

Giornata di Aggiornamento su

“Degradazione e Consolidamento delle Strutture in Cemento Armato”

Firenze, 30 novembre 2007.



PROGETTARE LA DURABILITA' DELLE STRUTTURE IN CA E CAP

prof. ing. Sergio Tattoni

Università degli Studi di Cagliari

Facoltà di Ingegneria - Dipartimento di ingegneria strutturale

Quanto può durare una struttura in c.a.?

Nei vecchi testi di costruzioni in c.a si leggeva che

“... il calcestruzzo protegge l'acciaio dalla corrosione ...”



... ma sarà poi vero?

Cosa si intende per durabilità?

Requisito prestazionale

La durabilità, definita come conservazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali e delle strutture, è una proprietà essenziale affinché i livelli di sicurezza vengano garantiti durante tutta la vita utile di progetto dell'opera. La durabilità è funzione dell'ambiente in cui la struttura vive e del numero di cicli di carico cui la struttura potrà essere sottoposta. La durabilità si ottiene utilizzando materiali di ridotto degrado ovvero assegnando dimensioni strutturali maggiorate necessarie a compensare il deterioramento prevedibile dei materiali durante la vita utile di progetto, oppure mediante procedure di manutenzione programmata.

Dal DM 14/09/2005 Norme Tecniche per le Costruzioni

Vita utile.

Requisito prestazionale

La **vita utile di progetto** è il periodo durante il quale si assume che la struttura sarà utilizzata per i suoi scopi previsti, con manutenzione anticipata, ma senza che risultino necessari sostanziali interventi di riparazione (UNI EN 1991-1).

Quantificazione della vita utile

Requisito prestazionale

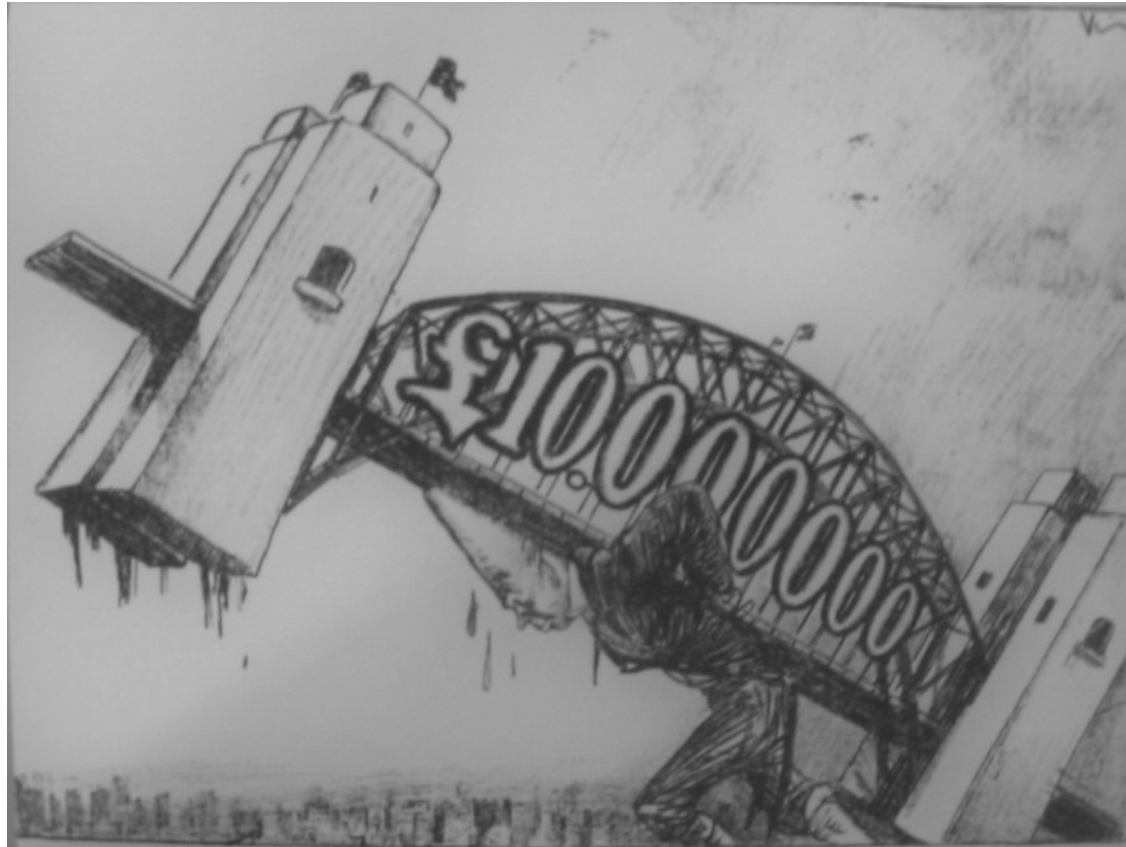
Tab. 2.5.1 – Vita utile di progetto per diverse tipologie di struttura

VITA UTILE DI PROGETTO (anni)	TIPOLOGIA DI STRUTTURA
10	Strutture provvisorie – Strutture in fase costruttiva
≥10	Componenti strutturali sostituibili (giunti, appoggi, ecc.)
50	Strutture di Classe 1
100	Strutture di Classe 2

- *Classe 1*: vita utile 50 anni, periodo di ritorno da considerare per i fenomeni naturali coinvolti 500 anni. Riguarda le costruzioni il cui uso prevede normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose, reti viarie e ferroviarie la cui interruzione non provoca situazioni di emergenza.
- *Classe 2*: vita utile 100 anni, periodo di ritorno da considerare per i fenomeni naturali coinvolti 1000 anni. Riguarda le costruzioni il cui uso prevede affollamenti significativi, industrie con attività pericolose per l'ambiente, reti viarie e ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza e costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, sociali essenziali.

Oneri finanziari legati alla durabilità

L'onere finanziario di una costruzione va ben oltre il suo costo di costruzione...



...ma è destinato ad aumentare nel tempo per le necessità di **manutenzioni ordinarie e straordinarie.**

Investimento totale

$$E(N) := S + \sum_{i=1}^N \frac{V_i}{(1+r)^i} + \sum_{i=1}^N \frac{p_i \cdot D_i}{(1+r)^i}$$

E = investimento totale

S = investimento diretto (costo dell'opera)

V_i = costo di manutenzione ordinaria (€/anno)

r = tasso reale di interesse

p_i = probabilità di danneggiamento per anno

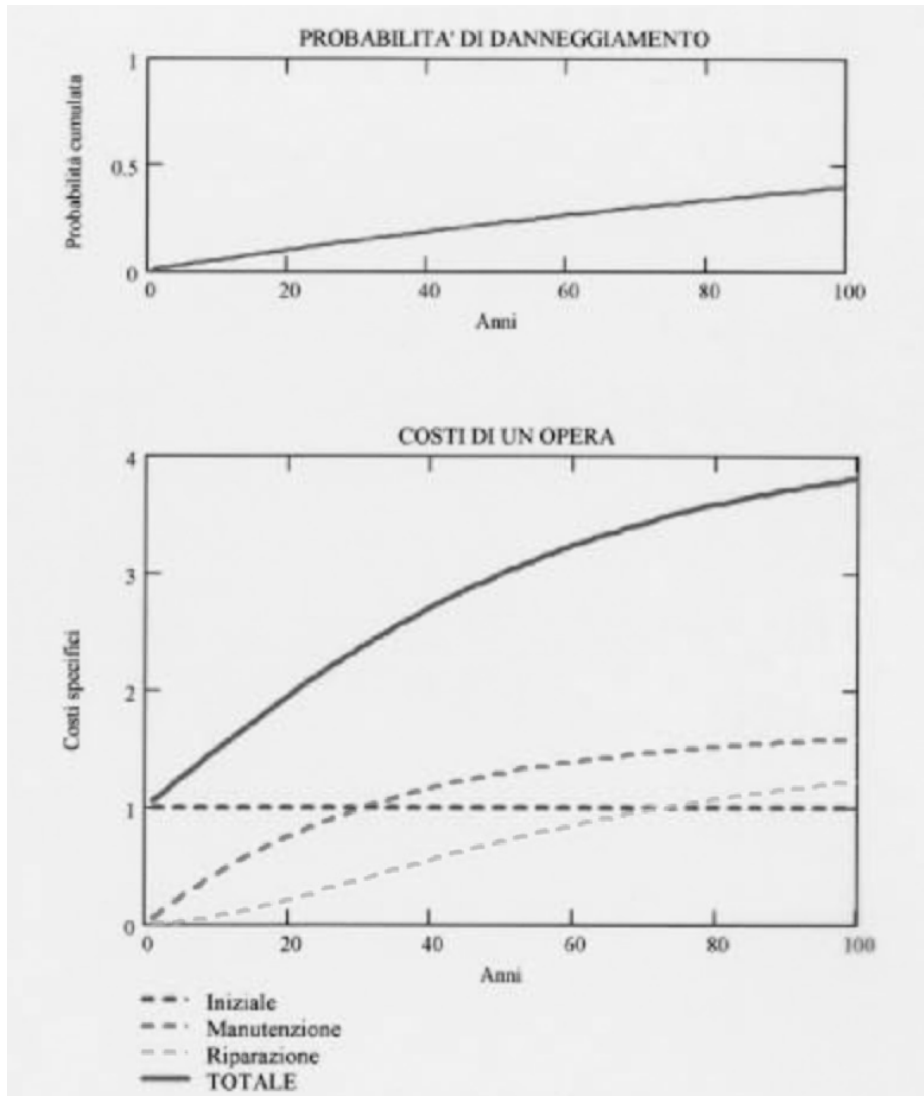
D_i = costo di riparazione (€/anno)

