



CORSO DI FORMAZIONE
"IMPIEGO DELL'ACCIAIO NELLE STRUTTURE ESISTENTI
RETROFIT SISMICO E PROBLEMI DI DURABILITÀ "
Villa Crawford - S. Agnello (NA), 29 gennaio 2025

DURABILITÀ E MANUTENZIONE DI STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO

Prof. Maurizio Nicolella

D.I.C.E.A. – Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale
Università di Napoli Federico II

Perché questo corso?
Perché questo intervento?
Il calcestruzzo non era eterno?













Le norme di oggi salvaguardano la durabilità del calcestruzzo?

NTC 2018
CIRC. 7/2019
UNI 11104
UNI EN 206
UNI EN 1992
UNI EN 13670

11.2.11. DURABILITÀ

Per garantire la durabilità delle strutture in calcestruzzo armato ordinario o precompresso, esposte all'azione dell'ambiente, si devono adottare i provvedimenti atti a limitare gli effetti di degrado indotti dall'attacco chimico, fisico e quelli derivanti dalla corrosione delle armature e dai cicli di gelo e disgelo.

A tal fine, valutate opportunamente le condizioni ambientali del sito ove sorgerà la costruzione o quelle di impiego, conformemente alle indicazioni della tabella 4.1.III delle presenti norme, in fase di progetto dovranno essere indicate le caratteristiche del calcestruzzo da impiegare in accordo alle *Linee Guida sul calcestruzzo strutturale* edite dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici facendo anche, in assenza di analisi specifiche, utile riferimento alle norme UNI EN 206 ed UNI 11104. Inoltre devono essere rispettati i valori del copriferro nominale di cui al punto 4.1.6.1.3, nonché le modalità e la durata della maturazione umida in accordo alla UNI EN 13670:2010, alle *Linee Guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale* ed alle *Linee Guida per la valutazione delle caratteristiche del calcestruzzo in opera* pubblicate dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Ai fini della valutazione della durabilità, nella formulazione delle prescrizioni sul calcestruzzo, si potranno prescrivere anche prove per la verifica della resistenza alla penetrazione degli agenti aggressivi, quali ad esempio anidride carbonica e cloruri. Si può, inoltre, tener conto del grado di impermeabilità del calcestruzzo, determinando il valore della profondità di penetrazione dell'acqua in pressione. Per la prova di determinazione della profondità della penetrazione dell'acqua in pressione nel calcestruzzo indurito potrà farsi utile riferimento alla norma UNI EN 12390-8.

Le Norme Tecniche per le Costruzioni in merito alla durabilità così si esprimono: *“la **conservazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche** dei materiali e delle strutture, proprietà essenziale affinché i livelli di sicurezza vengano garantiti **durante tutta la vita dell’opera**, deve essere garantita attraverso una opportuna scelta dei materiali e un opportuno dimensionamento delle strutture, **comprese le eventuali misure di protezione e manutenzione**”*

Le NTC hanno cercato di circoscrivere un concetto aleatorio e soggettivo come la durabilità, evidenziando e/o disciplinando i **parametri che la influenzano**:

- ❖ **degrado dei materiali**
- ❖ **tempo**
- ❖ **ambiente di servizio**
- ❖ **posa in opera**
- ❖ **manutenzione programmata**
- ❖ **destinazione d’uso**

Quindi per durabilità s’intende non solo il mantenimento dei coefficienti di sicurezza stabiliti in fase di progetto, ma anche la **conservazione dell’efficienza iniziale per tutta la vita di servizio al di sopra del livello minimo**, dove per efficienza s’intende il **rispetto degli stati limite legati alla funzionalità dell’opera**

Se è conforme ai valori limite, si deve presumere che il calcestruzzo nella struttura **soddisfi i requisiti di durabilità** per l'uso previsto nelle specifiche condizioni ambientali, a condizione che:

- sia correttamente gettato, compattato e stagionato, per esempio in conformità con la UNI EN 13670-1 oppure con altre norme pertinenti;
- rispetti il copriferro minimo richiesto per le specifiche condizioni ambientali, in accordo con la norma di progetto pertinente, per esempio la UNI EN 1992-1-1 [paragrafo 5.3.2 della norma UNI EN 206-1]

Con questo criterio, il progettista ha praticamente risolto, nella maggior parte dei casi, il problema della durabilità dell'opera, se utilizza:

- la UNI EN 1992-1-1 (Progettazione delle strutture di calcestruzzo – Parte 1-1 Regole generali e regole per gli edifici per progettare l'opera in c.a.), in particolare il capitolo 4, per dimensionare i copriferri in funzione della classe della struttura e delle classi di esposizione;
- la UNI EN 206-1 (Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità per prescrivere il calcestruzzo);
- la UNI EN 13670-1 (Esecuzione di strutture di calcestruzzo – Requisiti comuni per prescrivere la messa in opera e la stagionatura).

Al fine di garantire alla struttura adeguata durabilità, si devono considerare i seguenti fattori correlati:

- la classe di servizio prevista;*
- la destinazione d'uso della struttura;*
- le condizioni ambientali prevedibili;*
- la composizione, le proprietà e le prestazioni dei materiali;*
- la forma degli elementi strutturali ed i particolari costruttivi;*
- la qualità dell'esecuzione ed il livello di controllo della stessa;*
- le particolari misure di protezione;*
- la manutenzione programmata durante la vita presunta.*

4.2.10. CRITERI DI DURABILITÀ

La durabilità deve assicurare il mantenimento nel tempo della geometria e delle caratteristiche dei materiali della struttura, affinché questa conservi inalterate funzionalità, aspetto estetico e resistenza.

Al fine di garantire tale persistenza in fase di progetto devono essere presi in esame i dettagli costruttivi, la eventuale necessità di adottare sovrasspessori, le misure protettive e deve essere definito un **PIANO DI MANUTENZIONE** (ispezioni, operazioni manutentive e programma di attuazione delle stesse).

4.4.13. DURABILITÀ

In relazione alla classe di servizio della struttura e alle condizioni di carico, **DOVRÀ ESSERE PREDISPOSTO IN SEDE PROGETTUALE UN PROGRAMMA DELLE OPERAZIONI DI MANUTENZIONE E DI CONTROLLO DA EFFETTUARSI DURANTE LA VITA DELLA STRUTTURA.**

LA PREVENZIONE DEL DEGRADO DELLE STRUTTURE IN C.A. SI SVILUPPA IN TRE FASI:



Il requisito di durabilità può essere soddisfatto attraverso l'adozione di **appropriati provvedimenti**, tra cui:

a) scelta opportuna dei materiali;

b) dimensionamento opportuno delle strutture;

c) scelta opportuna dei dettagli costruttivi;

d) adozione di tipologie costruttive e strutturali che consentano, ove possibile, l'ispezionabilità delle parti strutturali;

f) impiego di prodotti e componenti chiaramente identificati in termini di caratteristiche meccanico-fisico-chimiche, indispensabili alla valutazione della sicurezza, e dotati di idonea qualificazione, così come specificato al Capitolo 11;

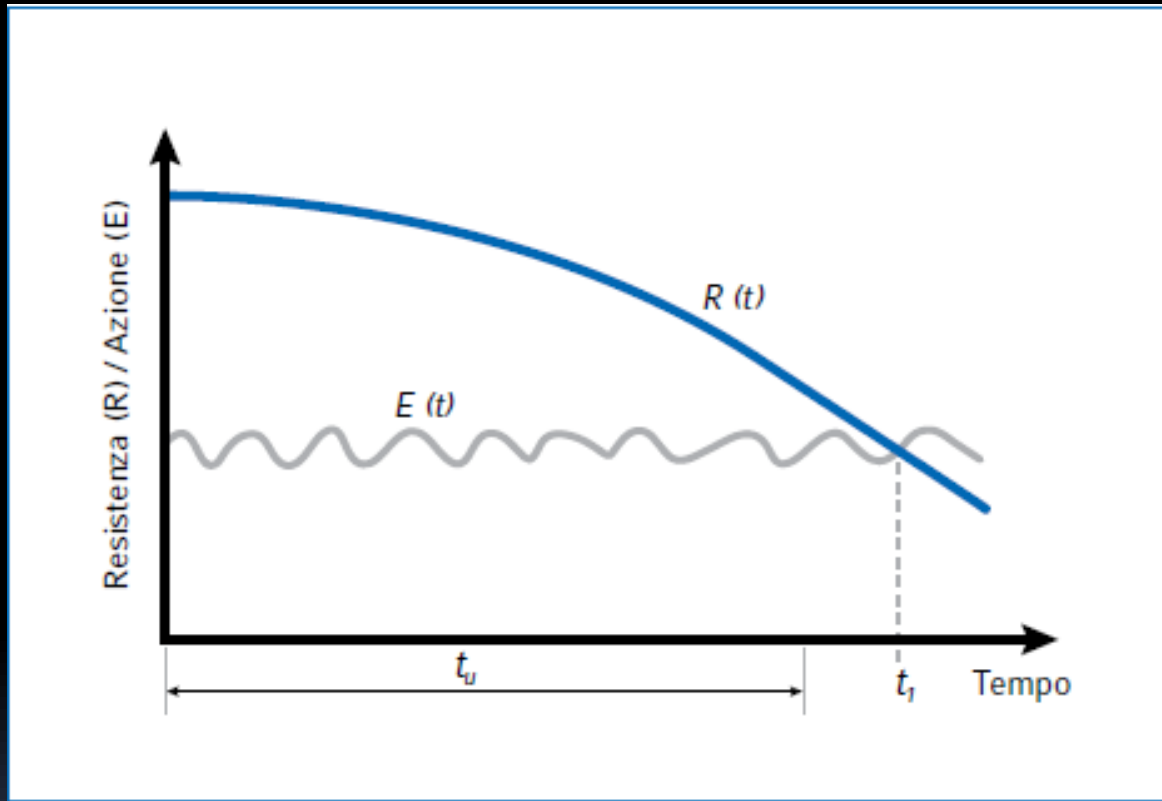
e) pianificazione di misure di protezione e manutenzione; oppure, quando queste non siano previste o possibili, progettazione rivolta a garantire che il deterioramento della costruzione o dei materiali che la compongono non ne causi il collasso;

g) applicazione di sostanze o ricoprimenti protettivi dei materiali, soprattutto nei punti non più visibili o difficilmente ispezionabili ad opera completata;

h) adozione di sistemi di controllo, passivi o attivi, adatti alle azioni e ai fenomeni ai quali l'opera può essere sottoposta.

