

IL CALCESTRUZZO NELLE OPERE MARITTIME

Mario Collepardi, Dipartimento di Scienza dei
Materiali e della Terra, Facoltà di Ingegneria
Università di Ancona

Riassunto

Nel presente lavoro viene innanzitutto esaminata la correlazione fra micro-struttura e prestazioni del calcestruzzo quale materiale composito, basato su un sistema di aggregati lapidei dispersi in una matrice cementizia, rinforzato con armature metalliche.

Vengono quindi analizzati separatamente i diversi meccanismi di degrado che coinvolgono il calcestruzzo quale materiale composito in ambiente marino: corrosione dei ferri di armatura, reazione alcali-aggregato, distruzione della matrice legante per attacco solfatico, ecc.

Viene quindi proposto, attraverso un approccio olistico del degrado e della sua prevenzione, un procedimento per il progetto del materiale in funzione del progetto dell'opera marittima in accordo con le nuove normative che regolamentano le opere in cemento armato nei paesi dell'Unione Europea.

1. INTRODUZIONE

Il calcestruzzo è un materiale largamente impiegato nelle infrastrutture dell'ingegneria civile. Insieme a quelle riguardanti le opere marittime, quali le piattaforme *off-shore* per l'estrazione del petrolio, ponti o *tirine*/sottomarini, consolidamenti costieri, ecc. In particolare, tra le opere marittime direttamente attinenti i servizi per l'ingegneria navale si possono menzionare i ponti ed i bacini di carenaggio.

Tra tutti gli ambienti naturali, nei quali possono sorgere le opere in calcestruzzo, il mare rappresenta indubbiamente quello più aggressivo nei confronti sia del calcestruzzo stesso, sia delle armature metalliche presenti nelle strutture in cemento armato (c.a.) o in cemento armato precompresso (c.a.p.).

L'azione aggressiva dell'ambiente marittimo, che può pregiudicare seriamente la durabilità delle opere in c.a. e in c.a.p. anche a pochi anni dalla loro costruzione, dipende dalla concomitanza di due fattori fondamentali:

- a) la microporosità della matrice cementizia - formata dalla miscela di acqua e cemento - che avvolge gli aggregati lapidei e le armature metalliche;
- b) la presenza, nell'ambiente marino, di quasi tutti gli agenti aggressivi per la matrice cementizia, per gli aggregati e per i ferri di armatura.

Anche le recenti norme tecniche italiane (UNI 9838 richiamata dal DM dei Lavo-

avvolge le armature metalliche: la interdipendenza tra lo spessore del copriferro e la qualità della matrice cementizia, nell'assicurare la protezione dei ferri di armatura, verrà ripresa più avanti (nel paragrafo 4.2) nell'esaminare le raccomandazioni tecniche emanate per garantire la durabilità delle opere in c.a. e c.a.p.

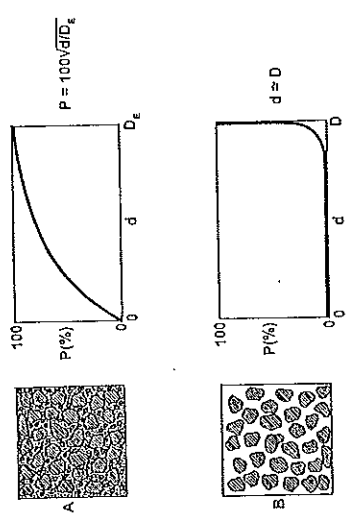


Fig. 1 - Rappresentazione schematica, grafica ed analitica di un insieme di elementi lapidei ben assortiti con pochi vuoti interstiziali (A) e di elementi lapidei quasi monogranulari (B); P rappresenta la percentuale di materiale passante al vaglio di apertura d , mentre D rappresenta la massima dimensione dell'elemento lapideo.

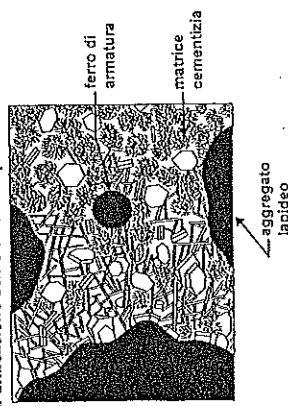


Fig. 2 - Rappresentazione schematica di un ferro di armatura e della matrice cementizia situata nel vuoto interstiziale tra tre aggregati lapidei.

ri Pubblici per le opere in c.a. e c.a.p.) ispirate alle direttive europee (ENV 206), tengono conto in pratica di questi due importanti fattori, sia pure in forma semplificata e facilmente fruibile da parte dei progettisti delle opere in c.a. e in c.a.p.

Nei paragrafi che seguono verranno approfonditi e sviluppati gli argomenti sopra menzionati e riguardanti la micro-struttura e le macroproprietà del materiale, il suo comportamento in servizio in relazione all'ambiente, e le norme tecniche emanate per garantirne la durabilità.

2. DALLA MICRO-STRUTTURA ALLE MACRO-PROPRIETÀ DEL CALCESTRUZZO

Il calcestruzzo è un materiale composito - costituito da una matrice cementizia nella quale sono dispersi gli elementi lapidei (sabbia, pietrisco o ghiaia), - molto spesso rinforzato da ferri di armatura per sopporre alle carenze prestazionali del materiale per quanto attiene alle sollecitazioni di flessione e di trazione.

