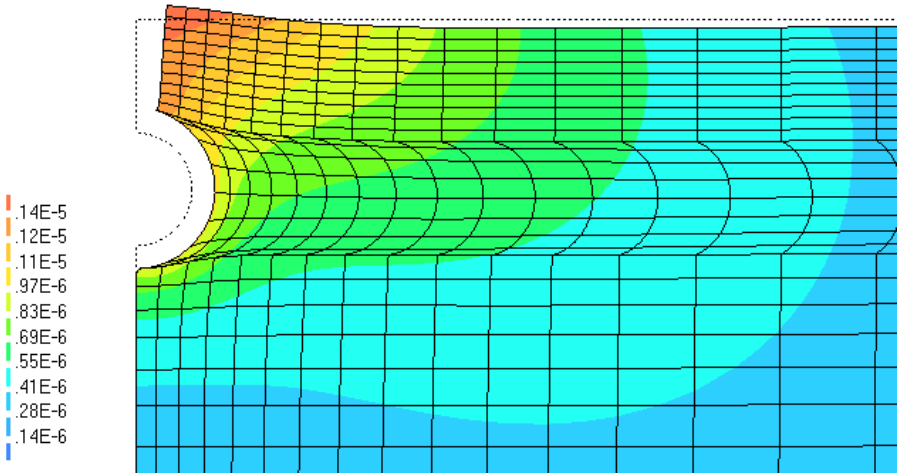




$$\frac{\square}{\square} = \left(\frac{34+3.6\cdot\square}{50}\right)\cdot\square\cdot\square^{(0.6-0.39\cdot\square)} \qquad (6)$$

Anche in questo caso i risultati sono stati raggruppati in relazione al valore del copriferro, c_c.

Anche in questo caso, la dipendenza dal raggio della barra, R_0, è trascurabile.



Apertura della fessura
Modello semplificato barra d'angolo

Al fine di valutare la sicurezza strutturale, è importante conoscere la penetrazione di corrosione e la conseguente riduzione della sezione della barra. I modelli presentati consentono di calcolare l'apertura di fessura, w_c, in relazione all'espansione della barra (a causa della produzione di ossido), y.

È possibile correlare, y, alla penetrazione di corrosione x, mediante il coefficiente di dilatazione volumetrica di ossido, n. Tale coefficiente varia solitamente tra 2 e 6*.

Una semplice equazione di continuità#, permette di correlare x ed y.

$$x = \sqrt{(1-n)\cdot(x_0 - y)^2 + n \cdot x_0^2} - x_0 \qquad (8)$$

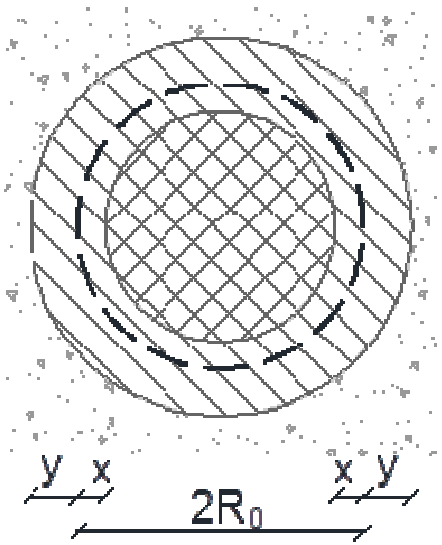
*Pedeferri, P., Bertolini, L. (2000). *La durabilità del calcestruzzo armato*, McGraw-Hill, Milano, Italy. *In Italian.*

#Bossio A., Montuori M., Bellucci F., Lignola G.P., Prota A., Cosenza E. & Manfredi G. (2011) Analytical modeling of reinforcement corrosion effects on RC members degradation. In: *2nd Workshop: The new boundaries of structural concrete.* Imready, Ancona, Italy: 205-213.

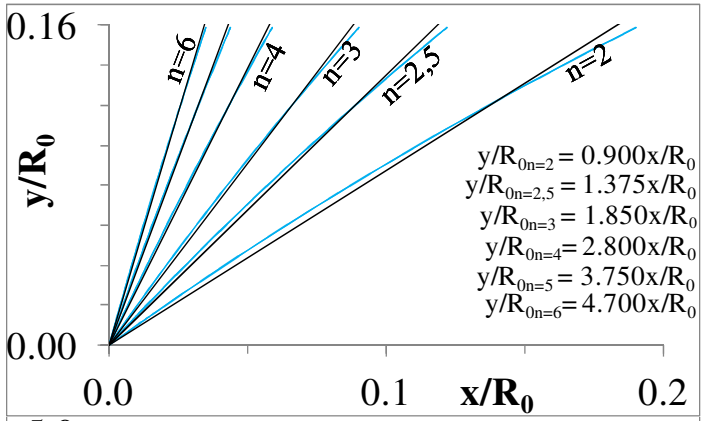
Relazione tra apertura di fessura e consumo di barra