N = vita utile dell'opera (per i ponti 100 anni)

L'investimento per una struttura non è limitato al suo costo di costruzione, ma deve tenere conto della sua manutenzione e del costo delle riparazioni.

Struttura durevole

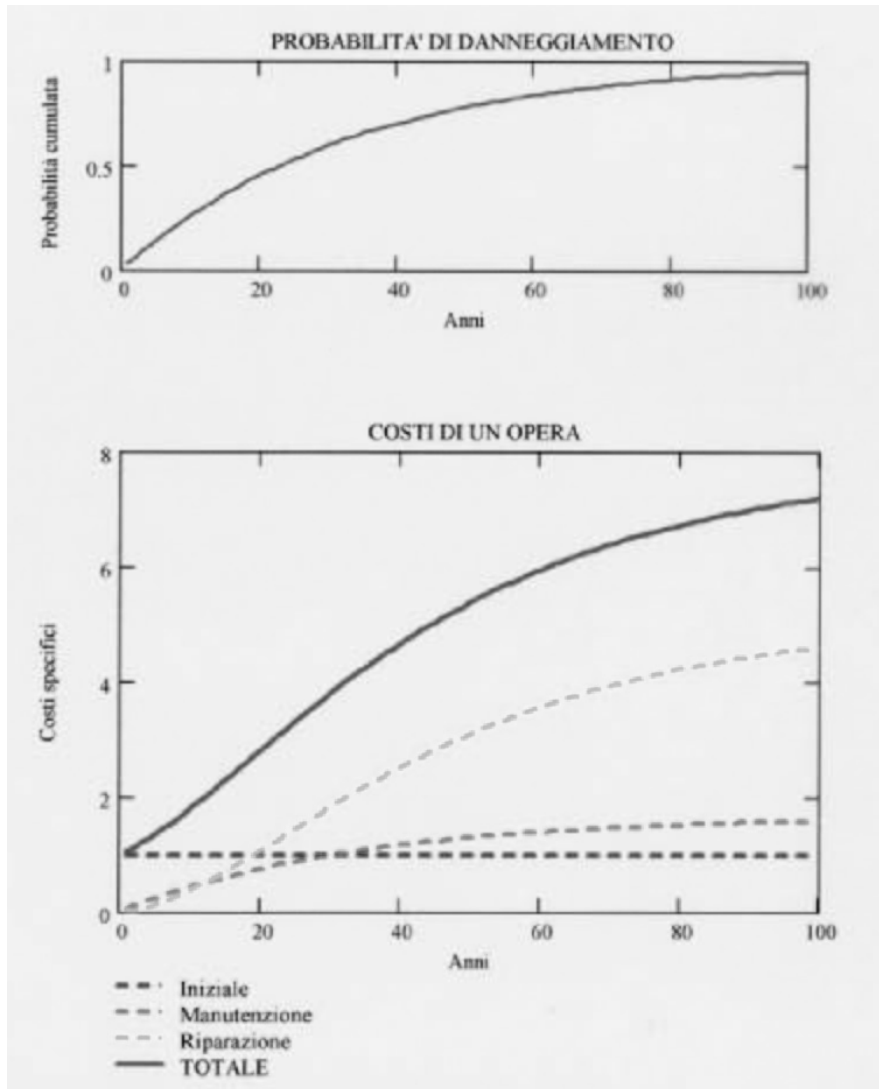
Aspetti economici



Caso di una struttura durevole.
La probabilità di danneggiamento e quindi di una manutenzione straordinaria, è modesto.

Struttura poco durevole

Aspetti economici

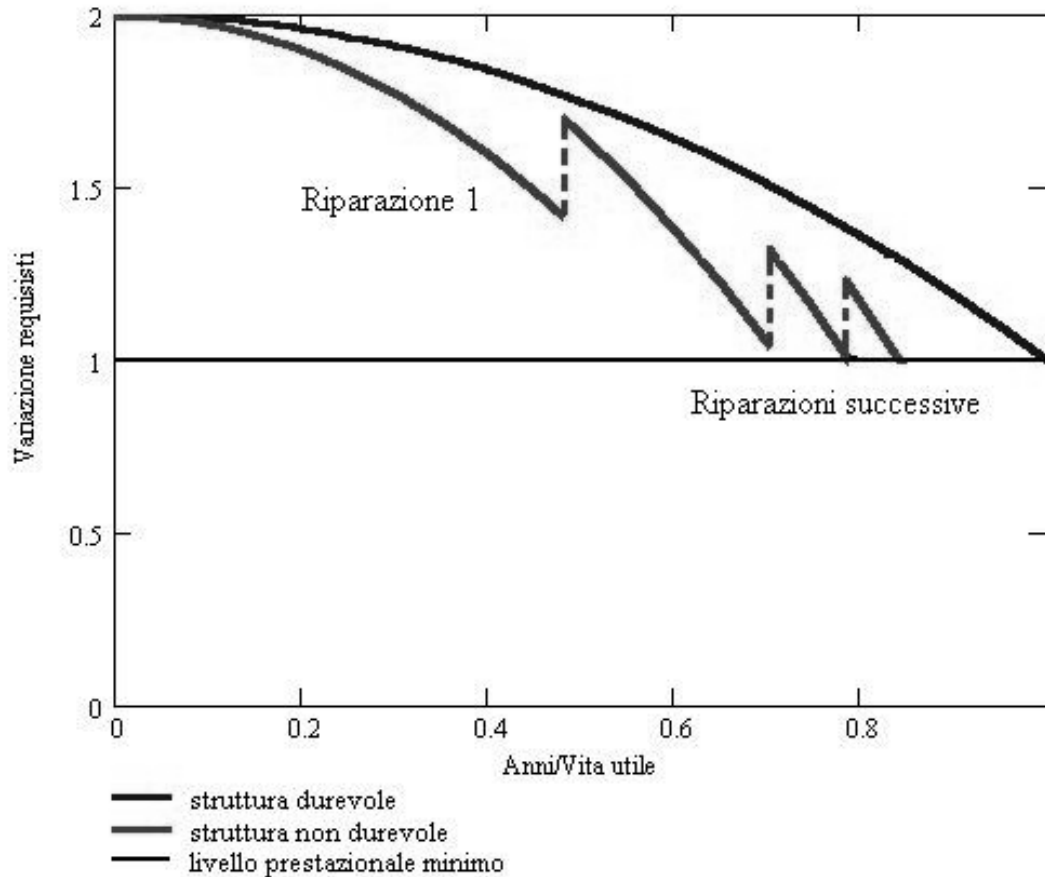


Caso di una struttura poco durevole.

Aumenta la probabilità di danneggiamento e l'investimento si incrementa ben oltre le aspettative.

Danneggiamento e riparazione

Aspetti economici



Non sempre la riparazione, se non muta i meccanismi di alterazione, consente alla struttura di raggiungere la sua aspettativa di vita..

La durabilità rientra nella logica degli SL,ultimi . . .

