

# CORROSIONE DELL'ACCIAIO IN STRUTTURE IN CALCESTRUZZO IMMERSO IN ACQUA DI MARE

Luigi Coppola\*, Romeo Fratesi\*\*, Saveria Monosi\*\*  
e Roberto Troli\*

## RIASSUNTO

---

Per il progetto del tunnel sottomarino per l'attraversamento dello Stretto di Messina è stato attivato un programma sperimentale che ha incluso sia prove di laboratorio che prove di campo presso il porto di Ancona, al fine di studiare la corrosione delle armature in calcestruzzi permanentemente immersi in acqua di mare. Sono stati realizzati una serie di provini cubici non armati ed una serie di travi con armature. Sono stati confezionati sia travi di calcestruzzo integro che travi preventivamente fessurate prima dell'immersione in acqua di mare, con ampiezza della fessura di circa 0.03, 0.3 e 1 mm.

Sono stati misurati i seguenti parametri in funzione del tempo di immersione in acqua di mare: la penetrazione del cloruro dei provini non armati ed il grado di corrosione delle travi armate attraverso osservazioni visive e indagini al microscopio elettronico.

I risultati ottenuti hanno messo in evidenza come la velocità di diffusione del cloruro nel calcestruzzo decresce al diminuire del rapporto acqua/cemento dell'impasto e allorché per il confezionamento del conglomerato cementizio viene utilizzata cenere volante oppure fumo di silice in aggiunta al cemento Portland. Nei provini di calcestruzzo polimero-impregnati (PIC) la penetrazione del cloruro registrata dopo tre mesi di permanente immersione in acqua di mare è stata trascurabile: dopo questo periodo la penetrazione del cloruro è aumentata sorprendentemente in accordo con il meccanismo di suzione capillare.

Il grado di corrosione dell'acciaio, valutato in termini di area superficiale corrosa e di profondità di penetrazione della corrosione, è risultato di modesta entità sulle travi di calcestruzzo integro non fessurate immerse per due anni in acqua di mare, indipendentemente dal rapporto acqua/cemento adottato (0.65 - 0.35). Per queste travi ci si attende che, anche per periodi di immersione in acqua di mare più lunghi, il grado di corrosione risulti ridotto a causa della mancanza di ossigeno (in prossimità delle armature) necessario perché il processo di corrosione si manifesti. Nella trave di calcestruzzo prefessurata con l'ampiezza della fessura maggiore di 0.2 mm è stato osservato un processo di corrosione per *pitting* in atto sulle zone dell'armatura in prossimità dell'apice della fessura. Nessun vantaggio tecnico nella riduzione della corrosione dell'acciaio è stato registrato per i calcestruzzi polimero-impregnati.

## INTRODUZIONE

---

Le strutture in calcestruzzo armato sono largamente impiegate negli ambienti marini. Le principali zone della struttura interessate dal fenomeno della corrosione delle armature sono quelle situate in prossimità del bagnasciuga (*splash zone*) e nella zona degli spruzzi (*spray zone*). Le strutture in calcestruzzo armato completamente immerse in acqua di mare, invece, non soffrono di alcun problema di durabilità purché il calcestruzzo impiegato abbia un rapporto acqua/cemento di 0.45 o più basso (1).

---

\* Enco, Engineering Concrete, Spresiano (TV)

\*\* Dipartimento di Scienza dei Materiali e della Terra, Università di Ancona

Tuttavia, in certe condizioni anche per le strutture completamente immerse nell'acqua di mare sono state registrate corrosioni severe dell'acciaio dopo qualche anno di esposizione all'ambiente marino (2). Queste circostanze sono state registrate per le strutture fessurate in cui le fessure stesse erano state determinate dal ritiro del calcestruzzo o da sforzi di flessione eccessivi generati negli elementi prefabbricati durante il trasporto e la messa in opera oppure prodotti da carichi dinamici in servizio sulle strutture immerse (azione delle onde e delle correnti marine).

Nelle strutture permanentemente immerse in acqua di mare il cloruro penetra all'interno del calcestruzzo attraverso il copriferro e dopo un certo tempo raggiunge in prossimità delle armature una concentrazione tale da provocare la corrosione dell'acciaio. Essendo la resistività elettrica dei calcestruzzi immersi nell'acqua di mare relativamente bassa, la velocità di corrosione è sostanzialmente controllata dal processo di diffusione dell'ossigeno attraverso il copriferro. Siccome la quantità di ossigeno disponibile nelle strutture immerse è molto più bassa rispetto a quella disponibile nella zona di bagnasciuga o nella zona degli spruzzi la velocità di corrosione, determinata dalla diffusione dell'ossigeno, dovrebbe essere teoricamente molto più bassa nelle strutture in conglomerato cementizio completamente immerse indipendentemente dalla presenza di fessure nella struttura.

Il principale obiettivo del presente lavoro è stato quello di studiare se, oppure no, la presenza delle fessure influenza la corrosione dell'acciaio nelle strutture armate permanentemente immerse in acqua di mare. Un ulteriore scopo del presente lavoro è stato quello di valutare l'influenza della composizione del calcestruzzo sulla velocità di diffusione del cloruro, e sulla velocità di corrosione delle armature sia nelle strutture fessurate che in quelle integre.

## **MATERIALI E METODOLOGIA DI PROVA**

Questo lavoro, che è stato condotto dall'Università di Ancona e dalla Enco per valutare la durabilità del calcestruzzo armato in acqua di mare, rappresenta una parte di un esteso programma di ricerca attivato per la definizione delle caratteristiche e delle prestazioni del rivestimento anticorrosivo del tunnel in acciaio previsto per l'attraversamento in subalveo dello Stretto di Messina (3-7). Il progetto include misure di resistività elettrica, potenziale di libera corrosione, resistenza di polarizzazione, intensità della corrente in un sistema di protezione catodica di strutture in calcestruzzo con copriferri variabili da 10 a 50 mm: questi dati non verranno esaminati nel presente lavoro. La presente memoria, invece, si limiterà a valutare soltanto i seguenti due aspetti della ricerca:

- 1) la penetrazione del cloruro nel calcestruzzo;
- 2) la corrosione dell'acciaio in travi di calcestruzzo integre o prefessurate prima dell'immersione in acqua di mare.