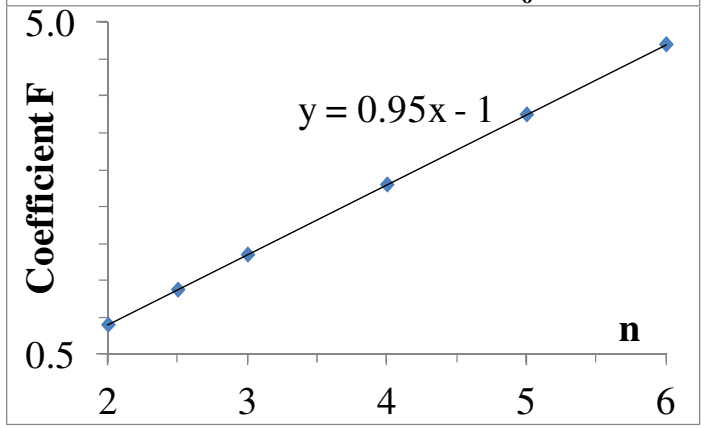
$$y = \sqrt{(1-n)\cdot(R_0 - x)^2 + n\cdot R_0^2} - R_0$$

$$\frac{y}{R_0} = \sqrt{(1-n)\cdot\left(1-\frac{x}{R_0}\right)^2 + n} - 1$$



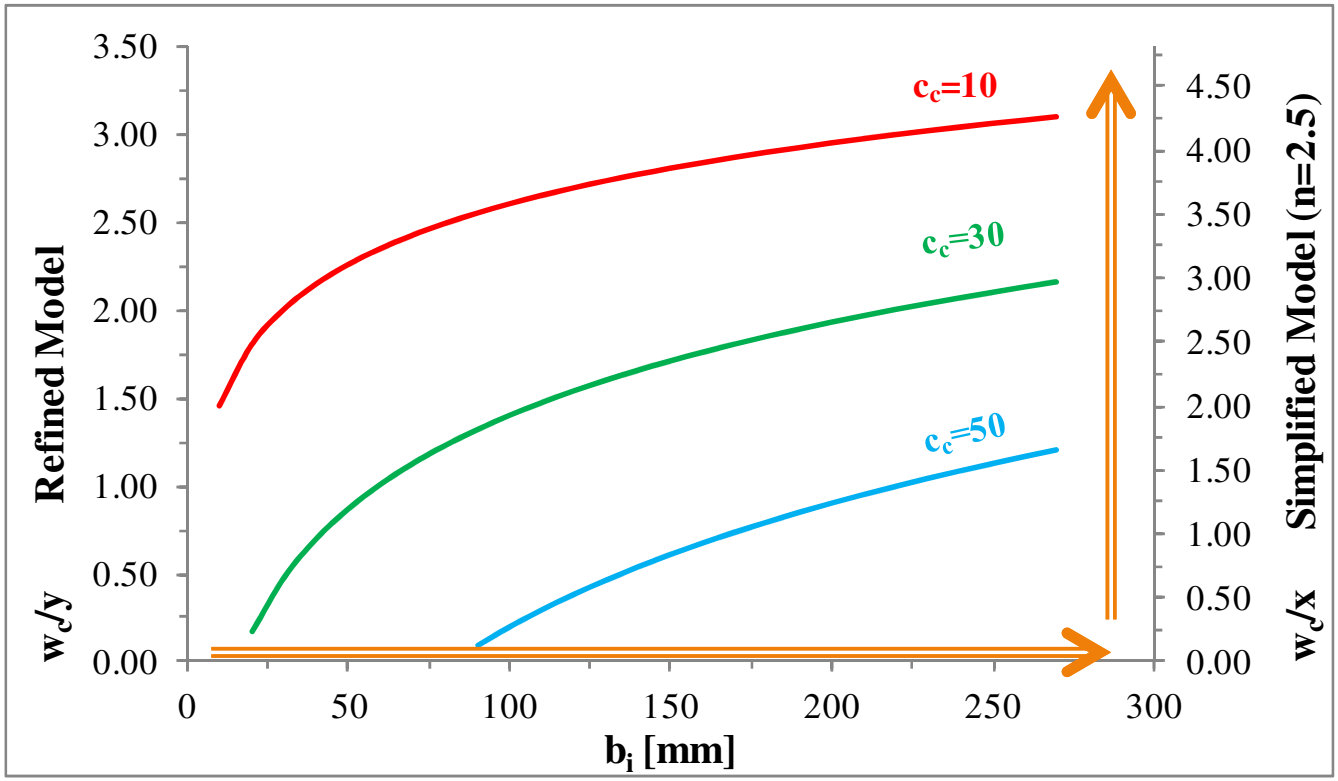
Il volume di ossido prodotto pari a $\pi\cdot[(R_0+y)^2-(R_0-x)^2]$ è uguale ad n volte il volume di barra consumatasi $\pi\cdot[R_0^2-(R_0-x)^2]$.





$$\frac{y}{R_0} \cong (0.95\cdot n - 1)\cdot\frac{x}{R_0} \quad \rightarrow \quad n \cong \frac{y}{(0.95\cdot n - 1)}$$

