

aicap

Associazione Italiana
Cemento Armato e Precompresso
via G. Anronelli, 41 - 00147 ROMA

PROGRAMMA PRELIMINARE

GIORNATE A.I.C.A.P. 1981

- A) PRECOMPRESSIONE PARZIALE
- B) STRUTTURE MARITTIME

RAVENNA - 20-24 MAGGIO

MUSEO NAZIONALE - CHIOSTRI DI S. VITALE

L'AZIONE DELL'ACQUA DEL MARE SUL CALCESTRUZZO ARMATO

MARIO COLLEPARDI

Sommario

Le strutture in calcestruzzo armato a contatto dell'acqua del mare possono essere degradate attraverso diversi meccanismi. Questi possono essere di natura chimica, fisica e meccanica. Tuttavia, i fattori più importanti che influiscono sul processo di degradazione del calcestruzzo e del ferro sono: a) dilavamento della pasta di cemento da parte dell'acqua; b) attacco dei solfati sul calcestruzzo; c) corrosione dei ferri accelerata dalla presenza degli ioni cloruro.

Abstract

Reinforced concrete structures in sea water can be deteriorated through different mechanisms. These can be due to chemical, physical and mechanical causes. However, the most important factors affecting concrete and iron deterioration are: a) leaching of cement paste by sea water; b) sulfate attack of concrete and c) iron corrosion promoted by the presence of chloride ions.

1. INTRODUZIONE

Possono essere definiti agenti chimicamente aggressivi per il calcestruzzo quei prodotti che, a seguito di trasformazioni chimiche o chimico-fisiche, provocano un peggioramento nelle prestazioni del conglomerato. Tali agenti possono essere presenti in natura (terreni, acque marine, acque sotterranee, ecc.) o prodotti artificialmente dall'uomo attraverso processi concernenti industrie chimiche, alimentari, farmaceutiche, petrolifere, ecc.

Qualunque sia la natura dell'agente aggressivo naturale, la degradazione del calcestruzzo interessa non tanto la superficie del manufatto, ma soprattutto la sua struttura interna, la cui permeabilità diviene, pertanto, il principale parametro che governa la durabilità del materiale. Perché un agente aggressivo naturale possa esplicare la sua azione è necessario, quindi, che esso penetri all'interno del calcestruzzo. In genere, un agente aggressivo secco - si consideri per esempio il solfato di magnesio in cristalli - non è in grado di penetrare all'interno di un calcestruzzo anche se molto permeabile. Perché ciò possa avvenire è necessario che l'agente aggressivo sia disciolto nell'acqua e da questa trasportato all'interno del calcestruzzo. Per questo motivo, l'acqua è considerata un elemento ambientale potenzialmente più aggressivo che non l'aria o il terreno a contatto del calcestruzzo. Nel caso del terreno, un agente aggressivo può provocare la degradazione del calcestruzzo solo per la presenza di acqua nel terreno, attraverso la quale può avvenire il trasporto del sale aggressivo dal terreno all'interno del calcestruzzo.

L'acqua del mare rappresenta indubbiamente l'agente aggressivo naturale più importante sia per la vastità del fenomeno, sia per gli effetti degradanti che coinvolgono il calcestruzzo e i ferri d'armatura.

L'attacco dell'acqua del mare nei confronti del calcestruzzo armato è piuttosto complesso e coinvolge meccanismi di natura chimica (per la presenza di anidride carbonica, di sali magnesiaci e soprattutto di sali solfatici), di natura fisica (cristallizzazione dei sali, insorgere di pressione osmotica, alternanze di bagnatura e asciugamento, e formazione di ghiaccio) di natura meccanica (abrasione ed impatto dovuto al moto ondoso) e perfino di natura biologica (per la presenza di batteri e molluschi).

Ciò spiega come la degradazione del calcestruzzo si manifesti in forme e con intensità talvolta molto diverse a seconda che prevalga un meccanismo piuttosto che l'altro, in relazione alle differenti condizioni ambientali, climatiche, geografiche.

Tuttavia, si possono fondamentalmente individuare due tipi di degradazione: il primo consiste in un dilavamento della pasta di cemento e si manifesta prevalentemente in mare aperto (dove il moto ondoso favorisce l'azione dilavante dell'acqua del mare) ed in presenza di anidride carbonica aggressiva; il secondo si presenta sotto forma di fessurazioni e di stacchi del calcestruzzo ed è principalmente causato dall'azione dei solfati.

