

LA CORROSIONE DELLE ARMATURE DEL CALCESTRUZZO. INFLUENZA DI ALCUNI MATERIALI CON ATTIVITA' POZZOLANICA: FUMI DI SILICE E CENERI VOLANTI

Mario BERRA, Gerardo FERRARA: Ingegneri Civili ENEL - CRIS Milano
Salvatore TAVANO: Dottore in Chimica – ADDIMENT ITALIA S.r.l.

SOMMARIO Il presente lavoro si prefigge di fare il punto sullo stato dell'arte relativo al comportamento dei fumi di silice e delle ceneri volanti per quanto riguarda la corrosione dei ferri d'armatura del calcestruzzo. Vengono pertanto esaminati i principali effetti sui parametri che governano il fenomeno quali la riduzione della porosità della pasta di cemento con conseguente diminuzione della penetrazione dell'acqua, dell'ossigeno e dei cloruri, la sostanziale invariabilità del processo di carbonatazione e l'aumento della resistività elettrica. I risultati finora disponibili mostrano che sia i fumi di silice che le ceneri volanti, se adeguatamente utilizzati, esercitano una sensibile azione preventiva e possono contribuire efficacemente a limitare il pericolo della corrosione delle barre d'armatura.

SUMMARY The aim of this paper is to present a state of the art on the effects of silica fumes and fly ashes on the reinforcing bar corrosion in concrete. The cement paste porosity reduction with a low penetration of water, oxygen and chlorides, the substantially similar rate of carbonation and the increase of the electrical resistivity are examined and discussed. The available results show that the suitable use of both silica fumes and fly ashes can significantly reduce the risk of the reinforcing bar corrosion in concrete and can be therefore considered an effective preventive measure.

1. INTRODUZIONE

In condizioni normali l'armatura del calcestruzzo è a contatto con il liquido interstiziale contenuto nei pori che è fortemente alcalino e in tali condizioni l'acciaio è passivato e la corrosione non può insorgere. Tuttavia nel corso della vita di una struttura possono intervenire diversi processi di degrado del calcestruzzo che possono da una parte ridurre l'alcalinità del liquido interstiziale e dall'altra favorire la penetrazione di agenti aggressivi (ossigeno e cloruri). Ciò innesca la corrosione delle armature e condiziona il tempo di vita in servizio delle strutture in cemento armato normale e precompresso. Infatti, com'è noto, alla corrosione sono associati processi di espansione dovuti al fatto che i prodotti di ossidazione occupano 2-3 volte il volume del metallo da cui hanno avuto origine. Questa azione dirompente è spesso tale da superare la massima capacità deformativa del calcestruzzo causando dapprima l'insorgere di fessure lungo il percorso delle armature e successivamente il completo distacco del copriferro (1). Le possibili misure preventive riguardano sia il processo di confezionamento del calcestruzzo che l'uso di tecniche appartenenti al vasto settore dell'anticorrosione (protezione catodica, uso di inibitori, rivestimenti protettivi ecc.) (2). Per quanto concerne il processo di confezionamento del calcestruzzo, la ricerca di questi ultimi anni ed i risultati pubblicati in ambito internazionale hanno messo in evidenza l'importanza dell'impiego dei materiali pozzolanici come il fumo di silice e la cenere volante in aggiunta al cemento Portland ordinario. Il presente lavoro si prefigge pertanto di fare il punto sullo stato dell'arte relativo al comportamento dei fumi di silice e delle ceneri volanti per quanto riguarda la corrosione dei ferri d'armatura.

2. MECCANISMO DELLA CORROSIONE DELL'ACCIAIO NEL CALCESTRUZZO ARMATO

E' noto che l'alcalinità di un impasto cementizio è sufficiente per creare intorno all'acciaio uno strato passivante di ossido di ferro insolubile che protegge l'armatura dalla corrosione. Il valore del pH che caratterizza, normalmente, la pasta cementizia è maggiore di 12,5 (3) ed alcuni ricercatori sono dell'opinione che il valore di soglia di sicurezza sia intorno a 11,5 (4,5). Al di sopra di tale valore ci si mantiene normalmente sia con calcestruzzi di cemento Portland che con calcestruzzi addizionati, in fase di miscelazione, di aggiunte minerali con caratteristiche pozzolaniche come le ceneri volanti o i fumi di silice (6,7,8). Ne consegue pertanto che il ferro è, all'origine, protetto dalla corrosione anche se esistono gli elementi chimici (ossigeno e umidità) che la renderebbero possibile. Un elemento importante che interviene a disturbare questo stato di equilibrio è la presenza di cloruri (Cl^-) nell'impasto cementizio. Essi possono essere contenuti nei componenti dell'impasto oppure possono penetrare dall'esterno. Esiste un valore critico della concentrazione di Cl^- per ciascun valore di pH che può distruggere lo strato passivante sia a livello locale che a livello generalizzato. Più è basso il valore del pH più sarà bassa la concentrazione di Cl^- capace di innescare il processo corrosivo.

Nella figura 1 è riportato l'andamento della relazione pH/concentrazione di Cl^- critica

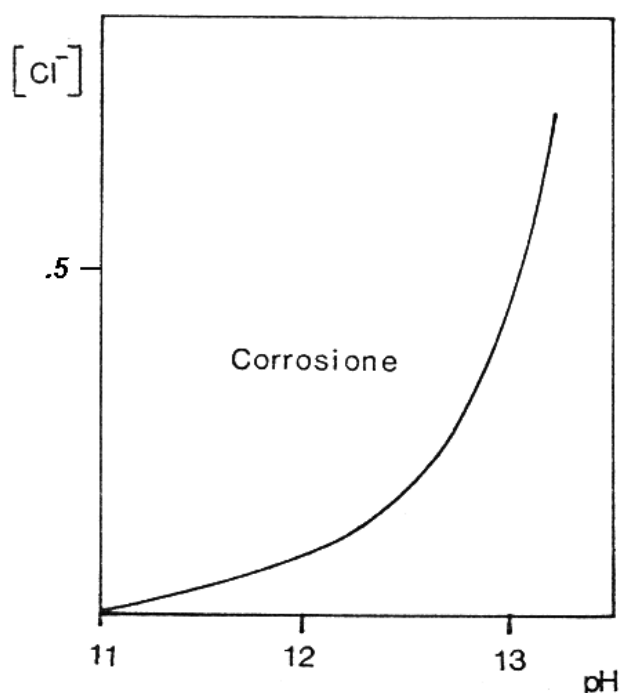
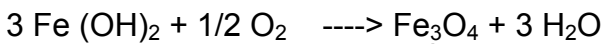
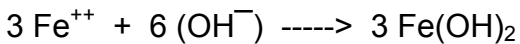
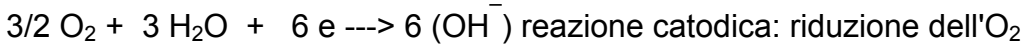