2.2.1. STATI LIMITE ULTIMI (SLU)

Lo stato limite ultimo è definito come lo stato al superamento del quale si ha il collasso strutturale, crolli, perdita di equilibrio, dissesti gravi, ovvero fenomeni che mettono fuori servizio in modo irreversibile la struttura. Il grado di sicurezza nei confronti degli stati limite ultimi dovrà essere, tanto più elevato, quanto più gravi sono le conseguenze dell'evento sfavorevole rappresentato dal raggiungimento di uno stato limite ultimo.

Sono elencati nel seguito alcuni stati limite ultimi tra i più consueti:

- a) perdita di equilibrio della struttura o di una sua parte
 - b) deformazioni o movimenti eccessivi
 - c) raggiungimento della massima capacità di resistenza di parti di strutture, collegamenti, fondazioni
 - d) raggiungimento della massima capacità di resistenza della struttura nel suo insieme
 - e) raggiungimento della massima capacità di resistenza dei terreni
 - f) rottura di membrature e collegamenti per fatica
 - g) rottura di membrature e collegamenti per altri effetti dipendenti dal tempo
 - h) instabilità di parti della struttura o del suo insieme.
-

... o di esercizio.

2.2.2. STATI LIMITE DI ESERCIZIO (SLE)

Lo stato limite di esercizio è definito come lo stato al superamento del quale corrisponde la perdita di una particolare funzionalità che condiziona o limita la prestazione dell'opera.

Sono elencati nel seguito alcuni stati limite ultimi tra i più consueti:

- | |
|--|
| <i>a)</i> danneggiamenti locali (ad es. fessurazione del calcestruzzo) che possono ridurre la durabilità della struttura, la sua efficienza o il suo aspetto |
| <i>b)</i> eccessive deformazioni e distorsioni che possono limitare l'uso della costruzione, la sua efficienza e il suo aspetto |
| <i>c)</i> eccessive deformazioni o distorsioni che possono compromettere l'efficienza e l'aspetto di elementi non strutturali, impianti, macchinari |
| <i>d)</i> eccessive vibrazioni che possono compromettere l'uso della costruzione |
| <i>e)</i> danni per fatica che possono compromettere la durabilità |
| <i>f)</i> corrosione e/o degrado dei materiali in funzione dell'ambiente di esposizione. |

Dal DM 14/09/2005 Norme Tecniche per le Costruzioni

In sintesi:

Effetto dell'azione

$$\mathbf{E}_d \leq \mathbf{R}_d$$

Corrispondente resistenza

Dal DM 14/09/2005 Norme Tecniche per le Costruzioni

Progetto di vita utile.

- Identificare e formulare le prestazioni funzionali
- Determinare le proprietà ed il tipo di aggressività dell'ambiente in cui si trova la struttura
- Scegliere i materiali e le tecniche costruttive più appropriate
- Impiegare modelli matematici che descrivono le interrelazioni tra ambiente, proprietà dei materiali ed i meccanismi di deterioramento.
- Monitorare i processi di deterioramento attraverso prove ed analisi (possibilmente non distruttive) per quantificare l'effettivo stato di degrado e programmare gli interventi di manutenzione.

Classi di esposizione

Denominazione della classe	Descrizione dell'ambiente di esposizione	Esempi di condizione ambientale
Nessun rischio di corrosione delle armature o di attacco chimico		
X0	Molto secco	Edifici con interni a umidità relativa molto bassa
Corrosione indotta da carbonatazione		
XC1	Secco	Interni di edifici a bassa umidità relativa
XC2	Bagnato, raramente secco	Parti di strutture di contenimento liquidi; fondazioni
XC3	Umidità moderata	Edifici con interni a umidità relativa da moderata ad alta; calcestruzzo esterno
XC4	Ciclicamente secco e bagnato	Superfici soggette al contatto con acqua, non comprese nella classe XC2

Azioni

... che vengono poi completata da sottoclassi in funzione delle condizioni di esercizio.

Cause più frequenti di degrado

- Gelività
- Dilavamento (attacco acido)
- Attacco solfatico:
in climi caldi → ettringite, freddi → thaumasite)
- Reazione alcali aggregato
- Carbonatazione → ossidazione delle armature
- Carbonatazione + presenza di cloruri → ossidazione delle armature

È sempre comunque necessario l'ingresso nei **pori** o nelle **fessure** del conglomerato di gas (O_2 o CO_2), ioni e liquidi (H_2O).



Contro la gelività

Nella tecnologia del calcestruzzo il miglioramento della durabilità alla azione del gelo della microstruttura porosa avviene attraverso l'uso di **additivi aeranti** che producono vuoti in misura del 5% del volume del manufatto.

Affinché tale approccio sia realmente efficace le bolle devono distribuirsi nel volume della matrice secondo una spaziatura ottimale: il raggio di influenza di una bolla sferica deve cioè sovrapporsi a quello delle bolle contigue.

Protezione dal dilavamento

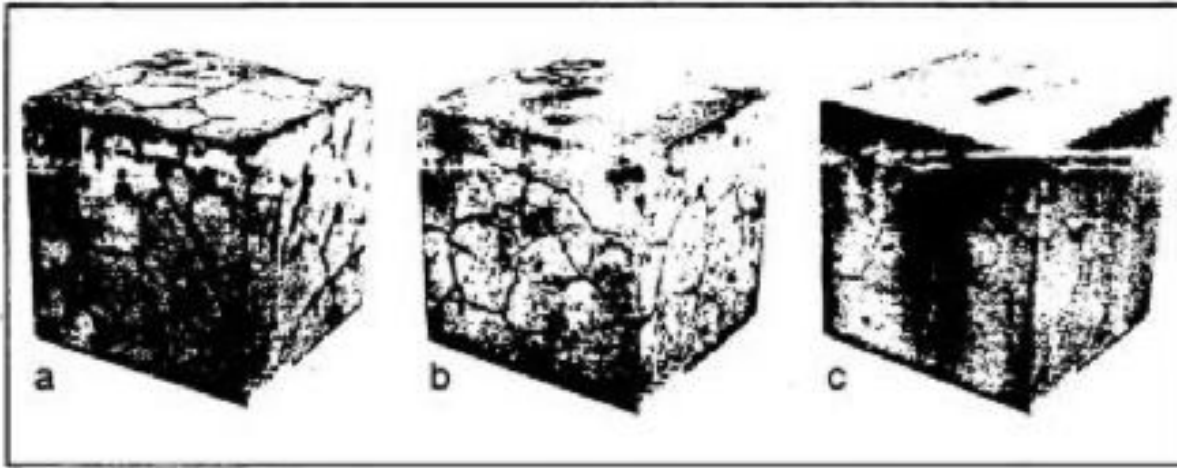
Progetto della durabilità



L'accurata impermeabilizzazione preserva il calcestruzzo dall'infiltrazione dell'acqua.

Protezione da attacchi solfatici e reazione alcali aggregato

Progetto della durabilità



- Conoscenza degli inquinanti nel terreno
- Analisi della reattività degli aggregati
- Protezione delle strutture dalla penetrazione dell'acqua e degli inquinanti
- Scelta di un cemento solfato-resistente (p.e. pozzolanico)

Diffusione della carbonatazione (1)

$$\frac{d}{dx} q(x, t) = D_c(x, t) \cdot A \cdot \frac{(C_1(x, t) - C_2(x, t))}{x}$$

$q(x, t)$ = quantità di CO_2 che può permeare uno strato di cls

$D_c(x, t)$ = diffusività della CO_2 nel calcestruzzo

$C_1(x, t) - C_2(x, t)$ = differenza di concentrazione della CO_2 fra l'aria ed il fronte carbonatato

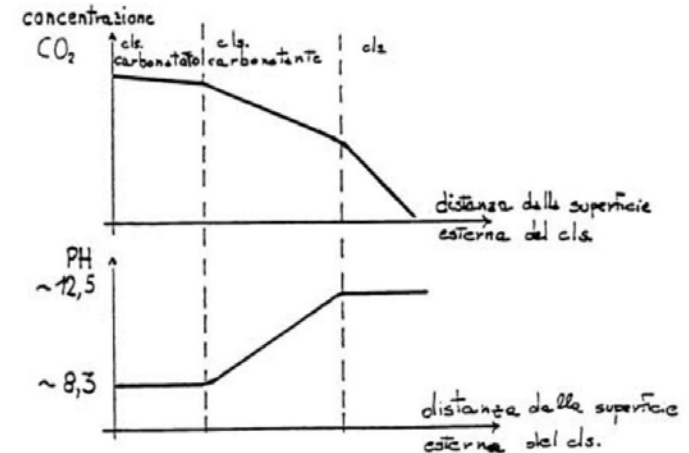
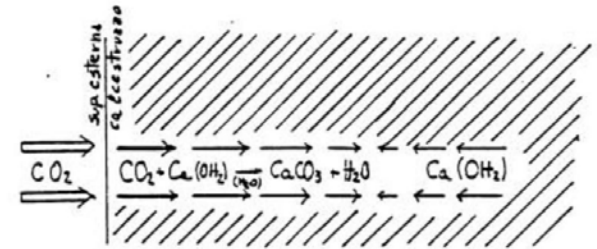
A = costante di reazione

