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

Corrosione ed effetti strutturali: Prevenzione e Diagnostica degli Interventi di Ripristino Conservativo

Antonio Bossio

Ordine degli Ingegneri della provincia di Napoli

Napoli
27 Febbraio 2013

Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei MAteriali e della Produzione Industriale (D.I.C.MA.P.I.), Università degli Studi di Napoli "Federico II"

Introduzione

Gli interventi di Ripristino Conservativo non possono prescindere da una corretta progettazione della campagna sperimentale da condurre per l'acquisizione di adeguati *livelli di conoscenza* e *fattori di confidenza* come indicato al punto 8.5.4 delle NTC e della Circolare esplicativa:

"*Sulla base degli approfondimenti effettuati nelle fasi conoscitive sopra riportate, saranno individuati i* ***livelli di conoscenza*** *dei diversi parametri coinvolti nel modello (geometria, dettagli costruttivi e* ***materiali****), e definiti i correlati* ***fattori di confidenza****, da utilizzare come ulteriori coefficienti parziali di sicurezza che tengono conto delle carenze nella conoscenza dei parametri del modello.*"

Introduzione

In tale ottica è necessario, dunque, effettuare indagini *in situ* ed in laboratorio (su campioni prelevati dall'elemento strutturale) che restituiscano lo stato di "salute" dei materiali costituenti e, di conseguenza, della struttura.

Le metodologie di indagine sono sostanzialmente di due tipologie:

- Indagini di tipo elettrochimico;
- Indagini di tipo strutturale.

Lo **scopo** è quello di avere un quadro dettagliato ed approfondito sia dello stato di ossidazione delle barre che dello stato di ammaloramento del calcestruzzo che ben rappresenti il **degrado** in atto nella struttura.

Tipologie di indagine

Indagini di tipo elettrochimiche (sulle barre)

Misure del potenziale di corrosione
Mappatura del potenziale
} Mappa cromatica dei valori di potenziale cui volge la barra di armatura. → Localizzazione delle zone di attacco.

Prove di resistività → La "resistenza" offerta dal calcestruzzo al passaggio di corrente. → Localizzazione dei difetti del calcestruzzo e misura indiretta della velocità di corrosione.

Misure di velocità di corrosione → Processo di riduzione radiale della barra [µm/anno]. → Consumo annuo di barra.

Indagini di tipo strutturale (sul calcestruzzo)

Misure sclerometriche
Velocità degli ultrasuoni
} **Metodo SonReb** (interpretazione dello spettro d'onda). → Lo stato di integrità del calcestruzzo.

Pacometro

Il pacometro è uno strumento digitale il cui funzionamento si basa sul principio di induzione magnetica e permette di rilevare, all'interno di elementi in calcestruzzo armato, in maniera non distruttiva:
la presenza, la direzione ed il ~~diametro~~ delle barre di armatura.

Proprio il principio di funzionamento ad induzione magnetica, lo rende poco attendibile per la misura del diametro delle barre corrose. L'ossido, infatti, è più voluminoso del metallo, per cui il diametro misurato risulta essere superiore a quello nominale, ed in realtà, sempre a causa della corrosione, si è ridotto.

È stata, dunque, messa a punto una tecnica basata sulla misura della fessura esterna, che restituisce il valore del raggio della barra.

Misura di apertura della fessura

La misura della corrosione basata sull'apertura della fessura, affiancata alle prove elettrochimiche e meccaniche, costituisce un potente strumento di diagnostica non distruttiva.

PASSO 1. Misurare *in situ* l'apertura di fessura;
PASSO 2. Valutare il rapporto w_c/y e calcolare il valore di y;
PASSO 3. Correlare y con x;
PASSO 4. Correlare w_c con x;
PASSO 5. Calcolare la sezione di barra residua usando come raggio il valore $R_1=R_0-x$;
PASSO 6. Ripetere le analisi strutturali utilizzando il diametro effettivo della barra appena calcolato.

Misura di apertura della fessura:

Esempio di applicazione

Consideriamo una struttura in calcestruzzo armato edificata in classe di esposizione XC4 (Carbonatazione). Le prescrizioni della UNI-EN 206-1 (recepite nelle NTC 2008) prevedono un un quantitativo minimo di cemento pari a 300 kg/m^3 ed un valore di copriferro di 30 mm.

D.M. 14 Gennaio 2008						
Classe di esposizione		Max a/c	Min R_{ck}	Min cemento	**Copriferro**	
				[kg/m^3]	VN 50 anni	VN 100 Anni
XC0	Nessun Rischio	/	15	/	10	20
XC1 (secco)	Corrosione da Carbonatazione	0.65	25	260	15	25
XC2 (sempre umido)		0.60	30	280	25	35
XC3 (moderatamente umido)		0.55	37	280	25	35
XC4 (cicli di bagnato)		0.50	37	300	30	40

È possibile, quindi, calcolare il tempo di innesco, T_i, e di propagazione, T_p, fino ad una apertura di fessura pari al limite di fessurazione (w_c=0.3mm).