Soddisfare il requisito di durabilità per un elemento strutturale in c.a., significa soddisfare la funzione di stato limite

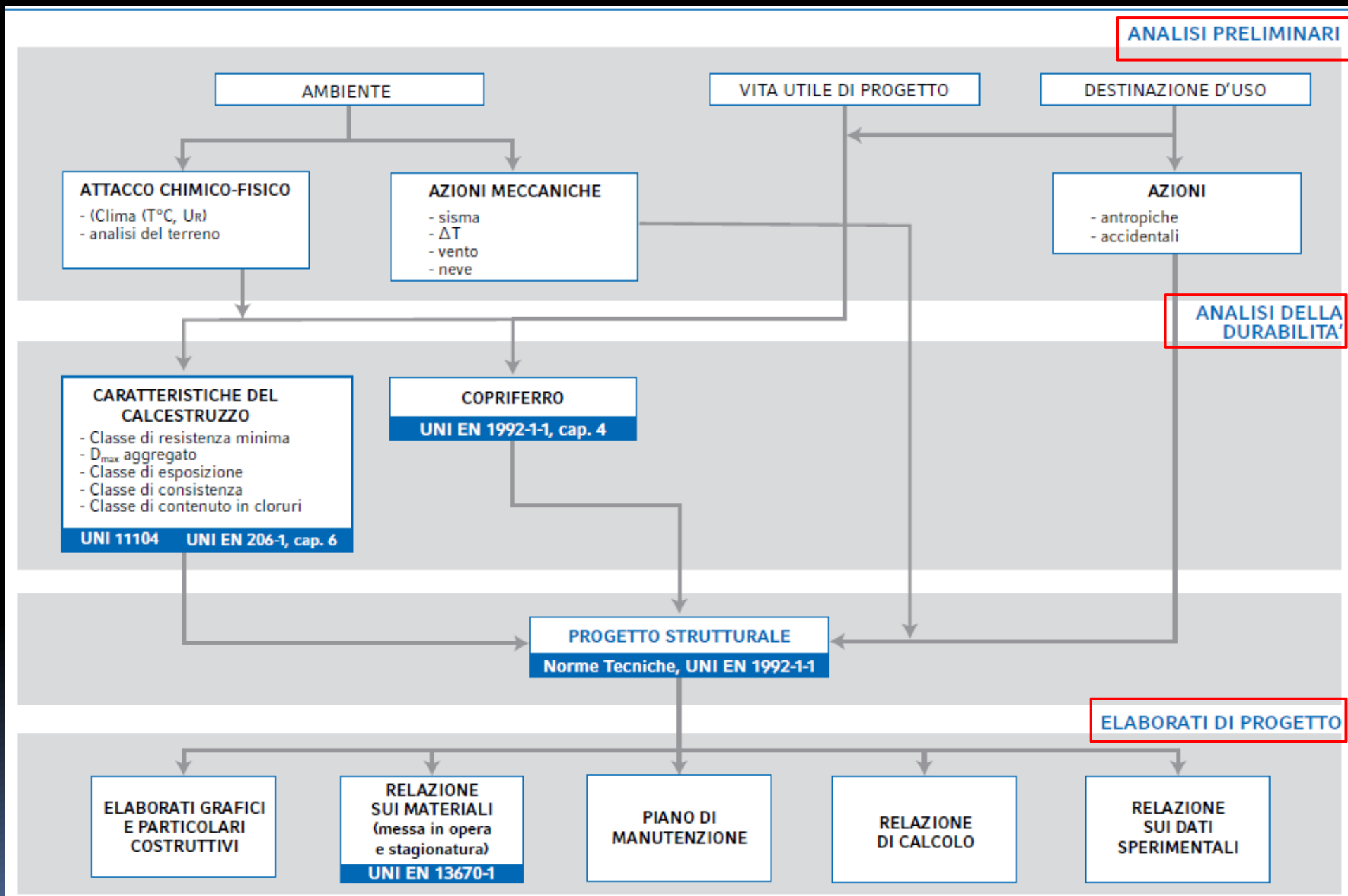
$$g(t) = R(t) - E(t)$$



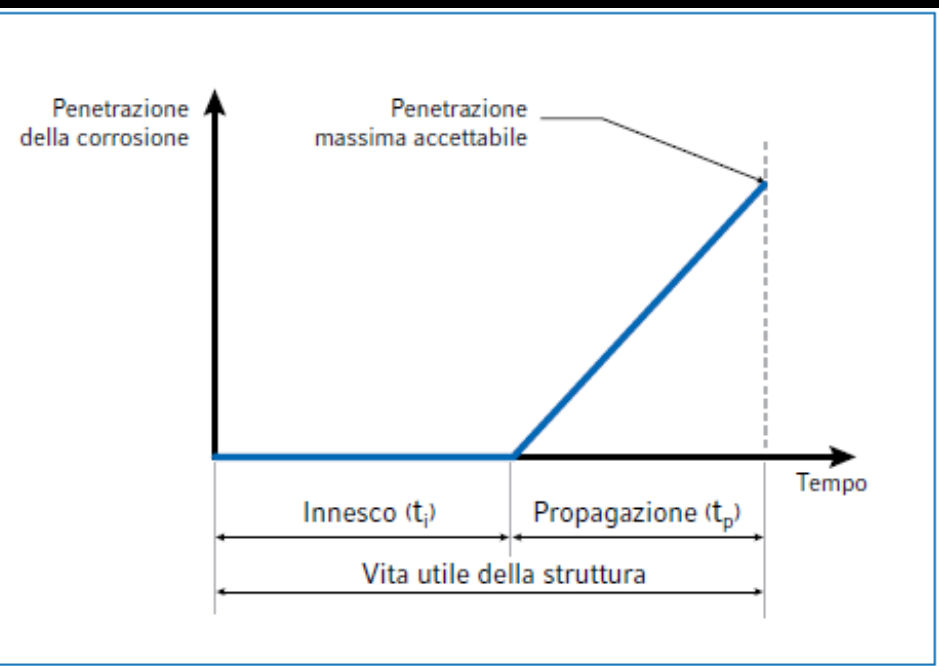
t_u = vita utile di progetto

Requisito di durabilità garantito se $t_1 > t_u$

Schema logico che il progettista deve seguire per adempiere alle esigenze di durabilità delle opere in c.a.

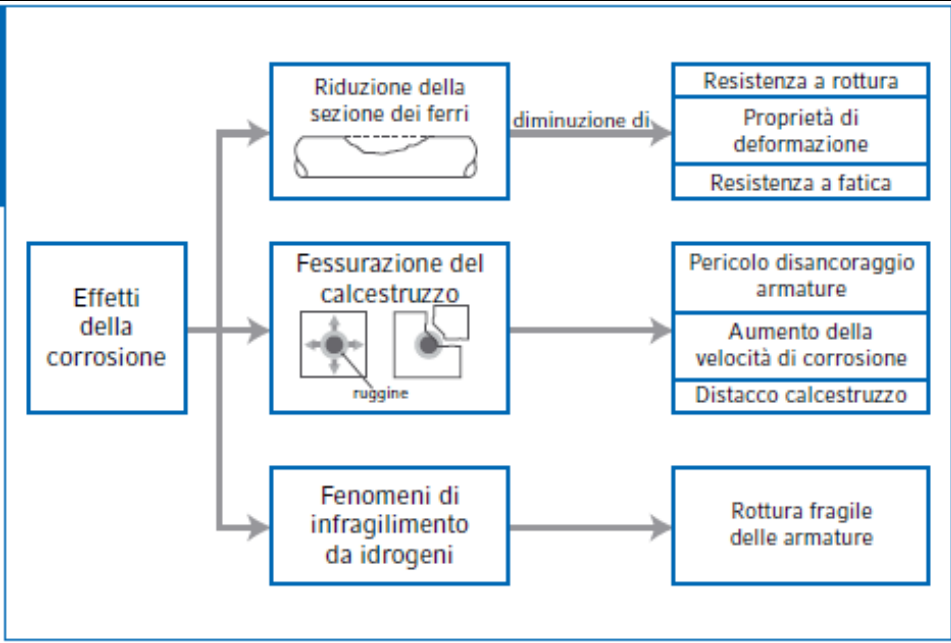


La modalità della perdita di resistenza nel tempo, e quindi la progressiva riduzione dei coefficienti di sicurezza stabiliti in fase di progetto, è schematizzata nelle figure sottostanti:



modello di Tuutti

effetti della corrosione



classe-consistenza esposizione-rapporto
contenuto-cemento **Copriferro-classe**
resistenza-classe **classe-esposizione**
rapporto-contenuto **riciclato-copriferro**
consistenza-calcestruzzo **strutturale-**
stagionatura classe-resistenza
stagionatura-undefined **classe-**
strutturale cemento-classe calcestruzzo-
riciclato

CLASSI DI ESPOSIZIONE

Dalle NTC può nascere qualche dubbio sulla scelta del documento che definisce le classi di esposizione. Ne vengono introdotti ben 3: le norme UNI EN 206-1, UNI 11104 e le Linee guida sul calcestruzzo strutturale recentemente rinnovate, facenti probabilmente riferimento a qualche bozza della norma EN 206 provvisoria.

Questa confusione è soprattutto formale, perché l'utilizzo dell'una o dell'altra non porta a differenze sostanziali. Per praticità è consigliabile fare riferimento alla UNI 11104, cioè alla norma di recepimento della norma europea, ultima pubblicata in ordine di tempo.