L'acqua del mare - a causa della presenza di quantità rilevanti di cloruri - è in grado di provocare un'azione aggressiva anche nei confronti dei ferri d'armatura. La corrosione dei ferri - che può provocare a sua volta un distacco del co-proferro - si manifesta talvolta anche in opere distanti alcuni chilometri dalle coste.

Tenuto conto della complessità del fenomeno, nel seguito sono discussi i seguenti tre tipi di aggressione: dilavamento della pasta di cemento, attacco dei solfati, attacco dei cloruri nei confronti dei ferri di armatura, tutti fenomeni con

nessi con l'azione dell'acqua del mare. Ciò non significa che gli altri fenomeni sopra menzionati (quali l'azione meccanica provocata dal moto ondoso, ecc., non siano da prendere in considerazione. Per essi, tuttavia, si rimanda alla letteratura specializzata ed in particolare al libro "Concrete Corrosion - Concrete Protection" di Imre Biczök (Akadémiai Kiadó, Budapest, 1972).

2. IL DILAVAMENTO DELLA PASTA DI CEMENTO

Per dilavamento si intende l'azione dissolvvente esercitata da un liquido in movimento a contatto con un solido.

L'idrossido di calcio, che è uno dei costituenti della pasta di cemento, ha una solubilità in acqua di 1,6 g/l alla temperatura di 20°C. Ciò significa che una qualsiasi porzione di pasta o di calcestruzzo in contatto con un litro d'acqua, dopo un certo tempo necessario al raggiungimento dell'equilibrio, può arrivare a perdere fino a 1,6 grammi di Ca(OH)_2 . Se però l'acqua è in movimento l'azione dissolvvente si rinnova continuamente ed in teoria si può arrivare a sciogliere tutto l'idrossido di calcio presente in un calcestruzzo. In effetti, il dilavamento può procedere più o meno rapidamente in relazione ad alcuni parametri che ne regolano la cinetica, quali per esempio la temperatura dell'ambiente, la porosità del solido, la velocità con cui si muove il liquido, l'estensione della superficie di contatto liquido-solido, ecc.

In linea di massima, qualunque sia l'effetto della temperatura sulla solubilità, un solido si scioglie più rapidamente a caldo. Ancora più forte è l'effetto della porosità sulla velocità di dissoluzione: una pasta più porosa per un elevato rapporto acqua/cemento o per una stagionatura troppo breve e quindi per una maggiore porosità capillare, oppure per una inadeguata compattazione, e quindi per una maggiore macroporosità, è più

rapidamente dilavata dall'azione dell'acqua corrente. Nel caso del calcestruzzo, la porosità, oltre che dal rapporto acqua/cemento e dal grado di compattazione, può essere influenzato anche dal dosaggio di cemento: una quantità di cemento insufficiente a riempire tutti gli interstizi presenti tra gli inerti porterà inevitabilmente ad un materiale più poroso, qualunque sia stato il rapporto acqua/cemento, l'efficienza del sistema di messa in opera, e l'accuratezza della stagionatura. A parità di volume della struttura di calcestruzzo, maggiore è la superficie esposta all'azione dell'acqua, più rapido è il dilavamento. Anche il grado di finitura della superficie influenza la velocità di dilavamento, nel senso che superfici più chiuse e più compatte rallentano il dilavamento. Resta, infine, da segnalare l'importanza della scelta del cemento: calcestruzzi confezionati con un cemento pozzolanico o d'altoforno presentano un minor quantitativo di Ca(OH)_2 , rispetto a quelli preparati con cemento Portland, e quindi risultano sensibilmente più resistenti all'azione dilavante dell'acqua in movimento.

L'effetto del dilavamento consiste in una perdita di resistenza meccanica ed in un aumento della porosità dovuta all'asportazione di materiale solido dalla pasta di cemento presente in una malta o in un calcestruzzo. Si è calcolato, in prima approssimazione, che per ogni 1% del contenuto originale di calce di idrolisi asportata per dilavamento, si registra una diminuzione dell'1-2% nella resistenza meccanica a compressione (1). D'altra parte, soprattutto se l'acqua dilavante contiene ioni aggressivi, quali per esempio i solfati, l'aumento di porosità provocata dal dilavamento della calce di idrolisi crea condizioni più favorevoli alla penetrazione degli ioni aggressivi all'interno della struttura e ne accelera quindi il deterioramento.