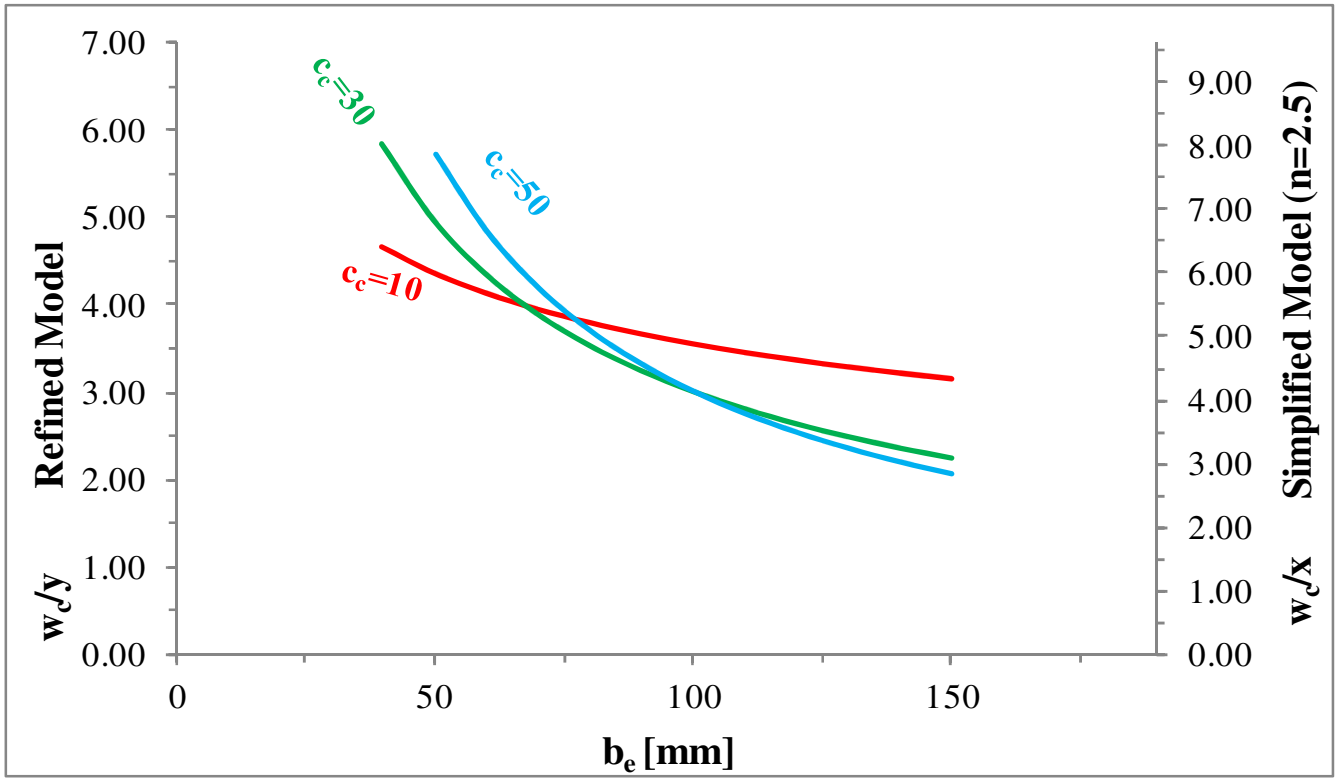
Apertura della fessura
Discussione di risultati – Barra interna



La dipendenza è limitata solo al copriferro, c_c, e la distanza tra due fessure successive, b_i.

Il rapporto w_c/x cresce al crescere di b_i.

Apertura della fessura
Discussione di risultati – Barra d'angolo

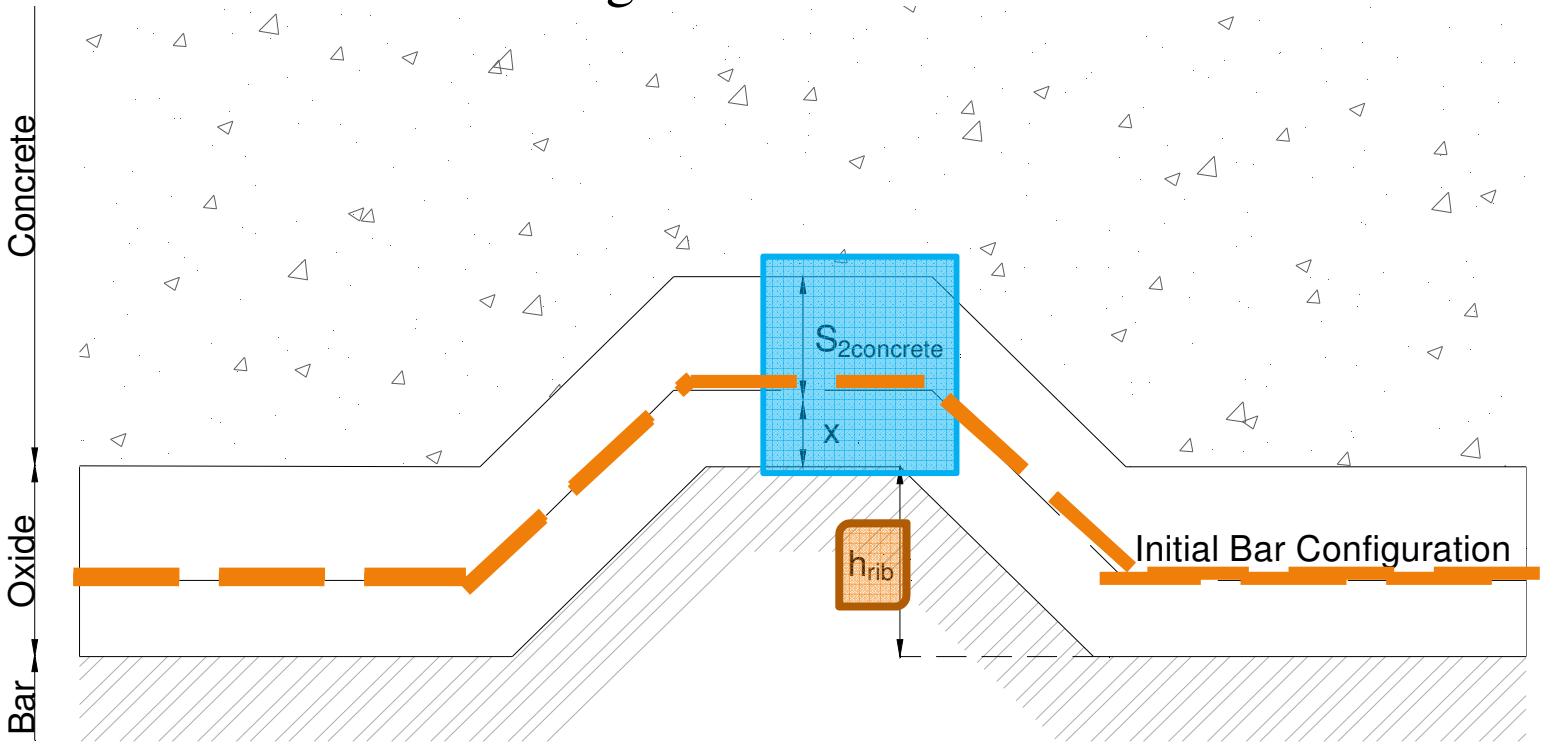


Il rapporto w_c/y è riportato in relazione alla distanza con il bordo esterno b_e, ed al copriferro c_c.

