



GIOVANNI FERRARELLA

IL DEGRADO E LA CORROSIONE NEGLI ELEMENTI IN C.A. E C.A.P.



 **PRONTO
GRAFILL** 

Clicca e richiedi di essere contattato
per **informazioni** e **promozioni**

  **WEBAPP INCLUSA**
CON AGGIORNAMENTO AUTOMATICO

**GRAFILL**

Giovanni Ferrarella

IL DEGRADO E LA CORROSIONE NEGLI ELEMENTI IN C.A. E C.A.P.

Ed. I (01-2021)

ISBN 13 978-88-277-0199-7

EAN 9 788827 701997

Collana **COME FARE PER** (40)



Prima di attivare Software o WebApp inclusi prendere visione della licenza d'uso.

Inquadrare con un reader il QR Code a fianco oppure collegarsi al link <https://grafill.it/licenza>

© **GRAFILL S.r.l.** Via Principe di Palagonia, 87/91 – 90145 Palermo
Telefono 091/6823069 – Fax 091/6823313 – Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail grafill@grafill.it

**CONTATTI
IMMEDIATI**



ProntoGRAFILL
Tel. 091 226679



Chiamami
chiamami.grafill.it



Whatsapp
grafill.it/whatsapp



Messenger
grafill.it/messenger



Telegram
grafill.it/telegram

Finito di stampare presso **Tipografia Publistampa S.n.c. – Palermo**

Edizione destinata in via prioritaria ad essere ceduta nell'ambito di rapporti associativi.

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.



**PRONTO
GRAFILL**

**CLICCA per maggiori informazioni
... e per te uno SCONTO SPECIALE**

SOMMARIO

PREFAZIONE

del Prof. Giovanni Minafò p. 7

INTRODUZIONE " 9

1. DEGRADO DEL CALCESTRUZZO	"	11
1.1. Composizione generale del calcestruzzo	"	11
1.2. Il degrado del calcestruzzo	"	12
1.2.1. Corrosione delle barre di armatura	"	12
1.2.1.1. La fase di innesco	"	15
1.2.1.2. Corrosione da carbonatazione	"	16
1.2.1.3. Velocità di propagazione	"	19
1.2.2. Corrosione da cloruri	"	19
1.2.3. Attacco solfatico	"	22
1.2.4. Reazione alcali-aggregati	"	23
1.2.4.1. ASR	"	23
1.2.5. Degrado da gelo e disgelo	"	24
2. CENNI SUL CEMENTO ARMATO	"	26
2.1. Introduzione al cemento armato e cenni storici	"	26
2.2. Caratteristiche generali del materiale	"	27
2.2.1. Aderenza calcestruzzo – acciaio	"	28
2.2.2. Stati tensionali e comportamento meccanico	"	29
2.3. Comportamento a compressione e prove sul calcestruzzo	"	30
2.4. Comportamento a trazione del calcestruzzo	"	32
2.5. Controlli di accettazione	"	32
2.5.1. Prelievo e prova dei campioni	"	33
2.5.2. Controlli di accettazione	"	34
2.5.2.1. Controllo di tipo A (§ 11.2.5.1, NTC 2018)	"	34
2.5.2.2. Controllo di tipo B (§ 11.2.5.2, NTC 2018)	"	34
2.5.3. Prescrizioni per i controlli di tipo A e di tipo B	"	35

2.5.4.	Controllo della resistenza del cls in opera e prove complementari	p.	36
2.5.5.	Prescrizioni relative al calcestruzzo confezionato con processo industrializzato	"	36
2.6.	Cenni sugli acciai.....	"	37
2.6.1.	Controlli di produzione e qualificazione degli acciai.....	"	37
3.	CEMENTO ARMATO PRECOMPRESSO	"	39
3.1.	Introduzione al cemento armato precompresso	"	39
3.2.	Acciai ad alta resistenza per c.a.p.....	"	40
3.3.	Sistemi di precompressione	"	42
3.4.	Pre-tensione	"	42
3.5.	Post-tensione.....	"	42
3.5.1.	Precompressione esterna.....	"	43
3.6.	Fasi di realizzazione	"	44
3.6.1.	Sistema a fili aderenti – Armatura pre-tesa.....	"	44
3.6.2.	Sistema a cavi scorrevoli – Armatura post-tesa.....	"	45
3.7.	Progetto della precompressione.....	"	46
3.7.1.	La scelta del tracciato dei cavi.....	"	46
3.8.	Trasferimento della precompressione.....	"	47
3.8.1.	Trasferimento della precompressione tramite post-tensione.....	"	47
3.8.2.	Trasferimento della precompressione tramite pre-tensione	"	48
3.9.	Effetti della precompressione	"	50
3.9.1.	Valutazione tramite carichi equivalenti	"	50
3.10.	Perdite e cadute di tensione	"	52
3.11.	Stati limite di esercizio	"	55
3.11.1.	Stati limite di controllo del livello tensionale.....	"	55
3.11.2.	Stato limite di fessurazione.....	"	56
3.12.	Stati limite ultimi	"	56
3.12.1.	Stato limite ultimo per sollecitazioni normali	"	57
3.12.2.	Stato limite ultimo per taglio (Eurocodice 2 – Progettazione delle strutture di calcestruzzo).....	"	57
3.13.	Modalità di rottura fragile.....	"	59
3.14.	Effetti della corrosione sugli acciai da precompressione	"	59
4.	DIAGNOSI	"	62
4.1.	Introduzione.....	"	62