L'azione dissolvvente dell'acqua viene sensibilmente accentuata dalla presenza della cosiddetta anidride carbonica "aggressiva" capace di sciogliere il carbonato di calcio presente nel-

la pasta di cemento ed eventualmente negli inerti calcarei. A parità di contenuto di anidride carbonica totale (sempre presente nell'aria e quindi nell'acqua sotto forma di acido carbonico) la frazione di anidride carbonica "aggressiva" aumenta nell'acqua se questa contiene dei sali. Pertanto le acque salmastre, e soprattutto quelle marine, presentano un'azione dilavante nei confronti del calcestruzzo sensibilmente maggiore delle altre acque naturali.

In generale, quando si parla di dilavamento di un calcestruzzo si pensa soprattutto all'azione dissolvente dell'acqua nei confronti della calcedi idrolisi, che è indubbiamente il composto più solubile presente in un impasto cementizio. Tuttavia, anche gli altri costituenti della pasta cementizia, ritenuti in prima approssimazione insolubili in acqua, presentano in realtà una certa solubilità anche se sensibilmente inferiore a quella del Ca(OH)_2 .

Per concludere si può affermare che, nella pratica, le conseguenze del dilavamento sono di fatto trascurabili se si confeziona e si mette in opera un normale calcestruzzo di buona qualità possibilmente con cemento pozzolanico o d'altoforno, mentre diventano apprezzabili se si prepara un calcestruzzo povero di cemento, con un alto rapporto acqua/cemento, mal costipato, ed inadeguatamente stagionato.

3. ATTACCO DEI SOLFATI

Tra tutti gli agenti aggressivi del calcestruzzo, i solfati sono indubbiamente i più importanti sia per la frequenza con cui si può manifestare l'attacco solfatico, sia per le conseguenze e stremamente negative che essi sono capaci di provocare.

Il contenuto di solfato nell'acqua del mare è piuttosto rilevante e varia tra un minimo di 2500 ppm ad un massimo di 3100 ppm. Tuttavia, è stato riscontrato che a causa della presenza di altri sali nell'acqua di mare, l'effetto dei solfati è meno gra-

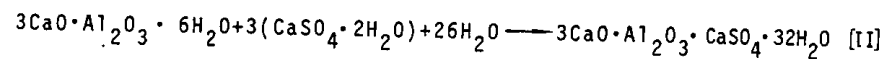
ve di quello che si potrebbe dedurre dalla sua concentrazione. Si assume che, per l'acqua del mare, la concentrazione dei solfati, dal punto di vista dell'aggressione nei confronti del calcestruzzo, equivale a circa 1000-2000 ppm.

L'attacco solfatico si manifesta attraverso un rigonfiamento esagerato del calcestruzzo. Quando il calcestruzzo è immerso in acqua potabile esso tende a rigonfiarsi di alcune centinaia di micron per metro nel giro di qualche anno (2) : il rigonfiamento, dovuto all'ingresso di acqua potabile nella pasta di cemento, è esattamente l'opposto del fenomeno di ritiro che si manifesta, sia pure con una variazione dimensionale molto maggiore, allorquando il calcestruzzo è esposto in un ambiente asciutto e l'acqua evapora dalla pasta cementizia verso l'ambiente. Il rigonfiamento che si manifesta in un calcestruzzo immerso in una acqua solfatica, molto maggiore di quello concernente l'immersione in acqua potabile (Fig. 1), è di tale entità che possono verificarsi fessurazioni o distacchi nel materiale (Fig. 2). Si potrebbe pensare di definire patologico il rigonfiamento in acqua solfatica e fisiologico quello in acqua potabile. La Fig. 3 mostra un esempio pratico di degradazione di attacco solfatico in un calcestruzzo impiegato per la costruzione di canali di irrigazione (3).

Occorre, inoltre, tener conto che un eccessivo rigonfiamento del calcestruzzo - causato dall'azione dei solfati - è condizione necessaria ma non sufficiente per provocare la degradazione del calcestruzzo. Nei calcestruzzi a ritiro compensato contenenti cementi espansivi (4) si verifica sostanzialmente lo stesso fenomeno fisico (rigonfiamento) molto spesso causato dalla stessa reazione chimica (produzione di ettringite). In questo caso, però, il rigonfiamento - di entità controllata - oltre a coinvolgere tutta la struttura, è contrastato dalla presenza di armature appositamente predisposte per trasformare l'espansione in una compressione del calcestruzzo ed in una tensione dei ferri d'arma-

tura. Nel caso della degradazione causata dall'attacco solfatico, il rigonfiamento, oltre a raggiungere valori elevati per la sua continua presenza di solfati, non si esplica omogeneamente in tutta la struttura ma si manifesta soprattutto nelle zone contigue di calcestruzzo a contatto con i solfati provenienti dall'ambiente. Inoltre, la mancanza di un adeguato contrasto nelle zone di calcestruzzo più esposte all'evaporazione consente che le dilatazioni differenziali provochino la fessurazione ed il distacco del materiale.