Misura di apertura della fessura:

Esempio di applicazione

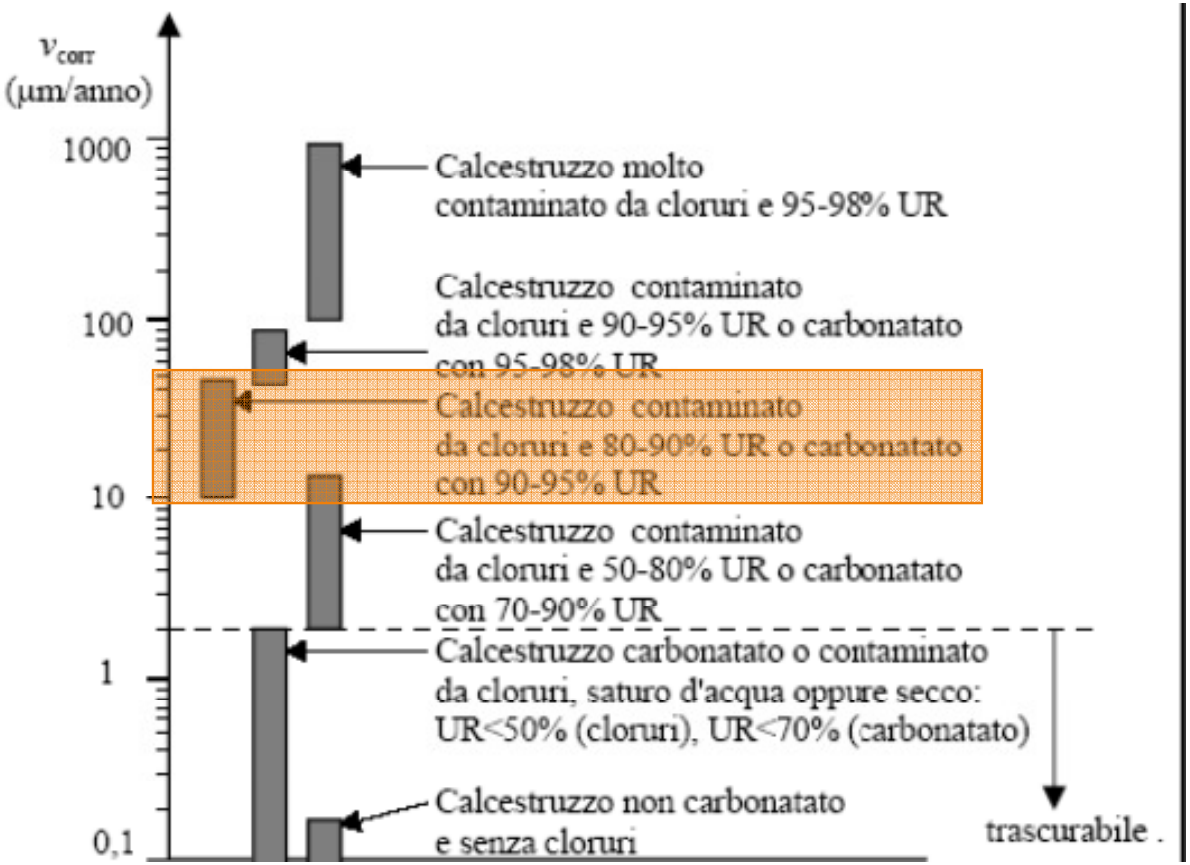
Affinchè il processo di corrosione abbia inizio, è necessario che il fronte di carbonatazione raggiunga la superficie esterna della barra secondo la legge $s=kt^{1/2}$, dove s è la profondità di carbonatazione e k il coefficiente di carbonatazione funzione del confezionamento e dalla messa in opera del calcestruzzo e dall'ambiente cui è esposto. Nel caso in esame, dovrà quindi risultare **s_1=30mm** ed **s_2=10mm**.

Consideriamo un calcestruzzo ben realizzato e, pertanto, sia k=6 mm/anno$^{1/2}$.

Il **tempo di innesco**, $T_i=(s/k)^2$, è, quindi, pari a 25 anni.