4.2.	Durabilità	p.	62
4.3.	Diagnosi delle strutture	"	64
4.4.	Prove distruttive e non distruttive	"	64
4.4.1.	Indagini non distruttive su c.a. e c.a.p.	"	65
4.4.1.1.	Impact Echo per la valutazione dello stato di degrado di strutture in c.a.p.	"	70
4.4.1.2.	Valutazione del degrado di strutture in c.a.p. a cavi post tesi mediante Georadar	"	71
4.4.2.	Indagini distruttive su c.a. e c.a.p.	"	74
4.4.3.	Caratterizzazione del livello di degrado e qualità dei materiali	"	76
4.5.	Problemi legati alla corrosione nelle armature da precompressione	"	77
4.5.1.	Difetti di progettazione di elementi in c.a.p.	"	77
4.5.2.	Difetti di costruzione di elementi in c.a.p.	"	78
4.5.3.	Difetti di manutenzione di elementi in c.a.p.	"	78
5.	PREVENZIONE ED INTERVENTI	"	79
5.1.	Introduzione	"	79
5.2.	Requisiti per il copriferro	"	80
5.3.	Interventi	"	82
5.3.1.	Rallentamento della fase di innesco	"	83
5.3.2.	Influenza del fumo di silice	"	83
5.3.3.	Influenza delle ceneri volanti	"	83
5.4.	Sistemi di protezione	"	84
5.5.	Aspetti e disposizioni generali di progettazione	"	85
5.5.1.	Disposizioni per strutture in c.a.	"	85
5.5.2.	Disposizioni per strutture in c.a.p.	"	85
5.6.	Cemento armato precompresso – sistemi a cavi post-tesi	"	87
5.7.	Inibitori di corrosione	"	89
5.8.	Trattamenti superficiali	"	91
5.9.	Rivestimenti epossidici per acciai da c.a. e c.a.p.	"	91
5.10.	Armatura resistente alla corrosione	"	94
5.11.	Considerazioni finali	"	97
6.	INTRODUZIONE AL FOGLIO DI CALCOLO	"	99
6.1.	Valutazione della corrosione negli elementi in c.a. e c.a.p.	"	99
6.2.	Modello di degrado per l'armatura ordinaria	"	99
6.3.	Modello di degrado per l'armatura da precompressione	"	100
6.4.	Foglio di calcolo	"	102

7. CONTENUTI E ATTIVAZIONE DELLA WEBAPP	p. 103
7.1. Contenuti della WebApp.....	" 103
7.2. Requisiti hardware e software	" 103
7.3. Attivazione della WebApp.....	" 103
7.4. Assistenza tecnica sui prodotti Grafill (TicketSystem).....	" 104
 BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	 " 105

INTRODUZIONE

Fin dalla seconda metà del secolo scorso, il degrado delle strutture in cemento armato e cemento armato precompresso divenne uno dei maggiori problemi dell'ingegneria strutturale.

Molte delle strutture in cemento armato convenzionale e cemento armato precompresso costituenti il costruito residenziale e la rete stradale, come del resto quella della maggior parte dei Paesi Europei, sono stati costruiti con limitate conoscenze nei confronti della durabilità e affidabilità, facendo i conti con un panorama tecnologico in piena evoluzione e con sistemi costruttivi ancora in sperimentazione. Numerosi studi svolti nel corso degli anni hanno evidenziato come buona parte della responsabilità del degrado di tali opere, sia rappresentata dalla corrosione delle armature metalliche. I processi corrosivi sono responsabili di vari fenomeni di degrado, strutturale e non, come:

- riduzione dell'area della sezione trasversale delle armature;
- fessurazione del copriferro di calcestruzzo fino allo *spalling*, che porta alla riduzione della capacità portante della strutture e, in casi ancor più eccessivi, al collasso della struttura;
- perdita di aderenza tra acciaio e calcestruzzo, che si traduce in una modifica dello stato tensionale interno, possibili fenomeni di sfilamento e causa di rottura fragile dell'elemento.

È evidente come le strutture maggiormente esposte ai fenomeni corrosivi siano rappresentate da viadotti autostradali e ponti, sui quali si utilizzano sali antigelo per garantire la viabilità durante le stagioni invernali, al fine di contrastare la formazione di ghiaccio sul manto stradale. Una soluzione salina, come l'acqua di mare o la strada bagnata di sale come antigelo, favoriscono lo spostamento degli ioni nella reazione di ossidoriduzione e quindi aumentano la velocità di formazione di ossidi sulle armature metalliche, con conseguente fessurazione del calcestruzzo ed espulsione del copriferro. A tal proposito, si evidenzia come le strutture costruite negli tra la fine degli anni '50 e i primi anni '60 siano quelle più coinvolte da queste criticità a causa di una tecnologia sul c.a.p. ancora non del tutto matura e un'incontrollata cementificazione derivante dal noto boom edilizio di quegli anni.

Di conseguenza, è di fondamentale importanza un'accurata previsione del fenomeno della corrosione delle armature metalliche che, senza dubbio, richiede un'approfondita conoscenza del concetto di durabilità del cemento armato, delle proprietà di trasporto del calcestruzzo e la conoscenza della loro variabilità nel tempo.

