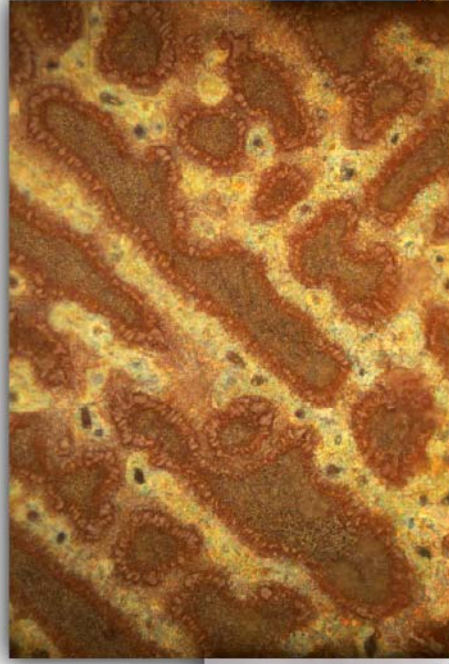


**Giornate
Nazionali**
sulla

Corrosione e Protezione

XI EDIZIONE

Ferrara - 15-17 giugno 2015

Organizzate da



**ASSOCIAZIONE
ITALIANA
DI METALLURGIA**



AITIVA
Associazione Italiana
Tecnici Industrie Vernici ed Affini

APCE
ASSOCIAZIONE PER LA PROTEZIONE
DALLE CORROSIONI ELETTROLITICHE

NACE MILANO ITALIA
INTERNATIONAL SECTION

Presentazione

Testi

Copyright

Comitati

**Segreteria
organizzativa**

Sponsor



INDICE

LETTURE PLENARIE

Studio di miscele binarie per la messa a punto di un inibitore di corrosione da cloruri per il calcestruzzo armato

A. Brenna, S. Beretta, F. Bolzoni, M.V. Diamanti, L. Lazzari, MP. Pedferri, M. Ormellese

Metodi innovativi per la conservazione del bronzo e del bronzo dorato

A. Balbo, C. Monticelli, E. Bernardi, C. Chiavari, B. Lenza, C. Martini, L. Brambilla, S. Goidanich, M. Mascalchi, A.A. Mencaglia, S. Siano

CORROSIONE E PROTEZIONE DELLE ARMATURE NELLE OPERE IN C.A.

Valutazione del comportamento alla corrosione in calcestruzzi confezionati con leganti innovativi

M. Cabrini, L. Coppola, S. Lorenzi, T. Pastore, S. Pellegrini

Applicazione della metodologia EIS ai fini della valutazione della durabilità del calcestruzzo armato rivestito con FRP

A. Bossio, C. Bitondo, T. Monetta

Protective properties of TMOS/MTES coatings on steel in simulated carbonated concrete pore solution

M. Criado, I. Sobrados, J. Sanz, J.M. Bastidas

Variabilità spaziale della corrosione delle armature: un nuovo approccio con misure elettrochimiche locali

M. Stefanoni, U. Angst, B. Elsener

Resistività del calcestruzzo carbonatato e corrosione delle armature

M. Gastaldi, M. Messina, L. Bertolini

INIBITORI DI CORROSIONE

Influenza di una lunga catena alifatica sulle caratteristiche inibitrici del benzotriazolo

G. Trabanelli, A. Frignani, C. Monticelli, F. Zucchi

Prevenzione dalla corrosione di superfici di alluminio mediante rivestimenti compositi a base di cerio

L. Calabrese, A. Capri, L. Bonaccorsi, E. Proverbio

Studio sull'azione passivante prodotta dal Cr VI sull'acciaio zincato nel calcestruzzo

T. Bellezze, G. Roventi, D. Timofeeva, R. Fratesi



RESISTIVITÀ DEL CALCESTRUZZO CARBONATATO E CORROSIONE DELLE ARMATURE

M. Gastaldi, M. Messina, L. Bertolini

Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica “G.Natta”

Sommario

Per prevedere la vita residua di una struttura in calcestruzzo armato in cui la carbonatazione ha già interessato il copriferro è necessario stimare la velocità con cui la corrosione propaga. La determinazione di questo parametro in strutture reali tuttavia, non è di semplice determinazione. La misura della resistività elettrica del calcestruzzo è uno dei metodi proposti e utilizzati, per ottenere una stima della velocità di corrosione delle armature. Tuttavia le correlazioni tra resistività e velocità di corrosione non hanno validità generale, ma dipendono da diversi fattori quali il tipo di calcestruzzo e le condizioni di esposizione; inoltre la resistività è influenzata da diversi parametri tra cui la modalità di misura.

Questa nota riporta i risultati di uno studio volto a valutare gli effetti della modalità di misura della resistività del calcestruzzo sulla stima della velocità di corrosione delle armature in calcestruzzo carbonatato. Sono state realizzate misure di resistività su provini in calcestruzzo carbonatato utilizzando sonde interne ed esterne. I provini sono stati sottoposti a cicli di asciutto-bagnato durante i quali sono stati monitorati anche il potenziale e la velocità di corrosione. I risultati sperimentali mostrano che le misure eseguite esternamente possono non rappresentare le condizioni del calcestruzzo a livello dell'armatura e condurre a un'errata stima della velocità di corrosione.