Misura di apertura della fessura:

Esempio di applicazione



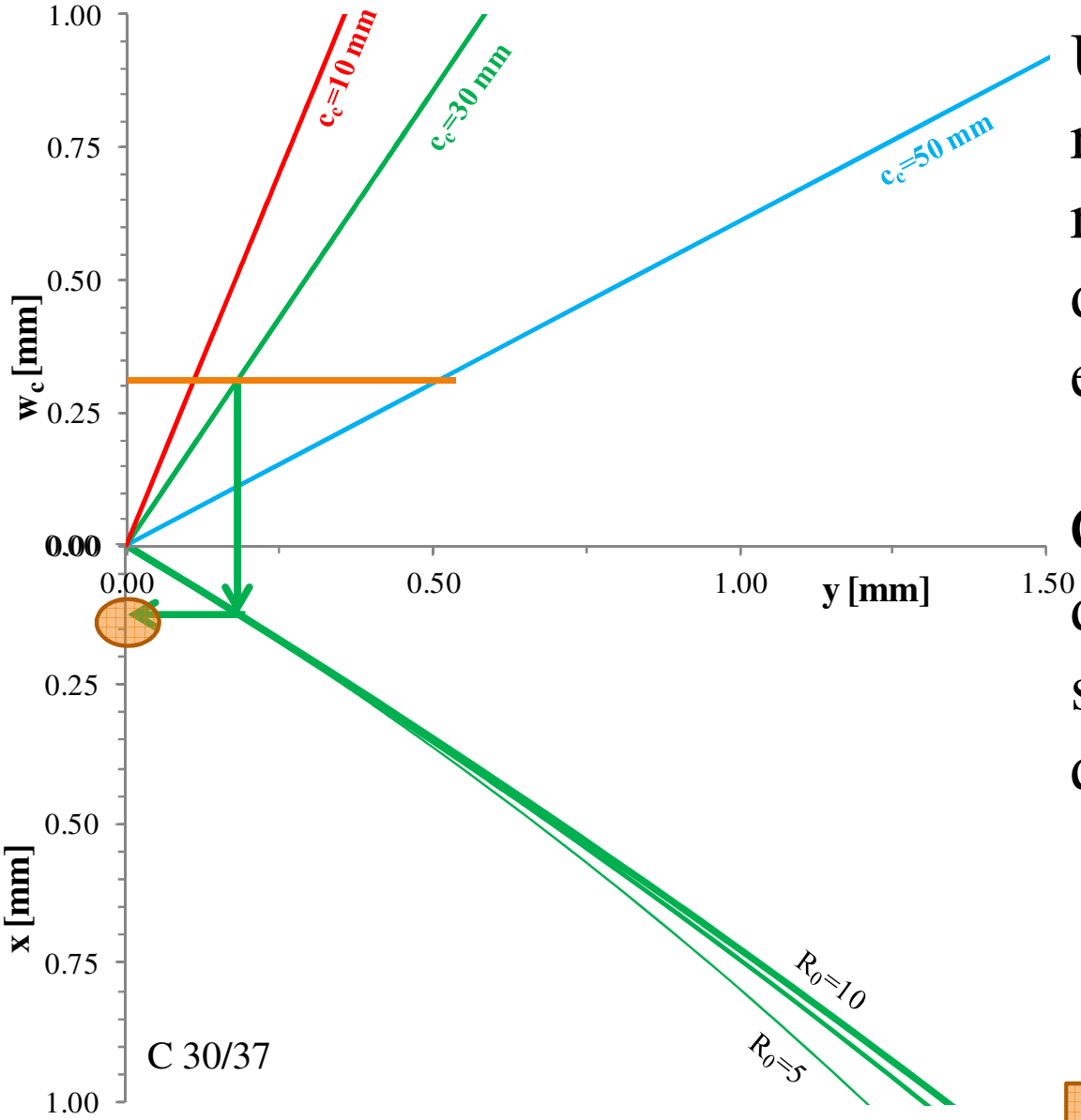
In classe di esposizione XC4 la velocità di corrosione si può considerare mediamente pari a v_{corr}=0.025 mm/anno.

Per avere il valore del tempo di penetrazione, è necessario, a questo punto, conoscere il consumo di barra, x.

Il **tempo di penetrazione, T_p**, è, infatti, definito come il rapporto tra la penetrazione limite, P_{lim}, e la velocità di corrosione, v_{corr}.

In questo caso la penetrazione limite è pari al consumo di barra, per cui è necessario individuarne il valore.