Rispetto al caso precedente, il rapporto w_c/x sembra essere meno dipendente dal valore del copriferro, c_c.

Aderenza

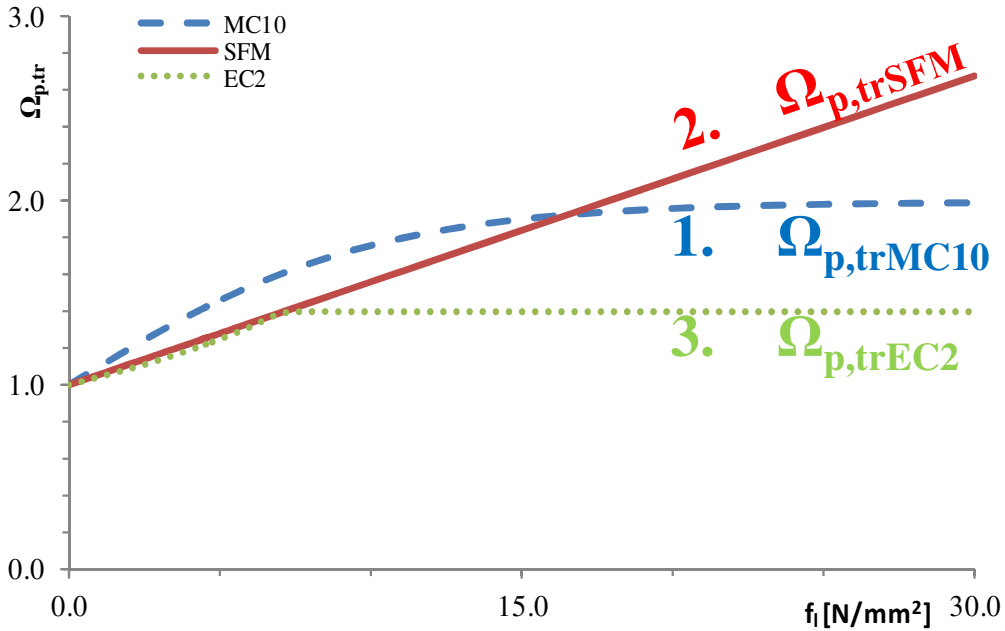
I modelli proposti possono essere utilizzati anche per la valutazione della variazione di aderenza tra barra e calcestruzzo a seguito della sua ossidazione.



L'aderenza diminuisce costantemente fino ad un valore di spostamento tra barra e calcestruzzo, generata dalla riduzione della barra e dalla conseguente espansione dell'ossido, pari all'altezza di nervature bar, h_{rib}.

$$x+S_{2concrete}=h_{rib}$$

Aderenza
Generalità



Gli effetti della corrosione sull'aderenza sono legati all'andamento del rapporto tra la tensione tangenziale ultima, $\tau_{b,f}$, e la massima, τ_0, con $\tau_0 = 1.25 \cdot \sqrt{f_{c0}}$ (MC2010), dove f_{c0} è il valore medio della resistenza caratteristica a compressione.

Il valore di $\tau_{b,f}$, influenza, inoltre, la lunghezza di ancoraggio delle barre:

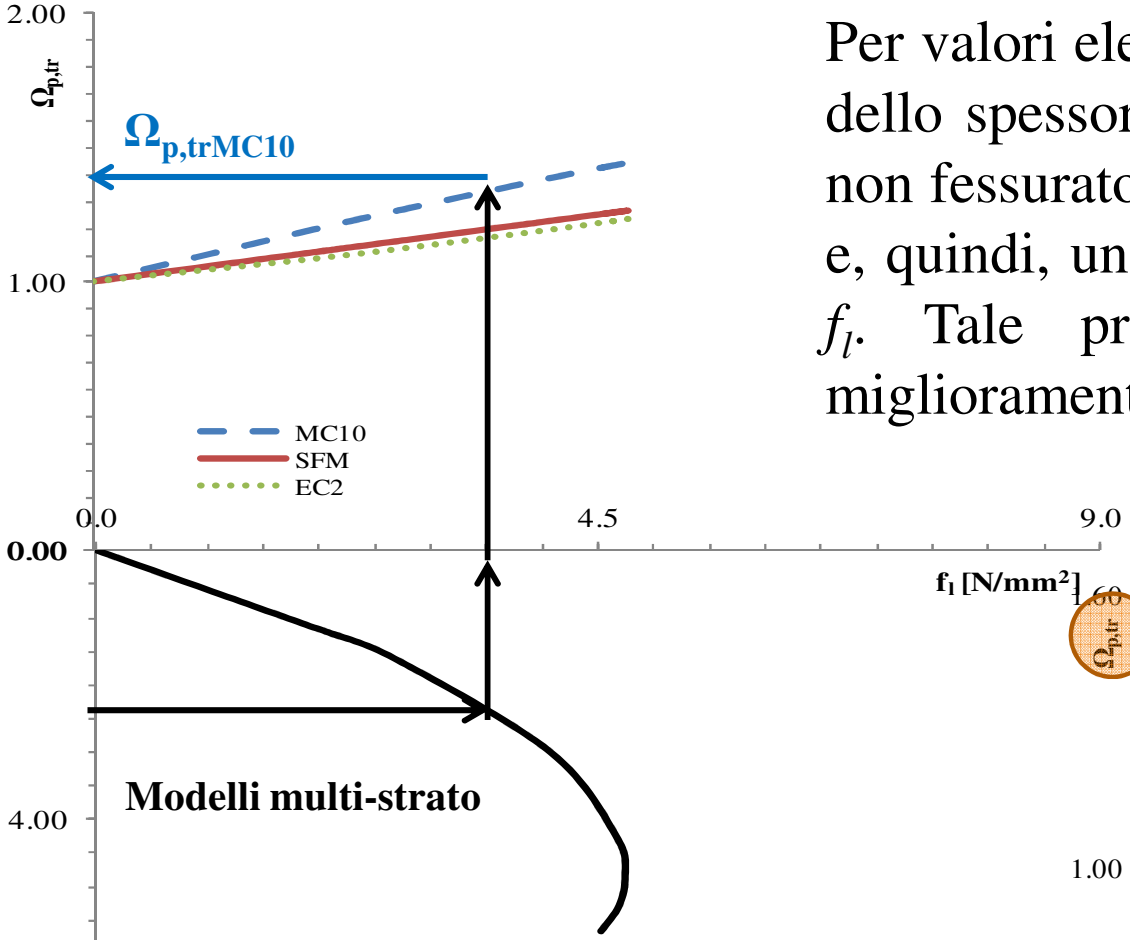
$$\Omega_{p,tr} = \frac{\Omega_{p,tr} \cdot \Omega}{4 \cdot \Omega_{p,tr}}$$

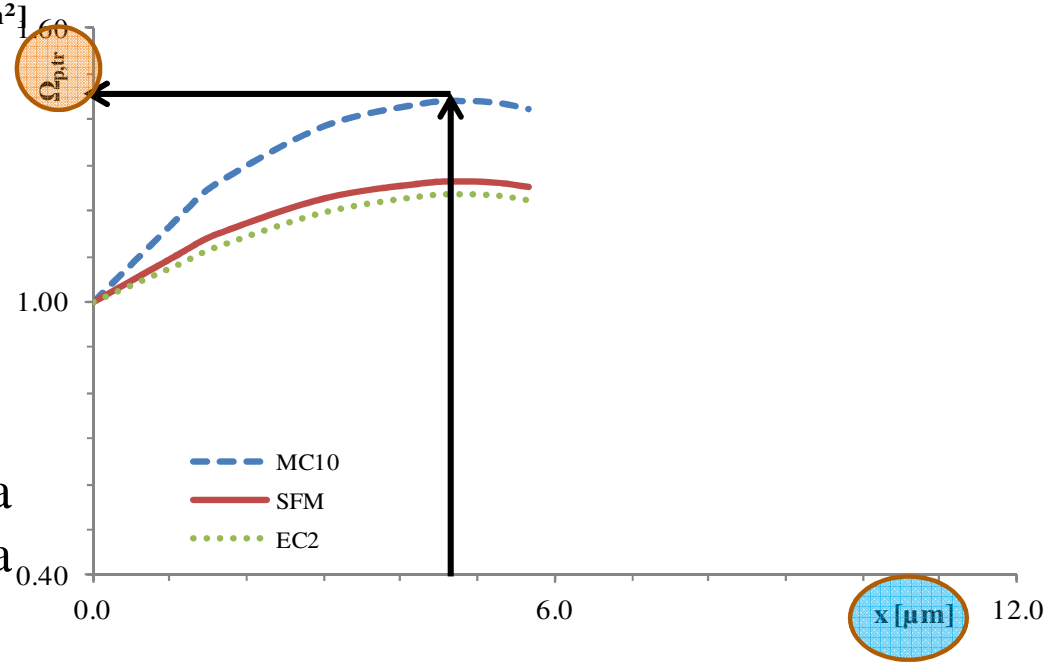
Sono stati considerati tre diversi modelli di aderenza:

1. First Complete Draft of Model Code 2010 – $\mathbf{\Omega_{p,trMC10}} = \dfrac{\tau_{b,f}}{\tau_0} = \left(1 + \tanh\dfrac{0.2 \cdot f_l}{0.1 \cdot f_{co}}\right)$
2. **Simple Friction Model** – $\Omega_{p,trSFM} = \dfrac{\tau_{b,f}}{\tau_0} = \left(1 + \mu \cdot \dfrac{f_l}{\tau_0}\right)$
3. **EuroCodice2** – $\Omega_{p,trEC2} = \dfrac{\tau_{b,f}}{\tau_0} = \left(-\dfrac{1}{1 - 0.4 \cdot f_l}\right) \leq 1.4$