Introduzione

La corrosione delle armature indotta dalla carbonatazione è la causa principale di degrado delle strutture in calcestruzzo armato, esposte in ambienti in assenza di cloruri [1]. Con l'avanzare del degrado aumentano notevolmente i costi associati agli interventi di ripristino necessari [2,3]; la realizzazione di un intervento di ripristino prima che il degrado si manifesti può pertanto portare a considerevoli risparmi.

Una volta che il fronte di carbonatazione ha raggiunto le armature, e quindi si è innescata la corrosione, la corrosione può propagare con velocità non trascurabili solo se il calcestruzzo non è asciutto e in presenza di ossigeno (in strutture esposte in atmosfera la presenza di ossigeno è sempre garantita).

La misura della velocità di corrosione nelle strutture reali non è di semplice attuazione; tuttavia nel corso degli anni sono stati proposti diversi metodi per riuscire a stimare questo parametro, fondamentale per la valutazione della vita di servizio delle strutture in calcestruzzo armato soggette a carbonatazione [1,4]. Una stima della velocità di corrosione può essere fatta attraverso la misura della resistività elettrica del calcestruzzo [5-7]. Questa è una misura non distruttiva, può essere effettuata sulla superficie del calcestruzzo ed è di semplice attuazione. In generale, nelle aree in cui la resistività del calcestruzzo è bassa la velocità di corrosione delle armature è alta.

Per ottenere una stima della velocità di corrosione, tuttavia, è necessario essere in possesso di correlazioni sperimentali tra resistività elettrica del calcestruzzo e velocità di corrosione dell'armatura. Queste correlazioni dipendono da diversi fattori quali: l'umidità, la temperatura, il rapporto acqua/cemento, la stagionatura, il tipo di cemento e la presenza di cloruri [4-10]. La misura della resistività del calcestruzzo può essere eseguita applicando due o quattro elettrodi sulla superficie del calcestruzzo o utilizzando sonde interne [11,12]. Le misure di resistività del calcestruzzo eseguite superficialmente possono essere influenzate dalle condizioni degli strati superficiali del calcestruzzo che possono presentare caratteristiche differenti rispetto a quelle del calcestruzzo che si trova a contatto con le armature [13].

In questa nota sono riportati i risultati di una ricerca in cui si sono valutati gli effetti della modalità di misura della resistività del calcestruzzo sulla stima della velocità di corrosione delle armature in calcestruzzo carbonatato. Su appositi provini in calcestruzzo armato, in cui prima del getto sono state inserite sonde per misure elettrochimiche e di resistività elettrica del calcestruzzo, sono stati monitorati, dopo carbonatazione accelerata, il potenziale, la velocità di corrosione e la resistività del calcestruzzo durante cicli di asciutto-bagnato. Le misure di resistività sono state eseguite sia con le sonde poste all'interno del calcestruzzo a diverse profondità, sia con sonde poste sulla superficie esterna dei provini. Le misure di resistività sono state correlate con le velocità di corrosione, in modo da valutare l'influenza della misura sulla stima della velocità di corrosione.

Procedura sperimentale

Provinci

Per lo svolgimento delle prove sperimentali sono stati confezionati due provini prismatici di dimensioni 300×160×50 mm in calcestruzzo armato (denominati 1C e 3C). Si è utilizzato un calcestruzzo con rapporto acqua/cemento 0.65, realizzato con 325 kg/m³ di cemento al calcare di tipo CEM II/A-LL 42.5 R, 211 l/m³ di acqua e 1737 kg/m³ di aggregato calcareo frantumato con diametro massimo di 9.5 mm. Per raggiungere la lavorabilità richiesta, S4, è stato aggiunto all'acqua d'impasto un additivo superfluidificante (in quantità pari a 1% in massa rispetto al cemento).

In mezzeria a ciascun provino è stata inserita un'armatura per calcestruzzo (di tipo B450C), di diametro 10 mm e lunghezza 320 mm (Fig. 1), in modo da avere uno spessore di copriferro di 20 mm dalle due superfici 300×160 mm. Le due estremità di ogni armatura sono state isolate, con una guaina termorestringente, per una lunghezza di 30 mm, lasciando a contatto del calcestruzzo solo una zona centrale di 260 mm. Prima della fase di getto, sono stati inseriti un elettrodo di riferimento interno, per misurare il potenziale di corrosione vicino all'armatura, e delle sonde di resistività, per misurare la resistività elettrica del calcestruzzo a diverse profondità. L'elettrodo di riferimento in-

terno è stato realizzato con un filo di titanio attivato (ricavato da una rete per protezione catodica) lungo 20 mm. Questo elettrodo è stato posto parallelamente all'armatura ad una distanza di 10 mm. Sono state realizzate due tipologie di sonde per la misura della resistività elettrica del calcestruzzo: una a *pettine* (denominata sonda A) e una con geometria cilindrica (denominata sonda B). La sonda a *pettine* è stata realizzata disponendo in parallelo quattro fili di titanio attivato, lunghi 20 mm, posti ad una distanza tra loro di 8 mm. La sonda cilindrica è stata realizzata fissando quattro dischi in acciaio inossidabile di tipo 1.4401 (AISI 316), di diametro 5 mm e con un interasse tra loro di 10 mm, in un cilindro di PVC. Tutti gli elettrodi delle diverse sonde sono stati singolarmente collegati ad un cavo elettrico per lo svolgimento delle misure dall'esterno.

Entrambe le tipologie di sonde sono state poste nella mezzeria del provino. Una sonda a *pettine* nel provino 1C (denominata sonda Av) è stata posta anche perpendicolarmente all'armatura, in modo da misurare la resistività a diverse profondità di copriferro. La Fig. 1 mostra la geometria dei provini e la disposizione delle diverse sonde all'interno del provino 1C (la disposizione delle sonde nel provino 3C è analoga ma senza la sonda a *pettine* disposta in verticale).