Dall'effetto alla causa

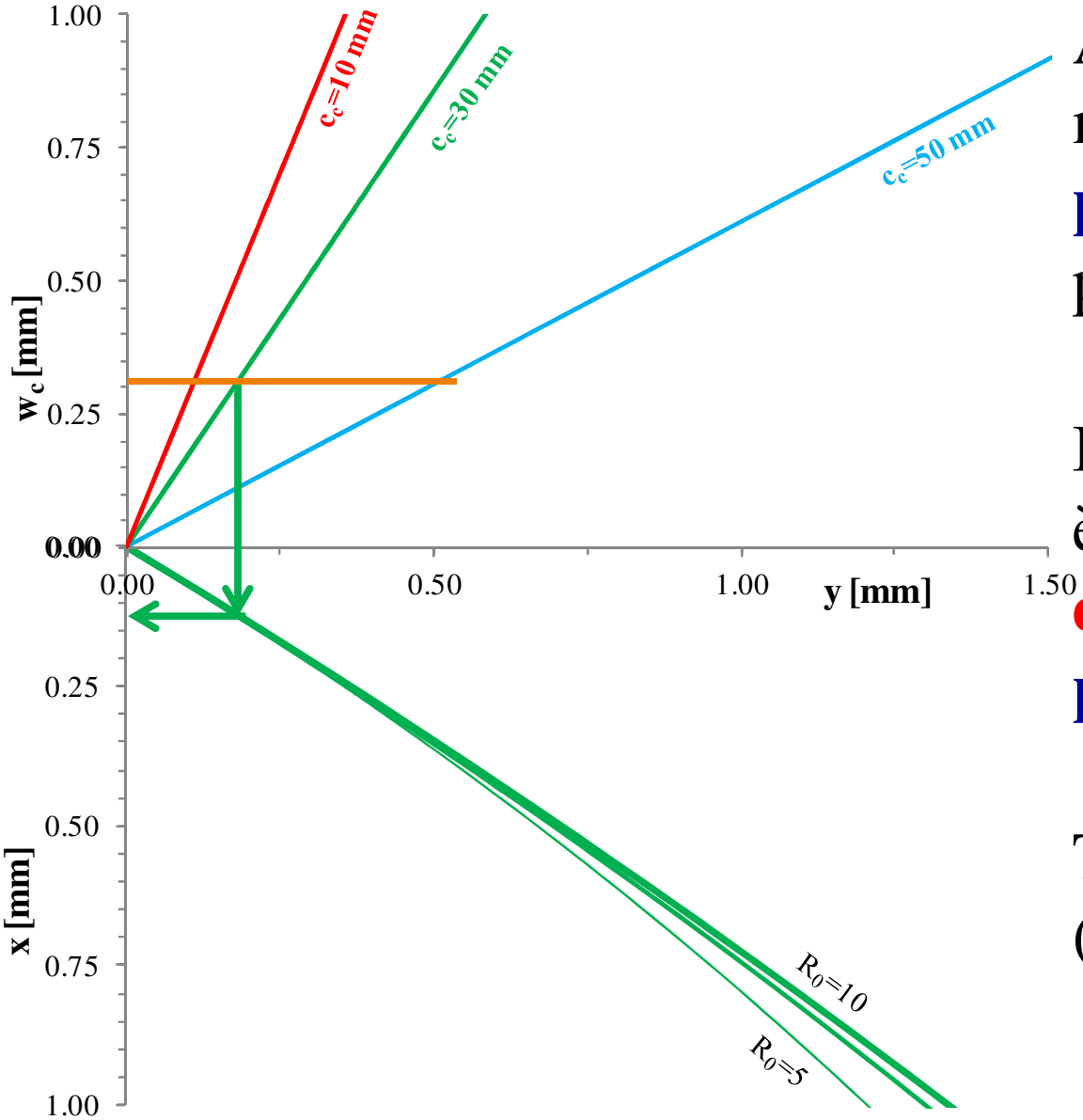


Utilizzando il grafico è possibile risalire al valore di consumo radiale di barra, x, dalla misura della fessura sulla superficie esterna del copriferro.

Consideriamo che l'apertura della fessura sia pari al limite superiore di fessurazione e, quindi, uguale a 0.300 mm.

Per un copriferro 30 mm, si ricava una penetrazione di circa 0.150 mm.

