



L'INTERVENTO DI RECUPERO DIAGNOSI – AFFIDABILITÀ – SOSTENIBILITÀ

Ing. Antonio Bossio, PhD



Roma,
03 Febbraio 2017

Dipartimento di Strutture per l'ingegneria e l'architettura (DI.ST.) e
Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione Industriale
(D.I.C.Ma.P.I.) – Università degli Studi di Napoli “Federico II”



Strutture Corrose

2

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità





Strutture Corrose

3

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità





Strutture Corrose

4

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità





NEWS report

5

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Rai News 24





NEWS report

6

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità





NEWS report

7

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Cavalcavia di Lecco, come e perché è crollato

di Rossella Calabrese

L'analisi di Antonio Occhiuzzi, Ordinario di Tecnica delle Costruzioni all'Università Parthenope di Napoli e Direttore ITC-CNR

31/10/2016 - “**Agghiacciante**. Difficilissimo capire tutto da lontano, senza vedere i luoghi e senza poter consultare le carte, ma una certa esperienza in dissesti di ponti stradali aiuta”. [...]

“1. Cavalcavia isostatico su schema Gerber, 2 spalle e 2 pile; campate di riva in appoggio con sbalzo verso la mezzeria, selle Gerber, campata centrale più lunga a semplice appoggio sulle selle Gerber. Sezione diffusa aperta ‘a pettine’, costituita da travi con sezione a “I” affiancate. È significativo osservare, con riferimento a notizie apparse sulla stampa, che le selle appaiono avere una geometria correttamente dimensionata.

2. **Lo schema Gerber va benissimo, ma invecchia**, come tutti i ponti e come tutte le cose. I giunti strutturali sono proprio in corrispondenza delle selle Gerber, e da lì, se non sono in opera appositi apparecchi di giunto, **si infiltra l'acqua** proveniente dalla piattaforma stradale. In Lombardia, dove lavoro, si comincia a gettare **sale** sulle strade di questi tempi e si va avanti fino a fine Aprile. Inutile sottolineare l'effetto dei **cloruri di sodio** presenti in acqua sulle armature del calcestruzzo. Le foto dall'estradosso mostrano che apparecchi di giunto non ce n'erano: calcestruzzo e armature erano presumibilmente ‘invecchiati’ dal sale, quando non ammalorati, proprio in corrispondenza delle selle Gerber.

3. **Il cantoniere** addetto alla sorveglianza (lo fanno, lo fanno tutti i giorni) si accorge che il calcestruzzo delle selle si sta rapidamente deteriorando, ma non può capirne le potenziali conseguenze. **È preoccupato che pezzi di copriferro in caduta possano colpire gli autoveicoli in transito**, e fa quello che è nelle sue possibilità: chiude una corsia della strada sottostante, la corsia immediatamente al di sotto della sella Gerber, concentrando il traffico sulla sola corsia di sorpasso. L'immagine della sua telecamera mostra che già prima del passaggio del mezzo, le linee di intradosso di campata centrale e mensola non sono più allineate, come lo erano in precedenza.



NEWS report

8

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Cavalcavia di Lecco, come e perché è crollato

di Rossella Calabrese

L'analisi di Antonio Occhiuzzi, Ordinario di Tecnica delle Costruzioni all'Università Parthenope di Napoli e Direttore ITC-CNR

4. L'autoveicolo oggetto dell'incidente non può definirsi un semplice TIR. Il carico massimo lordo per gli autotreni previsto dal codice della strada è intorno ai 450 kN (45 tonnellate); da circa trent'anni, i calcoli dei ponti stradali si fanno considerando il transito di uno o più mezzi di peso pari a 600 kN (60 t); considerando anche gli altri carichi previsti dalle norme vigenti, si è a circa 1,5 volte il carico massimo che può transitare in Italia. Il camion in questione è un bestione a 8 assi, con 30 impronte di carico (gomme). La tara è intorno ai 150-200 kN (15-20 t) e il carico, da quanto si capisce due grossi coil di acciaio pesanti oltre 250 kN ciascuno, potrebbe essere superiore ai 500 kN (50 t). In totale, un peso superiore ai 700 kN, probabilmente ancora maggiore (anche se non credo che si possa arrivare a oltre 1000 kN come riferito dai giornali). NESSUNO ha progettato il cavalcavia per quel carico, NESSUNO ha costruito il cavalcavia per quel carico.

5 Esistono, ogni giorno, numerosi trasporti eccezionali, per geometria (sagoma), per carichi o per entrambe le cose. Si studiano con attenzione i percorsi, si evitano tratti a rischio - in manutenzione o sotto 'osservazione', si transita di notte chiudendo al traffico gli itinerari da utilizzare. In queste condizioni, il mezzo eccezionale transita al centro della carreggiata quando percorre gallerie e ponti. Nel caso in questione, in cui la geometria aperta della sezione trasversale definisce un comportamento torsionale completamente 'secondario' (il bimomento della sezione globale indotto dal mezzo che percorre il ponte accostato al margine della carreggiata, e non al centro, si trasforma in extra-taglio e extra-momento flettente per le singole travi (1), che si aggiungono al comportamento flessionale tradizionale), il trasporto eccezionale avrebbe dovuto percorrere il cavalcavia a cavallo della linea centrale.



NEWS report

9

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Cavalcavia di Lecco, come e perché è crollato

di Rossella Calabrese

L'analisi di Antonio Occhiuzzi, Ordinario di Tecnica delle Costruzioni all'Università Parthenope di Napoli e Direttore ITC-CNR

6. Non va così: il mezzo percorre il cavalcavia a traffico aperto (sopra e sotto), transitando sulla destra. I valori di taglio e flessione sono superiori a quelli di progetto e la posizione di transito eccentrica rispetto all'asse del ponte fa 'schizzare in cielo' il taglio nella sezione della sella Gerber sulla trave di bordo dal lato dell'autoarticolato. Appena questo è interamente sul cavalcavia, salta la sella Gerber della trave di bordo in corrispondenza della fine del mezzo (non serve tracciare la linea di influenza del taglio per carichi viaggianti per capire che è la posizione del mezzo che comporta il massimo taglio nella sella). Manca l'apparecchio di giunto, come visto prima, gli assi avranno anche impattato sulla piattaforma stradale dopo aver attraversato il giunto, dando anche un 'tocco dinamico' all'impennata del taglio. Saltata la prima sella Gerber continua la torsione dell'impalcato e saltano in sequenza anche le altre. Non tutte però: l'ultima resiste (non cederà neanche nel prosieguo) e, per qualche istante regge da sola il carico (peso del ponte e dei carichi in transito) che prima divideva con le altre quattro. L'equilibrio dinamico del cavalcavia dal momento in cui si rompe la prima sella è di difficilissima interpretazione: fatto sta che per qualche momento il peso del ponte e del carico straordinario vengono sostenuti dall'unico appoggio rimasto, generando nello sbalzo della campata di riva, al di sopra della pila, un momento flettente negativo dal valore inimmaginabile: la sezione sostiene una mostruosa rotazione plastica senza scomporsi troppo (congratulations a progettista ed esecutore per la straordinaria performance!), ma il miracolo dura solo qualche attimo.

7. L'autoarticolato ruota lungo il proprio asse e, precipitando sulla statale in basso, si ribalta quasi a 180°. L'autista della vettura bianca in transito sulla statale, si accorge di quanto sta accadendo (nel video in rete si vedono, chiari, gli stop che si accendono) e quasi riesce a fermarsi a tempo.

8. Nonostante la straordinaria duttilità della sezione di appoggio del cavalcavia, gli spostamenti assumono valori troppo elevati, la campata centrale perde l'appoggio e - praticamente integra - precipita sulla strada sottostante con il suo carico di morte, del quale non ha nessuna colpa.

Conclusioni: non basta mai un solo errore, ce ne vogliono tanti per fare un disastro. Ed errori (e responsabilità) appaiono abbastanza chiari: difetto di manutenzione, mancata comprensione di quanto sarebbe successo, viaggio temerario del carico "eccezionale" accadono questa volta in Lombardia, la più avanzata regione italiana, dove è piacevole vivere e lavorare, ma dove - come dappertutto - si sbaglia".

http://www.edilportale.com/news/2016/10/progettazione/cavalcavia-di-lecco-come-e-perch%C3%A9-%C3%A8-crollato_54737_17.html



Strutture Corrose

10

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

***STIAMO ASSISTENDO
A UNA VERA E PROPRIA
ECATOMBE
DELLE STRUTTURE!!!!!!***

MA COSA È LA CORROSIONE?



La corrosione

Processo di corrosione dell'acciaio

11

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità





La corrosione

Processo di corrosione dell'acciaio

12

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità





Processo di corrosione dell'acciaio

13

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Il termine **corrosione** (dal latino *com-* particella indicante insistenza e *rodere*, per “consumare”) indica un processo **naturale e irreversibile** di consumazione lenta e continua di un materiale, che ha come conseguenze il **peggioramento delle caratteristiche o proprietà fisiche del materiale inizialmente coinvolto**.

La corrosione è un fenomeno di natura **elettrochimica** che determina una interazione chimico-fisica del **materiale metallico** con l'ambiente che lo circonda.

La corrosione è il decadimento delle proprietà tecnologiche di un manufatto a causa di interazioni con l'ambiente circostante.



Rappresentazione schematica interfaccia

Tutti gli oggetti/manufatti prodotti e
tutti i processi produttivi comportano
l'esigenza di esporre un manufatto ad
un ambiente...
e, pertanto, alla corrosione!?



Prima difficoltà

15

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

L'ambiente può cambiare e non sappiamo come...

4 macroambienti:

AMB. INTERNO

AMB. MARINO

AMB. INDUSTRIALE

AMB. RURALE

Rad. Luminosa

NO_x

SO₂

H₂O



Esistono infinite situazioni → Teorie per infiniti casi

Metalli puri – IDEALI

Leghe – DIFETTI



Matizzazione interfaccia con circuito elettrico

16

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

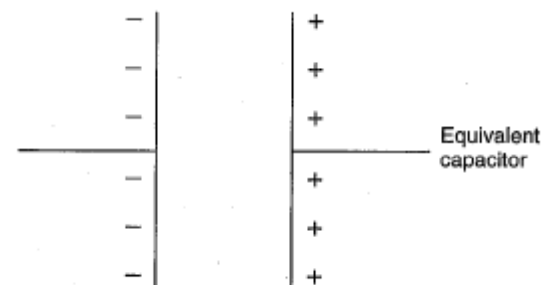
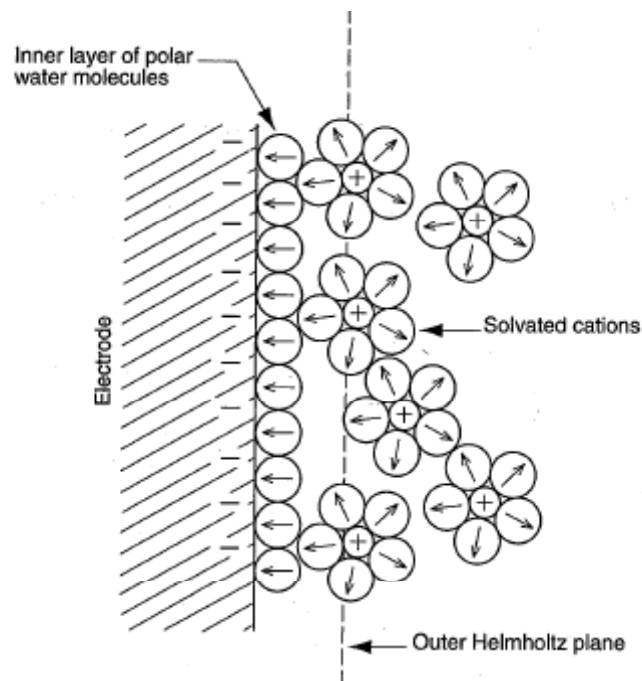


FIGURE 2.1 Schematic electrode surface structure with equivalent electric capacitor.

COSTANTE
DIELETTRICA

ϵ

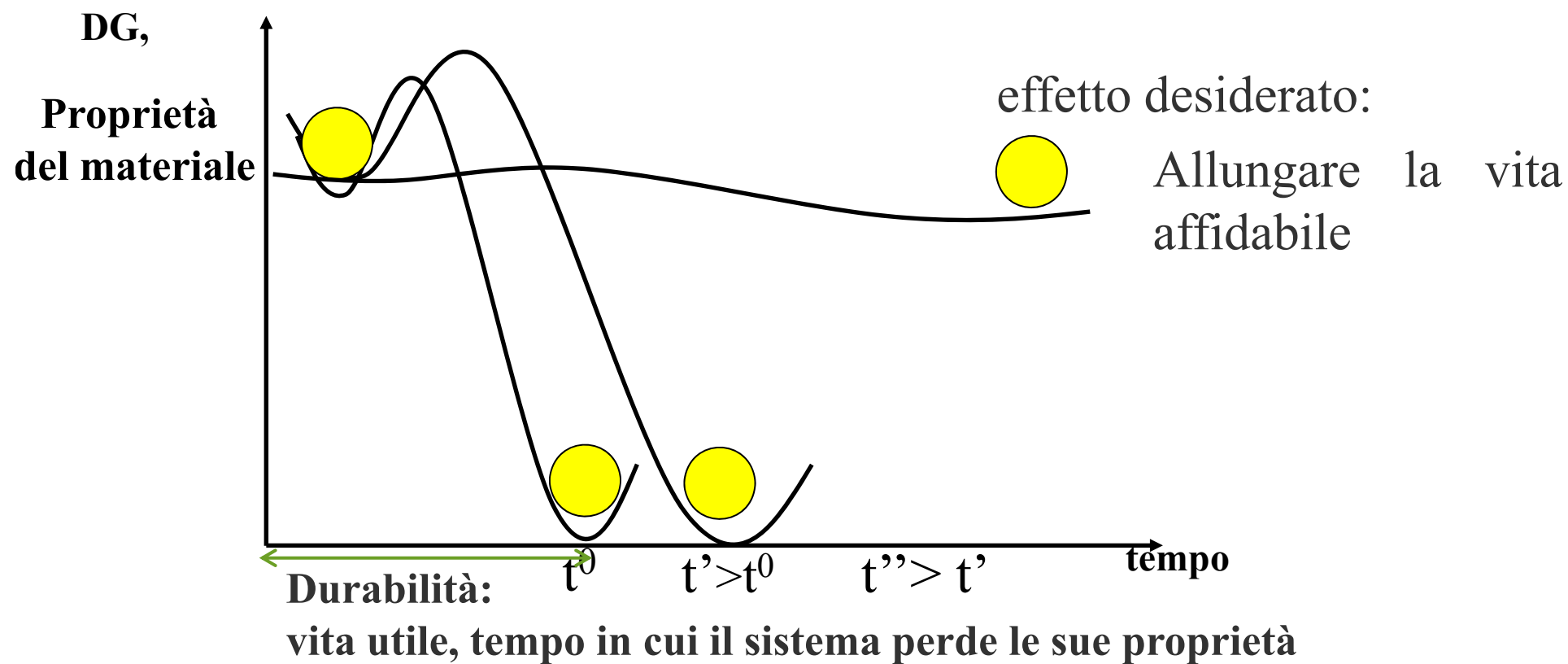
$\Delta x \sim 3-4$ file di atomi



Aspetti cinetici

17

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità – Affidabilità

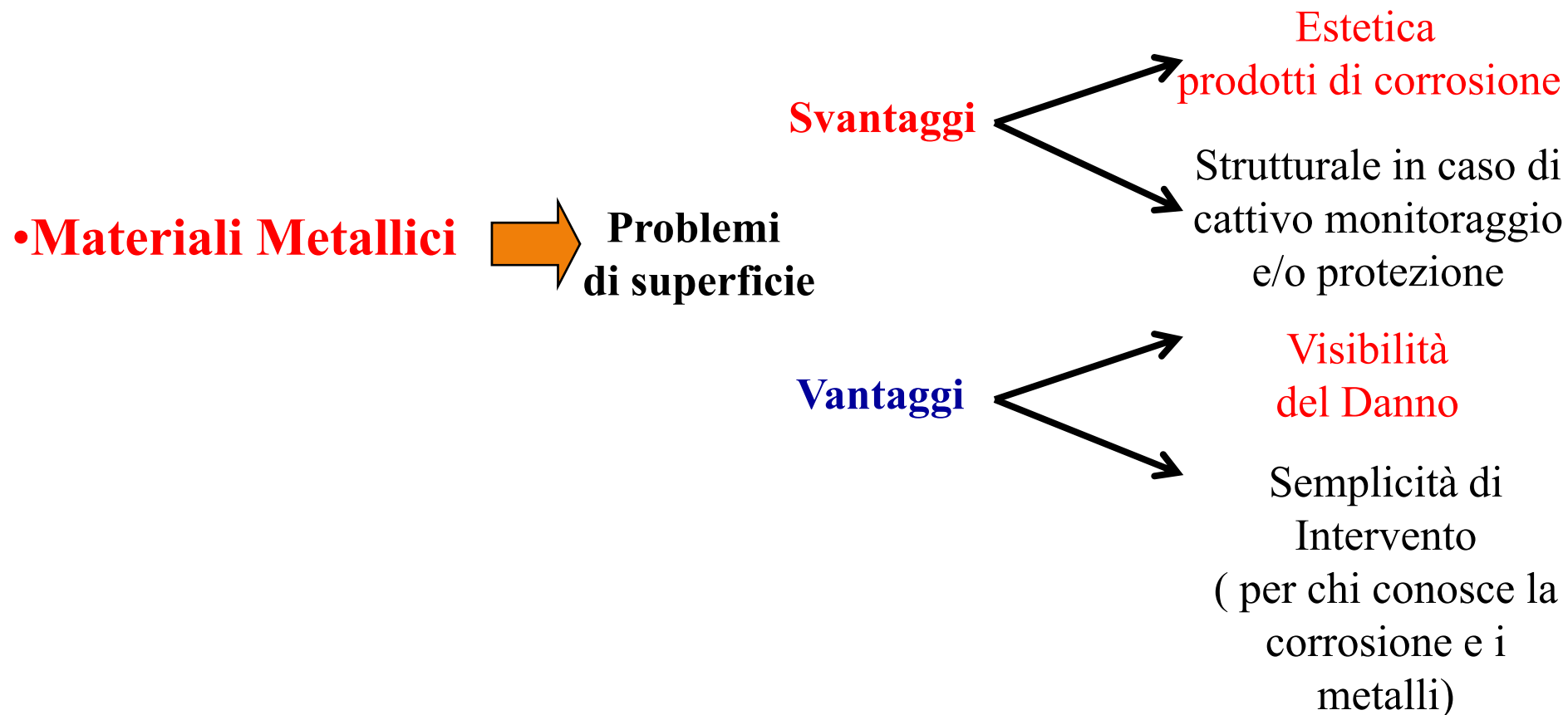




Processo di degradazione ambientale

18

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità





Come si affronta un problema reale

OSSERVAZIONE: indagare sulla superficie per ricavare informazioni riguardo COMPOSIZIONE e MORFOLOGIA

A. Occhio umano

B. Microscopio Ottico

C. SEM



Morfologie di corrosione

20

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Corrosione generalizzata: $S_c = S_a$ NON CRITICA

Corrosione localizzata: $S_c \neq S_a$ CRITICA

S_c = Superficie Catodica

S_a = Superficie Anodica



Aspetti ingegneristici: Acciaio

21

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

La corrosione induce una progressiva degradazione delle proprietà meccaniche dell'acciaio con conseguente riduzione di affidabilità e sicurezza del manufatto.



Piscina di Zurigo, 1973-1985



Impatto della corrosione del ferro

Nel tempo impiegato a leggere queste righe,

760 Kg

di ferro sono stati resi inutilizzabili, nel mondo, a causa di
fenomeni di corrosione



La corrosione

Corrosione Generalizzata

23

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



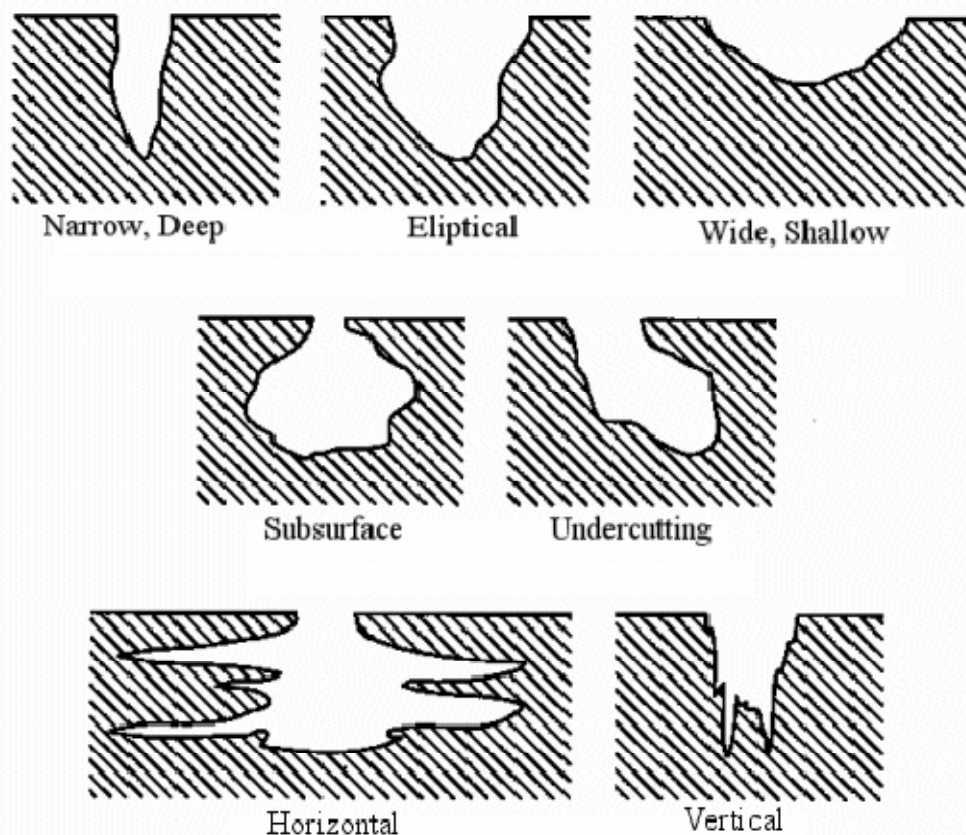


Corrosione per pitting: morfologia

24

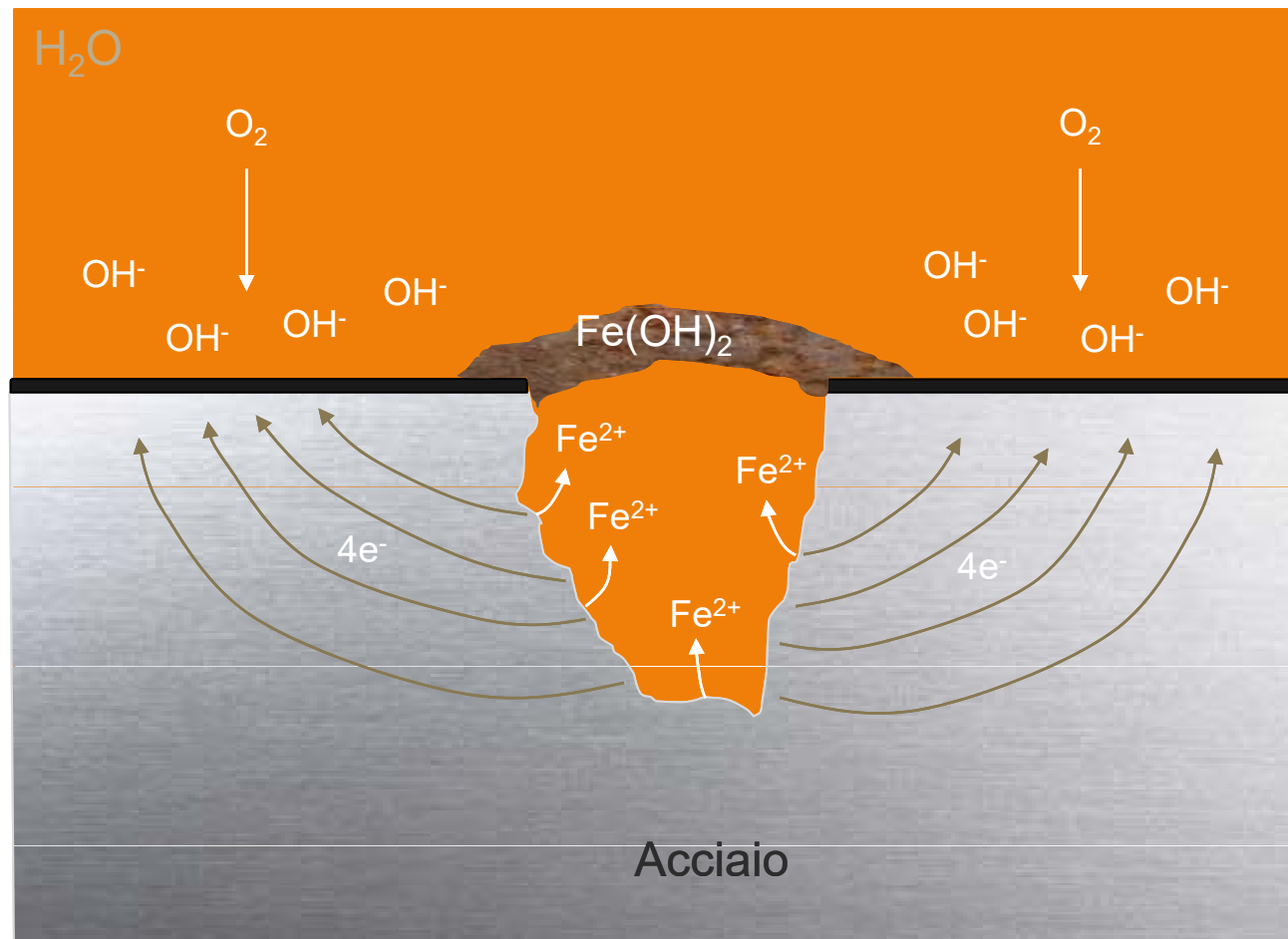
L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

La corrosione per pitting si presenta come **attacchi estremamente localizzati**, detti pit o vaiolature, che **dalla superficie penetrano attraverso lo spessore del metallo a velocità spesso molto elevata**. Le vaiolature o pit, le cui dimensioni variano da poche decine di micron sino ad alcuni millimetri, si innescano e propagano in punti singolari, mentre la gran parte della superficie metallica esposta all'ambiente resta inalterata.



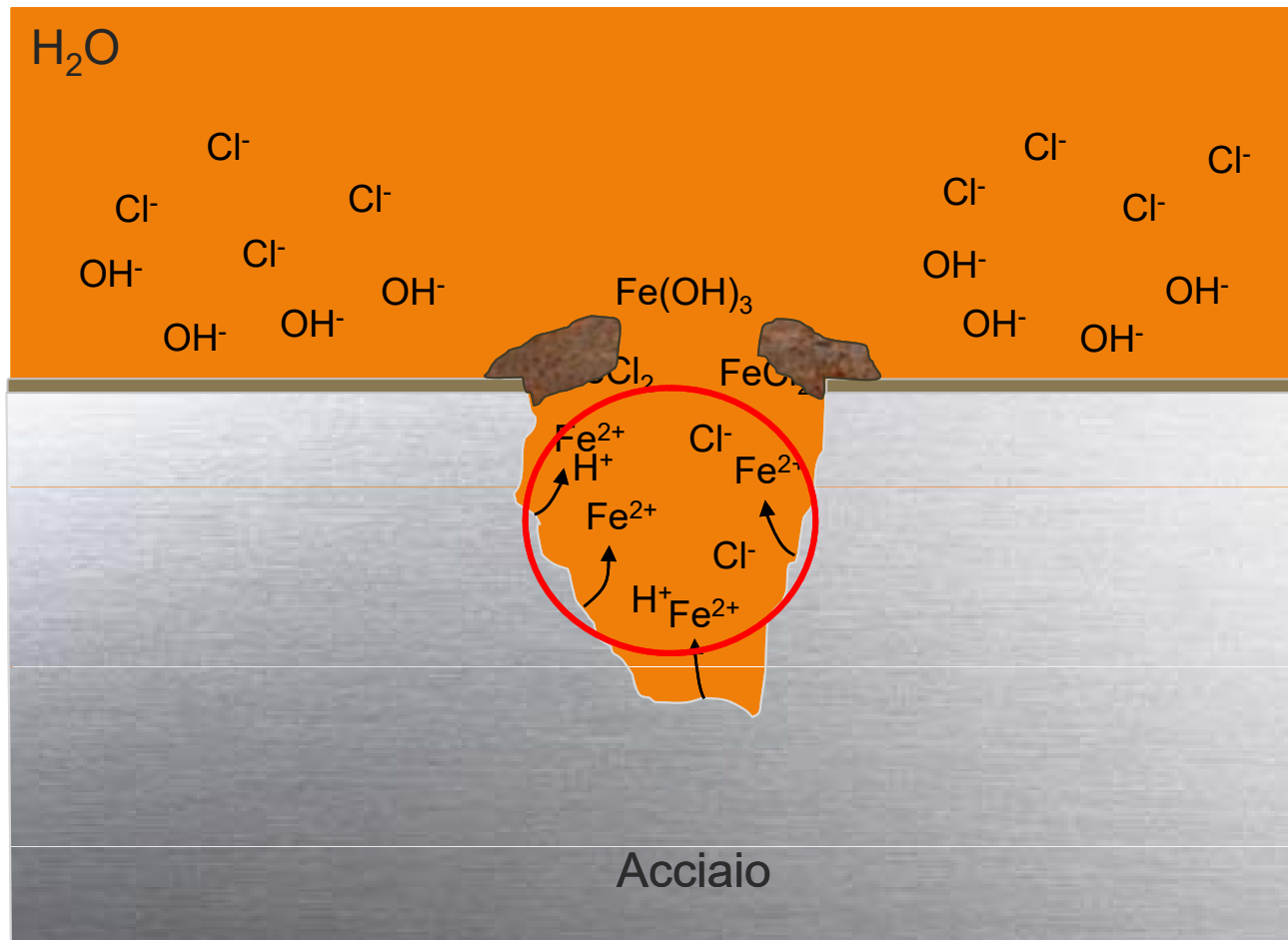


Meccanismo di corrosione per pitting





Meccanismo di corrosione per pitting





La corrosione

Protezione dalla Corrosione

27

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Dio creò la materia...

**Save the surface
and you will save all!**

...e il diavolo la superficie.



Concetto di durabilità

28

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Periodo di tempo in cui qualunque oggetto realizzato è in grado di mantenere i requisiti previsti di **sicurezza, stabilità e funzionalità**, senza richiedere manutenzione straordinaria e di ripristino.

Tutto ha una vita finita dall'oggetto più semplice a quello più complesso





La corrosione delle strutture in calcestruzzo armato

Concetto di durabilità

29

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

IL CALCESTRUZZO ARMATO COSTITUISCE UN'ECCEZIONE ???



SICURAMENTE NO!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!



La corrosione delle strutture in calcestruzzo armato

Concetto di durabilità

30

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



CALCESTRUZZO ARMATO NON È ETERNO

Fino a qualche anno fa non esistevano norme che tenessero conto della vita finita di una struttura



Concetto di durabilità

31

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Il concetto di DURABILITÀ

è stato preso in giusta considerazione solo dopo il verificarsi di incidenti rilevanti e drammatici



Si è reso necessario un intervento da parte del legislatore che mettesse
ORDINE
in una materia nella quale ha regnato il **CAOS** per decenni



Cronistoria normativa

32

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

L'importanza del problema è stata colta, in Italia, per la prima volta alla fine degli anni '60, e tradotta in norma nel 1980, in quanto nella legge 1086/1971 e successivi D.M. a essa associati (D.M. 9161/1971, D.M. 30/1972 e D.M. 16/1976) non si fa menzione di durabilità del calcestruzzo.

A introdurlo per primo è stato, anche se la garanzia della durabilità è demandata alla discrezionalità del progettista, il **D.M. del 26/03/1980**, che al punto 2.1.8 specifica: “*al fine di garantire la durabilità del conglomerato in ambiente aggressivo è necessario prescrivere, in funzione della granulometria o del rapporto acqua/cemento, un dosaggio minimo di cemento*”;

Nel 1985 il D.M. 27/07/1985, sempre al punto 2.1.8 specifica: “*al fine di garantire la durabilità del conglomerato particolarmente in ambiente aggressivo, così come in presenza di cicli di gelo e disgelo, è necessario studiarne adeguatamente la composizione*”;

Il D.M. 14/02/1992 ribadisce le direttive del precedente e al punto 2.1.8 riporta: “*al fine di garantire la durabilità del conglomerato particolarmente in ambiente aggressivo, così come in presenza di cicli di gelo e disgelo, è necessario studiarne adeguatamente la composizione*”.

IN PRATICA LE STESSE IDENTICHE PAROLE



Cronistoria normativa

33

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Solo con l'entrata in vigore del D.M. del **09/01/1996**, si dà al progettista un riferimento normativo, infatti al testo del precedente D.M. (14/02/1992) si aggiunge il seguente capoverso: *“Si potrà anche far riferimento alla norma UNI 9858 (maggio 1991)”*.

Il riferimento a norme è stato ripreso dal vigente **D.M. 14/01/2008** che, oltre a dedicare un paragrafo alla durabilità (11.2.11) all'ultimo capoverso del punto recita *“Al fine di ottenere la prestazione richiesta in funzione delle condizioni ambientali, nonché per la definizione della relativa classe, si potrà fare utile riferimento alle indicazioni contenute nelle Linee Guida sul calcestruzzo strutturale edite dal Servizio centrale del Consiglio Superiore dei LL.PP. ovvero alle norma UNI EN 206 – 2006 ed UNI 11104:2004”*.

Queste ultime norme UNI hanno sostituito le UNI 9858 e danno finalmente una chiara indicazione al progettista su come progettare un calcestruzzo durevole in relazione al tipo di ambiente cui la struttura è esposta.

In particolare la **UNI EN 206-2006** definisce 5 macroclassi di esposizione ambientale delle strutture. Tali macroclassi sono a loro volta suddivise in sottoclassi, ognuna delle quali caratterizzata da specifici parametri per il confezionamento del calcestruzzo. Di seguito, si riporta una tabella riassuntiva delle macroclassi e delle relative sottoclassi con l'indicazione dei suddetti parametri.



Durabilità del calcestruzzo armato

34

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Classi di esposizione ambientale (EN 206-1, prospetto 1)

<u>classe</u>	<u>Ambiente/agenti di degrado</u>
<u><i>XC</i></u>	assenza di rischio di corrosione delle armature o di attacco del cls.
<u><i>XC</i></u>	corrosione delle armature indotta da carbonatazione
<u><i>XD</i></u>	corrosione delle armature indotta da cloruri esclusi quelli provenienti dall'acqua di mare
<u><i>XS</i></u>	corrosione da cloruri presenti nell'acqua di mare
<u><i>XF</i></u>	degrado del cls. provocato da cicli di gelo/disgelo con o senza sali disgelanti
<u><i>XA</i></u>	attacco chimico del calcestruzzo



Diversi ambienti determinano microclimi differenti all'interno di una stessa struttura



Concetto di durabilità nelle normative

35

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

In una definizione data dal comitato misto delle due associazioni internazionali FIP (Federation Internationale de la Precontrainte) e CEB (Comité Eurointernational du Beton) la durabilità di una struttura viene espressa come:

“attitudine di un'opera a sopportare attacchi di agenti aggressivi di diversa natura mantenendo inalterate le caratteristiche meccaniche e funzionali”

RICHIAMO ALLA DURABILITÀ NEL D.M. DEL 14.01.2008

Il D.M. 14.1.2008 chiarisce, finalmente, che “*Le presenti Norme tecniche per le costruzioni definiscono i principi per il progetto, l'esecuzione e il collaudo delle costruzioni, nei riguardi delle prestazioni loro richieste in termini di requisiti essenziali di resistenza meccanica e stabilità, anche in caso di incendio, e di durabilità. Esse forniscono quindi i criteri generali di sicurezza, precisano le azioni che devono essere utilizzate nel progetto, definiscono le caratteristiche dei materiali e dei prodotti e, più in generale, trattano gli aspetti attinenti alla sicurezza strutturale delle opere*”.



La corrosione delle strutture in calcestruzzo armato

Parametri di normativa per la durabilità

36 L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità												
D.M. 14 Gennaio 2008							UNI 206-1					
Classe di esposizione		Max a/c	Min R _{ck}	Min cemento	Copriferro		Classe di esposizione		Max a/c	Min R _{ck}	Min cemento	Copriferro
				[kg/m ³]	VN 50 anni	VN 100 Anni					[kg/m ³]	VN 50 anni
XC0	Nessun Rischio	/	15	/	10	20	XC0	Nessun Rischio	/	15	/	15
XC1 (secco)	Corrosione da Carbonatazione	0.65	25	260	15	25	XC1 (secco)	Corrosione da Carbonatazione	0.65	25	260	20
XC2 (sempre umido)		0.60	30	280	25	35	XC2 (sempre umido)		0.60	30	280	20
XC3 (moderatamente umido)		0.55	37	280	25	35	XC3 (moderatamente umido)		0.55	37	280	30
XC4 (cicli di bagnato)		0.50	37	300	30	40	XC4 (cicli di bagnato)		0.50	37	300	30
XS1 (sulla costa)	Corrosione da Cloruri	0.50	37	300	35	45	XS1 (sulla costa)	Corrosione da Cloruri	0.50	37	300	30
XS2 (sommerso)		0.45	45	320	40	50	XS2 (sommerso)		0.45	45	320	40
XS3 (spruzzi)		0.45	45	340	45	55	XS3 (spruzzi)		0.45	45	340	40
XD1 (moderatamente umido)	Corrosione da Cloruri da altre fonti	0.55	37	300	35	45	XD1 (moderatamente umido)	Corrosione da Cloruri da altre fonti	0.55	37	300	30
XD2 (umido)		0.55	37	300	40	50	XD2 (umido)		0.55	37	300	30
XD3 (cicli di bagnato)		0.45	45	320	45	55	XD3 (cicli di bagnato)		0.45	45	320	40

Queste classi influenzano dapprima le prestazioni dell'acciaio e successivamente interessano quelle del calcestruzzo e, di conseguenza, quelle della sezione e della struttura in generale.



La corrosione delle strutture in calcestruzzo armato

Parametri di normativa per la durabilità

37 L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità												
D.M. 14 Gennaio 2008							UNI 206-1					
Classe di esposizione		Max a/c	Min R _{ck}	Min cemento	Copriferro		Classe di esposizione		Max a/c	Min R _{ck}	Min cemento	Copriferro
				[kg/m ³]	VN 50 anni	VN 100 Anni					[kg/m ³]	VN 50 anni
XF1 (moderata saturazione di acqua in assenza di agente disgelante)	Corrosione da cicli di gelo/disgelo con e senza disgelanti	0.50	40	320	30		XF1 (moderata saturazione di acqua in assenza di agente disgelante)	Corrosione da cicli di gelo/disgelo con e senza disgelanti	0.55	37	300	30
XF2 (moderata saturazione di acqua in presenza di agente disgelante)		0.50	30	340	45		XF2 (moderata saturazione di acqua in presenza di agente disgelante)		0.55	30	300	30
XF3 (elevata saturazione di acqua in assenza di agente disgelante)		0.50	30	340	30		XF3 (elevata saturazione di acqua in assenza di agente disgelante)		0.50	37	320	30
XF4 (elevata saturazione di acqua in presenza di agente disgelante)		0.45	35	360	45		XF4 (elevata saturazione di acqua in presenza di agente disgelante)		0.45	37	340	40
XA1 (ambiente chimicamente debolmente aggressivo secondo il prospetto 2 della UNI EN 206-1)	Corrosione da attacco chimico	0.55	35	320	25		XA1 (ambiente chimicamente debolmente aggressivo secondo il prospetto 2 della UNI EN 206-1)	Corrosione da attacco chimico	0.55	37	300	30
XA2 (ambiente chimicamente moderatamente aggressivo secondo il prospetto 2 della UNI EN 206-1)		0.50	40	340	25		XA2 (ambiente chimicamente moderatamente aggressivo secondo il prospetto 2 della UNI EN 206-1)		0.50	37	320 con cemento resistente a solfati	30
XA3 (ambiente chimicamente fortemente aggressivo secondo il prospetto 2 della UNI EN 206-1)		0.45	45	360	25		XA3 (ambiente chimicamente fortemente aggressivo secondo il prospetto 2 della UNI EN 206-1)		0.45	45	360 con cemento resistente a	40

Queste classi **influenzano dapprima le prestazioni del calcestruzzo** e successivamente interessano quelle dell'**acciaio** e, di conseguenza, quelle della sezione e della struttura in generale.