Il calcestruzzo è stato caratterizzato sia allo stato fresco, sia allo stato indurito. L'abbassamento al cono è risultato pari a 210 mm e si sono misurate resistenze a compressione, su cubi di lato 100 mm, di 22 MPa e 36 MPa rispettivamente dopo 3 e 28 giorni di stagionatura.

Dopo il getto, i provini sono stati mantenuti per 3 giorni in laboratorio alla temperatura di circa 20°C all'interno dei casseri, coprendo la superficie del getto con un foglio di polietilene per evitare l'evaporazione dell'acqua dal calcestruzzo. Terminata la stagionatura, i provini sono stati estratti dai casseri e lasciati in laboratorio (a circa 20°C e 30% U.R.) per 7 giorni. Successivamente i provini sono stati sottoposti a carbonatazione accelerata, in un'apposita camera saturata con CO₂ in cui l'umidità relativa è stata mantenuta a 70%. Verificata la carbonatazione dell'intero spessore del calcestruzzo (effettuata attraverso la prova alla fenoltaleina su carote estratte dai provini), i provini sono stati esposti in laboratorio.

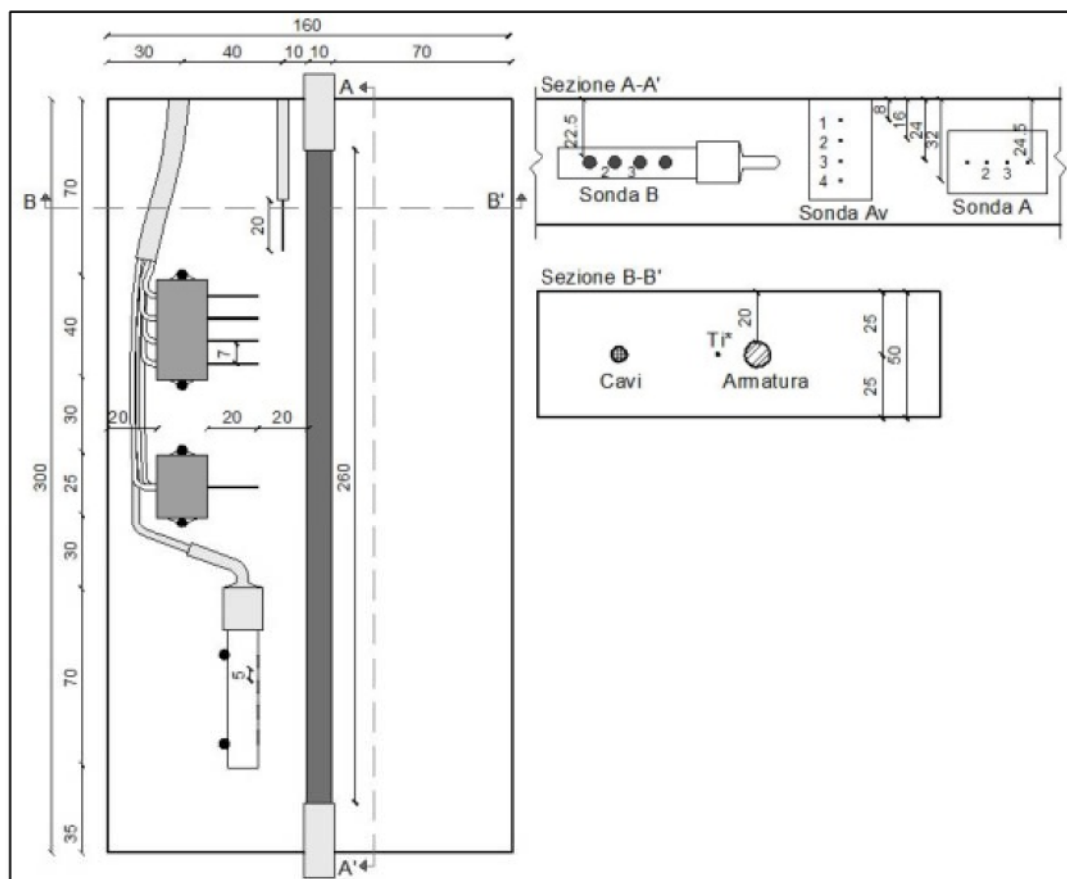


Fig. 1 Geometria dei provini e disposizione delle diverse sonde all'interno del provino 1C.

Prove

Durante il periodo di mantenimento dei provini in laboratorio si sono monitorati la resistività elettrica del calcestruzzo e le condizioni di corrosione delle armature fino al raggiungimento di misure stabili nel tempo. In seguito, i provini sono stati sottoposti a due cicli di asciutto-bagnato.

Durante la fase di bagnatura i provini sono stati sottoposti prima a risalita d'acqua per capillarità (immergendo per 5 mm la parte superiore del getto) per 48 ore e quindi sono stati immersi in acqua per 3 giorni. L'acqua è stata portata alla temperatura del laboratorio prima di essere posta in contatto con i provini. Durante la fase di asciugatura, i provini sono stati tenuti in laboratorio alla temperatura di circa 20°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) e umidità relativa del 30% ($\pm 5\%$) (temperatura e umidità sono state monitorate nel tempo) per circa 45 giorni, fino al raggiungimento di misure stabili nel tempo.