Nel confezionamento degli impasti sono stati impiegati un cemento portland del tipo *CE I* di classe 42.5 R in accordo con la normativa nazionale UNI- ENV 197/1. Sono stati impiegati inoltre, quali aggiunte minerali, la cenere volante e il fumo di silice. Le proprietà fisiche e le analisi chimiche di ognuno dei materiali menzionati sono già state riportate in un altro lavoro (8). E' stata impiegata, inoltre, sabbia naturale tondeggiante con un modulo di finezza di 2.9 ed una ghiaia di pezzatura massima di 19.1 mm; la combinazione dell'aggregato fine e di quello grosso dal punto di vista granulometrico è stata effettuata in modo da riprodurre al meglio la curva ottimale di Bolomey. E' stato impiegato, inoltre, un additivo iperfluidificante con elevato potere di riduzione dell'acqua di impasto, a base di un polimero naftalinico condensato con formaldeide. L'additivo è stato impiegato al fine di ottenere una consistenza *S5* (abbassamento al cono di

Abrams di 210-250 mm) per tutti i calcestruzzi indipendentemente dal rapporto acqua/cemento adottato (0.35-0.50-0.65). Le composizioni dei calcestruzzi realizzati e le relative proprietà sono riportate nelle Tabelle 1 e 2.

Tabella 1 - Composizione dei calcestruzzi

IMPASTO N.	INGREDIENTI (kg/m <sup>3</sup> )						
	ACQUA	CEMENTO	CV**	FS***	SABBIA	GHIAIA	IF <sup>†</sup>
1	194	299	-	-	734	1197	0.6
2*	154	308	-	-	754	1230	4.0
3	140	400	-	-	732	1194	9.0
4	138	394	60	-	721	1175	12.0
5	142	406	-	61	743	1211	12.2
6	149	298	-	45	732	1194	7.1

\* Questo impasto è stato anche utilizzato per confezionare il calcestruzzo polimero-impregnato (PIC).

\*\*CV = Cenere Volante

\*\*\*FS = Fumo di Silice

<sup>†</sup> IF = Additivo iperfluidificante

Tabella 2 - Proprietà reologiche e meccaniche dei calcestruzzi

IMPASTO N.	A/C	A/(C+CV)	A/(C+FS)	SLUMP (mm)	RESISTENZA A COMPRESSIONE (MPa) A:		
					3 gg	7gg	28 gg
1	0.65	-	-	230	17.5	22.7	31.6
2*	0.50	-	-	220	24.5	36.9	42.9
3	0.35	-	-	250	43.6	52.5	62.4
4	0.35	0.30	-	250	46.2	56.3	71.4
5	0.35	-	0.30	250	51.9	60.8	80.2
6	0.50	-	0.43	220	22.0	31.5	53.5

\* Questo impasto è stato anche utilizzato per il confezionamento del calcestruzzo polimero-impregnato (PIC) la cui resistenza al termine del trattamento di polimerizzazione (3 giorni) è risultata di 89 MPa

Per ognuno dei calcestruzzi realizzati sono stati confezionati provini cubici compattati con un vibratore ad ago e protetti, sulla superficie non a contatto con il cassero, con un foglio di plastica per 7 giorni per evitare l'evaporazione di acqua dal conglomerato verso l'esterno; dopo questa stagionatura preliminare i provini sono stati introdotti in un ambiente alla temperatura di 20°C ed umidità relativa del 90% per 45 giorni. Questi provini sono stati destinati alle misure di penetrazione del cloruro. Sono state inoltre realizzate una serie di travi di dimensioni 400x150x100 mm provviste di un incavo (Fig. 1). Le travi sono state realizzate gettando il calcestruzzo in due strati: dopo aver realizzato il primo strato di calcestruzzo di spessore pari a 70 mm veniva posizionato sulla superficie del conglomerato una lastra di acciaio di dimensioni 320x130x1 mm; successivamente si provvedeva a completare il provino con un secondo strato di calcestruzzo di spessore pari a 30 mm. Lo spessore di calcestruzzo che ricopre la lastra di acciaio risulta, pertanto, pari a 30 mm fatta eccezione per la zona in corrispondenza dell'incavo dove questo spessore si riduce a 20 mm. Ognuno dei due strati di calcestruzzo è stato compattato con un vibratore ad ago. Dopo il confezionamento le travi sono state stagionate nelle casseforme per tre giorni. Quindi, le travi sono state sottoposte ad una prova di flessione a tre punti al fine di innescare la fessurazione in

corrispondenza dell'incavo. L'ampiezza della fessura è stata misurata in corrispondenza della fibra più sollecitata della trave con un comparatore ottico. Dopo aver rimosso il carico applicato sulla trave l'ampiezza massima della fessura è risultata compresa in uno dei seguenti intervalli: 0.02-0.04 mm (valore medio 0.03 mm); 0.20-0.40 mm (valore medio 0.30 mm); 0.90-1.10 mm (valore medio 1 mm).

Le superfici fessurate delle travi in calcestruzzo furono completamente sigillate per mezzo di una resina epossidica, fatta eccezione per la faccia della trave contenente l'incavo e per quella opposta, in modo che la penetrazione dell'acqua di mare potesse avvenire liberamente soltanto attraverso la fessura creata in corrispondenza della fibra soggetta alla massima tensione. Sia le travi fessurate che quelle integre, entrambe rinforzate con la lastra di acciaio, furono successivamente stagionate per ulteriori 45 giorni alla temperatura di 20°C.

I provini cubici e le travi di calcestruzzo polimero-impregnato (PIC) furono realizzati con l'impasto N.2 avente rapporto acqua/cemento di 0.50. Dopo un giorno dal confezionamento dei provini, essi furono essiccati in stufa alla temperatura di 105°C per 24 ore e successivamente immersi in un monomero liquido di metilmetacrilato contenente l'1% di azo-isobutirronitrile che fungeva da catalizzatore. Dopo 24 ore di immersione i provini di calcestruzzo furono lavati con un getto di acqua, al fine di rimuovere il monomero in eccesso sulla superficie del calcestruzzo. Successivamente i provini furono immersi in un bagno di acqua alla temperatura di 70°C per 16 ore, al fine di consentire la polimerizzazione del monomero. Alla fine del trattamento è stata rilevata una quantità di polimero nell'impasto pari a circa il 5% della massa del calcestruzzo: lo spessore di conglomerato cementizio impregnato è risultato all'incirca di 20 mm e la resistenza a compressione di 89 MPa.