Patrimonio residenziale

38

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

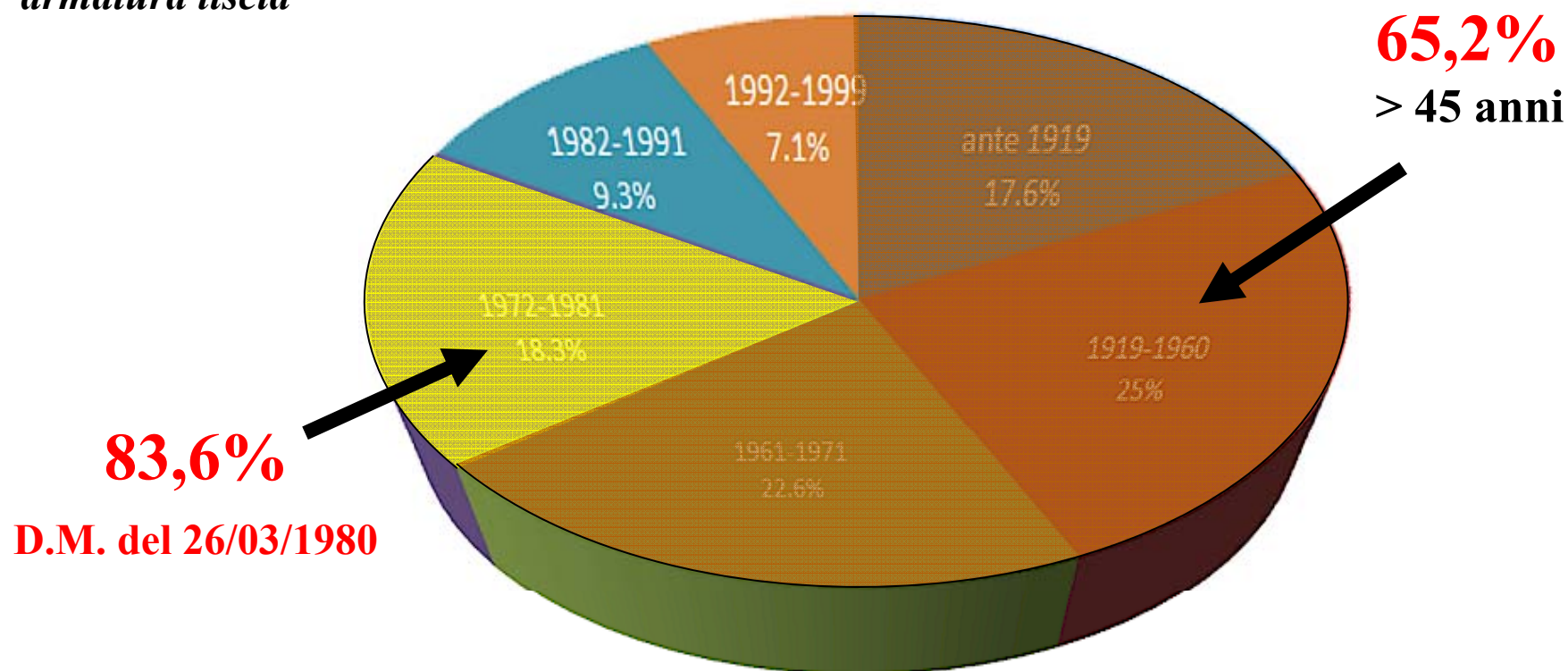
Pre anni '70

Strutture in
calcestruzzo armato
realizzate con
armatura liscia

Legge 5 novembre 1971 n° 1086

→ *Norme per la disciplina delle opere di
conglomerato cementizio armato*

→ **Armatura ad
aderenza migliorata**



Fonte: prof. ing.
Gianfranco de Matteis

Patrimonio residenziale per epoca di costruzione



Degrado del calcestruzzo armato

39

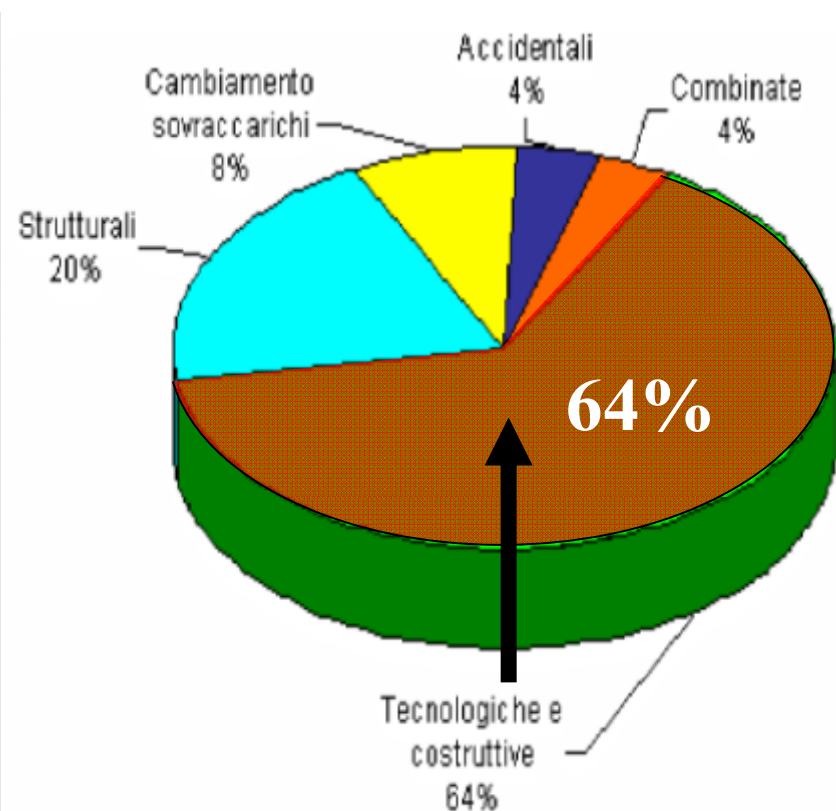
L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Un recente studio riporta una statistica eseguita su 139 strutture affette da diverse “patologie” riconducibili a 6 cause principali di degrado. Da tale studio emerge come il **64%** delle cause principali sono dovute a motivi tecnologici e costruttivi.

Cause	Descrizione	N. strutture	Tot.	%
Tecnologiche	1) Cls di qualità scadente	31	58	41.73%
	2) Attacco chimico del cls	12		
	3) Copriferro inadeguato	9		
	4) Materiali di base non idonei	6		
Costruttive	5) Scarso controllo della messa in opera	19	31	22.30%
	6) Ignoranza delle tecniche costruttive	12		
Strutturali	7) Calcolo strutturale incompleto o errato	28	28	20.14%
Sovraccarichi	8) Variazione della destinazione d'uso	11	11	7.91%
Accidentali	9) Incendio	6	6	4.32%
Combinata	10) Risultante da almeno due condizioni delle precedenti	5	5	3.60%

Tot. Complessivo 139

Tabella 1 – Vulnerabilità degli edifici in c.a. secondo Olazabel e Traversa.





Corrosione nelle strutture in calcestruzzo armato

Durabilità del calcestruzzo armato

40

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Seppure il calcestruzzo armato era considerato, nel secolo scorso, un materiale eterno, il presentarsi di fenomeni di degrado precoce ha certamente fatto cambiare rotta a professionisti e legislatori.

I fenomeni di corrosione, oltre a ridurre la **sicurezza e la stabilità strutturale delle opere,**
rappresenta un problema di pubblica incolumità.



Corrosione nelle strutture in calcestruzzo armato

Durabilità del calcestruzzo armato

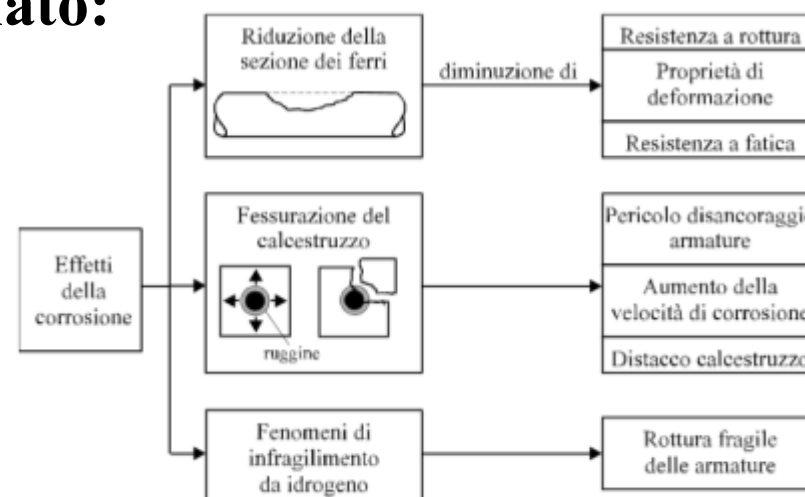
41

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Il presentarsi delle forme di degrado porta alla conoscenza dei fenomeni di base (**Processi elettrochimici**)

Le **MALATTIE** del calcestruzzo armato:

1. Corrosione da cloruri
2. Corrosione da carbonatazione
3. Infragilimento da idrogeno
4. Correnti vaganti/disperse





Corrosione nelle strutture in calcestruzzo armato

Corrosione da carbonatazione

42

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Il calcestruzzo

pH $13 \div 13,5$

Presenza di film passivo sulle
armature

Acciaio protetto

Corrosione trascurabile

$v_{corr} < 2 \mu\text{m}/\text{anno}$

La penetrazione di CO_2 ha un
duplice effetto:

- Incrementa la resistenza
superficiale riducendo la
porosità

- *Degrada fortemente le
armature*



La Carbonatazione

(penetrazione di CO_2)

Riduce il pH $13 \div 13,5$ a 9

Distrugge il film passivo sulle
armature

Acciaio non protetto

*In presenza di O_2 e H_2O dà luogo
a corrosione generalizzata
 $10 \mu\text{m}/\text{anno} < v_{corr} < 100 \mu\text{m}/\text{anno}$*



Corrosione nelle strutture in calcestruzzo armato

Corrosione da carbonatazione

43

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Corrosione da carbonatazione

Tempo di innesco:

$$t_i = \left(\frac{c}{K} \right)^2$$

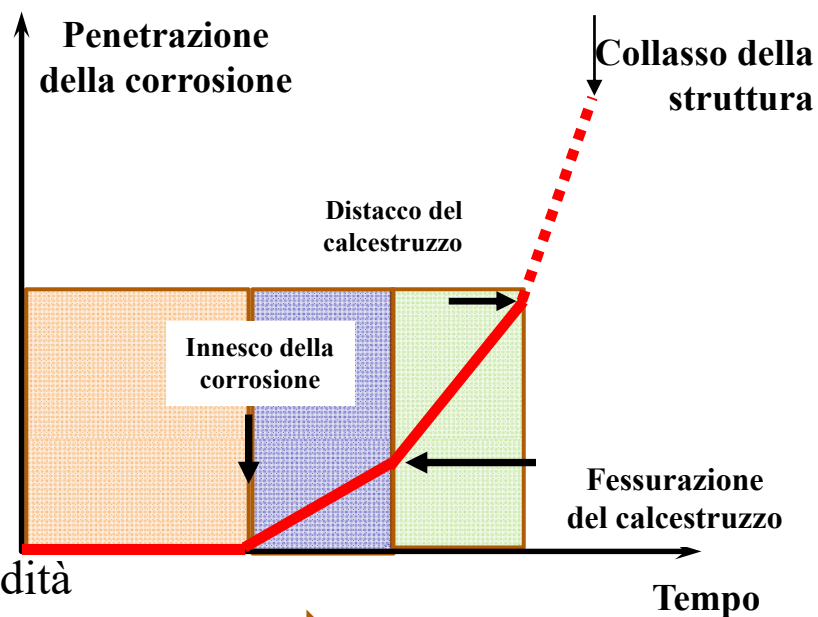
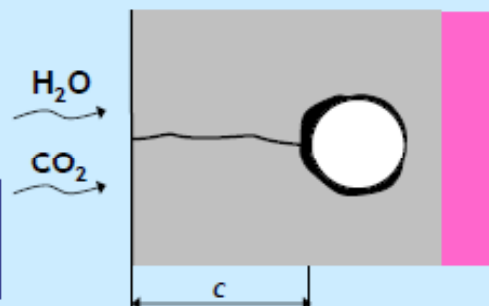
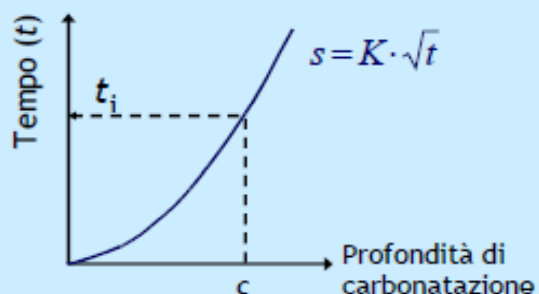
Tempo di propagazione (t_p):

- velocità di corrosione (V_{corr})
- penetrazione limite (P_{lim})

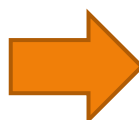
$$t_p = \frac{P_{\text{lim}}}{V_{\text{corr}}}$$

Vita di servizio

$$t_u = t_i + t_p$$



K = coefficiente di carbonatazione



Umidità
Temperatura
Porosità
Compattazione



Facilmente ricavabile



Diagramma Pourbaix: Ferro

44

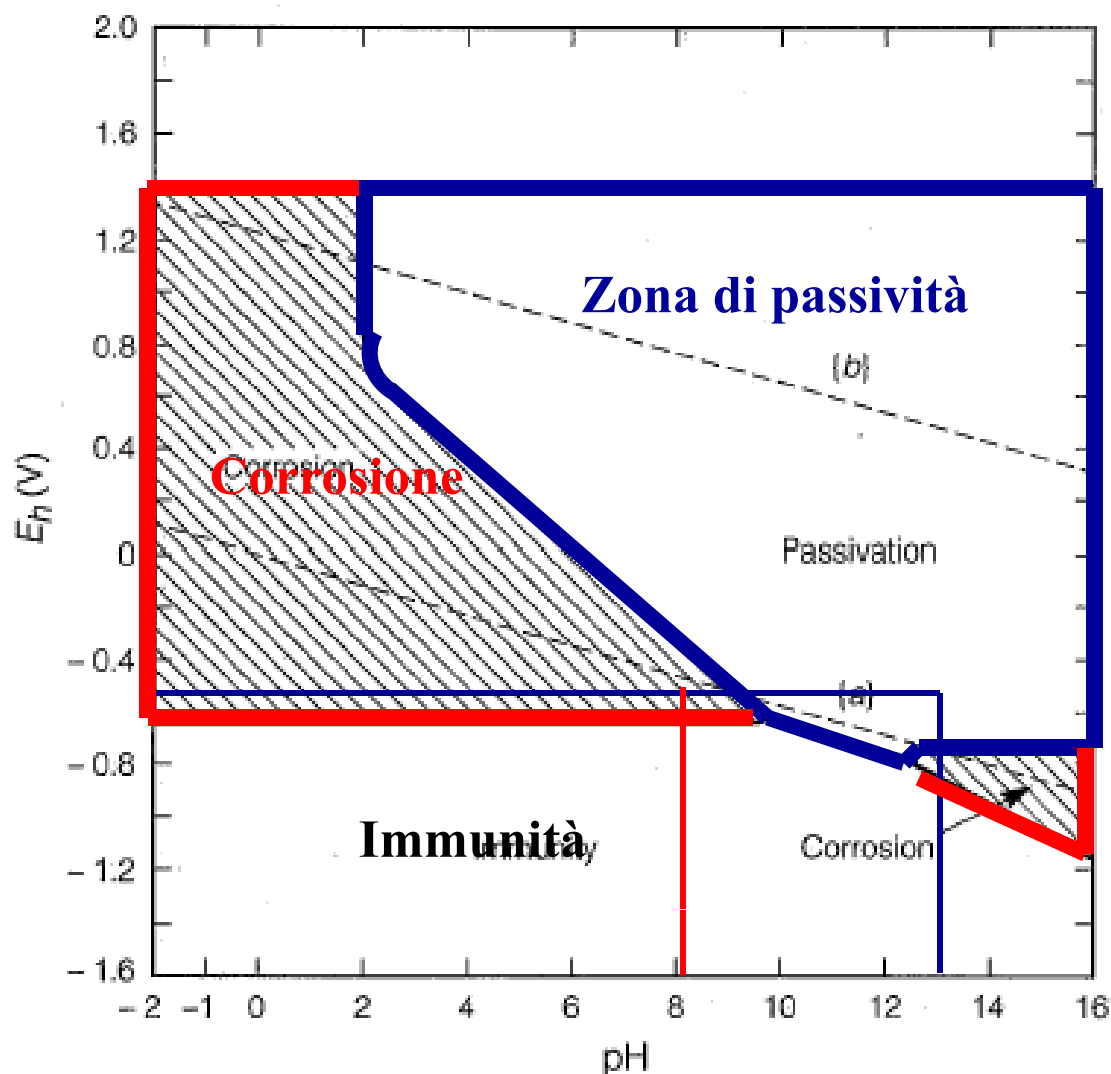
L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Zona di passività

La passivazione è un fenomeno di natura elettrochimica che può rallentare o impedire la reazione di corrosione dei metalli. Tale fenomeno consiste nella formazione di un sottile film (costituito da prodotti della corrosione, sostanze presenti nell'ambiente aggressivo o ossigeno adsorbito sulla superficie del metallo) che aderisce perfettamente alla parte della superficie del pezzo a contatto con l'ambiente. Perché possa avvenire il fenomeno della passivazione, tale film deve ostacolare la diffusione dell'agente ossidante, per cui deve essere "compatto", cioè deve essere denso e poco poroso.

Immunità

Generalmente si ritiene che un metallo sia in stato di immunità quando termodinamicamente è stabile rispetto al mezzo che lo contiene. I potenziali di equilibrio s'intendono definiti per i vari metalli misurandoli rispetto ad un elettrodo impolarizzabile il quale dovrà essere disposto, per realizzare il miglior contatto con l'ambiente e nel caso di strutture interrate, alla superficie del terreno sulla verticale della struttura. Si può affermare che lo stato di immunità permane fino a quando il metallo ha comportamento catodico rispetto ad altri metalli presenti o all'ambiente esterno cioè fino a quando il potenziale del metallo rispetto al terreno assuma valori inferiori a -1V.





Corrosione nelle strutture in calcestruzzo armato

Corrosione da cloruri

45

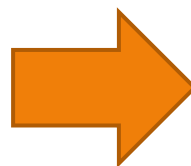
L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Gli ioni cloruro Cl^-

Rompono il film passivo (protettivo)

Danno luogo, in presenza di O_2 e H_2O a corrosione di tipo:

**Localizzata o generalizzata (in
relazione alla concentrazione)**



Il tenore Critico

0,4÷1% in peso del contenuto di
cemento

Corrosione pericolosa

$v_{corr} > 200 \mu\text{m}/\text{anno}$

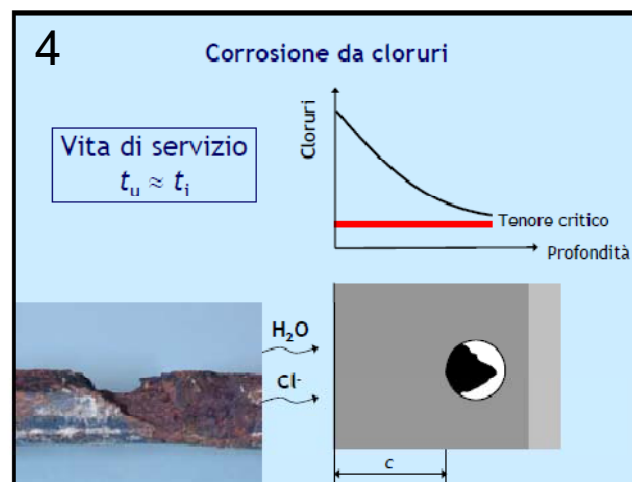
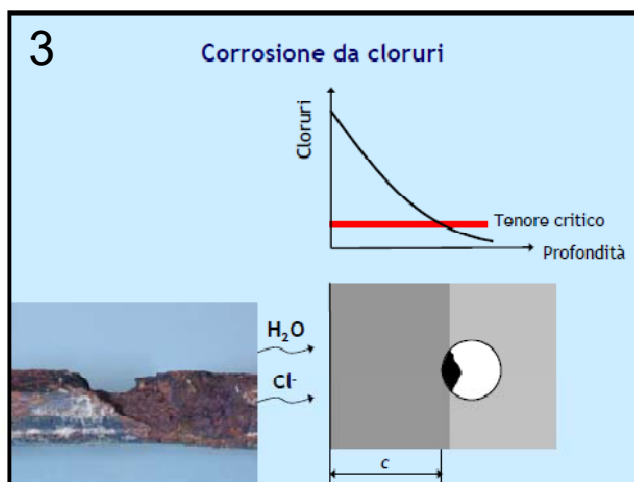
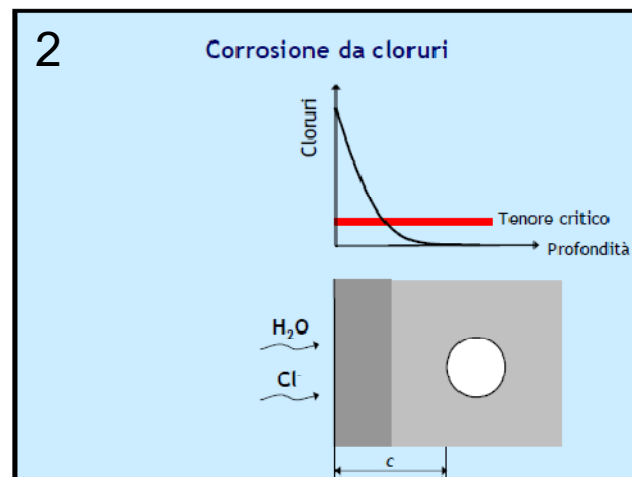
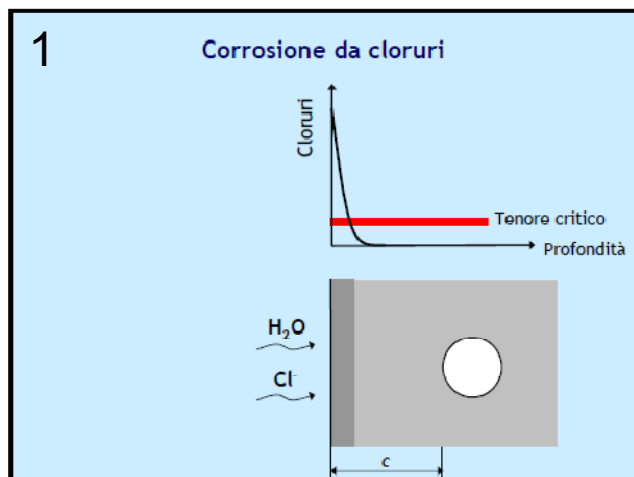


Corrosione nelle strutture in calcestruzzo armato

Corrosione da cloruri

46

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



Forma di corrosione molto pericolosa in quanto non dà segnali di degrado fino al collasso della struttura.

La conoscenza del coefficiente di diffusione del calcestruzzo e delle analisi chimiche ci consentono di determinare il tempo di innesco del fenomeno e quindi la vita utile del manufatto.

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]$$



Durabilità del calcestruzzo armato

47

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

*Nota la **MALATTIA** del CLS è il caso di individuare la **CURA***

Strutture esistenti

DIAGNOSI

Utilizzando il know how sui processi elettrochimici si ricorre a strumentazioni e metodologie **non invasive**.

Conoscenza dello stato di degrado senza asportazione di calcestruzzo ed esposizione di barre.

CORRETTO RIPRISTINO

Applicazione della normativa in relazione alla progettazione e qualità dei materiali a marcatura CE.

Interventi mirati

Livelli di conoscenza



Corrosione nelle strutture in calcestruzzo armato

Effetti strutturali del degrado

48

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

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 $0,4 \div 1\%$ 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



Corrosione nelle strutture in
calcestruzzo armato

Processo diagnostico

49

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

**La causa del degrado del calcestruzzo armato è un
processo elettrochimico**



Esistono strumentazioni che rilevano processi elettrochimici

**Misura del potenziale delle
barre UNI 10174:1993***

Indicazione sullo stato di
degrado dell'armatura

**Misure di resistività
del cls**

Indicazione sullo stato di
corrosione dell'armatura

Misure di polarizzazione

Informazioni sul reale
assottigliamento delle
armature e staffe

Tecniche non invasive



Analisi distruttive ottimizzate e mirate



Corrosione nelle strutture in calcestruzzo armato

Processo diagnostico

50

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



NORMA TECNICA **UNI 10174:1993**

DATA **01/03/1993**

AUTORI UNICEMENTO

TITOLO Istruzioni per l'ispezione delle strutture di cemento armato esposte all' atmosfera mediante mappatura di potenziale.

Instruction for the inspection of reinforced concrete structure exposed atmosphere by half potential mapping.

7. Interpretazione delle misure

L'interpretazione dovrebbe essere effettuata da personale di provata esperienza. Non può essere effettuata sulla base di un singolo criterio, bensì occorre valutare le condizioni ambientali a cui è esposta la struttura e gli eventuali contributi spuri. L'interpretazione delle misure di potenziale può essere effettuata agevolmente mediante l'analisi comparata di dati ottenuti con altre tecniche (vedere premessa 0). In appendice sono riportati alcuni aspetti dell'interpretazione delle misure di potenziale al solo scopo di offrire una guida per la comprensione di alcuni aspetti.



Corrosione nelle strutture in
calcestruzzo armato

Diagnostica

51

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

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.

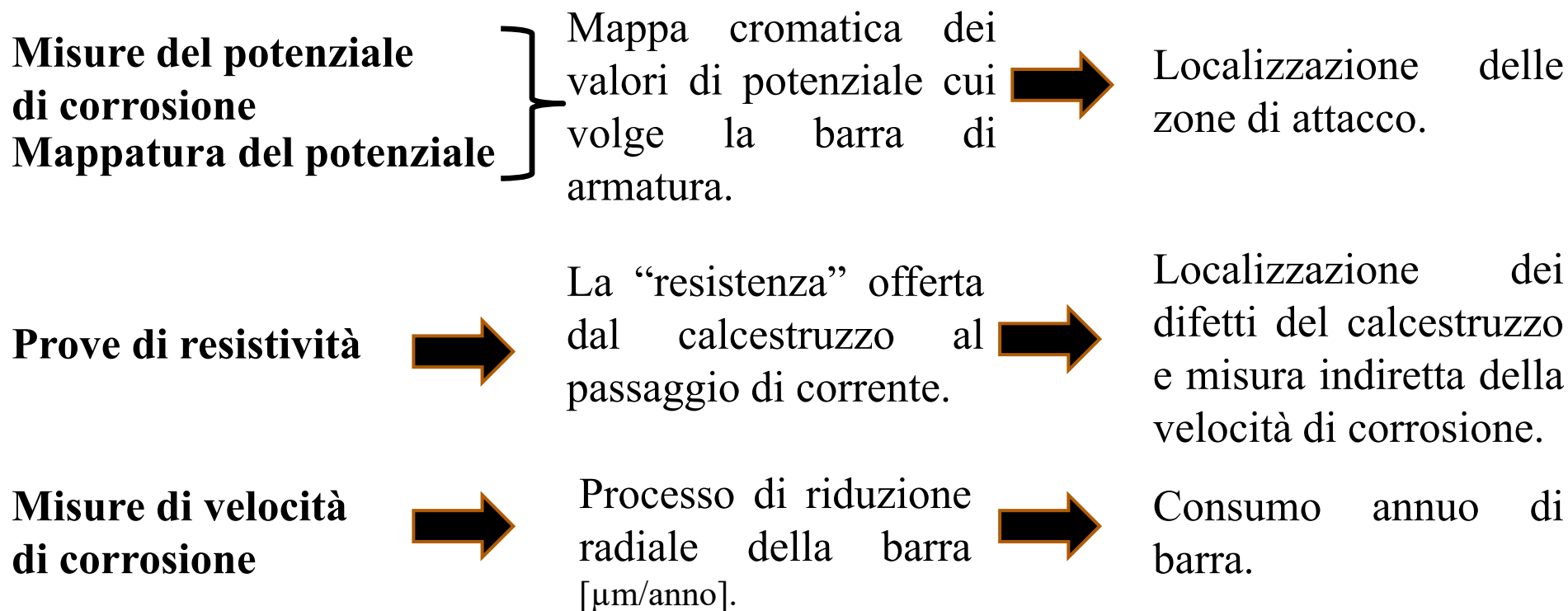


Tipologie di indagine

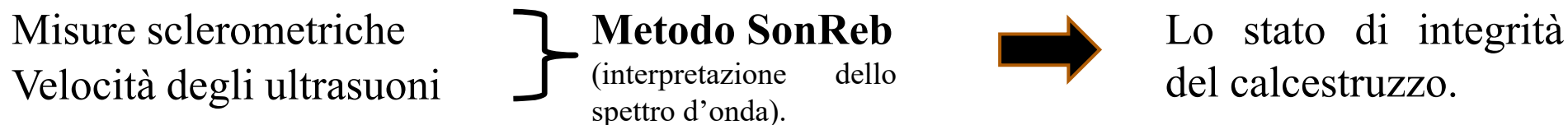
52

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Indagini di tipo **elettrochimiche** (sulle barre)



Indagini di tipo **strutturale** (sul calcestruzzo)





Corrosione nelle strutture in
calcestruzzo armato

NTC2008

53

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Indagini ben progettate ed eseguite consentono di raggiungere adeguati livelli di conoscenza in relazione alla tipologia di intervento.

LE FASI DI DIAGNOSI PREVEDONO:

- **Piano delle prove**
- **Esecuzione**
- **Analisi dei risultati**



Corrosione nelle strutture in calcestruzzo armato

NTC2008

54

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

CAP 8 – NTC 2008 – 8.2 – Criteri generali:

[...]. La valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi su costruzioni esistenti devono tenere conto dei seguenti aspetti:

- la costruzione riflette lo stato delle conoscenze al tempo della sua realizzazione;
- possono essere insiti e non palesi difetti di impostazione e di realizzazione;
- la costruzione può essere stata soggetta ad azioni, anche eccezionali, i cui effetti non siano completamente manifesti;
- le strutture possono presentare **degrado** e/o modificazioni significative rispetto alla situazione originaria.

Nella definizione dei modelli strutturali, si dovrà, inoltre, tenere conto che:

- la geometria e i dettagli costruttivi sono definiti e la loro conoscenza dipende solo dalla documentazione disponibile e dal livello di approfondimento delle indagini conoscitive;
- la conoscenza delle **proprietà meccaniche dei materiali** non risente delle incertezze legate alla produzione e posa in opera ma solo della omogeneità dei materiali stessi all'interno della costruzione, del livello di approfondimento delle indagini conoscitive e dell'affidabilità delle stesse;
- i carichi permanenti sono definiti e la loro conoscenza dipende dal livello di approfondimento delle indagini conoscitive.



Corrosione nelle strutture in calcestruzzo armato

NTC2008

55

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

CAP 8 – NTC 2008 – 8.5.3 – CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEI MATERIALI:

Per conseguire un'adeguata conoscenza delle caratteristiche dei materiali e del loro degrado, ci si baserà su documentazione già disponibile, su verifiche visive in situ e su **indagini sperimentali**. Le indagini dovranno essere motivate, per tipo e quantità, dal loro effettivo uso nelle verifiche; nel caso di beni culturali e nel recupero di centri storici, dovrà esserne considerato l'impatto in termini di conservazione del bene. I valori delle resistenze meccaniche dei materiali vengono valutati sulla base delle prove effettuate sulla struttura e prescindono dalle classi discretizzate previste nelle norme per le nuove costruzioni.

CAP 8 – NTC 2008 – 8.5.4 – LIVELLI DI CONOSCENZA E FATTORI DI CONFIDENZA:

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.



Corrosione

56

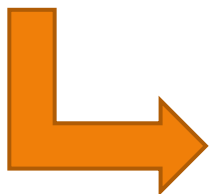
L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

I fenomeni di corrosione che innescano il degrado del calcestruzzo armato sono principalmente:

- **La Carbonatazione**: l'alcalinità del calcestruzzo (pH 12,5÷13) è neutralizzata dalla presenza dell'anidride carbonica ed umidità proveniente dall'ambiente esterno;
- **L'Attacco da ioni cloruro**: ioni Cl^- raggiungono le armature e rompono localmente il film protettivo.

Conseguenze della corrosione:

- Riduzione della sezione delle armature
- Fessurazione ed espulsione del copriferro
- Perdita di aderenza acciaio-calcestruzzo



Perdita di resistenza a momento flettente, perdita di resistenza a taglio, insorgere di carico eccentrico, sfilamento delle barre di armatura, **modificazione della risposta globale** delle strutture, **cambio del meccanismo di rottura**.

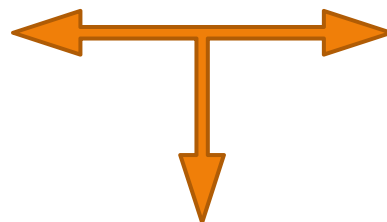


Introduzione

57

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Dipartimento di Strutture per
l'ingegneria e l'architettura
(DI.ST.)

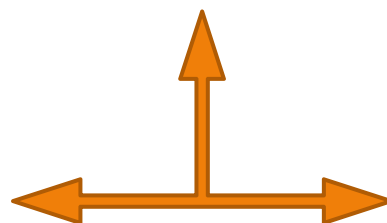


Dipartimento di Ingegneria
Chimica, dei Materiali e della
Produzione Industriale
(D.I.C.Ma.P.I.)

OBIETTIVO

Valutare la perdita della capacità portante di elementi in calcestruzzo armato realizzati con barre lisce ed aderenza migliorata degradati dal fenomeno della corrosione.

ANALISI
PARAMETRICA



APPLICAZIONE
SPERIMENTALE

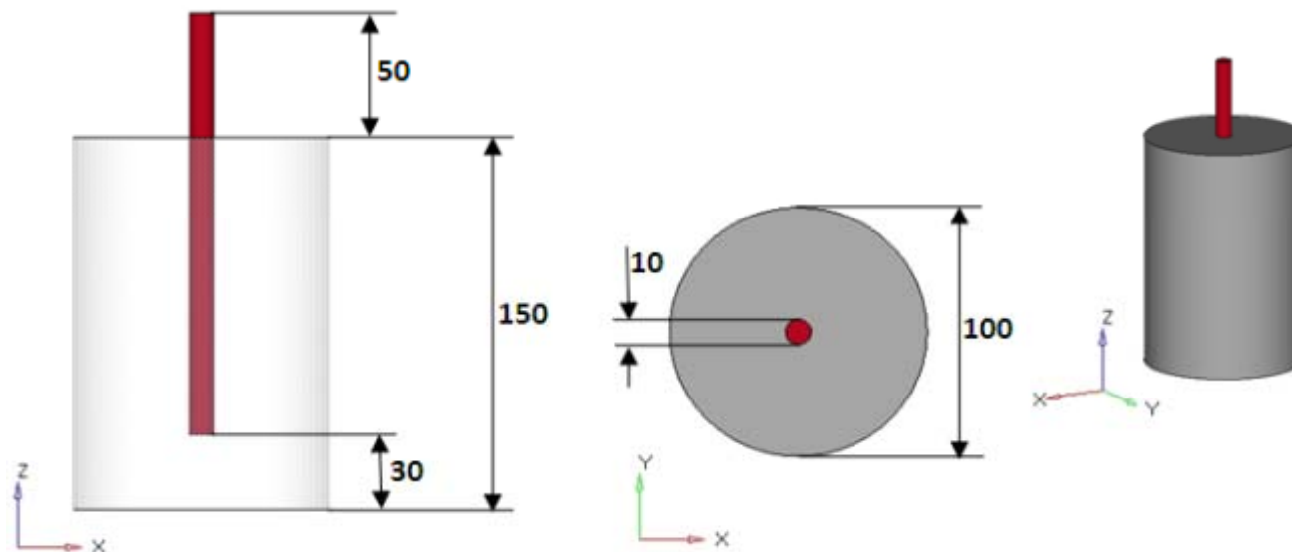


La corrosione delle strutture in calcestruzzo armato

Modello Previsionale *Studi preliminari*

58

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



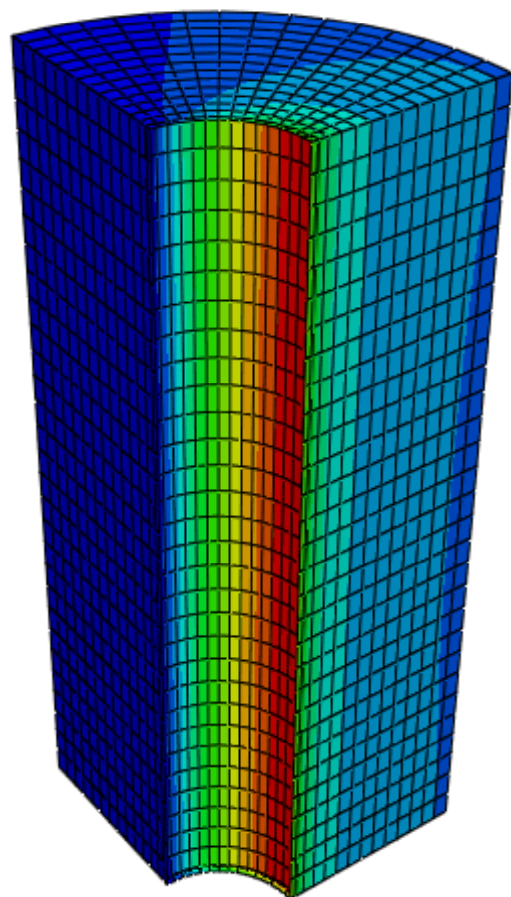


La corrosione delle strutture in calcestruzzo armato

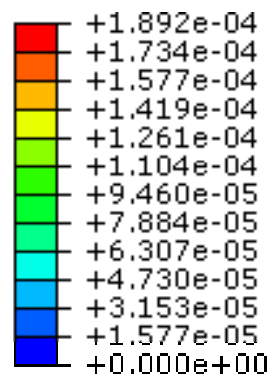
Modello Previsionale *Studi preliminari*

59

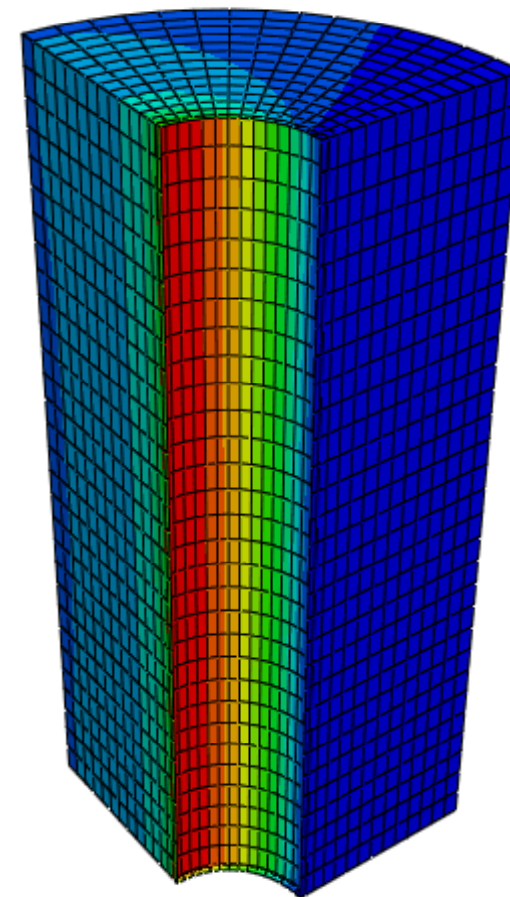
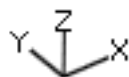
L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