La resistività elettrica del calcestruzzo è stata misurata sia con le sonde inserite all'interno dei provini sia con sonde esterne applicate sulla superficie del calcestruzzo. Le misure di resistività con le sonde interne sono state svolte tra i due elettrodi centrali (2 e 3, Fig 1) delle sonde *A* e *B* e tra le coppie di elettrodi 1-2, 2-3 e 3-4 della sonda *Av*. Si sono utilizzate due tipologie di sonde esterne. La prima, denominata sonda *F*, è costituita da due cilindri di rame (diametro 10mm) distanziati 40 mm ed è stata impiegata per misurare la resistività elettrica del calcestruzzo della superficie inferiore contro cassero (misura *F1*) e di quella superiore non casserata (misura *F3*). La seconda (sonda *P*) è costituita da due piastre rettangolari (di lunghezza 46 mm e larghezza 42 mm) poste parallelamente tra loro, posizionate sulla superficie dei provini in modo da realizzare la misura della sezione di calcestruzzo tra la superficie inferiore e superiore. La Fig. 2 mostra uno schema della posizione delle sonde, esterne ed interne, nel corso della prova. Tra gli elettrodi delle sonde esterne e la superficie del calcestruzzo è stata interposta una spugna in condizione satura superficie asciutta. Per misurare la resistività elettrica della superficie del calcestruzzo a contatto con l'acqua nel corso dei cicli di bagnatura il provino è stato estratto momentaneamente dall'acqua; prima della misura si è provveduto a rimuovere l'eccesso d'acqua rendendo la superficie satura superficie asciutta.

La resistività elettrica del calcestruzzo è stata determinata misurando la sua conducibilità elettrica utilizzando un conduttimetro digitale (che effettua la misura utilizzando un segnale in tensione sinusoidale costante con una frequenza tra 40 e 1000 Hz). Per ottenere la resistività elettrica del calcestruzzo, la misura di conducibilità elettrica è stata moltiplicata per la costante di cella che dipende e dalla geometria della sonda. La costante di cella è stata determinata sperimentalmente per ciascuna sonda.

Le condizioni di corrosione sono state valutate attraverso misure di potenziale, effettuate con l'elettrodo interno di titanio attivato e con un elettrodo esterno al calomelano saturo (SCE), e di velocità di corrosione, misurata con la tecnica della resistenza di polarizzazione, in cui si è usato come contro elettrodo una rete per protezione catodica posta esternamente al provino e come elettrodo di riferimento quello interno di titanio attivato.

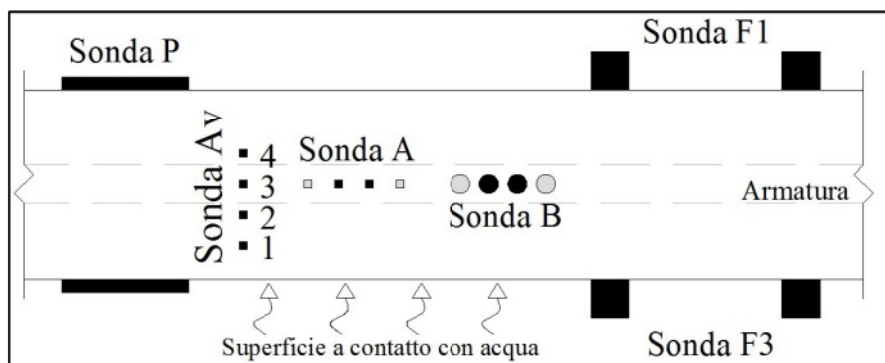


Fig. 2 Schema della posizione delle sonde esterne e interne nel corso della prova (in nero sono indicati gli elettrodi impiegati nelle misure di resistività mentre in grigio quelli non impiegati nell'ambito di questo lavoro).

La misura rispetto all'elettrodo di riferimenti esterno (SCE), nel corso dei cicli di bagnatura, è stata fatta immergendo l'elettrodo in acqua, mentre, nel corso dei cicli di asciugatura, l'elettrodo è stato posto sulla superficie del calcestruzzo, interponendo una spugnetta umida.

Risultati e discussione

Nelle Fig. 3-6 sono riportati, a titolo d'esempio, i risultati delle prove effettuate sul provino 1C durante un ciclo di bagnatura e asciugatura. La Fig. 3a mostra l'andamento nel tempo della resistività del calcestruzzo misurata con le sonde interne durante un ciclo di bagnatura. Al termine del periodo di mantenimento in laboratorio a 20°C ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) e umidità relativa del 30% ($\pm 5\%$) le misure ottenute con le sonde interne forniscono valori di resistività compresi tra 20000 e 100000 $\Omega \times \text{m}$, caratteristici di un calcestruzzo carbonatato secco. Si osserva una variabilità nei risultati in funzione della tipologia di sonda e della direzione della misura. Questa variabilità può essere attribuita alle differenze di porosità locali del calcestruzzo e alle differenze nella presenza di aggregati di diversa dimensione tra gli elettrodi delle sonde.