Dopo una stagionatura preliminare di 45 giorni i provini cubici e le travi, sia fessurate che integre, furono immerse in vasche contenenti acqua di mare. L'acqua di mare veniva aspirata per mezzo di una pompa direttamente dal mare del porto di Ancona ed inviata in un sistema di vasche dove erano stati sistemati i provini di calcestruzzo e le travi. L'aspirazione dell'acqua di mare per mezzo della pompa avveniva in modo che l'acqua stessa potesse circolare all'interno delle vasche per 1 ora. Quindi, veniva effettuata una sosta di 2 ore e successivamente si provvedeva ad aspirare nuovamente l'acqua di mare per 1 ora.

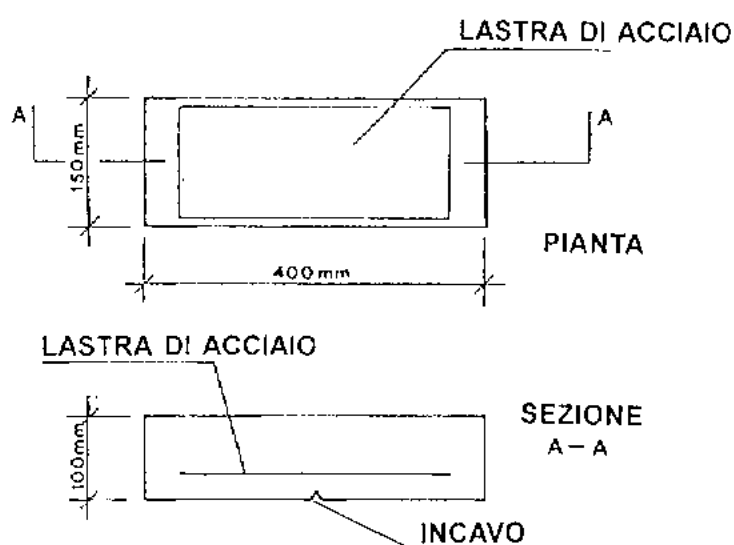


Figura 1 - Travi in calcestruzzo armate con lastra d'acciaio.

## RISULTATI DELLE PROVE EFFETTUATE SUI PROVINI DI CALCESTRUZZO INDURITI

### La penetrazione del cloruro

La penetrazione del cloruro è stata determinata sui provini cubici di calcestruzzo mediante un metodo colorimetrico che consiste nello spruzzare una soluzione a base di fluoresceina e nitrato di argento sulle superfici di frattura dei provini sottoposti alla pressa ad una prova di taglio puro (9). La soluzione impiegata ha la peculiarità di colorarsi di un marrone molto intenso nelle zone di calcestruzzo non penetrate dal cloruro; essa, invece, assume una colorazione rosacea chiara nelle zone penetrate dallo ione aggressivo. Pertanto, questa differenza cromatica è in grado di evidenziare il fronte di avanzamento del cloruro nel calcestruzzo.

### La corrosione dell'acciaio

La corrosione delle piastre di acciaio nelle travi, fessurate e non, è stata valutata visivamente ogni 6 mesi rimuovendo il calcestruzzo del copriferro dalle travi. Inizialmente i prodotti di corrosione presentavano una colorazione molto scura (tendente al nero) a causa della presenza dell'ossido di ferro,  $Fe_3O_4$ , che testimoniava un meccanismo di corrosione a bassi potenziali determinato dall'assenza di elevate quantità di ossigeno nell'acqua di mare. Dopo circa mezz'ora il colore dei prodotti di corrosione mutava, assumendo una colorazione rosso intenso che indicava una rapida trasformazione dell' $Fe_3O_4$  in  $Fe_2O_3$ , a causa dell'esposizione della piastra di acciaio all'aria. Dopo aver rimosso l'intera porzione di calcestruzzo che copriva la lastra di acciaio, e dopo aver pulito la superficie della piastra stessa, è stata determinata l'area superficiale interessata dal fenomeno di corrosione. Infine, dopo aver rimosso dalla superficie del calcestruzzo i prodotti di corrosione mediante una pulizia con una soluzione debolmente acida (Fig. 2), è stata determinata, mediante il microscopio ottico, la riduzione della sezione della lastra in acciaio per effetto del fenomeno corrosivo (Fig. 3). E' stata quindi stilata una classifica basata sulla l'area superficiale interessata dal fenomeno corrosivo e sulla profondità di penetrazione dell'attacco delle lastre di acciaio.



**Figura 2 - Microfotografia della superficie della lastra d'acciaio dopo aver rimosso con una soluzione debolmente acida i prodotti di corrosione.**



**Figura 3 - Microfotografia della lastra d'acciaio vista in sezione dopo aver rimosso i prodotti di corrosione per misurare la profondità dell'attacco corrosivo (sotto la freccia).**