Nella UNI 11104, il **PROSPETTO 1** consente di individuare la corretta individuazione della classe di esposizione dell'opera e di ogni sua singola componente, in funzione dell'ambiente

Denominazione della Classe	Descrizione dell'ambiente	Esempi informativi di situazioni a cui possono applicarsi le classi di esposizione
1 Assenza di rischio di corrosione o attacco		
XO	Per calcestruzzo privo di armatura o inserti metallici: tutte le esposizioni eccetto dove c'è gelo e disgelo, o attacco chimico. Calcestruzzi con armatura o inserti metallici: in ambiente molto asciutto.	Interno di edifici con umidità relativa molto bassa. Calcestruzzo non armato all'interno di edifici. Calcestruzzo non armato immerso in suolo non aggressivo o in acqua non aggressiva. Calcestruzzo non armato soggetto a cicli di bagnato asciutto ma non soggetto ad abrasione, gelo o attacco chimico.
2 Corrosione indotta da carbonatazione		
Nota - Le condizioni di umidità si riferiscono a quelle presenti nel copriferro o nel ricoprimento di inserti metallici, ma in molti casi si può considerare che tali condizioni riflettano quelle dell'ambiente circostante. In questi casi la classificazione dell'ambiente circostante può essere adeguata. Questo può non essere il caso se c'è una barriera fra il calcestruzzo e il suo ambiente.		
XC1	Asciutto o permanentemente bagnato	Interni di edifici con umidità relativa bassa. Calcestruzzo armato ordinario o precompresso con le superfici all'interno di strutture con eccezione delle parti esposte a condensa, o immersa in acqua.
XC2	Bagnato, raramente asciutto	Parti di strutture di contenimento liquidi, fondazioni. Calcestruzzo armato ordinario o precompresso prevalentemente immerso in acqua o terreno non aggressivo.
XC3	Umidità moderata	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso in esterni con superfici esterne riparate dalla pioggia, o in interni con umidità da moderata ad alta.
XC4	Ciclicamente asciutto e bagnato	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso in esterni con superfici soggette a alternanze di asciutto ed umido. Calcestruzzo a vista in ambienti urbani. Superfici a contatto con l'acqua non compresa nella classe XC2.
3 Corrosione indotta da cloruri esclusi quelli provenienti dall'acqua di mare		
XD1	Umidità moderata	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso in superfici o parti di ponti e viadotti esposti a spruzzi d'acqua contenenti cloruri.
XD2	Bagnato, raramente asciutto	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso in elementi strutturali totalmente immersi in acqua anche industriale contenente cloruri (piscine).
XD3	Ciclicamente asciutto e bagnato	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso, di elementi strutturali direttamente soggetti agli agenti disgelanti o agli spruzzi continui di agenti disgelanti. Calcestruzzo armato ordinario o precompresso, elementi con una superficie immersa in acqua contenente cloruri e l'altra esposta all'aria. Parti di ponti, pavimentazioni e parcheggi per auto.

Denominazione della Classe	Descrizione dell'ambiente	Esempi informativi di situazioni a cui possono applicarsi le classi di esposizione
4 Corrosione indotta da cloruri presenti nell'acqua di mare		
XS1	Esposto alla salsedine marina ma non direttamente in contatto con l'acqua di mare	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso con elementi strutturali sulle coste o in prossimità.
XS2	Permanentemente sommerso.	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso di strutture marine completamente immerse in acqua.
XS3	Zone esposte agli spruzzi oppure alla marea.	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso con elementi strutturali esposti alla battigia o alle zone soggette agli spruzzi ed onde del mare.
5 Attacco di cicli gelo/disgelo con o senza disgelanti *)		
XF1	Moderata saturazione d'acqua, in assenza di agente disgelante	Superfici verticali di calcestruzzo con facciate e colonne esposte alla pioggia ed al gelo Superfici non verticali e non soggette alla completa saturazione ma esposte al gelo alla pioggia o all'acqua.
XF2	Moderata saturazione d'acqua in presenza di agente disgelante	Elementi come parti di ponti che in altro modo sarebbero classificati come XF1 ma che sono esposti direttamente o indirettamente agli agenti disgelanti.
XF3	Elevata saturazione d'acqua in assenza di agente disgelante	Superfici orizzontali in edifici dove l'acqua può accumularsi e che possono essere soggetto ai fenomeni di gelo, elementi soggetti a frequenti bagnature ed esposti al gelo.
XF4	Elevata saturazione d'acqua in presenza di agente antigelo oppure acqua di mare	Superfici orizzontali quali strade o pavimentazioni esposte al gelo ed ai sali disgelanti in modo diretto o indiretto, elementi esposti al gelo e soggetti a frequenti bagnature in presenza di agenti disgelanti o di acqua di mare.
6 Attacco chimico **)		
XA1	Ambiente chimicamente debolmente aggressivo secondo il prospetto 2 della UNI EN 206-1	Contenitori di fanghi e vasche di decantazione. Contenitori e vasche per acque reflue.
XA2	Ambiente chimicamente moderatamente aggressivo secondo il prospetto 2 della UNI EN 206-1	Elementi strutturali o pareti a contatto di terreni aggressivi.
XA3	Ambiente chimicamente fortemente aggressivo secondo il prospetto 2 della UNI EN 206-1	Elementi strutturali o pareti a contatto di acque industriali fortemente aggressive. Contenitori di foraggi, mangimi e liquami provenienti dall'allevamento animale. Torri di raffreddamento di fumi e gas di scarichi industriali.
*) Il grado di saturazione della seconda colonna riflette la relativa frequenza con cui si verifica il gelo in condizioni di saturazione: - moderato: occasionalmente gelato in condizioni di saturazione - elevato: alta frequenza di gelo in condizioni di saturazione. **) Da parte di acque del terreno e acque fluenti.		

Il **PROSPETTO 4** della UNI 11104 consente di individuare le caratteristiche minime che deve possedere il calcestruzzo per proteggere l'opera, in base alla combinazione di classi di esposizione, rapporto acqua/cemento massimo, contenuto minimo di cemento e classe di resistenza minima

	Classi di esposizione																	
	Nessun rischio di corrosione dell'armatura	Corrosione delle armature indotta dalla carbonatazione				Corrosione delle armature indotta da cloruri						Attacco da cicli di gelo/disgelo				Ambiente aggressivo per attacco chimico		
						Acqua di mare			Cloruri provenienti da altre fonti									
		X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2
Massimo rapporto a/c	-	0,60		0,55	0,50	0,50	0,45		0,55	0,50	0,45	0,50	0,50		0,45	0,55	0,50	0,45
Minima classe di resistenza*)	C12/15	C25/30		C28/35	C32/40	C32/40	C35/45		C28/35	C32/40	C35/45	C32/40	C25/30		C28/35	C28/35	C32/40	C35/45
Minimo contenuto di cemento (kg/m³)	-	300		320	340	340	360		320	340	360	320	340		360	320	340	360
Contenuto minimo in aria (%)													3,0 ^{a)}					
Altri requisiti												Aggregati conformi alla UNI EN 12620 di adeguata resistenza al gelo/disgelo				È richiesto l'impiego di cementi resistenti ai solfati ^{b)}		

*) Nel prospetto 7 della UNI EN 206-1 viene riportata la classe C8/10 che corrisponde a specifici calcestruzzi destinati a sottofondazioni e ricoprimenti. Per tale classe dovrebbero essere definite le prescrizioni di durabilità nei riguardi di acque o terreni aggressivi.

a) Quando il calcestruzzo non contiene aria aggiunta, le sue prestazioni devono essere verificate rispetto ad un calcestruzzo aerato per il quale è provata la resistenza al gelo/disgelo, da determinarsi secondo UNI 7087, per la relativa classe di esposizione.

b) Qualora la presenza di solfati comporti le classi di esposizione XA2 e XA3 è essenziale utilizzare un cemento resistente ai solfati secondo UNI 9156.

CLASSE DI CONSISTENZA

Rappresenta un indice della lavorabilità del calcestruzzo, cioè la capacità del calcestruzzo di lasciarsi introdurre e stendere nella cassaforma, di avvolgere le barre di armatura, di riempire l'interno della forma e di espellere l'eccesso di aria inglobata durante la fase di vibrazione. La specificazione della classe di consistenza, in fase di progetto, assume, nel contesto della durabilità dell'opera, una maggiore rilevanza rispetto al passato, in cui spesso è stata lasciata a discrezione dell'impresa.

È quindi consigliabile prescrivere la classe di consistenza:

- **S₁** o **V₄** nella prefabbricazione di manufatti estrusi e di elementi realizzati con **casseri scorrevoli**.
- **S₂** è utilizzata prevalentemente nella prefabbricazione
- **S₃** per strutture realizzate con **casseri rampanti**, pavimentazioni realizzate con laser screed, strutture non vibrato con **forti pendenze (falde)**, **getti non pompato, plinti poco armati**.
- **S₄** per getti effettuati direttamente dalla **canala dell'autobetoniera** di **pavimenti, solette, platee, plinti** e per getti **pompato a prevalente sviluppo verticale** come **muri e pilastri, normalmente armati**, travi, solette con forti pendenze.
- **S₅** per il getto di **strutture pompate a prevalente sviluppo orizzontale con pendenze modeste**, solai, travi, travi rovesce, platee, solette, plinti, pavimenti, setti, muri e pilastri fortemente armati.

COMPONENTI

I materiali che costituiscono i **componenti** per la produzione di calcestruzzo sono: **cemento, acqua, aggregati, additivi e aggiunte**. Ad eccezione dell'acqua tutte le altre componenti sono marcate CE.

Le NTC, in conformità alla norma europea UNI EN 206-1, consentono l'uso di aggregati di **riciclo**, condizionato dall'origine del materiale, dalla destinazione finale e dalle prestazioni del calcestruzzo, come riportato nella Tabella 11.1.III.



ATTENZIONE AI PROBLEMI DI ASSORBIMENTO DELL'ACQUA!!!

Origine delle materiale da riciclo	Classe del calcestruzzo	Percentuale di impegno
Demolizione di edifici (macerie)	= C 8/10	fino al 100%
Demolizione di solo calcestruzzo e c.a.	≤ C30/37	≤ 30%
	≤ 20/25	fino 60%
Riutilizzo di calcestruzzo interno negli stabilimenti di prefabbricazione qualificati - da qualsiasi classe	≤ 45/55	fino al 15%
	Stessa classe del calcestruzzo di origine	fino al 5%
da calcestruzzi > C45/55		

Tabella 11.2.III estratta dalle Norme tecniche_[N3] in cui vengono prescritti i quantitativi di aggreganti di riciclo che è possibile utilizzare nel confezionamento del calcestruzzo in base all'origine del materiale, l'impiego e le prestazioni del calcestruzzo.

COPRIFERRO

La norma prescrive nel capitolo 4.4.1 il valore nominale:

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

Tolleranza di
esecuzione

dove

$$c_{min} = \max \{ c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add} - 10mm \}$$

Margine di
sicurezza

Riduzione
per inox

in cui

$$\Delta c_{dev} = 10mm \text{ e } \Delta c_{dur,\gamma} = \Delta c_{dur,st} = \Delta c_{dur,add} = 0_{[N10]}$$

Riduzione per
protezione
aggiuntiva

$c_{min,b}$ è il copriferro minimo necessario per l'aderenza delle armature.

Per armature ordinarie $c_{min,b}$ è pari al diametro della barra, nel caso di barre singole e al diametro equivalente, nel caso di barre raggruppate. Se la dimensione nominale massima dell'aggregato è maggiore di 32mm, la norma raccomanda di maggiorare $c_{min,b}$ di 5 mm.

$c_{min,dur}$ è il copriferro minimo correlato alle condizioni ambientali e si ricava dai prospetti 4.3N, 4.4N e 4.5N in funzione della classe di esposizione, ricordando che la classe strutturale per un periodo di vita presunta della struttura pari a 50 anni è la classe strutturale S4.