Aderenza

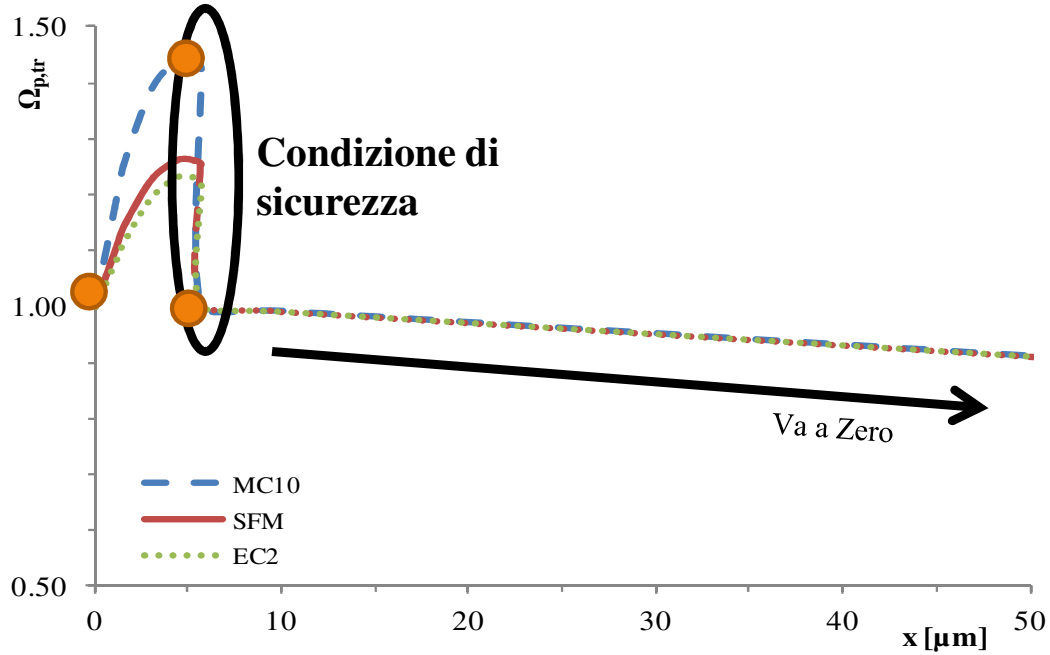
Per valori elevati di consumo di barra, x, la riduzione dello spessore della corona circolare di calcestruzzo non fessurato determina una riduzione della rigidezza e, quindi, una riduzione di pressione laterale interna, f_l. Tale pressione è profondamente legata al miglioramento della capacità di aderenza.





È, però, preferibile correlare direttamente la variazione di aderenza, $\Omega_{p,tr}$, con la riduzione di barra, x.

Aderenza



L'espansione dell'ossido genera una pressione interna che determina un aumento dell'aderenza.

L'apertura della fessura determina una perdita di pressione laterale, per cui, il valore dell'aderenza torna quello iniziale.

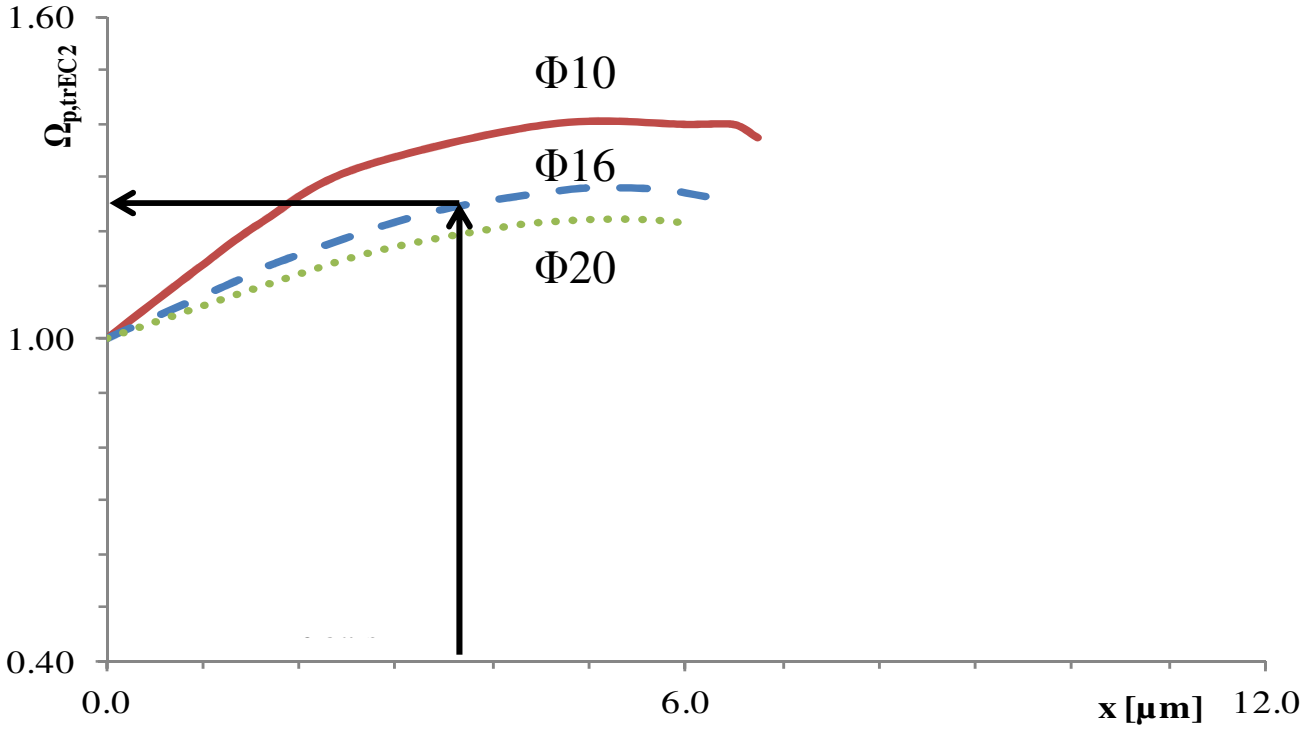
Quindi, l'aderenza decresce in relazione allo spostamento che si verifica tra barra e calcestruzzo, fino ad annullarsi (disingaggio).