Misura di apertura della fessura

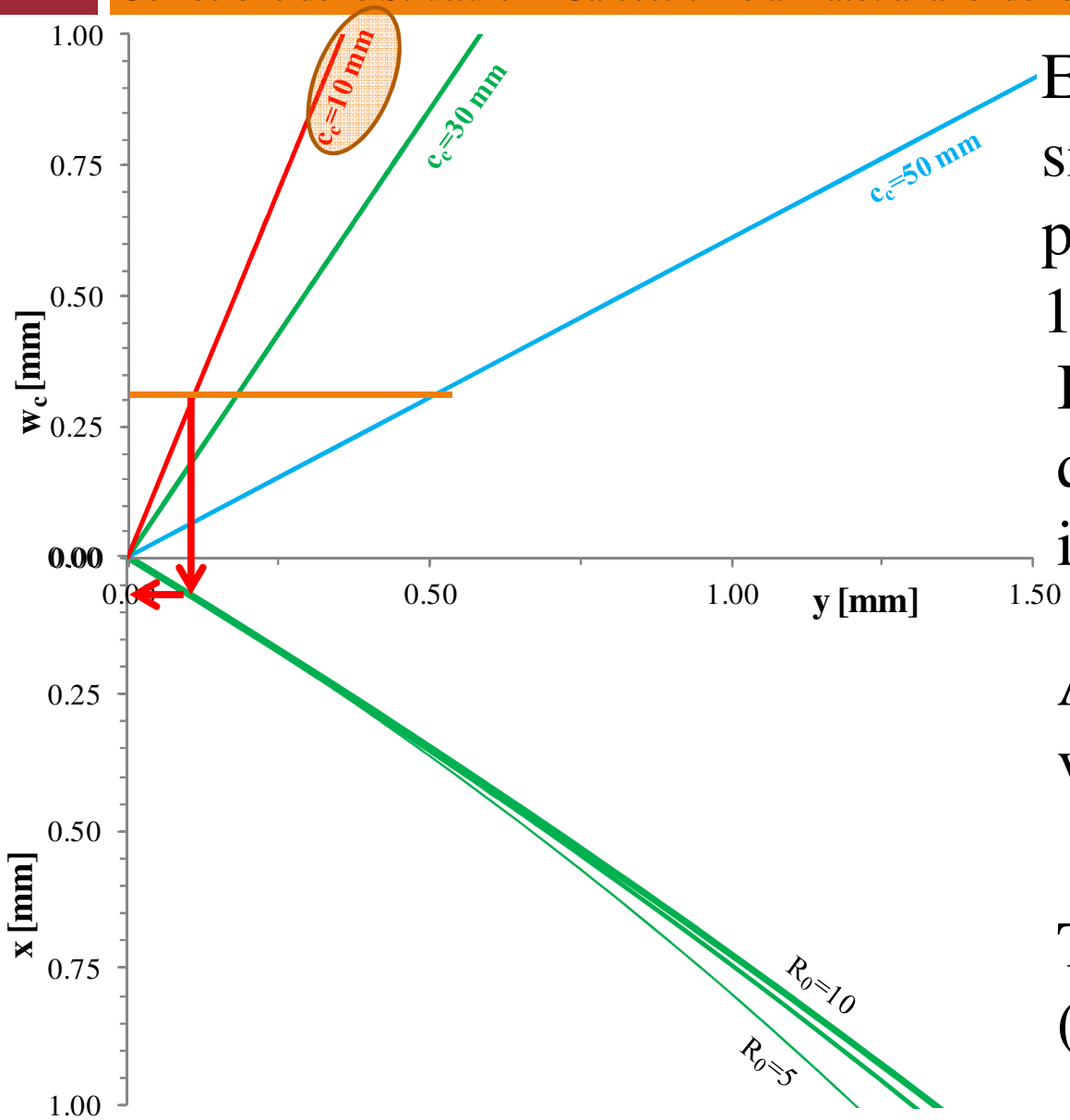


Ad una velocità di 0.025 mm/anno il **tempo di propagazione** $T_p=(P_{lim}/v_{corr})$ è pari a 6 anni.

Il **tempo utile**, T_u, del processo è uguale alla somma del **tempo di innesco**, T_i, con quello di **propagazione**, T_p.

$T_{u(30mm)} = T_{i(30mm)} + T_{p(30mm)} =$ (**25** + **6**) anni = 31 anni.

Misura di apertura della fessura



Effettuiamo il calcolo per il lato sinistro del pilastro visto in precedenza il cui copriferro è 10mm.

Il tempo di innesco, pari al quadrato del rapporto s/k, vale, in questo caso, circa 3 anni.

Anche il tempo di propagazione vale circa 3 anni, per cui:

$T_{u(10mm)} = T_{i(10mm)} + T_{p(10mm)} =$
(**3** + **3**) anni = 9 anni.