Il prospetto 4.3N consente di variare la classe strutturale nella maniera seguente:

- per vite utili di progetto di 100 anni si incrementa la classe strutturale di 2;
- se vengono utilizzati calcestruzzi con classe di resistenza superiore ai minimi previsti dal prospetto 4.3N, si riduce la classe strutturale di 1;
- per elementi strutturali assimilabili a solette si riduce la classe strutturale di 1;
- se la produzione del calcestruzzo è sottoposta a un rigoroso controllo di qualità, si riduce la classe strutturale di 1

Classe Strutturale							
Criterio	Classe di esposizione secondo il prospetto 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1	XD2 / XS1	XD3 / XS2 / XS3
Vita utile di progetto di 100 anni	aumentare di 2 classi	aumentare di 2 classi	aumentare di 2 classi	aumentare di 2 classi	aumentare di 2 classi	aumentare di 2 classi	aumentare di 2 classi
Classe di resistenza ^{1) 2)}	≥ C30/37 ridurre di 1 classe	≥ C30/37 ridurre di 1 classe	≥ C35/45 ridurre di 1 classe	≥ C40/50 ridurre di 1 classe	≥ C40/50 ridurre di 1 classe	≥ C40/50 ridurre di 1 classe	≥ C45/55 ridurre di 1 classe
Elemento di forma simile ad una soletta (posizione delle armature non influenzata dal processo costruttivo)	ridurre di 1 classe	ridurre di 1 classe	ridurre di 1 classe	ridurre di 1 classe	ridurre di 1 classe	ridurre di 1 classe	ridurre di 1 classe
È assicurato un controllo di qualità speciale della produzione del calcestruzzo	ridurre di 1 classe	ridurre di 1 classe	ridurre di 1 classe	ridurre di 1 classe	ridurre di 1 classe	ridurre di 1 classe	ridurre di 1 classe

Prospetto 4.3N estratto dalla UNI EN 1992-1-1_[N4] che permette di variare la classe strutturale in funzione di alcuni criteri costruttivi.

Requisito Ambientale per $c_{\min, \text{dur}}$ (mm)							
Classe strutturale	Classe di esposizione secondo il prospetto 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1	XD2 / XS1	XD3 / XS2 / XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Prospetto 4.4N estratto dalla UNI EN 1992-1-1_[N4] che prescrive i valori del copriferro minimo $c_{\min, \text{dur}}$ con riferimento alla durabilità per acciai da armatura ordinaria, in accordo alla EN 10080.

Requisito Ambientale per $c_{\min, \text{dur}}$ (mm)							
Classe strutturale	Classe di esposizione secondo il prospetto 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1	XD2 / XS1	XD3 / XS2 / XS3
S1	10	15	20	25	30	35	40
S2	10	15	25	30	35	40	45
S3	10	20	30	35	40	45	50
S4	10	25	35	40	45	50	55
S5	15	30	40	45	50	55	60
S6	20	35	45	50	55	60	65

Prospetto 4.5N estratto dalla UNI EN 1992-1-1_[N4] che prescrive i valori del copriferro minimo $c_{\min, \text{dur}}$ con riferimento alla durabilità per acciai da precompressione.

LA STAGIONATURA

Le Linee guida sul calcestruzzo strutturale definiscono la STAGIONATURA come *“l’insieme di precauzioni che, durante il processo di indurimento, permette di trasformare l’impasto fresco in un materiale resistente, privo di fessure e durevole”*. Si ricorda che per STAGIONATURA PROTETTA s’intende il mantenimento delle casseforme per le superfici verticali del getto, oppure la protezione delle superfici orizzontali del getto dalle basse temperature, dagli agenti atmosferici o dalla rapida evaporazione dell’acqua d’impasto tramite fogli di materiale plastico, tessuti mantenuti umidi, agenti antievaporanti, nebulizzazione di acqua.

Durata minima della stagionatura per la classe di stagionatura 1: 12h⁵⁾

Durata minima della stagionatura per la classe di stagionatura 2

(corrispondente ad una resistenza della superficie del calcestruzzo pari al 35% della resistenza caratteristica prescritta)

Temperatura superficiale del calcestruzzo (t) °C	Tempo minimo della stagionatura, giorni ¹⁾		
	Sviluppo della resistenza del calcestruzzo ³⁾⁴⁾ $(f_{cm,2} / f_{cm,28}) = r$		
	Rapido $r \geq 0,50$	Medio $0,50 > r \geq 0,30$	Lento $0,30 > r \geq 0,15$
$t \geq 25$	1,0	1,5	2,5
$25 > t \geq 15$	1,0	2,5	5
$15 > t \geq 10$	1,5	4	8
$10 > t \geq 5$	2,0	5	11

Durata minima della stagionatura per la classe di stagionatura 3

(corrispondente ad una resistenza della superficie del calcestruzzo pari al 50% della resistenza caratteristica prescritta)

$t \geq 25$	1,5	2,5	3,5
$25 > t \geq 15$	2,0	4	7
$15 > t \geq 10$	2,5	7	12
$10 > t \geq 5$	3,5	9	18

Durata minima della stagionatura per la classe di stagionatura 4

(corrispondente ad una resistenza della superficie del calcestruzzo pari al 70% della resistenza caratteristica prescritta)

$t \geq 25$	3	5	6
$25 > t \geq 15$	5	9	12
$15 > t \geq 10$	7	13	21
$10 > t \geq 5$	9	18	30

1) Deve essere conteggiato anche il tempo di presa se eccedente le 5 ore

2) Per temperature sotto i 5°C la durata dovrebbe essere prolungata della permanenza al di sotto di 5°C

3) Lo sviluppo della resistenza del calcestruzzo è il rapporto delle resistenze medie a compressione dopo 2 giorni e a 28 giorni determinate da prove iniziali o basate su prestazioni del calcestruzzo conosciute di composizione simile (vedi EN 206-1 sezione 7.2)

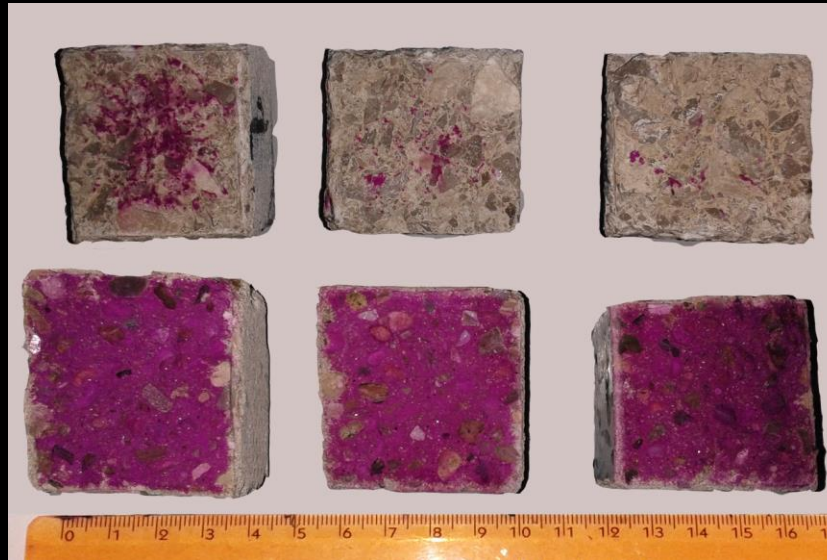
4) Per sviluppi della resistenza del calcestruzzo molto bassi, occorre dare le prescrizioni particolari nelle specifiche di esecuzione

5) Ammesso che il tempo di presa non superi 5h e la temperatura superficiale del calcestruzzo sia maggiore o uguale a 5°C.

Traduzione delle tavole 4, F.1, F.2, F.3 estratte dalla norma prEN 13670:2008_[N12] in cui viene prescritta la durata della stagionatura in funzione della temperatura superficiale e dello sviluppo della resistenza del calcestruzzo.

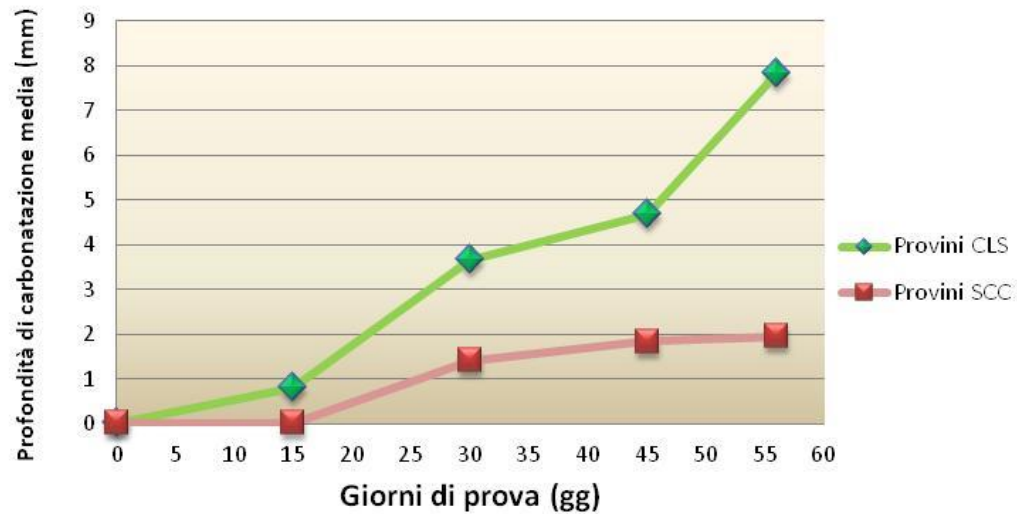
CALCESTRUZZO

ORDINARIO



AUTOCOMPATTANTE

Avanzamento della carbonatazione



Quali sono state le cause degli insuccessi
del calcestruzzo armato?

CHIMICHE, FISICHE, MECCANICHE, PROGETTUALI

Carbonatazione
Attacco da cloruri
Reazione Alkali aggregati
Ritiro
Variazioni termiche
Copriferro insufficiente

.....

Carbonatazione

Attacco da cloruri

Reazione Alkali aggregati

Ritiro

Variazioni termiche

Copriferro insufficiente

.....

È POSSIBILE ATTUARE UNA MANUTENZIONE PREVENTIVA? IN COSA PUÒ CONSISTERE?