Posto

$$\frac{d}{dx} D_c(x, t) = \frac{d}{dt} D_c(x, t) = 0$$

e

$$\frac{d}{dx} (C_1(x, t) - C_2(x, t)) = \frac{d}{dt} (C_1(x, t) - C_2(x, t)) = 0$$



si ottiene integrando

$$x(t) := K \cdot \sqrt{t}$$

Diffusione della carbonatazione (2)

$$x(t) := K \cdot \sqrt{t}$$

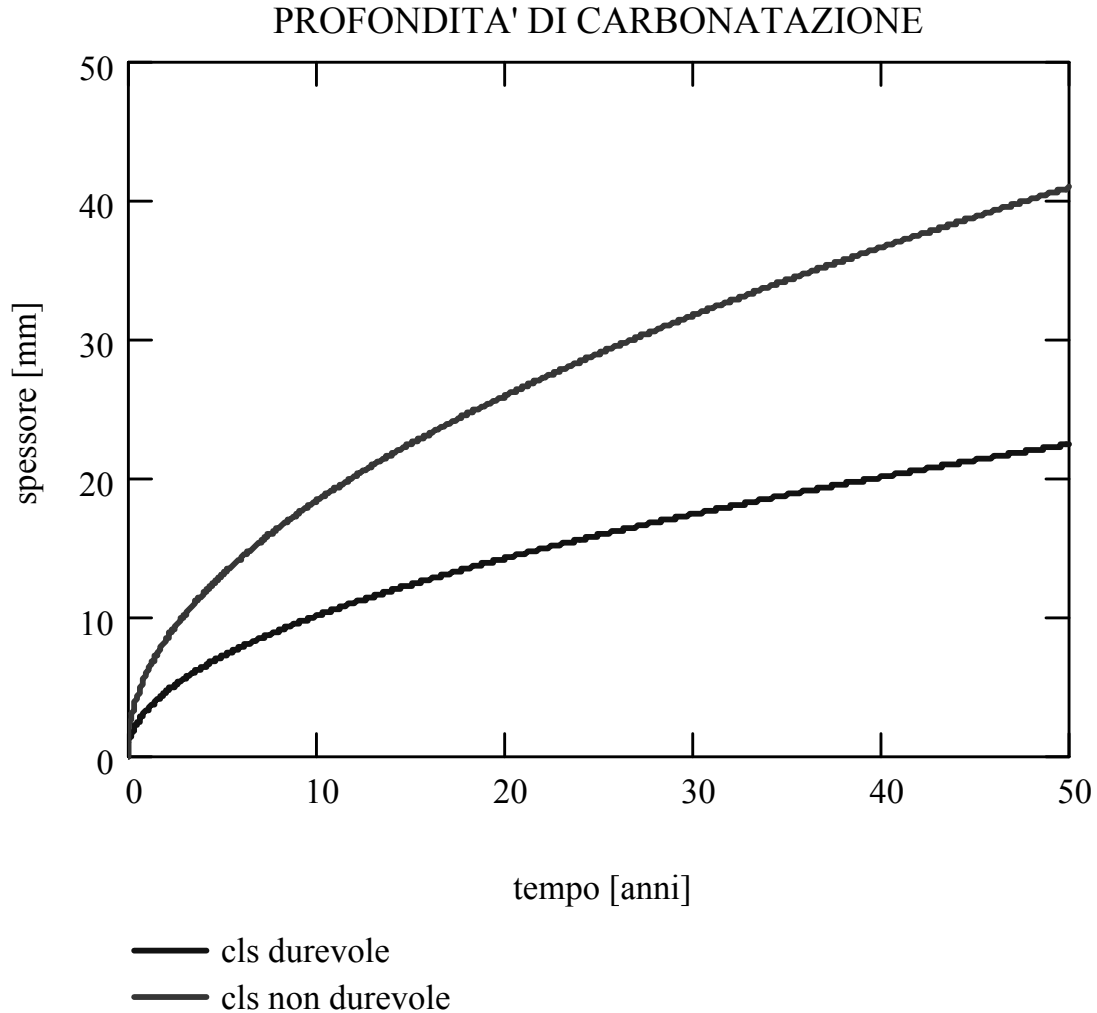
secondo Sitter
$$K := \frac{(46 \cdot w - 17.6)}{2.7} \cdot R \cdot H$$

w = rapporto A/C

R = 1.0 per cemento Portland tipo A
0.6 per cemento Portland tipo B
1.4 per cemento d'altoforno, scorie 30-40%
2.2 per cemento d'altoforno, scorie > 60%

H = 0.3 per cls esterno non protetto (umido)
0.5 esterno medio
0.7 esterno protetto
1.0 interno

Diffusione della carbonatazione (3)

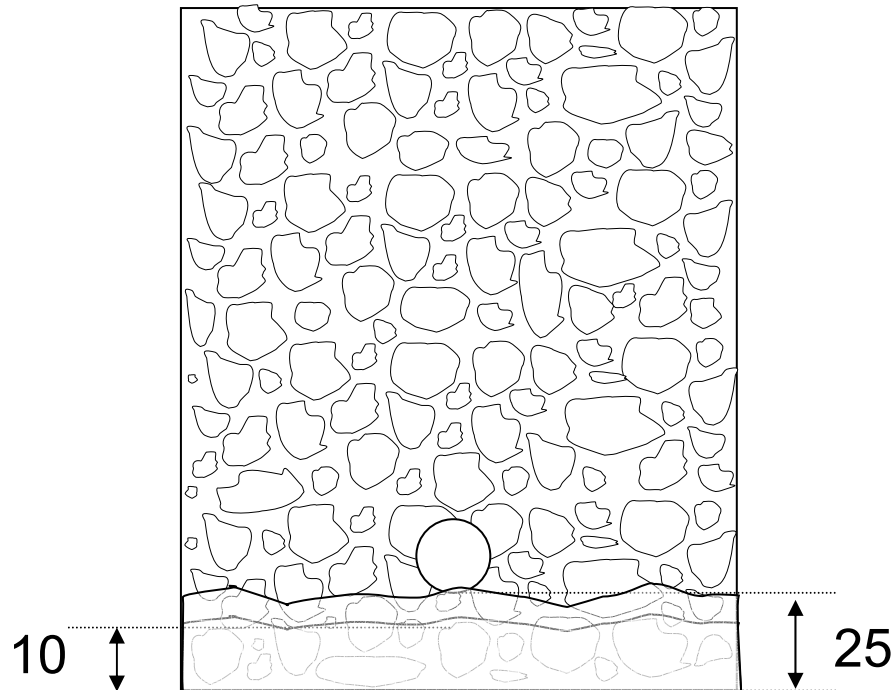


Carbonatazione e copriferro (1)

Un calcestruzzo **durevole** impiega 10 anni a raggiungere 10 mm di carbonatazione e 63 anni per raggiungere 25 mm.

Un calcestruzzo **non durevole** impiega rispettivamente 3 e 19 anni.

Dopo tale termine può iniziare il processo di corrosione delle armature.