Teoricamente, il volume occupato dagli elementi lapidei (sabbia, ghiaia o pietrisco) dovrebbe essere massimizzato sia per ragioni economiche, sia per motivi tecnici inerenti soprattutto la stabilità dimensionale nei confronti delle variazioni igro-termiche e delle sollecitazioni meccaniche in servizio (deformazione viscosa). Questo obiettivo viene raggiunto adottando il criterio di minimizzare il contenuto dei vuoti interstiziali tra i singoli elementi lapidei in conformità a modelli matematici (equazione di Fuller, di Bolomey, ecc.) che descrivono una distribuzione granulometrica molto assortita. Nella Fig. 1 è schematicamente mostrata la distribuzione granulometrica di un insieme lapideo ben assortito con pochi vuoti interstiziali (A) e di un aggregato lapideo pressoché monogranulare con molti vuoti (B). Una volta che sia garantita la scelta di aggregati lapidei con il miglior assortimento granulometrico possibile, tutte le macro-proprietà del materiale composito (calcestruzzo) vengono a dipendere in gran parte dalla qualità della micro-struttura della matrice cementizia che idealmente riempie i vuoti interstiziali tra i singoli aggregati lapidei. In queste condizioni, tutte le prestazioni del calcestruzzo - ed in particolare la resistenza meccanica e la durabilità - dipendono quasi esclusivamente dalla porosità della matrice legante che avvolge gli elementi lapidei, purché questi siano scelti in conformità alle norme (UNI 8520) che ne stabiliscono l'idoneità (compattezza, stabilità chimica, ecc.). Anche la protezione dalla corrosione dei ferri di armatura annessi nel calcestruzzo dipende quasi esclusivamente dalla qualità della matrice legante (ed in particolare dalla sua micro-porosità) oltre che dallo spessore di calcestruzzo (copriferro) che separa i ferri dall'ambiente esterno aggressivo (Fig. 2). Minore è lo spessore del copriferro, maggiore deve essere la capacità protettiva intrinseca del materiale che

della matrice legante: acqua e cemento) e ridurre il rapporto a/c . Nella Fig. 3 è schematicamente ed esemplificativamente illustrata la progressiva riduzione di porosità nella matrice legante all'aumentare di α (da 0 a 0.75) ed al diminuire del rapporto a/c (da 0.60 a 0.40).

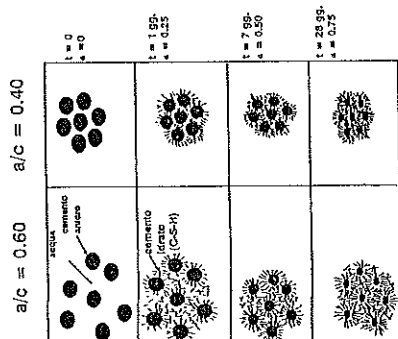


Fig. 3 - Modello schematico dell'idratazione del cemento Portland in funzione del rapporto acqua/cemento (a/c) e del tempo (t) di stagionatura cui corrisponde un determinato grado di idratazione (α).

Da un punto di vista pratico, per garantire la durabilità del calcestruzzo e la protezione dei ferri di armatura (attraverso la impermeabilità della matrice agli agenti aggressivi presenti nell'ambiente esterno) non è necessario arrivare ad annullare completamente la porosità capillare ($V/p = 0$). È sufficiente, invece, ridurre V/p ad un valore sufficientemente piccolo da creare una discontinuità nella distribuzione dei pori capillari presenti nella matrice legante. Per esempio per $\alpha = 0.50$, situazione che si verifica con molti cementi dopo una stagionatura di circa 1 mese, è sufficiente adottare un rapporto a/c non superiore a 0.55 per arrivare ad una condizione di segmentazione dei pori: questa situazione, in base all'equazione [1], corrisponde ad un valore di V/p eguale a circa 73 litri/100kg di cemento.

Se è vero che la diminuzione di acqua (a parità di tutti gli altri parametri ed in particolare del dosaggio di cemento, c , e del tipo di aggregato lapideo) comporta un miglioramento prestazionale del materiale composito indurito attraverso la riduzione

È opportuno, a questo punto, illustrare schematicamente un modello fisico per rappresentare la matrice cementizia la quale va intesa, in termini dinamici e non statici, come un sistema costituito da granuli di cemento (prevalentemente compresi tra 10 e 50 μm e quindi molto più piccoli degli aggregati lapidei) separati dall'acqua. Con il trascorrere del tempo, all'interfaccia tra i granuli di cemento e l'acqua, avvengono una serie piuttosto complessa di reazioni chimiche il cui risultato è la progressiva formazione di tre "fasi" distinte:

- i) un silicato di calcio idrato (C-S-H) mal cristallizzato e con morfologia prevalentemente fibrosa;
- ii) un alluminato di calcio idrato (C-A-H) di forma prevalentemente laminare;
- iii) idrossido di calcio, Ca(OH)_2 , ben cristallizzato.

Man mano che aumenta la frazione (α) di cemento anidro convertito nei suoi prodotti di idratazione [C-S-H, C-A-H, Ca(OH)_2], lo spazio originariamente occupato dall'acqua si riempie dei prodotti di neo-formazione con la conseguente progressiva riduzione nella porosità della matrice legante.

La micro-porosità della matrice cementizia (nota come porosità capillare) che condiziona tutte le macro-proprietà delle strutture in c.a. e in c.a.p., può essere in pratica governata attraverso la scelta di un parametro compositivo di grandissima importanza nella tecnologia del calcestruzzo: il rapporto tra il quantitativo di acqua (a) e quello del cemento (c), noto anche come rapporto a/c . Aumentando la massa dell'acqua (a) e/o diminuendo quella del cemento (c), si aumenta ovviamente il rapporto a/c e si predispongono la formazione di una micro-struttura più porosa, meccanicamente più debole, e più facilmente penetrabile dagli agenti aggressivi presenti nell'ambiente che circonda le strutture. Maggiore è la quantità di acqua, infatti, maggiore diventa la reciproca distanza tra i vari granuli di cemento e più porosa risulta la micro-struttura costituita dalle fibre di C-S-H e degli altri prodotti di idratazione [C-A-H e Ca(OH)_2].

La dipendenza della porosità della matrice legante dal rapporto a/c può essere dimostrata, oltre che sperimentalmente, da numerosi modelli matematici fra i quali il più consolidato è quello proposto da Powers (1). Secondo questa teoria, si può dimostrare che, la porosità capillare V/p (espressa in litri per 100 kg di cemento) aumenta con il rapporto a/c secondo l'equazione

$$V/p = 100 a/c - 36.15 \alpha \quad [1]$$

dove α rappresenta la frazione di cemento che ha reagito con l'acqua. In sostanza, in base all'equazione [1], per ridurre il volume dei pori capillari (V/p) della matrice legante è necessario aumentare α (cioè favorire la reazione tra i due componenti

ne della porosità nella micro-struttura della matrice legante, è anche vero, però, che le caratteristiche reologiche (lavorabilità) del conglomerato fresco, molto importanti in fase esecutiva al momento del getto dentro le casseforme, risultano significativamente penalizzate. In sostanza, la scelta del quantitativo di acqua - una volta che sia stato fissato il tipo e la granulometria dell'aggregato lapideo disponibile - deve tener conto da una parte delle pressioni del materiale indurito in servizio (resistenza meccanica, durabilità, ecc.), e dall'altra delle difficoltà esecutive al momento della realizzazione (forma e geometria della struttura, densità delle armature metalliche, ecc.) che richiedono una determinata lavorabilità del calcestruzzo allo stato fresco come sarà mostrato più avanti nel paragrafo 4.3.