Nelle strutture in c.a.p., a differenza di quelle in cemento armato convenzionale, risultano di maggiormente pericolosi due meccanismi corrosivi quali:

- 1) corrosione sotto sforzo;
- 2) infragilimento da idrogeno.

La prima è dovuta ad una cricca a cui si associa uno sforzo di trazione. Questa comporta una netta perdita delle proprietà meccaniche dell'elemento. L'infragilimento da idrogeno è la forma più grave per acciai ad alta resistenza. Gli atomi di idrogeno tendono a concentrarsi nelle zone di massima sollecitazione causando la propagazione della cricca e la rottura di schianto dell'elemento.

Numerosi studi universitari stanno analizzando i due fenomeni di collasso al fine di valutare il legame causa-effetto tra la corrosione e la risposta strutturale degli elementi in c.a. e c.a.p. al fine di favorire la ricerca in tal campo e ridurre i fenomeni corrosivi e le conseguenze ad essi assimilabili.

Ferrarella Giovanni

DEGRADO DEL CALCESTRUZZO

1.1. Composizione generale del calcestruzzo

I componenti del calcestruzzo si dividono in due gruppi principali: inerte, ossia gli aggregati, rappresentati fondamentalmente da sabbia, ghiaia o pietrisco; matrice cementizia, formato dall'impasto composta tra acqua e legante.

Tra i leganti il più diffuso è il cemento *Portland*, prodotto dalla cottura di terre calcareo-argillose, contenenti ossido di silicio (SiO_2), ossido di alluminio (Al_2O_3), ossido di ferro (Fe_2O_3), ossido di calcio (CaO) e ossido di magnesio (MgO) da cui si ottiene il «*clinker*», successivamente macinato assieme ad un piccola parte di gesso o anidrite solubile. Quest'ultimo, come noto, è un regolatore di presa, ossia ha lo scopo di ritardare di circa un'ora la fase di presa che altrimenti sarebbe troppo breve ed impedirebbe la lavorabilità del cemento.

Aggiungendo le corrette quantità d'acqua si producono reazioni chimiche tra acqua e cemento, ovvero il cosiddetto «*processo di idratazione*», con la produzione nel tempo variazioni fisiche e l'acquisizione delle proprietà desiderate:

- *processo di presa*, con conseguente perdita di lavorabilità che comincia ad avvenire dopo un'ora;
- *processo di indurimento*, in cui si avvia l'acquisizione delle proprietà meccaniche, dopo circa 10 ore dal getto.

Esistono alcune tipologie di cementi detti «*di miscela*» in cui, oltre ai sopra citati *clinker* e gesso, vengono macinati anche altri prodotti quali «*pozzolana*» o «*loppa d'altoforno*», grazie ai quali si ottengono rispettivamente il cemento pozzolanico e il cemento d'altoforno.

A questi componenti possono essere ulteriormente aggiunti diversi additivi in funzione alle proprietà che si vogliono ottenere o che si vogliono limitare:

- *additivi fluidificanti e superfluidificanti*: intervengono sull'impasto migliorando la lavorabilità del calcestruzzo a pari valore del rapporto acqua/cemento;
- *additivi aeranti (AEA – Air Entraining Agents)*: modificano la tensione superficiale dell'acqua e favorendo la formazione di bolle d'aria, sulla porosità del calcestruzzo;
- *additivi acceleranti*: modificano il grado di idratazione del cemento alle brevi stagionature così da ridurre i tempi di presa e indurimento della pasta cementizia.

Gli additivi riducono il grado di idratazione del cemento nelle prime ore, ritardando il processo di presa; esistono, sul mercato ancora una vasta gamma di additivi più o meno usati quali disarmanti, stagionanti, riduttori d'acqua, coloranti, antigelo, inibitori di corrosione, adesivi.

1.2. Il degrado del calcestruzzo

I principali fenomeni di degrado (figura 1.1) che interessano il calcestruzzo possono avere diverse cause: chimiche, fisiche, meccaniche, strutturali e biologiche.

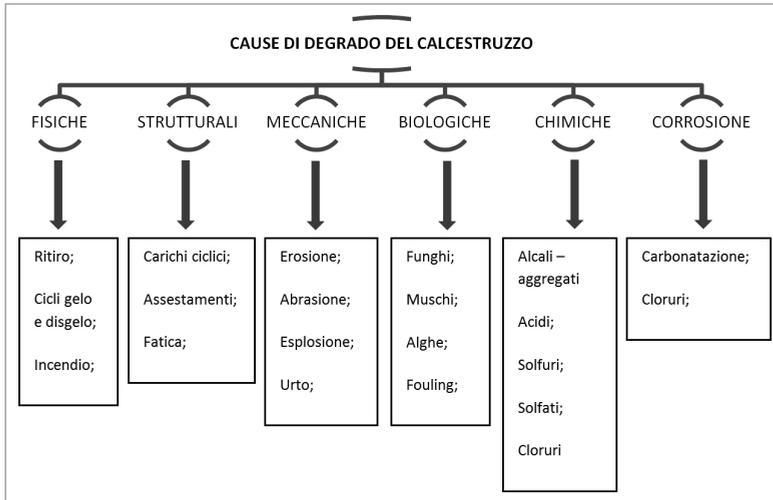


Figura 1.1. Classificazione delle cause di degrado

Tra le cause di natura chimica, quelle che interessano le strutture in calcestruzzo armato e cemento armato precompresso sono:

- 1) corrosione delle barre di armatura causata dalla carbonatazione del calcestruzzo o da ingresso di cloruri;
- 2) attacco solfatico della matrice cementizia;
- 3) reazione alcali-aggregati [9].