Le reazioni distruttive del calcestruzzo dovute alla presenza di solfati nell'ambiente sono fondamentalmente due: quella che porta alla formazione di gesso biidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e quella che provoca la formazione di ettringite ($3\text{Ca} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$):



L'idrossido di calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (sempre presente in un calcestruzzo in quanto prodotto dalla reazione tra l'acqua di impasto ed i silicati di calcio del cemento) viene trasformato nel più voluminoso gesso biidrato, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, secondo la reazione [I]. Ancora maggiore è l'aumento di volume che si verifica con la reazione [II] quando un alluminato idrato di calcio, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$,* è trasformato in ettringite. Gli alluminati idrati

* Nota: il $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ non è l'unico alluminato idrato di calcio presente nella pasta di cemento. Altri alluminati idrati, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$; $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, o anche un solfoalluminato meno ricco in solfato, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ sono convertibili in ettringite con aumento di volume.

presenti nella pasta cementizia all'interno di un calcestruzzo provengono fondamentalmente dall'alluminato tricalcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ o più brevemente C_3A) e dal ferro-alluminato tetracalcico ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ o più brevemente C_4AF) del cemento. La reazione [II] provoca, come si è detto, un maggior aumento di volume che non la reazione [I], ed il C_3A più del C_4AF sembra contribuire alla produzione di ettringite. Da ciò deriva che il contenuto di C_3A nel cemento da impiegare è un parametro importante nel determinare l'attacco solfatico del calcestruzzo a parità di condizione aggressiva dell'ambiente.

3.1 Raccomandazioni per calcestruzzi resistenti all'attacco solfatico

Il problema di eliminare i danni provocati da un attacco solfatico sul calcestruzzo consiste in:

- valutare in modo quantitativo il grado dell'attacco solfatico;
- confezionare (mediante scelta delle materie prime ed opportuno proporzionamento degli ingredienti) un calcestruzzo che sia capace di resistere adeguatamente all'attacco solfatico.

Ovviamente più severo è l'attacco dei solfati, maggiore deve essere la resistenza chimica opposta dal calcestruzzo.

Per quanto riguarda la valutazione dell'attacco, il criterio adottato dalla maggior parte delle normative è quello di misurare la concentrazione del solfato nell'ambiente, tenendo presente che maggiore è la concentrazione di solfato più severo è l'attacco, e che a parità di concentrazione del solfato nell'ambiente l'aggressione è maggiore se l'ambiente è costituito dall'acqua invece che dal terreno.

Il Comitato 201 (durabilità del calcestruzzo) dell'American Concrete Institute (5) raccomanda di far riferimento alla Tabel-

la 1. A seconda del contenuto di solfato in un terreno o in un acqua, l'attacco è definito "debole", "moderato", "severo", e "severissimo". Si può osservare, per esempio, che ad un attacco severo corrispondono tenori in solfati solubili di 0,2-2% se l'ambiente è il terreno, e di 1500-1000 parti per milione (ppm) corrispondenti a 0,15-1% se l'ambiente è l'acqua. Stabilito il grado di attacco mediante un'analisi chimica del solfato nell'ambiente, si possono prendere le adeguate contromisure consistenti nello scegliere un cemento tanto più resistente ai solfati (cioè tanto più povero in C_3A) ed un rapporto acqua/cemento tanto più basso quanto è più severo l'attacco.

Tabella 1 Raccomandazione del Comitato ACI 201 (5) per calcestruzzi resistenti ai solfati.

Grado di attacco	Solfati (SO_4^{2-}) nel terreno (%)	Solfati (SO_4^{2-}) nell'acqua (ppm)	Cemento secondo ASTM	Rapporto a/c massimo **
Debole	0,00 - 0,10	0 - 150	--	--
Moderato *	0,10 - 0,20	150 - 1500	Tipo II, IP, IS	0,50
Severo	0,20 - 2,00	1500 - 10000	Tipo V	0,45
Severissimo	2,00	10000	Tipo V + pozzolana	0,45

* L'acqua del mare rientra in questa categoria

**Un più basso rapporto acqua/cemento può essere necessario per prevenire la corrosione dei ferri in un calcestruzzo armato o precompresso.