3 IL DEGRADO DEL CALCESTRUZZO NELLE OPERE MARITTIME

In generale il degrado del calcestruzzo può coinvolgere ciascuno dei tre componenti di questo materiale composito (matrice cementizia, aggregato lapideo, ferri di armatura) attraverso un numero piuttosto limitato di meccanismi (non più di sei) di natura chimica, fisica e meccanica.

Nei casi specifici delle strutture in calcestruzzo per opere marittime, i suddetti meccanismi agiscono quasi tutti, in modo talvolta sinergico, determinando un effetto globale sul degrado della struttura che può diventare tra i più devastanti se non si è progettato uno specifico materiale capace di resistere all'azione dell'acqua del mare.

Per semplicità di esposizione, i diversi meccanismi di degrado, che possono agire in un ambiente marino, verranno di seguito sinteticamente e singolarmente esaminati nel presente paragrafo. Occorre, tuttavia, tener presente che un approccio "riduzionistico", cioè legato ad un singolo fenomeno di degrado, ancorché utilissimo in sede di indagini sul meccanismo dell'azione, può risultare fuorviante ed in genere riduttivo rispetto al comportamento reale del materiale. In realtà, come ha di recente indicato Méthia (2) è necessario adottare - ma non solo per analizzare il degrado delle opere marittime - un approccio "olistico", cioè integrale dei vari meccanismi di degrado, al fine di tener conto dell'effetto globale risultante dalla coesistenza delle varie sollecitazioni (chimiche, fisiche e meccaniche) sui vari componenti del materiale composito (matrice, aggregato e armatura metallica).

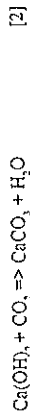
Il ritorno da un approccio "riduzionistico", prevalentemente adottato in questo paragrafo per comodità di esposizione, ad uno di tipo "olistico" verrà completato più avanti in sede di commento della normativa (paragrafo 4.2).

I singoli meccanismi di degrado del calcestruzzo (escludendo le cause di tipo "traumatico" quali quelle imputabili ad un incendio, ad un sisma o ad un evento bellico) possono essere così sintetizzati:

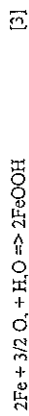
- carbonatazione
- dilavamento
- reazione alcali-aggregato
- attacco del cloruro
- attacco del solfato
- formazione di ghiaccio

Di seguito i suddetti singoli meccanismi, tutti operanti sulle strutture in calcestruzzo per opere marittime, vengono sinteticamente riassunti, mentre si rimanda alla vasta letteratura specializzata (3-7) per un esame più approfondito sull'argomento.

Carbonatazione: il processo consiste nella reazione dell'anidride carbonica dell'aria con la calce formatasi nel calcestruzzo a seguito della idratazione del cemento:



La reazione [2] non è di per sé aggressiva per il calcestruzzo, ma rende vulnerabili gli eventuali ferri di armatura all'azione dell'ossigeno e dell'umidità annessi perenni, insieme alla CO_2 , dall'aria ambientale verso l'interno del calcestruzzo.

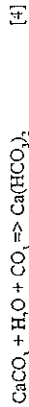


La reazione [3], che comporta una corrosione generalizzata dei ferri di armatura, è di fatto bloccata se nel calcestruzzo è presente calce in quantità sufficiente a rendere il pH della fase acquosa (presente nei pori della matrice cementizia) superiore a 11. Questa benefica situazione per le armature metalliche è nota come passivazione dei ferri e consiste nella formazione di uno strato sottilissimo di ossido ferrico impermeabile all'ossigeno ed alla umidità e quindi protettivo nei confronti della corrosione. Se, però, a causa della carbonatazione la calce è totalmente neutralizzata - attraverso la reazione [2] - il pH diminuisce al di sotto di 9 ed il ferro si depassiva: cioè lo strato protettivo di ossido ferrico diviene poroso e promuove, così, il decorso della reazione [3] purché ci sia sufficiente ossigeno e acqua ad alimentare il processo.

La corrosione promossa dalla carbonatazione, che riguarda gran parte delle opere in calcestruzzo armato esposte all'aria, soprattutto se umida, coinvolge - nel caso delle opere marittime - tutte le strutture ad eccezione di quelle completamente immerse in acqua di mare dove, per la limitata diffusione della CO_2 , attraverso i pori capillari saturi di acqua oltre che per la scarsa solubilità dell'ossigeno in acqua, i

processi delle reazioni [2] e [3] sono di fatto arrestati.

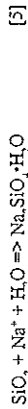
Dilavamento: consiste nell'asportazione del calcestruzzo per effetto dell'azione fisico-meccanica dell'acqua corrente o battente come si verifica nelle strutture esposte al moto ondoso. Il fenomeno è aggravato dalla presenza di acido carbonico disciolto nell'acqua stessa che favorisce l'asportazione della calce, già carbonatata all'aria e quindi presente come CaCO_3 , per formazione del più solubile bicarbonato di calcio:



Anche questo fenomeno non coinvolge le strutture completamente immerse in acqua di mare, ma si esplica prevalentemente nelle zone esposte al "bagna-asciuga" dove si alterna l'azione carbonatante dell'aria - secondo la reazione [2] - a quella dilavante - secondo la reazione [4] - dell'acqua superficiale più ricca in anidride carbonica aggressiva.

Reazione alcali-aggregati: è una reazione che coinvolge alcuni particolari elementi lantidei (aggregati alcali-reativi) costituiti prevalentemente di silice amorfa o mal cristallizzata suscettibile di reagire con gli ioni sodio e potassio, presenti nell'acqua di mare, in aggiunta a quelli che accompagnano solitamente il cemento dentro il calcestruzzo.