Si osserva uno sfasamento temporale nella rilevazione dell'ingresso dell'acqua da parte delle sonde in funzione della posizione degli elettrodi rispetto alla superficie del calcestruzzo a contatto con l'acqua (il calcestruzzo è stato immerso per 5 mm). In particolare, la misura di resistività effettuata sulla coppia di elettrodi 1-2 della sonda Av, posti ad una distanza tra 8 e 16 mm dalla superficie immersa, mostra, già dopo circa 15 minuti dall'inizio della bagnatura, una diminuzione da circa 90000 $\Omega \times \text{m}$ a circa 50000 $\Omega \times \text{m}$. Questa iniziale diminuzione della resistività è legata al contatto dell'elettrodo in posizione 1 con il calcestruzzo bagnato. Si forma quindi uno strato a minore resistività in corrispondenza all'elettrodo 1. Tuttavia il restante calcestruzzo tra i due elettrodi, che presenta ancora una resistività elevata, contribuisce in modo predominante nel determinare la resistività misurata tra i due elettrodi (i due strati a diversa resistività si trovano in serie tra loro e lo strato asciutto presenta una resistività di circa due ordini di grandezza superiore di quella dello strato bagnato); pertanto non si osservano variazioni sostanziali nelle misure nelle successive 2 ore. Quando l'acqua raggiunge anche l'elettrodo in posizione 2 (dopo 2 ore) la resistività si porta velocemente su valori inferiori a 300 $\Omega \times \text{m}$ che mostrano poi solo una lieve diminuzione nel tempo.

La misura effettuata tra la coppia di elettrodi 3-4 della sonda Av, che si trova ad una profondità tra 24 e 32 mm dalla superficie bagnata, comincia a rilevare la presenza dell'acqua solo dopo circa 4 ore dall'inizio della prova e mostra il completo bagnamento dello strato tra i due elettrodi solo dopo più di 7 ore. Anche per questi elettrodi la resistività passa da circa 100000 $\Omega \times \text{m}$, rilevati in condizioni asciutte, a valori di 200-300 $\Omega \times \text{m}$ in condizioni di calcestruzzo bagnato.

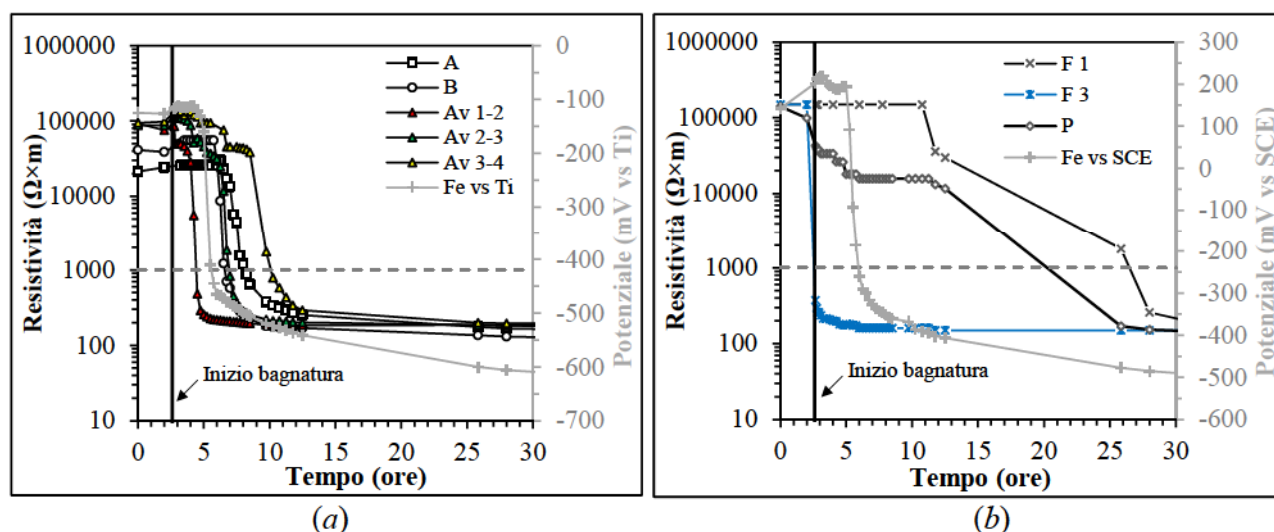


Fig. 3 Andamento nel tempo della resistività del calcestruzzo e del potenziale di corrosione dell'armatura, misurati con le sonde interne (a) e con le sonde esterne (b) sul provino 1C durante un ciclo di bagnatura.

Tra gli elettrodi 2 e 3 la variazione di resistività inizia dopo circa 2 ore, quando l'elettrodo 2 è interessato dal bagnamento, raggiunge i valori di 200-300 $\Omega \times m$ dopo circa 4 ore.

Le sonde *A* e *B*, poste in orizzontale si collocano tra le coppie di elettrodi 2-3 e 3-4 della sonda *Av*. La sonda *B* rileva la presenza dell'acqua poco prima della sonda *A* perché ha gli elementi sensibili di dimensione maggiore (Fig. 1). Quando l'acqua raggiunge la porzione posta più in basso della superficie degli elettrodi, dopo circa 4 ore, si registra la rapida riduzione della resistività, che passa da oltre 50000 $\Omega \times m$ a 200-300 $\Omega \times m$. Questo avviene perché in questo caso lo strato a minore resistività, che si trova nella parte in basso, è in parallelo allo strato a maggiore resistività che si trova nella parte alta e, pertanto, fornisce un contributo preponderante nella resistività rilevata. Anche con la sonda *A*, quando è raggiunta dall'acqua, la resistività si porta sui valori analoghi a quelli misurati con le altre sonde.