Nel caso di un attacco "debole" si può impiegare qualsiasi cemento ed il rapporto acqua/cemento dipenderà sostanzialmente dalla resistenza meccanica che si vuole ottenere. Per un attacco "moderato" è necessario non superare 0,50 per il rapporto acqua/cemento mentre il cemento prescelto (Tipo II) dovrà essere

moderatamente resistente ai solfati, la qualcosa corrisponde, secondo l'ASTM 150, ad un contenuto di C_3A inferiore all'8%. Per un attacco "severo" è necessario ridurre ulteriormente il rapporto acqua/cemento al di sotto di 0,45; il cemento impiegato (tipo V) dovrà essere più resistente ai solfati, cioè contenere non più del 5% in C_3A mentre la somma di $C_4AF + 2C_3A$ non dovrà essere superiore al 20%. Per un attacco "severissimo" il rapporto acqua/cemento non deve superare 0,45 mentre il cemento tipo V dovrà essere sostituito da una miscela di cemento tipo V e pozzolana o cenere volante (15-25%). La pozzolana, combinandosi con gran parte dell'idrossido di calcio proveniente dall'idratazione del cemento, riduce infatti la quantità di gesso biidrato prodotto secondo la reazione [I]. L'efficacia della pozzolana e della loppa nel ridurre l'attacco solfatico è riconosciuta dal Comitato 201 dell'ACI ammettendo di sostituire il cemento tipo II con una miscela di cemento Portland normale tipo I (per il quale il C_3A può superare l'8%) e pozzolana (cemento IP) o loppa d'altoforno (IS).

Il Comitato ACI 211 (proporzionamento del calcestruzzo dell'American Concrete Institute suggerisce (6) valori leggermente diversi dal Comitato ACI 201 come è mostrato in Tabella 2 e prevede un solo tipo di attacco (con solfati maggiori dello 0,2%). Tuttavia rimane fermo il principio che occorre fissare un rapporto acqua/cemento relativamente basso. Inoltre, l'impiego di un cemento Portland normale (tipo I ASTM) è consentito in luogo di un cemento resistente ai solfati (tipo II o meglio tipo V ASTM), purché il rapporto acqua/cemento sia un po' più basso (circa il 10% in meno). Infine il Comitato ACI 211 suggerisce rapporti acqua/cemento più bassi per strutture sottili o con copriferri inferiori a 25 mm. Infatti, a parità di ambiente aggressivo, le conseguenze dell'attacco solfatico sono ovviamente più gravi per queste strutture che non per quelle più massicce.

Tabella 2 Raccomandazioni del Comitato 211 ACI (6) per calcestruzzi resistenti agli ambienti solfati* e all'acqua di mare.

Tipo di struttura	acqua/cemento massimo	Tipo di cemento
Sezioni sottili o con copriferri inferiori a 25 mm	0,40	I
	0,45	II o V
Strutture massicce	0,45	I
	0,50	II o V

* con tenori di solfato superiore allo 0,2% espresso come SO_4^{2-}

Le raccomandazioni (7) dell'associazione europea dei cementieri (Cembureau) prevedono quattro tipi di attacco solfatico e suggeriscono diversi proporzionamenti per confezionare calcestruzzi adeguatamente resistenti ai solfati (Tabella 3). Oltre al tipo di cemento ed al rapporto acqua/cemento, presi in considerazione dalle raccomandazioni ACI (Tabelle 1. e 2), il Cembureau raccomanda (7) un dosaggio minimo di cemento non previsto, invece, dalle raccomandazioni ACI (5,6). In realtà, la prescrizione di un dosaggio minimo di cemento può dar luogo ad alcuni seri inconvenienti in quelle strutture dove sia necessario lo sviluppo del calore di idratazione o minimizzare il ritiro. Si pensi, per esempio, ai grossi getti per una diga o per una fondazione. Se l'acqua o il terreno a contatto con tali strutture contengono rispettivamente 5 g/l o più di 12 g/Kg, il calcestruzzo dovrebbe essere confezionato con un rapporto acqua/cemento di 0,45 e contenere, secondo le raccomandazioni Cembureau, almeno 370 Kg/m^3 di cemento resistente ai solfati. Tale dosaggio di cemento è sicuramente eccessivo per strutture di grande mole per l'elevato sviluppo del calore. In realtà, il dosaggio di cemento deve risultare una conseguenza del rapporto acqua/cemento, del diametro massimo dell'inerte e della lavorabilità. Per esempio,

Tabella 3 Raccomandazioni del Cembureau (7) per calcestruzzi resistenti ai solfati

Grado di attacco	Nessuno	Debole		Moderato	Forte	Fortissimo (*)
Solfato nelle acque (mg di SO_4^{2-} per litro)	0 - 200	200-400	400-600	600-3000	3000-6000	>6000
Solfato nei terreni (mg di SO_4^{2-} per Kg di terreno secco)	0 - 2000	2000-4000	4000-6000	6000-12000	>12000	--
Cemento	Normale	Normale	Normale (**)	"Resistente ai solfati" (***)	"Resistente ai solfati" ai solfati"	"Resistente ai solfati" ai solfati"
Rapporto acqua/cemento massimo	--	0,55	0,50	0,50	0,45	0,45
Dosaggio di cemento (Kg/m^3)	--	300	330	330	370	370

(*) E' prevista anche una protezione del calcestruzzo con resina, bitume, ecc.