Tensioni in direzione x



E Calcestruzzo: 25 GPa
E Acciaio: 210 GPa
 ν Calcestruzzo: 0.2
 ν Acciaio: 0.3



Tensioni in direzione y

Modello 3D



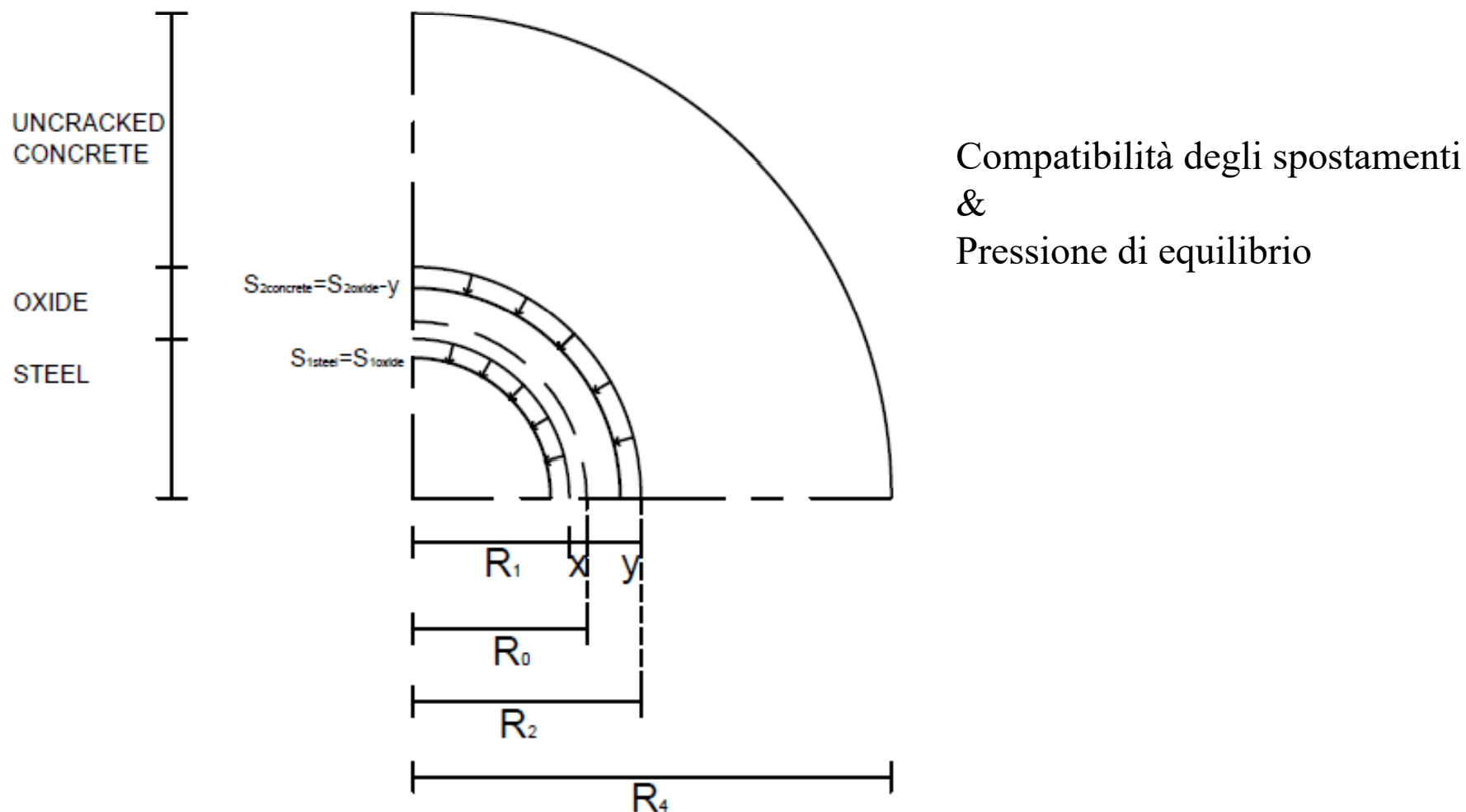
La corrosione delle strutture in calcestruzzo armato

Innesco della fessura

Due corone circolari e un cilindro solido

60

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità – Affidabilità



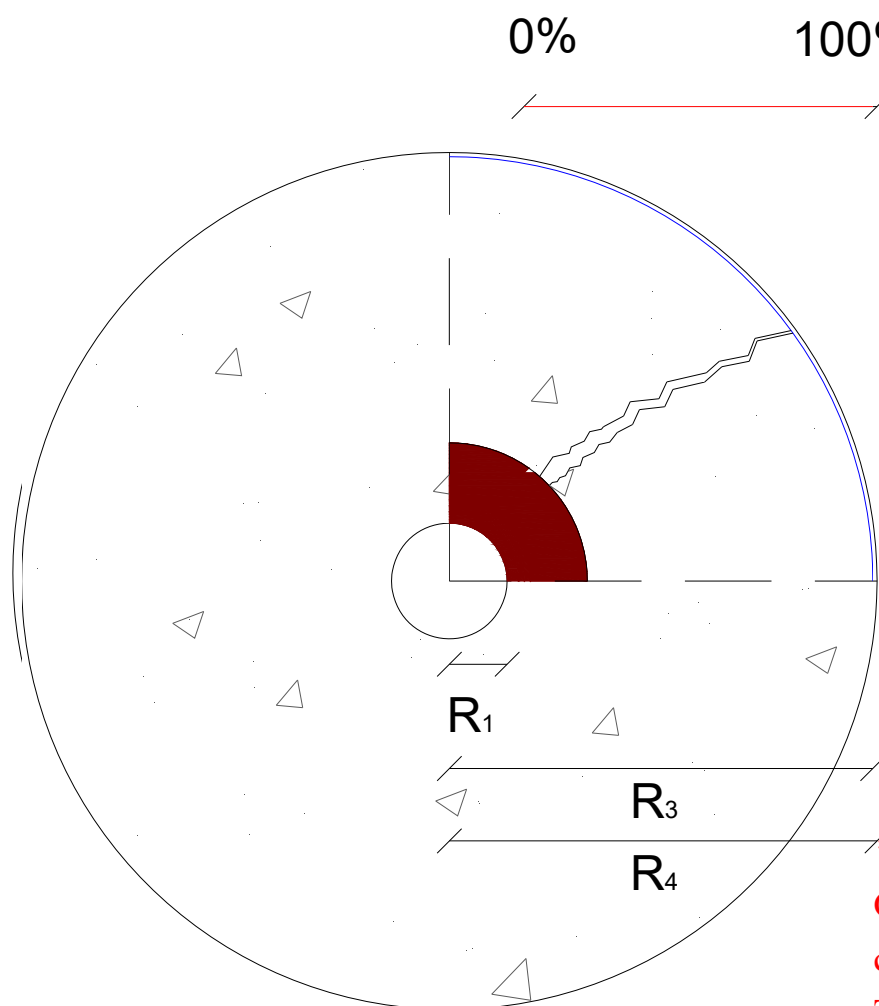
Modello a tre strati – Equilibrio e compatibilità degli spostamenti



Propagazione della fessura

61

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità – Affidabilità



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 .

*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" In: Proceedings of The New Boundaries of Structural Concrete – ACI Italy Chapter. 2st Workshop, 15-16 Settembre 2011, Ancona, Italia, IMREADY Ed..

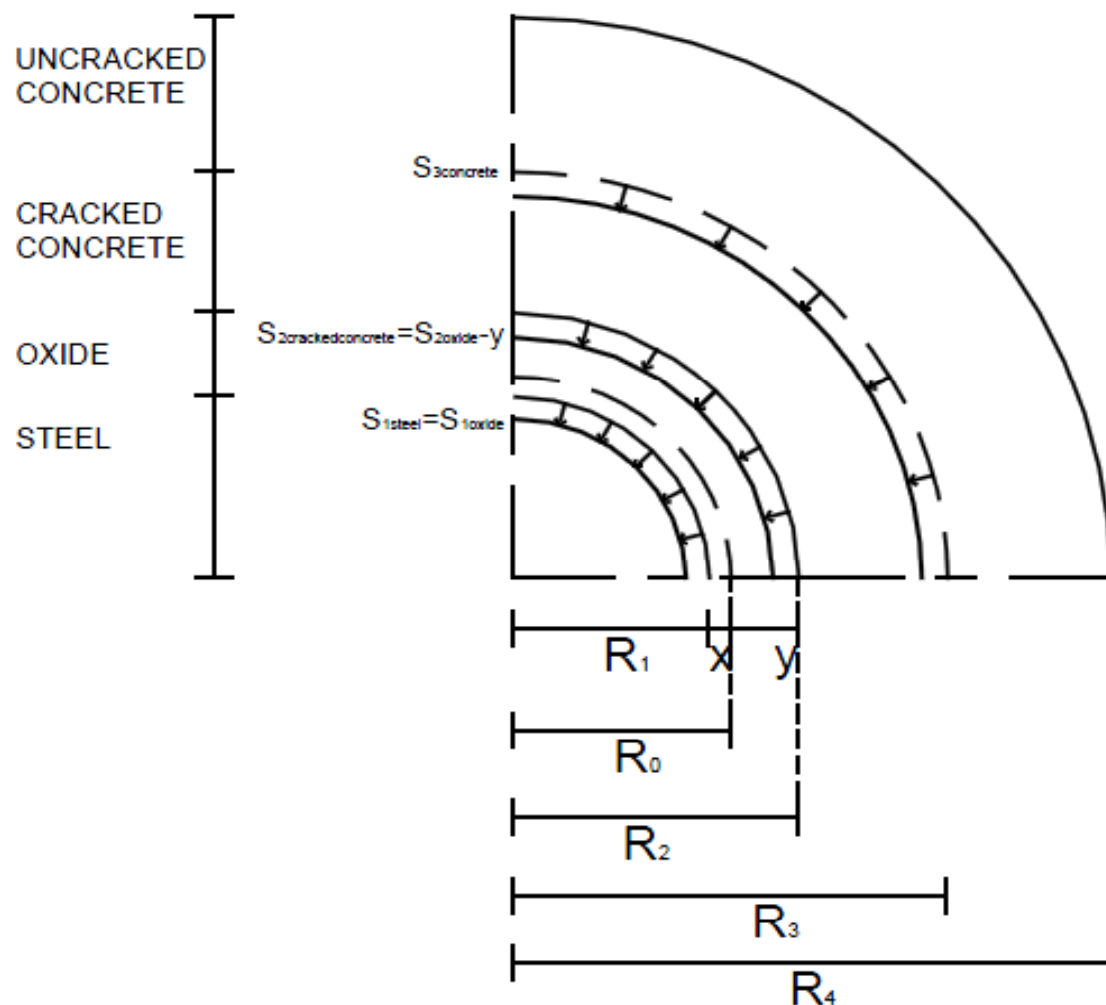


Propagazione della fessura

Tre corone cilindriche e un cilindro solido

62

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità – Affidabilità



Compatibilità degli spostamenti
&
Pressione di equilibrio

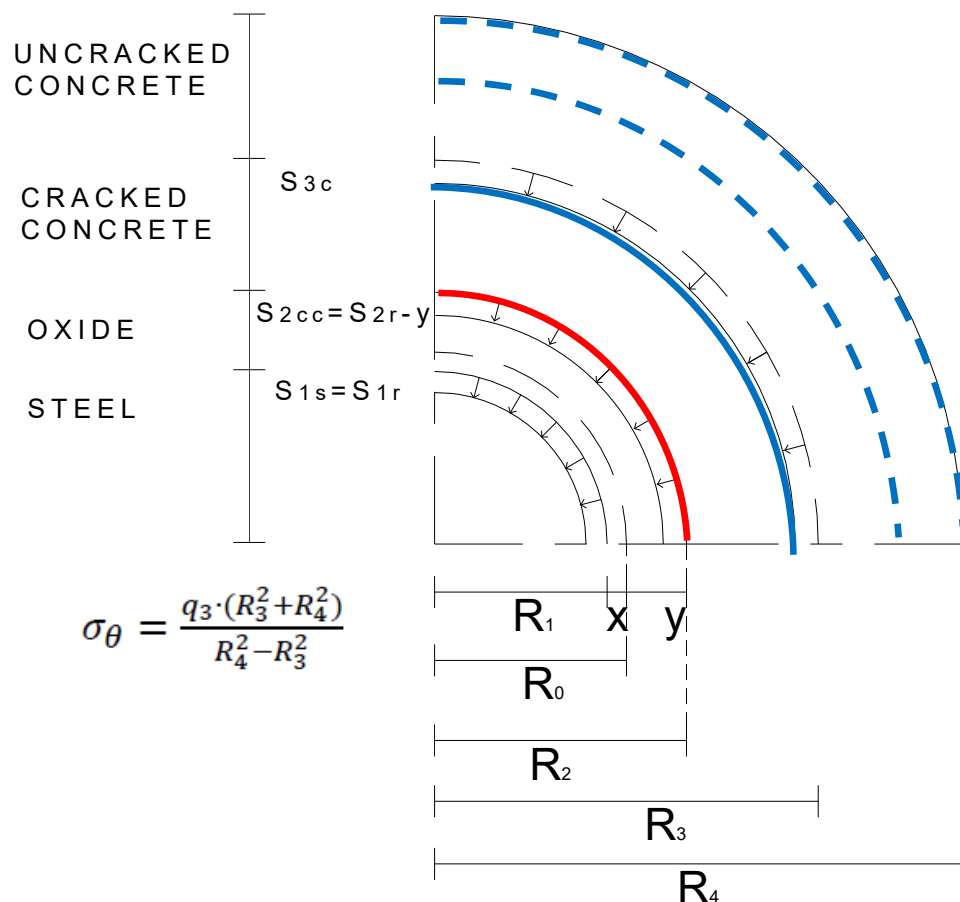
Modello a quattro strati – Equilibrio e compatibilità degli spostamenti



Propagazione della fessura

63

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità – Affidabilità



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.

$$R_1 = R_0 - x$$

$$R_2 = R_1 + x + y$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

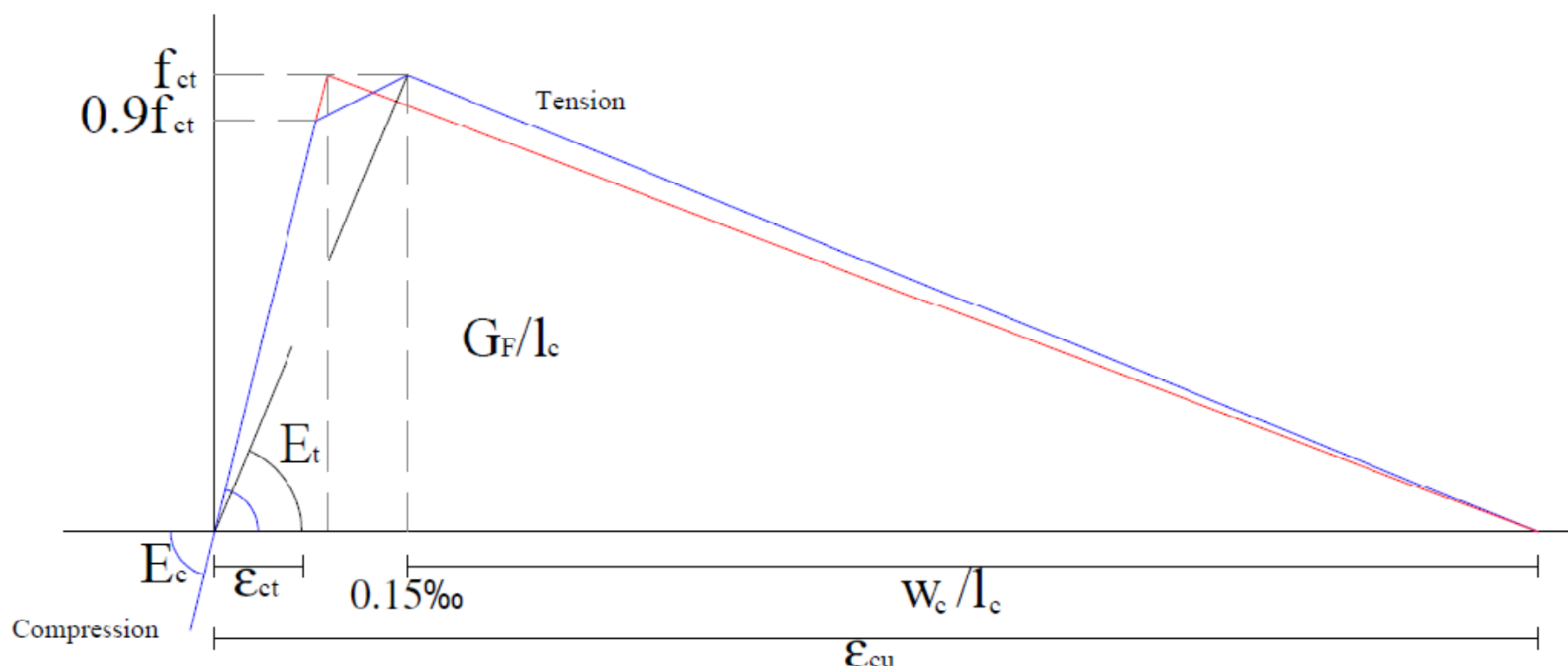


Propagazione della fessura

64

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Calcestruzzo in trazione

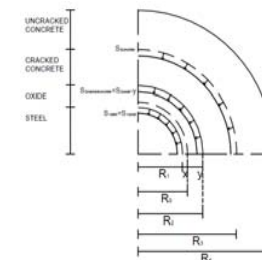


Processo governato dall'energia di frattura, G_F e dalla lunghezza caratteristica, l_c



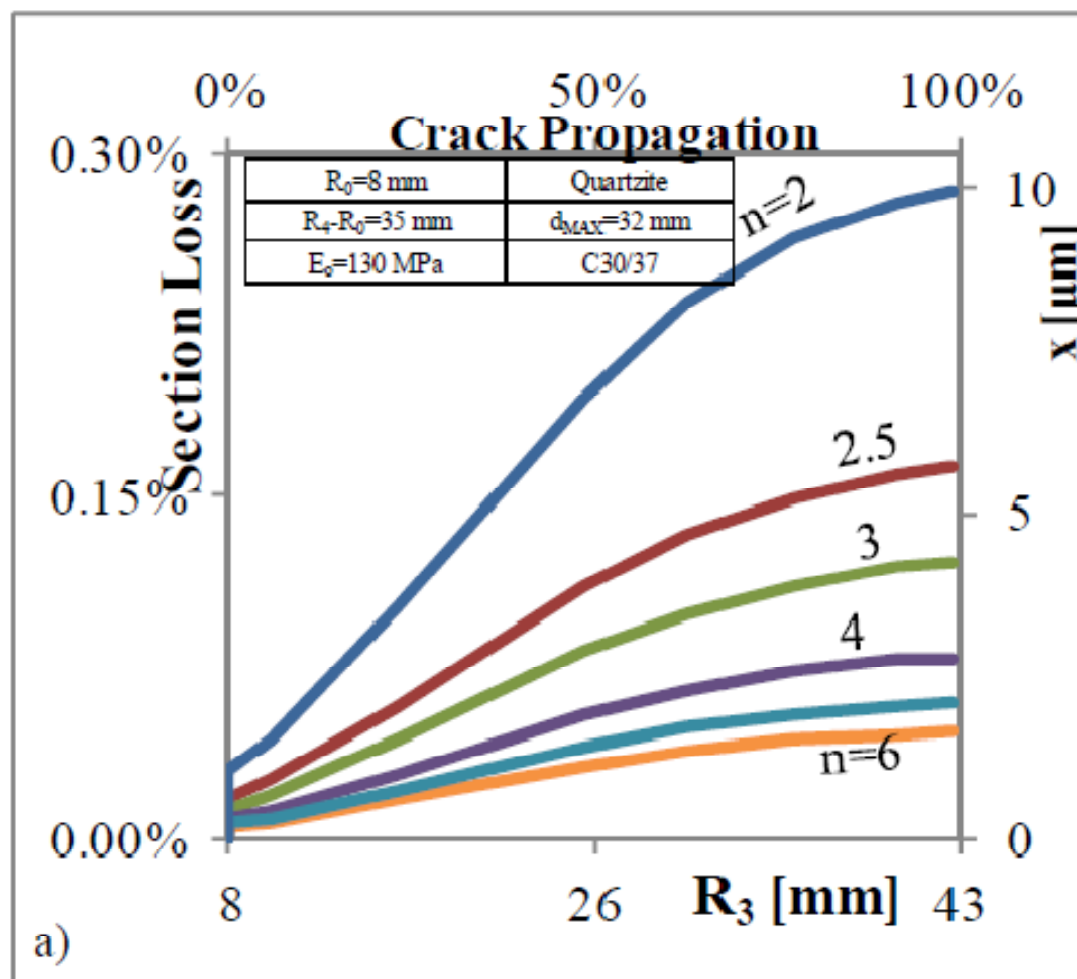
Propagazione della fessura

Analisi parametrica



65

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

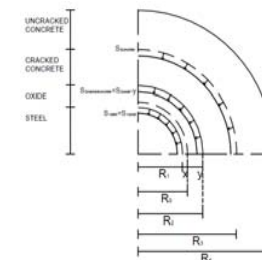


Sezione persa vs avanzamento del fronte di calcestruzzo fessurato, R_3 , e vs riduzione di barra, x



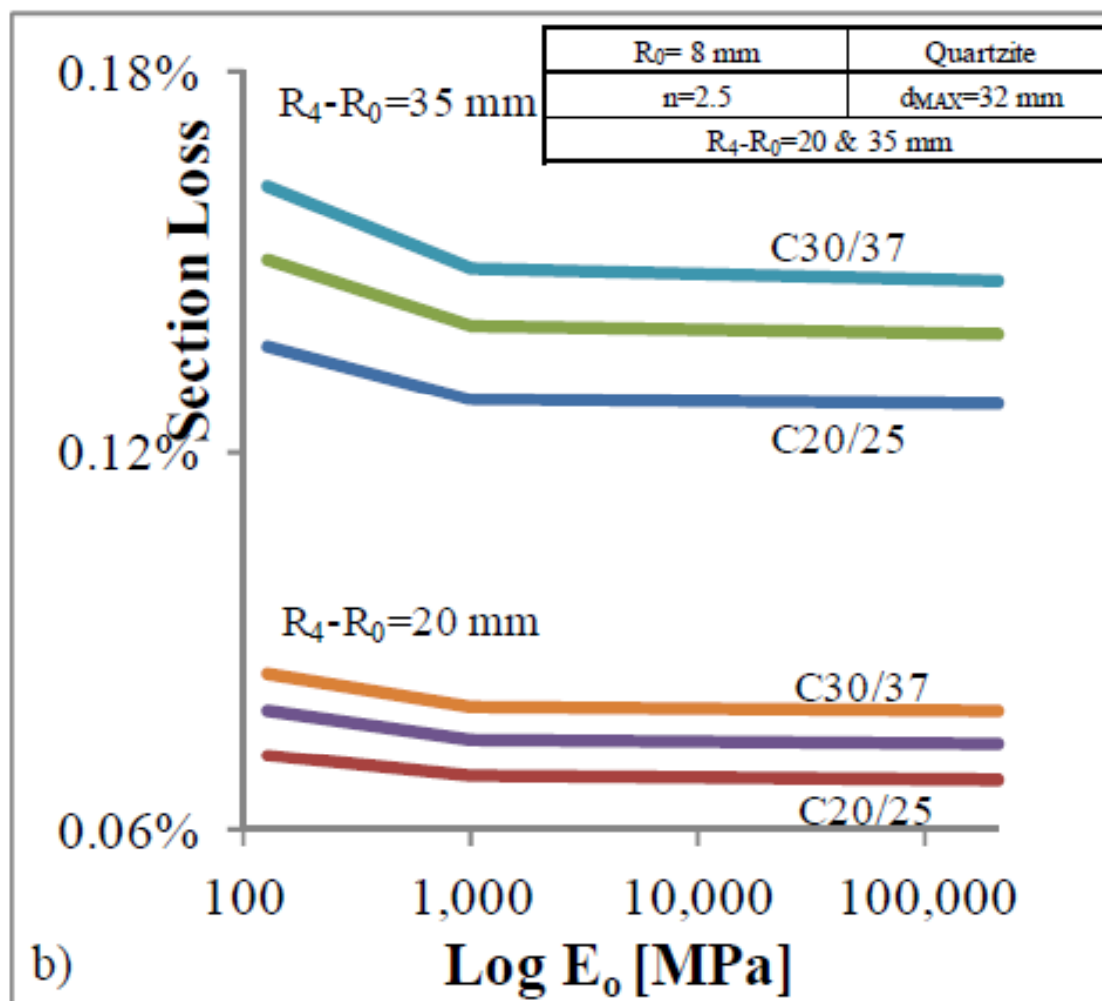
Propagazione della fessura

Analisi parametrica



66

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità – Affidabilità

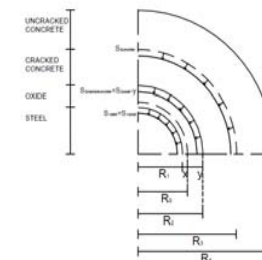


Modulo di Young dell'ossido, E_o , a fessurazione completa.



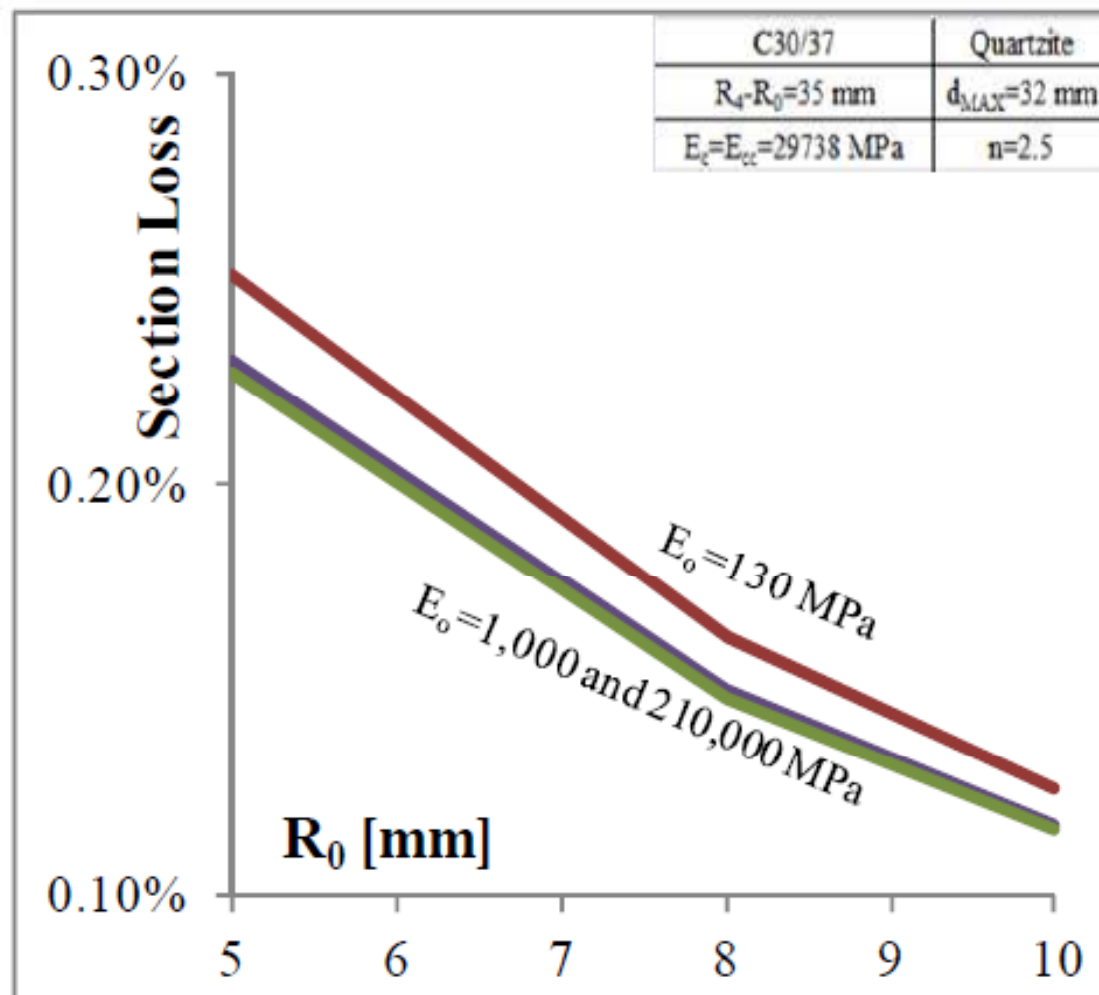
Propagazione della fessura

Analisi parametrica



67

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

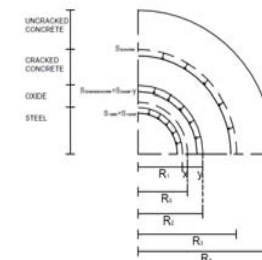


Sezione di barra persa vs raggio della barra, R_0 , al variare del modulo di Young dell'ossido, E_o .



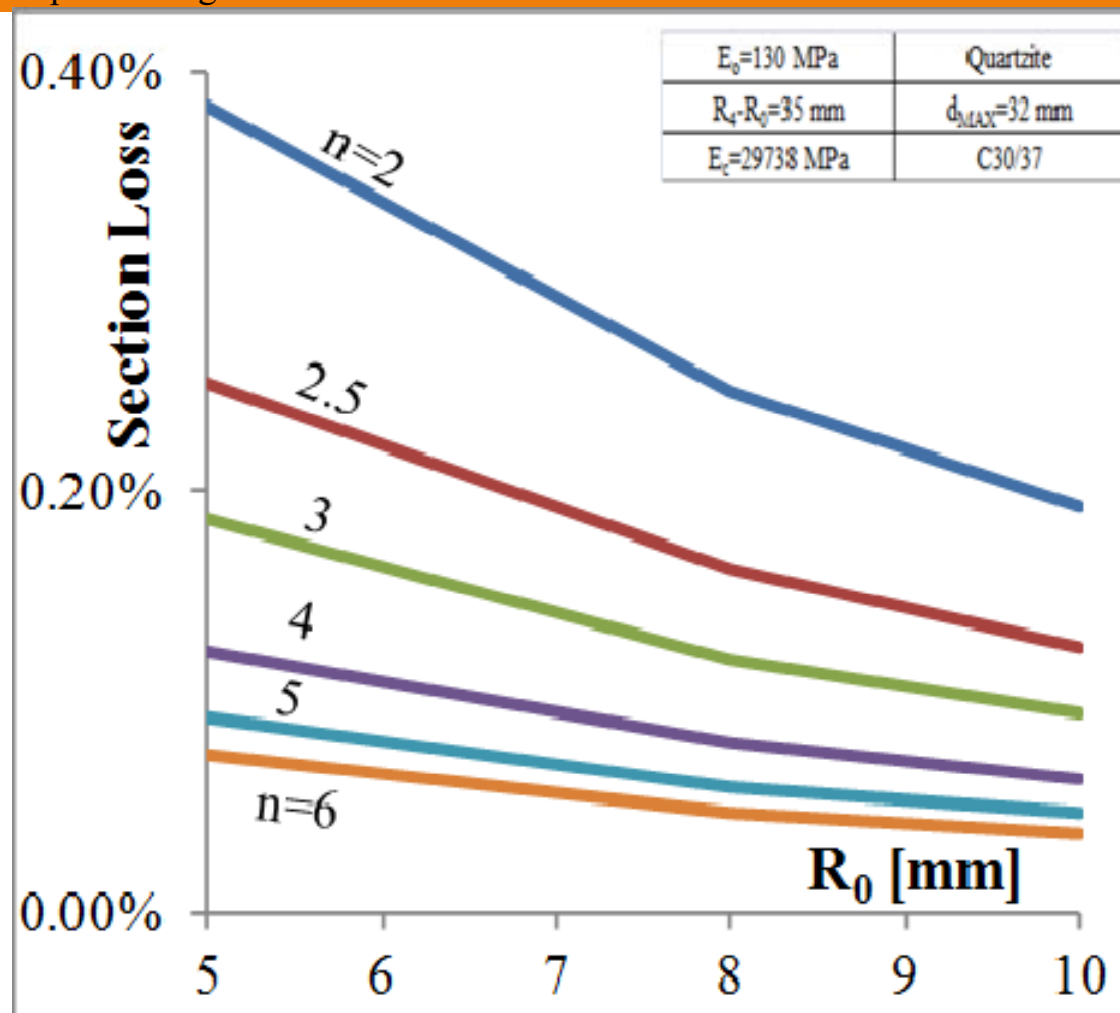
Propagazione della fessura

Analisi parametrica



68

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

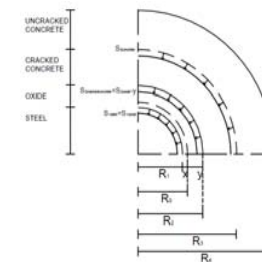


Sezione persa di vs raggio della barra, R_0 , $c_c = 35 \text{ mm}$, $E_0 = 130 \text{ MPa}$, $d_{MAX, \text{Quartzite}} = 32 \text{ mm}$



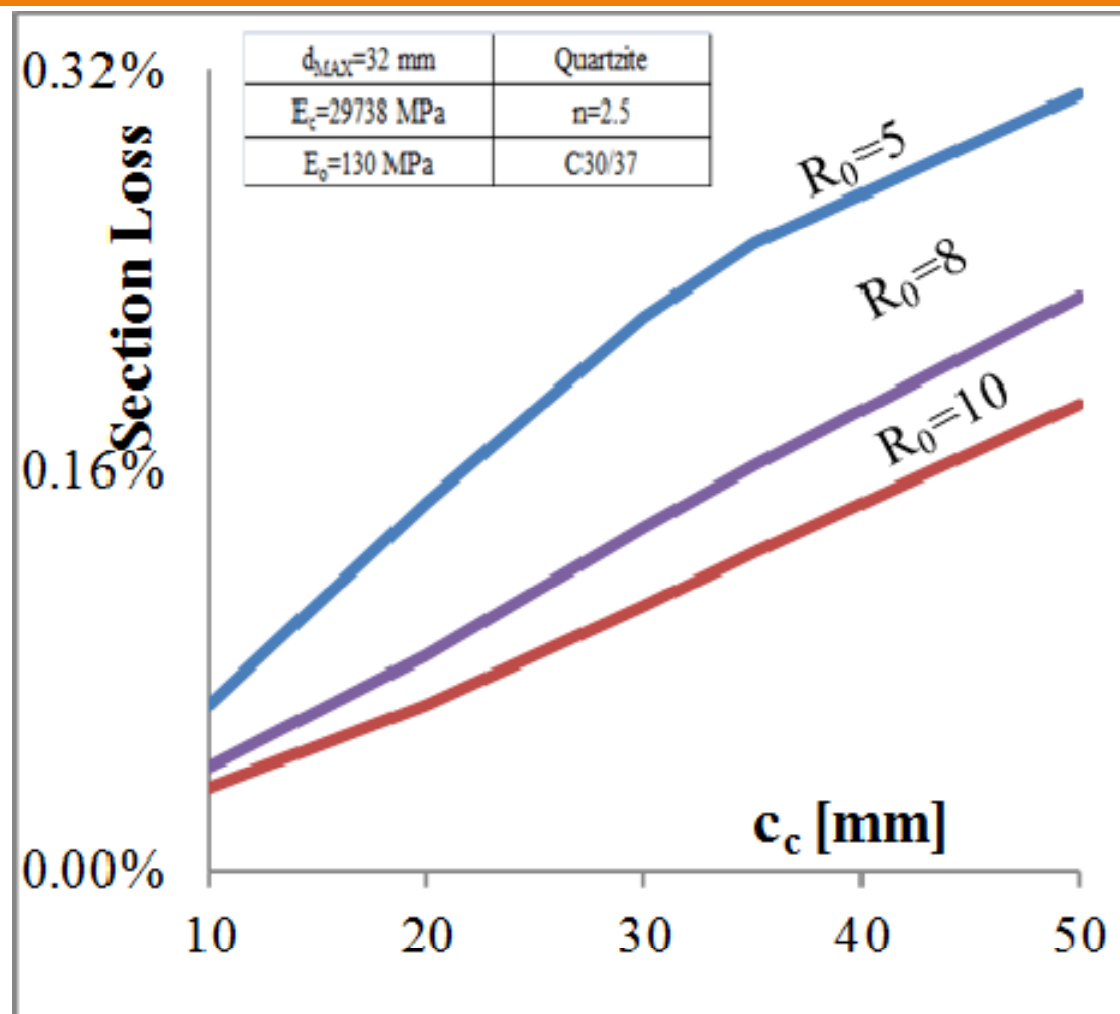
Propagazione della fessura

Analisi parametrica



69

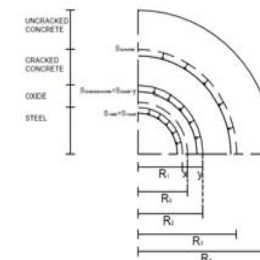
L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



Sezione persa vs copriferro, $c_c=R_4-R_0$, in relazione al raggio della barra, R_0 .