Mentre tra le cause fisiche, quelle che interessano il calcestruzzo sono rappresentate prevalentemente dal degrado causato dall'alternarsi di cicli di gelo e disgelo.

1.2.1. Corrosione delle barre di armatura

Relativamente al materiale metallico e alla funzione dell'elemento strutturale, la corrosione può avere diversi effetti:

- riduzione, anche significativa, della sezione resistente dell'elemento con conseguente compromissione della capacità strutturale dell'elemento;
- distorsioni o fessurazioni indotte dall'azione espansiva dei prodotti di corrosione, che si verifica quando il componente è vincolato completamente o parzialmente immerso in un materiale rigido e fragile;
- foratura del componente, quando l'attacco della corrosione è localizzato (*pitting*);
- per specifiche combinazioni di materiale metallico, ambiente e condizioni di sollecitazione meccanica, possono formarsi delle cricche che possono portare a pericolose rotture improvvise anche in materiali tenaci.

CENNI SUL CEMENTO ARMATO

2.1. Introduzione al cemento armato e cenni storici

Il cemento armato, più propriamente detto calcestruzzo armato o conglomerato cementizio armato, e comunemente abbreviato con c.a., è un materiale di origine artificiale che sfrutta l'unione del calcestruzzo, dotato di una buona resistenza a compressione ma con una modesta resistenza a trazione, con l'acciaio, dotato di un'ottima resistenza, sia a trazione che a compressione, oltre che di notevole duttilità.

L'armatura in acciaio, appunto, conferisce un comportamento duttile all'intero elemento strutturale in cemento armato.

L'invenzione del cemento armato si fa risalire alla metà dell'Ottocento quando l'inventore francese Joseph-Louis Lambot presentò all'Esposizione Universale di Parigi del 1855, una piccola imbarcazione realizzata con struttura metallica ricoperta di calcestruzzo. Joseph Monier, giardiniere di Parigi, costruì pochi anni dopo vasi da fiori, utilizzando cemento e struttura con gabbie metalliche e registrando il primo brevetto nel luglio 1867. Negli anni successivi, lo stesso, ottenne una serie di brevetti per la costruzione di tubi, serbatoi, solette piane e curve, scale e altri elementi in cemento armato, all'interno dei quali erano già contenuti i concetti elementari per la corretta e funzionale disposizione dell'armatura metallica.

L'importanza della nuova invenzione fu subito compresa ed apprezzata, per cui si ebbe un repentino sviluppo di nuovi brevetti a livello mondiale dalla Germania, all'Austria, alla Francia, all'Inghilterra e all'America.

In primissimo piano tra gli inventori in questo campo, l'Ingegnere francese Francois Henneique autore del brevetto di una trave con staffe nella quale si evincono i fondamentali della statica delle travi in cemento armato (armatura longitudinale dove occorre in base ai momenti sollecitanti e le staffe disposte a distanza variabile in funzione della sollecitazione di taglio) [76].

L'Ing. Henneique impostò anche una teoria statica del cemento armato di tipo approssimato che con semplici formule gli permise di progettare migliaia di strutture più o meno simili tra loro.

Anche nel nostro paese ci furono dei pionieri di questa nuova tecnica. Il brevetto francese del «*Système Hennebique*», invece, fu introdotto nel nostro paese con successo nel 1894, dall'Ingegnere Giovanni Antonio Porcheddu, che formulò successivamente anche alcuni miglioramenti allo stesso brevetto, relativi all'utilizzo dei pieghi nelle barre di armatura.

Tuttavia, pur essendo già utilizzato su larga scala l'utilizzo del cemento armato, in Italia venne regolamentato da una legislazione specifica soltanto a partire dal novembre 1939.

Tra i maggiori progettisti che svilupparono le potenzialità del cemento armato, l'architetto Le Corbusier, nella sua ricerca di forme plastiche e libertà spaziali, R. Maillart che propose forme strutturali innovative, e Pier Luigi Nervi la cui opera è volta a conseguire l'identificazione fra calcolo strutturale e soluzione formale.

2.2. Caratteristiche generali del materiale

Il calcestruzzo è un materiale non omogeneo le cui caratteristiche meccaniche dipendono dai suoi componenti e dai loro rapporti in termini di quantità in volume e in peso. Nonostante la sua non omogeneità, il suo comportamento macroscopico, può essere schematizzato con buona approssimazione con caratteristiche omogenee ed isotrope.

Le non linearità meccaniche del cemento armato sono legate ai legami costitutivi non lineari dei materiali che lo compongono e alle tensioni tangenziali che si instaurano sulla superficie cilindrica che circonda le barre, necessaria per assicurare la collaborazione tra i due materiali.