(**) In tal caso il cemento normale può essere sostituito con un cemento "resistente ai solfati" dosato a 300 Kg/m^3 con un rapporto acqua/cemento di 0,55.

(***) Il "cemento resistente ai solfati" dovrebbe essere definito dalle norme di ciascun Paese della Comunità Europea. In realtà in Italia non esiste alcuna norma di legge che definisce tale cemento, anche se si assume che il cemento d'altoforno, quello pozzolanico, quello ferrico e ancor più quello ferrico-pozzolanico siano resistenti ai solfati. D'altra parte nessuna norma di legge stabilisce in Italia cosa sia il cemento ferrico o il cemento ferrico-pozzolanico.

con un diametro massimo dell'inerte di 75 mm e con una lavorabilità di 2,5 cm di slump, sono necessari 140 litri di acqua per metro cubo di calcestruzzo (8). Pertanto il dosaggio di cemento risulterà così fissato dal rapporto acqua/cemento (0,45):

$$\frac{a}{c} = \frac{140}{c} = 0,45 \quad c = \frac{140}{0,45} = 310 \text{ Kg/m}^3$$

Naturalmente, con lo stesso rapporto acqua/cemento di 0,45 (richiesto per garantire la resistenza all'attacco solfatico) sarà necessario aumentare il dosaggio di cemento se si diminuisce il diametro massimo dell'inerte.

Criteri analoghi a quelli adottati per le raccomandazioni ACI sono suggeriti dalle raccomandazioni FIP-CEB (9). L'attacco solfatico è definito debole, medio o forte a seconda del contenuto dello ione SO_4^{2-} nelle acque o nei terreni come è mostrato in Tabella 4. Maggiore è il contenuto di solfato nell'ambiente, minore deve essere il rapporto acqua/cemento per il calcestruzzo. In realtà le raccomandazioni FIP-CEB precisano che il massimo rapporto acqua/cemento debba essere 0,60 per un attacco debole e 0,50 per un attacco forte, dovendosi forse intendere un valore intermedio di 0,55 per un attacco medio. Le raccomandazio-

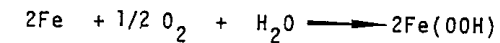
Tabella 4 Raccomandazioni FIP-CEB per calcestruzzi resistenti all'attacco solfatico (9).

Grado di attacco	debole	medio	forte
Solfato nelle acque (mg SO_4^{2-} /l)	200 - 600	6000 - 3000	>3000
Solfato nei terreni (mg SO_4^{2-} /Kg di terreno secco)	2000 - 5000	> 5000	--
Rapporto acqua/cemento massimo	0,60	0,55	0,50

ni FIP-CEB sottolineano l'importanza di un'accurata stagionatura umida per le opere in calcestruzzo esposte ad ambienti aggressivi, mentre non prescrivono - al pari delle raccomandazioni ACI - alcun dosaggio di cemento minimo; né d'altra parte viene prescritto alcun tipo di cemento giacché si assume che un calcestruzzo impermeabile, per il basso rapporto acqua/cemento, sia sufficientemente durevole indipendentemente dal tipo di cemento adottato.

4. L'ATTACCO DEI CLORURI NEI CONFRONTI DEI FERRI D'ARMATURA

Le armature in presenza dell'ossigeno e dell'umidità dell'ambiente possono subire una degradazione consistente nella trasformazione chimica da ferro metallico a ossidi o idrossidi di ferro. Il processo può essere così schematizzato:



La reazione può avvenire più facilmente nelle strutture in calcestruzzo armato il cui copriferro non protegge adeguatamente i ferri dalla penetrazione dell'aria umida dall'ambiente verso i ferri stessi. La presenza di cloruri - aggiunti oltre certi limiti insieme al cemento, agli additivi, agli inerti o all'acqua di impasto o provenienti dall'ambiente come è il caso dell'acqua del mare - promuove notevolmente il processo di ossidazione del ferro.