## **RISULTATI E DISCUSSIONE**

### **I calcestruzzi confezionati con cemento portland**

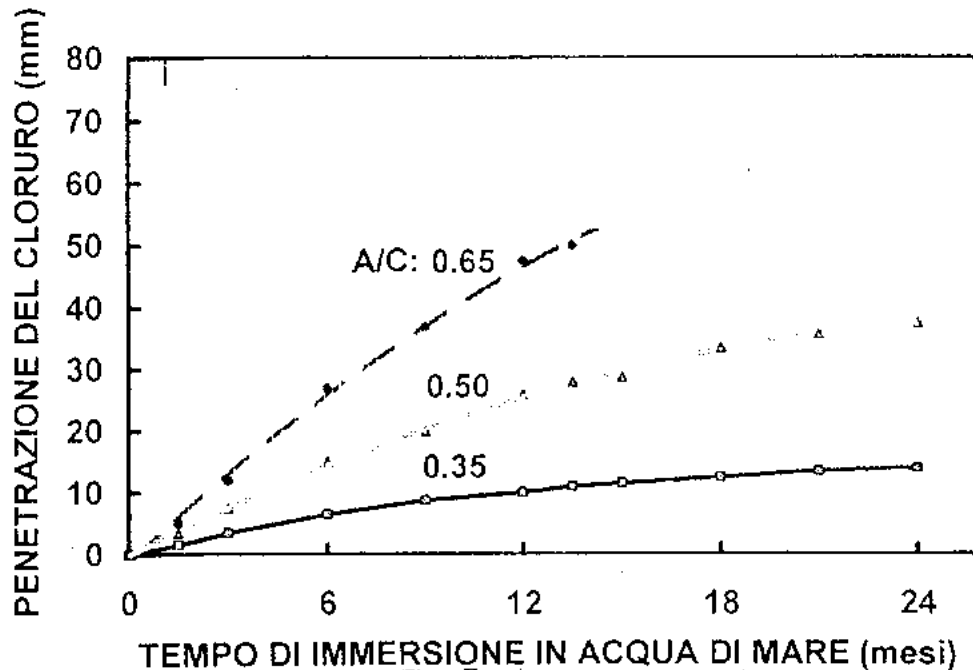
In questo paragrafo vengono riportati i risultati ottenuti per i calcestruzzi confezionati con cemento portland (impasto N. 1, 2 e 3 di Tabella 2) realizzati con tre diversi rapporti acqua/cemento (0.35-0.50-0.65),

La Figura 4 mostra la profondità di penetrazione del cloruro in funzione del tempo di immersione nell'acqua di mare. Come ci si attendeva, la profondità di penetrazione del cloruro è tanto più bassa quanto minore il rapporto acqua/cemento dell'impasto. Questo conferma i risultati di penetrazione degli ioni cloruro ottenuti per calcestruzzi immersi permanentemente in soluzioni acquose di cloruro di sodio o cloruro di calcio disponibili in letteratura (2, 10).

La Tabella 3 mostra l'influenza dell'ampiezza della fessura del calcestruzzo sulla superficie dell'acciaio interessata dal fenomeno corrosivo (*AS*) e sulla profondità di penetrazione dell'attacco corrosivo della lastra di acciaio (*RS*), in funzione del rapporto acqua/cemento e del tempo di immersione in acqua di mare espresso in anni.

Nella Tabella 3 non sono riportati i risultati relativi alle travi di calcestruzzo non fessurate, giacché in nessuno di questi provini è stata registrata traccia di corrosione, indipendentemente dal rapporto acqua/cemento e dal tempo di immersione in acqua di mare, sebbene il copriferro di calcestruzzo (20 mm) in alcuni casi si presentava completamente penetrato dagli ioni cloruri. Ad esempio, la profondità di penetrazione del cloruro nel calcestruzzo confezionato con l'impasto N. 1 - con rapporto acqua/cemento 0.65 - era pari a 25 mm dopo meno di 6 mesi di immersione in acqua di mare (Fig. 4). Nonostante il copriferro in calcestruzzo risultasse completamente penetrato dal cloruro, non è stata registrata alcuna traccia di corrosione nella corrispondente trave rinforzata

con lastra di acciaio, non fessurata, dopo 6 mesi, nè tanto meno dopo 2 anni di permanente immersione in acqua di mare. Questi risultati confermano un'opinione generale che le strutture in calcestruzzo armato completamente immerse, indipendentemente dal rapporto acqua/cemento impiegato per il confezionamento dell'impasto, hanno un comportamento sostanzialmente migliore rispetto a quelle che sono esposte nella zona degli spruzzi o nella zona di bagnasciuga.



**Figura 4 - Influenza del rapporto a/c sulla penetrazione del cloruro nei calcestruzzi confezionati con cemento portland.**

Per quanto attiene alle travi fessurate, i cui risultati sono riportati in Tabella 3, sembra che l'ampiezza della fessura giochi un ruolo molto più importante nel controllare la velocità di corrosione che non la qualità del calcestruzzo, e quindi il rapporto acqua/cemento impiegato per il confezionamento dell'impasto. Ad esempio, con un'ampiezza della fessura di circa 1 mm - misurata sulla superficie di calcestruzzo - l'area della lastra di acciaio interessata dal fenomeno corrosivo è risultata di circa 400-500 mm<sup>2</sup>, indipendentemente dal rapporto acqua/cemento dell'impasto. La profondità dell'attacco corrosivo dell'area interessata dal fenomeno è risultata di 0.02 mm dopo 6 mesi, 0.05 mm dopo 1 anno e 0.15 mm dopo 2 anni. Anche per queste travi si conferma che il rapporto acqua/cemento del calcestruzzo non influenza significativamente la velocità di corrosione. In qualche caso dopo 2 anni di esposizione in acqua di mare le lastre di acciaio sono state completamente perforate per effetto della corrosione interessando un'area limitata della lastra stessa di superficie pari a qualche mm. Questo significa che la massima profondità di penetrazione dell'attacco corrosivo può superare 1 mm/anno, pari all'originale spessore della lastra di acciaio, sebbene il valore medio della profondità di corrosione dopo 2 anni può raggiungere soltanto 0.15 mm.

L'ampiezza critica delle fessura- misurata sulla superficie del calcestruzzo - al di sopra della quale si manifesta il fenomeno di corrosione, sembra essere molto prossima a 0.3 mm e più probabilmente a 0.2 mm. La profondità dell'attacco corrosivo riportato in Tabella 3 indica che con un'ampiezza della fessura - misurata sulla superficie del calcestruzzo - di 0.3 mm, la velocità di corrosione è minore di 10 µm all'anno quando il copriferro di calcestruzzo è pari a 20 mm (che corrisponde al valore dello spessore di calcestruzzo nell'area in corrispondenza dell'incavo sulla

trave). I risultati indicherebbero, quindi, il seguente meccanismo di corrosione per le travi in calcestruzzo armato permanentemente immerse in acqua di mare. Nelle strutture in calcestruzzo integro e privo di fessure non si manifesta alcuna corrosione, sebbene la diffusione del cloruro attraverso i pori capillari della matrice di cemento sia tale da raggiungere le armature, in particolar modo nei calcestruzzi con più elevato rapporto acqua/cemento e con i copriferri meno spessi. Questo comportamento è attribuibile ad una ridotta disponibilità di ossigeno nell'acqua di mare, ed in particolare nella fase acquosa che riempie i pori capillari della matrice di cemento in prossimità della lastra di acciaio. Infatti, la diffusione dell'ossigeno attraverso un calcestruzzo completamente saturo di acqua è molto bassa - all'incirca  $10 \cdot 10^{-13} \text{ mol} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  in accordo a quanto riportato da Gjov e Vennessland (2) - ed impedisce che il fenomeno di corrosione dell'acciaio raggiunga velocità significative, sebbene le superfici dell'acciaio siano contaminate dal cloruro, depassivate e, quindi, potenzialmente esposte al processo di corrosione.