La collaborazione tra due materiali così eterogenei, il calcestruzzo e l'acciaio, è spiegata attraverso due aspetti fondamentali: il primo riguarda l'ottima aderenza manifestata tra i due materiali, in grado di trasmettere le tensioni dal calcestruzzo all'acciaio; inoltre i coefficienti di dilatazione termica dei due materiali sono sostanzialmente uguali tra loro ($10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Le strutture in conglomerato cementizio armato, rispetto ad altre strutture con materiali diversi, presentano notevoli vantaggi:

- grande adattabilità, per forma e per varietà di applicazioni pratiche: la forma di tali strutture, infatti, può adattarsi a un semplice getto di fondazione piuttosto regolare e simmetrico o al più complesso modello architettonico in elevazione (secondo opportuni criteri realizzativi e normativi);
- solidarietà e collaborazione fra le diverse parti, per la natura stessa della loro esecuzione;
- buona resistenza all'azione del fuoco;
- le spese di manutenzione, se eseguite regolarmente secondo quanto previsto nei piani di manutenzione dell'opera, risultano piuttosto contenute;
- l'acciaio, se sono seguite le prescrizioni normative a riguardo sia nella fase progettuale, in quella esecutiva e in quella manutentiva, risulta protetto nei riguardi degli agenti ossidanti dal calcestruzzo che lo avvolge;
- metodo costruttivo piuttosto economico, che garantisce semplicità e rapidità di esecuzione, seppur nel rispetto delle tempistiche minime per il raggiungimento di determinate prestazioni dettate dalla normativa.

Come è evidente, il cemento armato presenta anche degli aspetti negativi:

- scarsa coibenza acustica, dovuta alla monoliticità del cemento armato;
- scarsa coibenza termica, che giustifica la presenza dei cosiddetti «*ponti termici*» con conseguenze di natura igienico-sanitaria poiché può provocare la formazione di condensazione superficiale e di muffa all'interno degli ambienti abitativi e di tipo ener-

CEMENTO ARMATO PRECOMPRESSO

3.1. Introduzione al cemento armato precompresso

Come detto nel precedente capitolo, il punto debole del cemento armato ordinario è la scarsa resistenza a trazione del calcestruzzo, cui si rimedia affidando interamente alle barre in acciaio opportunamente collocate il compito di assolvere tali sforzi. L'idea di migliorare le prestazioni del calcestruzzo con la precompressione è pressoché contemporanea ai primi studi sul cemento armato convenzionale.

Solo in tempi recenti si sono avuti risultati apprezzabili non per motivi legati a nuovi sviluppi teorici, bensì alla disponibilità di materiali più affidabili, di adeguate tecniche di produzione e all'evoluzione tecnologica nel mondo dell'ingegneria e delle costruzioni.

La precompressione, di per sé, consiste in un particolare stato di tensione e di deformazione artificialmente indotto nella struttura al fine di migliorare il comportamento strutturale di quest'ultima. Si induce preventivamente nella struttura uno stato tensionale opposto a quello a cui essa sarà soggetta durante l'esercizio ossia durante l'azione di carichi esterni.

Essenzialmente, le modalità con cui può essere realizzata la tecnica della precompressione sono due, ossia:

- 1) attraverso uno spostamento impresso ai vincoli (citata per ragioni storiche ma fondamentalmente fornisce scarsi risultati);
- 2) attraverso l'utilizzazione di armature opportunamente tese prima dell'applicazione dei carichi.

Per ottenere vantaggi apprezzabili attraverso questa tecnica, si deve disporre di acciai armonici con elevatissimo limite di snervamento; infatti le attuali armature da precompressione hanno, a parità di modulo elastico E , tensioni di snervamento di 2000 MPa, con tensioni al tiro di circa 1400 MPa e relative pre-deformazioni dell'ordine dello 0,7%.

La precompressione può essere:

- 1) *Integrale*: quando sotto i carichi di esercizio non si manifestano tensioni di trazione (nella direzione della precompressione);
- 2) *A sezione interamente reagente*: quando la tensione di trazione massima non supera, sempre in corrispondenza dei carichi di esercizio, un valore limite accettabile;
- 3) *Parziale*: quando non sono fissati limiti alla tensione di trazione e si opera in regime fessurato.

Nel primo caso risulta sufficiente la sola armatura di precompressione ai fine del soddisfacimento delle verifiche in esercizio e a rottura. Mentre negli ultimi due casi risulta necessario inserire delle armature aggiuntive per soddisfare le verifiche di resistenza [4, 13, 42, 48].

3.2. Acciai ad alta resistenza per c.a.p.

Gli acciai da precompressione sono utilizzati per strutture in cemento armato precompresso, generalmente sotto forma di barre trecce o trefoli a 7 fili (figura 3.1.). Come detto, la caratteristica principale di questi acciai, riguarda il valore delle tensioni di snervamento, che in media risulta compreso tra 1000 e 2000 MPa.

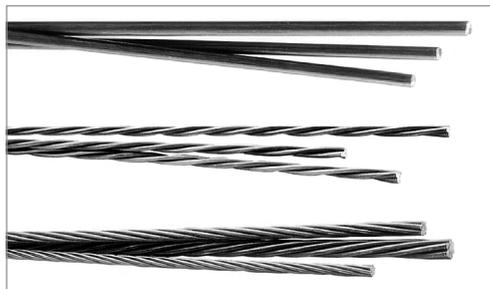


Figura 3.1. Cavi per precompressione

[Zavanella, Leti, Veggetti, *Progettazione, costruzioni e impianti*, Corso su Zanichelli.it]

L'Eurocodice 2 (1992) prevede che gli acciai per precompressione siano classificati in base a determinate proprietà (vedi tabella 3.1).