Fig. 1 – Concentrazione critica dei cloruri in funzione del pH (9)

Al di sotto di pH 9 la corrosione avviene indipendentemente dalla presenza di Cl^- perchè la protezione alcalina è assente. Ciò si verifica, ad esempio, quando la profondità di carbonatazione ha superato lo spessore del copriferro attraverso il processo di neutralizzazione della calce di idrolisi da parte dell'anidride carbonica presente nell'aria. Questo fenomeno avviene, com'è noto, lentamente nel tempo, seguendo una legge secondo cui la profondità di carbonatazione aumenta in funzione di \sqrt{t} . (2) Infine, una terza possibilità di riduzione del pH è legata all'azione delle acque dilavanti che disciolgono la calce di idrolisi e gli altri ossidi alcalini specialmente nei punti deboli della struttura (nidi di ghiaia e fessure larghe). In tutti i casi esaminati lo strato passivante viene

distrutto ed in presenza di O_2 ed umidità si verificano schematicamente le seguenti reazioni chimiche.



↓
Ruggine

Mentre l'ossigeno viene consumato in ragione stechiometrica della quantità di ruggine che si forma e pertanto deve essere continuamente alimentato dall'esterno, la presenza dell'acqua è necessaria ma essa non è consumata nell'insieme completo del processo corrosivo. Come conseguenza di ciò la corrosione non avviene nel calcestruzzo secco (il processo elettrolitico è impedito). Nel calcestruzzo saturo d'acqua invece, la corrosione è impedita in quanto l'ossigeno non raggiunge la superficie dell'acciaio (fig. 2).

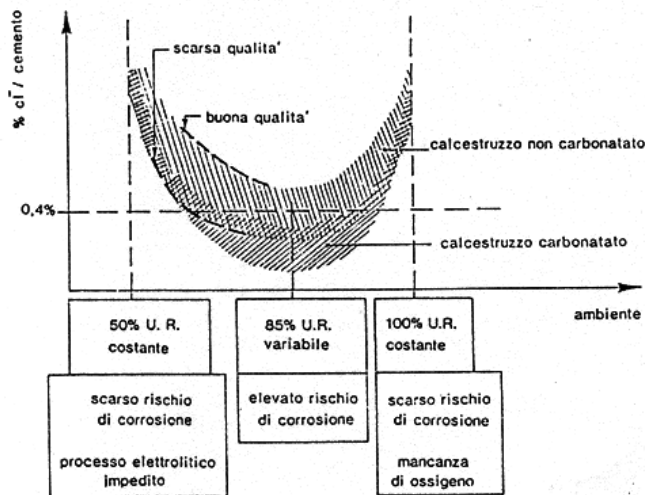


Fig. 2 – Influenza dell'umidità sul contenuto di cloruri critico per l'innesco della corrosione (10)

Inoltre poiché durante la corrosione si ha trasporto di elettroni dalla zona anodica a quella catodica, la velocità del processo dipende dalla conducibilità elettrica del calcestruzzo (mezzo elettrolita). Per riassumere, i parametri che influenzano la corrosione si possono suddividere in parametri di innesco e parametri di propagazione (11). Essi influenzano il tempo di vita del calcestruzzo ovvero il tempo oltre il quale è necessario intervenire per salvaguardare l'integrità della struttura. Tale tempo è inteso come somma del tempo di innesco più il tempo di propagazione (fig. 3).

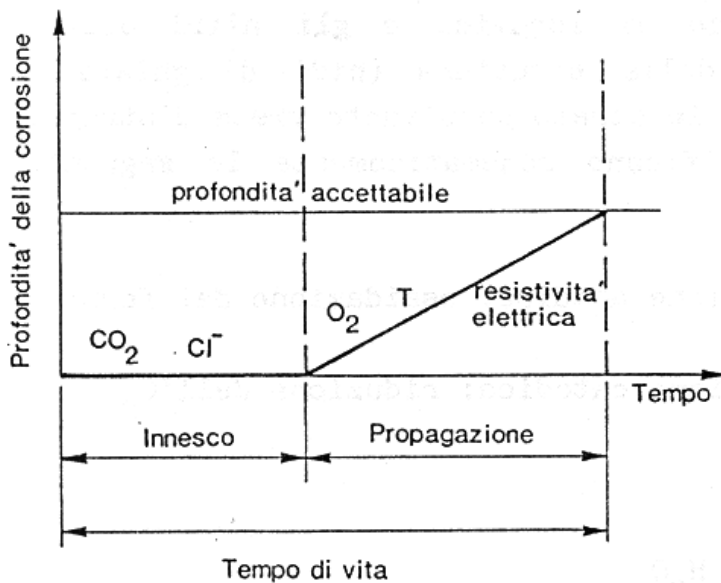


Fig. 3 – Andamento schematico del processo di corrosione (11)

Sul tempo di innesco agiscono:

- cloruri
- carbonatazione.

Sul tempo di propagazione agiscono:

- disponibilità di O_2
- temperatura
- conducibilità elettrica del calcestruzzo (reciproco della resistività)

Per quanto riguarda l'umidità relativa, una volta superato il valore minimo, che consente il compiersi del processo elettrochimico di corrosione, essa influenza la propagazione sino ad un certo valore aumentando la conducibilità elettrica. Oltre tale valore si realizza, invece, una progressiva saturazione dei pori rallentando via via l'afflusso di O_2 verso l'interno del calcestruzzo con conseguente diminuzione del pericolo di corrosione dell'armatura.