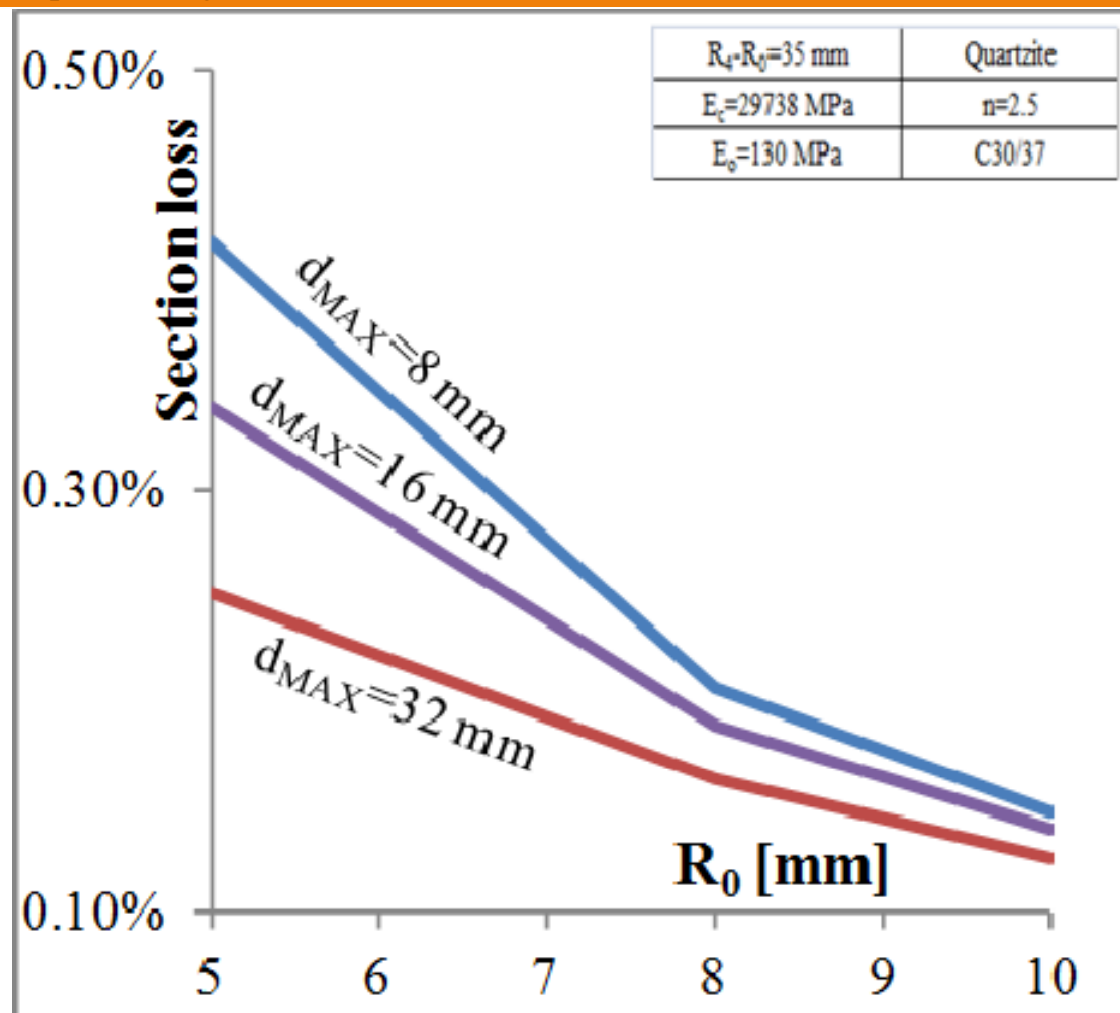


Propagazione della fessura Analisi parametrica



70

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità – Affidabilità

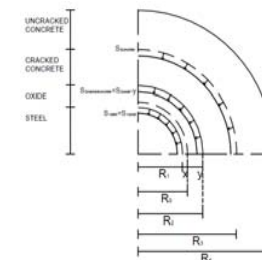


Sezione persa vs raggio della barra, R_0 , in relazione al diametro massimo dell'aggregato, per $n=2.5$, copriferro $c_c = R_4 - R_0 = 35 \text{ mm}$, $E_o = 130 \text{ Mpa}$



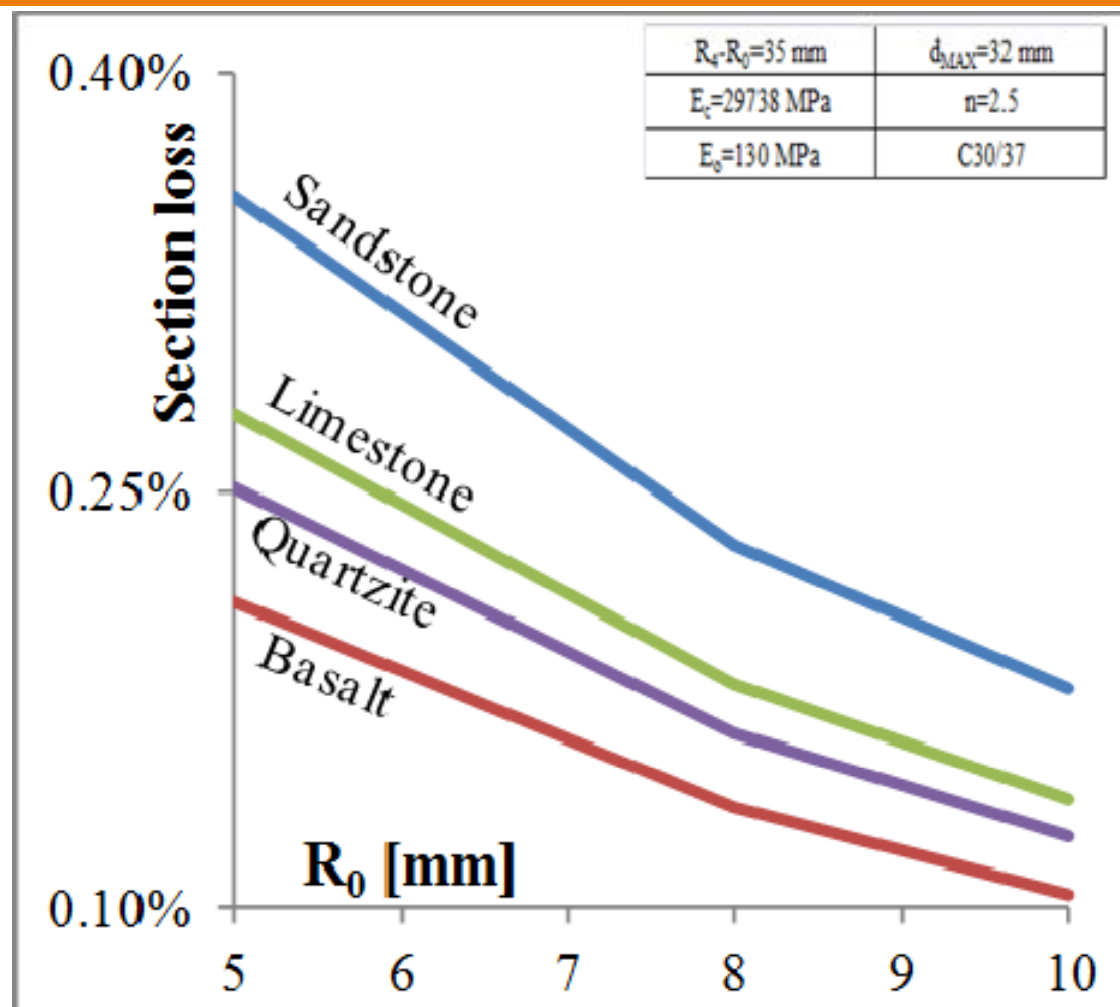
Propagazione della fessura

Analisi parametrica



71

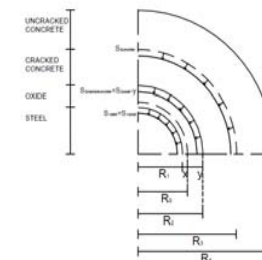
L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



Sezione persa vs raggio della barra, R_0 , in relazione al tipo di aggregato.

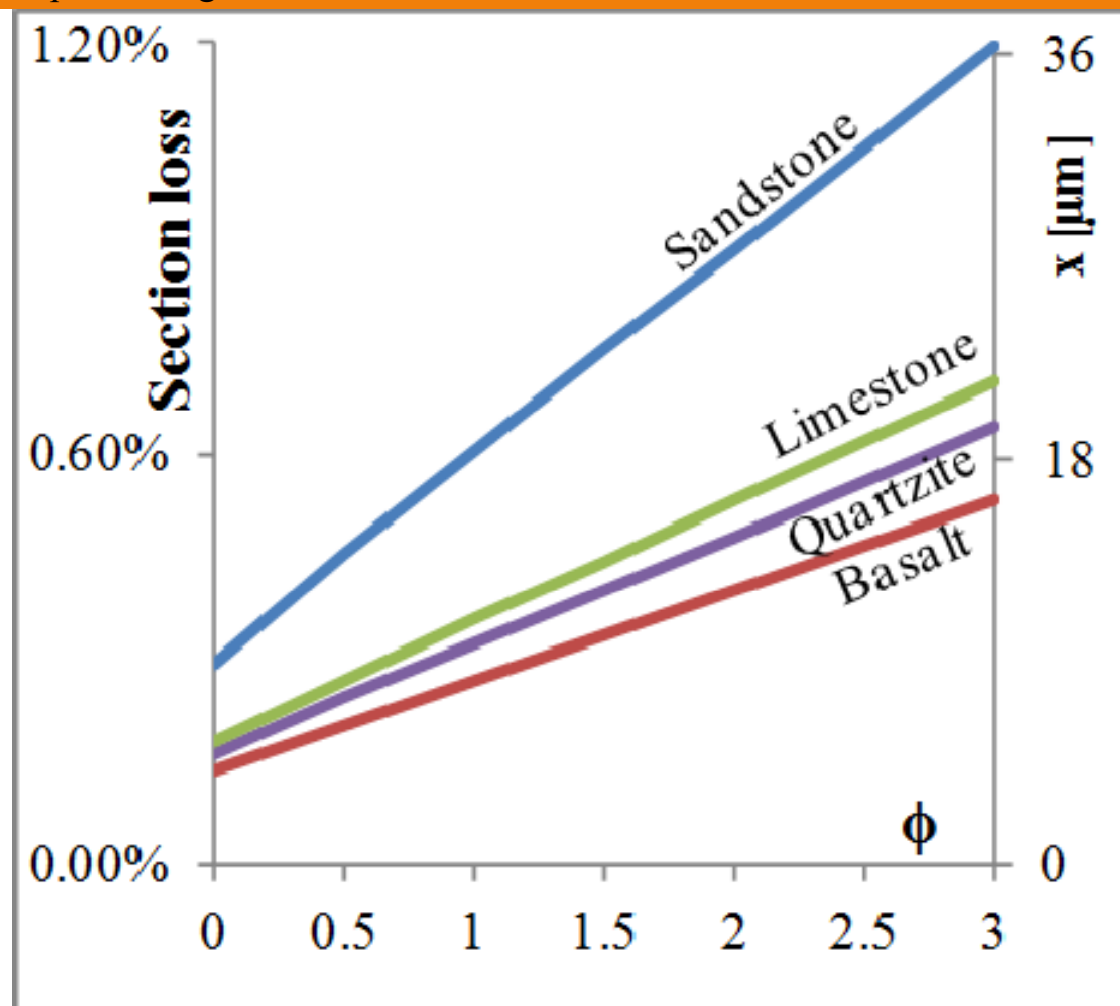


Propagazione della fessura *Analisi parametrica*



72

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



Sezione persa e penetrazione di corrosione, x , vs fattore di creep, ϕ , in relazione al tipo di aggregato



Test a barra singola vs elementi reali in c.a.

73

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Come correlare i risultati ottenuti sui campioni cilindrici con elementi reali?



?



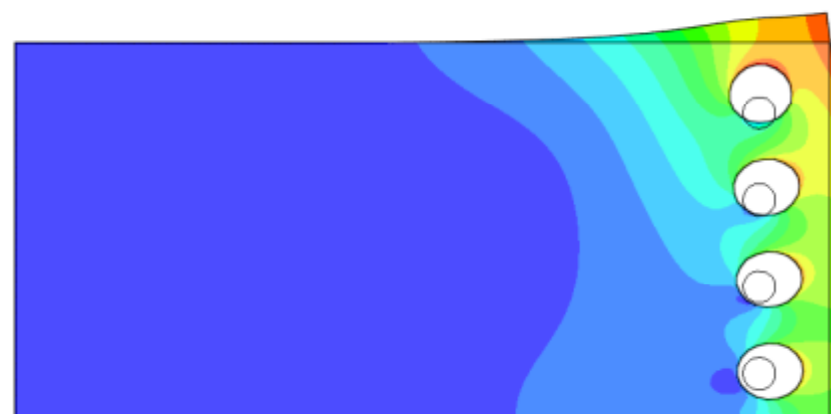
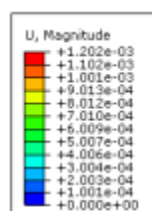
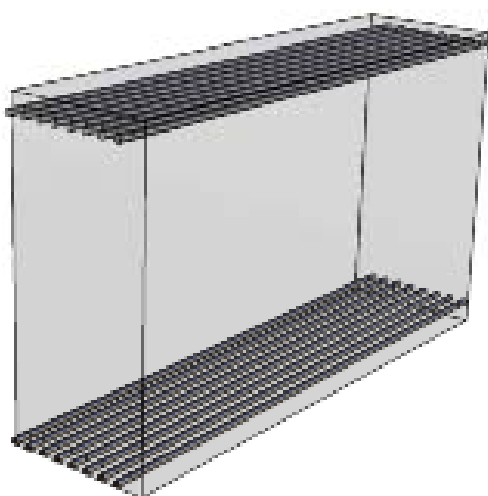


Elementi reali in c.a.

74

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Trave in calcestruzzo armato



Carico di pressione

Spazio minimo tra le barre (EC2 §8.2)

$$\max \left\{ \begin{array}{l} \Phi \text{ bar} \\ \text{Dim.aggr.} + 5\text{mm} \\ 20\text{mm} \end{array} \right.$$

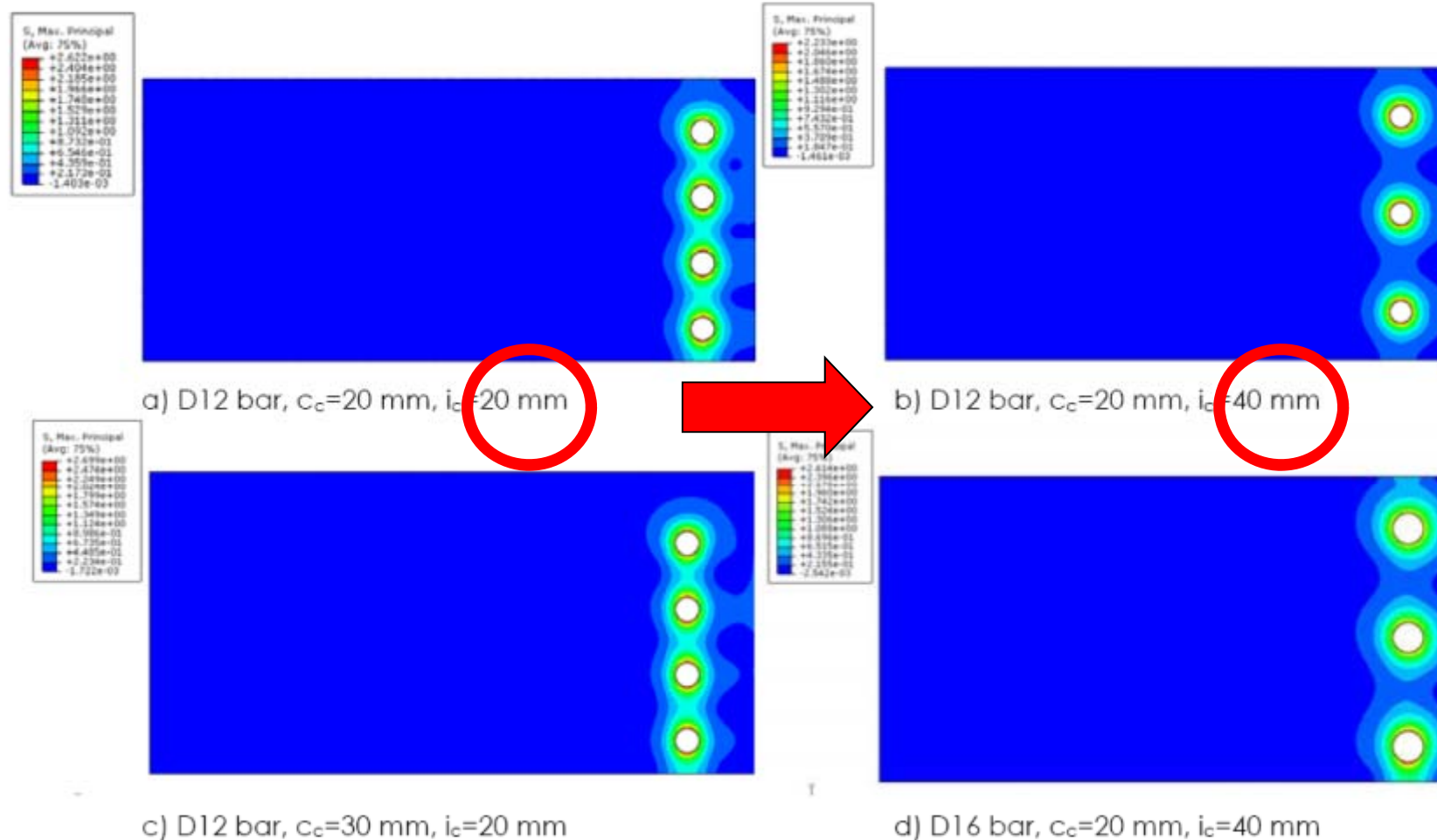
Spazio di interfero i_c 20 – 30 – 40 mm



Elementi reali in c.a.

75

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



Riduzione dell'interazione tra le barre e tensione nel calcestruzzo (differenza tra le analisi)

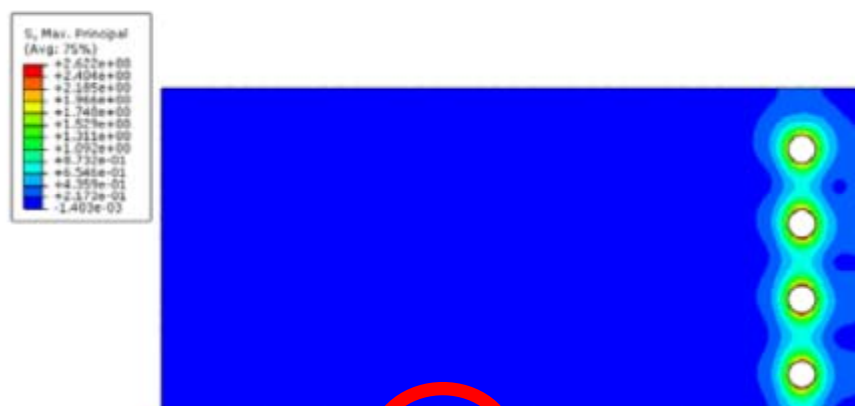


La corrosione delle strutture in calcestruzzo armato

Elementi reali in c.a.

76

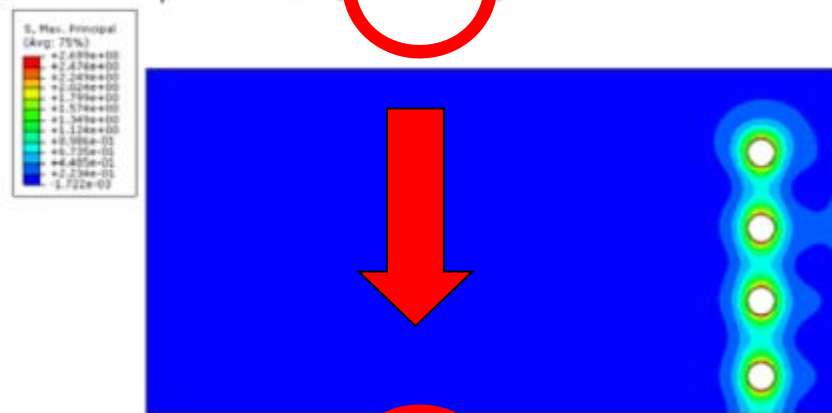
L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



a) D12 bar, $c_c=20$ mm, $i_c=20$ mm



b) D12 bar, $c_c=20$ mm, $i_c=40$ mm



c) D12 bar, $c_c=30$ mm, $i_c=20$ mm



d) D16 bar, $c_c=20$ mm, $i_c=40$ mm

Nessuna variazione dell'interazione tra le barre e della tensione nel calcestruzzo (differenza tra le analisi)



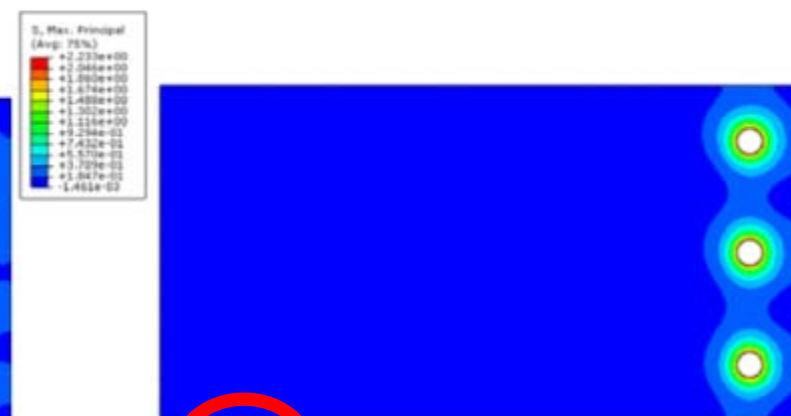
Elementi reali in c.a.

77

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



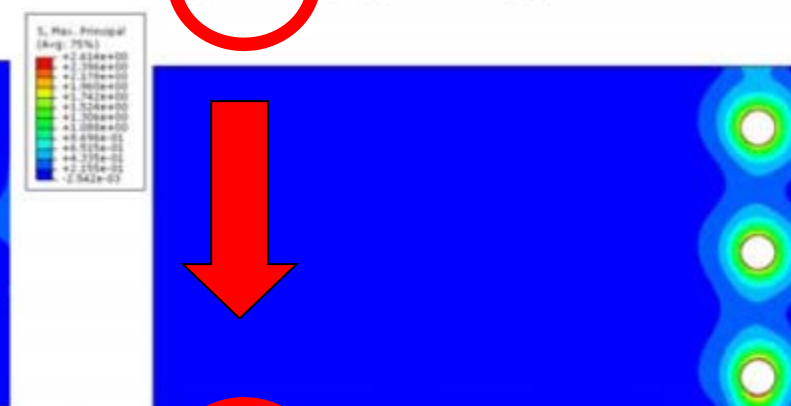
a) D12 bar, $c_c=20$ mm, $i_c=20$ mm



b) D12 bar, $c_c=20$ mm, $i_c=40$ mm



c) D12 bar, $c_c=30$ mm, $i_c=20$ mm



d) D16 bar, $c_c=20$ mm, $i_c=40$ mm

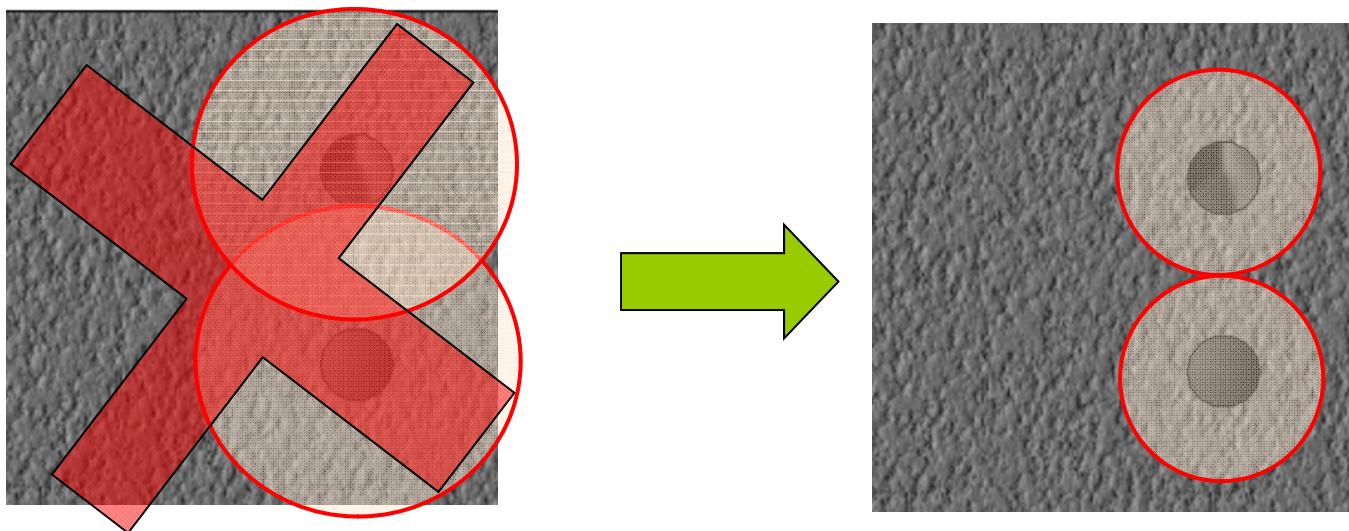
Aumento dell'interazione tra le barre e della tensione nel calcestruzzo (differenza tra le analisi)



Elementi reali in c.a.

78

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



La corrispondenza migliore tra i due sistemi si ottiene se

Il copriferro del modello a singola barra è il valore minimo tra...

min {
 Il copriferro
 Metà dell'interferro

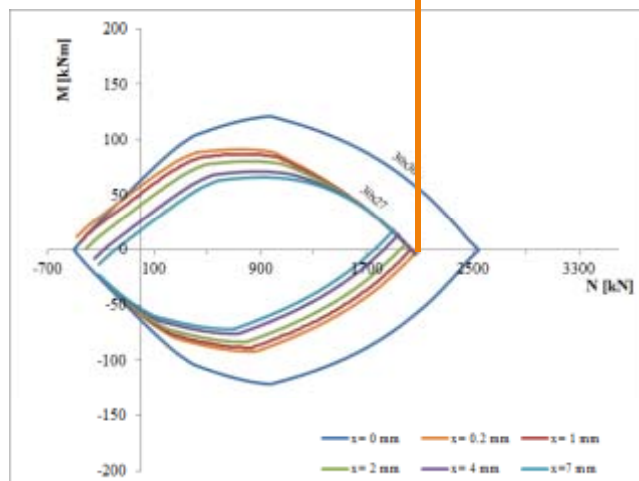
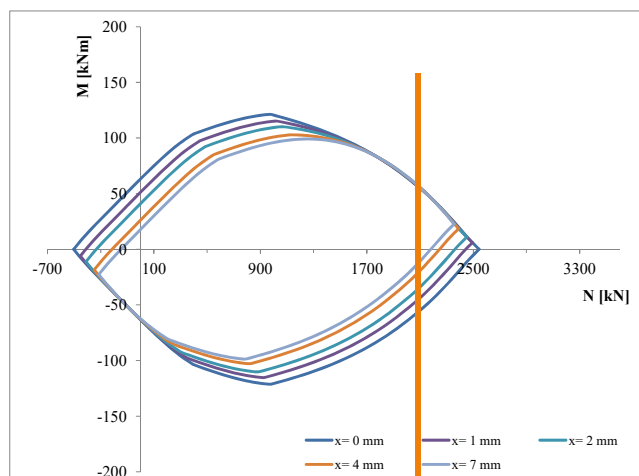


Analisi teoriche *DOMINI M-N*

79

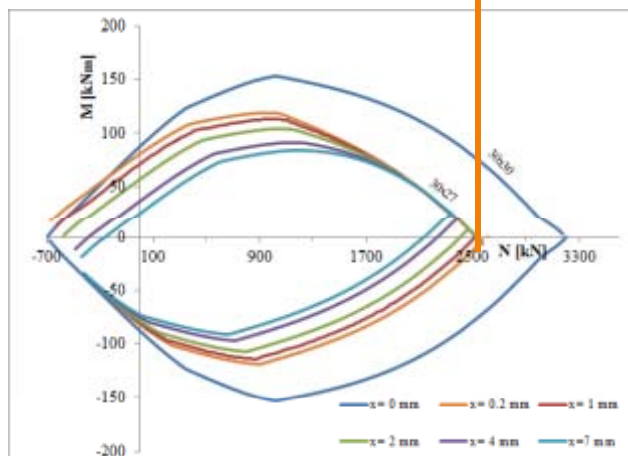
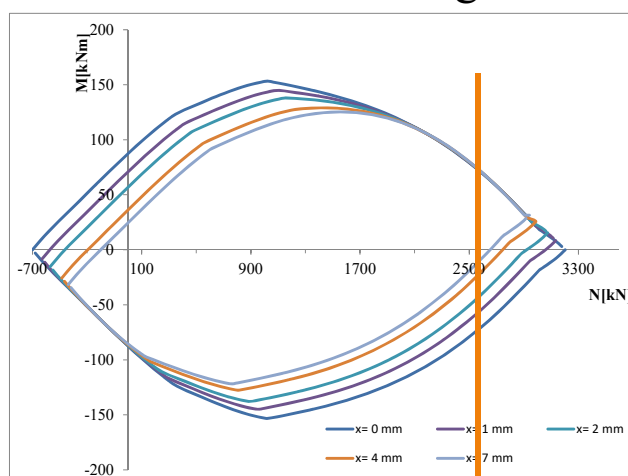
L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Barre lisce



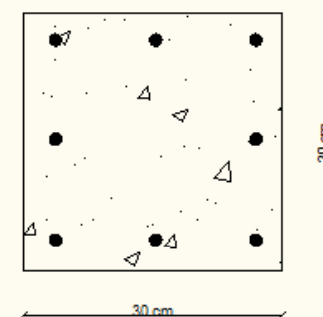
$M_{Rd}=0$; $N=-20,02\%$

Barre aderenza migliorata



$M_{Rd}=0$; $N=-19,05\%$

Sezione 30x30



Sezione 30x27





La corrosione delle strutture in calcestruzzo armato

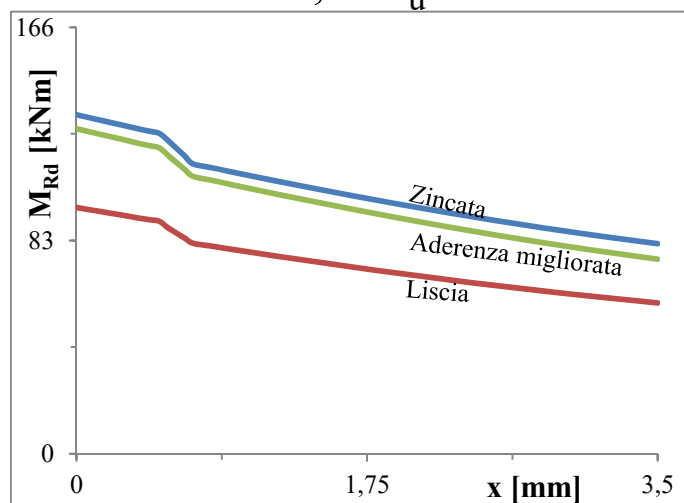
ANALISI TEORICHE

DIAGRAMMI $M_{Rd}-x$ e DIAGRAMMI Perdita % M_{Rd} - Perdita % A_s

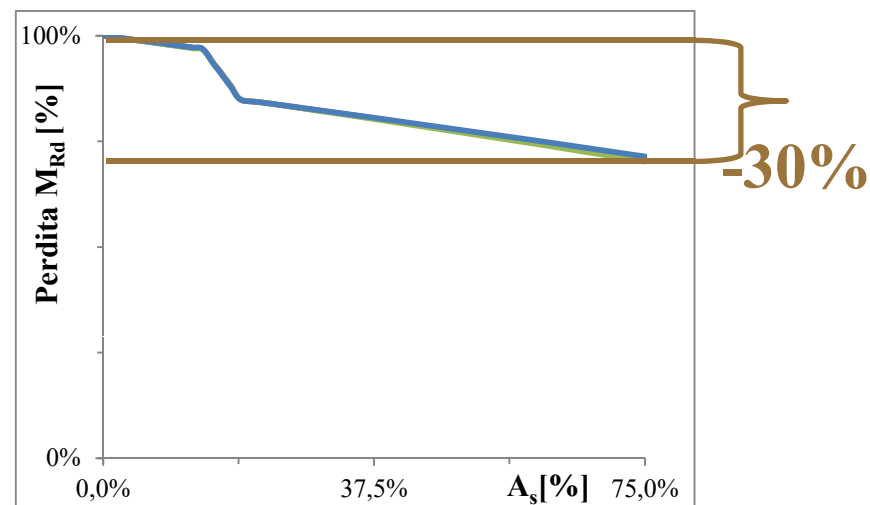
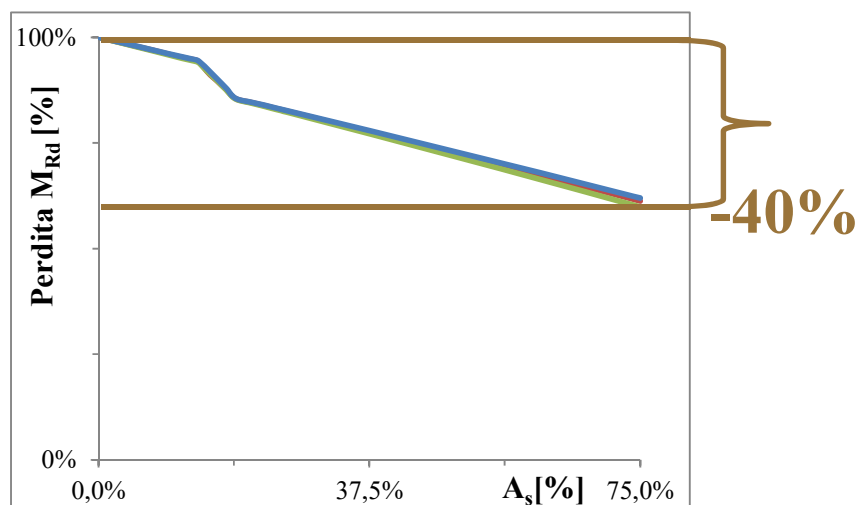
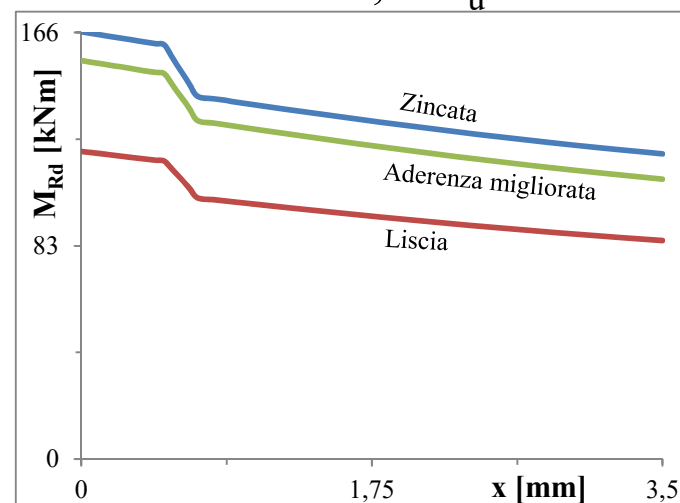
80

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità – Affidabilità

$$N=0,2 \cdot N_u$$



$$N=0,4 \cdot N_u$$



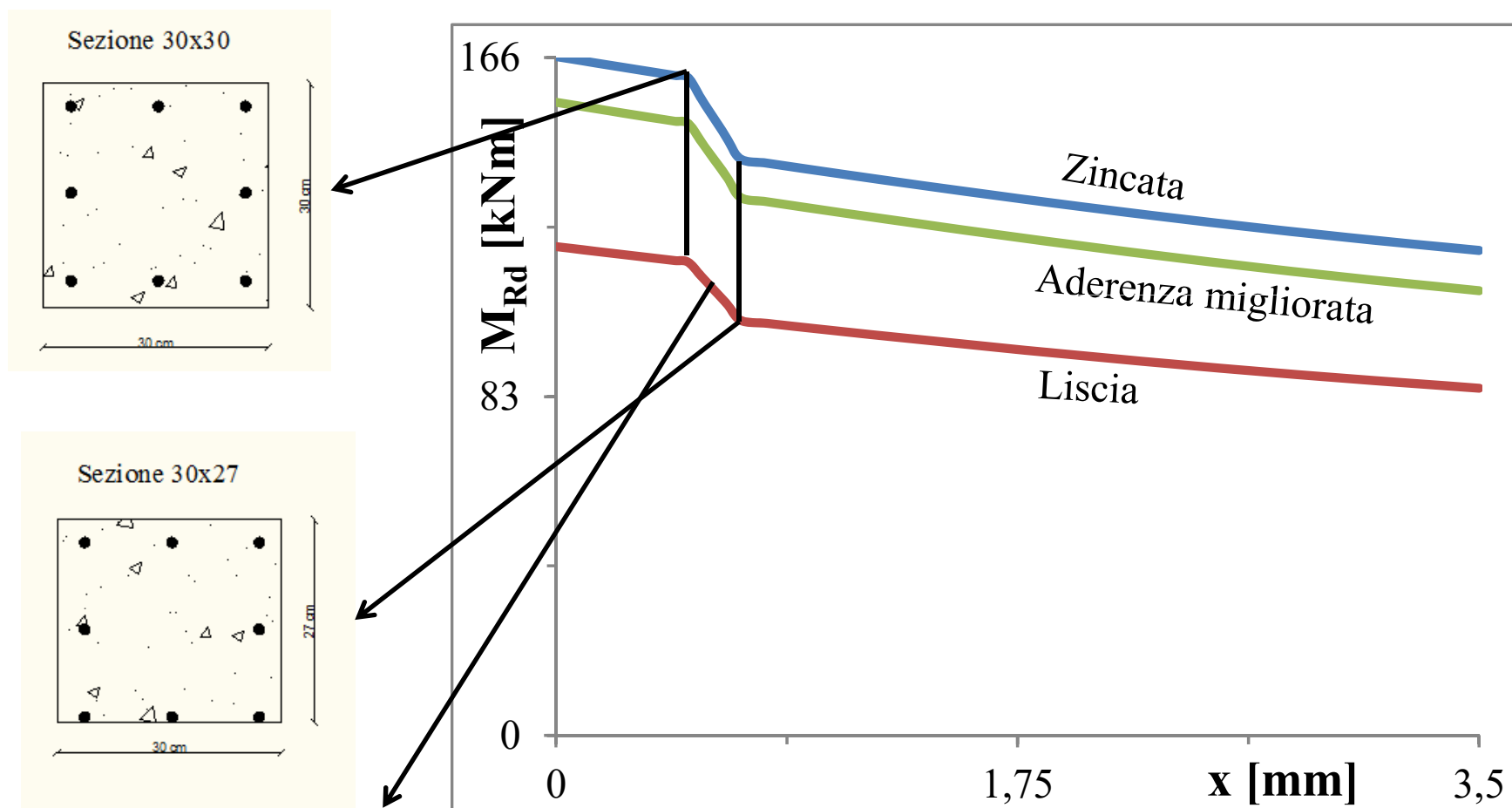


ANALISI TEORICHE

DIAGRAMMI $M_{Rd}-x$ e DIAGRAMMI Perdita % M_{Rd} - Perdita % A_s

81

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



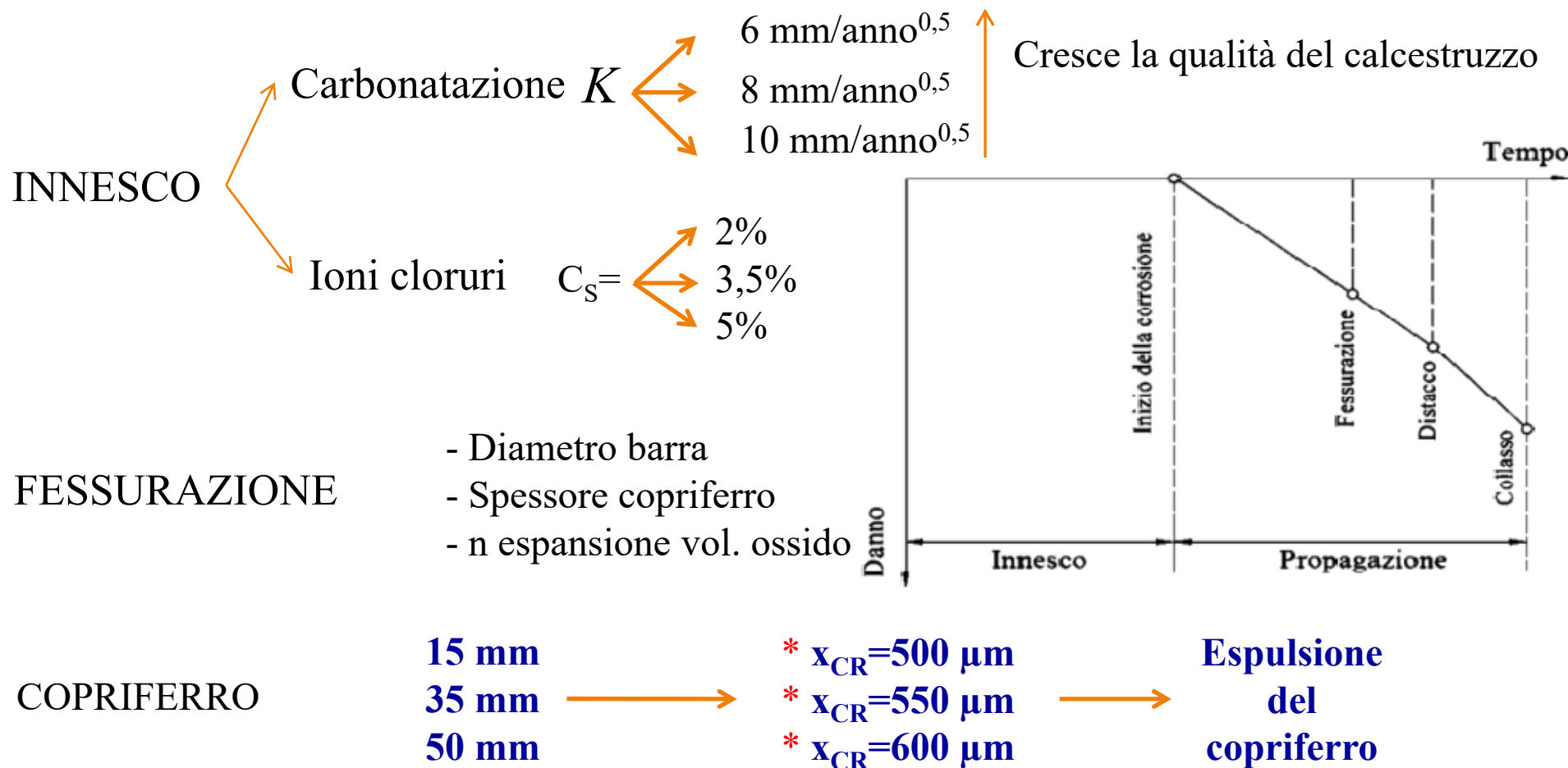
È stata effettuata una interpolazione lineare e il copriferro è stato considerato parzialmente reagente.