2.4.1. VITA NOMINALE DI PROGETTO

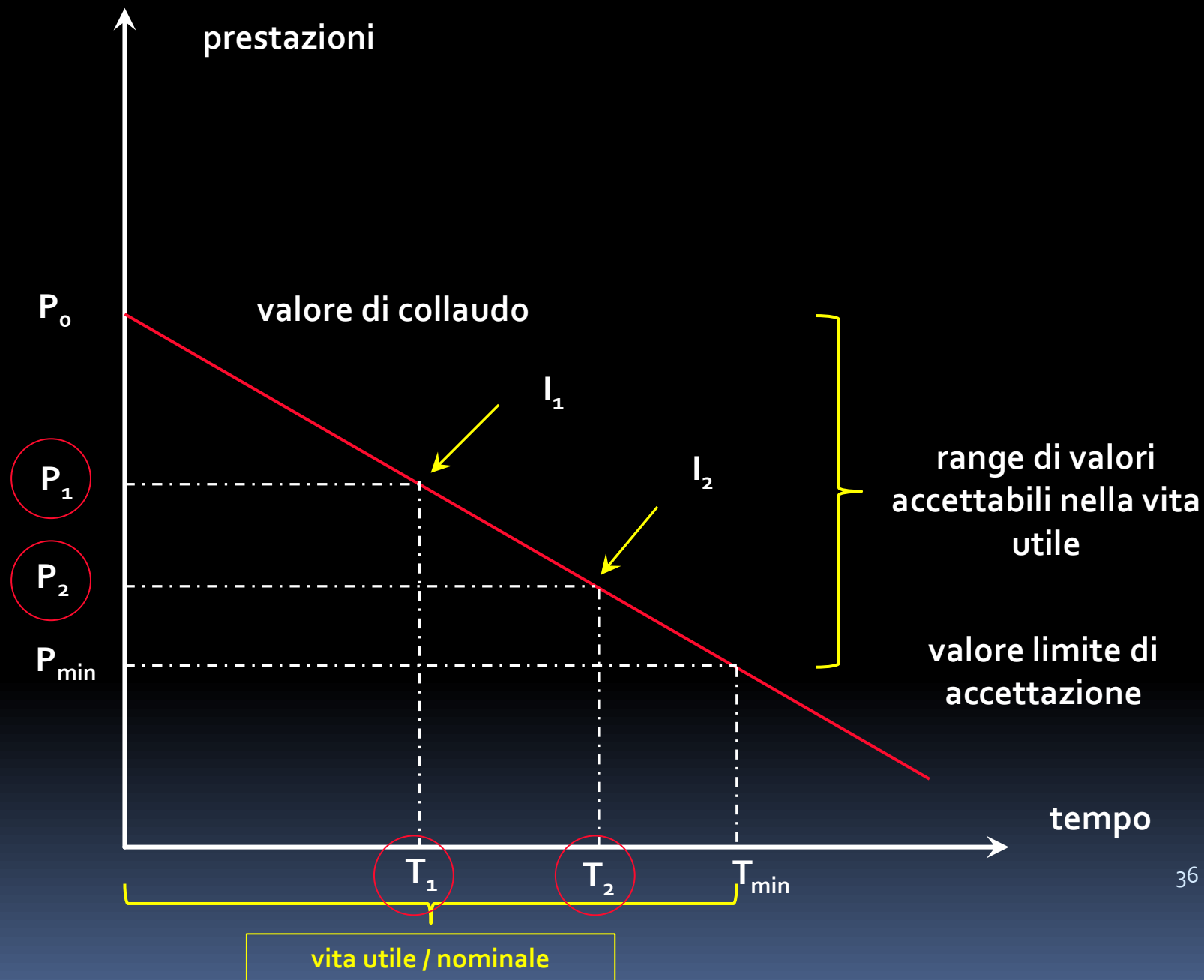
La vita nominale di progetto V_N di un'opera è convenzionalmente definita come il numero di anni nel quale è previsto che l'opera, purché soggetta alla necessaria manutenzione, mantenga specifici livelli prestazionali.

I valori minimi di V_N da adottare per i diversi tipi di costruzione sono riportati nella Tab. 2.4.I. Tali valori possono essere anche impiegati per definire le azioni dipendenti dal tempo.

Tab. 2.4.I – Valori minimi della Vita nominale V_N di progetto per i diversi tipi di costruzioni

TIPI DI COSTRUZIONI		Valori minimi di V_N (anni)
1	Costruzioni temporanee e provvisorie	10
2	Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari	50
3	Costruzioni con livelli di prestazioni elevati	100

NTC 2018



valore di collaudo

P_0

P_1

P_2

$P_{\min}$

prestazioni

I_1

I_2

valore limite di accettazione

tempo

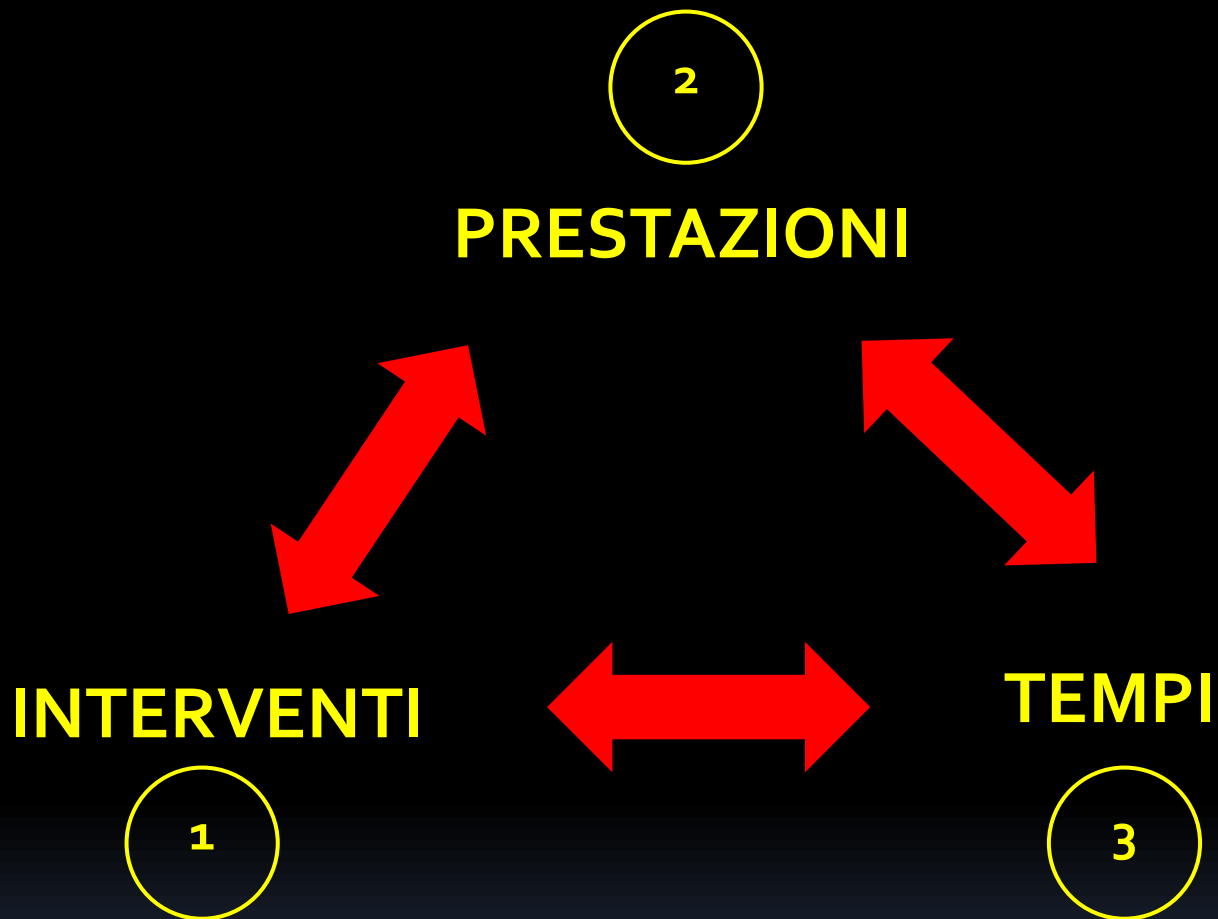
T_1

T_2

$T_{\min}$

37

vita utile / nominale



PER I CALCESTRUZZI: CORROSIONE DA CARBONATAZIONE



ANDAMENTO DELLA PENETRAZIONE DA CARBONATAZIONE



$$s = K * t^{1/n}$$

s [mm] SPESSORE STRATO CARBONATATO

n = 2 PER CALCESTRUZZI POROSI

K [mm/anno^{1/2}] COSTANTE DIPENDENTE DALLE CONDIZIONI AMBIENTALI :

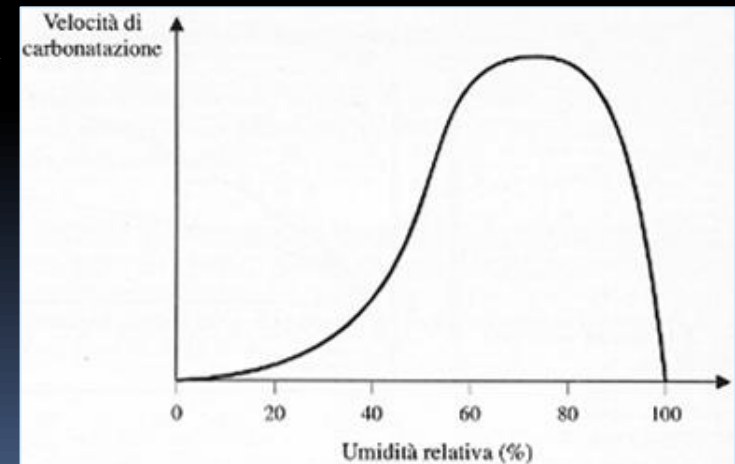
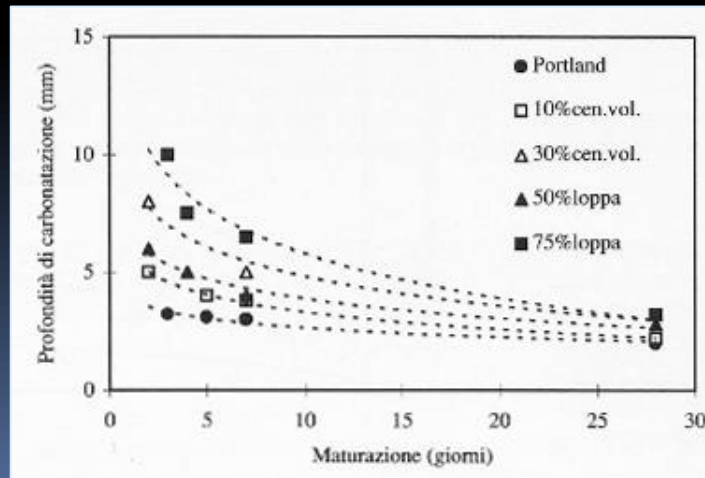
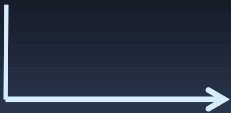
TENORE DI CO₂ > CO₂ → > VELOCITÀ DI CORROSIONE