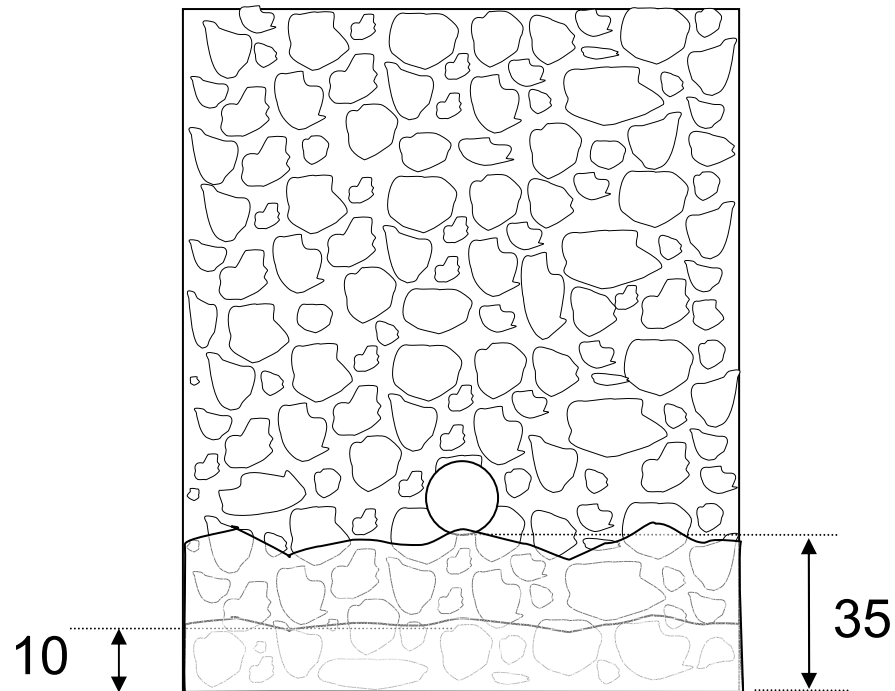


Carbonatazione e copriferro (2)

Un calcestruzzo **durevole** impiega 10 anni a raggiungere 10 mm di carbonatazione e 122 anni per raggiungere 35 mm.

Un calcestruzzo **non durevole** impiega rispettivamente 3 e 37 anni.

Dopo tale termine può iniziare il processo di corrosione delle armature.



Valori limite raccomandati per la composizione del cls

Rapporto massimo A/C

Classe di resistenza minima

Contenuto minimo di cemento kg/m³

Contenuto minimo aria %

Altri requisiti

Classe di esposizione	Ambienti a secco		Ambienti a umidità moderata				Ambienti a umidità elevata				Ambienti chimici aggressivi				
	XC1	XC2	XF1	XF2	XF3	XF4	XS1	XS2	XS3	XS4	XAL	XAS	XAD	XAE	
Rapporto massimo a/c	0,65	0,60	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Classe di resistenza minima	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37
Contenuto minimo di cemento (kg/m ³)	260	280	300	300	300	300	320	340	360	360	360	360	360	360	360
Contenuto minimo di aria (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,0 ⁽¹⁾	4,0 ⁽¹⁾	4,0 ⁽¹⁾	-	-
Altri requisiti										Aggregati conformi al prEN 12620:2000 con sufficiente resistenza al gelo/sgelo				Cemento resistente ai solfati ⁽²⁾	
a)	Quando il calcestruzzo non contiene aria aggiunta per la relativa classe di esposizione.														
b)	Qualora la presenza di SO ₂ comporti le classi di esposizione XF3 e XF4, il cemento deve essere a alta resistenza. Se il cemento è classificato a media o ad alta resistenza ai solfati, il cemento dovrebbe essere utilizzato in classe di esposizione XA2 (e in classe di esposizione XA1 se applicabile) e il cemento ad alta resistenza, se solido dovrebbe essere utilizzato in classe di esposizione XA3.														

Progetto della durabilità

La composizione del calcestruzzo incide sulla velocità di diffusione della carbonatazione.

Copriferro per classe di esposizione

Progetto della durabilità

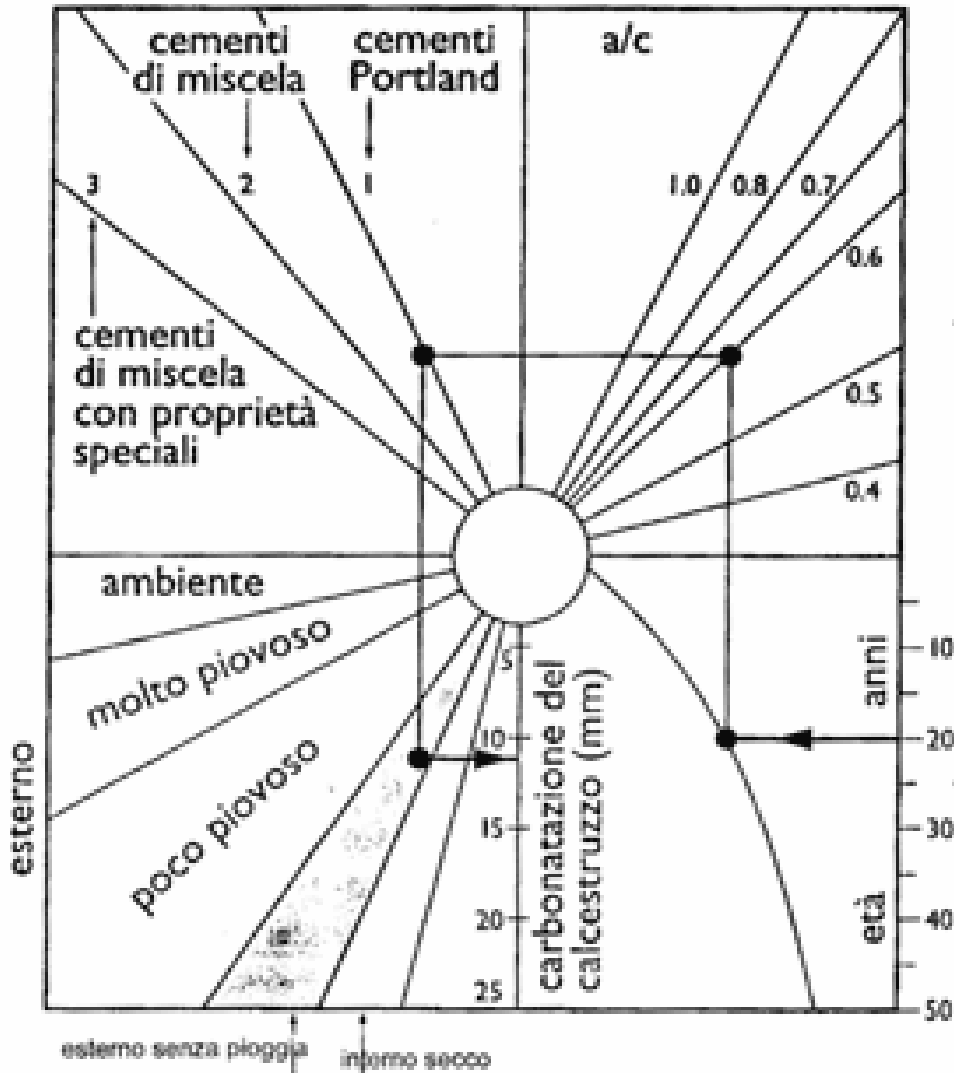
Copriferro minimo e Classi di Esposizione Classe S4 - vita media 50 anni

Classe Esposizione	Cmin (mm)
X0	10
XC1	15
XC2-XC3	25
XC4	30
XD1-XS1-XF1-XA1	35
XD2-XS2-XF2-XA2	40
XD3-XS3-XF3-XF4-XA3	45

Viene prescritto un copriferro minimo in funzione della classe di esposizione.