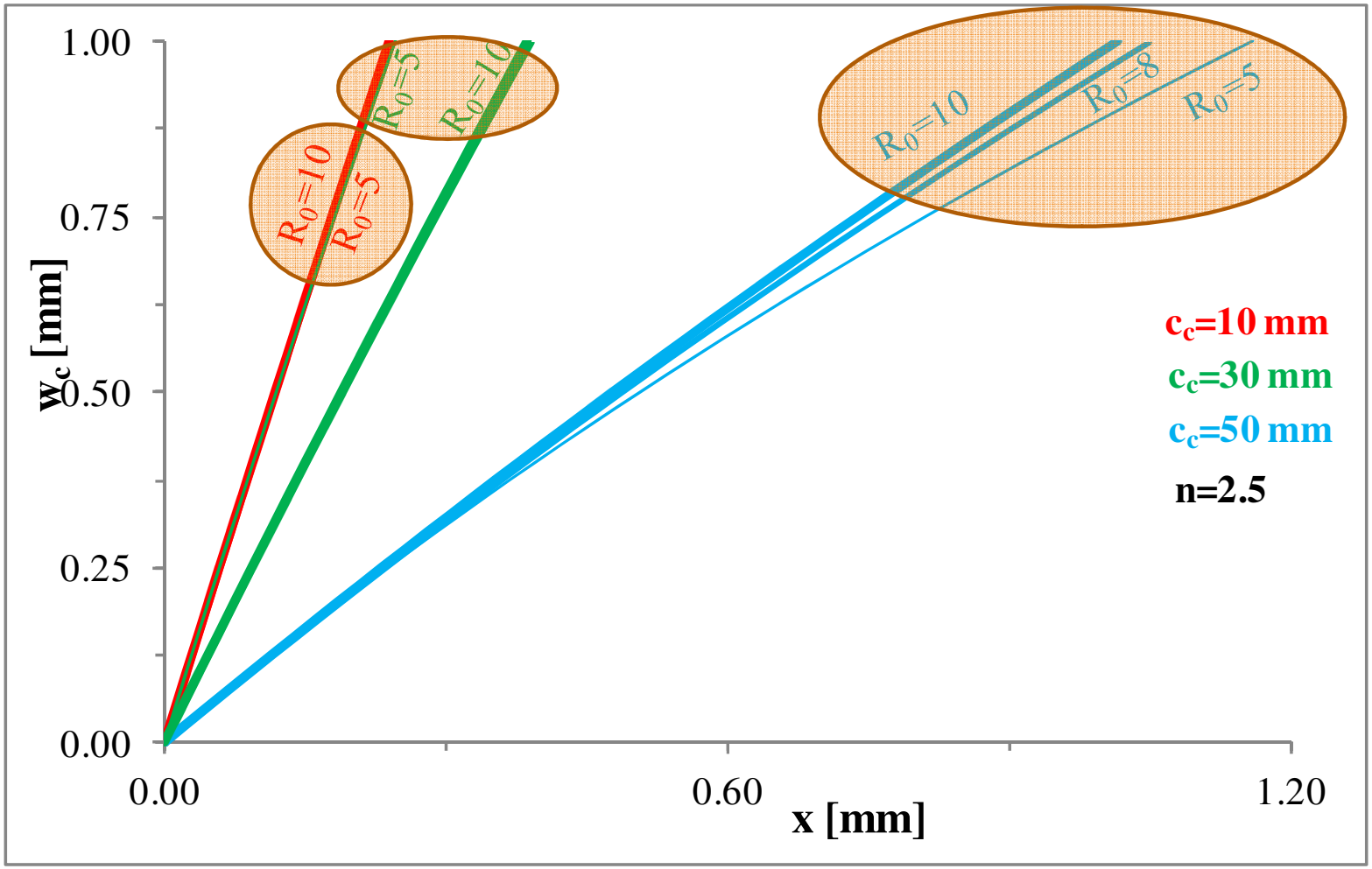
Misura di apertura della fessura

Copriferro	$T_{innesco}$	w_c	P_{lim}	v_{cor}	$T_{propagazione}$	T_{utile}	k
mm	anni	mm	mm	mm/anno	anni	anni	
10	3	0.300	0.075	0.025	3	6	6
30	25	0.300	0.150	0.025	6	31	
10	3	0.500	0.150	0.025	6	9	
30	25	0.500	0.250	0.025	10	35	
10	2	0.300	0.075	0.025	3	5	7
30	18	0.300	0.150	0.025	6	24	
10	2	0.500	0.150	0.025	6	8	
30	18	0.500	0.250	0.025	10	28	

Le prime quattro righe paragonano, per due differenti valori di copriferro (10 e 30 mm), il tempo utile. Si nota come, da una fessura w_c=0.3 mm (limite di fessurazione), si arriva al probabile disingaggio (w_c=0.5 mm) in soli 3-4 anni di differenza. Le altre righe ripetono lo stesso concetto, ma per opere confezionate con un calcestruzzo leggermente peggiore.

Relazione tra apertura di fessura e consumo di barra

È possibile mettere in relazione direttamente il valore dell'apertura della fessura, w_c, con il consumo radiale di barra, x, e costruire degli abachi in relazione a differenti valori di copriferro e diametro di barra.



Ma perché tutto ciò?

CASE EDILIZIA POPOLARE: rappresentano il 4,4% del patrimonio edilizio nazionale;

OSPEDALI PUBBLICI: 742 in tutta Italia;

SEDI COMUNALI: circa 8000 municipi più le sedi delle regioni e delle province;

UNIVERSITÀ: 68 università statali in Italia con decine di palazzi ciascuna;

AUTOSTRADE E TANGENZIALI: con cavalcavia, ponti e svincoli, gallerie;

Istituti scolastici, ponti ferroviari, porti, centrali elettriche, dighe;

STADI, piscine ed altre strutture sportive, nonché biblioteche, teatri;

Ed ancora **carceri, caserme, tribunali, metropolitane, acquedotti, ecc…**

Realizzati in calcestruzzo armato soffrono di degrado dovuto a problemi di corrosione.