La corrosione dei ferri di armatura presenta sostanzialmente due fenomeni degradanti: il primo, più pericoloso, riguarda la diminuzione di sezione del ferro metallico, il secondo comporta un distacco del copriferro a causa del rigonfiamento del ferro sottostante per la trasformazione da metallo in ossido. Naturalmente la rimozione del copriferro provoca una completa esposizione dei ferri all'azione aggressiva che viene pertanto accelerata.

L'effetto è particolarmente pericoloso nei calcestruzzi armati precompressi dove l'azione corrosiva diviene più incisiva in presenza di una sollecitazione di trazione sui ferri d'armatura.

Nel caso di strutture esposte all'azione dell'acqua del mare la concentrazione di cloruri - variabile in genere tra 18 e 22 grammi/litro - è tale da provocare un sensibile e rapido processo di ossidazione dei ferri se non sono adeguatamente protetti da un copriferro impermeabile. C'è inoltre da tener conto che nel caso dell'acqua del mare il calcestruzzo del copriferro può essere più facilmente attaccato dall'azione dei sali (in particolare il solfato) creando così condizioni più favorevoli alla penetrazione ed all'attacco dei cloruri verso i ferri di armatura.

Pertanto per proteggere i ferri dall'aggressione dei cloruri è necessario: a) innanzitutto creare una barriera adeguata con un copriferro in calcestruzzo impermeabile e resistente esso stesso all'attacco nei confronti del calcestruzzo; b) in secondo luogo evitare l'impiego di materiali (cemento, additivi, inerti ed acqua di impasto) con quantità rilevanti di cloruro.

Per quanto riguarda il punto a) occorre fondamentalmente:

1. Limitare il rapporto acqua/cemento - per ridurre la "microporosità" ed aumentare l'impermeabilità del calcestruzzo - a valori non superiori a quelli già riportati nelle Tabelle 1-4.
2. Compattare completamente il calcestruzzo mediante una efficace ed omogenea vibrazione o, qualora ciò sia di difficile esecuzione, aumentare adeguatamente la lavorabilità del calcestruzzo in relazione ai sistemi di vibrazione disponibili. La completa compattazione del calcestruzzo è di fondamentale importanza per ridurre la "macroporosità" del copriferro: qua

lora ciò non avvenga diviene praticamente inutile l'impiego di calcestruzzi "microporosi" per il basso rapporto acqua/cemento.

3. Aumentare lo spessore di copriferro il quale dovrà essere tanto maggiore quanto peggiore e la qualità intrinseca del calcestruzzo, cioè quanto più alto è il rapporto acqua/cemento.

Come si vede esiste una stretta correlazione tra i tre summenzionati parametri nei confronti della resistenza chimica del copriferro in quanto i primi due influenzano la "resistenza specifica" del calcestruzzo alla penetrazione degli agenti aggressivi, mentre il terzo condiziona soltanto la lunghezza del cammino resistente.

A differenza di quanto avviene per l'attacco solfatico nei confronti del calcestruzzo, non esiste invece una normativa che specifichi, correlandoli tra loro, i valori dei parametri summenzionati. Tuttavia l'American Concrete Institute raccomanda (5) di non superare un rapporto acqua/cemento di 0,40 per strutture armate con copriferro di circa 35 mm. Qualora questo specifico rapporto acqua/cemento non possa essere realizzato si può tollerare un rapporto acqua/cemento di 0,45 purché il copriferro sia aumentato di mezzo pollice. Questi valori sono raccomandati per tutti i tipi di cemento, sebbene quelli con moderati contenuti di C_3A (tra 5 e 8%) abbiano mostrato una migliore protezione nei confronti dei ferri d'armatura.

Per quanto concerne la presenza di cloruro aggiunto nello impasto attraverso una o più delle materie prime (acqua, cemento, inerti e additivi) il Comitato ACI 201 (5) raccomanda che il contenuto totale di cloruro - espresso rispetto al peso di cemento - non debba superare i seguenti limiti:

1. Calcestruzzi armati precompressi 0,06%

- | | |
|--|---------------|
| 2. Calcestruzzi armati in ambienti umidi ed esposti ai cloruri dell'ambiente (zone marine) | 0,10% |
| 3. Calcestruzzi armati in ambienti umidi ma non esposti ai cloruri dell'ambiente (incluse zone dove il calcestruzzo può essere occasionalmente bagnato come nei garage, cantine, ecc.) | 0,15% |
| 4. Calcestruzzi armati in ambienti asciutti. | Nessun limite |