Nelle travi in calcestruzzo fessurate con ampiezza della fessura di 0.2-0.3 mm, la soluzione di continuità nel calcestruzzo può essere facilmente occlusa dal materiale solido e probabilmente dalla brucite che precipita all'interno delle fessure a causa della reazione tra il magnesio,  $\text{Mg}^{+2}$ , presente in acqua di mare e gli ioni  $\text{OH}^-$  della pasta di cemento. Quindi, esiste un valore critico dell'ampiezza della fessura al di sotto del quale la corrosione è trascurabile e pari a quella che si registra per i calcestruzzi non fessurati, purchè la struttura possenga un copriferro di calcestruzzo minimo almeno pari a 20 mm.

Nelle strutture in calcestruzzo maggiormente fessurate, con un'ampiezza della fessura al di sopra di 0.3 mm, i cloruri possono facilmente penetrare nel calcestruzzo e raggiungere l'armatura indipendentemente dal rapporto acqua/cemento dell'impasto. D'altra parte a causa dell'azione delle onde dell'acqua di mare, gli ioni solubili della pasta di cemento, ed in particolare gli ioni  $\text{OH}^-$ , possono essere facilmente dilavati dalla zona di calcestruzzo in prossimità della superficie fessurata. Quindi, il rapporto tra gli ioni che determinano la corrosione - essenzialmente gli ioni  $\text{Cl}^-$  - e gli ioni che la inibiscono, essenzialmente gli ioni  $\text{OH}^-$ , raggiunge immediatamente un valore molto critico per la corrosione in prossimità dell'apice della fessura e, quindi, la passività della superficie dell'acciaio viene localmente distrutta (11). Conseguentemente sulla superficie della lastra di acciaio viene a crearsi una macrocella con una zona anodica molto piccola in prossimità della fessura, dove il rapporto  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  è relativamente elevato, ed una zona molto estesa a comportamento catodico sulla superficie dell'acciaio che si trova distante all'apice della fessura dove, invece, il rapporto  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  è sostanzialmente più basso. I dati ottenuti mettono in evidenza che tra la superficie della zona catodica e la superficie di quella anodica viene a crearsi un fenomeno di corrosione per *pitting* che può raggiungere un'intensità elevata anche in presenza di una ridotta quantità di ossigeno nell'acqua di mare a diretto contatto con la zona anodica. I dati ottenuti evidenziano, inoltre, che la superficie dell'area anodica in prossimità della fessura è relativamente ridotta e non aumenta significativamente nel tempo (Tabella 3). Tuttavia, la profondità di penetrazione dell'attacco corrosivo può aumentare e raggiungere una velocità di corrosione di circa  $70 \mu\text{m}$  all'anno (Tabella 3); in qualche caso essa può essere anche più elevata e raggiungere 1 mm in meno di due anni.

Occorre, infine, sottolineare che il pH misurato in corrispondenza dell'area anodica in prossimità all'apice della fessura è risultato minore di 3; questo valore è significativamente più basso del pH dell'acqua di mare (all'incirca 7.5). La diminuzione di pH sembra essere prodotta dall'idrolisi dei complessi clorurati che si sviluppano nel cratere di corrosione (11) e che possono ulteriormente accelerare il processo di corrosione in corrispondenza del cratere stesso. D'altra parte il ridotto pH è responsabile della corrosione per *pitting*, giacchè esso inibisce la possibile ripassivazione dell'area anodica in presenza di ossigeno.



**Tabella 3 - Influenza dell'ampiezza della fessura sulla corrosione  
dei calcestruzzi armati confezionati con cemento portland**

IMPASTO (N. - A/C)	GRADO DI CORROSIONE PER UNA FESSURA DI AMPIEZZA (mm) PARI A:					
	0.03		0.3		1.0	
	AS* (mm <sup>2</sup> )	RS** (mm)	AS (mm <sup>2</sup> )	RS (mm)	AS (mm <sup>2</sup> )	RS (mm)
(1-0.65)						
0.5 anni	NO CORROSIONE		NO CORROSIONE		460	0.02
1 anno	NO CORROSIONE		NO CORROSIONE		430	0.05
2 anni	NO CORROSIONE		380	0.02	480	0.15
(2-0.50)						
0.5 anni	NO CORROSIONE		NO CORROSIONE		450	0.01
1 anno	NO CORROSIONE		350	0.01	480	0.06
2 anni	NO CORROSIONE		400	0.02	510	0.15
(3-0.35)						
0.5 anni	NO CORROSIONE		NO CORROSIONE		500	0.03
1 anno	NO CORROSIONE		NO CORROSIONE		440	0.05
2 anni	NO CORROSIONE		360	0.01	480	0.14

\*AS = Area Superficiale interessata dalla corrosione

\*\* RS = Riduzione della Sezione per effetto della corrosione

#### Calcestruzzi confezionati con fumo di silice e cenere volante

In questo paragrafo vengono riportati i risultati ottenuti con i calcestruzzi confezionati con cemento portland e con aggiunte minerali costituite da ceneri volanti e fumo di silice. Tutti i calcestruzzi sono stati confezionati con lo stesso rapporto di acqua/cemento di 0.50 (impasti N. 3, 4 e 5 di Tabella 1).

La Figura 5 mostra l'influenza dell'aggiunta di fumo di silice e cenere volante sulla velocità di penetrazione del cloruro nei provini permanentemente immersi in acqua di mare. In presenza di cenere volante la velocità di diffusione del cloruro è minore rispetto a quella dell'impasto confezionato senza questa aggiunta minerale. L'influenza del fumo di silice nel ridurre la diffusione del cloruro nel calcestruzzo sembra essere maggiore di quella registrata per la cenere volante. Risultati analoghi sono stati ottenuti studiando l'influenza del fumo di silice e della cenere volante sulla diffusione del cloruro in provini di calcestruzzi immersi in soluzioni acquose di cloruro di sodio o cloruro di calcio (10).