3. PARAMETRI SU CUI AGIRE PER LIMITARE LA CORROSIONE (QUALITÀ DEL COPRIFERRO)

Il calcestruzzo è, com'è noto, un materiale adatto alla prevenzione della corrosione delle armature in esso annegate. Tuttavia numerosi casi di degrado verificatisi soprattutto negli ultimi anni hanno evidenziato la necessità di curare con maggior attenzione particolarmente la qualità del copriferro. Una via per raggiungere validamente questo obiettivo consiste nel limitare, attraverso una appropriata composizione e per mezzo di una adeguata saturazione, la tendenza alla fessurazione del calcestruzzo e nel ridurre la permeabilità della pasta di cemento alla penetrazione dell'anidride carbonica, dei cloruri, dell'ossigeno e dell'umidità. Per quanto concerne la composizione, oltre ad eseguire una buona scelta dell'aggregato ed un suo corretto studio granulometrico, occorre intervenire sul dosaggio di cemento e sul rapporto a/c, impiegando allo scopo opportuni superfluidificanti. Inoltre, qualora il calcestruzzo sia esposto a particolari azioni aggressive come quella del gelo e disgelo, dei sali disgelanti, dei solfati e di altre sostanze chimiche, è

opportuno prendere i provvedimenti necessari a garantire la durabilità dell'opera per evitare che, in concomitanza del degrado del calcestruzzo, si verifichi anche la corrosione delle armature. Beninteso il calcestruzzo non deve subire segregazione sia durante la fase di trasporto che durante la posa in opera. Inoltre la vibrazione deve essere sufficiente a garantire la massima compattazione possibile. Per diminuire la permeabilità è necessario ridurre la porosità totale del calcestruzzo oppure, a parità di porosità totale, ridurre la dimensione media dei pori contenendo, per quanto possibile, la formazione dei grossi pori capillari. In questo modo, oltre ad impedire la penetrazione degli elementi che innescano la corrosione, si crea una barriera che si oppone al movimento delle cariche elettriche con conseguente diminuzione della conducibilità. Un mezzo per diminuire la porosità sembra consistere nell'impiego di alcune aggiunte minerali con caratteristiche pozzolaniche come il fumo di silice e la cenere volante. Ciò è reso possibile dalla formazione di prodotti di idratazione secondaria che, riempiendo i pori capillari, migliorano la qualità del copriferro e riducono in modo apprezzabile il rischio di innesco della corrosione, a patto di curare particolarmente la maturazione (10) sia come durata che come scelta dei materiali protettivi (fig. 4).

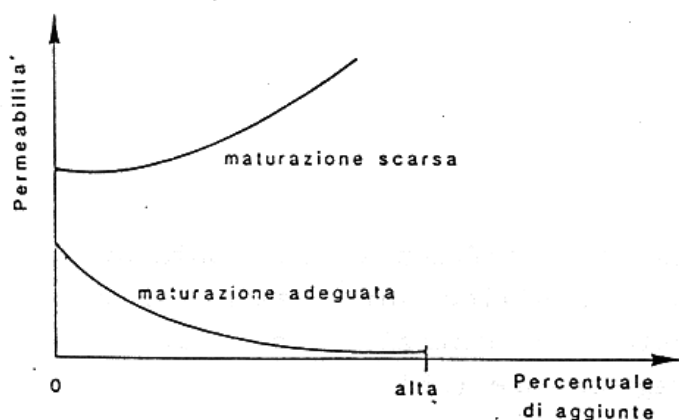


Fig. 4 –
Influenza della maturazione sulla permeabilità di paste cementizie con aggiunte pozzolaniche

3.1 Influenza del fumo di silice

L'esame della letteratura tecnica sull'argomento conferma che i fumi di silice (12,13,14), purché opportunamente impiegati, costituiscono un nuovo mezzo per diminuire drasticamente la porosità e quindi la permeabilità del calcestruzzo. Essi possono influenzare sia il tempo di innesco che il tempo di propagazione della corrosione che sono, come già detto, determinanti per stabilire il tempo di vita dell'opera in calcestruzzo.

3.1.1 Tempo di innesco

Per quanto concerne il tempo di innesco è stato verificato (15) che con un'aggiunta di fumi di silice dell'ordine del 10-20% (valori d'impiego normali, raramente superati) il pH della soluzione presente nei pori del calcestruzzo, dopo che è avvenuta la reazione pozzolanica, non scende al di sotto di 12,5 che corrisponde a quello di una soluzione satura di $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Con aggiunte del 30% si ha una ulteriore riduzione del pH che comunque si mantiene al di sopra di 11,5, sufficiente a mantenere una buona passività dell'acciaio. Come si è visto in precedenza però, la riduzione del pH comporta una riduzione del tenore critico di cloruri con conseguente aumento del rischio di corrosione. Ciò sembra correlabile ad una minore capacità della pasta cementizia idratata di legare e

neutralizzare gli ioni cloruro presenti nell'impasto rendendoli così disponibili nella soluzione dei pori e quindi attivi ai fini della corrosione (15) (Fig. 5 e 6).

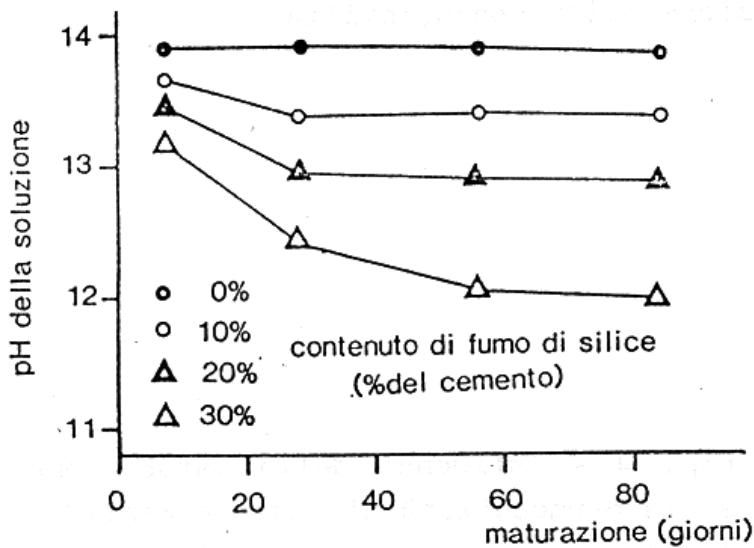


Fig. 5 – Influenza del contenuto di fumo di silice sul pH di paste cementizie a differenti stagionature.