Tabella 3.1. Caratteristiche meccaniche acciai da precompressione

Tipo di acciaio	Barre	Fili	Trefoli	Trefoli e fili sagomati	Trecce
Tensione caratteristica di rottura ... f_{ptk} N/mm ²	≥ 1000	≥ 1570	≥ 1860	≥ 1820	≥ 1900
Tensione caratteristica allo 0,1% di deformazione residua ... $f_{p(0,1)k}$ N/mm ²	–	≥ 1420	–	–	–
Tensione caratteristica all'1% di deformazione totale ... $f_{p(1)k}$ N/mm ²	–	–	≥ 1670	≥ 1620	≥ 1700
Tensione caratteristiche di snervamento f_{pyk} N/mm ²	≥ 800	–	–	–	–
Allungamento sotto carico massimo A_{gt}	≥ 3,5	≥ 3,5	≥ 3,5	≥ 3,5	≥ 3,5

Gli acciai per precompressione sono classificati in base alle seguenti proprietà:

- 1) **Tipo di acciaio:** rappresenta i valori caratteristici del carico di snervamento e del carico a rottura.
- 2) **Classe dell'acciaio:** rappresenta il comportamento a rilassamento, ossia la diminuzione dello sforzo opposto al materiale nel tempo, quando quest'ultimo viene sottoposto ad una deformazione costante. Questo fenomeno può avere effetti davvero significativi nelle strutture in cemento armato precompresso perchè gli acciai sono sottoposti a sollecitazioni molto elevate, per cui anche una piccola diminuzione dello sforzo opposto dall'acciaio potrebbe portare ad una significativa diminuzione dello stato di precompressione. Il rilassamento è misurato dalla riduzione percentuale del carico in un provino a cui viene imposta una deformazione costante per un tempo.

DIAGNOSI

4.1. Introduzione

La richiesta di informazioni e di un'approfondita conoscenza sulla corretta diagnosi dei fenomeni di degrado in strutture in cemento armato e in cemento armato precompresso è sempre più frequente, articolata ed esigente. Soprattutto perché, dopo un periodo più o meno lungo di vita di una struttura, cominciano ad essere evidenti segni di deterioramento estetico e, come spesso succede, funzionale.

I fenomeni di degrado che interessano queste strutture hanno origine, come approfondito nei capitoli precedenti, dall'utilizzo di calcestruzzi non sempre adeguatamente proporzionati alle condizioni ambientali di esercizio, dall'insufficiente spessore del copriferro degli elementi strutturali, dal non corretto smaltimento di acque meteoriche, da difetti di sigillatura o di intasamento di condotti, da una manutenzione programmata che spesso viene trascurata.

La principale difficoltà nella valutazione del livello di degrado è rappresentata dall'impossibilità di accedere direttamente, ed in maniera poco invasiva, alle armature per cui si ricorre, oltre che ad una attenta valutazione visiva dello stato fessurativo e del degrado, a tecniche di indagine di tipo indiretto (che sia puntuale o globale).

Prima di approfondire tutte le tematiche riguardanti le diagnosi delle strutture in c.a. e c.a.p. è opportuno introdurre alcuni sintetici, ma significativi, concetti riguardanti il concetto di durabilità delle strutture. Realizzare strutture realmente durabili, infatti, significa assicurare ottimali condizioni di esercizio dell'intera struttura, consente una gestione programmata degli interventi di manutenzione e facilita l'approccio alla diagnosi di eventuali fenomeni di degrado più o meno seri [9, 43, 45].

4.2. Durabilità

Il concetto di durabilità viene introdotto nella Normativa Tecnica Italiana, sia pure in maniera del tutto generica, nel D.M. 26 marzo 1980. È bene sottolineare che però, ai primi del secolo scorso, il R.D. del 10 gennaio 1907, la Normativa Tecnica Italiana conteneva già quelle regole che implicitamente assicuravano una buona durata nel tempo delle opere, seppur in maniera superficiale e basata sulle conoscenze in materia ancora in via di sviluppo.

Bisogna attendere, però, il D.M. 14 febbraio 1992, attraverso il recepimento della UNI 9858 versione italiana della UNI ENV 206:1991, per avere una chiara ed esplicita interpretazione dei concetti e delle procedure indispensabili per la progettazione di opere durevoli e nel rispetto di determinati requisiti.

Tra i numerosi parametri con un ruolo fondamentale per il soddisfacimento dei requisiti che identificano la durabilità del calcestruzzo, il primo ed importante da definire durante la progettazione è il rapporto acqua/cemento (a/c).

La scelta di un determinato rapporto a/c durante la fase progettuale di un conglomerato cementizio, deriva fondamentalmente:

- dalle prescrizioni sulla durabilità, che fissano valori massimi del rapporto a/c in funzione delle classi di esposizione;
- dalla richiesta di valori di resistenza meccanica adeguati alle sollecitazioni di progetto, statiche e dinamiche.