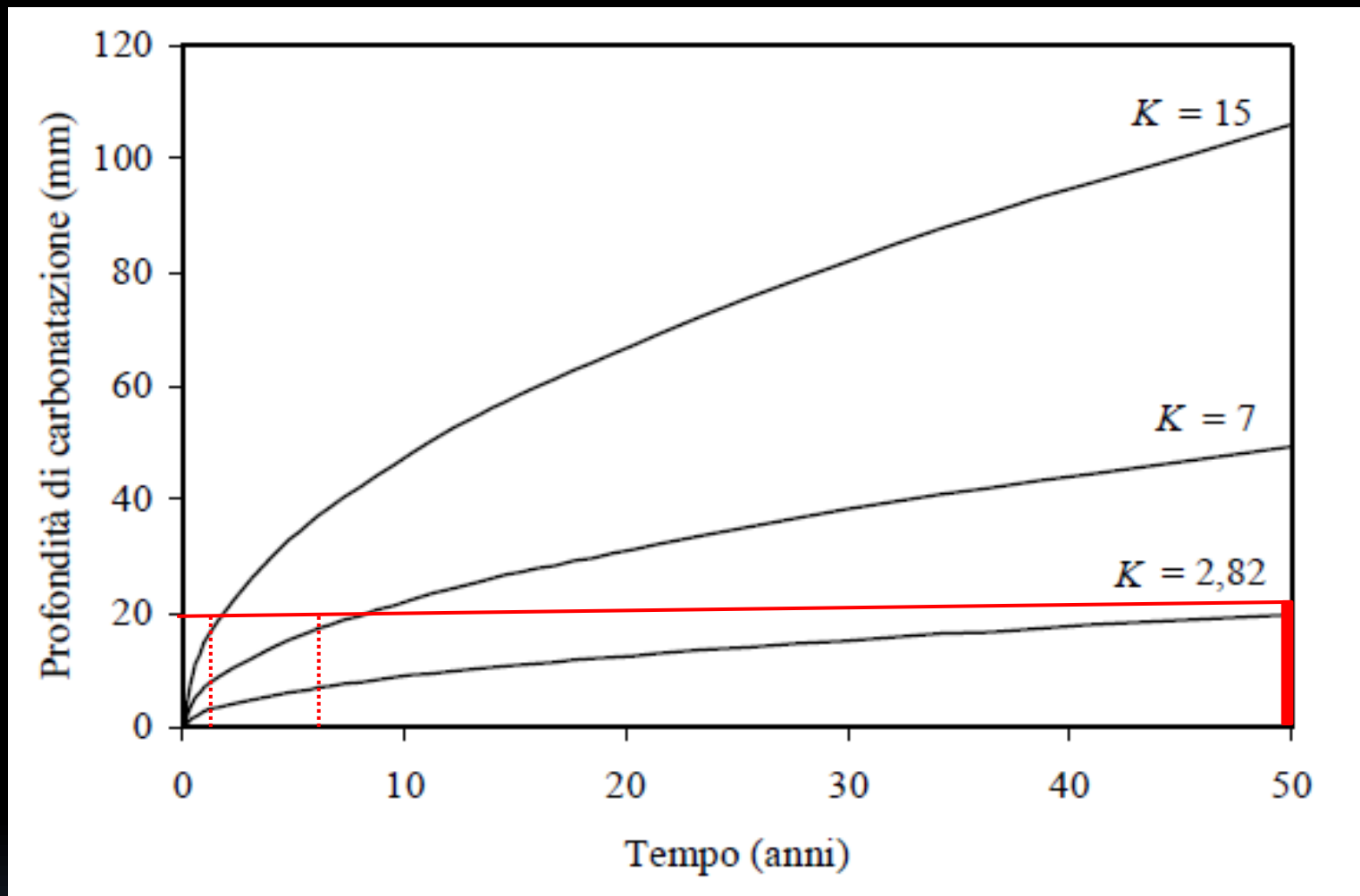
TEMPERATURA > T → > VELOCITÀ DI CORROSIONE

ALCALINITÀ DEL CLS → DIPENDE DALLA QUANTITÀ E DAL TIPO DI CEMENTO USATO

UMIDITÀ RELATIVA

RAPPORTO A/C,
MATURAZIONE





$2 \leq K < 6$ per calcestruzzi di elevata compattezza (cioè con basso A/C e ben costipati e maturati) con contenuto di cemento superiore a 350 kg/mc;
 $6 \leq K < 9$ per calcestruzzi di media compattezza;
 $K \geq 9$ per calcestruzzo porosi di bassa qualità con contenuto di cemento minore di 250 kg/mc

	COSTANTE DI DIFFUSIONE K_{CO_2} (mm/anni ^{1/2})		
R_{ck} (N/mm ²)	<i>Ambienti interni (U.R.= 65%)</i>	<i>Esterno protette dalla pioggia</i>	<i>Esterno esposte alla pioggia</i>
15	8.26	6.19	4.13
20	7.23	5.42	3.61
25	5.78	4.33	2.84
30	4.90	3.68	2.32
35	4.13	2.97	1.80
40	2.84	2.04	1.03
45	1.81	1.44	0.85

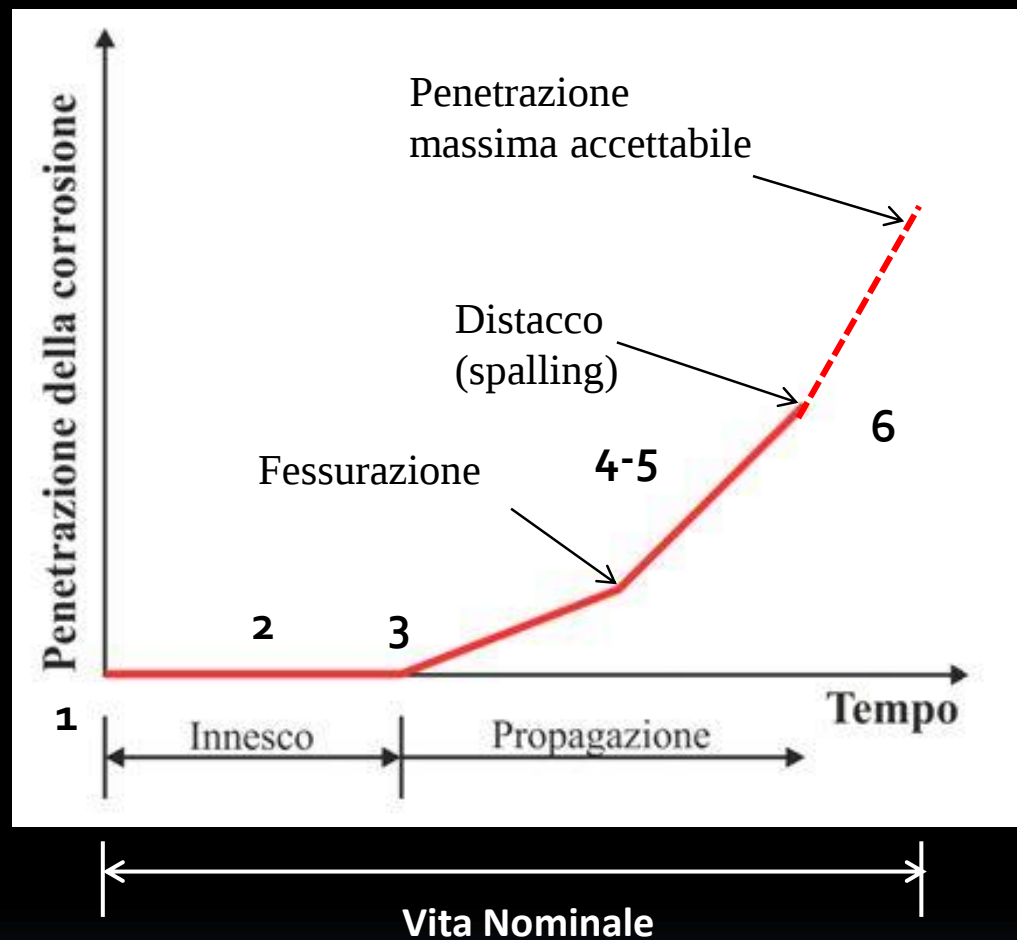
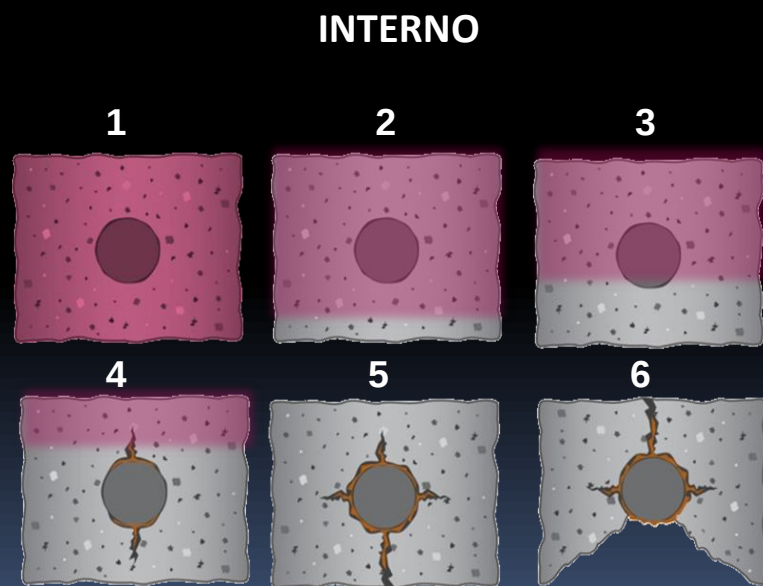
da *Concretum*
Prof. Luigi Coppola