Ma perché tutto ciò?

Tali fenomeni si sono spesso manifestati prima di quanto previsto in sede progettuale (in alcuni casi per errori in fase di esecuzione o per utilizzo di materiali non idonei), m anche e soprattutto a causa della **mancata manutenzione ordinaria** e **dell'assenza di modelli previsionali** atti ad individuare **tempi e modalità di intervento**.

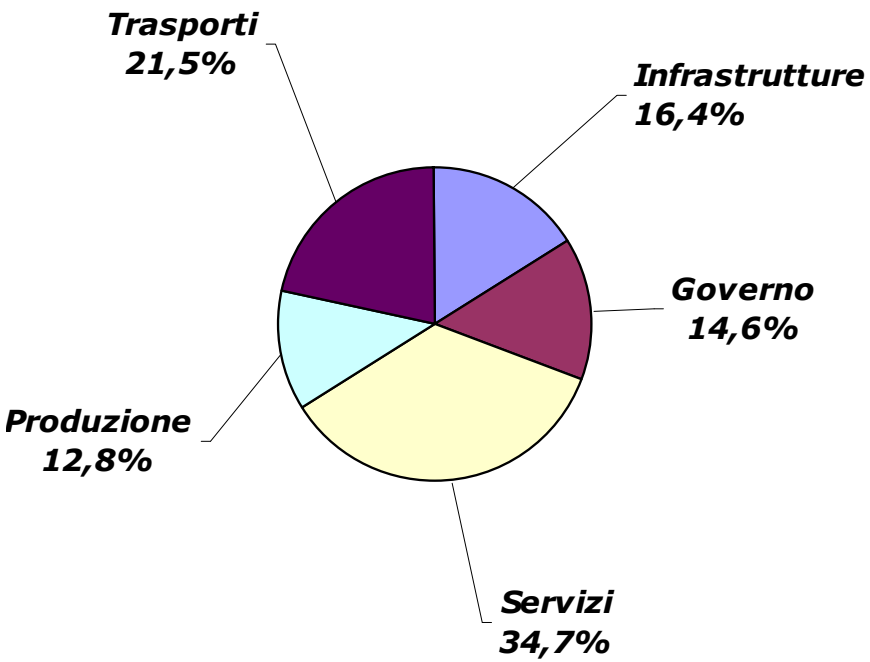
Essi rappresentano, oltre che ad un **pericolo** per la popolazione, un elevato costo economico diretto (interventi di risanamento) ed un consistente costo indiretto (mancata fruibilità dei manufatti e decoro urbano).

Ma quanto **costa** la corrosione in termini economici?

Costi della Corrosione

Negli Stati Uniti di America, uno studio degli anni '70 del Battelle Institute indica nel 4.2% del PIL il costo della corrosione, nel 2001, il dipartimento dei trasporti stima tali costi nel 5.0% del PIL pari a 440.000 milioni di dollari.

In **Italia** tale stima si attesta tra il **4.5% ed il 5.0% del PIL**, con un costo annuo di **70.000 milioni di Euro dei quali il 5.5% è speso per opere pubbliche** (circa 4000 milioni).



Senza considerare i costi indiretti connessi alla mancata fruibilità delle strutture, e, pensando a condotte di adduzione alla perdita, ad esempio, di acqua, ecc…

Facciamo due conti…

Quanto potrebbe essere risparmiato?