Secondo quanto previsto nel D.M. 17 gennaio 2018 (NTC 2018) si può fare riferimento alla norma UNI 11104:2016, in ottemperanza a quella europea UNI ENV 206:1991, nel richiedere un elevato dosaggio di cemento (c), un basso rapporto a/c e conseguentemente un'elevata resistenza caratteristica a compressione (R_{ck}) per rallentare la velocità di penetrazione degli agenti aggressivi. Inoltre, l'Eurocodice 2 impone l'adozione di uno spessore di copriferro (c_f) relativamente alto per allungare il tempo trascorso perché gli agenti aggressivi arrivino alle armature metalliche.

I valori limiti di c , a/c , R_{ck} e c_f sono scelti in funzione della classe di esposizione ambientale.

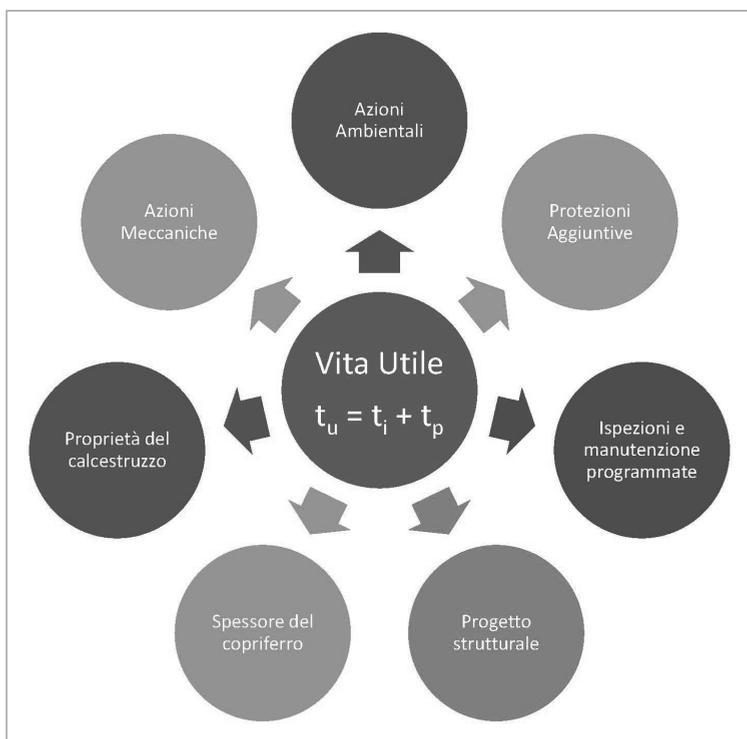


Figura 4.1. Schema di definizione della vita utile di un'opera proposto dalle NTC

INTRODUZIONE AL FOGLIO DI CALCOLO

6.1. Valutazione della corrosione negli elementi in c.a. e c.a.p.

Un aspetto delicato e di primaria importanza sulla modellazione dei processi di degrado è la simulazione della corrosione dell'armatura ordinaria. La corrosione delle armature, con le conseguenze ad essa correlate, inducono ad una progressiva riduzione dei margini di sicurezza su cui si fonda la progettazione strutturale antisismica.

In primo luogo, la corrosione, causa una riduzione della sezione resistente delle armature, con conseguente diminuzione della loro capacità di sopportazione dei carichi statici o dinamici. In secondo luogo, genera ossidi espansivi (prodotti di corrosione che occupano un volume in genere da 4 a 5 volte maggiore di quello del materiale ferroso da cui provengono) che causano un'ulteriore fessurazione nel calcestruzzo, riducono l'aderenza tra le armature e il calcestruzzo e ne provocano l'espulsione (*spalling*) o la delaminazione.

La corrosione sull'armatura ordinaria è solitamente modellata tramite un modello globale, mentre la corrosione sull'acciaio da precompressione è stata considerata di tipo localizzato per *pit* (*pitting*) [24].

L'impostazione del foglio di calcolo allegato alla presente pubblicazione, è basata sulle indicazioni e le formulazioni estratte dalla pubblicazione: Gotti G., Ielmini D., Malerba P.G., Sgambi L., *Influenza dei fenomeni di degrado sulla modalità di rottura di elementi strutturali in calcestruzzo armato precompresso*, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano, Milano, Italia, 2010.

6.2. Modello di degrado per l'armatura ordinaria

La riduzione del diametro delle armature corrose $\phi'(t)$ al generico istante di tempo t , può essere stimata utilizzando la legge di Faraday:

$$\phi'(t) = 0.00116 \cdot i_{corr} \cdot (t - t_0)$$

in cui la costante 0.0116 è un fattore di conversione per passare da $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ a $\mu\text{m}/\text{anno}$.

La legge di Faraday indica che la velocità di corrosione di $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ corrisponde, nel caso dell'acciaio, ad una perdita di diametro di circa $11,6 \mu\text{m}/\text{anno}$.

Il diametro della barra d'armatura in funzione del tempo $\phi(t)$ può essere stimata attraverso la relazione seguente:

$$\phi(t) = \phi_0 - n \cdot \phi'(t)$$

La diminuzione del diametro della sezione trasversale dell'acciaio dovuta alla corrosione, in base al modello proposto, è caratterizzata quindi da un andamento lineare nel tempo. ϕ_0 rappresenta il diametro iniziale dell'armatura.

La velocità di corrosione i_{corr} dipende fortemente dalle condizioni ambientali (ad esempio, umidità relativa, temperatura, etc.), dal tipo di attacco chimico-fisico (ad esempio, carbonatazione, cloruro, etc.), dalle caratteristiche del calcestruzzo e dell'acciaio, e dall'apertura delle fessure. In un processo corrosivo, qualunque sia la morfologia dell'attacco, si ha una perdita di massa.