Stima della profondità di carbonatazione

Progetto della durabilità

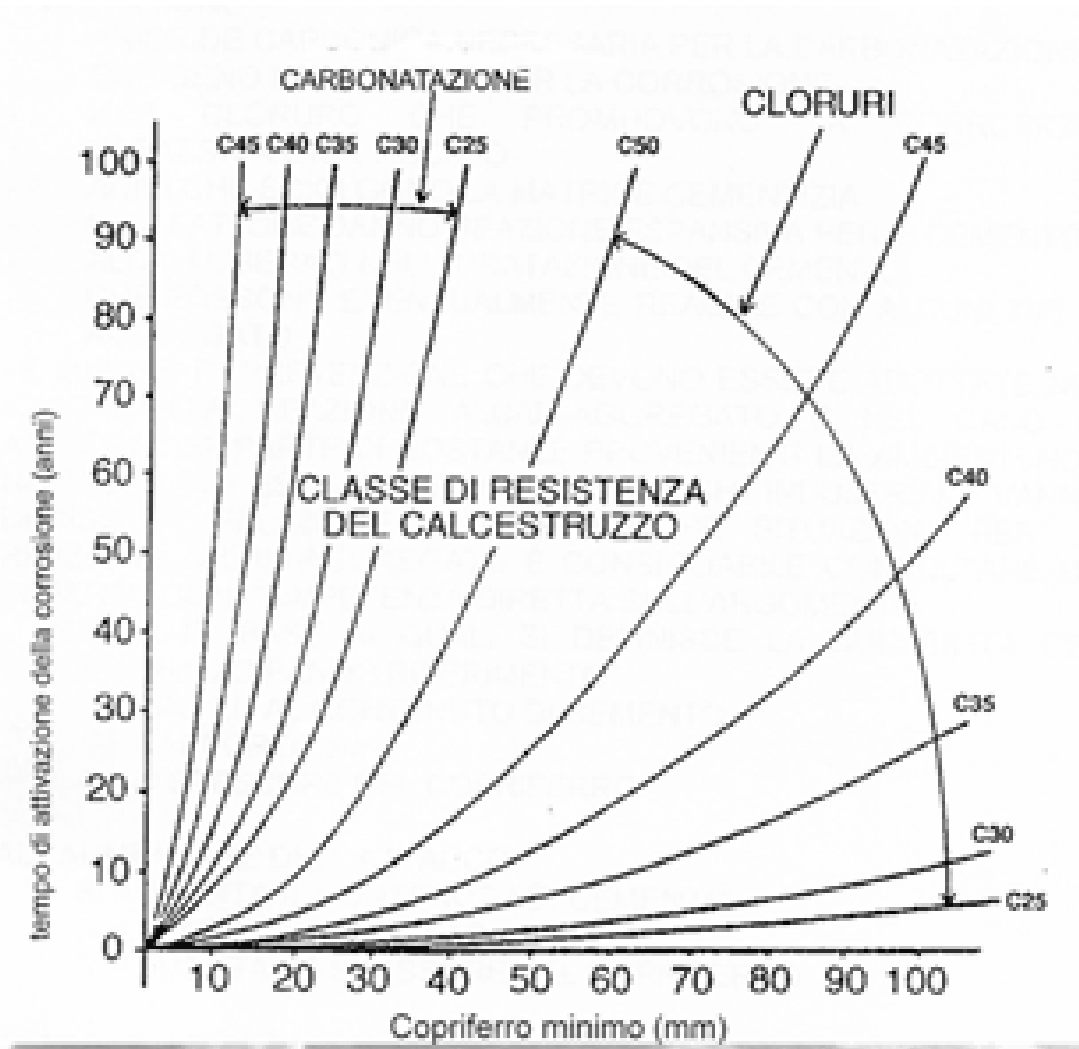


Da ACI
Special Publication,
Concrete Durability
1987

Determinazione del copriferro in funzione della vita utile, resistenza e presenza di cloruri.

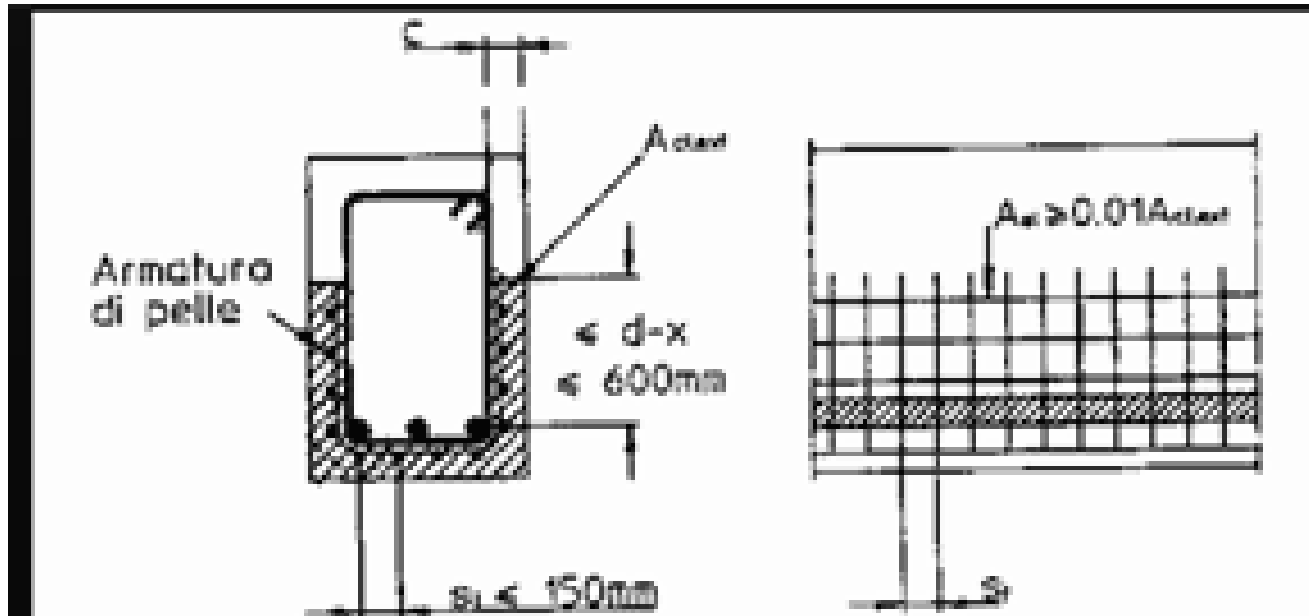
Progetto della durabilità

Da
Institution of Civil
Engineering
Improvement
Durability 1986.



Effetti sulla progettazione

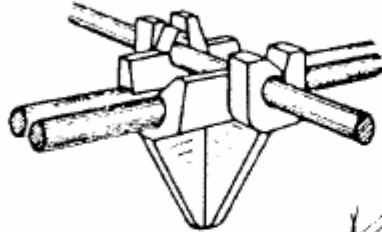
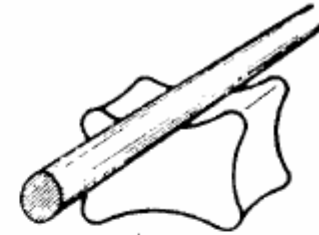
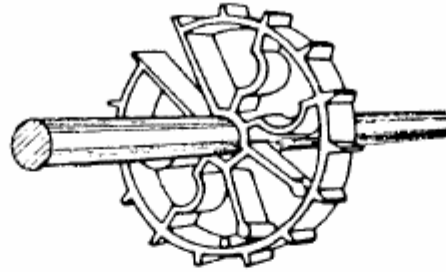
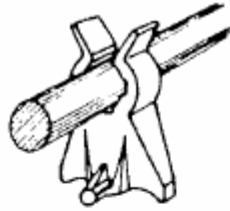
Progetto della durabilità



- Lo spessore di coperifero elevato riduce le sezioni utili (maggiori dimensioni nominali delle sezioni)
- Lo spessore del coperifero deve essere essere riferito all'armatura più esterna (staffe) di ciascun elemento strutturale
- Si può rendere necessaria una armatura di pelle (inox) atta ad evitare il distacco del coperifero

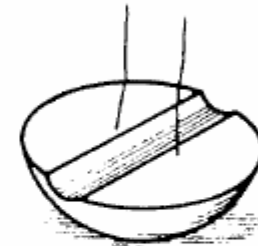
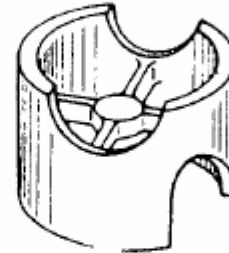
Il distanziatore ... questo sconosciuto!