Valutazione parametri

82

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



*A. Bossio, T. Monetta, F. Bellucci, G. P. Lignola, A. Prota: “Modeling of concrete cracking due to corrosion process of reinforcement bars”, Cement and concrete research, 71 (2015) 78–92, DOI:10.1016/j.cemconres.2015.01.010



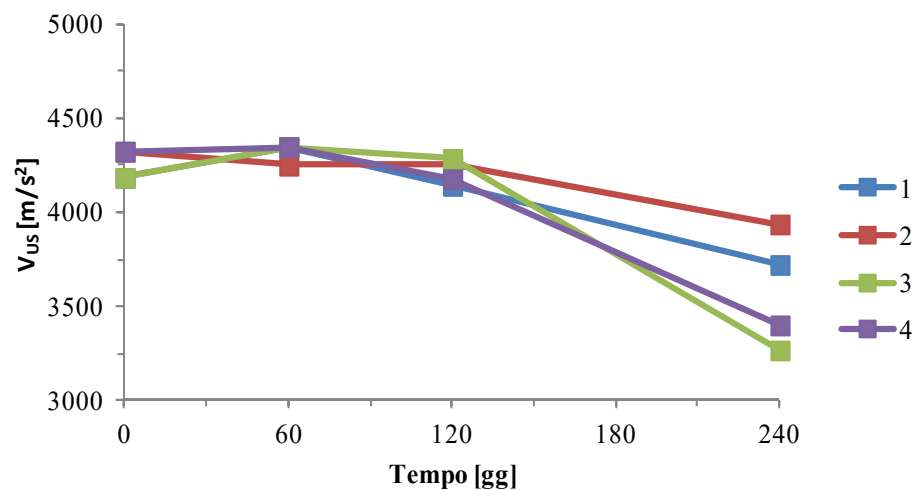
La corrosione delle strutture in calcestruzzo armato

Risultati sperimentali – Prove Ultrasuoni

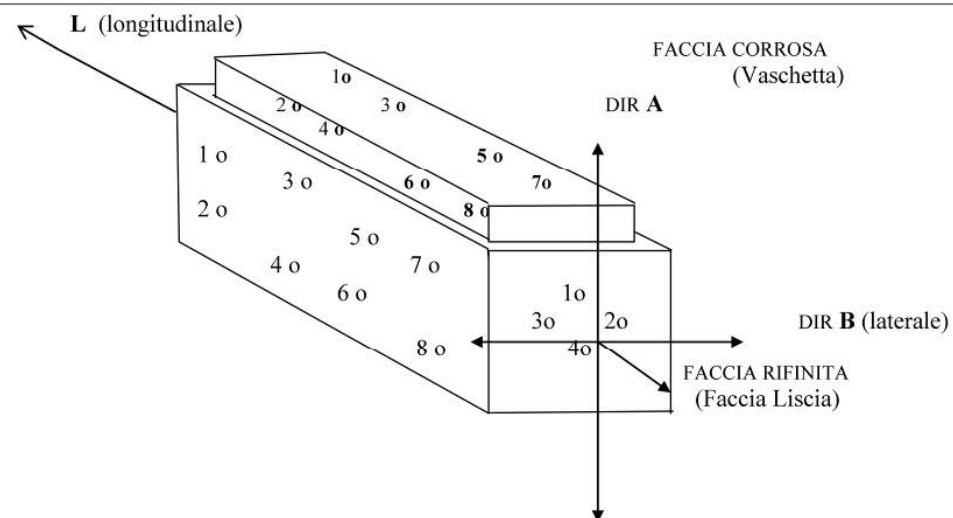
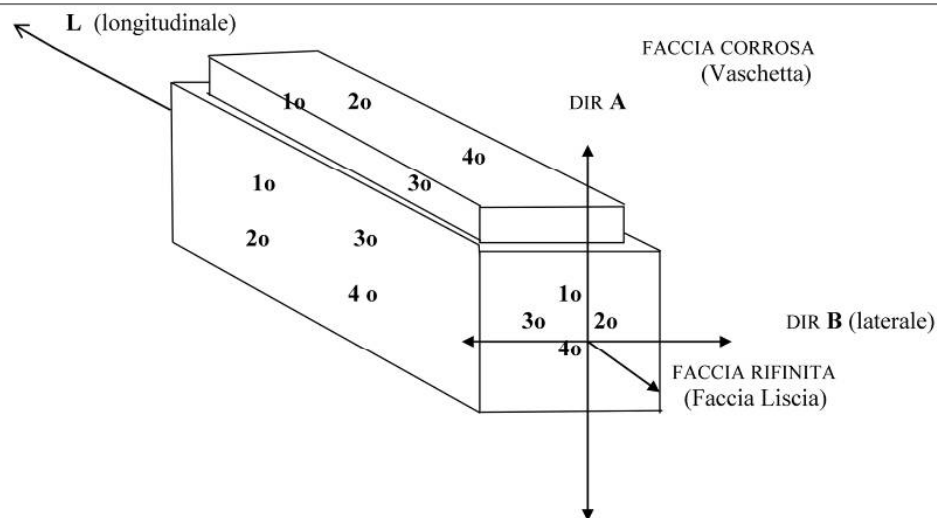
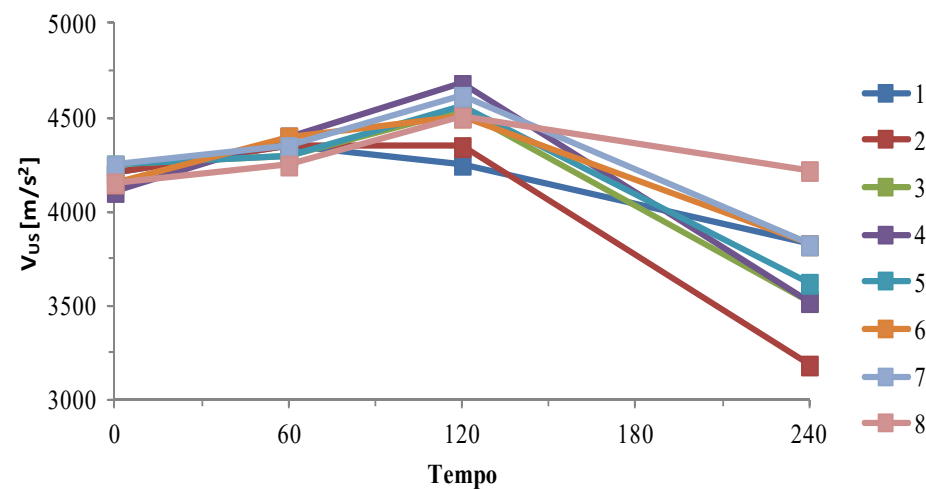
83

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Campione armatura Liscia



Campione Armatura Aderenza Migliorata

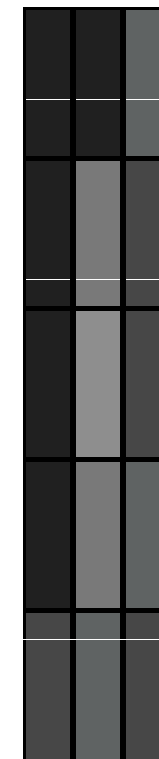
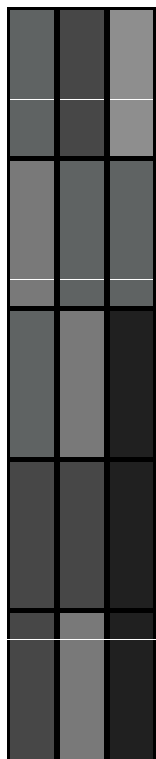




La corrosione delle strutture in calcestruzzo armato

Risultati sperimentali – Prove di Potenziale

84	L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità											
>-100	>-135	>-170	>-205	>-240	>-275	>-310	>-350	<=-350	(mV)			





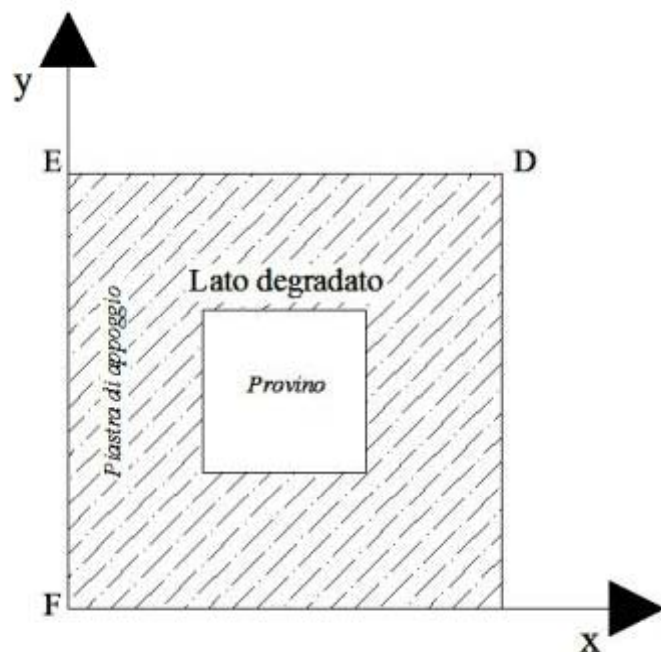
Prova di compressione

85

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Fasi:

- CAPPATURA
- FASCIATURA
- POSIZIONAMENTO LVDT
- SCHIACCIAMENTO
- ANALISI DATI





ANALISI SPERIMENTALE

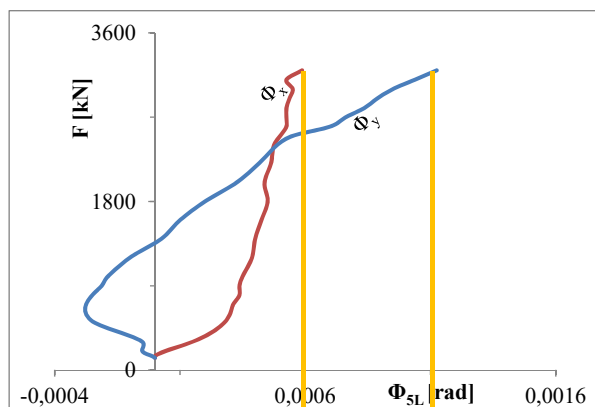
Prova di compressione

86

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

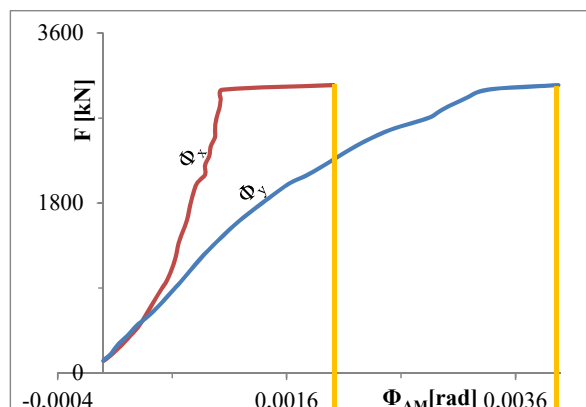
I seguenti diagrammi mostrano la rotazione della testa del provino al crescere del carico intorno all'asse x e intorno all'asse y.

Armatura liscia



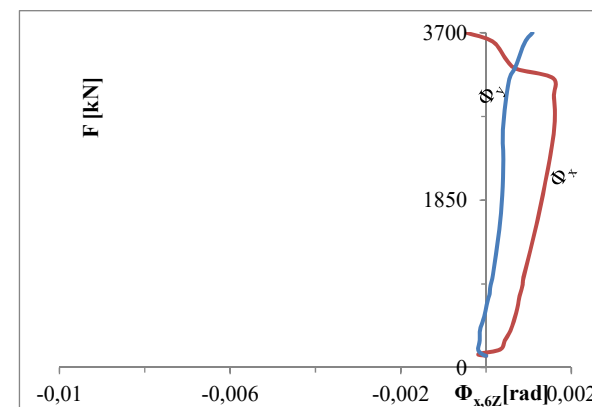
+48,02%

Armatura A.migliorata



+49,40%

Armatura zincata



Rotazione maggiore lungo il lato corrosivo (intorno asse y), poiché il copriferro non fornisce più lo stesso contributo del lato non corrosivo

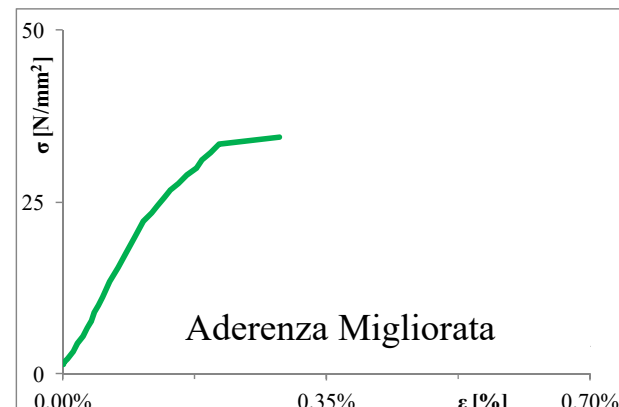
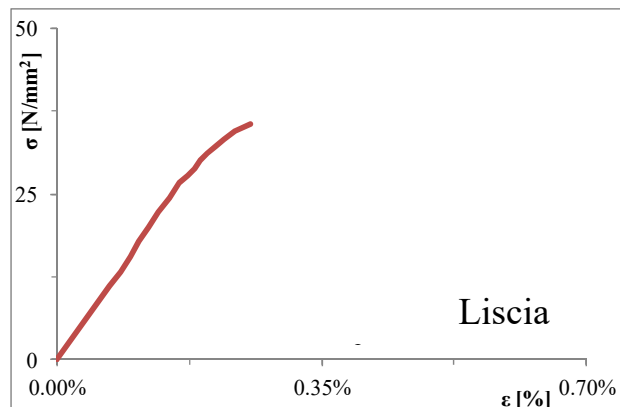
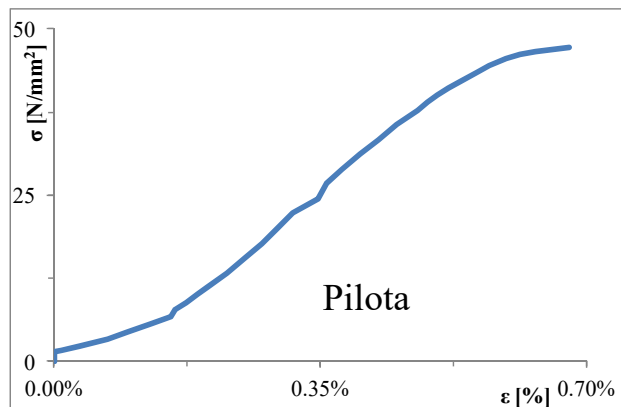
In questo caso **non vi è la presenza di un piano preferenziale di rotazione**, segno del fatto che il copriferro del lato soggetto a corrosione riesce a fornire normalmente il suo contributo



Prova di compressione (analisi dei dati)

87

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



Il processo corrosivo ha degradato allo stesso modo entrambi i campioni. La riduzione del carico di prova è di 24,6% e 27% per barre lisce e aderenza migliorata.

Entrambi i provini corrosi presentano **una rotazione della testa rispetto alla faccia degradata manifestando una minore resistenza in quella parte della sezione.**



	ϵ	σ [N/mm ²]
pilota	2,82‰	47,2
lisce	2,79‰	35,56
ad. migl.	2,87‰	34,44

-24,6%

-27,0%

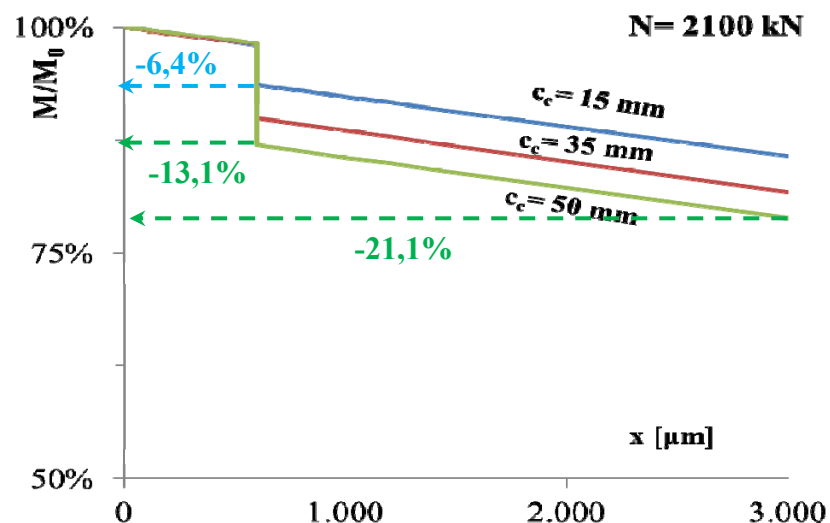
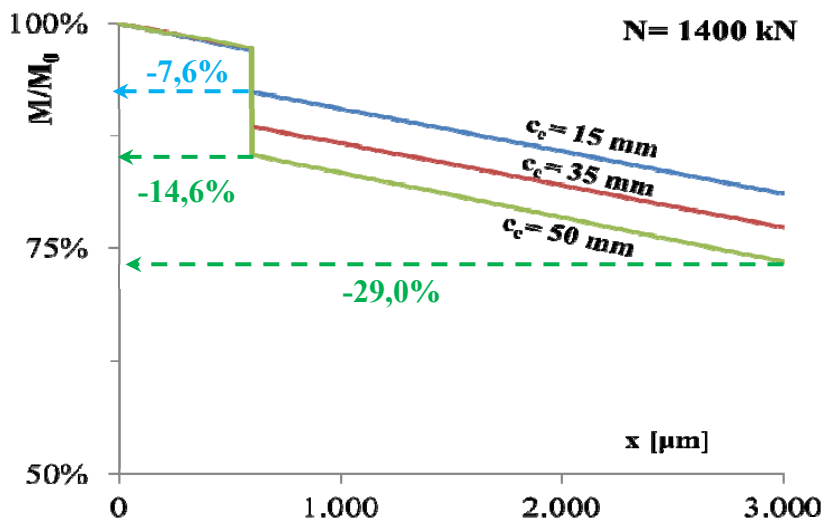
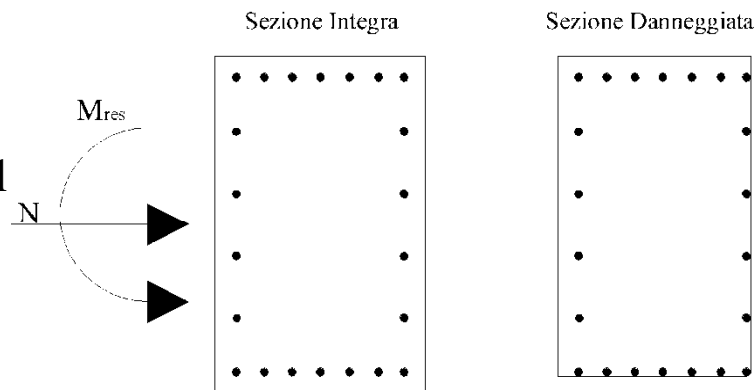


Momento flettente

88

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

- Aumentando il carico assiale, N , l'influenza delle armature diminuisce;
- Occorre un maggiore consumo di barra al crescere del copriferro, c_c ;
- Quando il consumo radiale di barra è pari a $3000 \mu\text{m}$, la capacità flettente si riduce di circa il 29% per sforzo normale $N=1400 \text{ kN}$ e copriferro $c_c=50 \text{ mm}$.

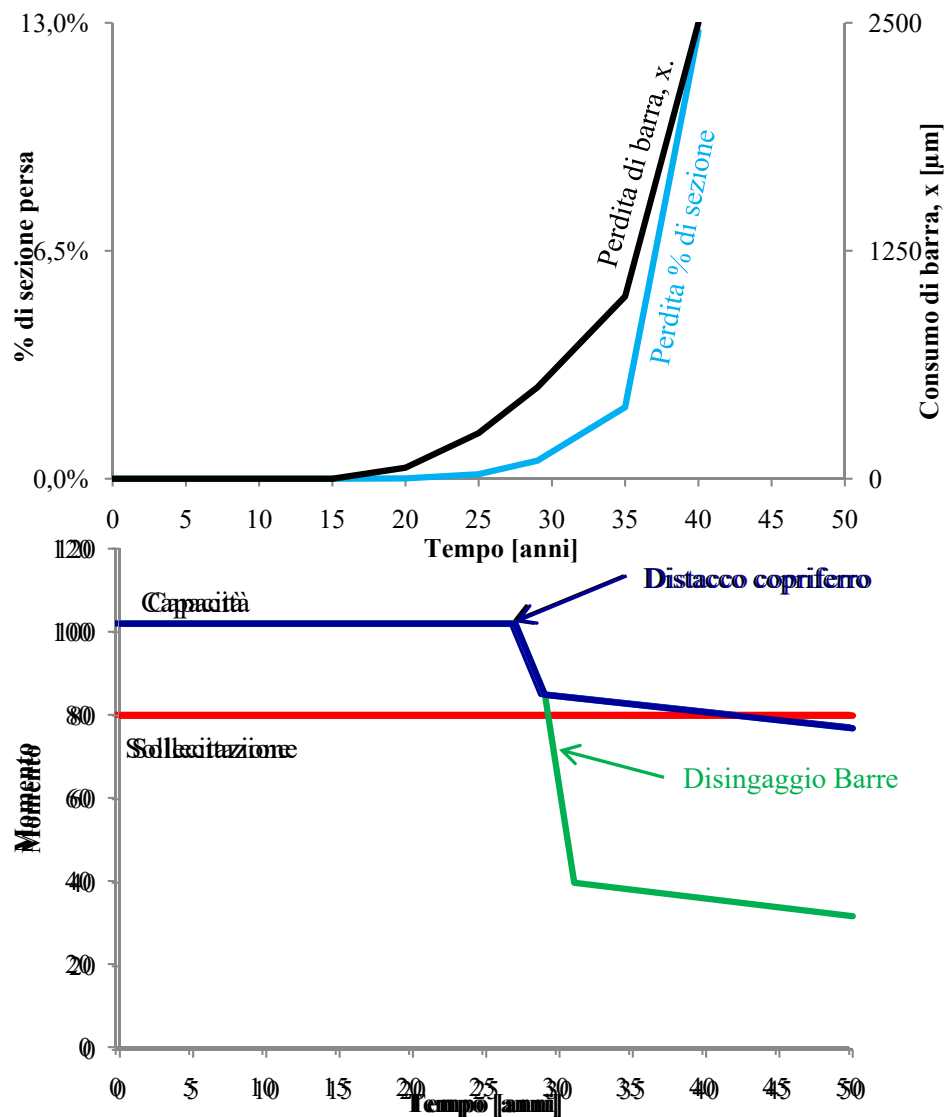




Esempio: trave inflessa

89

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

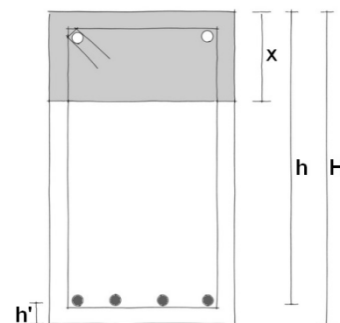


Si osserva la riduzione della capacità flessionale della trave fin sotto il livello di sollecitazione.

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



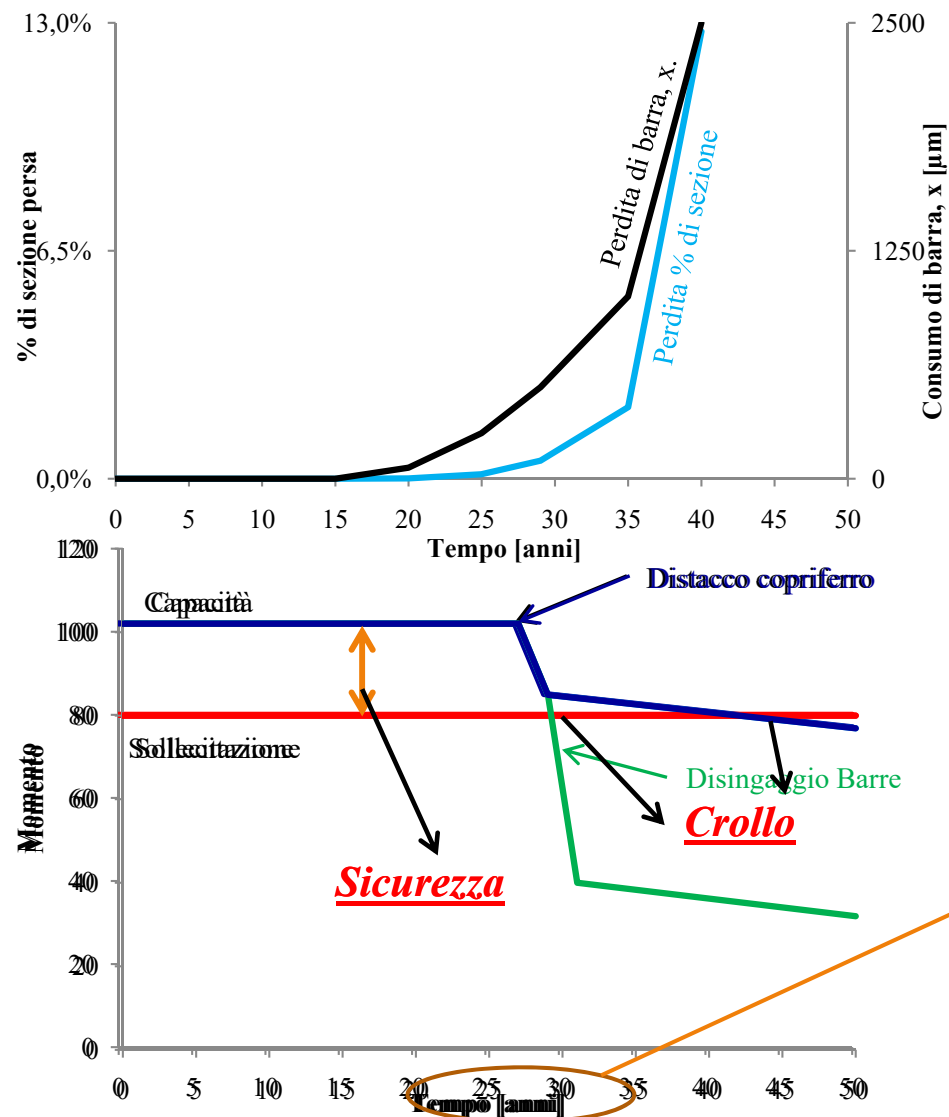


La corrosione delle strutture in calcestruzzo armato

Esempio: trave inflessa

90

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



Il tempo dipende dalla classe di esposizione ambientale del manufatto e può variare in parti diverse della stessa struttura. Inoltre, manutenzione ordinaria e regimentazione delle acque meteoriche possono notevolmente dilatare il tempo di sicurezza.

Prove gravimetriche

91

L'intervento di recupero. Diagnosi – affidabilità – sostenibilità

Barre lisce



Media sezione persa
14.65%

Barre AM



Media sezione persa
22.56%

**Barre
zincate**



Media sezione persa
2.22%

25%



38%



6%





La corrosione delle strutture in calcestruzzo armato

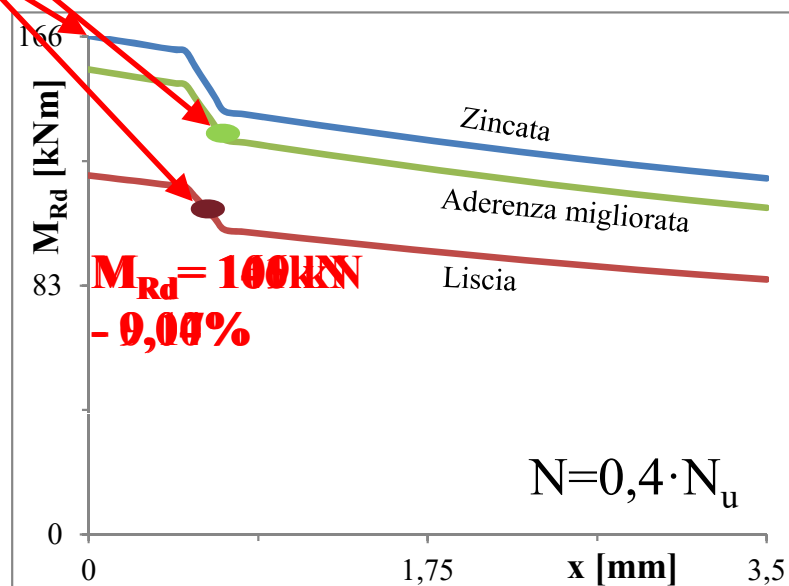
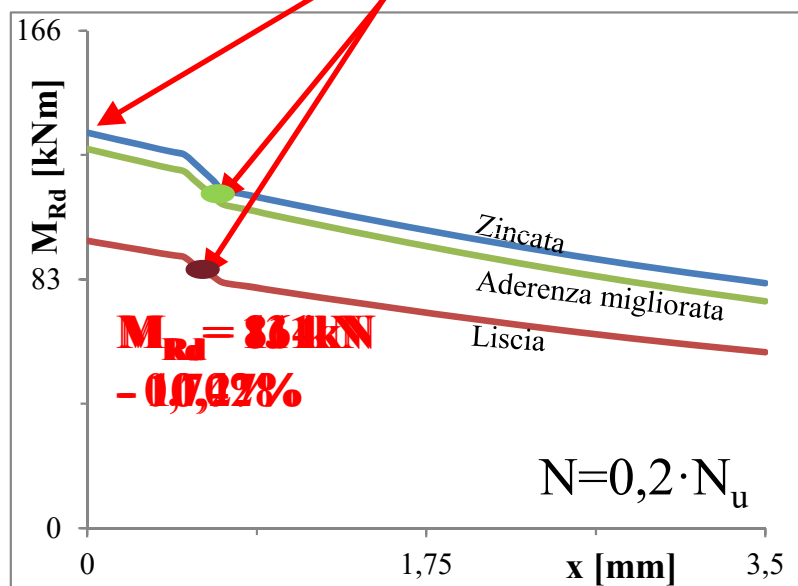
Prove gravimetriche

92

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità – Affidabilità

Tipo barre	perdita di sezione radiale mm	0,4·Nu		0,2·Nu	
		MRd iniziale	MRd finale	MRd iniziale	MRd finale
		kN·m	kN·m	kN·m	kN·m
Lisce	0,41	120	109	96	86
Aderenza migliorata	0,52	155	141	127	114
Zincate	0,04	166	166	132	131

Si leggono ora, dai diagrammi dell'analisi teorica, i valori di M_{Rd} che si hanno in base alla perdita di sezione radiale effettiva ricavata dalle prove gravimetriche.

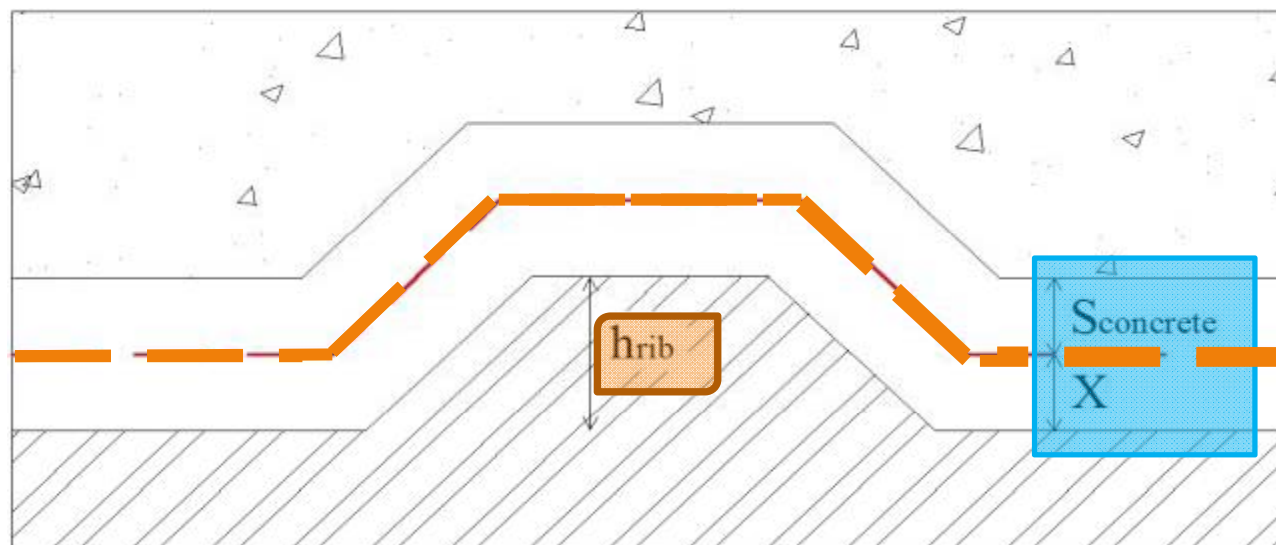




ADERENZA

93 L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Una delle conseguenze principali che il fenomeno della corrosione ha sulle strutture in calcestruzzo armato è la perdita di aderenza.



L'aderenza diminuisce costantemente fino ad annullarsi per un valore di spostamento tra barra e calcestruzzo, generata dalla somma della riduzione della barra con l'espansione dell'ossido, pari all'altezza della nervatura, h_{rib} .

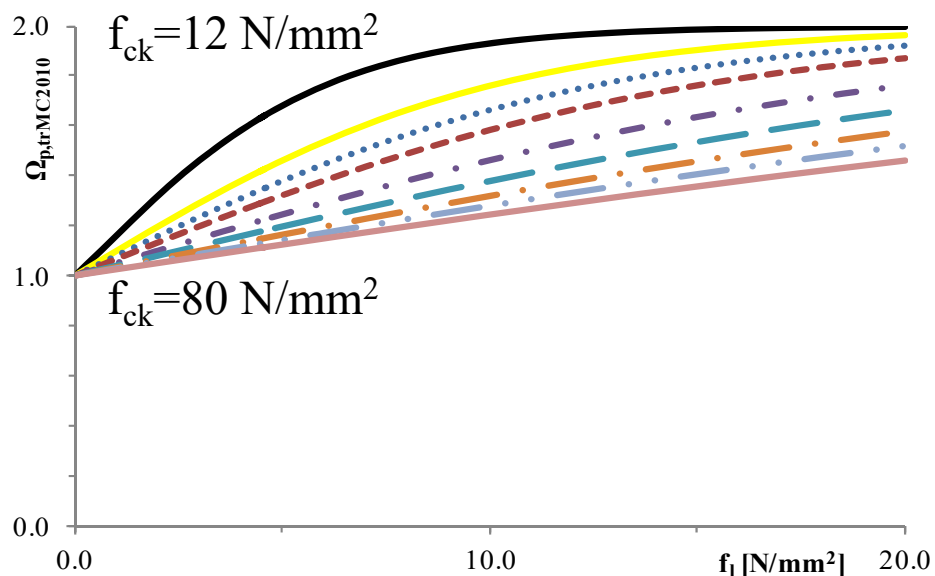
$$x + S_{concrete} = h_{rib}$$



MODELLO PROPOSTO

94

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



È possibile considerare gli effetti della corrosione sul comportamento dall'aderenza, considerando la variazione del rapporto tra la tensione ultima di aderenza, $\tau_{b,f}$, e la massima tensione di aderenza, τ_0 ; con $\tau_0 = 1.25 \times f_{co}^{0.5}$ in accordo al MC10, e f_{co} = sforzo medio di compressione cilindrica del calcestruzzo.

A tale scopo sono stati considerati tre differenti modelli

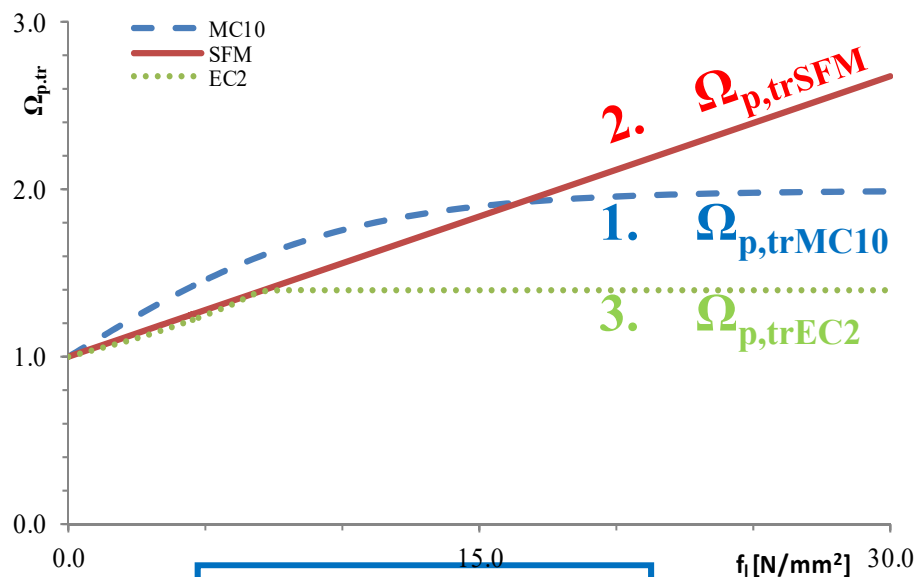
1. First Complete Draft del Model Code 2010 – $\Omega_{p,trMC10} = \frac{\tau_{b,f}}{\tau_0} = \left(1 + \tanh \frac{0.2 \cdot f_l}{0.1 \cdot f_{co}} \right)$
2. Un modello semplice alla Mohr-Coulomb – $\Omega_{p,trSFM} = \frac{\tau_{b,f}}{\tau_0} = \left(1 + \mu \cdot \frac{f_l}{\tau_0} \right)$
3. L'EuroCodice2 – $\Omega_{p,trEC2} = \frac{\tau_{b,f}}{\tau_0} = \left(-\frac{1}{1 - 0.4 \cdot f_l} \right) \leq 1.4$



MODELLO PROPOSTO

95

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità – Affidabilità



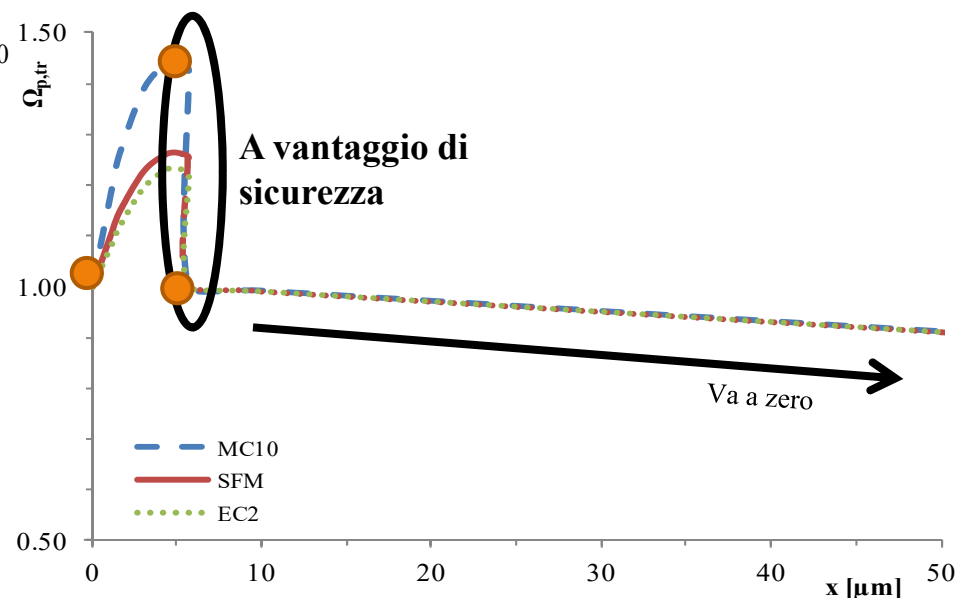
$$1. = \frac{\tau_{b,f}}{\tau_0} = \left(1 - \tanh \frac{0.2 \cdot f_l}{0.1 \cdot f_{co}} \right)$$

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

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

L'espansione degli ossidi genera una pressione interna, all'interfaccia ossido- calcestruzzo, tale da condurre, in fase iniziale, ad un incremento dell'aderenza.

L'apertura della fessura (che si genera a causa dell'attingimento della trazione massima nel calcestruzzo) determina la perdita di pressione laterale di confinamento della barra e induce una brusca perdita di aderenza.