La reazione alcali-aggregato, in realtà molto complessa e poco conosciuta nel dettaglio del suo chimismo, comporta la trasformazione di silice reattiva in silicati di sodio capaci di rigonfiarsi significativamente in presenza di acqua come grossolanamente schematizzato nel processo [5]:



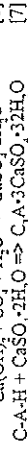
Sebbene la reazione alcali-aggregato coinvolga solo quei particolari calcestruzzi confezionati con aggregati d'erti appunto alcali-reativi (presenti in Italia prevalentemente nelle formazioni geologiche del versante Adriatico), è stato recentemente segnalato da Mehta (8) che il degrado di molte opere in calcestruzzo per opere marittime, diagnosticato in passato sulla base di altri meccanismi coinvolgenti l'attacco del solfato sulla matrice cementizia, debba in realtà essere rivisto come provocato anche dall'azione del sodio presente nell'acqua di mare nei confronti degli aggregati reattivi.

Attacco del cloruro: il cloruro, abbondantemente presente nell'acqua di mare, può diffondere secondo la legge di Fick (9), attraverso la fase acquosa che riempie i pori capillari della matrice cementizia presente nel copriferro e provocare la corrosione localizzata dei ferri di armatura (*pitting corrosion*) attivando localmente il processo di ossidazione, secondo la reazione [3], a causa della depassivazione dello strato di ferro protettivo provocata dal cloruro. In realtà, il fenomeno difficilmente coinvolge

le strutture permanentemente immerse in acqua di mare per la carenza di ossigeno che dovrebbe alimentare l'ossidazione del ferro. È più probabile che il fenomeno della *pitting corrosion* agisca in prossimità delle zone esposte al "bagna-asciuga" dove si alterna la penetrazione del cloruro dall'acqua di mare e l'ossigeno dall'aria. In queste zone, inoltre, la penetrazione del cloruro, oltre che per diffusione secondo la legge di Fick attraverso i pori quando sono saturi di acqua, può avvenire anche per suzione capillare quando i pori sono insaturi di umidità.

In questa zona, inoltre, l'alternarsi delle condizioni di asciutto e bagnato comporta l'accumulo di un elevato deposito salino con fenomeni di sub-fluorescenza che favoriscono il distacco del copriferro e l'esposizione delle barre di armatura al diretto contatto dell'acqua marina.

Attacco del solfato: il solfato anch'esso presente in acqua di mare, attacca la matrice cementizia, ed in particolare il $\text{Ca}(\text{OH})_2$, e successivamente la fase C-A-H, attraverso un complesso di reazioni tutte di carattere dirompente così sintetizzabili in modo schematico:



Tanto la formazione di gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), quanto la successiva produzione di ettringite ($\text{C}_2\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) avvengono con aumento di volume che provoca fessurazioni e distacchi nelle zone corticali del copriferro con conseguente esposizione dei ferri di armatura all'azione diretta dell'acqua di mare.

In particolari condizioni climatiche (temperatura compresa tra 0°C e 10°C) è favorita anche la formazione di un prodotto ancor più devastante: la thaumasite di composizione $\text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ (10).

Formazione del ghiaccio: la formazione di ghiaccio, che fortunatamente sembra esclusa nei climi temperati della maggior parte delle zone costiere italiane, è un fenomeno che coinvolge, invece, le strutture in calcestruzzo nelle zone di alta montagna. Tuttavia, in ambienti marini tipici del Nord Europa, la produzione di ghiaccio accompagna frequentemente gli altri meccanismi di degrado e ne facilita il decorso grazie all'indebolimento meccanico del copriferro. Il fenomeno degradante, come quasi tutti gli altri sopra illustrati, è legato ad un aumento di volume (circa 9%) conseguente alla trasformazione di stato da acqua liquida in ghiaccio.

4 IL COMPORTAMENTO DEL CALCESTRUZZO IN SERVIZIO

Per valutare il comportamento del materiale in servizio, occorre tener conto di diverse prestazioni, quali: la resistenza meccanica a compressione ed a trazione, la durabilità in relazione all'ambiente, la stabilità dimensionale in relazione alle sollecitazioni applicate (modulo elastico e deformazione viscosa), alle variazioni termometriche (coefficiente di dilatazione termica e ritiro igrometrico), alla permeabilità ai fluidi (aria ed acqua in particolare), ecc.

Tuttavia, da un punto di vista pratico tutte le proprietà sopra menzionate sono riconducibili a due di esse - resistenza meccanica a compressione e durabilità - ed attraverso queste direttamente o indirettamente calcolabili. Inoltre, sono ben note le relazioni che correlano queste due fondamentali proprietà con i parametri composizionali del materiale (in particolare con il rapporto α/c , e con il tipo e la dimensione dell'aggregato lapideo) cosicché diventa anche possibile progettare la composizione del calcestruzzo (*mix-design*), cioè progettare la miscela, a partire dai dati prestazionali richiesti per il materiale stesso.

Questa operazione, che rappresenta lo scopo ultimo dell'ingegneria dei materiali, è paradossalmente praticabile più per un materiale tradizionale come il calcestruzzo, che non per i molti altri nuovi materiali dell'ingegneria. Nel caso specifico del calcestruzzo, materiale impiegato in grandissime quantità, l'operazione del *mix-design* diventa di fondamentale importanza se si pensa che esso coinvolge la costruzione di numerosissimi manufatti (travi, pilastri, piatte di fondazione, ecc.) ciascuno dei quali, talvolta nella stessa opera (porto, autostrada, aeroporto, edificio, ecc.), richiede una produzione su misura (*tailorist*), adattata caso per caso, alle condizioni microclimatiche (terreno, acqua, aria) ed alle varie esigenze strutturali.

In aggiunta alle due prestazioni fondamentali del materiale in opera (resistenza meccanica a compressione e durabilità), che includono come si è detto quasi tutte le altre prestazioni del materiale in servizio, occorre tener presente, per una corretta progettazione del materiale, anche gli aspetti di processo ed in particolare della lavorabilità del conglomerato fresco in relazione alle difficoltà esecutive in corso d'opera.