Progetto della durabilità

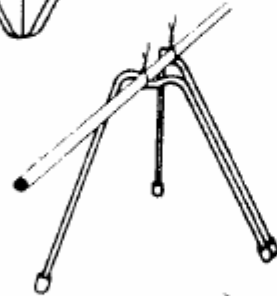


Distanziatore
in plastica

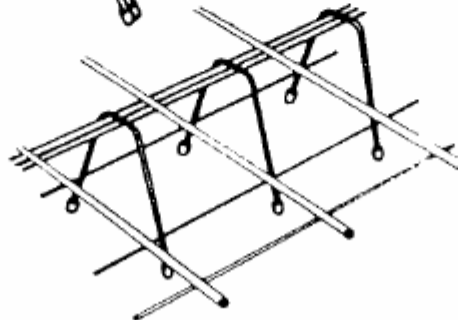
Blocchetto in
amianto - cemento



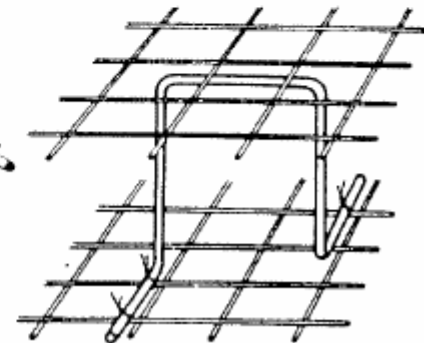
Emisfera di
calcestruzzo



Pendolo in
calcestruzzo

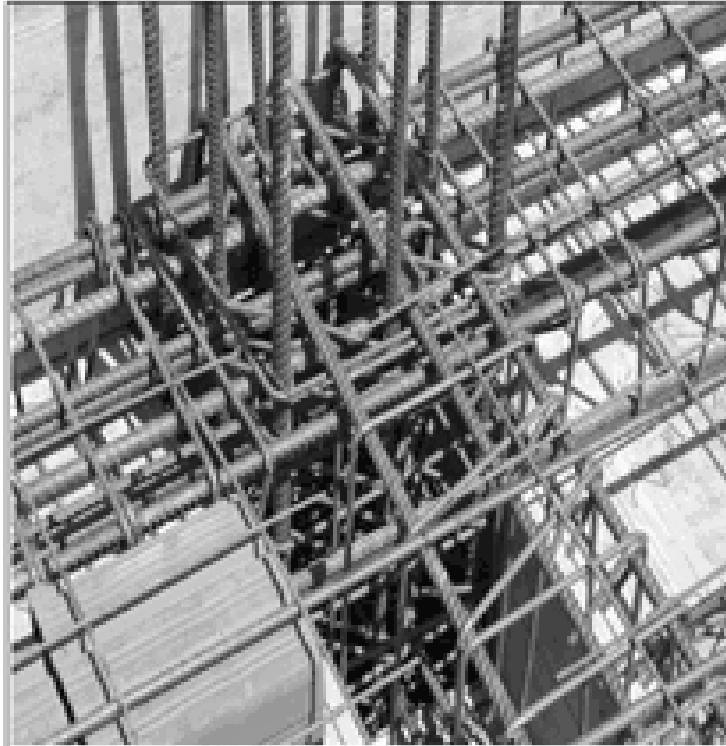


Montanti per lo strato di
armatura superiore

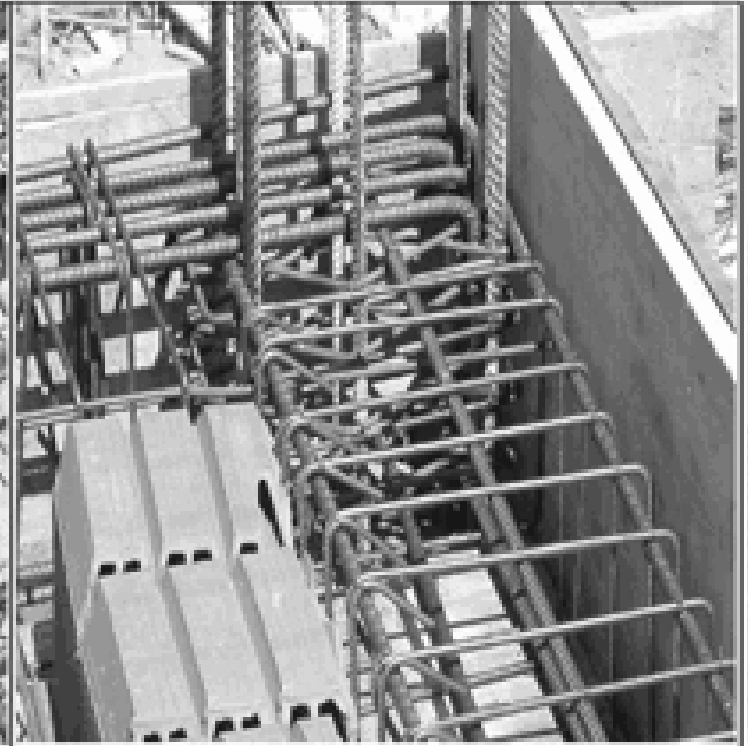


Cura del particolare costruttivo

Progetto della durabilità



Esempio di nodo di bordo



Esempio di nodo d'angolo

Si dovrà curare il dettaglio della disposizione delle armature, rispettando anche l'interferro.

Copriferro negli interventi di recupero

Progetto della durabilità

Nelle **strutture esistenti**,
ove il copriferro potrebbe essere insufficiente,
è possibile intervenire senza incrementare lo spessore degli
elementi costruttivi mediante una adeguata **protezione**.

Protezione con vernici elastomeriche

(Tattoni 1977)

Progetto della durabilità

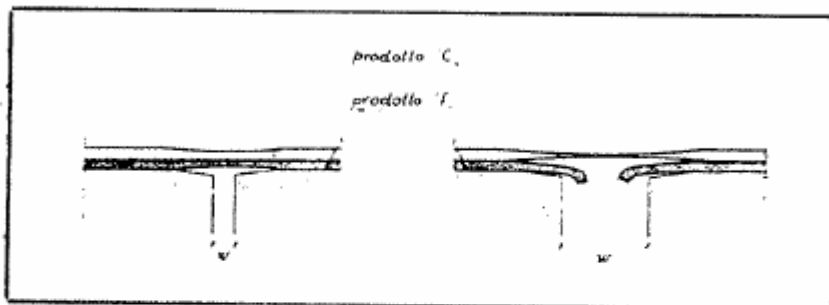


Fig. 7. Comportamento della protezione elastomerica in corrispondenza di una fessura. Fino ad una certa ampiezza di fessura ($w < 0,5 \div 0,6$ mm) il prodotto « F » si distacca dal calcestruzzo e l'insieme di « F » e di « C » forma un « ponte » a protezione della fessura. Oltre tale limite il materiale « F » si rompe, mentre « C », staccandosi da « F », continua l'azione protettiva.

La protezione del calcestruzzo è possibile in quanto lo strato protettivo è in grado di sostenere l'apertura di sottostanti fessure senza lacerarsi (bridging effect)

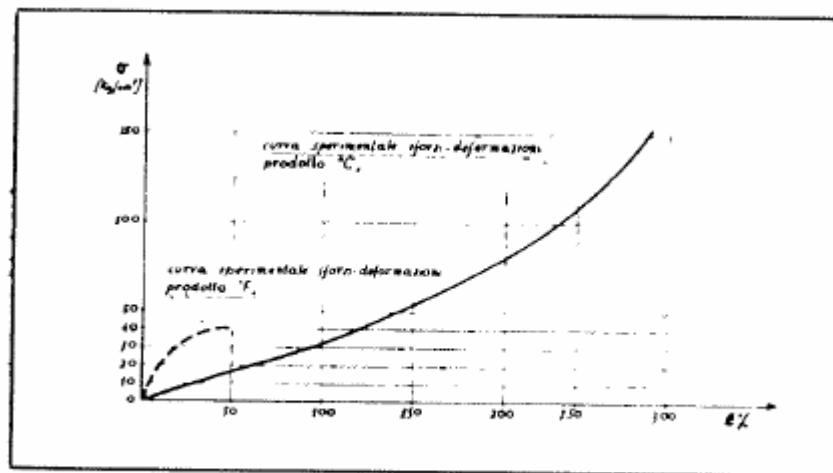


Fig. 8. Curve sperimentali sforzi-deformazioni per i materiali « F » e « C »

Protezione con malte modificate

(Mantegazza, Penna, Tattoni 1994)

La realizzazione di malte cementizie modificate con polimeri, consente di ottenere strati di bassa porosità, difficilmente penetrabili da agenti aggressivi e per i quali è possibile instaurare una **equivalenza di spessore** con calcestruzzo ordinario in modo da ridurre l'effettivo spessore del ricoprimento.