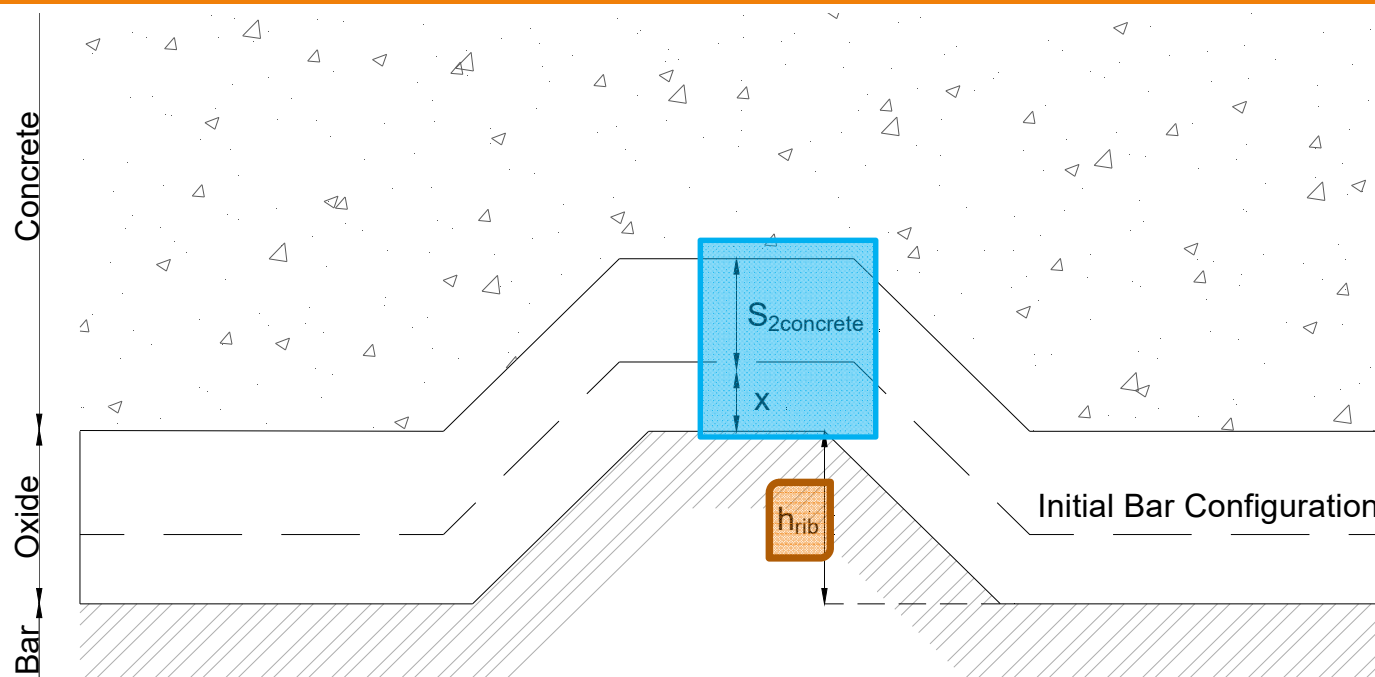




CONDIZIONE DI DISANCORAGGIO

96

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



La forza di ancoraggio diminuisce costantemente fino ad un valore di spostamento tra barra e calcestruzzo, generata dalla riduzione barra e dall'espansione degli ossidi, pari all'altezza delle nervature, h_{rib} .

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



DISCUSSIONE DEI PARAMETRI

97

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



In riferimento alle normative italiane, il valore del copriferro, c_c , e la classe di resistenza del calcestruzzo, sono profondamente legati alla classe di esposizione ambientale dell'opera.



Concrete exposure class	Concrete cover mm	Concrete class	strength N/mm^2
-	mm		N/mm^2
XC1	20		C20/25
XC2	20		C25/30
XC4	30		C30/37

Tutte le analisi condotte al fine delle valutazioni strutturali, pertanto, non possono prescindere dalla conoscenza di tali parametri.

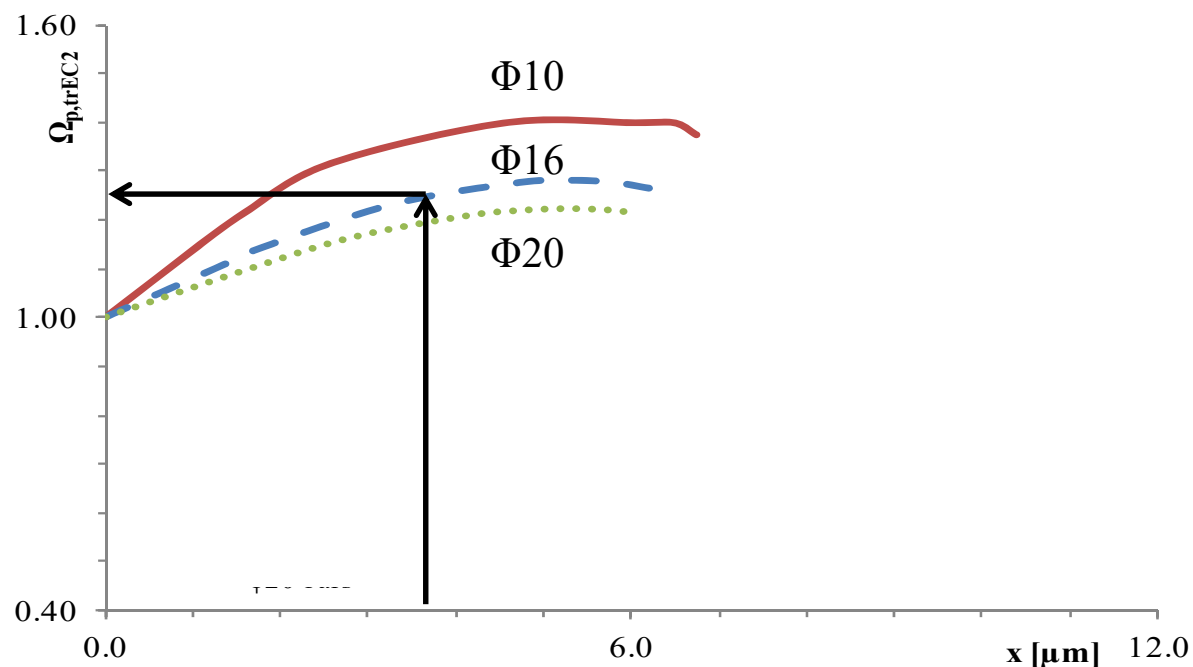


DISCUSSIONE DEI PARAMETRI

Effetto del diametro della barra

98

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



Minore è il raggio della barra, tanto maggiore sarà il rapporto $\Omega_{p, tr}$ che condice al debonding, anche se il consumo di barra, x , resta paragonabile.

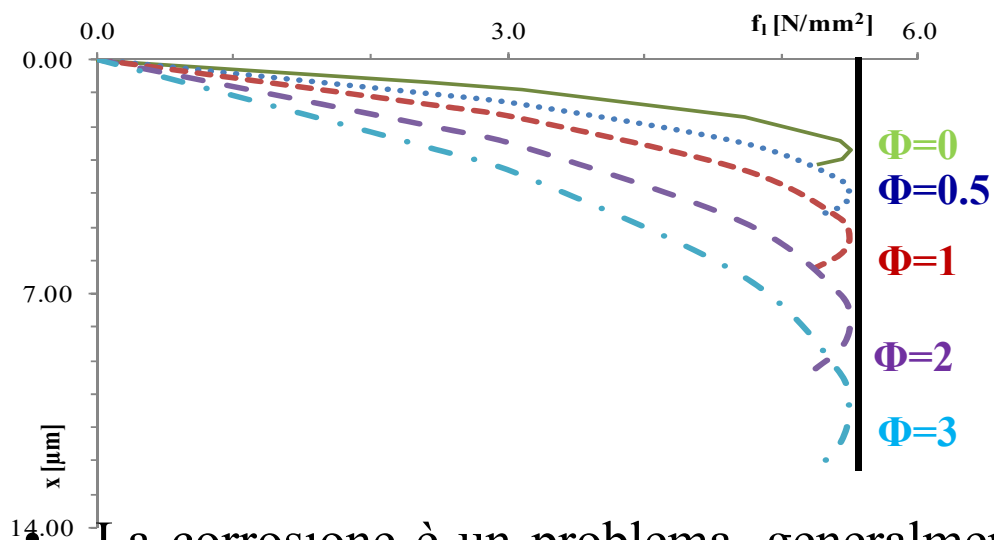


DISCUSSIONE DEI PARAMETRI

Effetto del creep

99

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità – Affidabilità



- XC2
- $\phi 16$ mm
- copriferro=20 mm
- Classe di resistenza C25/30
- $E_{cc} = 1/(1+\Phi)E_c$.

- La corrosione è un problema, generalmente, di medio lungo termine, così come il verificarsi del fenomeno del creep. Il creep determina la riduzione del modulo elastico del calcestruzzo di un fattore che può essere assunto nella forma $1/(1+\Phi)$, con Φ che aumenta con il tempo e con il carico. Naturalmente, al crescere del fattore di creep, il modulo elastico del calcestruzzo diminuisce.
- Il valore di f_t resta costante, ma il consumo di barra che lo determina cambia sensibilmente.
- Naturalmente, calcestruzzi di classe superiore e copriferri maggiori richiedono maggiore consumo di barra.

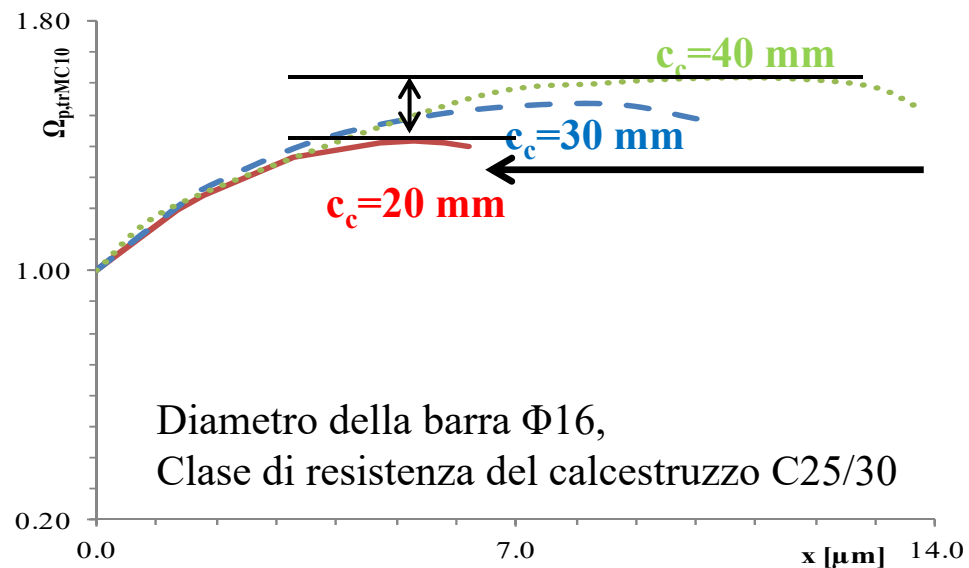


DISCUSSIONE DEI PARAMETRI

Effetto del copriferro

100

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



Il copriferro, c_c , è un'importante protezione delle barre di armatura dalla corrosione.

Infatti, il suo effetto sul consumo di barra è davvero marcato.

Anche se il copriferro non ha un marcato effetto sull'aderenza le sue proprietà protettive fanno sì che è necessario un maggiore consumo di barra (maggiore tempo) affinché si attinga il massimo valore del rapporto $\Omega_{p, tr}$.

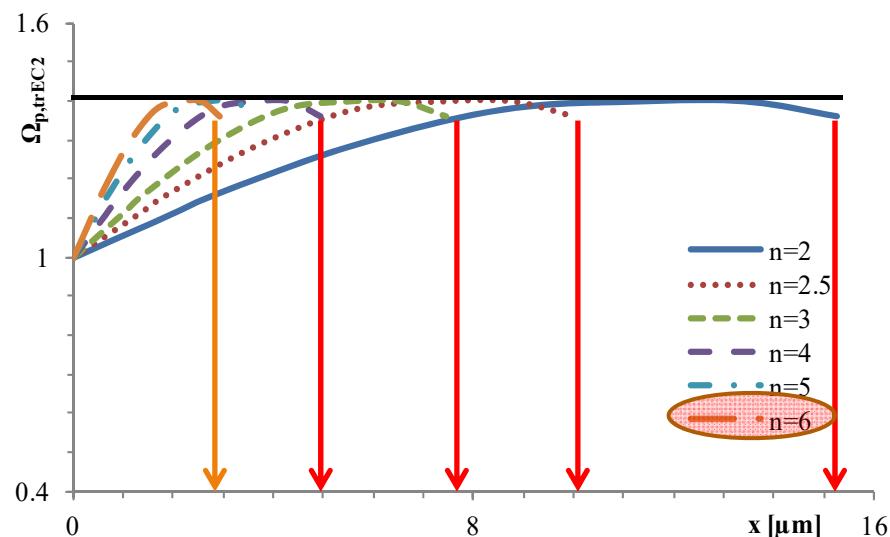


DISCUSSIONE DEI PARAMETRI

Effetto del fattore di espansione volumetrica dell'ossido

101

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità – Affidabilità



Diametro della barra $\Phi 16$,
Copriferro=30 mm
Classe di resistenza del calcestruzzo C25/30

Il grafico mostra l'effetto sul bond dovuto ai diversi ossidi (diversa espansione volumetrica).

Maggiore risulta essere n , minore risulta essere la riduzione di barra, x , per raggiungere la fessurazione del copriferro.

Si nota, inoltre, che:

Ha un basso effetto sull'aderenza,
Ma influenza molto il consumo di barra che determina le condizioni di debonding.



ADERENZA

102

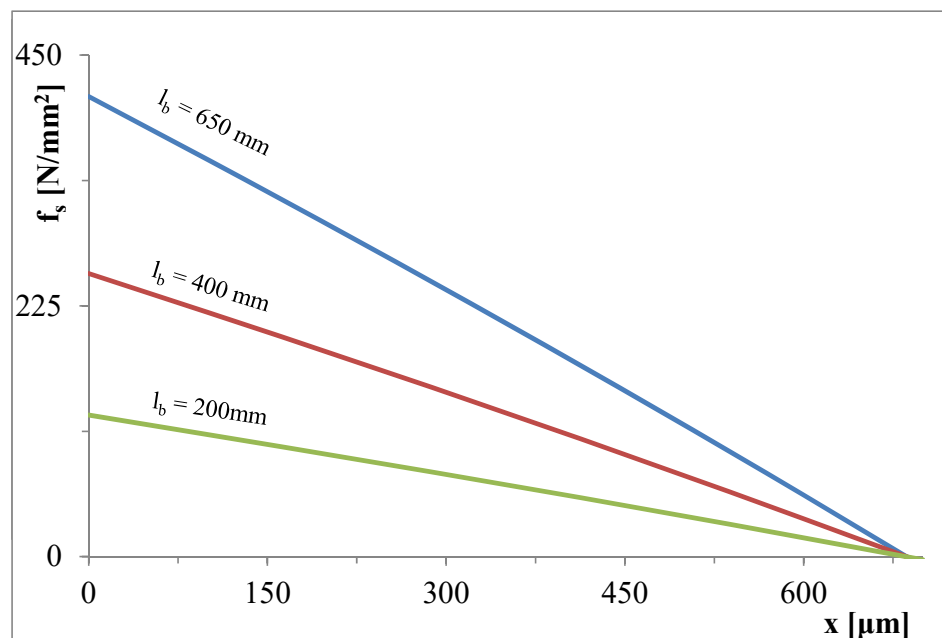
L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta \cdot \frac{f_{bk}}{\gamma_c}$$

$$x + s_{concrete} = h_{rib}^* = 0,07 \cdot 2 \cdot R_0$$

$$x = 686 \mu m^{**} \longrightarrow f_{bd} = 0$$

$$f_s \frac{\pi \cdot \Phi^2}{4} = f_{bd} \cdot \pi \cdot \Phi \cdot l_b$$



Indipendentemente dalla lunghezza di ancoraggio scelta, la tensione f_s si riduce progressivamente fino ad annullarsi, in quanto dipendente solo dai parametri geometrici dell'altezza h_{rib} della nervatura.

*Wang-Liu: "Modeling bond strength of corroded reinforcement without stirrups" – Department of Civil Engineering , Shanghai Jiaotong University, 16 December 2003

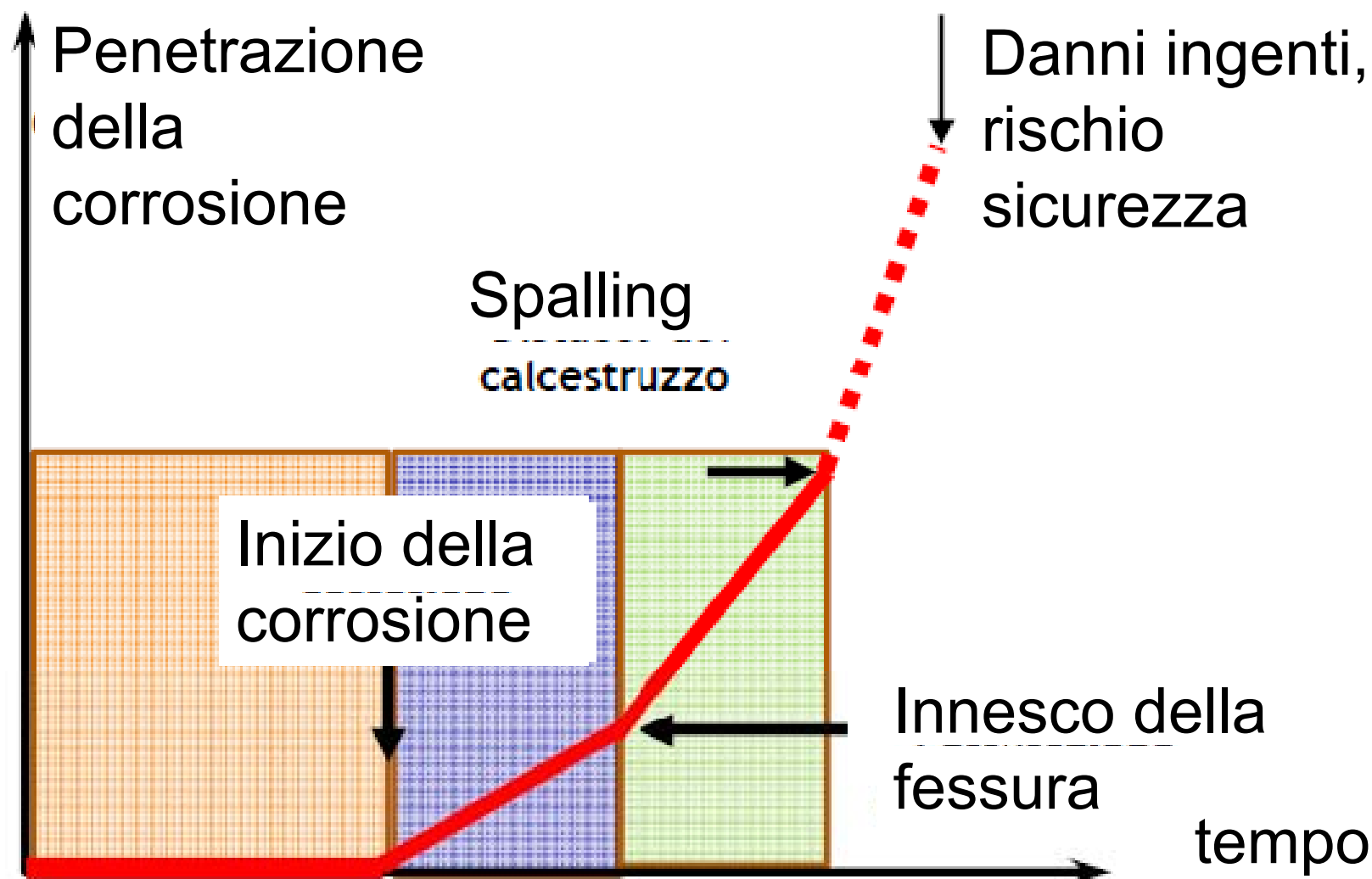
**Bossio A., Montuori M, Bellucci F., Lignola G.P., Prota A., Cosenza E., Manfredi G.: "Indirect measure of corrosion level based on crack opening." Journal of Heritage Conservation 34/2013 p. 36-40. 2013.



Innesco e propagazione della fessura

103

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità – Affidabilità





Test di indagine non distruttiva basati sul valore di apertura delle fessure

104

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Le tecniche di indagine elettrochimica, seppur ancora non di larga diffusione, non sono le uniche tecniche di indagine del livello di corrosione, attuabili senza rimozione del copriferro

Alcuni dei test on distruttivi più comuni sono:

Test di carbonatazione (fenolftaleina test);

Mappatura del potenziale di corrosione;

Misura della velocità di corrosione;

Misure di resistenza;



>-100	>-100
>-100	>-100
>-100	>-100
>-100	>-150
>-100	>-300
>-300	>-350
>-300	>-250
>-250	>-250





Test di indagine non distruttiva basati sul valore di apertura delle fessure

105

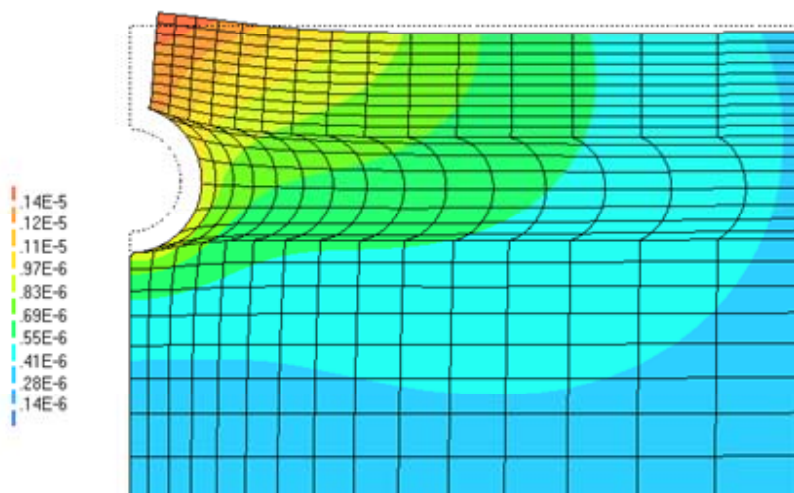
L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità – Affidabilità

È stata valutata la possibilità di correlare direttamente il valore dell'apertura delle fessure nel copriferro con il valore di barra consumata a causa della corrosione.

Analisi FEM sono state effettuate al fine di simulare il comportamento di strutture soggette a fenomeni di corrosione.

Ipotesi di base per le analisi FEM

- Sono state effettuate 200 analisi FEM utilizzando il programma TNO DIANA 9.4;
- È stato imposto uno spostamento al calcestruzzo lungo il perimetro della barra;
- Il calcestruzzo è stato considerato a comportamento elastico sia in compressione che in tensione;
- La deformabilità dell'acciaio e dell'ossido sono state trascurate.



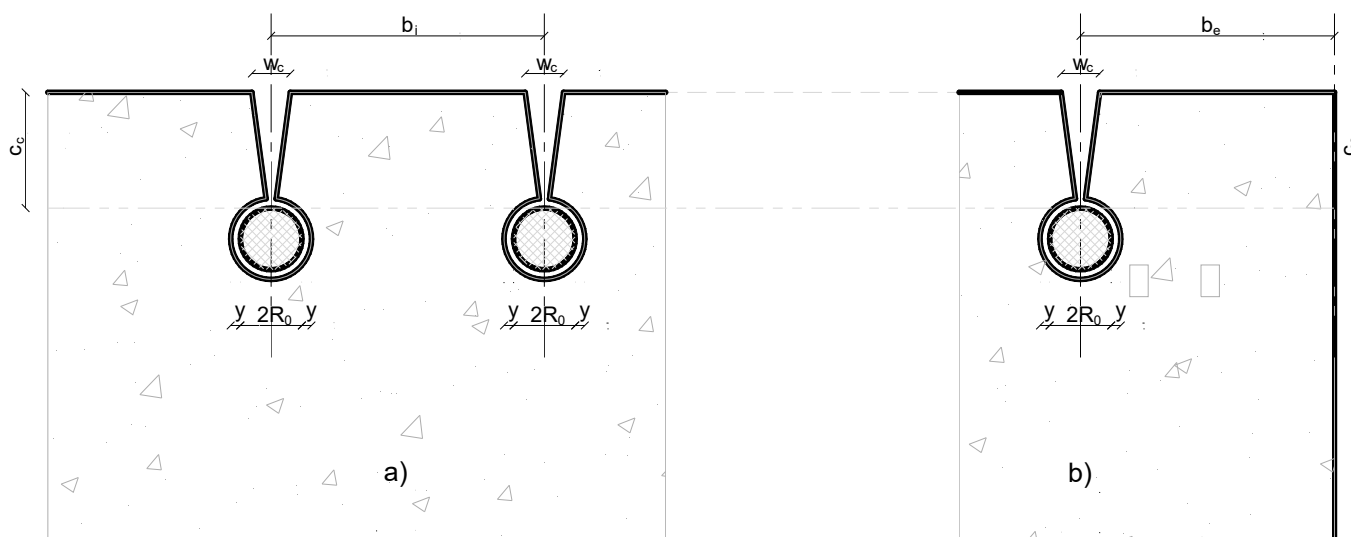


Test non distruttiva basati sull'apertura delle fessure

Barre interne e barre esterne

106

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità – Affidabilità



DATI DI INPUT $\Longrightarrow$ **MODELLO** $\Longrightarrow$ **DATI DI OUTPUT**

- Copriferro, c_c , [10-30-50 mm, negli esempi seguenti];
 - Raggio della barra, R_0 , [5-8-10 mm negli esempi seguenti];
 - Distanza tra due fessure, b_i [70-260 mm];
 - Distanza della fessura dall'angolo esterno, b_e [35-130 mm];
 - Dimensione delle fessure, w_c ;
 - Spostamento imposto, y .
- Apertura della fessura normalizzata rispetto allo spostamento imposto, w_c/y .
 - Penetrazione della corrosione, x .



Test non distruttiva basati sull'apertura delle fessure *Penetrazione della corrosione*

Al fine di valutare la **sicurezza di una struttura**, però, è importante conoscere il **valore della penetrazione della corrosione** e, di conseguenza, la **riduzione di sezione dei ferri di armatura e delle staffe**.

I modelli presentati consentono di calcolare l'apertura di fessura, w_c , in relazione all'espansione della barra (dovuta alla produzione dell'ossido), y .

È possibile correlare y alla penetrazione della corrosione, x , utilizzando il coefficiente di espansione volumetrica dell'ossido, n , solitamente compreso tra 2 and 6*.

Una semplice equazione di continuità (8), consente di correlare x e y . (alcune teorie aggiungono un volume di ossido che penetra all'interno delle fessure).

$$y = \sqrt{(1 - n) \cdot (R_0 - x)^2 + n \cdot R_0^2} - R_0 \quad (8)$$

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



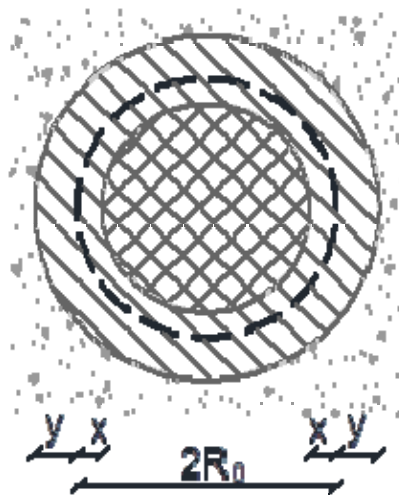
Test non distruttiva basati sull'apertura delle fessure

Equazione di continuità del volume di ossido

108

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

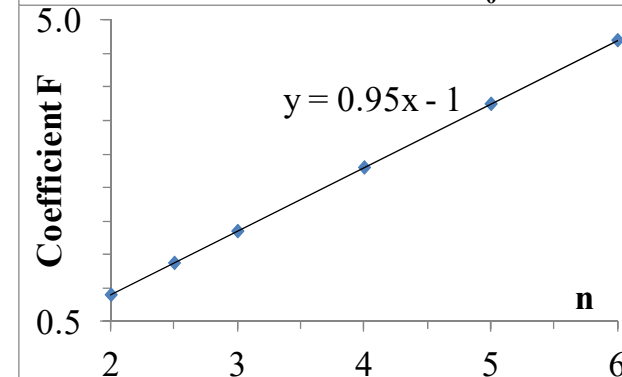
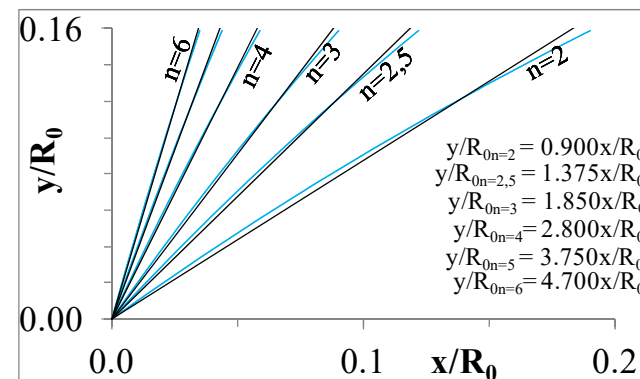
$$y = \sqrt{(1 - n) \cdot (R_0 - x)^2 + n \cdot R_0^2} - R_0 \quad (8)$$



Volume di ossido prodotto
 $\pi \cdot [(R_0 + y)^2 - (R_0 - x)^2]$

È uguale a n volte il volume di barra consumata $\pi \cdot [R_0^2 - (R_0 - x)^2]$.

$$\frac{y}{R_0} = \sqrt{(1 - n) \cdot \left(1 - \frac{x}{R_0}\right)^2 + n} - 1 \quad (9)$$



$$\frac{y}{R_0} \cong (0.95 \cdot n - 1) \cdot \frac{x}{R_0} \rightarrow x \cong \frac{y}{(0.95 \cdot n - 1)} \quad (10)$$

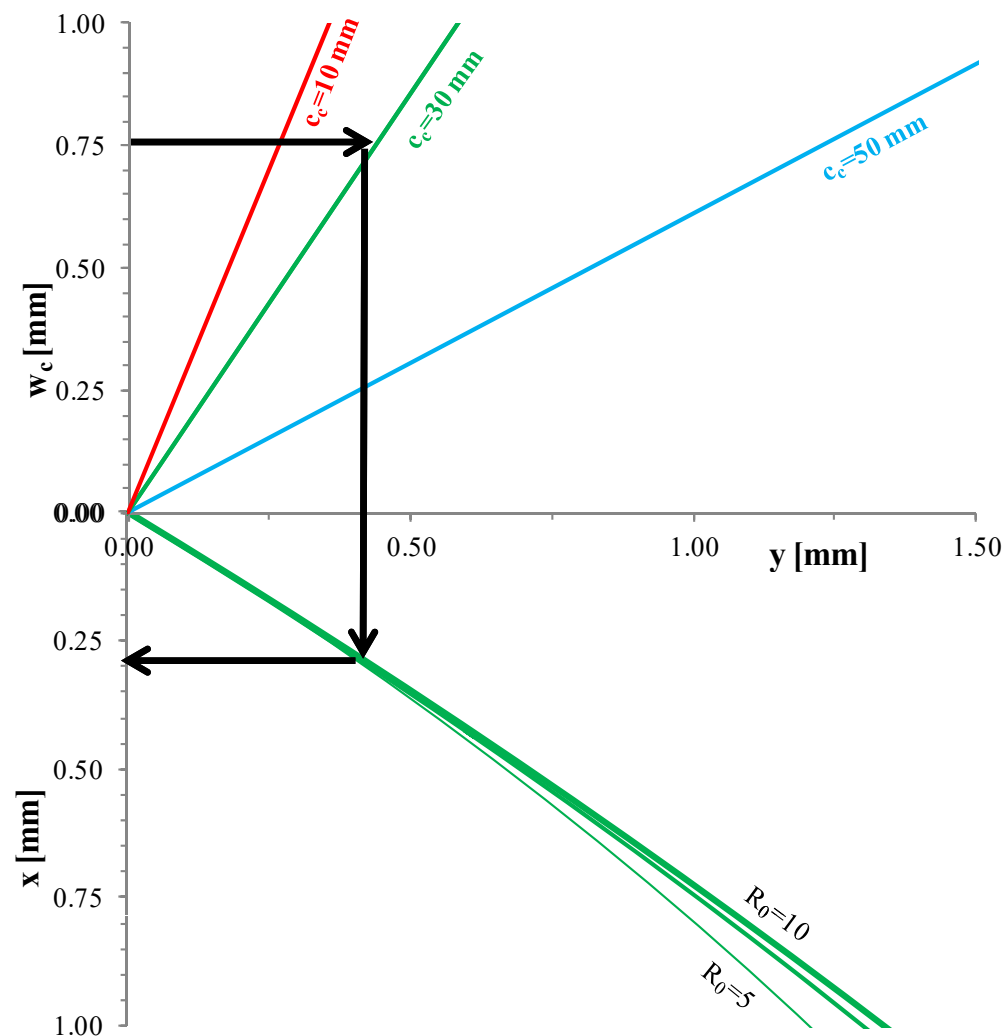


Test non distruttiva basati sull'apertura delle fessure

Barra interna - recupero

109

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità – Affidabilità





Test non distruttiva basati sull'apertura delle fessure

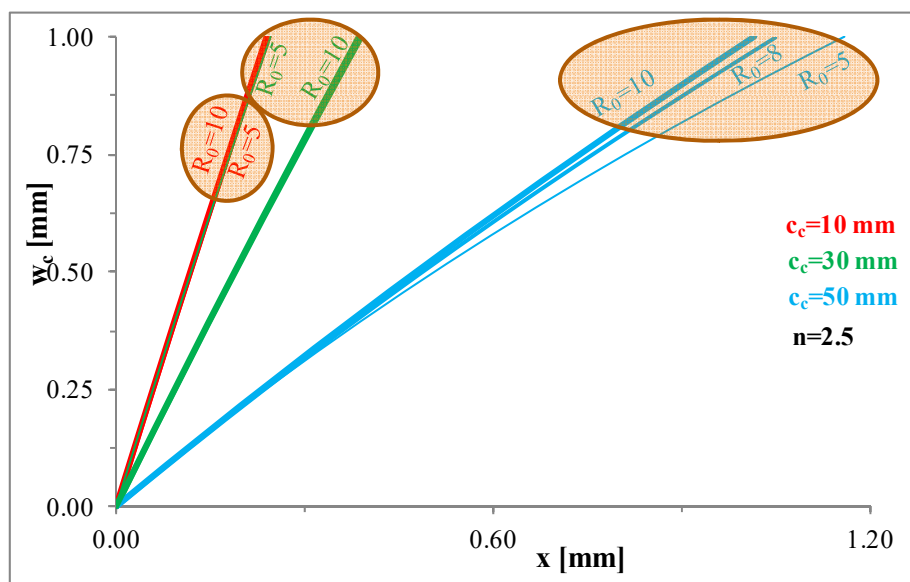
Grafici di progetto

110

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

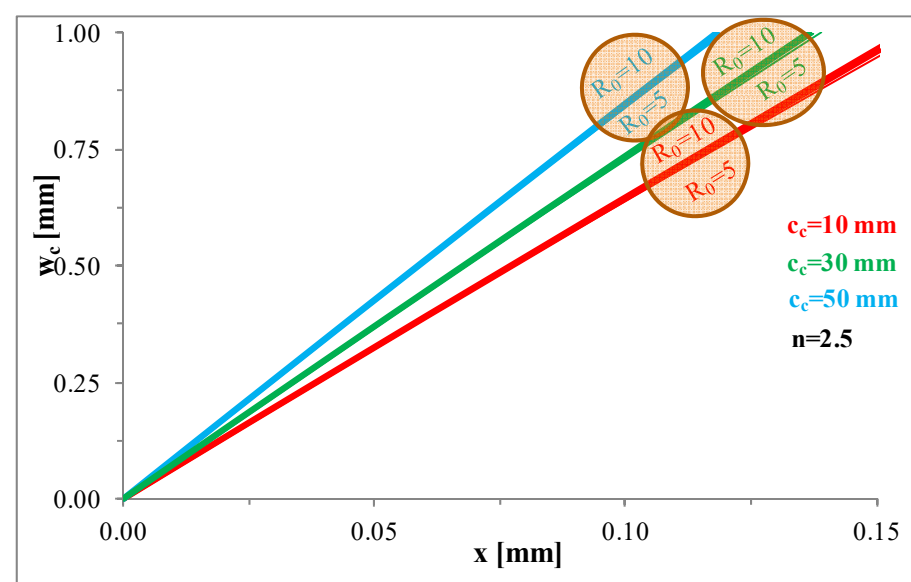
Discussione dei risultati

Barra interna



Eqs. (3) per valutare w_c/y and eq. (7) per valutare x .

Barra esterna



Eqs. (6) per valutare w_c/y e eq. (7) per valutare x .

Relazione tra w_c e x , utilizzando i modelli raffinati.

A vantaggio di sicurezza è stato utilizzato un valore basso di n ($=2.5$), (in quanto induce maggiori valori di penetrazione della corrosione).

È confermata la trascurabile dipendenza dal raggio della barra, R_0 .



Test non distruttiva basati sull'apertura delle fessure

Esempio applicativo

111

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



- STEP 1.** Misurare in situ l'apertura delle fessure;
- STEP 2.** Valutare il rapporto w_c/y e calcolare il valore di y usando l'eq. (3) o (6);
- STEP 3.** Correlare y a x usando l'eq. (7);
- STEP 4.** Correlare w_c a x ;
- STEP 5.** Calcolare la sezione di barra persa usando come raggio $R_1=R_0-x$;
- STEP 6.** Ripetere le analisi strutturali usando come raggio della barra R_1 ;
- STEP 7.** Verificare la sezione.



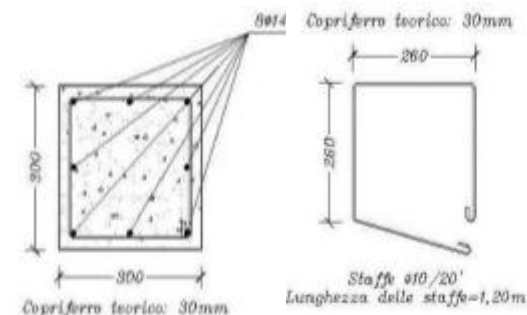
La corrosione delle strutture in calcestruzzo armato

Fessurazione

112

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

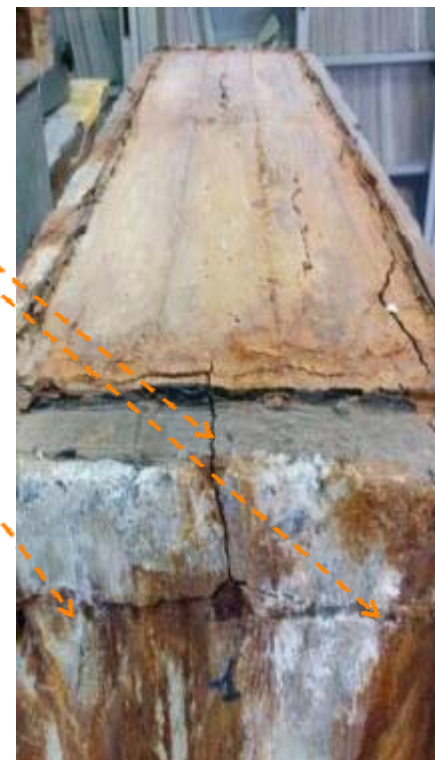
Le fessure erano assenti sul provino dotato di armatura zincata, mentre erano diffuse sul provino con armatura non zincata. Ove sono presenti tre fessure totali di 2.5-3.0 mm (in corrispondenza di ogni barra), il copriferro perde la capacità portante e protettiva.



NON Zincato



Zincato





Test non distruttiva basati sull'apertura delle fessure *Osservazioni*

113

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

È stata discussa **l'influenza di alcuni parametri difficili da ricavare**. In particolare, pensando a un **bene culturale**, il **diametro** della barra è molto difficile da stabilire, ma il suo effetto sul fenomeno è **quasi influente**.

È stato affrontato il problema del valore del copriferro, anch'esso difficile da stabilire in molti casi, e, per questa ragione, sono state fatte interpolazioni semplificate che **normalizzano i risultati rispetto al valore di copriferro**.

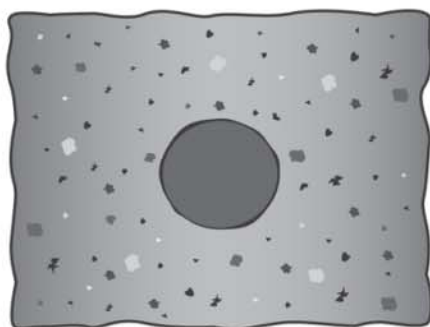
Infine, sono state trovate **relazioni che dipendono solo dallo spessore delle fessure** o dalla loro distanza dal bordo del calcestruzzo, entrambi facilmente misurabili. Il massimo scostamento riscontrato, inferiore al 30%, è stato trovato con i modelli raffinati. Comunque è considerato ragionevole in confronto all'incertezza circa la misura della fessura in situ e al processo di corrosione in generale.