La velocità di corrosione può essere espressa come perdita di massa per unità di superficie e di tempo. In generale, però, si preferisce considerare la velocità di penetrazione della corrosione; pertanto in questo caso la velocità di corrosione è espressa come la diminuzione dello spessore nell'unità di tempo. Alcuni valori tipici della velocità di corrosione possono essere trovati in letteratura. È bene sottolineare che il modello di corrosione dell'armatura non influisce sul modulo elastico, ma, come precedentemente espresso riguarda la diminuzione dell'effettiva area resistente.

Il modello utilizzato ipotizza in via semplificativa che vi sia perfetta aderenza tra acciaio e calcestruzzo, anche durante la riduzione dell'area $A_s(t)$ [24].

6.3. Modello di degrado per l'armatura da precompressione

Come già ampiamente descritto nei capitoli precedenti, una tipica caratteristica del degrado delle strutture in c.a.p. esposte ad ambienti contenenti cloruri è un attacco corrosivo per *pitting* delle armature. Per di più, a differenza degli acciai convenzionali, gli acciai da precompressione possono manifestare altre forme di corrosione come la corrosione sotto sforzo, l'infragilimento da idrogeno, la corrosione sotto fatica e la corrosione per sfregamento (Nürnberg 2002). Poiché i cavi da precompressione sono piccoli rispetto alla sezione di calcestruzzo e sono soggetti ad elevati valori tensionali, una riduzione dell'area trasversale dell'acciaio, anche modesta, può provocare una brusca rottura di tipo fragile con catastrofiche conseguenze. Nel caso di corrosione per *pitting*, la profondità massima di avanzamento raggiunta da una corrosione localizzata in una barra d'armatura *p max*.

In letteratura sono riportate diverse indicazioni per individuare il valore del parametro R , ossia il fattore di *pitting*, la cui stima risulta tuttavia molto incerta. Secondo Gonzalez et al. (1995) questo parametro varia da 4 ad 8, mentre secondo Darmawan e Stewart (2007) il valore varia tra 8 e 11. Questi valori sono in buon accordo con quanto osservato da Tuutti (1982), il quale suggerisce valori da 4 a 10. Ciò premesso, per semplicità viene generalmente assunta una forma emisferica di attacco, proposta da Val et al. (1998).

La profondità di attacco al tempo t può essere valutata attraverso la relazione:

$$p(t) = \phi'(t) R$$

CONTENUTI E ATTIVAZIONE DELLA WEBAPP

7.1. Contenuti della WebApp

- **Foglio di calcolo che consente di valutare la riduzione della sezione resistente delle armature, sia per strutture in c.a. che in c.a.p.**, seguendo rispettivamente il modello di corrosione dell'armatura ordinaria che sfrutta la legge di Faraday e quello relativo all'armatura da precompressione con corrosione localizzata per *pit* (Adattato da *Val et al.*, 1998). L'impostazione del foglio di calcolo allegato alla presente pubblicazione, è basata sulle indicazioni e le formulazioni estratte dalla pubblicazione: Gotti G., Ielmini D., Malerba P.G., Sgambi L., *Influenza dei fenomeni di degrado sulla modalità di rottura di elementi strutturali in calcestruzzo armato precompresso*, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano, Milano, Italia, 2010.
- **Banca dati normativa e giurisprudenza** consultabile attraverso un motore di ricerca, con aggiornamenti automatici per 365 giorni dall'attivazione della WebApp.

7.2. Requisiti hardware e software

- Dispositivi con MS Windows, Mac OS X, Linux, iOS o Android;
- Accesso ad internet e browser web con Javascript attivo;
- Software per la gestione di documenti Office e PDF.

7.3. Attivazione della WebApp

- 1) Collegarsi al seguente indirizzo internet:

https://www.grafill.it/pass/0199_7.php

- 2) Inserire i codici “A” e “B” (vedi ultima pagina del volume) e cliccare [**Continua**].
- 3) Accedere al **Profilo utente Grafill** oppure crearne uno su www.grafill.it.
- 4) Cliccare il pulsante [**G-CLOUD**].
- 5) Cliccare il pulsante [**Vai alla WebApp**] in corrispondenza del prodotto acquistato.
- 6) Fare il *login* usando le stesse credenziali di accesso al **Profilo utente Grafill**.

Lo scaffale **Le mie App** presenterà tutte le WebApp attive.

- 7) Per accedere alle WebApp del prodotto acquistato cliccare sulla relativa copertina.

7.4. Assistenza tecnica sui prodotti Grafill (TicketSystem)

L'assistenza tecnica (gratuita per 365 giorni dall'acquisto) è relativa esclusivamente all'installazione e all'avvio del prodotto (*non è prevista assistenza per il recupero dei dati*), se la configurazione hardware rispetta i requisiti richiesti.

L'assistenza *TicketSystem* è disponibile all'indirizzo **<https://www.supporto.grafill.it>**.

Effettuare il login al *TicketSystem* utilizzando i dati del profilo utente di **www.grafill.it** ed aprire un ticket seguendo le istruzioni.

La cronologia dei ticket resterà disponibile sulla schermata principale del *TicketSystem*.