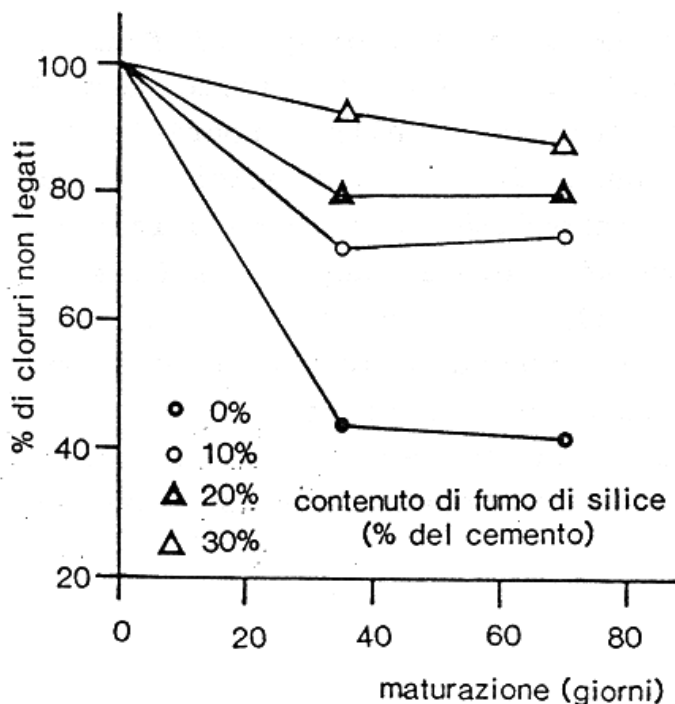


Fig. 6 – Percentuale di cloruri che rimane disciolta nella soluzione dei pori capillari di paste cementizie idratate (aggiunta di 0,4% di cloruri sul peso di cemento) addizionate di fumo di silice

Tuttavia mentre la concentrazione di cloruri presenti nel calcestruzzo all'atto del confezionamento può essere contenuta a livelli minimi, attraverso una scelta adeguata dei materiali, la diffusione dei cloruri potrà essere limitata solo agendo sulla porosità della pasta cementizia. L'uso dei fumi di silice riduce notevolmente la porosità e di conseguenza la permeabilità ai cloruri (16,17) e quindi, nel bilancio complessivo, la loro presenza risulta più favorevole di quanto sia dannosa, a causa della riduzione del pH. Il pH diminuisce ulteriormente nel tempo per azione della carbonatazione e perciò ci si è posti giustamente il problema di come i fumi di silice possano influenzare la profondità di carbonatazione, altro elemento fondamentale per l'innesco della corrosione. Si è visto che i fumi di silice

non influenzano in modo sostanziale la profondità di carbonatazione (6). Mentre un effetto importante sulla riduzione della carbonatazione si può ottenere con l'uso di riduttori d'acqua, maggior interesse sembra avere l'uso congiunto dei fumi di silice e dei super riduttori d'acqua, dovuto verosimilmente ad un effetto sinergico (Fig. 7) (18,19).

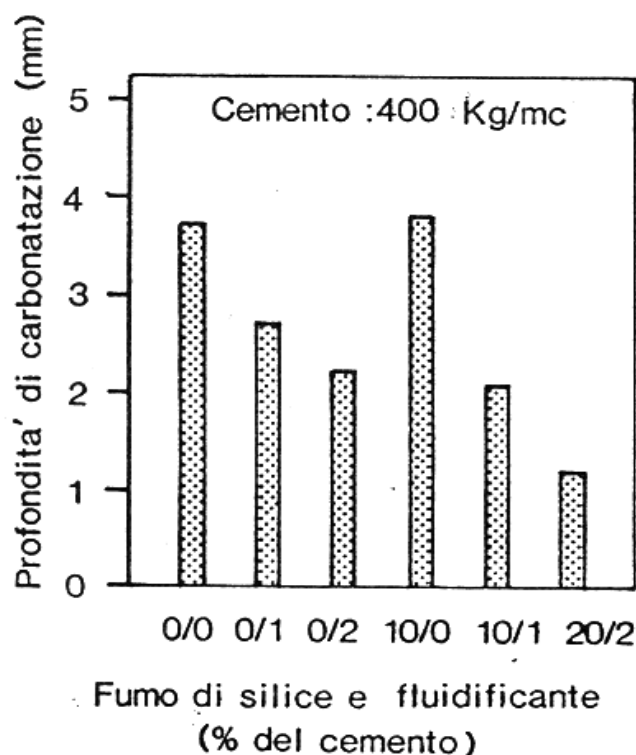


Fig. 7 – Profondità di carbonatazione con differenti dosaggi di fumo di silice e di fluidificante.

Questo è un punto molto importante della tecnologia di impiego dei fumi di silice perchè, come si vedrà anche in seguito, l'uso combinato con i super-riduttori d'acqua migliora in modo sostanziale molte altre proprietà del calcestruzzo ai fini della riduzione del pericolo di corrosione. Una controprova di ciò si è avuta esaminando la profondità di carbonatazione di calcestruzzi confezionati con fumi di silice ma ad elevati rapporti $a/(c + s)$ senza l'uso di additivi riduttori d'acqua (20). Si è visto che tali calcestruzzi presentano, in generale, una resistenza alla carbonatazione piuttosto mediocre in contrasto con elevate resistenze meccaniche. Ne consegue perciò che calcestruzzi confezionati con soli fumi di silice non possono essere considerati resistenti alla carbonatazione pur avendo resistenze meccaniche superiori alla media.