FATTORI INFLUENTI:

a) innesco: A/C; CO₂; C; T; UR

b) fino alla fessurazione: O₂; UR; T

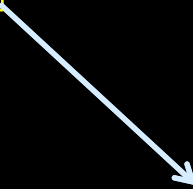
c) fino al distacco: UR; T



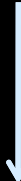
MODELLO DI TUUTTI

***È POSSIBILE ATTUARE UNA
MANUTENZIONE PREVENTIVA?
IN COSA PUÒ CONSISTERE?***

CALCOLO DEL TEMPO DI INNESCO

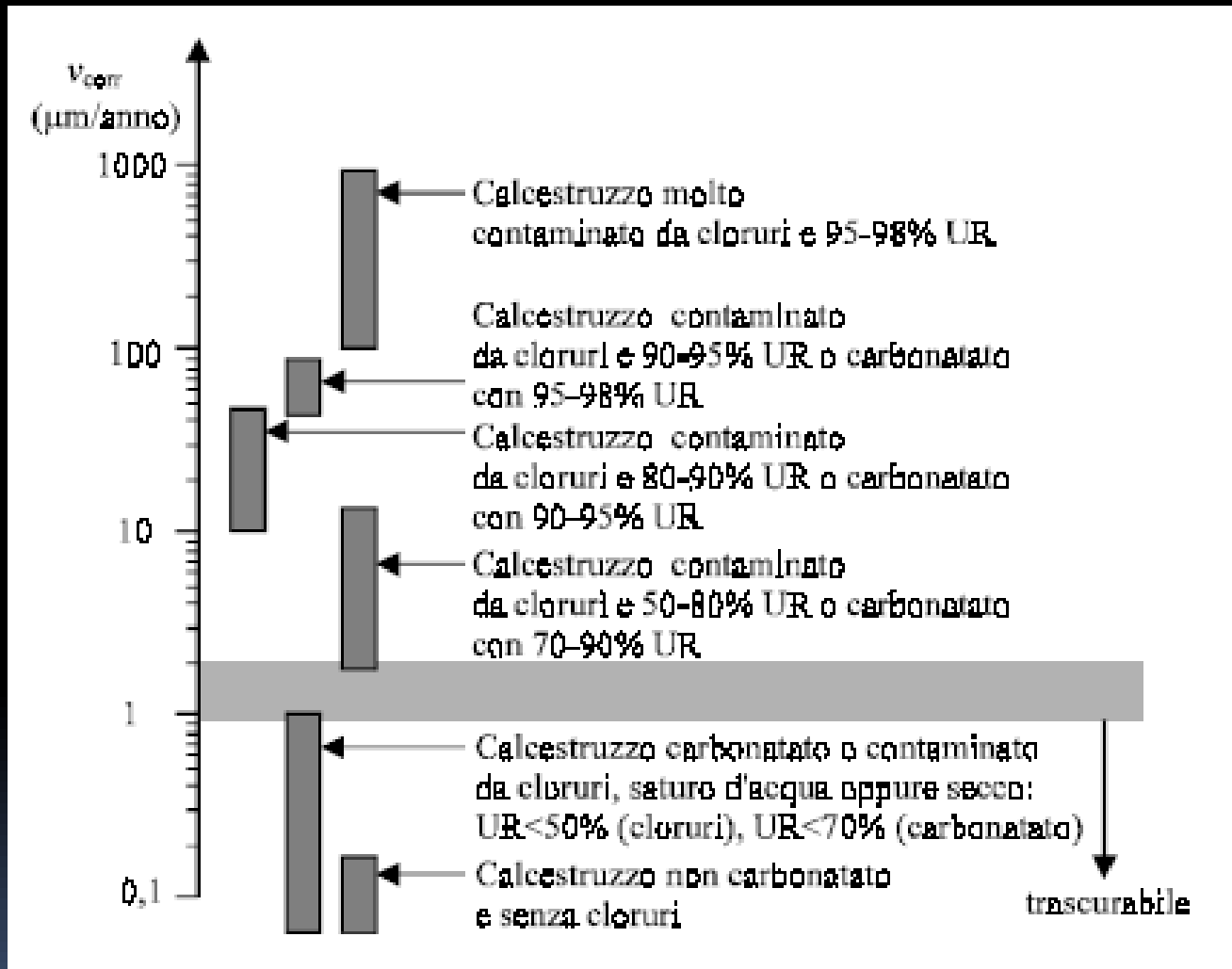
$$s = K * t^{1/n}$$


Per $n = 2$, $K = 7$ e $c = 20 \text{ mm} = s$, si ha:



$$t_i = \left(\frac{s}{K}\right)^n = \left(\frac{20}{7}\right)^2 = 8,16 \text{ anni}$$

CALCOLO DELLA VELOCITÀ DI AVANZAMENTO DELLA CORROSIONE



CORROSIONE DA CLORURI

NORMATIVA → MATERIE PRIME CON SIGNIFICATIVE CONCENTRAZIONI DI CLORURI

MECCANISMO → DISTRUZIONE FILM PROTETTIVO IN ZONE LOCALIZZATE (PITTING)

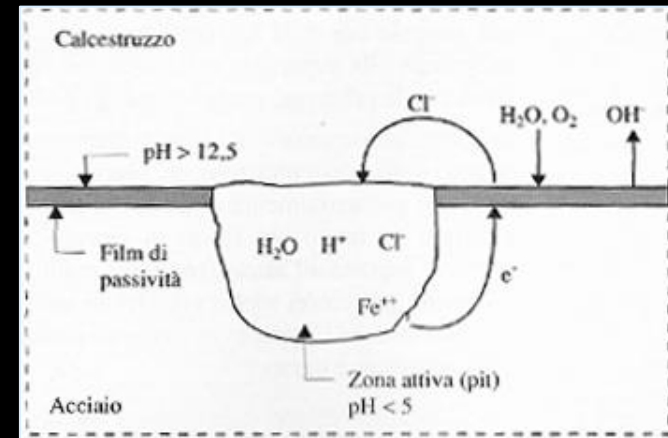
CONTENUTO CRITICO

STRUTTURE AEREE

BASSO TENORE $< 0,4\%$
ALTO TENORE $> 1\%$

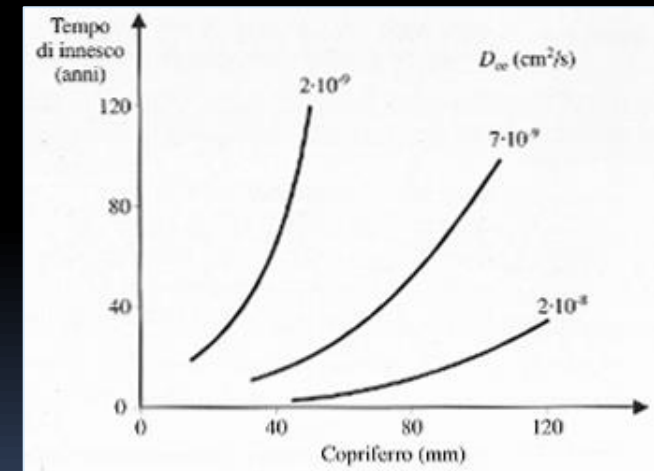
STRUTTURE IMMERSE

TENORE PIÙ ELEVATO DI UN ORDINE DI GRANDEZZA



TEMPO DI INNESCO

- TENORE DI CLORURI SULLA SUPERFICIE ESTERNA DEL CLS
- CARATTERISTICHE MATRICE CEMENTIZIA
- SPESSORE DI COPRIFERRO
- CONTENUTO CRITICO DI CLORURI



VELOCITÀ DI AVANZAMENTO

STRUTTURE AEREE

DA DECINE DI $\mu\text{m}/\text{anno}$ A $1 \mu\text{m}/\text{anno}$
 $> 2,34 \mu\text{m}/\text{anno}$

STRUTTURE IMMERSE

VALORI BASSI

→ FUNZIONE TENORE DI CLORURI ED UMIDITÀ

→ FUNZIONE O_2

CORROSIONE DA CLORURI

CORROSIONE DA CLORURI

STRUTTURE SOTTOPOSTE A TRATTAMENTO CON SALI DISGELANTI

- PONTI
- VIADOTTI
- PAVIMENTAZIONI
- PIAZZALI
- STRADE IN CALCESTRUZZO

STRUTTURE INDIRETTAMENTE ESPOSTE AI SALI DISGELANTI

- PARCHEGGI COPERTI
- GALLERIE STRADALI E FERROVIARIE (ZONE DEGLI IMBOCCHI IN CORRISPONDENZA DEI PIEDRITTI)
- BARRIERE STRADALI ED AUTOSTRADALI DI TIPO NEW JERSEY

STRUTTURE IN CONTATTO CON SOLUZIONI CONTENENTI CLORURO

- VASCHE DI PROCESSI INDUSTRIALI CHE UTILIZZANO SALAMOIE
- VASCHE DI IMPIANTI ITTICI
- TORRI DI RAFFREDDAMENTO CHE IMPIEGANO ACQUA DI MARE

STRUTTURE MARINE

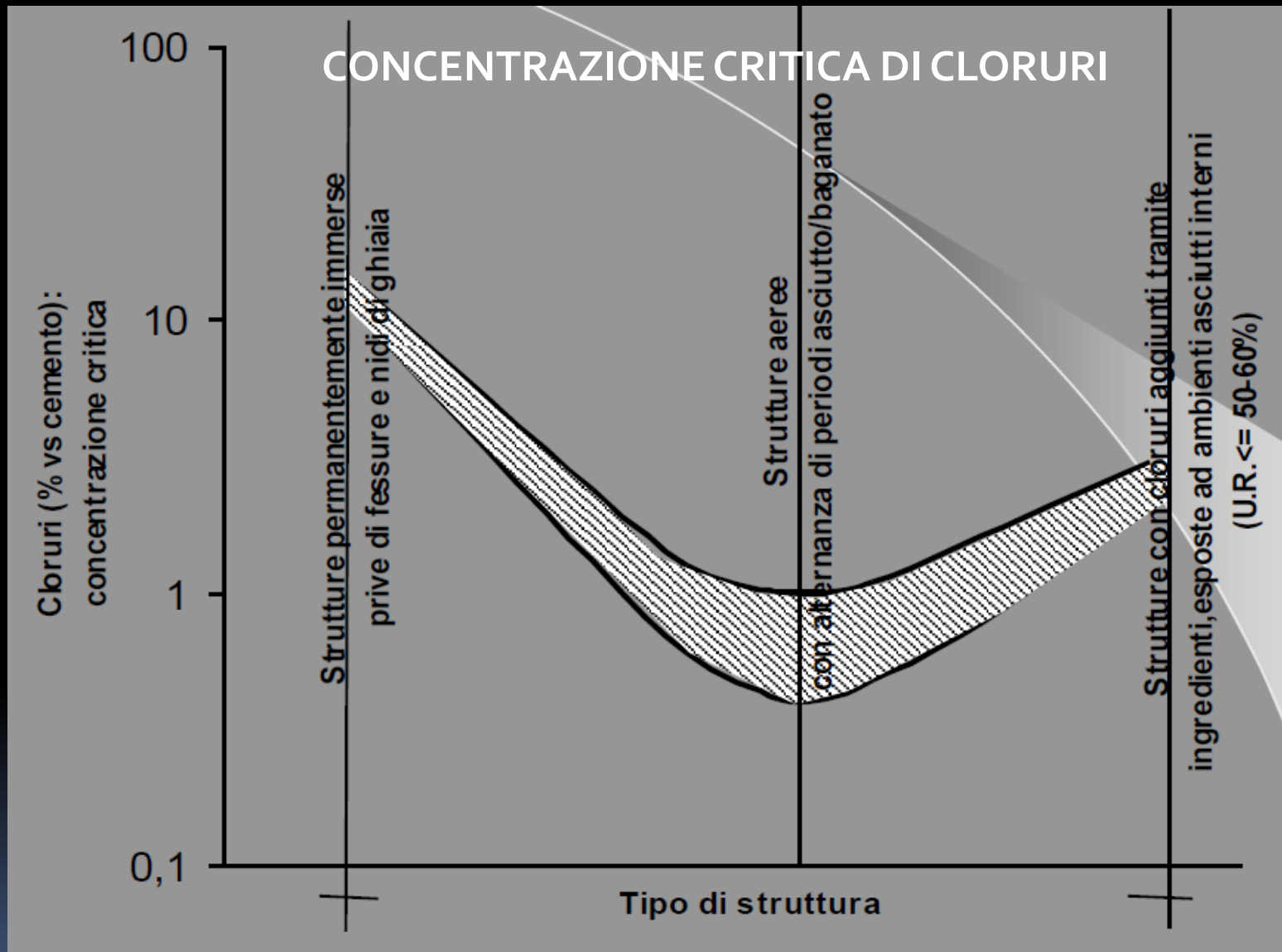
- EDIFICI E INFRASTRUTTURE DISTANTI FINO A 2-3 Km DALLA COSTA
- BANCHINE PORTUALI, MOLI, BACINI DI CARENAGGIO
- STRUTTURE OFF-SHORE