Con tutte le sonde di resistività poste sulla superficie esterna del calcestruzzo si misurano circa 100000 $\Omega \times m$ in condizioni asciutte (Fig. 3b). Le misure eseguite con la sonda *F* sulla superficie a contatto con l'acqua (*F3*) si portano a circa 200 $\Omega \times m$ immediatamente dopo la parziale immersione del provino in acqua. La misura con questa sonda esterna, quindi, rileva la resistività solo dello stato più superficiale del calcestruzzo. Le misure di resistività fatte sulla superficie opposta del provino (*F1*), quindi non a contatto con l'acqua, mostrano una riduzione di un ordine di grandezza della resistività solo dopo circa 9 ore dalla parziale immersione in acqua e il transitorio si esaurisce dopo più di 30 ore, raggiungendo valori di resistività analoghi a quelli rilevati sulla superficie opposta. Le piastre (sonda *P*) misurando la resistività dell'intera sezione di calcestruzzo mostrano una riduzione graduale della resistività a causa del continuo incremento dello spessore del provino interessato dalla risalita dell'acqua. Dopo circa 25 ore si raggiungono i valori di 200 $\Omega \times m$ che mostrano che la penetrazione dell'acqua ha interessato l'intero spessore del provino.

Anche il potenziale di corrosione mostra una repentina diminuzione quando l'acqua raggiunge l'armatura (Fig. 3a). Essendo l'armatura a 20 mm dalla superficie immersa, l'acqua la lambisce dopo circa 2.5 ore, dopo aver superato gli elettrodi 1-2 della sonda *Av* e prima che le altre sonde di resistività ne rilevino la presenza. Il potenziale misurato con l'elettrodo interno passa da valori di -100 mV vs Ti a valori inferiori a -450 mV vs Ti; nel tempo il potenziale continua a diminuire, raggiungendo circa -600 mV vs Ti dopo 30 ore. Con l'elettrodo esterno le misure passano da valori di circa 200 mV vs SCE misurati in condizioni asciutte a -300 mV vs SCE; dopo 30 ore il potenziale si è portato a -500 mV vs SCE.

La velocità di corrosione mostra un rapido incremento nell'istante in cui il potenziale diminuisce bruscamente (Fig. 4). La densità di corrente di corrosione passa rapidamente da 0.03 mA/m² a valori superiori a 1 mA/m². Dopo circa 6 ore dalla bagnatura si superano velocità di corrosione di 10 mA/m².

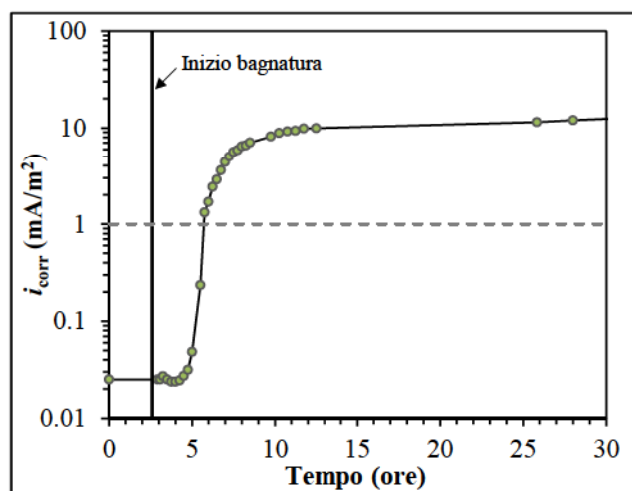


Fig. 4 Andamento nel tempo della velocità di corrosione dell'armatura misurata sul provino 1C durante un ciclo di bagnatura.

Durante il ciclo di asciugatura (Fig. 5 e 6), realizzato mantenendo il provino a 20°C ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) e 30% U.R. ($\pm 5\%$), le variazioni di resistività del calcestruzzo e di velocità di corrosione sono molto più lente (giorni) rispetto a quelle rilevate in bagnatura (ore) e mostrano un andamento parabolico nel tempo. Prima di iniziare un ciclo di asciugatura i provini sono stati tenuti immersi in acqua per 3 giorni; le resistività misurate con le diverse sonde si sono portate su valori di $100\text{--}200\ \Omega\times\text{m}$.

Le misure di resistività effettuate con le sonde esterne (Fig. 5b) mostrano che già dopo 2 giorni dall'inizio dell'asciugatura si superano $1000\ \Omega\times\text{m}$ e dopo circa 15 giorni si arrivano a misurare con la sonda *F*, da entrambe le superfici, circa $100000\ \Omega\times\text{m}$, valori analoghi a quelli rilevati prima della bagnatura. Come analizzato in precedenza, la misura effettuata con questa sonda individua le condizioni della superficie del calcestruzzo che tende ad asciugarsi più facilmente rispetto alla parte interna del provino. Con la sonda *P*, che misura l'intera sezione del provino, l'asciugatura risulta più lenta e i valori di $100000\ \Omega\times\text{m}$ si raggiungono solo dopo più di 30 giorni. Come osservato in fase di bagnatura, anche nel ciclo di asciugatura si evidenzia come il contributo degli strati superficiali asciutti, e quindi con elevata resistività, risulti rilevante nel determinare il valore di resistività misurato con la sonda *P*.

L'aumento della resistività, legato all'asciugatura, rilevato con le sonde poste all'interno del provino risulta molto più lento rispetto a quello misurato con le sonde esterne (Fig. 5a); per raggiungere i valori misurati prima della bagnatura sono stati necessari più di 40 giorni di esposizione in laboratorio.