3.1.2 Tempo di propagazione

Quando lo stato di passivazione dell'acciaio viene meno a causa della carbonatazione e/o dei cloruri, la corrosione è innescata ma la sua velocità può essere più o meno elevata in ragione di altri parametri. Fra questi, si è visto che giocano un ruolo importante la temperatura che, come è noto, influenza la velocità di reazione di tutti i processi chimici, la resistività elettrica e la velocità di trasporto dell'ossigeno dall'esterno. Nei calcestruzzi modificati con fumo di silice la resistività elettrica è notevolmente elevata e cresce esponenzialmente in funzione del tenore di fumi, specialmente a dosaggi di cemento medio alti (Fig. 8) (6).

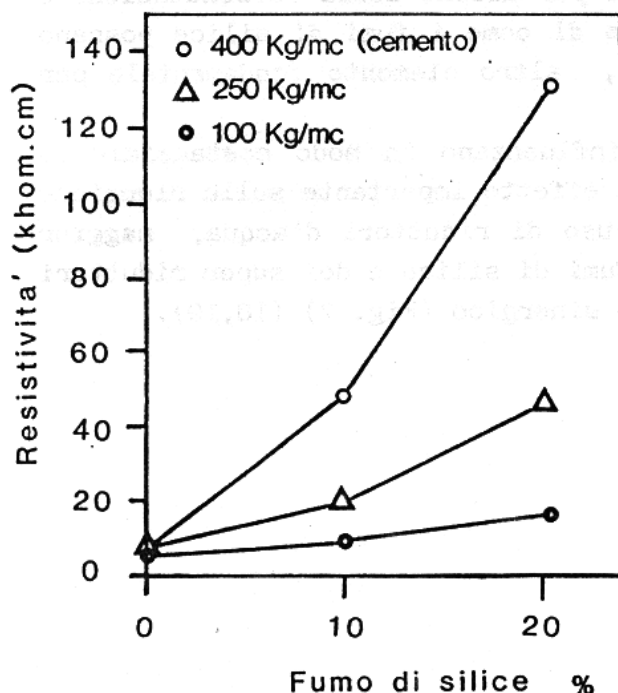


Fig. 8 – Effetto del fumo di silice sulla resistività elettrica del calcestruzzo

Per quanto riguarda il trasporto dell'ossigeno dall'esterno non si hanno ancora dati chiari anche se con la diminuzione della permeabilità, specialmente con l'uso combinato di additivi, si può presumere che il trasporto di O_2 diminuisca (18,21). La diminuzione della permeabilità inoltre, fa sì che l'accesso d'acqua alla superficie dell'acciaio sia limitato. In questo modo viene a mancare un altro elemento importante presente nella reazione di riduzione catodica dell' O_2 con conseguente controllo della corrosione.

Ciò è stato provato da alcuni autori (22) che hanno sottoposto campioni di malte speciali con fumi di silice e super-riduttori d'acqua a condizioni favorevoli alla corrosione senza che questa si sia manifestata. In questo tipo di malte essi hanno definito come parametri prioritari ai fini della protezione la mancanza, per l'appunto, di acqua accessibile all'armatura e la elevata resistività elettrica.

3.2 Influenza delle ceneri volanti

Come il fumo di silice anche la cenere volante può essere considerata come un materiale pozzolanico artificiale. La sua attività pozzolanica risulta tuttavia meno elevata rispetto a quella del fumo di silice, essenzialmente a causa della minore finezza e del minor contenuto di SiO_2 (23). Inoltre, a causa della maggior variabilità sia nella composizione chimica che in alcune caratteristiche fisiche delle ceneri volanti, gli studi finora condotti hanno fornito una maggiore diversificazione nei risultati sperimentali.

3.2.1 Tempo di innesco

Come già visto, nel processo di innesco della corrosione il primo passo è costituito dalla riduzione dell'alcalinità della pasta di cemento. Ciò potrebbe essere causato dal consumo di $Ca(OH)_2$ che avviene con la reazione pozzolanica. Infatti in una miscela di cemento portland e materiale pozzolanico è teoricamente sufficiente un 25% di silice reattiva per consumare l'idrossido di calcio proveniente dall'idratazione del cemento Portland (24). Tuttavia è stato dimostrato che l'elevata alcalinità della soluzione dei pori di una pasta di cemento Portland dipende essenzialmente dalla presenza di idrossidi di sodio e potassio piuttosto che dall'idrossido di calcio (25). Ciò spiega alcuni risultati sperimentali (7) secondo i quali il pH della soluzione dei pori di paste di cemento con cenere volante si è

ridotto dal valore di riferimento di 13,75 a solo 13,55. Altre esperienze (8), condotte su provini esposti in ambiente esterno a Dhahran, hanno evidenziato che, dopo 600 giorni di reazione tra cenere volante (nella proporzione del 40% in peso della miscela cementizia) e idrossido di calcio, il pH rimane ancora nel range da 12,7 a 12,93. Dato che il pericolo dell'innesco della corrosione, come già visto, è più facilmente correlabile a fattori fisici come la permeabilità della pasta di cemento, soprattutto alla diffusione della CO_2 (carbonatazione) e dei cloruri, può essere vantaggioso l'impiego della cenere volante che conduce ad un miglioramento della distribuzione dei pori in una pasta di cemento a completa idratazione. Quest'effetto influenza favorevolmente la permeabilità sia all'acqua che ai gas ma, poiché analogamente all'uso del fumo di silice tali aggiunte ritardano lo sviluppo delle proprietà idrauliche, una inadeguata maturazione potrebbe portare ad effetti opposti (26). Nel caso di paste di cemento contenenti 10, 20 e 30% di ceneri volanti, passando dai 28 ai 90 giorni di stagionatura, è stata osservata un'apprezzabile riduzione delle dimensioni dei pori ed un drastico calo nelle permeabilità (da $11-13 \times 10^{-11}$ a 1×10^{-11} cm/s) (27). Alcuni autori (28) hanno trovato che la permeabilità di calcestruzzi contenenti ceneri volanti è più elevata di quella di un normale calcestruzzo a 28 giorni ma è sostanzialmente più bassa a 6 mesi di stagionatura. Come per il fumo di silice anche per la cenere volante non è ancora ben chiaro l'effetto sulla carbonatazione: infatti i risultati sperimentali tendono a diversificarsi, soprattutto in relazione alla composizione dei calcestruzzi ed ai metodi di prova usati. Tuttavia l'opinione più accreditata è che due calcestruzzi, con e senza ceneri volanti, dovrebbero mostrare la stessa profondità di carbonatazione (9,29,30,31,32,33,34). Cionondimeno se la maturazione del calcestruzzo non è adeguata, la profondità di carbonatazione è maggiore nei calcestruzzi con ceneri (Fig. 9)(35).