5. CONCLUSIONI

Al fine di garantire una durabilità sia del calcestruzzo che dei ferri, per le strutture in calcestruzzo armato destinate a rimanere a contatto con l'acqua del mare, si deve: a) limitare il rapporto acqua/cemento (0,45-0,50) per creare una struttura impermeabile e quindi inattaccabile come suggerito dalle normative internazionali; b) orientarsi verso cementi di per sé più resistenti ai solfati ed al dilavamento (cemento d'altoforno, pozzolanico, ferrico, ferrico-pozzolanico); c) compattare completamente il calcestruzzo aumentandone la lavorabilità; d) prevedere un copriferro di adeguato spessore (≥ 35 mm); e) limitare il contenuto di cloruro nelle materie prime (cemento, inerti, acqua e additivi) a 0,06% per il calcestruzzo precompresso ed a 0,10% per il calcestruzzo armato.

6. BIBLIOGRAFIA

- (1) F.M. Lea "The Chemistry of Cement and Concrete", pg. 345 Edward Arnold, London, (1970).
- (2) M. Collepardi "Scienza e tecnologia del calcestruzzo", pg. 466, Hoepli, Milano, (1980).
- (3) B.P. Bellport, "Performance of Concrete", pg.83, Technical Editor, University Toronto Press, (1968).
- (4) M. Collepardi "Scienza e tecnologia del calcestruzzo", pg. 230, Hoepli, Milano, (1980).
- (5) ACI Committee 201 "Guide to Durable Concrete", Journal American Concrete Institute, 74, 573, (1977).
- (6) ACI Committee 211 "Recommended Practice for Selecting Proportions fo Normal and Heavyweight Concrete" ACI Manual of Concrete Practice, Part 1. pg.211-1, ACI Publication, Detroit, (1979).
- (7) Cembureau Recommendation "Use of Concrete in Aggressive Environment", (1976).
- (8) M. Collepardi "Scienza e tecnologia del calcestruzzo", pg. 410, Hoepli, Milano, (1980).
- (9) Codice-Modello per le strutture in cemento armato, CEB-FIP, pg. 159, Ed. AITEC, Roma, (1979).

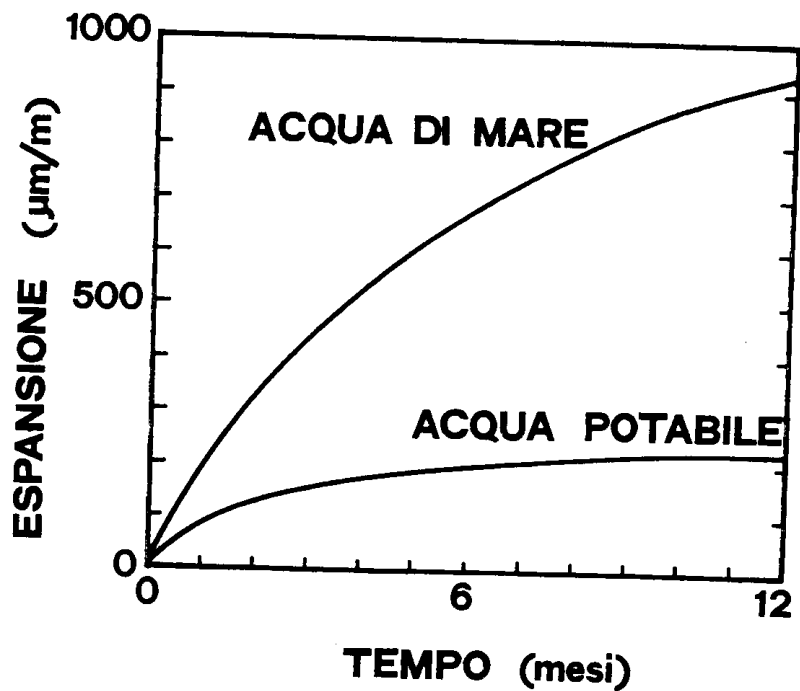


Fig. 1 Influenza del tipo di acqua sull'allungamento del calcestruzzo (cemento Portland ordinario = 300 Kg/m³; acqua/cemento = 0,60)



Fig. 2 A sinistra un provino di calcestruzzo degradato per immersione in acqua solfatica (3000 ppm); a destra un provino di calcestruzzo resistente all'azione dei solfati. Nel centro è mostrato un provino sottoposto a dilavamento con acqua contenente anidride carbonica aggressiva.



Fig. 3 Esempio di degradazione di calcestruzzo impiegato per la costruzione di canali di irrigazione contenenti acque solfatice (3).