Nei paragrafi che seguono vengono analizzate separatamente le tre prestazioni sopra menzionate (resistenza meccanica, durabilità, lavorabilità) che, in accordo con la denominazione della nuova normativa europea, sono indicate come:

- classe di resistenza (meccanica)
- classe di esposizione ambientale (durabilità)
- classe di consistenza (lavorabilità)

4.1 La classe di resistenza

La classe di resistenza indica la resistenza caratteristica (R_{ck}) misurata attraverso la rottura a compressione di provini cubici (o anche cilindrici) stagionati per 28 giorni in condizioni predeterminate (in ambiente alla temperatura di 20°C e UR = 95%). La media dei valori ($R_{m,28}$), penalizzata di un fattore (k_2) che dipende dallo scarto quadratico medio (δ) derivante dalla maggiore o minore costanza di qualità nel processo produttivo, consente di calcolare la resistenza caratteristica sulla base di un controllo statistico:

$$R_{ck} = R_{m,28} - k_2 \delta \quad [8]$$

dove k_2 è assunto eguale a 1,4 ed è stabilito da specifiche norme di legge*.

La resistenza caratteristica viene fissata dal progettista dell'opera sulla base di considerazioni unicamente di carattere strutturale: in sostanza, il valore di R_{ck} viene fissato in base alla valutazione delle tensioni esistenti nella struttura in servizio (σ), tenuto conto dei margini di sicurezza che per legge debbono far sempre rispettare una significativa differenza tra la sollecitazione in servizio (σ) e la resistenza del materiale (R_{ck}):

$$\sigma = 6 + (R_{ck} - 15) / 4 \quad [9]$$

La resistenza caratteristica, come anche tutte le altre proprietà del calcestruzzo, è correlabile con il rapporto α/c . Tuttavia, la specifica correlazione che è necessario conoscere per progettare la composizione del materiale (α/c) in relazione alla specifica prestazionale richiesta dal progettista, dipende dal particolare tipo di cemento impiegato. Attualmente, con la nuova normativa europea (UNI-ENV 197/1), che regolamenta anche in Italia la produzione dei cementi, sono possibili 25 diversi "tipi" di cemento (Tabella 1) ciascuno dei quali è disponibile in 6 diverse "classi" (Tabella 2); tenendo conto dei "tipi" e delle "classi" di cemento, quindi, si arriva ad un totale di 150 diversi cementi ($25 \times 6 = 150$). Pertanto, la correlazione tra R_{ck} ed α/c si estrinseca in 150 diverse curve sperimentali, due delle quali, a puro titolo esemplificativo, sono riportate nella Fig. 4 per due cementi indicati con il codice alla-numerico previsto dalla vigente normativa: CEM I/FB-L 32.5 (che indica un cemento costituito, Tab. 1, da clinker di cemento Portland e da calcare aggiunto in misura variabile dal 6

* Il prodotto $k_2 \delta$ viene assunto eguale a 3,5 N/mm² per strutture che occupano un volume minore di 1500 m³. La nuova normativa europea ha stabilito per k valori leggermente diversi da quelli della norma italiana (legge n. 1086) ancora in vigore, e pertanto questi valori non sono attualmente utilizzabili per il calcolo di R_{ck} .

4.2 La classe di esposizione

Secondo la menzionata normativa vigente in tutti i Paesi dell'Unione Europea (ENV 206), gli ambienti dove sorgono le opere in calcestruzzo possono essere suddivisi in *classi di esposizione*. Trascurando nel presente lavoro alcuni ambienti industriali particolarmente aggressivi (centrali termiche, depuratori urbani, serbatoi per prodotti chimici, ecc.) individuati come classe di esposizione 3, i vari ambienti possono essere suddivisi in quattro classi di esposizione indicate con 1, 2, 3 e 4, per alcune delle quali (2 e 4) sono anche previste sub-classi (Tabella 3).

Tabella 3. Classificazione degli ambienti (secondo ENV 206) per le opere in calcestruzzo

CLASSE DI ESPOSIZIONE	AMBIENTE	ESEMPI DI STRUTTURE
1	Asciutto	Interni di abitazioni o uffici
2a	Umido	Esterni di qualsiasi struttura a contatto con aria, terra o acqua
2b	Umido con gelo	Esterni di qualsiasi struttura come in 2a esposti a cicli di gelo-difogelo
3	Umido con gelo e sali disgelanti	Strade, autostrade, aeroporti
4a	Marino	Strutture immerse e semi-immesse in acqua di mare o a contatto di questa sia pure discontinuamente
4b	Marino con gelo	Come in 4a ma in presenza di ghiaccio (Mari del Nord)

Una volta stabilita la classe di esposizione ambientale in base alle indicazioni della Tabella 3, la stessa normativa (ENV 206) stabilisce i parametri compositivi del calcestruzzo, ed in particolare fissa il rapporto *a/c massimo* (nel senso che non deve essere comunque superato) per garantire la durabilità dell'opera.

Nella Tabella 4 sono riportati, per ogni classe di esposizione, l'insieme dei vari fenomeni (illustrati singolarmente alla fine del paragrafo 3) responsabili del degrado se non si adottano adeguati provvedimenti circa la composizione del materiale ed in particolare circa il rapporto *a/c*.

Per esempio, nella classe di esposizione 1 il meccanismo di degrado è imputabile alla sola carbonatazione ed è necessario non superare il rapporto *a/c* di 0,65 nelle opere in c.a.; nella classe di esposizione 2a alla carbonatazione si somma il dilavamento ed il limite nel rapporto *a/c* diventa più restrittivo (0,60); nella classe di esposizione 4a (ambiente marino), oltre alla carbonatazione ed al dilavamento (aggravato dal moto ondoso) si verificano cumulativamente l'azione del sodio sugli aggregati (se alcali-reativi), l'azione del solfato sulla matrice cementizia e quella del cloruro sulla corrosione dei ferri di armatura; e pertanto necessario limitare il rapporto *a/c* a valori non superiori a 0,55. In sostanza, si può dire che i responsabili della norma ENV 206 abbiano adottato un criterio di tipo "olistico", ancorché non esplicitamente dichiarato.

Tabella 4. Massimo rapporto acqua/cemento e minimo volume d'aria per la durabilità di strutture in calcestruzzo esposte alle classi ambientali previste dalla norma UNI 9858 ed ENV 206.