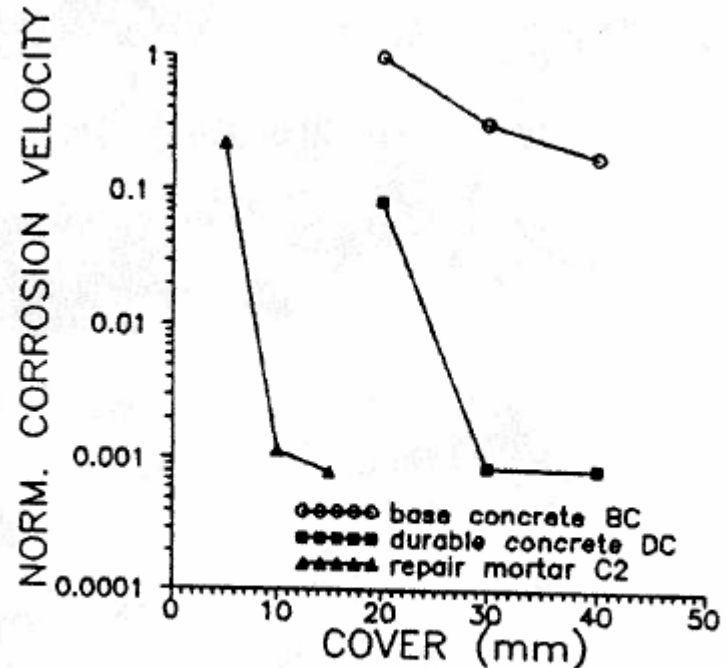


Fig. 23—Normalized rate of corrosion for the tested covers

Calcolo della vita utile – CTE 1990 (1)

Conformemente allo spirito degli stati limite:

Vita utile richiesta

$$\mathbf{T}_{sd} \leq \mathbf{T}_{ud}$$

Vita utile calcolata

Verifica

Calcolo della vita utile – CTE 1990 (2)

Vita limite convenzionale (100 anni)

$$T_{ud} = T_0 \times \alpha_1 \times \alpha_2 \times \alpha_3 \times \alpha_4 \times \alpha_5 \times \alpha_6 \times \alpha_7 \times \alpha_8$$

α_1 dipende dal rapporto A/C

α_2 dipende dalla lavorabilità dell'impasto

α_3 dipende dalla resistenza del calcestruzzo

α_4 dipende dall'ambiente

α_5 dipende dal tipo di struttura

α_6 dipende dal copriferro effettivo/al minimo richiesto

α_7 dipende dalla classe di esposizione

α_8 tiene conto di casi particolari

Calcolo della vita utile – CTE 1990 (3)

Slump cm	α_2
< 4.0	0.80
8.0	0.95
12.0	1.00
> 12.0	1.00

Rapporto A/C	α_1
0.40	1.00
0.45	0.95
0.50	0.90
0.55	0.80
0.60	0.70
> 0.60	0.70

f_{ck}	α_3
16	0.75
20	0.85
25	0.90
30	0.95
35	1.00
> 35	1.00

α_4	Ambiente		
	severo	normale	protetto
nessuno	0.70	0.85	0.95
curing	0.85	0.95	1.00
vapore	-	-	0.95

Verifica

Calcolo della vita utile – CTE 1990 (4)

α_5		Stato fessurativo		
Classe di esposizione	Protezione	compresso	non fessurato	fessurato
tutte	non armato	1.00		
1 e 2a coperto	nessuna	1.00	0.95	0.85
	corrente	1.00	1.00	0.95
	speciale	1.00	1.00	1.00
2a esterno 2b coperto	nessuna	0.95	0.85	0.70
	corrente	1.00	0.95	0.80
	speciale	0.90	1.00	1.00
2b esterno 3, 4 e 5	nessuna	0.90	0.75	0.55
	corrente	0.75	0.85	1.00
	speciale	0.90	1.00	1.00

Calcolo della vita utile – CTE 1990 (5)

$c-c_{\min}$ (mm)	α_6
0	0.90
5	0.95
10	1.00

Caso	α_8
Nei casi non menzionati	1.00
Cap con cavi post-tesi iniettati	0.85
Cap con cavi “unbonded”	0.75

Classi di esposizione	α_7
1	1.00
2	0.95
3	0.90
4	0.85
5a	0.80
5b	0.70
5c	0.70

Esempio:

edificio industriale prefabbricato in ca e cap, classe di esposizione 5a, $A/C = 0.45$, consistenza semifluida, $f_{ck} 35$, maturazione a vapore, ammesse fessurazioni, copriferro minimo

$$T_{ud} = 100 \times 1.00 \times 0.95 \times 1.00 \times 0.95 \times 0.55 \times 0.90 \times 0.80 \times 1.00 = \mathbf{36 \text{ anni}}$$

Conclusioni

- R_{ck} che corrisponda al rapporto A/C da adottare in relazione alla classe di esposizione ambientale
- classe di consistenza adeguata alla realtà del cantiere
- dimensione nominale massima degli aggregati definita in funzione delle dimensioni degli elementi strutturali e delle relative armature
- corretta posa in opera e costipazione del calcestruzzo
- stagionatura umida della superficie del calcestruzzo per almeno 3 giorni dopo la scasseratura
- uso di distanziatori
- controllo degli SLE (tensioni, deformazioni, fessurazione)

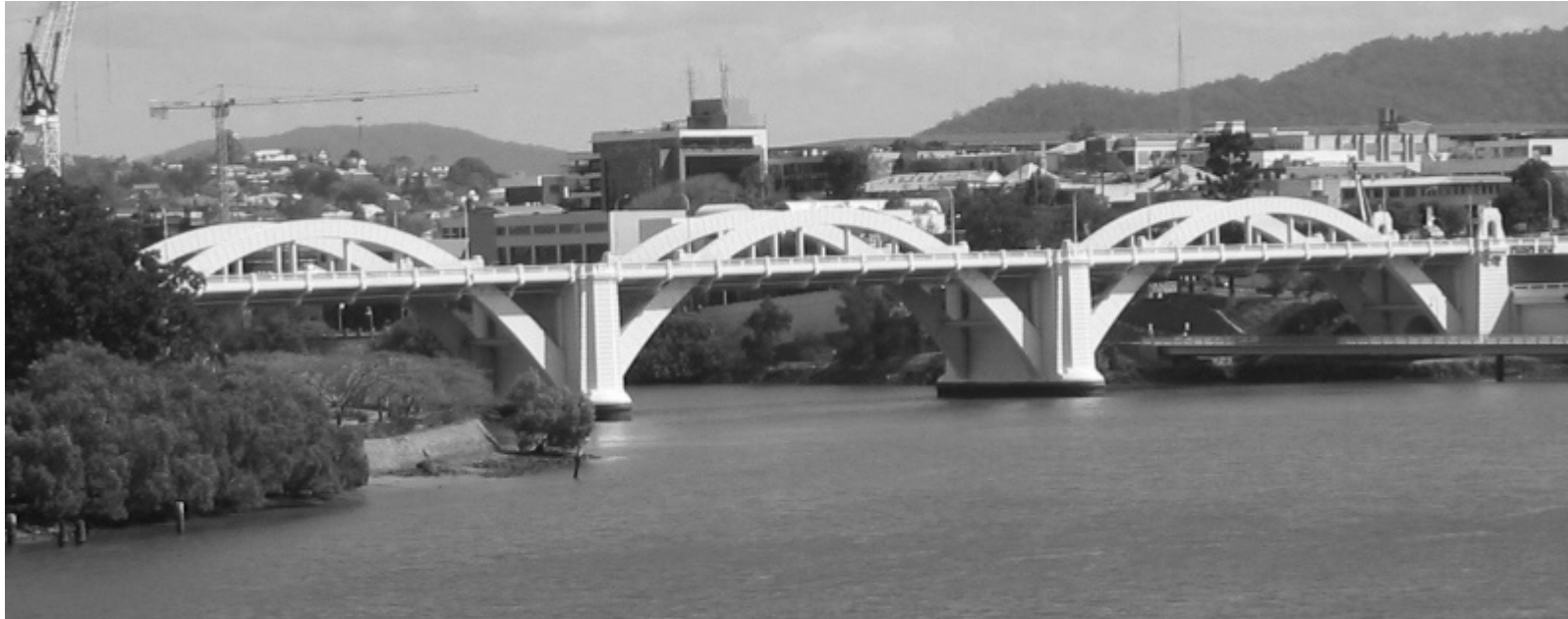
L'uomo nobile aspira all'eternità ...

*Per me si va ne la città dolente,
per me si va ne l'eterno dolore,
per me si va tra la perduta gente.
...*

*...
Dinanzi a me non fuor cose create
se non etterne, e io **eterno duro**.
Lasciate ogni speranza, voi ch'intrate*



... ma può accontentarsi di un tempo
sufficientemente lungo ...



Grazie per l'attenzione!