1. $$\frac{\tau_{b,f}}{\tau_0} = \left(1 - \tanh - \frac{0.2 \cdot f_l}{0.1 \cdot f_{co}}\right)$$

2. $$\frac{\tau_{b,f}}{\tau_0} = \left(1 + \mu \cdot \frac{f_l}{\tau_0}\right)$$

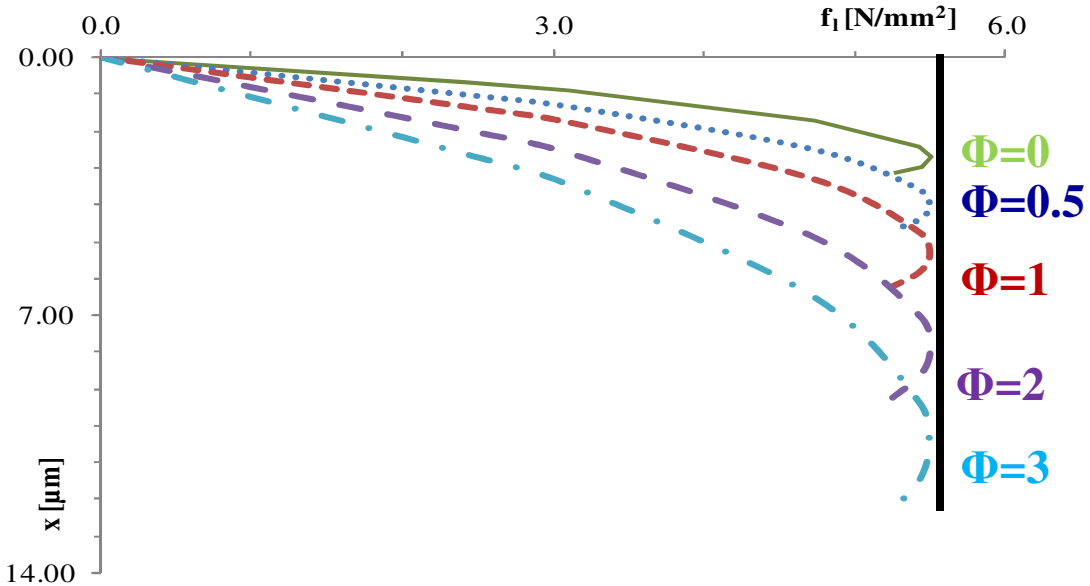
3. $$\frac{\tau_{b,f}}{\tau_0} = \left(-\frac{1}{1 - 0.4 \cdot f_l}\right) \leq 1.4$$

Aderenza - Parametri più influenti
Diametro della barra



Diametri di barra minori determinano rapporti, $\Omega_{p,tr}$, maggiori anche se il consumo di barra, x, resta sostanzialmente inalterato.

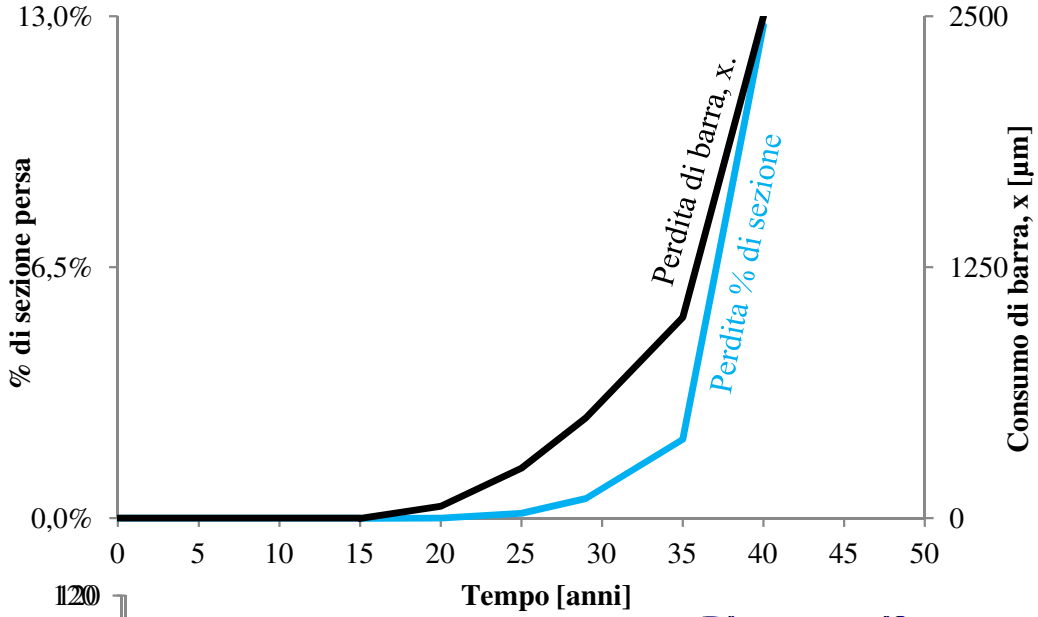
Aderenza - Parametri più influenti
Il Creep