La Tabella 4 mostra l'influenza della cenere volante e del fumo di silice sulla corrosione dell'acciaio rispetto al calcestruzzo di riferimento, di pari rapporto *a/c*, realizzato con solo cemento portland. Nelle travi non fessurate, che non vengono presentate in Tabella 4, non è stata registrata alcuna corrosione delle lastre di acciaio dopo 2 anni di permanente immersione in acqua di mare. Nelle travi fessurate i risultati di corrosione, in termini di area superficiale corrosa e di profondità di penetrazione della corrosione, sono sostanzialmente identici a quelli descritti per i calcestruzzi di solo cemento portland senza l'aggiunta di pozzolana (Tabella 3). Si conferma che ampiezze della fessura, misurate sulla superficie del calcestruzzo, maggiori di un valore critico (0.2-0.3 mm), sono necessarie per registrare un fenomeno di corrosione in atto indipendentemente dalla presenza del fumo di silice o della cenere volante.

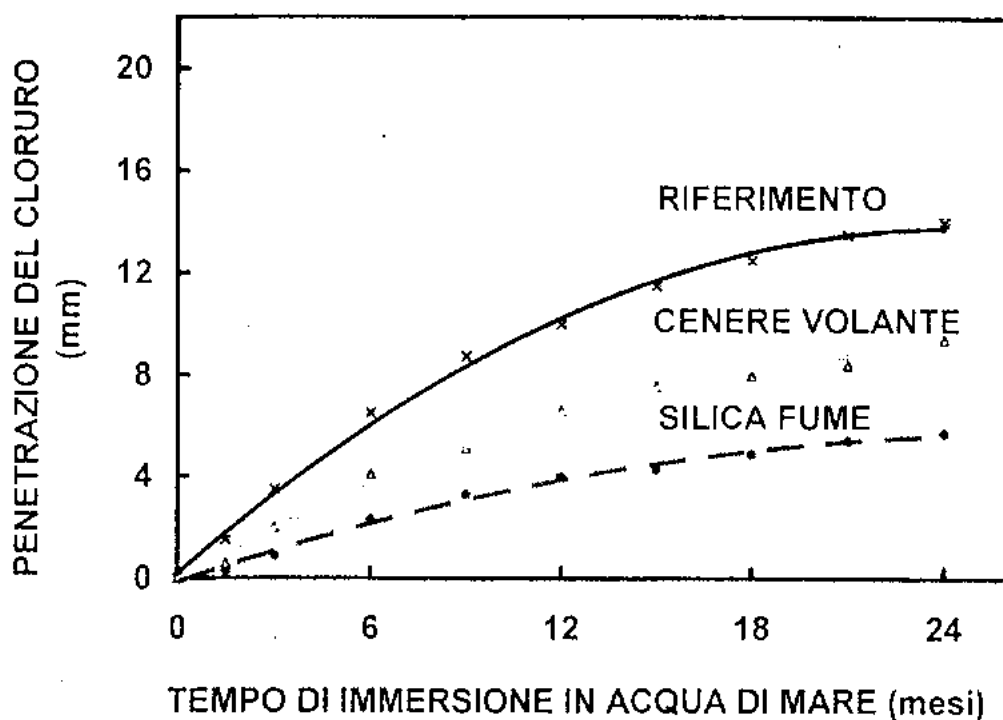


Figura 5 - Influenza dell'aggiunta di fumo di silice o cenere volante sulla penetrazione del cloruro nel calcestruzzo ( $a/c = 0.35$ ).

Tabella 4 - Influenza dell'ampiezza della fessura sulla corrosione dei calcestruzzi armati ( $a/c = 0.35$ ) confezionati con e senza cenere volante (CV) o fumo di silice (FS)

IMPASTO (N.-agg. min)	GRADO DI CORROSIONE PER UNA FESSURA DI AMPIEZZA (mm) PARI A:					
	0.03		0.3		1.0	
	AS* (mm <sup>2</sup> )	RS** (mm)	AS (mm <sup>2</sup> )	RS (mm)	AS (mm <sup>2</sup> )	RS (mm)
(3-no CV or FS)						
0.5 anni	NO CORROSIONE		NO CORROSIONE		500	0.03
1 anno	NO CORROSIONE		NO CORROSIONE		440	0.05
2 anni	NO CORROSIONE		300	0.01	480	0.14
(4-CV)						
0.5 anni	NO CORROSIONE		NO CORROSIONE		450	0.02
1 anno	NO CORROSIONE		340	0.01	480	0.06
2 anni	NO CORROSIONE		320	0.01	440	0.16
(5-FS)						
0.5 anni	NO CORROSIONE		NO CORROSIONE		500	0.01
1 anno	NO CORROSIONE		NO CORROSIONE		450	0.04
2 anni	NO CORROSIONE		360	0.01	500	0.14

\* AS = Area Superficiale interessata dalla corrosione

\*\* RS = Riduzione della Sezione per effetto della corrosione

## Calcestruzzo polimero-impregnato

In questo paragrafo vengono riportati e discussi i risultati ottenuti per il calcestruzzo polimero-impregnato confrontandoli con quelli registrati per il calcestruzzo di solo cemento portland e per il calcestruzzo confezionato con aggiunta di fumo di silice di pari rapporto acqua/cemento (0.50). Le composizioni e le proprietà di questi conglomerati sono mostrati in Tabella 1 e 2 (impasti N. 2 e 6).