Gli elementi sensibili più esterni della sonda *Av* (*Av* 1-2) sono quelli che evidenziano per primi la variazione di resistività; dopo circa 3 giorni di asciugatura si superano $1000\ \Omega\times\text{m}$. Le altre coppie di elettrodi, *Av* 2-3 e *Av* 3-4 poste a maggiore profondità, superano questo valore rispettivamente solo dopo 4 e 5 giorni. La sonda *A*, che si trova in mezzzeria al provino, è quella che manifesta un più lento incremento della resistività; valori di $1000\ \Omega\times\text{m}$ si raggiungono dopo 9 giorni dall'esposizione a 30% U.R.

Anche il potenziale di corrosione (Fig. 5) e la velocità di corrosione (Fig. 6) evidenziano una variazione graduale nei valori misurati nel tempo e sono necessari più di 40 giorni di asciugatura per ottenere valori analoghi a quelli rilevati prima della bagnatura. Le velocità di corrosione, pari a $20\ \text{mA}/\text{m}^2$ in condizioni di calcestruzzo bagnato, diventano trascurabili (inferiori a $1\ \text{mA}/\text{m}^2$) dopo circa 8 giorni dall'inizio del ciclo di asciugatura, quando, come osservato con le misure di resistività ottenute con le sonde interne, si è cominciato ad asciugare il calcestruzzo che circonda l'armatura.

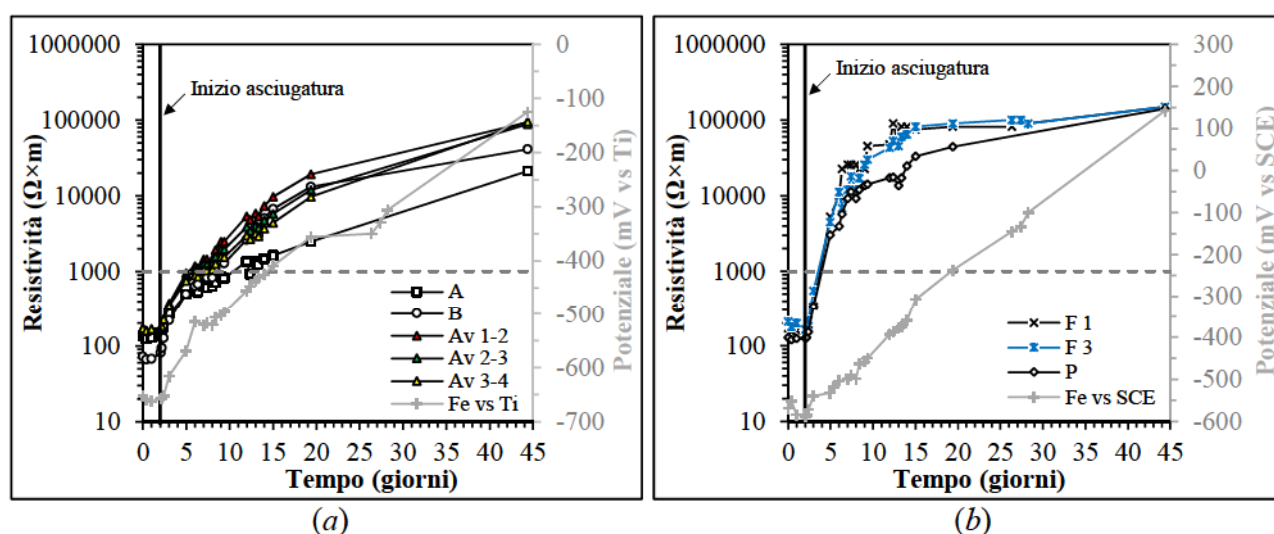


Fig. 5 Andamento nel tempo della resistività del calcestruzzo e del potenziale di corrosione dell'armatura, misurati con le sonde interne (a) e con le sonde esterne (b) sul provino 1C durante un ciclo di asciugatura.

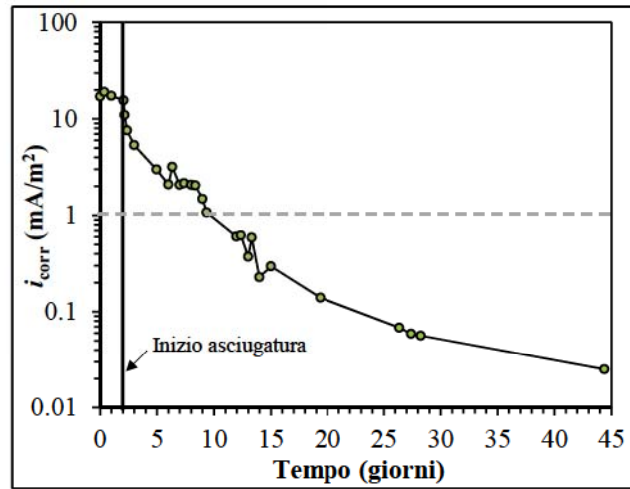


Fig. 6 Andamento nel tempo della velocità di corrosione dell'armatura misurata sul provino 1C durante un ciclo di asciugatura.

In Fig. 7a sono riportati i valori di resistività del calcestruzzo, rilevati con i diversi tipi di sonde, e le velocità di corrosione misurate nel medesimo istante durante i due cicli di asciugatura effettuati sui provini 1C e 3C. Si osserva che la posizione degli elettrodi delle sonde, interne o esterne al calcestruzzo, ha rilevanti conseguenze sulla correlazione tra resistività del calcestruzzo e velocità di corrosione.