CLASSE DI ESPOSIZIONE	MASSIMO RAPPORTO A/C per strutture in calcestruzzo normale armato precompresso	MINIMO VOLUME D'ARIA (%)	DEGRADO TEMUTO	COPRIFERRO* (mm) c.a./c.a.p.
1	0,65	—	carbonatazione	15/25
2a	0,70 0,60	—	carbonatazione & dilavamento	20/30
2b	0,55	4,5-7,5%	carbonatazione, dilavamento & ghiaccio	25/35
3	0,50	4,5-7,5%	carbonatazione, dilavamento, ghiaccio & attacco cloruri	40/50
4a	0,55 0,55	—	carbonatazione, dilavamento & attacco cloruri	40/50
4b	0,50	4,5-7,5%	carbonatazione, dilavamento, ghiaccio, attacco cloruri & solfati	40/50

* Valori raccomandati da Eurocode 2 (12)

Per quanto attiene, in particolare, al calcestruzzo delle opere marittime la norma ENV 206 non fa purtroppo distinzione - come invece è stato fatto notare (11) che

avviene per le norme americane ACI (12) - tra strutture immerse e semi-immesse in acqua o nelle vicinanze del mare. E' auspicabile che nella prossima stesura delle norme europee si tenga conto di questa distinzione, giacché l'effetto del mare può avere conseguenze molto diverse sulle strutture in calcestruzzo a seconda della loro particolare posizione: per esempio, l'azione è molto più severa nelle strutture esposte ad un "bagna-asciuga", come si verifica in un bacino di carenaggio, che non nelle strutture permanentemente immerse sotto acqua marina.

Nella Tabella 4, oltre al valore del rapporto α/c massimo consentito (così come è previsto dalla norma ENV 206), viene anche indicato lo spessore *minimo* di copriferro necessario anch'esso secondo le raccomandazioni dell'Eurocodice 2 (13), a garantire la durabilità dell'opera ed in particolare la protezione dei ferri di armatura dalla corrosione.

Oltre al rapporto α/c massimo, la norma ENV 206 (Tabella 4) prevede che, in caso di ambienti esposti ai cicli di gelo-disgelo (classi di esposizione 2b e 4b), il calcestruzzo contenga un *minimo* volume di aria inglobata (dal 4 al 6%) sotto forma di microbolle (dimensione 100-200 μm) adeguatamente "spaziate" e disperse nella matrice cementizia. Nella Tabella 4 sono riportati i valori minimi di aria inglobata proposti dalle norme ACI (4,3-7,5%) più cautelativi che non quelli definiti dalle norme europee. La funzione di queste microbolle è quella di allentare le sollecitazioni di fatica che insorgono nella matrice legante allorché il materiale è esposto ciclicamente alla formazione di ghiaccio: ciascuna microbolla funge da raccolta di acqua allorché questa è sospinta dalla pressione idraulica che insorge per l'aumento di volume che accompagna la formazione di ghiaccio.

Val la pena di precisare che la presenza delle microbolle d'aria - generate durante la miscelazione degli ingredienti in presenza di un prodotto tensioattivo (additivo aerante) - non favorisce la penetrazione di agenti aggressivi dall'ambiente esterno verso l'interno del materiale, poiché le microbolle costituiscono un sistema di vuoti con porosità discontinua che non modifica, quindi, la permeabilità della matrice legante all'acqua ed agli agenti aggressivi in essa contenuti. Tuttavia, la presenza delle microbolle comporta, ovviamente, un indebolimento meccanico della matrice, e quindi, anche del materiale composito: si calcola che per ogni punto percentuale di aria in più (oltre quello normalmente presente nel calcestruzzo privo di additivo tensioattivo aerante) si registra una diminuzione della resistenza meccanica di circa il 5%. Ciò significa, in pratica che ciascuna delle 150 curve di correlazione $R_{\text{st}} - \alpha/c$, simili a quelle mostrate in Fig. 4, subiscono uno spostamento in basso (verso l'asse dell'ascissa) pari a circa il 20%.

A chiusura di questo paragrafo, si può concludere che per una data classe di esposizione ambientale esiste un valore massimo nel rapporto acqua/cemento - che verrà qui indicato con $(\alpha/c)_2$ - capace di garantire la durabilità del calcestruzzo e la protezione dei ferri di armatura dalla corrosione:

classe di esposizione $\Rightarrow (\alpha/c)_2$ [12]

La [12] nel caso specifico di opere marittime in clima temperato come porti, banchi di carenaggio, ecc., diventa:

classe di esposizione = 4a $\Rightarrow (\alpha/c)_2 = 0,55$ [13]

Nel caso, invece, di opere marittime in climi freddi, come si verifica nel Nord Europa, la [12] diventa:

classe di esposizione = 4b $\Rightarrow (\alpha/c)_2 = 0,50$ [14]
 $\Rightarrow \text{aria} = 4,5 - 7,5\%$

Sebbene il rapporto α/c sia un parametro compositivo di grandissima importanza nel determinare le prestazioni ed in particolare la durabilità delle strutture in c.a. e c.a.p., da un punto di vista pratico è difficile, se non impossibile, accertare in sede di controllo delle prescrizioni se effettivamente questo vincolo nel parametro compositivo sia stato o meno soddisfatto. Pertanto, utilizzando le stesse correlazioni sperimentali $R_{\text{st}} - \alpha/c$ simili a quelle riportate in Fig. 4, è possibile trarre un parametro compositivo in un parametro prestazionale-meccanico (quale appunto la resistenza caratteristica) di più facile ed immediata determinazione. In altre parole, scelta la classe di esposizione $(\alpha/c)_2$, per esempio 0,55, secondo la [13] è possibile risalire al conseguente rapporto R_{st}^* tramite le curve sperimentali ($R_{\text{st}}^* = 35 \text{ N/mm}^2$ con il cemento CEM II/B-L 32,5 come è mostrato in Fig. 5).

Occorre a questo punto verificare se la R_{st}^* che corrisponde al rapporto $(\alpha/c)_2$ derivato da esigenze di durabilità, sia congruente o meno (cioè coincide o meno) con il valore di R_{st} derivante da sole considerazioni di carattere strutturale (equazione (10)). Ovviamente, nel caso non si verifichi, come spesso avviene, la congruenza tra i due valori per soddisfare entrambi i requisiti prestazionali, occorre adottare il criterio più cogente e cioè il valore massimo tra R_{st} ed R_{st}^* , che corrisponde d'altra parte al valore minimo tra (α/c) ed $(\alpha/c)_2$.