In teoria il calcestruzzo polimero-impregnato (*PIC*) sembra essere il miglior candidato per la realizzazione di un materiale durevole da utilizzare in strutture marine permanentemente immerse in acqua di mare, laddove i lavori di manutenzione e di ripristino debbono essere assolutamente esclusi a causa delle difficoltà di realizzazione degli stessi, e a causa degli enormi costi che questi lavori determinano. La diffusione del cloruro e dell'ossigeno, infatti, dovrebbe essere completamente bloccata nel calcestruzzo grazie all'impregnazione dei pori capillari realizzata mediante il polimero nello strato corticale del calcestruzzo (20 mm). Inoltre, la più elevata resistività elettrica del *PIC* dovrebbe ridurre ad un valore trascurabile il movimento degli elettroni causato da un meccanismo di corrosione per macrocoppia. In sostanza, quindi, nessun processo di corrosione delle aree metalliche dovrebbe essere registrato quanto meno per le strutture in calcestruzzo non fessurate. D'altra parte l'elevata resistenza a flessione (12) del calcestruzzo polimero-impregnato dovrebbe eliminare nelle strutture in conglomerato cementizio armato le fessurazioni causate durante il trasporto o durante la messa in opera delle lastre prefabbricate in calcestruzzo polimero-impregnato.

La Figura 6 indica che non c'è alcuna penetrazione del cloruro nel calcestruzzo polimero-impregnato durante i primi 3 mesi di immersione in acqua di mare, fatta eccezione per una leggera penetrazione di circa 2 mm registrata nello strato più esterno che risulta immediatamente penetrato dall'acqua di mare all'atto dell'immersione del provino nelle vasche. Questa rapida penetrazione avviene non tanto per un meccanismo di diffusione, quanto per un meccanismo di suzione capillare e dovrebbe essere ascritta al parziale dilavamento del monomero nello strato più esterno durante il lavaggio con acqua susseguente all'immersione nel monomero liquido. Quindi, fatta eccezione per questa esigua e veloce penetrazione del cloruro, il calcestruzzo polimero-impregnato si comporta molto meglio del corrispondente calcestruzzo di pari rapporto acqua/cemento con o senza fumo di silice. Sorprendentemente, però, dopo 3 mesi di immersione in acqua di mare la penetrazione del cloruro nel calcestruzzo polimero-impregnato è improvvisamente aumentata, tanto che in pochi mesi il provino di *PIC* è risultato completamente penetrato dal cloruro. Questo comportamento potrebbe essere ascritto ad una sorta di deterioramento del polimero acrilico causato dall'acqua di mare. Siccome l'impregnazione con il polimero ha coinvolto soltanto lo strato più esterno del calcestruzzo per uno spessore di 20 mm, la porzione di calcestruzzo più interna, che è stata essiccata a 105°C per la rimozione dell'acqua al fine di favorire l'intrusione del monomero, è capace di assorbire velocemente l'acqua di mare allorché il polimero nello strato più esterno del calcestruzzo è stato distrutto.

La Tabella 5 indica l'influenza dell'impregnazione del polimero sul comportamento corrosivo delle lastre di acciaio rispetto a quelle annegate nel calcestruzzo di riferimento con o senza fumo di silice di pari rapporto acqua/cemento. Come si può notare non c'è una significativa differenza tra il processo di corrosione delle travi armate realizzate con calcestruzzo polimero-impregnato rispetto a quelle realizzate con solo cemento portland o con cemento portland e fumo di silice. Anche per le travi in calcestruzzo polimero-impregnato, inoltre, si conferma che l'ampiezza della fessura determina la velocità di corrosione, sia in termini di area superficiale interessata dal fenomeno, sia in termini di profondità dell'attacco corrosivo: una ampiezza della fessura di 0.2-0.3 mm determina l'innesco o meno della corrosione.

Tutti i risultati ottenuti indicano che per le strutture immerse in acqua di mare non c'è alcun vantaggio tecnico nell'utilizzare un calcestruzzo polimero-impregnato in luogo di un calcestruzzo di solo cemento portland per quanto attiene alla durabilità della struttura ed in particolare alla corrosione dell'acciaio.

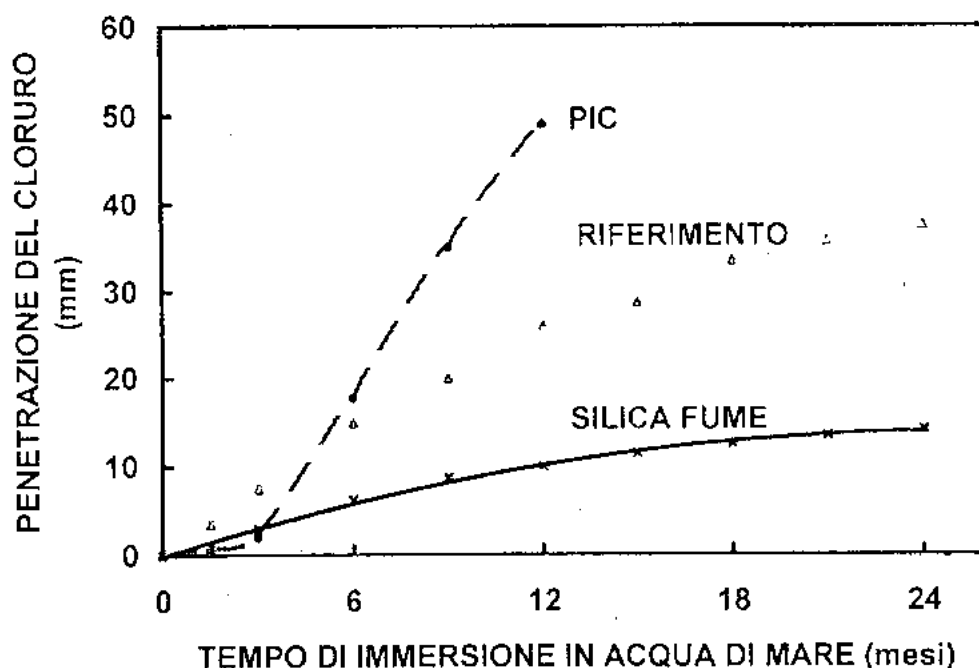


Figura 6 - Penetrazione del cloruro in calcestruzzi (a/c = 0.50) di cemento portland, polimero-impregnato e con fumo di silice.