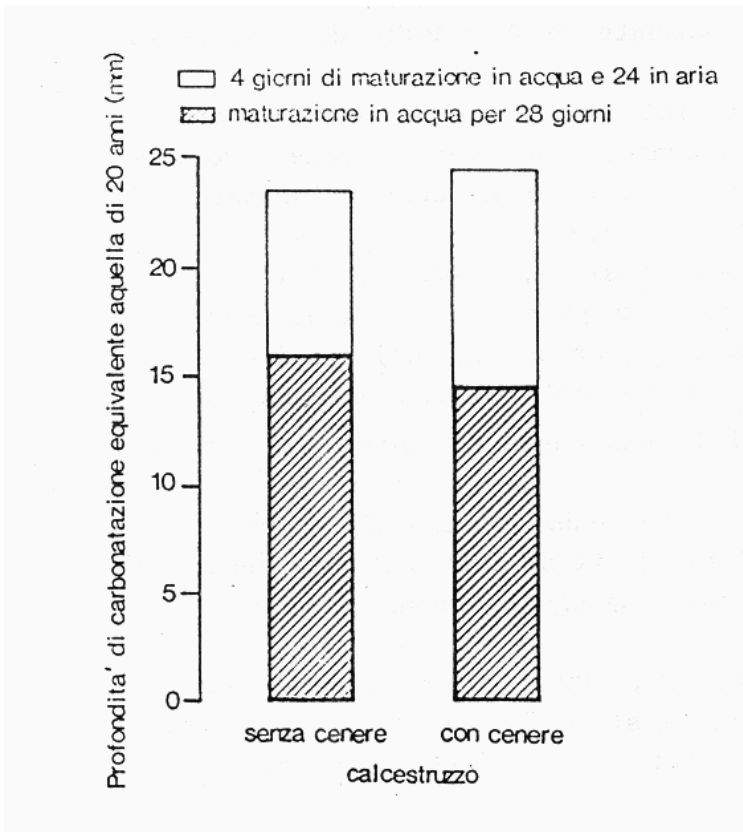


Fig. 9 – Confronto della profondità di carbonatazione di calcestruzzi con e senza ceneri

Per quanto riguarda la penetrazione di cloruri dall'esterno, i materiali pozzolanici giocano un ruolo nettamente positivo. Alcuni studi (36) hanno esaminato la profondità di penetrazione dei cloruri in calcestruzzi con cementi pozzolanici con e senza superfluidificanti in confronto con calcestruzzi confezionati con cementi Portland rilevando, per i primi, una netta riduzione della penetrazione dei cloruri. Risultati simili (37) sono stati ottenuti con paste di cemento contenenti fino al 30% di cenere volante. Infine, sempre riguardo la permeabilità ai cloruri, non sembra esserci distinzione apprezzabile tra le diverse classi di ceneri volanti (38).

3.2.2 Tempo di propagazione

L'influenza della cenere volante risulta benefica anche sui parametri che propagano la corrosione delle armature, ed in particolare la resistività elettrica. A questo riguardo prove sperimentali condotte su calcestruzzi con o senza cenere volante con rapporto a/c di 0,40 hanno mostrato che la resistività elettrica cresce di circa 3 volte in corrispondenza ad una sostituzione del cemento Portland con 25% in cenere (39) (Fig. 11).

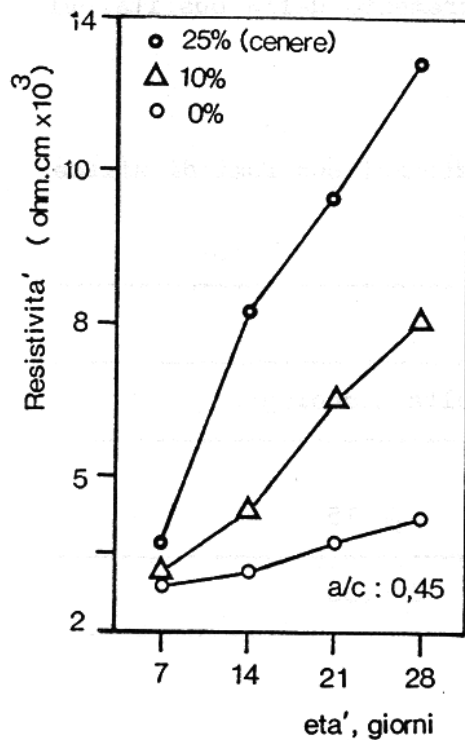


Fig. 10 – Resistività elettrica di calcestruzzi con e senza ceneri volanti

Tenendo presente che la perdita al fuoco della cenere sperimentata è risultava del 6,24%, tale risultato confuta, inoltre, l'opinione secondo cui la presenza di carbone incombusto nelle ceneri aumenta la conducibilità elettrica del calcestruzzo. Per quanto riguarda la disponibilità di ossigeno, essa è direttamente correlabile alla permeabilità al gas della pasta di cemento: misure su cementi di miscela con scorie di altoforno idratati e completamente essiccati hanno mostrato una apprezzabile riduzione della presenza di ossigeno (40,41). Per il calcestruzzo nelle normali condizioni ambientali ci si può aspettare delle riduzioni ancora più significative.

4 CONCLUSIONI

Esaminando comparativamente il comportamento dei fumi di silice e delle ceneri volanti nei riguardi della corrosione, si notano alcune analogie ed alcune diversità. Tra le analogie si può senz'altro sottolineare il comportamento pozzolanico di entrambi i materiali, anche se a differente livello. Tale comportamento consente di ottenere, se si esegue una maturazione adeguata, una pasta cementizia idratata più compatta con conseguente prolungamento del tempo di innesco e rallentamento della velocità, di corrosione delle armature. Tali effetti possono così essere sintetizzati:

- diminuzione significativa della penetrazione dei cloruri
- scarsa influenza sul processo di carbonatazione
- netto miglioramento della qualità del copriferro
- incremento della resistività elettrica.