Val la pena di segnalare, infine, che la classe di resistenza viene indicata, in accordo con le vigenti norme europee, con il simbolo C seguito da due numeri: il primo

* Per distinguere la R_{st} desunta da considerazioni di carattere strutturale da quella derivante da condizioni di durabilità, quest'ultima verrà indicata con il simbolo R_{st}^* .

di questi rappresenta la resistenza caratteristica misurata su provini cilindrici, ed il secondo la resistenza caratteristica misurata su provini cubici, con l'assunzione che il primo corrisponde all'80% del secondo. Per esempio la classe di resistenza C 24/30 individua un calcestruzzo con una resistenza caratteristica di 24 N/mm² su provini cilindrici e di 30 N/mm² su provini cubici. La classe di resistenza così indicata, che deve far parte delle specifiche di capitolato per tutte le opere in c.a. e c.a.p. secondo le vigenti normative, dovrebbe essere fatta coincidere con il maggiore tra i valori di R_{ck} ed R_{ck} per poter assicurare congruentemente tanto la resistenza meccanica quanto la durabilità del materiale.

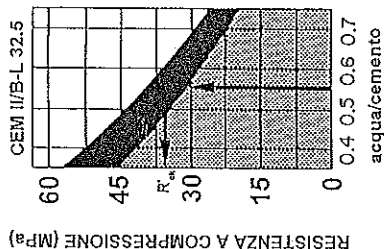


Fig. 5 - Esempio di trasformazione del rapporto (a/c), imposto dalla durabilità (Tabella 4) per opere marittime nella corrispondente R'_{sa} per un calcestruzzo confezionato con cemento CEM III/B-L 32.5.

4.3 La classe di consistenza

Oltre alle caratteristiche determinate da considerazioni di carattere strutturale e da quelle inerenti la durabilità, entrambe riassumibili in una unica classe di resistenza che tenga conto congruentemente di questi due requisiti, è necessario che il materiale sia progettato tenendo anche conto delle difficoltà esecutive del progettista dell'opera con quelle dell'impresa che le esegue.

Si è già accennato, alla fine del paragrafo 2, alle difficoltà di messa in opera, soprattutto in strutture geometricamente complicate e fortemente armate, quando il calcestruzzo fresco dovesse risultare reologicamente carente, cioè poco lavorabile, in virtù della riduzione nella quantità di acqua adottata per diminuire il rapporto a/c. Se questo aspetto del problema non viene preso in giusta considerazione in fase di progettazione del materiale, esiste il probabile rischio che nella fase esecutiva al calcestruzzo venga raggiunta acqua sul cantiere, per rendere più fluido l'impasto e più agevole la messa in opera, con buona pace per il rapporto a/c e per tutti gli argomenti di resistenza meccanica e di durabilità precedentemente illustrati.

E' pertanto di vitale importanza che la pratica di riaggiungere acqua al calcestruzzo sul cantiere, al momento del getto, sia da una parte proibita attraverso un più efficace controllo da parte della Direzione Lavori, e dall'altra fortemente disincentivata predisponendo, in fase di prescrizione del materiale, un calcestruzzo sufficientemente fluido e lavorabile da scoraggiare qualsiasi tentazione di nocive ragguglie di acqua.

La determinazione delle proprietà reologiche del calcestruzzo fresco, in accordo alle vigenti norme tecniche, si basa sulla definizione di una classe di consistenza basata sulla misura dell'abbassamento al cono di Abrams (*slump test*). Nella Tabella 5 sono indicati i cinque livelli della classe di consistenza (da S1 ad S5) ciascuno dei quali corrisponde ad un intervallo di *slump*; si passa dalla classe di consistenza S1 (che caratterizza un calcestruzzo poco lavorabile a consistenza di terra umida, con *slump* compreso tra 0 e 40 mm) per arrivare alla classe di consistenza S5 (che caratterizza un calcestruzzo superfluido con *slump* non inferiore a 210 mm).

Esistono due modi per aumentare progressivamente la classe di consistenza da S1 ad S5, in relazione alle crescenti difficoltà esecutive, senza penalizzare le prestazioni del calcestruzzo in servizio (resistenza meccanica e durabilità): si può aumentare il quantitativo di acqua (a), accompagnato però da un corrispondente aumento del quantitativo di cemento (c) in modo da mantenere costante il rapporto a/c; oppure, si può ricorrere all'impiego di polimeri idrosolubili (a base di naftalensolfonato, melammina solfonata, estere acrilico, ecc.) che fungono da disperdenti del sistema acqua-cemento rendendolo reologicamente più favorevole (cioè più fluido) senza dover ricorrere ad ulteriori aggiunte di acqua (14).

Qualunque sia il sistema che verrà prescelto, da chi dovrà produrre il calcestruzzo, nel determinare le proprietà reologiche dell'impasto fresco, è necessario che nelle prescrizioni di capitolato, il materiale sia preliminarmente progettato sulla base di una "terna" di prestazioni (classe di resistenza, classe di esposizione e classe di consistenza) che nel loro insieme garantiscano l'affidabilità del materiale sia in servizio, che in fase di esecuzione in corso d'opera.

Tabella 5. Classi di consistenza e relativi intervalli di slump previsti dalla norma UNI 9888

CLASSE DI CONSISTENZA	SLUMP (mm)	DENOMINAZIONE CORRENTE
S1	10-40	UMIDA
S2	50-90	PLASTICA
S3	100-150	SEMIFLUIDA
S4	160-200	FLUIDA
S5	> 210	SUPERFLUIDA

5 PRESCRIZIONI DI CAPITOLATO

La "terna" di prestazioni alla quale si è sopra fatto riferimento per una corretta e completa prescrizione di capitolato sul materiale, può essere rappresentata in un particolare diagramma ternario quale quello mostrato a titolo di esempio in Fig. 6 che si riferisce ad un determinato cemento. La rappresentazione di un sistema attraverso un diagramma ternario è frequentemente adottato nel campo della chimica-fisica per individuare, ad esempio, la composizione unitamente alla presenza delle fasi eterogenee che costituiscono il sistema.