Tabella 5 - Influenza dell'impregnazione con polimero sulla corrosione di calcestruzzi armati

IMPASTO (N.-tipo)	GRADO DI CORROSIONE PER UNA FESSURA DI AMPIEZZA (mm) PARI A:					
	0.03		0.3		1.0	
	AS* (mm <sup>2</sup> )	RS** (mm)	AS (mm <sup>2</sup> )	RS (mm)	AS (mm <sup>2</sup> )	RS (mm)
(2-Rifer.)						
0.5 anni	NO CORROSIONE		NO CORROSIONE		450	0.01
1 anno	NO CORROSIONE		350	0.01	480	0.06
2 anni	NO CORROSIONE		400	0.02	510	0.15
(6-FS)						
0.5 anni	NO CORROSIONE		NO CORROSIONE		390	0.01
1 anno	NO CORROSIONE		NO CORROSIONE		480	0.05
2 anni	NO CORROSIONE		360	0.01	440	0.14
(2-PIC)						
0.5 anni	NO CORROSIONE		NO CORROSIONE		480	0.02
1 anno	NO CORROSIONE		380	0.01	490	0.06
2 anni	NO CORROSIONE		410	0.02	500	0.13

\* AS = Area Superficiale interessata dalla corrosione

\*\* RS = Riduzione della Sezione per effetto della corrosione

## CONCLUSIONI

---

La corrosione di strutture in calcestruzzo armato non si manifesta dopo due anni di permanente immersione in acqua di mare nelle strutture non fessurate, con uno spessore del copriferro di 20 mm, realizzate con conglomerati cementizi aventi un rapporto acqua/cemento  $\leq$  a 0.65. Sebbene gli ioni cloruro in questo periodo di tempo possano raggiungere le armature, la disponibilità di ossigeno nella fase di acquosa dei pori capillari nella matrice di cemento è trascurabile e non è in grado di innescare il processo corrosivo. Ciò significa che la velocità di corrosione resterà nulla o comunque trascurabile (minore di 1 mm all'anno) anche per tempi di immersione più lunghi, purchè le fessure non si inneschino quando la struttura è in servizio.

Nelle strutture in calcestruzzo fessurate con un'ampiezza della fessura maggiore di 0.2 mm l'acqua di mare penetra immediatamente all'interno del calcestruzzo e raggiunge le armature, indipendentemente dal rapporto acqua/cemento dell'impasto, determinando l'innescò di un processo di corrosione per *pitting*. La velocità di corrosione è all'incirca di 70  $\mu\text{m}$  all'anno, ma in situazioni particolari essa può raggiungere anche 500  $\mu\text{m}$  all'anno.

La riduzione del rapporto acqua/cemento da 0.65 a 0.35, così come l'aggiunta del fumo di silice o della cenere volante, diminuisce la velocità di diffusione del cloruro: entrambe queste soluzioni potrebbero, quindi, inibire il processo di corrosione delle armature. Tuttavia, dal punto di vista pratico esse hanno un trascurabile effetto sulla velocità di corrosione dell'acciaio nelle strutture in calcestruzzo fessurato immerse in acqua di mare. Le fessure possono essersi innescate prima di immergere in acqua di mare gli elementi prefabbricati, per effetto del ritiro o per effetto di sforzi di flessione generati durante il trasporto o la messa in opera, oppure possono essersi generate sulle strutture in servizio a causa dei carichi dinamici prodotti, ad esempio, dall'azione delle onde e delle correnti marine.

Sorprendentemente, il calcestruzzo polimero-impregnato, che dovrebbe essere privo di fessure grazie alla sua elevata resistenza flessione, non ha mostrato un buon comportamento: infatti, dopo 3 mesi di permanente immersione in acqua di mare il polimero impregnante è stato distrutto anche nelle travi non fessurate. Quindi, sembra che non ci sia nessun vantaggio tecnico ad utilizzare un calcestruzzo polimero-impregnato nelle strutture immerse in acqua di mare. I materiali polimero-impregnati sono stati largamente consigliati per il ripristino delle strutture in calcestruzzo immerse in acqua di mare. I risultati del presente studio indicano che test preliminari sono necessari per questi materiali di ripristino prima che essi vengano impiegati nelle strutture marine.

## BIBLIOGRAFIA

- (1) G.C. Hoff, Proc. Concrete Durability, Katharine and Bryant Mather International Conference, J.M. Scanlon Ed., Atlanta (USA) 1987, pp. 997-1041.
- (2) O. Giørv e O. Vennesland, Proc. Concrete Durability, Katharine and Bryant Mather International Conference, J.M. Scanlon Ed., Atlanta (USA) 1987, pp. 1575-1602.
- (3) M. Collepardi, R. Fratesi, G. Moriconi e S. Biagini, Proc. International RILEM Symposium Admixtures for Concrete, Improvement of Properties, E. Vasquez Ed., Barcelona (Spain) 1990, pp. 269-278.
- (4) M. Collepardi, R. Fratesi, G. Moriconi, L. Coppola e C. Corradetti, Proc. International RILEM Symposium Admixtures for Concrete, Improvement of Properties, E. Vasquez Ed., Barcelona (Spain) 1990, pp. 279-288.

- (5) C. Branca, R. Fratesi, G. Moriconi e S. Simoncini, Proc. EUROCORR 91, I. Karl and M. Bod Eds., Budapest (Hungary) 1991, pp. 739-744.
- (6) R. Fratesi, G. Moriconi e S. Simoncini, Proc. Workshop COST 509 on Corrosion and Protection of Metals in Concrete, La Rochelle (France) 1993, pp. 12-17.
- (7) R. Fratesi, G. Moriconi e L. Coppola, accettato per la pubblicazione su Proc. Fourth Symposium on Corrosion Reinforcement in Concrete Construction, Cambridge (UK) 1996.
- (8) M. Collepardi, S. Monosi e M. Valente, Proc. Third CANMET/ACI International Conference "Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete", V.M. Malhotra Ed., Ottawa (Canada) 1989, pp. 425-444.
- (9) S. Monosi, G. Moriconi, I. Alverà e M. Collepardi, *Materials Engineering*, 1, 483-489 (1990).
- (10) M. Collepardi e S. Monosi, Proc. 1st RILEM International Congress, J.C. Maso Ed., Paris (France) 1987, pp. 9-16.
- (11) P. Schiessl, Proc. Concrete Durability, Katharine and Bryant Mather International Conference, J.M. Scanlon Ed., Atlanta (USA) 1987, pp. 1633-1650.
- (12) P.K. Mehta, *Concrete Structure, Properties and Materials*, Prentice-hall, Inc., Englewood Cliffs, USA, p. 407 (1986).