Per entrambi i materiali l'impiego corretto prevede l'uso di riduttori d'acqua. Questa necessità è maggiormente sentita per i fumi di silice, a causa della loro maggiore finezza. Tra le diversità va sottolineata, per i fumi di silice, la presenza di un effetto filler più pronunciato dovuto alla minor dimensione delle particelle (0, 1 μm) che, inserendosi tra i granuli di cemento, creano una struttura oltremodo densa e compatta, con un ulteriore miglioramento della qualità del copriferro.

Tabella I. Possibili categorie prestazionali dei calcestruzzi con fumi di silice nei riguardi della protezione delle armature.

	Calcestruzzi con fumo di silice		
	normale	intermedio	Ad alta tecnologia
% di fumo di silice	≤ 10	10 - 15	≥ 15
A/(c+s)	0,50	0,35 - 0,50	$\leq 0,30$
Dosaggio cemento kg/m^3	300	400	500
Superfluidificante	assente	dosaggi normali	dosaggi elevati
Livello di protezione	discreto	buono	ottimo

Mentre l'uso delle ceneri volanti può dare un contributo positivo alla protezione delle armature ma non richiede tecnologie applicative particolarmente sofisticate, l'uso dei fumi di silice può assicurare, in certe condizioni, una maggior garanzia di protezione delle armature ma presuppone tecnologie di impiego più complesse. Ciò è illustrato schematicamente nella tabella I nella quale i calcestruzzi con fumi di silice sono suddivisi in tre categorie prestazionali. Per ottenere un'ottima protezione delle armature è consigliabile pertanto lavorare con elevati dosaggi di cemento, fumi di silice e additivi super-riduttori d'acqua e ridurre il rapporto $a/(c+s)$ a valori inferiori o uguali a 0,30. Inoltre ciò consente di confezionare malte e/o calcestruzzi che posseggono una elevata durabilità a molti altri agenti aggressivi quali il gelo e il disgelo, i sali disgelanti, i solfati, le acque dilavanti ecc. con conseguente ulteriore protezione indiretta delle armature. In conclusione i risultati oggi disponibili non solo escludono un maggior rischio di corrosione delle barre di armature in calcestruzzi con ceneri volanti, pozzolane (42) e fumi di silice (19), ma sembrano mostrare un miglioramento della protezione delle armature, soprattutto quando questi materiali vengono utilizzati non in sostituzione del cemento.

5 BIBLIOGRAFIA

- 1) COMITE' EURO-INTERNATIONAL DU BETON (CEB): "CEB Manual on Cracking and Deformations", Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 1985
- 2) TURRIZIANI, R.: "Internal Degradation of Concrete Alkali-Aggregate Reaction, Reinforcement Steel Corrosion", 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, Brazil, Settembre 1986
- 3) ELSENER, B.: "Corrosion des armatures dans le béton", Documentation 89 SIA-Durabilité du béton armé, Zurich, 1985, pp. 29-37
- 4) SHALON, R., RAPHAEL, M.: "Influence of Sea water and Corrosion of Reinforcement", ACI Proceedings, V.55, 1959, pp. 1251-1628
- 5) PEDEFERRI, P.: "La corrosione delle armature nel calcestruzzo", Convegno sulle opere in calcestruzzo: Durabilità e ripristino, Milano, Dicembre 1985
- 6) GJORV, O.E.: "Durability of Concrete Containing Condensed Silica Fume", First International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and other Mineral by Products in Concrete, Montebello, Canada, Agosto 1983, ACI Publication SP 79 V. 2, pp. 695-708
- 7) DIAMOND, S.: "Effects of Two Danish Fly Ashes on Alkali Contents of Pore Solutions of Cement-Fly Ash Pastes", Cement and Concrete Research, V.II, 1981, pp. 383-394
- 8) RASHEEDUZZAFAR, DAKIHIL, F., MUKARRAM, K.: "Influence of Cement Composition and Content on the Corrosion Behaviour of Reinforcing Steel in Concrete", Katharine and Bryant Mather International Conference on Concrete Durability, Atlanta - USA, Aprile 1987, ACI Publication SP 100 V.2, pp. 1477-1502
- 9) DHIR, R.K.: "Pulverized-Fuel ASH", in Concrete Technology and Design, V.3, Cement Replacement Materials, Edited by Swamy, Surrey University Press, London, 1986, pp. 197-257
- 10) COMITE' EURO-INTERNATIONAL DU BETON (CEB). "Draft CEB Guide to Durable Concrete Structures", Bulletin d'Information n° 166, Maggio 1985
- 11) TUUTTI, K.: "Corrosion of Steel in Concrete" CBI research 4.82, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm 1982
- 12) SELLEVOLD, E.J., BAGER, D.H., KLITGAARD, J.K.: "Silica Fume-Cement Pastes: Hydration and Pore Structure", Report n. 82.610, Division of Building Materials, the Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway, Febbraio 1982
- 13) MALHOTRA, V.M., CARETTE, G.G.: "Silica Fume Concrete - Properties, Applications and Limitations", Concrete International, May 1983, pp. 40-46
- 14) TENOUTASSE, N., MARION, A.M.: "The influence of Silica Fume on the Hydration and Microstructure of OPC Pastes", 2nd International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, Aprile 1986 (Supplementary Papers)
- 15) PAGE, C.L., VENNESLAND, O.: "Pore Solution Composition and Chloride Binding Capacity of Silica Fume - Cement Pastes", RILEM, Materials and Structures, V.16, N.91, 1983, pp. 19-25
- 16) GUATEFALL, O.: "L'effect of Condensed Silica Fume on the Diffusion of Chlorides through Hardened Cement Paste", 2nd International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, Aprile 1986, ACI Publication SP 91 V. 2, pp. 991-997
- 17) MARUSIN, S.L.: "Chloride Ion Penetration in Conventional Concrete and Concrete Containing Condensed Silica Fume", 2nd International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, Aprile 1986, ACI Publication SP 91 V.2 , pp.1119-1133