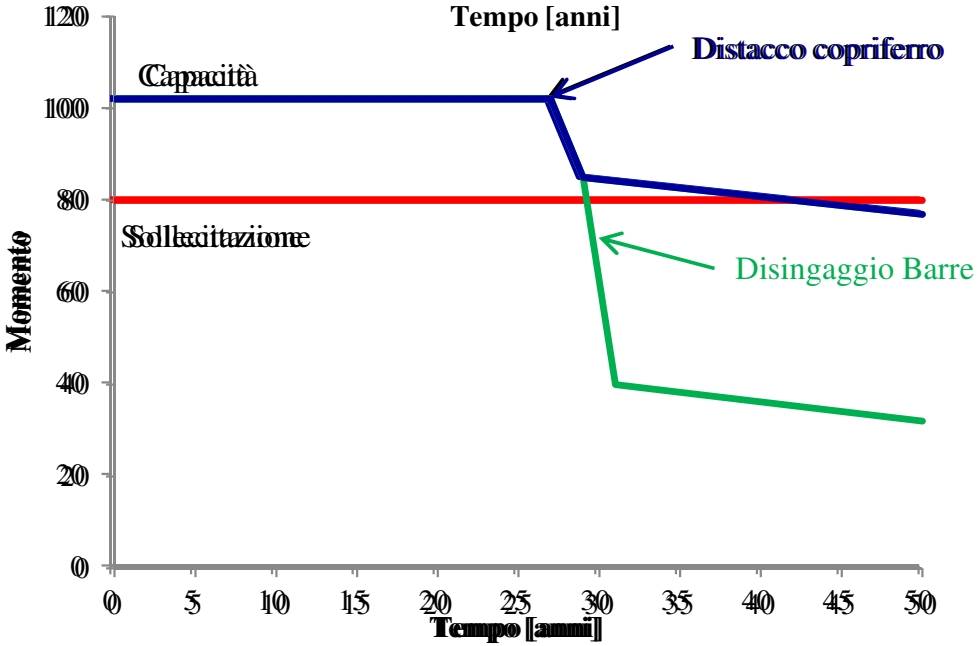


- Classe di esposizione XC2;
- Diametro della barra ϕ16;
- Copriferro 20 mm;
- Classe di resistenza del calcestruzzo C25/30;
- $E_{cc}=1/(1+\Phi)E_c$ (modulo elastico del calcestruzzo fessurato).

- La corrosione degli elemento in c.a. è un problema a medio termine così come il creep. Assumendo per il modulo elastico un fattore di riduzione $1/(1+\Phi)$, crescente con il tempo ed carico, allora maggiore è il fattore di deformazione Φ, minore è il modulo di Young del calcestruzzo.
- Il valore massimo della pressione laterale, f_l, resta tuttavia invariato, anche se il consumo di barra, x, è significativamente differente.
- Al crescere del valore del copriferro e della classe di resistenza del calcestruzzo aumenta anche la riduzione di barra, x.

Esempio: trave inflessa



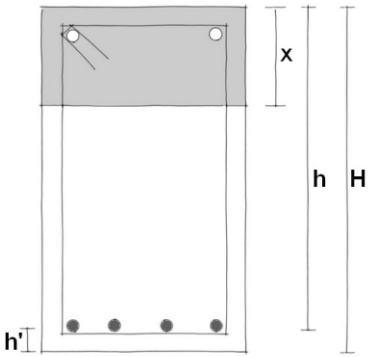


Si osserva la riduzione della capacità flessionale della trave fin sotto il livello di sollecitazione.

Durante l'innesco e la propagazione della fessurazione nel copriferro, la riduzione di capacità è minima.

Al distacco del copriferro la corrosione accelera e anche la capacità si riduce bruscamente.

Tale riduzione è ancora più brusca se interviene il disingaggio delle barre



Bibliografia

Lignola, G.P., Prota, A., Manfredi, G., Cosenza, E.,"**Unified theory for confinement of RC solid and allow circular columns**" Elsevier, Composites Part B 39: 1151, (2008).

Lignola G.P., Menichino G.P., Montuori M., Bellucci F., Cosenza E., Manfredi G. "**FEM analysis of reinforcement corrosion effects on RC members degradation**" *The New Boundaries of Structural Concrete. 1st Workshop* ACI Italy Chapter, CUES ISBN: 8895028554 ISBN-13: 9788895028552 107-1142010. 22-23 Aprile 2010 Salerno, Italia.

Montuori M., Bossio A., Menichino G. P., Bellucci F., Lignola G.P., Prota A., Cosenza E., Manfredi G. "**Modellazione dei processi di degradazione di elementi in calcestruzzo armato**" 18th Congresso C. T. E., IMREADY I ISBN:9788890364761 ID:301695939-48. 11-13 Novembre 2010 Brescia, Italia.

Bossio A., Montuori M, Bellucci F., Lignola G.P., Prota A., Cosenza E., Manfredi G. "**Analytical modeling of reinforcement corrosion effects on RC members degradation**" *The New Boundaries of Structural Concrete 2nd Workshop* ACI Italy Chapter, IMREADY ISBN: 8895028554 ISBN-13: 9788895028552 pp. 205-213. 15-16 Settembre 2011 Ancona, Italia.

Bossio A., Montuori M, Bellucci F., Lignola G.P., Prota A., Cosenza E., Manfredi G. "**Transverse stress on corroded steel reinforcement bars in concrete**" 4th International Symposium Bond in Concrete, PUBLISHER CREATIONS ISBN: 978-88-907078-1-0 Vol. 1 pp. 461-469. 17-20 Giugno 2012 Brescia, Italia.

Bossio A., Montuori M, Bellucci F., Lignola G.P., Prota A., Cosenza E., Manfredi G. "**Indirect measure of corrosion level based on crack opening**" *8th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC 2012)*, Wroclaw, Poland, 15-17 October 2012, Vol. 3, pp. 2305-2313, paper #310 DWE publisher; Jerzy Jasieńko (ed) ISSN 0860-2395, ISBN 978-83-7125-216-7

EC2 Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004: E) 2004. "**Design of concrete structures-Part 1-1 General rules and rules for buildings.**" Brussels.

Fédération Internationale du Béton (Fib). "**MC10 First Complete Draft of Model Code 2010.**" bulletin 55.

Grazie per la cortese attenzione

glignola@unina.it