REGOLA DEL 5

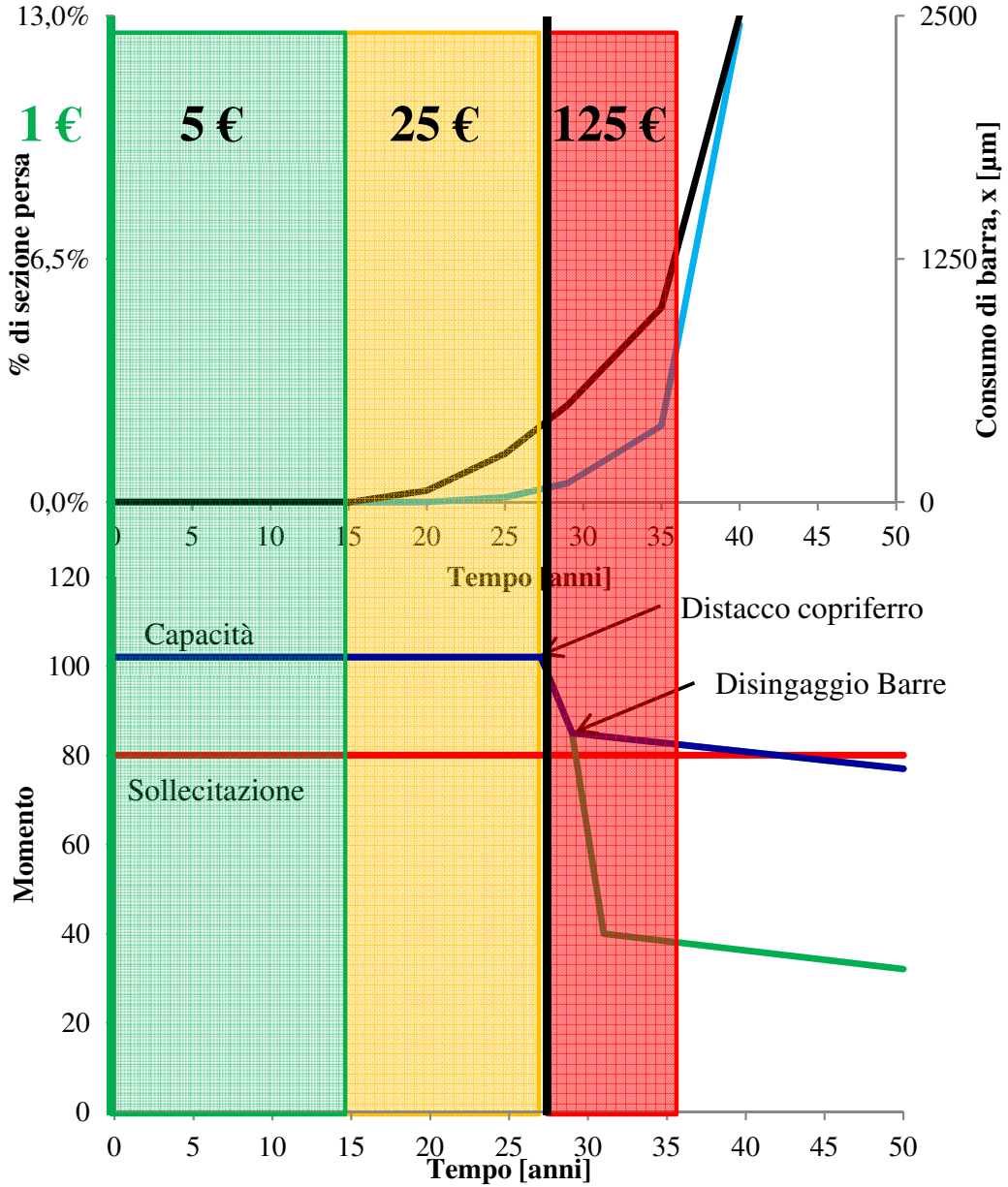
sulla valutazione dei costi connessi alla realizzazione di un'opera durevole

"Ogni singolo euro speso per ottenere una struttura in calcestruzzo armato **progettata e realizzata correttamente** comporta benefici ottenibili spendendo successivamente:

5 euro a costruzione finita nel periodo di innesco della corrosione;
25 euro quando la propagazione della corrosione è iniziata;
125 euro quando la corrosione ha portato a fessurazione il copriferro."

De Sitter

Facciamo due conti…



Si nota come avvenuto il distacco del copriferro, in pochissimo tempo il problema non diventa solo di tipo estetico, o economico, ma diventa un problema di sicurezza strutturale.

Risparmio

Se si effettua una manutenzione corretta a programmata, prima dell'espulsione del copriferro, il rapporto di risparmio è 1 € a 125 €, per cui potrebbero essere risparmiati circa: **32 milioni euro** solo dalle pubbliche amministrazioni, e **560 milioni di euro** dalla collettività tutta (pubblico + privato).

Bibliografia

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

Bossio A., Montuori M, Bellucci F., Lignola G.P., Balsamo A., Prota A., Cosenza E., "**Modellazione strutturale e monitoraggio dei fenomeni di corrosione**" II Convegno di Ingegneria Forense e V Convegno su CRolli, Affidabilità Strutturale, Consolidamento, Doppiavoce ISBN 978-88-89972-34-2 pp. 251-260. 15-17 Novembre 2012 Pisa, Italia.

Pedeferri P., Bertolini L., "**La durabilità del calcestruzzo armato**" McGraw-Hill, Milano, Italia.

Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, "**Linee Guida sul calcestruzzo strutturale**" Servizio Tecnico Centrale del C. S. dei LL. PP. UNI EN 206-1, 2006.

Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, "**Norme Tecniche per le Costruzioni, D. M. 14 gennaio 2008**" Suppl. or. n. 30 alla G.U. n. 29 del 04/02/2008.

Ing. Antonio Bossio
Dipartimento di ingegneria Chimica, dei MAteriali e della Produzione Industriale (D.I.C.MA.P.I.)

Mentre tu leggi
questo cartello si
corrodono
30.000 Kg
di ferro

Grazie per la cortese attenzione

antonio.bossio@unina.it