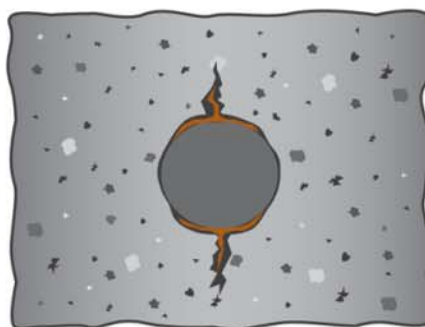
Dai Campioni alle Strutture....

114

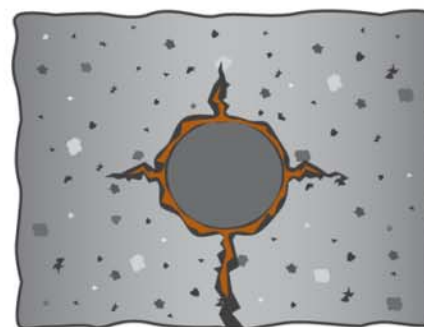
L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



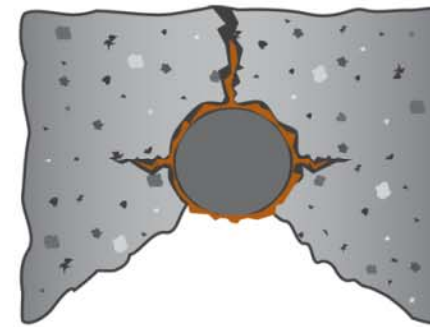
BEFORE CORROSION.



**BUILD-UP OF
CORROSION PRODUCTS.**



**FURTHER CORROSION.
SURFACE CRACKS.
STAINS.**



**EVENTUAL SPALLING.
CORRODED BAR.
EXPOSED.**



Lavori scientifici utili

115

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

OBBIETTIVO

1. Valutazione della penetrazione di corrosione che induce la fessurazione del copriferro.
2. Andamento dell'aderenza.
3. Correlazione tra la larghezza della fessura e la perdita radiale di barra.
4. Applicabilità alle strutture di interesse storico-culturale
5. Valutazione della capacità portante su scala reale
6. Valutazione degli effetti della corrosione sulla risposta globale delle strutture in calcestruzzo armato.

STATUS

GOAL

Analytical modeling of reinforcement corrosion effects on RC members degradation

GOAL

Transverse stress on corroded steel reinforcement bars in concrete

GOAL

Indirect measure of corrosion level based on crack opening

GOAL

Non invasive assessment of corrosion level in historical RC constructions

GOAL

Influence of the type of reinforcement on load bearing capacity of corroded reinforced concrete structures

GOAL

Seismic capacity of corroded RC buildings

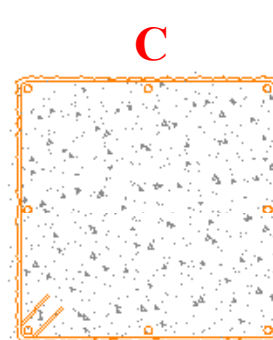
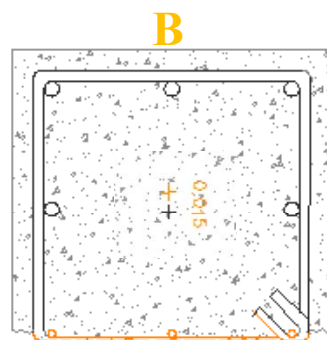
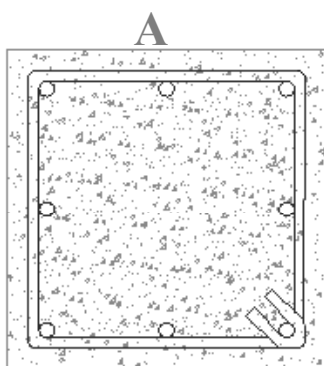


Effetti strutturali della corrosione

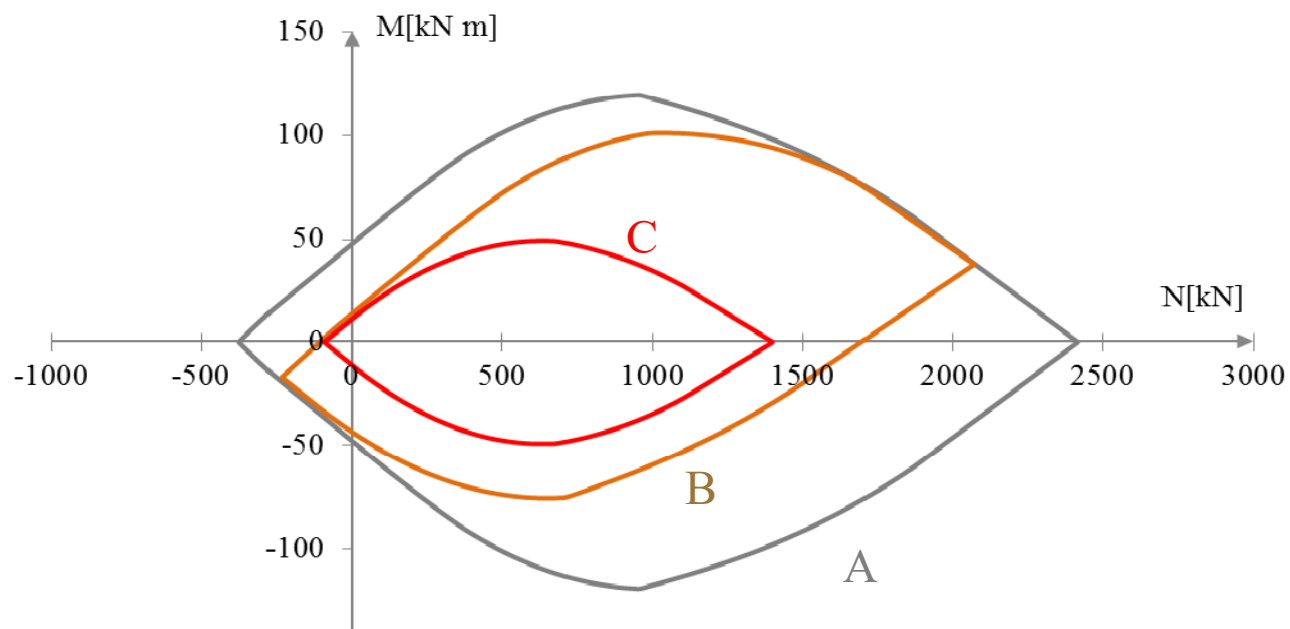
Variazione del dominio M-N

116

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



	A	B	C
B [mm]	300	300	240
H [mm]	300	270	240
A'_s [mm ²]	461.5	461.5	115
A_s [mm ²]	461.5	115	115
c' [mm]	30	30	0
c [mm]	30	0	0
A_{sw} [mm ²]	157	81.6	6.28

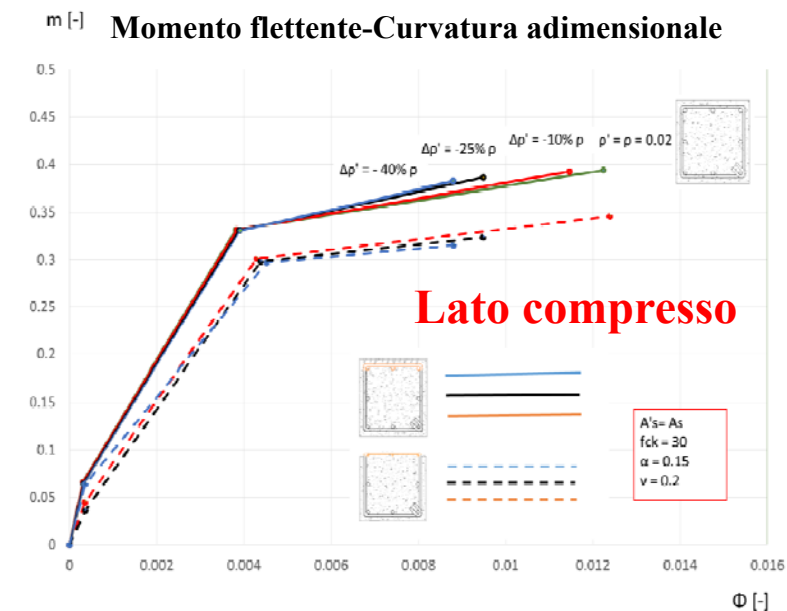
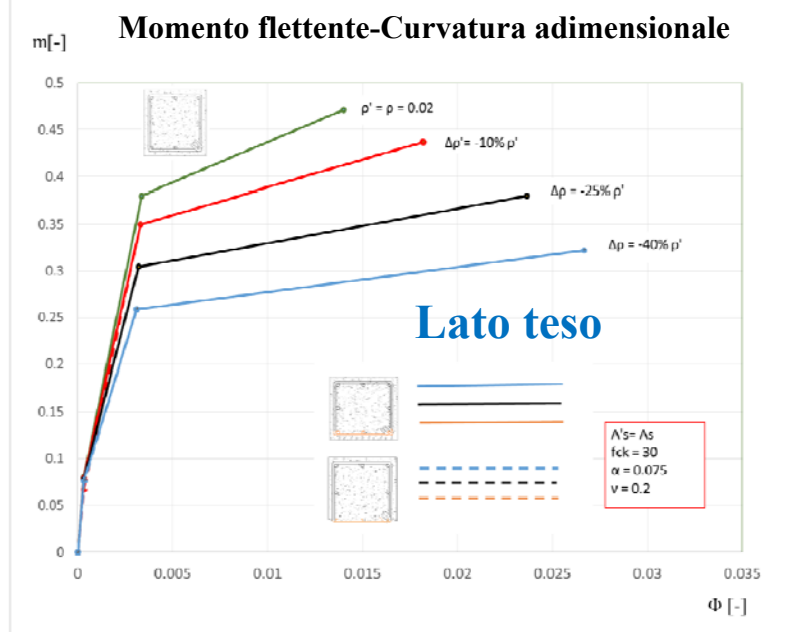




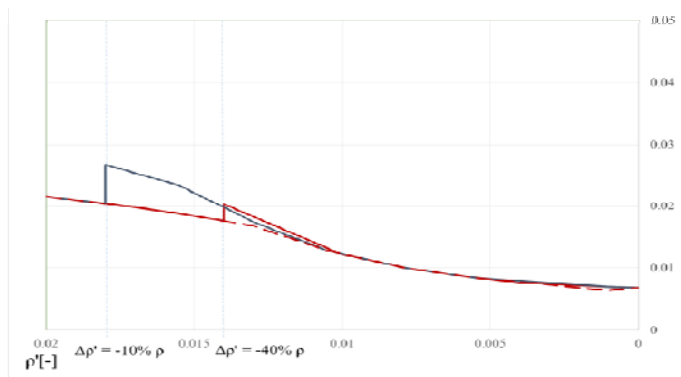
Effetti strutturali della corrosione Momento-Curvatura - Duttilità

117

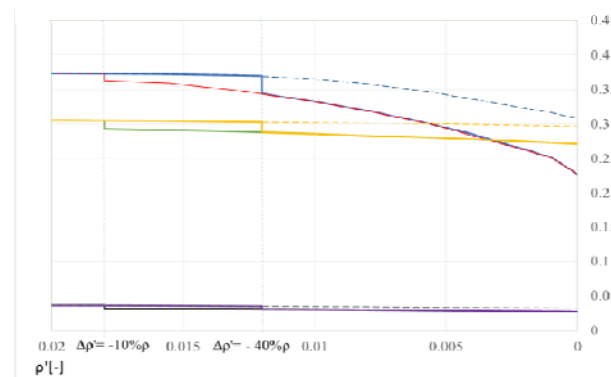
L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



Curvatura Ultima – Barre corrose **in compressione**



Momento Ultimo, di snervamento e di Cracking – barre corrose **in compressione**





Effetti strutturali della corrosione Il Taglio

118

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

$$V_{Rd} = \text{Min.} (V_{Rsd}; V_{Rcd})$$

$$V_{Rdc} = 0,9 \cdot b_w \cdot d \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot \left(\frac{\cotg \alpha + \cotg \theta}{1 + \cotg^2 \theta} \right)$$

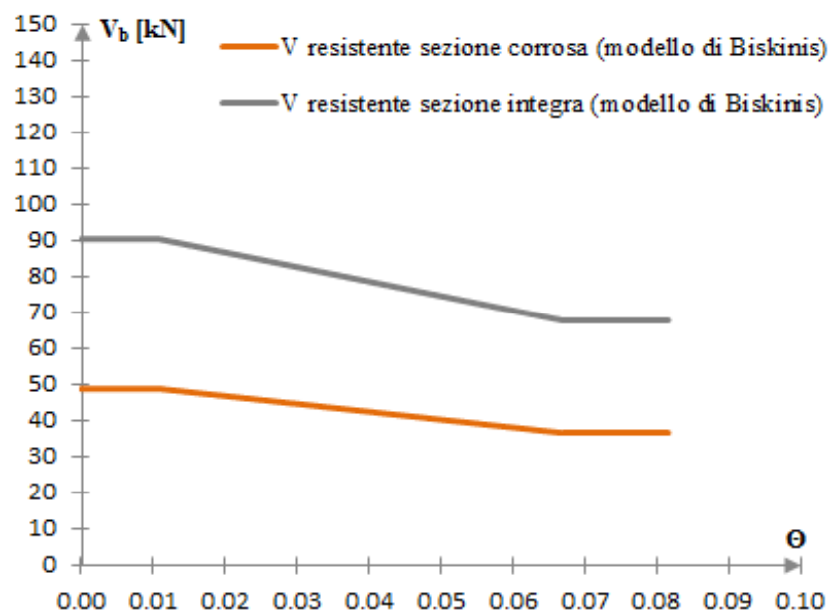
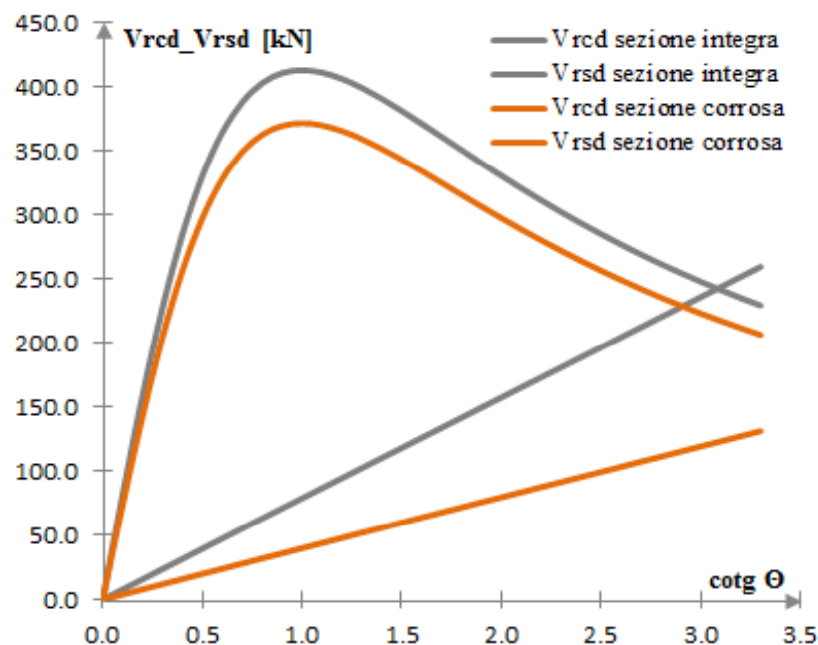
$$V_{Rsd} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\cotg \alpha + \cotg \theta) \cdot \sin \alpha$$

$$V_R = \frac{1}{\gamma_{ef}} [V_N + k(V_C + V_W)]$$

$$V_N = \frac{h - c}{2L_v} \min(N; 0,55A_g f'_c) \quad k = [1 - 0,05 \min(5; \mu_A^{pl})]$$

$$V_C = [0,16 \max(0,5; \rho_t)] \left[1 - 0,16 \min\left(5; \frac{L_v}{h}\right) \right] A_g \sqrt{f'_c}$$

$$V_W = \frac{A_{st}}{s} f_y (h - 2c)$$





Effetti strutturali della corrosione Il Taglio

119

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Sezione Intera:

Quadrato di lato: 300 mm

Copriferro: 30 mm

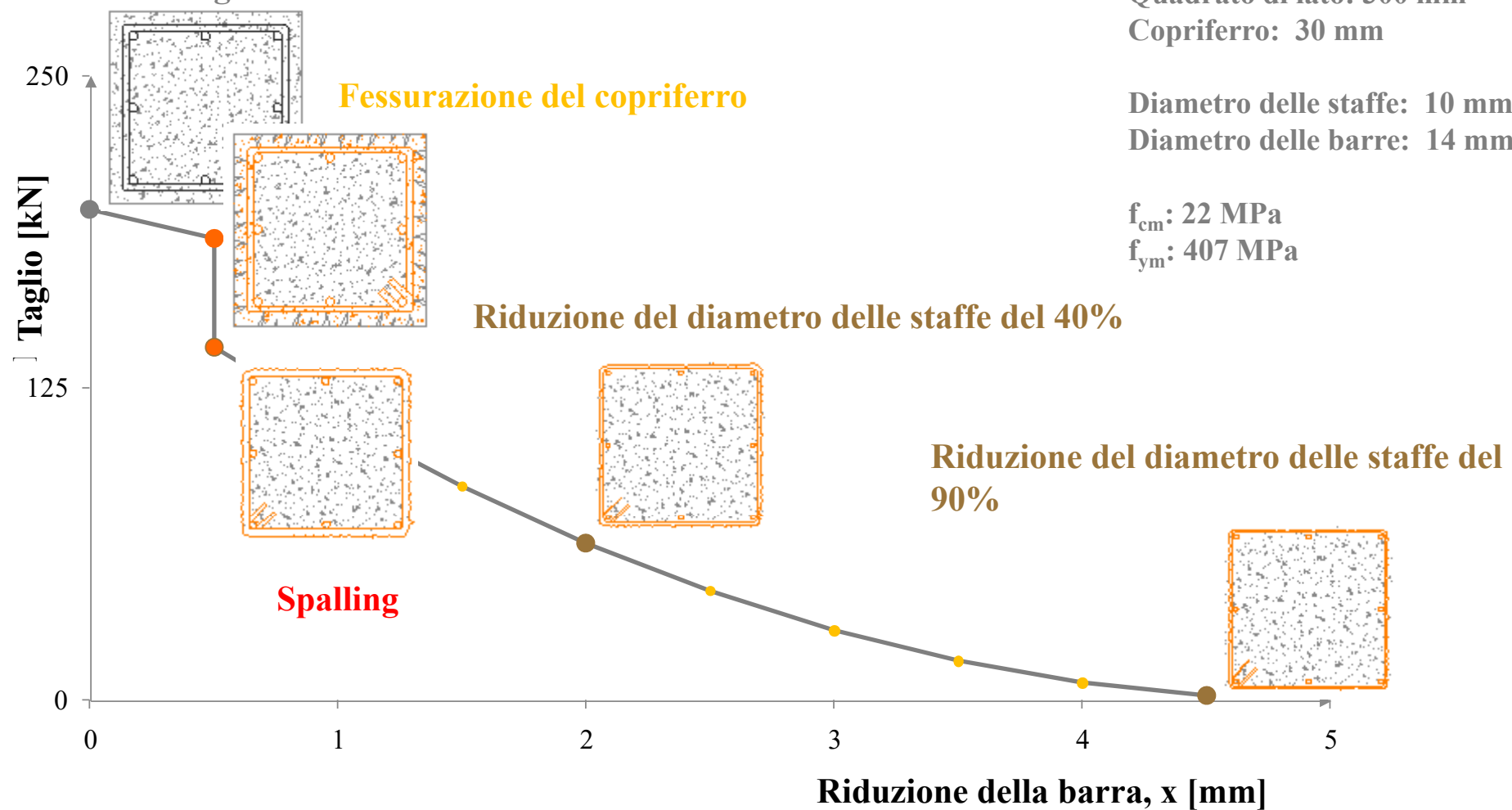
Diametro delle staffe: 10 mm

Diametro delle barre: 14 mm

f_{cm} : 22 MPa

f_{ym} : 407 MPa

Struttura integra





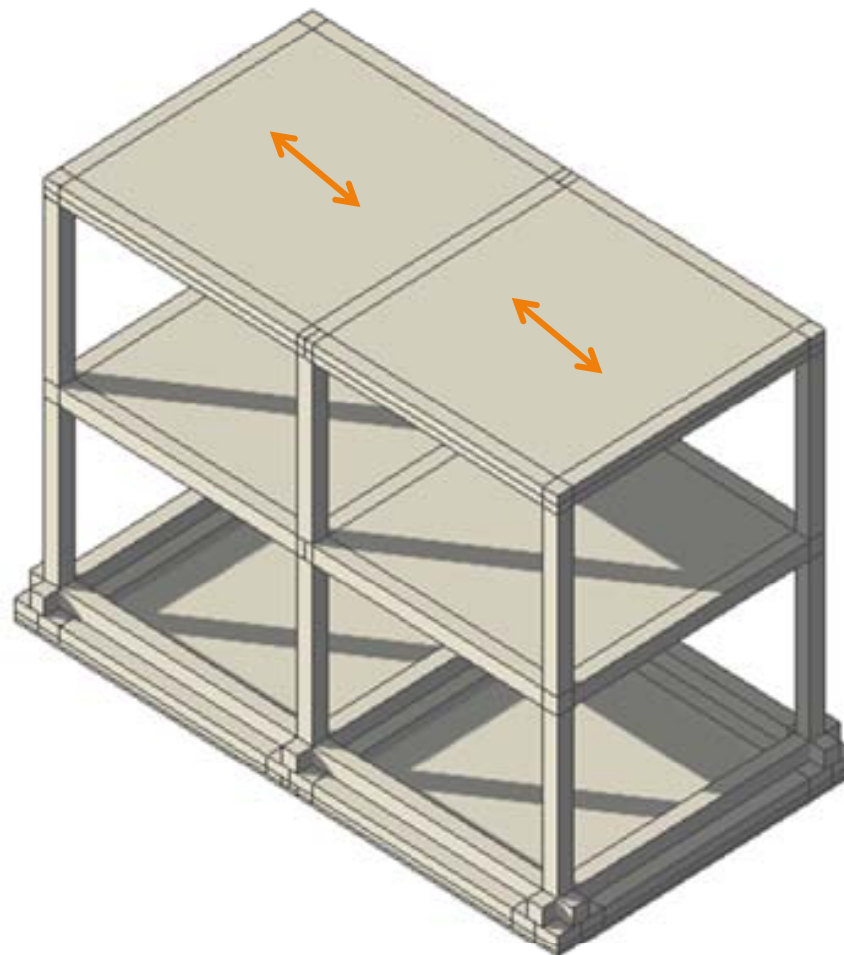
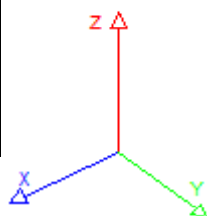
Struttura analizzata

120

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

n° di piani	2
n° di telai in dir. X	2
n° di telai in dir. Y	3
Altezza di piano [m]	3.2
Lunghezza [m]	10
Larghezza [m]	5

	MATERIALI	
	E_{cm} [MPa]	f_{cm} [MPa]
Calcestruzzo	31	22.6
Acciaio	210000	407



	Sezione [mm]	n° di barre	Diam. delle barre	Diam. delle staffe	passo [mm]	c_c
Pilastri	300 x 300	8	14	10	200	30
Travi	300 x 300	8	14	10	200	30

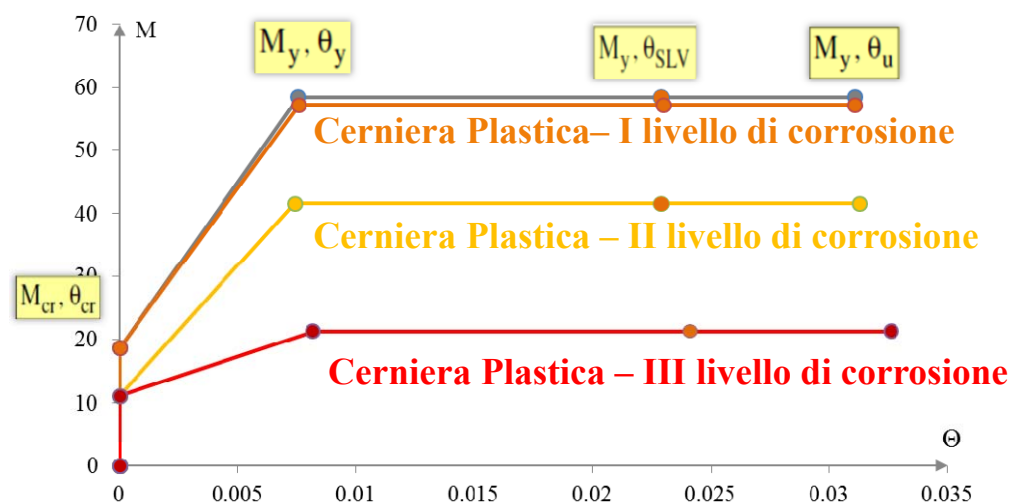
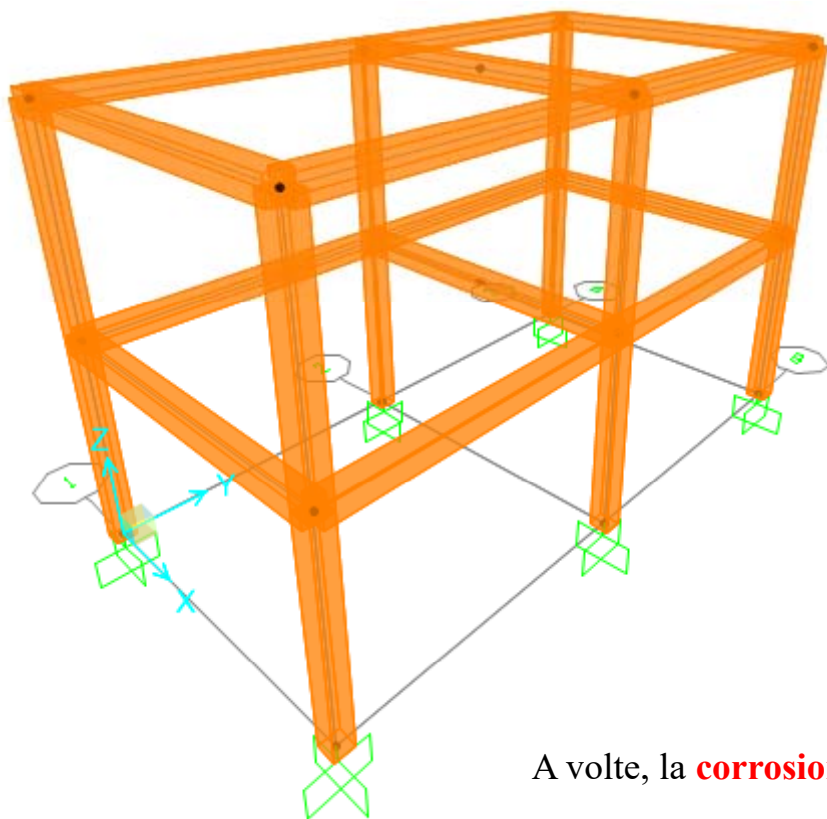


Livelli di corrosione considerati

121

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

	ϕ barre [mm]	ϕ staffe [mm]	Consumo di barre[μm]	Consumo di staffe [μm]	ϕ residuo barra [mm]	ϕ residuo staffa [mm]	Copriferro
I Livello	14	10	100	1072	13.7	8	Fessurato
II Livello	14	10	1000	1972	12	6	Spalled out
III Livello	14	10	3500	4472	7	1	Spalled out



A volte, la **corrosione** conduce a un comportamento **asimmetrico** delle cerniere plastiche



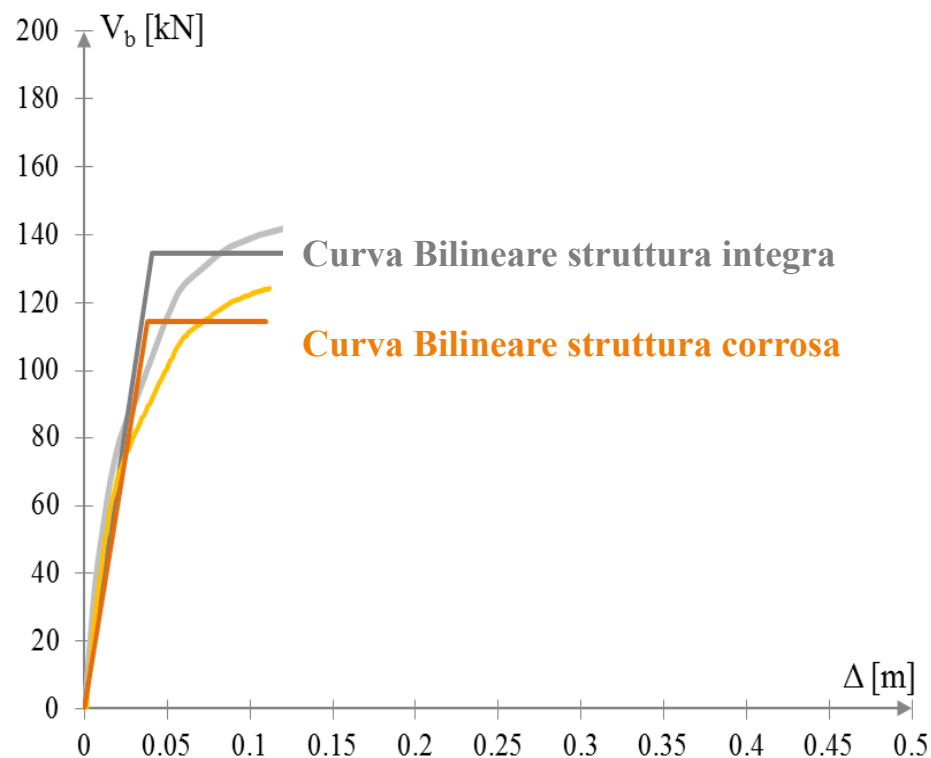
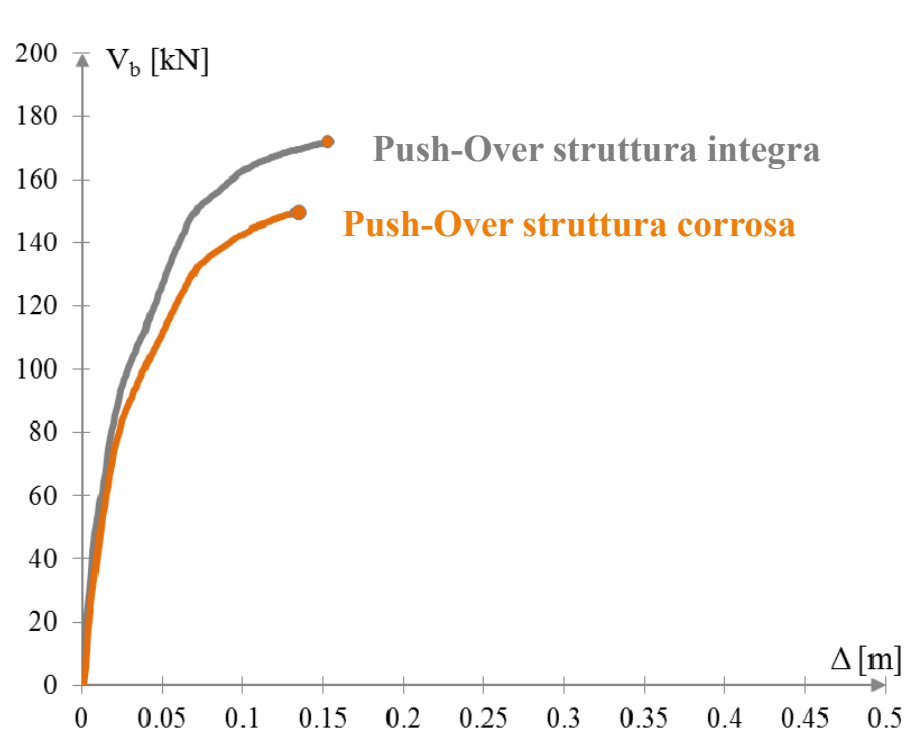
Analisi eseguite

122

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Le analisi di tipo Push-Over sono state eseguite:

- Per entrambe le direzioni principali ($\pm X, \pm Y$)
- Per 3 diversi livelli di corrosione
- Per 3 diverse configurazioni di corrosione





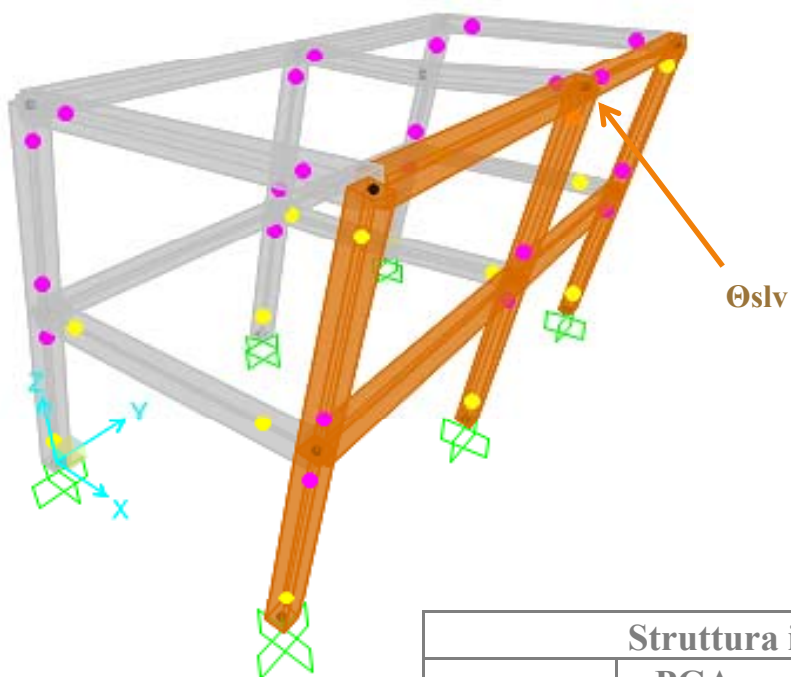
Analisi Push-Over Flessione

123

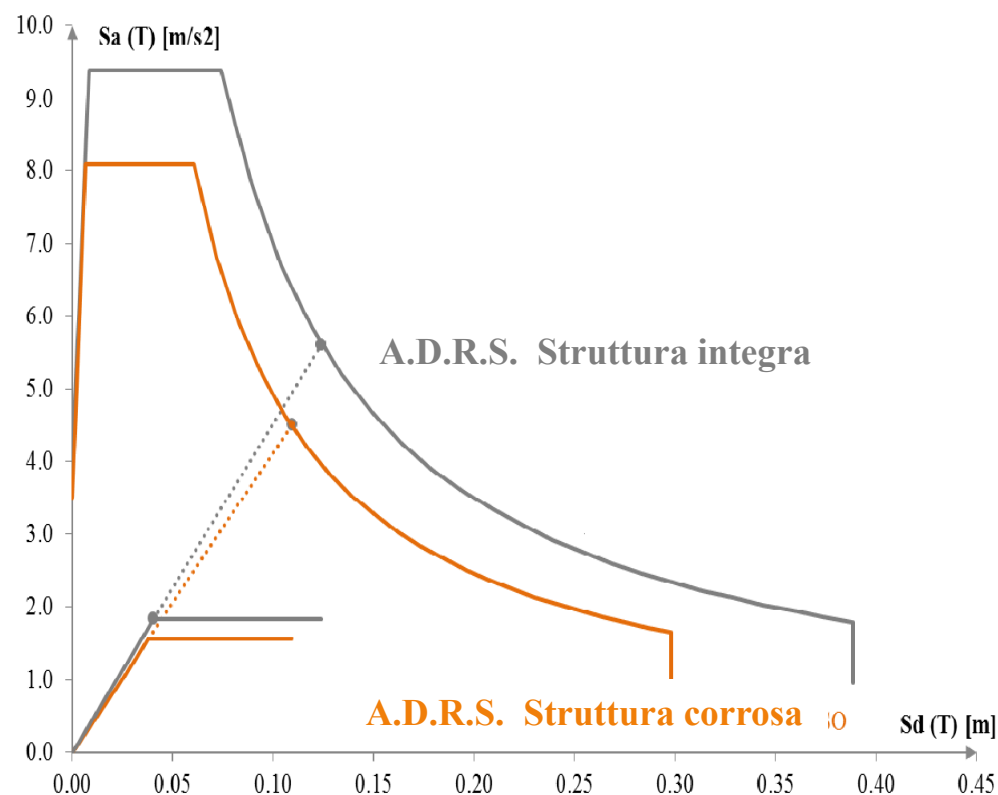
L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

I configurazione III livello	
Tempo di corrosione ($t_{inn.} + t_{prop.}$) $\equiv$ 65 anni	
Diametro delle barre corrose	7 mm
Diametro delle staffe corrose	1 mm
Copriferro	Spalled out

PUSH-OVER IN DIR. X+



Struttura integra		
μ_c	PGA cap. [m/s^2]	Tr [anni]
3.06	4.01	968



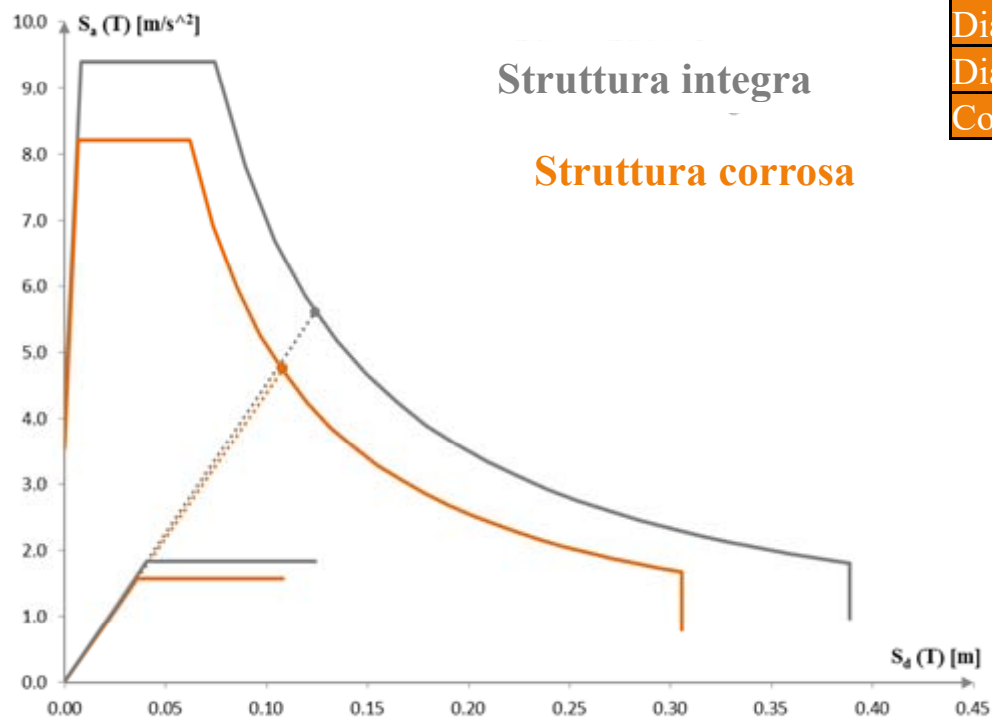
Struttura corrosa		
μ_c	PGA cap. [m/s^2]	Tr [anni]
2.87	3.49	588