CLORURI AGGIUNTI ERRONEAMENTE MEDIANTE GLI INGREDIENTI DEL CALCESTRUZZO (ACQUA, ADDITIVI, AGGIUNTE E AGGREGATI)

da *Concretum*
Prof. Luigi Coppola



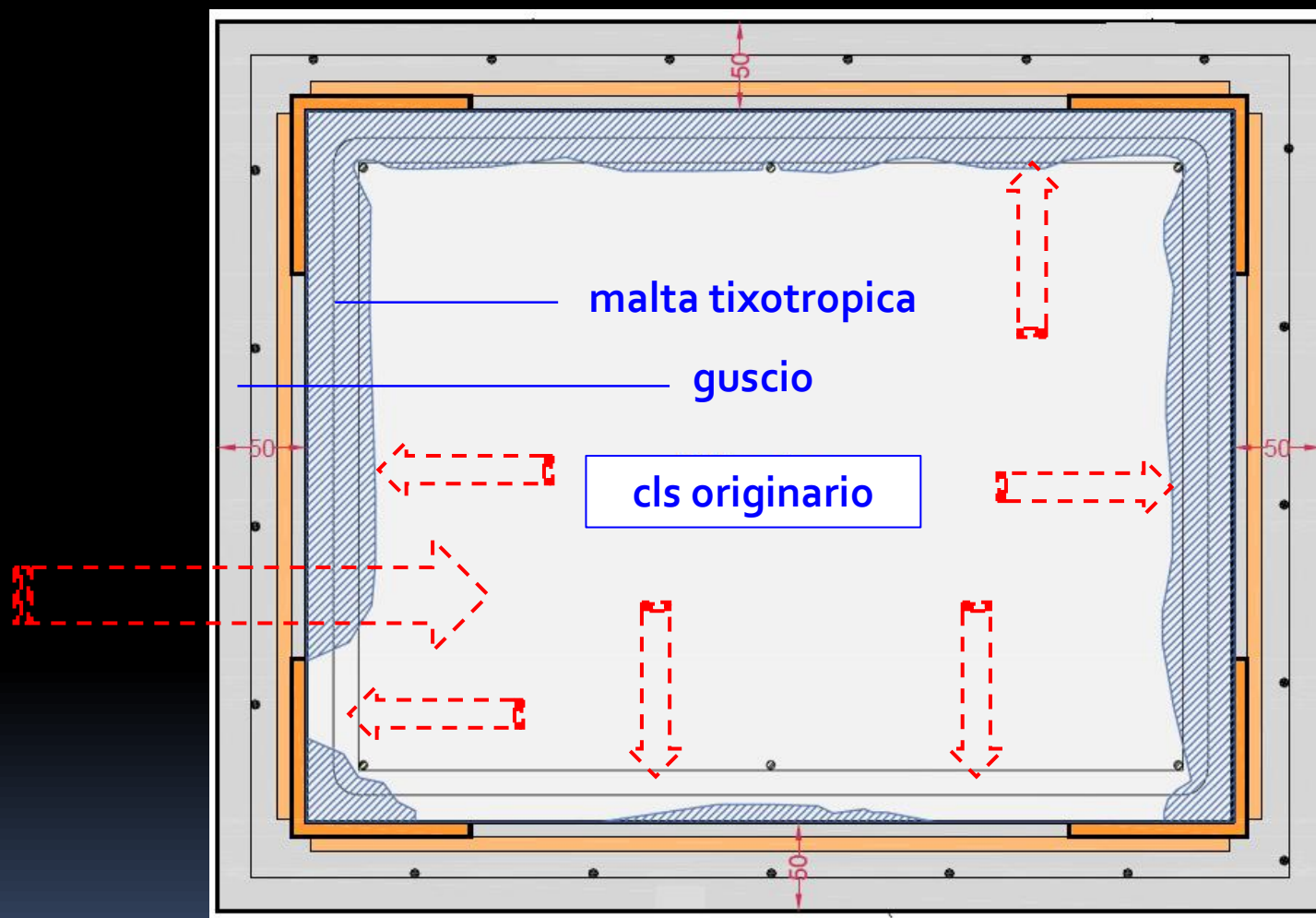
CORROSIONE DA CLORURI



CORROSIONE DA CLORURI



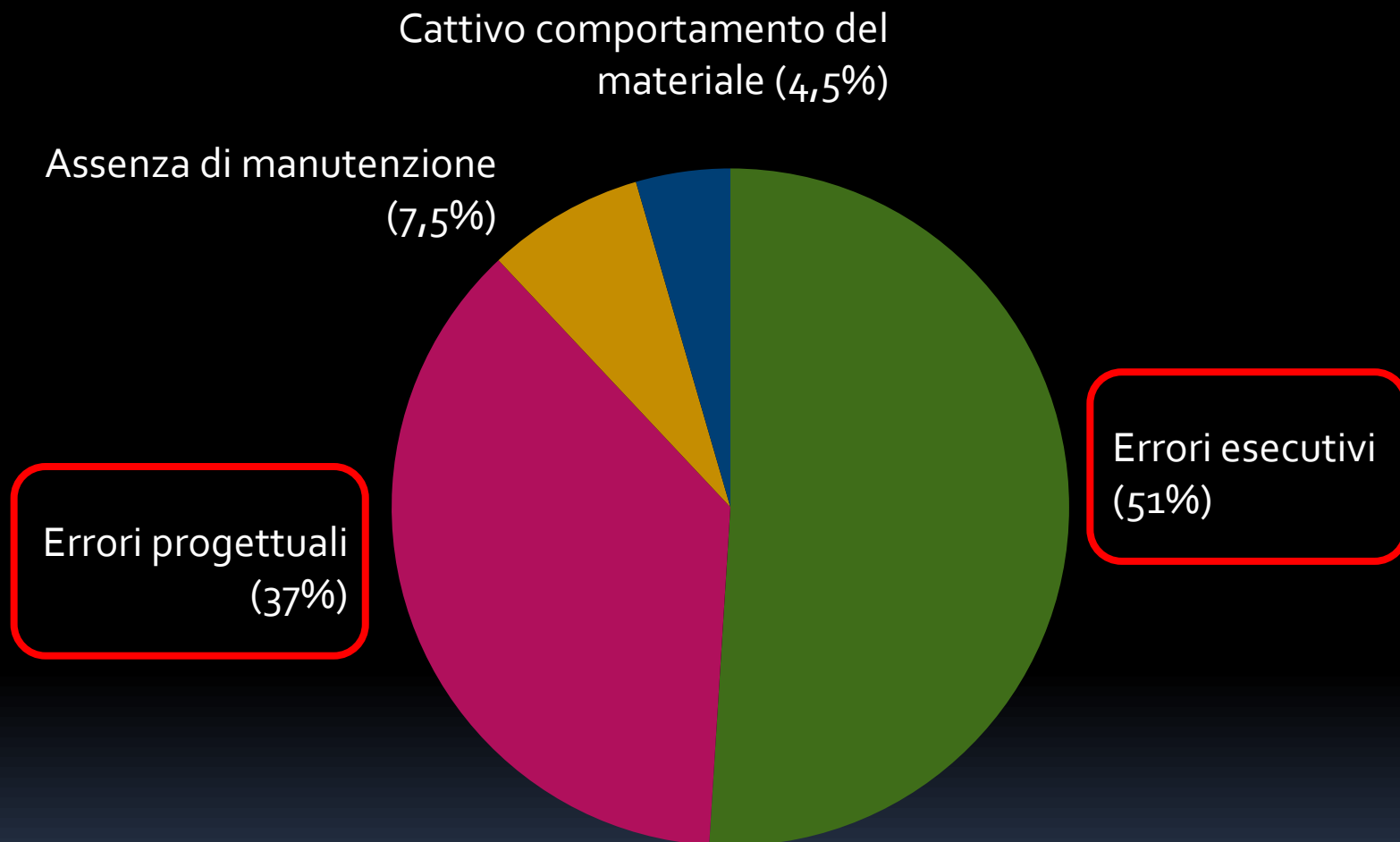
Attenzione all'illusione dei
rimedi (parziali)!!!!



Ricapitolando...

Classe di esposizione
Classe di resistenza
Classe di consistenza
Rapporto A/C
Mix design
Dmax / Ø
Copriferro
Consistenza
Stagionatura
Cicli gelo/disgelo
Rivestimenti
Protezione catodica
Manutenzione
Passivazione armature
Tipologia di calcestruzzo

CAUSE DI CORROSIONE DELLE ARMATURE DELLE OPERE IN C.A. (Patterson)



GRAZIE PER L'ATTENZIONE

Prof. Ing. Maurizio Nicolella
maurizio.nicolella@unina.it