- 18) VENNESLAND, O., GJPRV, O.E.: "Silica Concrete-Protection Against Corrosion of Embedded Steel", First International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and other Mineral by Products in Concrete, Montebello, Canada, Agosto 1983, ACI Publication SP 79 V.2, pp.719-729
- 19) SELLEVOLD, E.J.: "The Function of Condensed Silica Fume in High Strength Concrete", Symposium on Utilisation of High Strength Concrete, Stavanger, Norway, Giugno 1987, pp. 39-49
- 20) SKJOLSVOLD, O.: "Carbonation Depths of Concrete with and without Condensed Silica Fume", 2nd International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, Aprile 1986, ACI Publication SP 91 V.2, pp. 1031-1048
- 21) GJØRV, O.E.: "Effect of Condensed Silica Fume on the Electrolytic Conditions in Concrete", Seminar on Some Aspects of Admixtures and Industrial by Products on the Durability of Concrete, Chalmers University of Technology, Goteborg, Aprile 1986
- 22) PREEGE, C.M., ARUP, H., FROLUND, T.: "Electrochemical Behaviour of Steel in Dense Silica - Cement Mortar", First International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and other Mineral by Products in Concrete, Montebello, Canada, Agosto 1983, ACI Publication SP 79 V. 2, pp.785-796
- 23) BERRA, M., TAVANO, S.: "Proprietà di miscele cementizie contenenti fumo di silice condensato (Condensed Silica Fume)", Convegno AITEC: Il cemento e il calcestruzzo negli anni 180, Parma, Ottobre 1985
- 24) METHA, P.K.: "Pozzolanic and Cementitious by Products as Mineral Admixtures for Concrete - A Critical Review", First International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral by Products in Concrete, Montebello, Canada, Agosto 1983, ACI Publication SP 79 V.I, pp.1-46
- 25) DIAMOND, S.: "Long Term Status of Calcium Hydroxide Saturation of Pore Solution in Hardened Cements", Cement and Concrete Research, V.5, n. 6, 1975, pp. 607-616
- 26) SCHIESSL, P.: "Influence of the Composition of Concrete on the Corrosion Protection of the Reinforcement", Katharine and Bryant Mather International Conference on Concrete Durability, Atlanta - USA, Aprile 1987, ACI Publication SP 100 V. 2, pp.1633-1650
- 27) MANMOHAN, D., MEHTA, P.K.: "Influence on Pozzolanic, Slag, and Chemical Admixtures on Pore Size Distribution and Permeability of Hardened Cement Paste", Cement, Concrete and Aggregates, V.3, nO 1, Estate 1984, pp. 63-67
- 28) BERRY, E.E., MALHOTRA, V.M.: "Fly Ash for Use in Concrete - A Critical Review", ACI Journal, V.2, nO 3, Marzo-Aprile 1982, pp. 59-73
- 29) MARTIN, H., SCHIEBL, P., RAUEN, A.: "Karbonatisierung von Beton aus verschiedenen Zementen", Betonwerk+Fertigteil-Technik (1975)
- 30) WESCHE, K., SCHUBERT, P., WEBBER, J.W.: "Strength and Durability of Concrete with Coal-Ash as an Additive", Betonwerk+Fertigteil-Technik (1984)
- 31) MATTHEWS, J.D.: "Carbonation of Ten Year Old Concrete with and without Pulverized Fuel Ash", 2nd International Conference on Ash Technology and Marketing, London, Settembre 1984
- 32) NEWMAN, J.B., SULLIVAN, P.J.E. BELL, A.M.: "In Service Performance of Reinforced Concrete Structures Containing Pulverized Fuel Ash", Concrete 17, 1983, pp. 9-12
- 33) CABRERA, J.G., WOLLEY, G.R.: "A Study of Twenty-Five Year Old Pulverized Fuel Ash Concrete Used in Foundation Structures", Proceedings Instn.Civ.Engrs., Part 2, 79, pp. 149-165
- 34) BACKES, H.P.: "Carbonic Acid Corrosion of Mortars Containing Fly Ash", 2nd International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolan in Concrete", Madrid, Aprile 1986, ACI Publication SP 91 V.I, pp.621-636

- 35) DHIR, R.K., JONES, M.R., MUNDAY, J.G.L.: "A Practical Approach to Studying Carbonation of Concrete", Concrete 19, 1985, pp. 32-34
- 36) RIO, A., TURRIZIANI, R.: "Nuove ricerche sull'influenza della riduzione del rapporto acqua/cemento sulla resistenza chimica dei conglomerati cementizi", Il Cemento, 1, 1982, pp. 45-58
- 37) PAGE, C.L., SHORT, N.R. and MUNDAY, J.G.L.: "Diffusion of Chloride Ions in Hardened Cement Pastes", Cement and Concrete Research, 11, 1981, pp. 394-406
- 38) GEBLER, S.H., KLIEGER, P.: "The Effect of Fly Ash on the Durability of Air Entrained Concrete", 2nd International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolan in Concrete, Madrid, April 1986, ACI Publication SP 91 V.1, pp. 483-519
- 39) ABDULHADI, S.S.: "Electrical Resistivity of Concrete in Relation to Corrosion of Reinforcement", MSc thesis, Department of Civil Engineering, University of Petroleum and Minerals, Dhahran, 1982
- 40) TREADAWAY et al.: "The Influence of Concrete Quality on Carbonation in Middle Eastern Countries", Seminar on Corrosion of Steel in Concrete, 1 London, 1983
- 41) GRAF, H., GRUBE, H.: "The influence of Curing on the Gas Permeability of Concrete with Different Composition", RILEM Seminar Durability of Concrete Structures under Normal Outdoor Conditions, Hannover, March 1984
- 42) MASSAZZA, F., "Structure of Pozzolans and Fly Ash, and the Hydration of Pozzolanic and Fly Ash Cements. General Report", VIIIth International Congress on the Chemistry of Cements, V.4, Paris 1980, pp. 85-96.