Analisi Push-Over Flessione

124

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



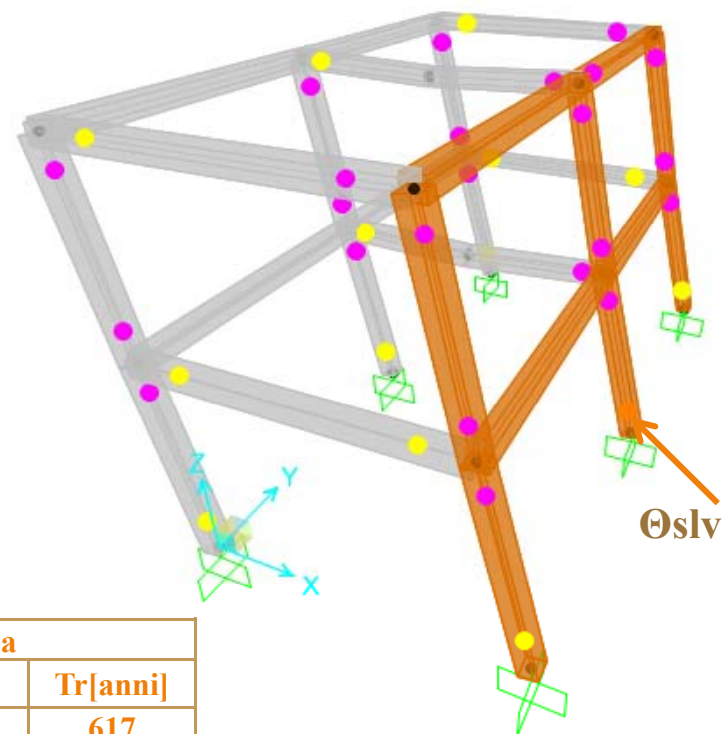
PUSH-OVER X+

Struttura corrosa		
μ_c	PGA cap. [m/s ²]	Tr [anni]
2.87	3.49	588

PUSH-OVER X-

Struttura corrosa		
μ_c	PGA cap. [m/s ²]	Tr [anni]
3.02	3.54	617

I Configurazione - III livello	
Tempo di corrosione ($t_{inn.} + t_{prop.}$) $\equiv$ 65 anni	
Diametro delle barre corrose	7 mm
Diametro delle staffe corrose	1 mm
Copriferro	Spalled out





Analisi Push-Over Taglio

125

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

II Configurazione - III livello

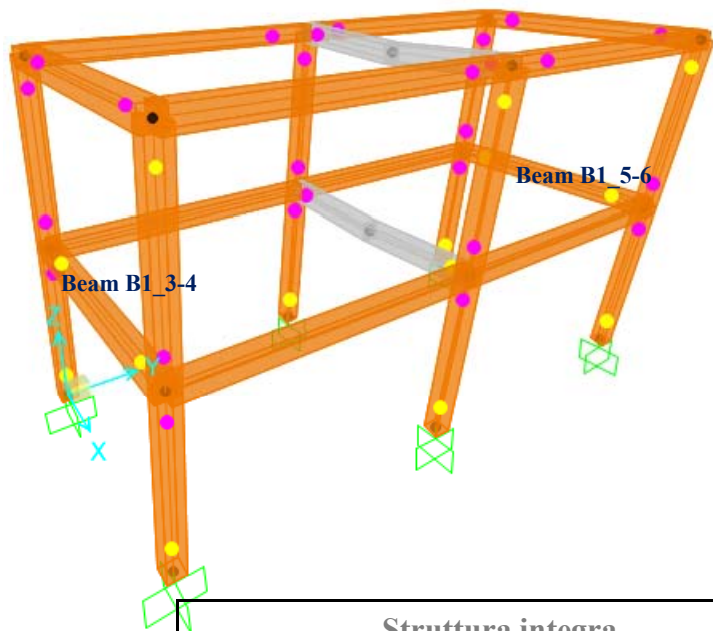
Tempo di corrosione ($t_{\text{inn.}} + t_{\text{prop.}}$) $\equiv$ 65 anni

Diametro delle barre corrose 7 mm

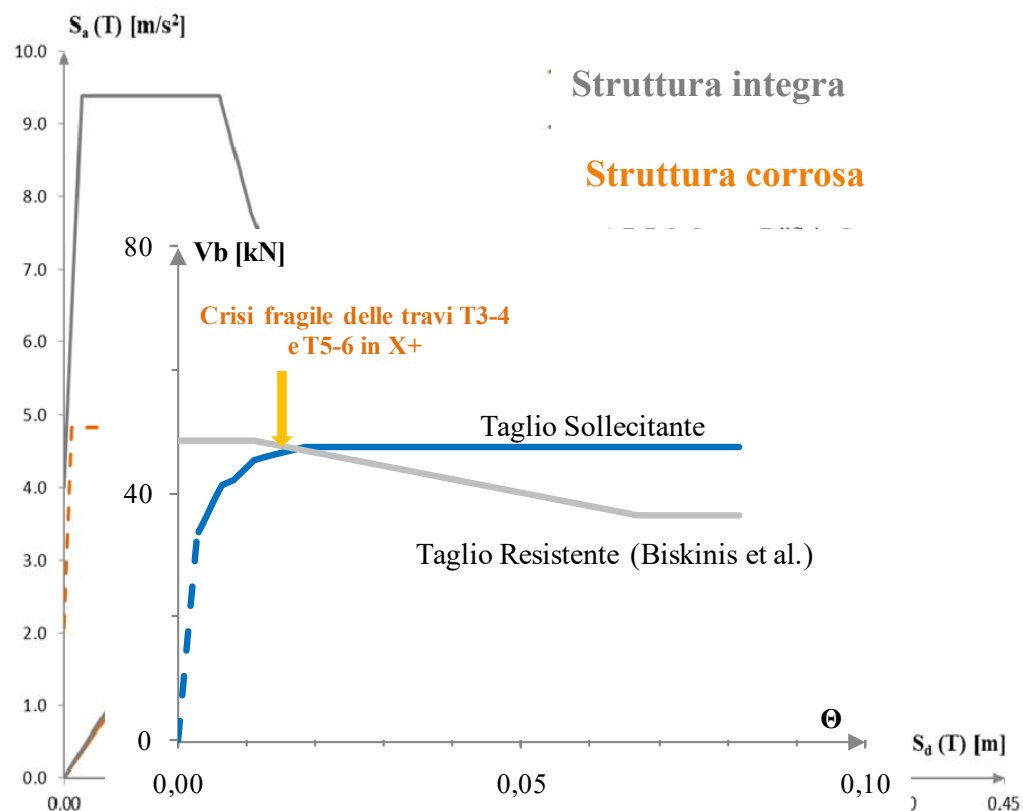
Diametro delle staffe corrose 1 mm

Copriferro Spalled out

PUSH-OVER IN DIR. X+



Struttura integra		
μ_c	PGA cap. [m/s ²]	Tr[anni]
3.06	4.01	968



Struttura corrosa		
μ_c	PGA cap. [m/s ²]	Tr[anni]
2.262	2.077	235

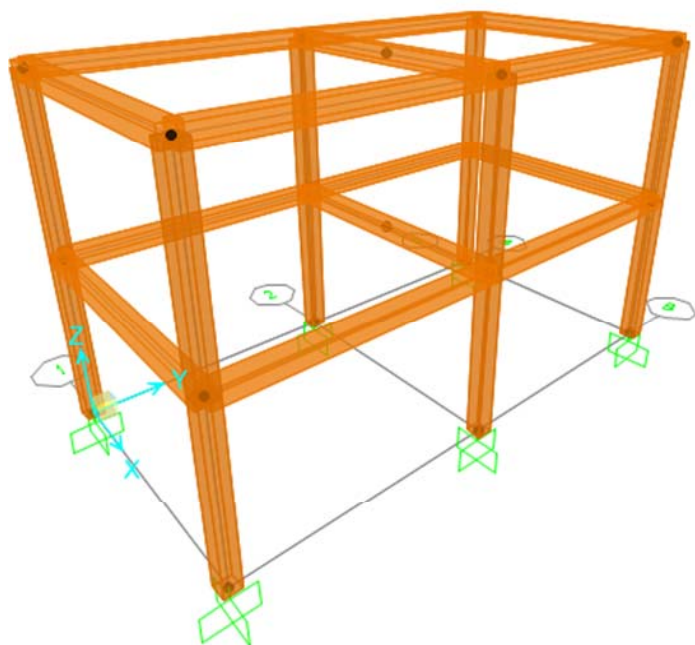


Analisi Push-Over Taglio

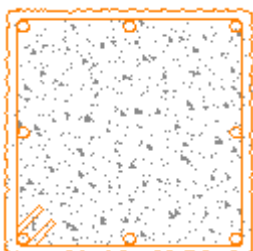
126

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

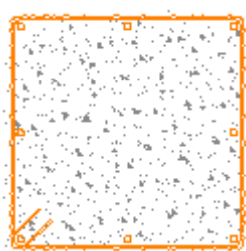
III Configurazione



II livello di Corrosione



III Livello di Corrosione



III Configurazione - II livello		III Configurazione - III livello	
Tempo di corrosione ($t_{inn.} + t_{prop.}$) $\equiv$ 40 anni		Tempo di corrosione ($t_{inn.} + t_{prop.}$) $\equiv$ 65 anni	
Diametro delle barre corrose	12 mm	Diametro delle barre corrose	7 mm
Diametro delle staffe corrose	6 mm	Diametro delle staffe corrose	1 mm
Copriferro	Spalled out	Copriferro	Spalled out

Frame	Verifiche a taglio delle travi per carichi gravitazionali	
	Verifica NTC (Vs/Vr)	Verifica Biskinis (Vs/Vr)
T1-1-2	0.2	0.3
T1-1-2	0.2	0.3
T1-1-7	0.2	0.3
T1-1-7	0.2	0.3
T1-2-3	0.2	0.3
T1-2-3	0.2	0.3
T1-3-4	0.7	1.1
T1-3-4	0.7	1.1
T1-4-5	1.3	2.1
T1-4-5	1.3	2.1
T1-5-6	0.7	1.1
T1-5-6	0.7	1.1
T1-7-8	0.2	0.3
T1-7-8	0.2	0.3
T2-1-2	0.2	0.3
T2-1-2	0.2	0.3
T2-1-7	0.2	0.3
T2-1-7	0.2	0.3
T2-2-3	0.2	0.3
T2-2-3	0.2	0.3
T2-3-4	0.7	1.1
T2-3-4	0.7	1.1
T2-4-5	1.3	2.1
T2-4-5	1.3	2.1
T2-5-6	0.7	1.1
T2-5-6	0.7	1.1
T2-7-8	0.2	0.3
T2-7-8	0.2	0.3

Frame	Verifiche a taglio delle travi per carichi gravitazionali	
	Verifica NTC (Vs/Vr)	Verifica Biskinis (Vs/Vr)
T1-1-2	0.8	1.1
T1-1-2	0.8	1.1
T1-1-7	0.8	1.1
T1-1-7	0.8	1.1
T1-2-3	0.8	1.1
T1-2-3	0.8	1.1
T1-3-4	2.6	3.6
T1-3-4	2.6	3.6
T1-4-5	5	7.1
T1-4-5	5	7.09
T1-5-6	2.6	3.6
T1-5-6	2.6	3.6
T1-7-8	0.8	1.1
T1-7-8	0.8	1.1
T2-1-2	0.8	1.1
T2-1-2	0.8	1.1
T2-1-7	0.8	1.1
T2-1-7	0.8	1.1
T2-2-3	0.8	1.1
T2-2-3	0.8	1.1
T2-3-4	2.6	3.6
T2-3-4	2.6	3.6
T2-4-5	5	7.1
T2-4-5	5	7.06
T2-5-6	2.6	3.6
T2-5-6	2.6	3.6
T2-7-8	0.8	1.1
T2-7-8	0.8	1.1

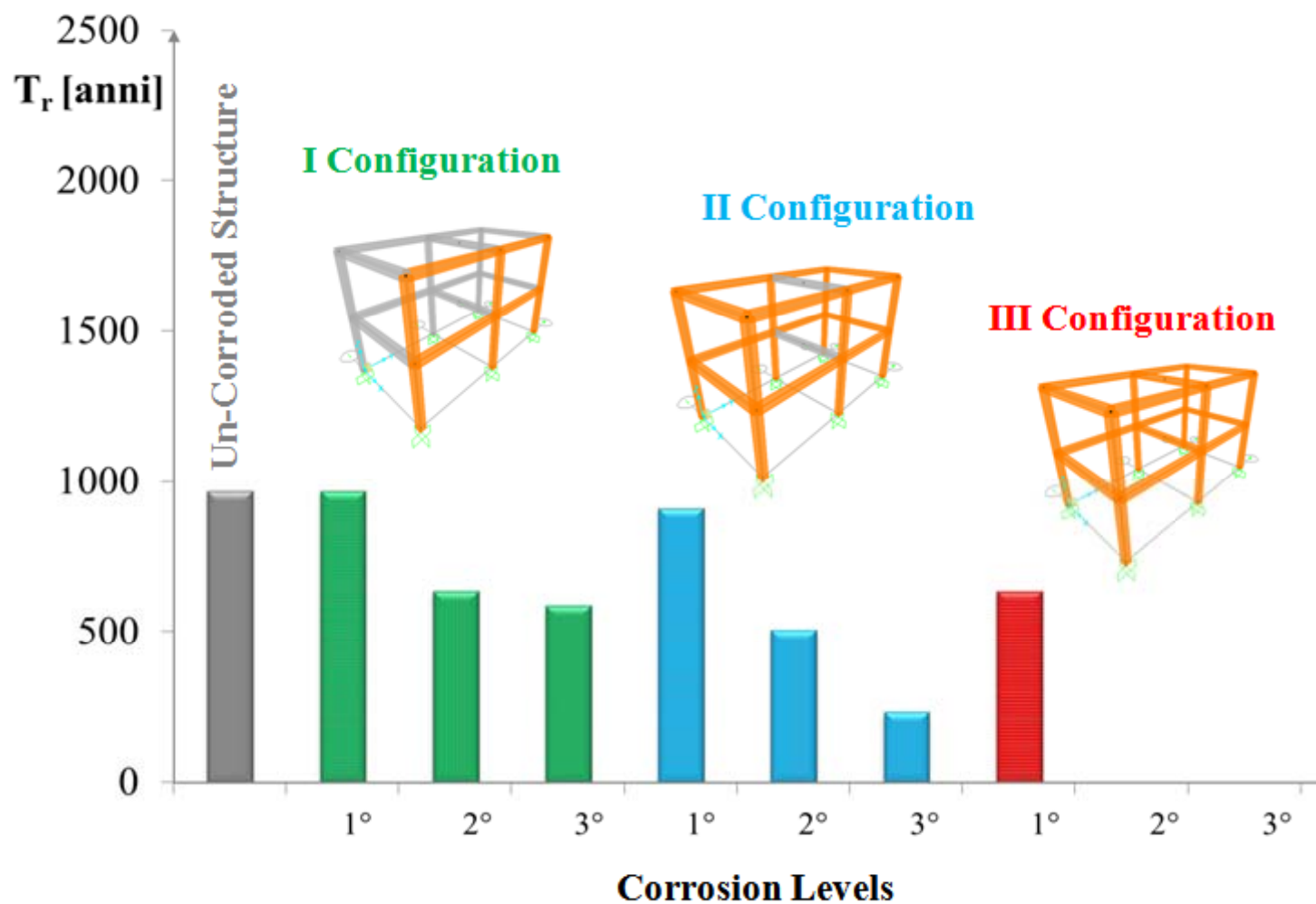


Simulazione del comportamento sismico di edificio

Conclusioni

127

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità





Simulazione del comportamento sismico di edificio

Conclusioni

128

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

- ✓ La corrosione delle barre di armatura in calcestruzzo rappresenta la ragione principale della **perdita di capacità portante delle strutture** (riduzione della sezione delle barre, riduzione di aderenza, fessurazione del calcestruzzo) che conducono alla riduzione della sicurezza sismica dei manufatti.
- ✓ Le analisi push-over, presentate per un semplice edificio, sottolineano **la riduzione della capacità sismica** causata del degrado, che spesso conduce a un **cambio di modalità di crisi dell'edificio**, passando da una modalità di tipo duttile, a una modalità di tipo fragile (a taglio).
- ✓ Tsono state analizzate tre differenti configurazioni di corrosione e tre diversi livelli di penetrazione della stessa:
 - Primo livello di corrosione: copriferro fessurato;
 - Secondo livello: il copriferro è stato espulso e la sezione di barra si è ridotta del 30%;
 - Terzo livello: il copriferro è stato espulso, le barre hanno subito una riduzione di sezione del 50% e le staffe una riduzione di sezione del 90%.



Simulazione del comportamento sismico di edificio

Conclusioni

129

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

✓ Il risultato più severo è stato ottenuto per la terza configurazione al terzo livello di corrosione. Infatti, in questo caso, **tutti gli elementi strutturali** presentano **una degradazione avanzata** lungo tutto il perimetro del fabbricato. La riduzione della sezione delle staffe del 90%, conduce a un **collasso fragile della struttura**.

✓ La **seconda configurazione**, al **terzo livello di corrosione**, rappresenta un caso significativo; infatti, si ha una **crisi prematura duttile delle travi perimetrali**.



Conclusioni

130

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

- **La corrosione** non è solo un problema di estetica e funzionalità delle strutture in calcestruzzo armato, ma soprattutto **un problema strutturale e di sicurezza**;
- L'utilizzo di **copriferri con spessori maggiori** estende in modo significativo il periodo di innesco del fenomeno di corrosione **garantendo, in alcuni casi, alla struttura** esposta ad ambienti aggressivi, **il superamento della vita utile**;
- Si è dimostrato che per **strutture la cui vita supera 45 anni**, la **perdita di capacità flessionale è di circa il 50%** se edificate in classe XC4 e copriferro 15 mm;
- Anche le strutture edificate in classe di esposizione ambientale XS1 con copriferro pari a 35 mm, hanno ormai **subìto un degrado tale da generare una perdita di capacità flessionale del 50% circa**;
- **L'aderenza delle barre nervate col calcestruzzo è fortemente influenzata dal processo corrosivo** in quanto lo spessore dell'ossido annulla la resistenza meccanica della nervatura della barra causandone lo **sfilamento**;
- Gli edifici in calcestruzzo armato realizzati prima degli anni '70, **necessitano di una totale revisione e ristrutturazione con interventi di recupero mirati al ripristino della capacità strutturale degli elementi garantendo sicurezza e stabilità.**



PERCHÉ?

131

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



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.



PERCHÉ?

132

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



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), ma 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?



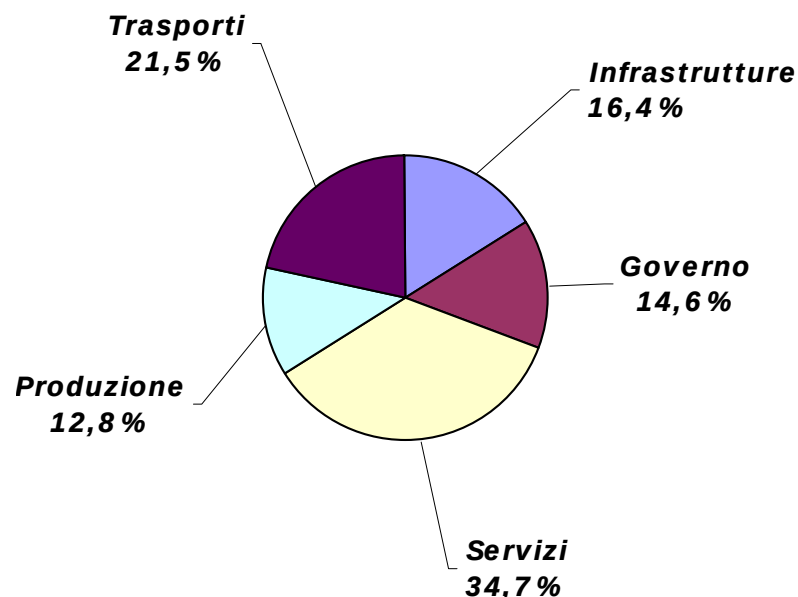
Costi della Corrosione

133

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

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...

134

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

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.”

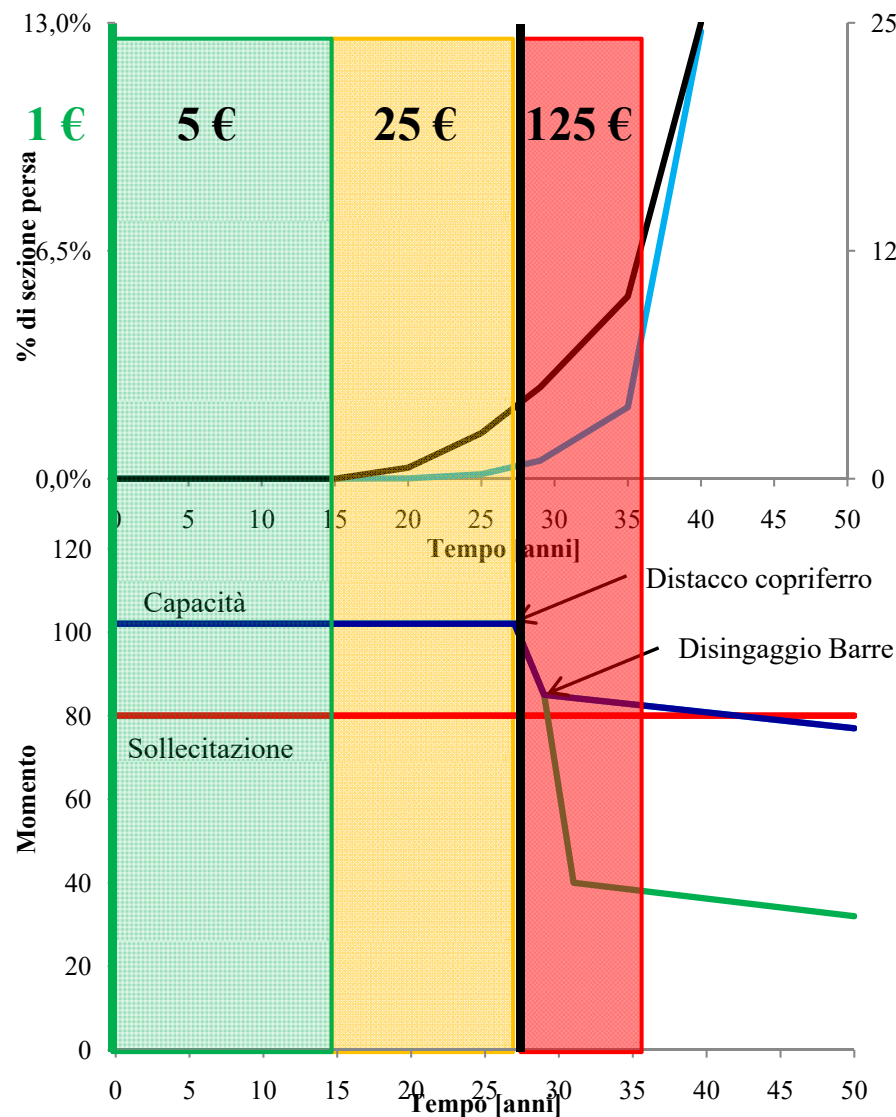
De Sitter



Facciamo due conti...

135

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



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.



Facciamo due conti...

136

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

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).





Aspetti economici

137

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Danni

- Danni diretti: riguardano beni materiali e possono essere monetizzati
- Danni indiretti: danni a beni materiali che permeano la struttura sociale, civile ed industriale tanto da non poter essere isolati e monetizzati
- Danni non riparabili: colpiscono il patrimonio culturale e non sono riparabili



Aspetti Economici: Danni diretti

138

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

- ❑ Ricostruzione di strutture civili ed industriali
- ❑ Manutenzione e ripristino
- ❑ Eccesso nei coefficienti di sicurezza e sovradimensionamento delle strutture
- ❑ Ricerche di tecnologie che tengano conto dei fenomeni di corrosione
- ❑ Oneri di progetto
- ❑ Oneri assicurativi per i rischi indotti dalla corrosione
- ❑ Danni estetici e paesaggistici
- ❑ Oneri stipendiali per il personale addetto a manutenzione e controlli
- ❑ Inquinamento ambientale



Aspetti Economici: Danni indiretti

- ❑ Perdita di produzione per impianti fermi a causa dei fenomeni di corrosione
- ❑ Danni di immagine
- ❑ Rinuncia a condizioni operative spinte con limitazioni delle rese, dei rendimenti e della produttività
- ❑ Riduzione della vita utile degli impianti
- ❑ Decadimento progressivo delle condizioni di sicurezza
- ❑ Problematiche di strutture in cemento armato connesse ad eventi non prevedibili



La corrosione

Aspetti Economici: Danni non riparabili

140

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità



Degradazione della torcia della Statua della Libertà

(1984)





La corrosione

Costi

141

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

- Italia 20.000.000.000,00 €/anno
- USA 250.000.000.000,00 \$/anno



La corrosione

Costi

142

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Annual Costs of Corrosion in the USA.

- ✗ Replacements, lost production and high costs of maintenance are the result of uncontrolled corrosion.
- ✗ Early failures produce unnecessary consumption of natural resources that waste fuels and ores.
- ✗ Corrosion failures are hazardous, causing deaths and injuries.
- ✗ Corrosion deterioration increases taxes through the early failure of expensive bridges, roads, loss of competitive markets for exports, and environmental impacts.



Corrosion costs each U.S. citizen over \$1,000 annually!



Italia 1,50 € al giorno per abitante

USA 3,00 \$ al giorno per abitante





Una curiosità...

143

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

I poeti e gli artisti parlano della corrosione dei metalli e del degrado delle cose pensando in effetti alla vita dell'uomo e alla sua precarietà. Ad esempio **Shakespeare** nel *King Lear* accosta, nel momento culminante della tragedia, la rovina del re a quella della natura e del mondo: “*O ruin'd piece of nature! This great world shall so wear out to nought!*”; l'**evangelista Matteo**, riportando il discorso della montagna, ammonisce: “*Non accumulatevi tesori sulla terra dove il tarlo e la ruggine logorano*”; il **cantante rock Neil Young** in uno dei suoi più importanti dischi *Rust never sleeps* (1979), canta l'angoscia per la vita che si consuma - perché, appunto, “*la ruggine non dorme mai*” -, e il sogno dei romantici di tutti i tempi di viverla intensamente a costo di bruciarla: “*It is better to burn out than it is to rust*”. I **corrosionisti**, che ben conoscono la tendenza dei metalli a ritornare alla polvere dei loro ossidi e dei loro sali da cui la metallurgia li aveva estratti, e ogni giorno sperimentano come questo ritorno effettivamente si produca per il venir meno, sotto i colpi del tempo che passa, di condizioni di passività, di barriere protettive o di inibizioni corrosionistiche, sono i primi a capire perché tanti poeti, artisti o santi possano vedere nella vita dei metalli e nel loro ritorno alle condizioni iniziali di combinazione con sostanze ambientali, una metafora della propria vita e del proprio destino. Ciononostante non guardano con timore a questo fenomeno. Per molti di loro la corrosione è un'occasione per scoprire, pensare, operare, cioè per realizzarsi scientificamente o professionalmente. Per qualcuno è addirittura uno strumento per fantasticare e giocare, cioè per vivere.

Per gli addetti ai lavori la corrosione è una medicina. Altro che malattia!



**Corrosione nelle strutture in
calcestruzzo armato**

Suggerimento

144

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Follow your passion and you will not

CORRODE

(unknown source)



Processo di corrosione dell'acciaio

145

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Testi consigliati

Sam Kean, *Il cucchiaino scomparso*, Adelphi Edizioni



A. Bossio; M. Montuori; F. Bellucci; G.P. Lignola; A. Prota; G. Manfredi; E. Cosenza (2014). *Corrosione e diagnostica delle strutture in calcestruzzo armato Criteri di intervento e ripristino conservativo*. UTET WOLTERS KLUWER ITALIA, 170 pp. ISBN:9788867501601





146

Grazie per la Cortese
Attenzione!!!



Fenolftaleina Aderenza
Perdita di Raggio Momento Flettente
Prevenzione Sicurezza Ossigeno Durabilità
Costo Rapporto Acqua Cemento
Cloruri
Sezione Protezione Pitting Penetrazione PIL Carbonatazione
Corrosione Controllo
Capacità Fessura Passività Degrado Armature
Strutturale NTC2008 Prove NDT
Tempo EcoSostenibile Taglio
Mondiale Materiali Manutenzione
Strutture Esistenti Copriferro Monitoraggio
Ripristino Indagine Vita Utile Agenti Aggressivi
Ossidi Fessurazione
Classi di Esposizione Ambientale

antonio.bossio@unina.it

Dept. of Structure for Engineering and Architecture (DI.ST.)
&

Dept. of Chemical Engineering, Materials and Industrial Production (D.I.C.Ma.P.I.)
University of Naples "Federico II"



La Prevenzione

147

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

La **prevenzione** del degrado delle strutture in calcestruzzo armato si sviluppa nelle seguenti tre fasi:

1. **Progettazione:** analisi del contesto ambientale, scelta dei materiali, concezione e calcolo della struttura, disegno dei particolari costruttivi;
2. **Esecuzione:** preparazione, messa in opera, controllo del copriferro, controlli di accettazione, compattazione e stagionatura del calcestruzzo;
3. **Manutenzione:** interventi morati e programmati nel corso della vita di servizio dell'opera in relazione all'ambiente nel quale opera (previa corretta diagnostica).

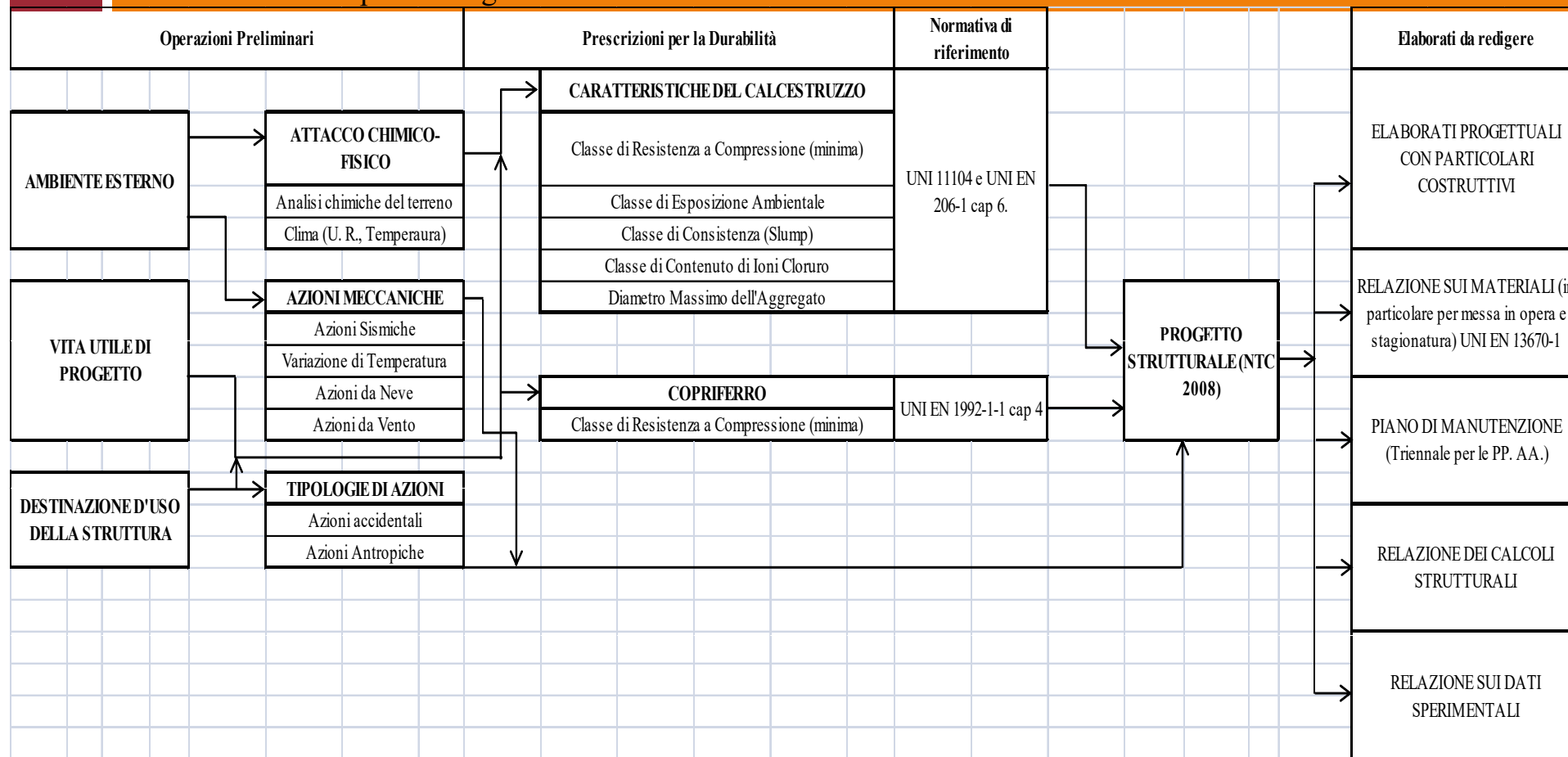


Costi della Corrosione Metodi di Protezione e Prevenzione

FASE PRELIMINARE

148

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità





PROPORZIONI OTTIMALI NELLA PREPARAZIONE DEI MATERIALI - ESEMPIO

149

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità – Affidabilità

Tabella 1 - Tempo estrapolato per penetrare un
copriferro di 40 mm in un calcestruzzo immerso
in acqua di mare

a/c	TEMPO
0.60	7 mesi
0.45	5 anni
0.30	65 anni

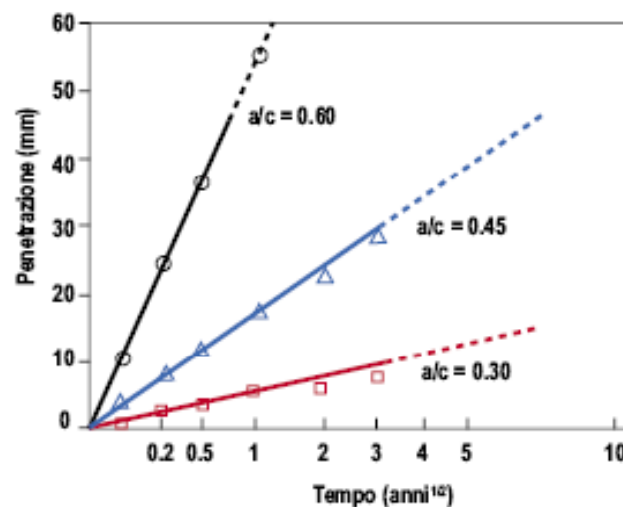


Fig. 3 - Influenza del rapporto a/c sulla penetrazione dei
cloruri attraverso calcestruzzi stagionati per 28 giorni prima
di essere immersi in acqua di mare.



IL COPRIFERRO

150

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Lo spessore di copriferro è certamente un parametro fondamentale.

La progettazione di elementi strutturali con spessori di **copriferro** adeguato, in relazione alle direttive normative, comporta una serie di effetti benefici in termini di **durabilità** della struttura.

Una delle funzioni principali del copriferro è di offrire protezione alle armature sottostanti interponendosi come barriera all'ambiente esterno.

Il suo **spessore netto** va calcolato dalla superficie esterna delle staffe fino alla faccia esterna dell'elemento strutturale.

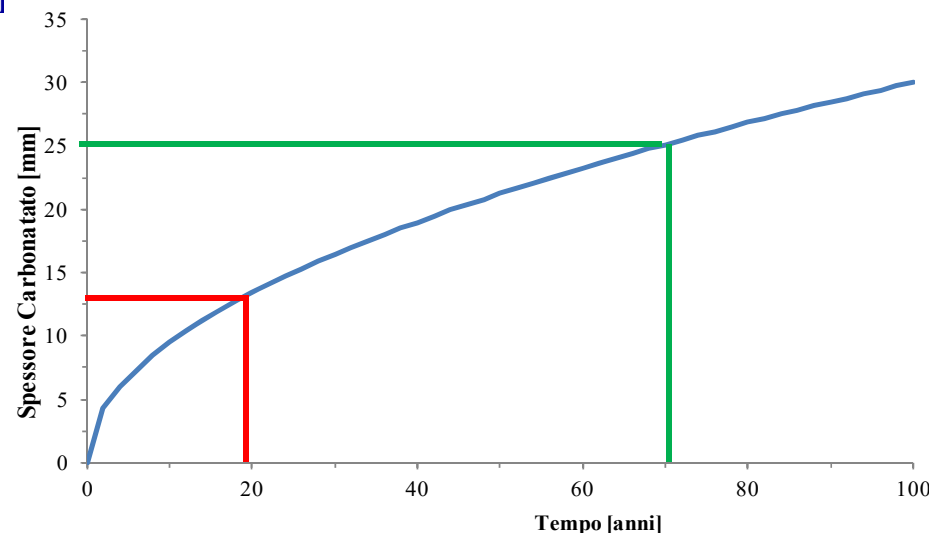
Un adeguato spessore di **copriferro**, garantisce una **minore permeabilità** del calcestruzzo agli agenti aggressivi allungando, quindi, il **tempo** necessario affinché essi penetrino fino a raggiungere la superficie delle armature.



IL COPRIFERRO

151 L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

La legge di penetrazione degli agenti aggressivi varia in relazione alla tipologia di attacco corrosivo, per cui, **spessori maggiori del copriferro influenzano in maniera differente il tempo di penetrazione**



In figura si nota come dimezzando il valore del copriferro (da 25 a 12,5 mm, secondo gli esempi riportati) il tempo di innesco diminuisce in maniera esponenziale, passando da 70 a 20 anni (meno della terza parte).



IL COPRIFERRO

152

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Prospetto 4.2 - Ricoprimenti minimi delle armature richiesti per calcestruzzi di massa volumica normale¹⁾

		Classe di esposizione definita nel prospetto 4.1								
		1	2a	2b	3	4a	4b	5a	5b	5c ^{3) 4)}
copriferro minimo ²⁾ [mm]	Barre di armatura	15	20	25	40 (I:35)	40 (I:35)	40 (I:35)	25	30	40
	Acciaio da precompresso	25 (I:20)	30	35	50 (I:40)	50 (I:40)	50 (I:40)	35	40 (I:35)	50 (I:45)

Al fine di soddisfare le disposizioni di 4.1.3.3 P(3), questi valori minimi di ricoprimento devono di regola essere associati alle particolari proprietà del calcestruzzo, descritte nel prospetto 3 della ENV 206.

Per elementi piastra, il copriferro può essere ridotto di 5 mm per le classi di esposizione 2-5.

Una riduzione di 5 mm può anche essere applicata per calcestruzzi di classe C40/50 o superiore associati rispettivamente a classi di esposizione 2a-5b per calcestruzzo armato ordinario e 1-5b per calcestruzzo armato precompresso. Comunque il copriferro minimo non sarà mai inferiore a quello previsto per classe di esposizione 1 del prospetto 4.2.

La classe di esposizione 5c implica la messa in opera di una barriera di protezione al fine di evitare ogni contatto diretto con l'elemento aggressivo.



IL COPRIFERRO

153

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

Il copriferro nominale di progetto, **da indicare obbligatoriamente sui grafici di progetto**, è dato da:

$$c_{\text{nom}} = c_{\text{min}} + \Delta c_{\text{dev}} \quad \text{dove:}$$

c_{nom} = valore nominale di progetto

c_{min} = valore minimo del copriferro

Δc_{dev} = la tolleranza di esecuzione relativa al copriferro

Il valore della tolleranza di esecuzione Δc_{dev} è assunto di norma pari a 10 mm, ma se in cantiere si prevedono controlli di qualità che comportano la misura dei copriferri, può assumersi $\Delta c_{\text{dev}} = 5$ mm. Nel caso si prevedono particolari controlli di qualità e la possibilità di poter scartare gli elementi strutturali con copriferro non conforme (è il caso in cui si usano elementi prefabbricati), può assumersi $\Delta c_{\text{dev}} = 0$.

Il **valore minimo del copriferro** è dato da:

$$c_{\text{min}} = \text{MAX} (c_{\text{min,b}}; c_{\text{min,dur}}; 10 \text{ mm}) \quad \text{dove:}$$

$c_{\text{min,b}}$ = copriferro minimo necessario per l'aderenza delle armature

$c_{\text{min,dur}}$ = copriferro minimo correlato alle condizioni ambientali (**durabilità**).

Il valore di $c_{\text{min,b}}$ è da assumersi pari al diametro della barra. Se la dimensione dell'inerte è più grande di 32 mm, il valore di $c_{\text{min,b}}$ deve essere maggiorato di 5 mm.



IL COPRIFERRO

154

L'intervento di recupero. Diagnosi – Sostenibilità - Affidabilità