La particolarità del diagramma ternario esemplificativamente mostrato in Fig. 6 consiste nel fatto che - a differenza di quanto avviene nei comuni diagrammi ternari - due dei parametri rappresentati su due lati del triangolo, (classe di resistenza meccanica e classe di esposizione) sono reciprocamente vincolati: in altre parole, se si aumenta la classe di esposizione, per esempio da 2a (ambiente generalmente umido) a 4a (ambiente marino), occorre promuovere a livelli più elevati anche la classe di resistenza (nel caso di Fig. 6 da circa 35 a 45 N/mm²): così pure non può essere aumentata la classe di resistenza per ragioni strutturali senza parallelamente promuovere anche la classe di esposizione alla quale il materiale può essere durevolmen-

te esposto. Ciò dipende dal fatto che, come si è già visto, queste caratteristiche - resistenza meccanica e durabilità - sono entrambe strettamente legate al rapporto σ/c e pertanto l'aumento di qualità del materiale - in termini di una delle due menzionate caratteristiche - è rappresentata dal movimento di una linea (e non di un punto) dalla base verso il vertice del triangolo.

Una volta che si è stabilito il livello di qualità in termini congiunti di resistenza meccanica e durabilità, ci si può muovere lungo una linea parallelamente al lato di base del triangolo che rappresenta la classe di consistenza del calcestruzzo: il movimento da sinistra a destra (per esempio dal punto A al punto B della Fig. 6) rappresenta un progressivo miglioramento delle proprietà reologiche, e quindi una maggiore facilità nel getto, senza alcuna penalizzazione nella resistenza meccanica e nella durabilità: ciò può essere realizzato in pratica, aggrugnando, per esempio, coadiuvanti reologici (additivi superfluidificanti) al calcestruzzo senza modificare la composizione per gli altri ingredienti.

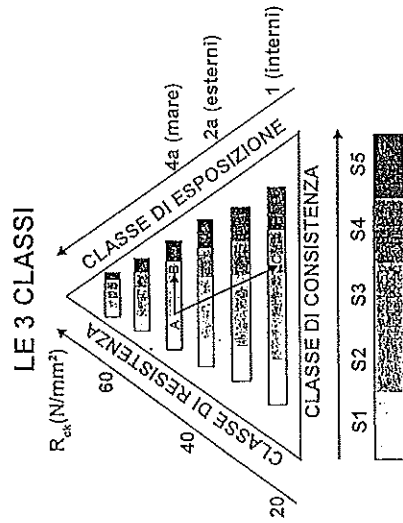


Fig. 6 - Rappresentazione schematica su diagramma ternario delle tre classi (di resistenza, di esposizione e di consistenza) per la caratterizzazione del calcestruzzo: l'esempio è limitato a tre classi di esposizione 1, 2a e 4a.

Il miglioramento reologico eseguito, invece, con riaggiunta dell'acqua sul cantiere, e quindi con penalizzazione delle altre due classi (di resistenza e di esposizione), è rappresentato dal movimento del punto A verso il punto C della Fig. 6: in questo caso, l'aumento nella classe di consistenza (da S2 a S4) è accompagnato da un significativo peggioramento delle altre due prestazioni (resistenza meccanica e durabilità) per effetto dell'aumento nel rapporto w/c .

Un'altra importante considerazione sulla rappresentazione mostrata in Fig. 6 riguarda la complessità dei sistemi in relazione ai numerosi (150) cementi potenzialmente disponibili secondo le recenti norme tecniche: in sostanza esiste, per ognuno dei 150 cementi potenzialmente disponibili sul mercato, un corrispondente diagramma ternario simile a quello mostrato in Fig. 6. Questa complessa situazione ha portato allo sviluppo di un sistema computerizzato (C/M/D, *Computerized Mix-Design*) per le prescrizioni di capitolato così come per la produzione del materiale in accordo a queste prescrizioni (15).

BIBLIOGRAFIA

- (1) M. Collepardi, Scienza e Tecnologia del Calcestruzzo, pp. 135-140, III Ed. Hoepli, Milano, 1991.
- (2) P.K. Mehta, "Concrete Technology at the Crossroads. Problems and Opportunities", Proceedings of the Malhotra Symposium on Concrete Technologies: Past, Present and Future, pp. 1-30, Ed. P.K. Mehta, ACI SP-144, 1994 S. Francisco.
- (3) M. Collepardi, "Durabilità del calcestruzzo. Teoria, Pratica e Prescrizioni di Capitolato". Parte I: cause di degrado di tipo chimico, pp. 707-726. 11, 1992.
- (4) L. Coppola, "Durabilità del calcestruzzo. Teoria, Pratica e Prescrizioni di Capitolato". Parte II: cause di degrado di tipo fisico e meccanico, pp. 199-209, 3, 1993.
- (5) B.C. Gerwick, "Pressing Needs and Future Opportunities of Concrete in the Marine Environment", Proceedings of the Gerwick Symposium on Durability of Concrete, pp. 1-5, Ed. P.K. Mehta, 1989.
- (6) M. Moukwa, "Deterioration of Concrete in Cold Sea Water". Cement and Concrete Research, 20, pp. 439-446, 1990.
- (7) O.E. Giourv. K. Tan, M.H. Zhang, "Diffusivity of Chlorides from Sea Water into High Strength Lightweight Concrete". ACI Materials Journal, pp. 447-452, 5, 1994.
- (8) P.K. Mehta, "Durability of Concrete - Fifth Years of Progress?", pp. 1-32, Ed. V.M. Malhotra, ACI SP-126, 1991.

- (9) M. Collepardi, A. Marcialis e R. Turriziani, "Penetration of Chloride Ions into Cement Paste and Concrete", Journal of the American Ceramic Society, pp. 534-535, 55, 1972.
- (10) T. Knudsen, "Thaumastite, Its Stability and Formation. A Literature Review and Report". Report for Eureka Project EV-672. Eurocare-Thaumastite, pp. 1 - 2.1, 1992.
- (11) M. Collepardi, "Mechanism of deterioration and mix-design of durable concrete structures", Proceedings of the Mehta Symposium on Durability of Concrete, pp. 35-60, Nice, 1994.
- (12) ACI Committee 201, "Guide to Durable Concrete", ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, 1993.
- (13) Eurocode No. 2, "Design of Concrete Structures, Part 1: General Rules and Rules for Buildings", 1991.
- (14) M. Collepardi, "Superplasticizers and air-entraining agents: state of the art and future needs", Proceedings of the Malhotra Symposium on Concrete Technology: Past, Present and Future, pp. 399-416. Ed. by P.K. Mehta, ACI SP-144, S. Francisco, 1994.
- (15) F. Bianchini, M. Collepardi, L. Coppola e R. Pozzi, "Computerized Mix-Design - Manuale di Istruzione", Ed. ENCO, 1994.