Le misure di resistività effettuate con gli elettrodi delle sonde posti ad una profondità prossima a quella a cui si trova l'armatura (elettrodi delle sonde *A* e *B* ed elettrodi 2-3 e 3-4 della sonda *Av*) mostrano una buona correlazione con le misure di velocità di corrosione delle armature. Le sonde interne, infatti, hanno mostrato di rilevare efficacemente le variazioni di umidità nel calcestruzzo in prossimità alle armature, responsabili delle variazioni nelle condizioni di corrosione. Si misurano velocità di corrosione non più trascurabili ($>1-2 \text{ mA/m}^2$) quando la resistività del calcestruzzo è inferiore a $1000 \Omega \times \text{m}$, in accordo con quanto riportato in letteratura [1].

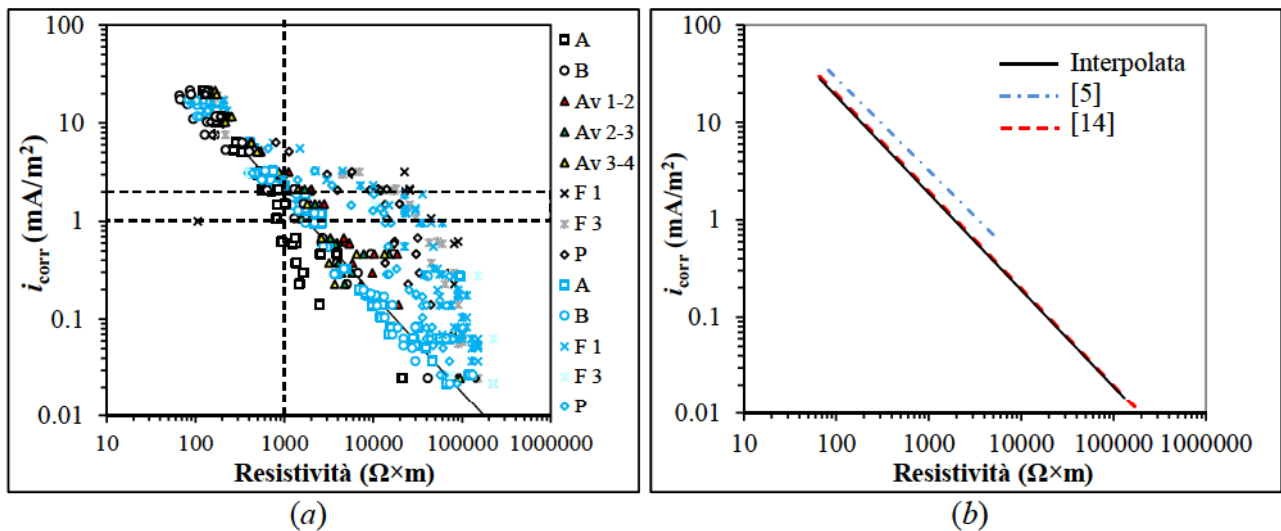


Fig. 7 Resistività del calcestruzzo, misurata con sonde esterne ed interne, e velocità di corrosione rilevate, nel medesimo istante, durante i cicli di asciugatura (a) e confronto tra la curva ottenuta interpolando i dati sperimentali, riferiti alle misure di resistività ottenute con le sonde poste in prossimità all'armatura, e dati di letteratura (b). (la curva del rif [14] è stata ottenuta in base all'equazione $V^d = \alpha^c \times F_{cl}^c \times \gamma_v \times m_o / \rho^c$; con V^d = velocità di corrosione, ρ^c = resistività del calcestruzzo, $\alpha^c = 2$, $F_{cl}^c = 1$, $\gamma_v = 1.3$ e $m_o = 882 [\Omega \times \text{m} \times \mu\text{m}/\text{anno}]$)

La curva che interpola questi dati (Fig 7a) è in accordo con le correlazioni tra resistività e velocità di corrosione, riferite a un calcestruzzo carbonatato, che si trovano in letteratura (Fig. 7b) [5,14]. Nell'interpolazione non si sono considerati le misure di resistività rilevate tra gli elettrodi 1-2 della sonda *Av* che identificano condizioni relative ad una porzione di calcestruzzo posta ad una minore profondità rispetto all'armatura.

Le misure di resistività effettuate con le sonde esterne, essendo influenzate dalla più rapida asciugatura degli strati superficiali del calcestruzzo, mostrano, invece, di rilevare valori di resistività molto elevati anche quando le armature si trovano ancora in calcestruzzo umido e presentano quindi velocità di corrosione non trascurabili. Le differenze più rilevanti si riscontrano con le misure ottenute con la sonda *F* che è la tipologia di sonda utilizzata in genere per svolgere misure di resistività sulla superficie del calcestruzzo durante le ispezioni in campo su strutture reali. Si sono rilevate resistività anche superiori a $20000 \Omega \times m$ con velocità di corrosione superiori a 2 mA/m^2 .

Quando il calcestruzzo è soggetto a bagnatura si è osservato che le variazioni dei valori misurati di resistività e velocità di corrosione sono molto rapide. Le velocità di corrosione passano da valori trascurabili ($< 0.1 \text{ mA/m}^2$) a valori superiori a $1\text{-}2 \text{ mA/m}^2$ in 1 ora, dal momento in cui l'acqua inizia a interessare la superficie dell'armatura (Fig. 4). Le differenze tra la posizione delle armature e quella degli elettrodi delle sonde, tra cui si sono fatte le misure resistività, portano ad avere la variazione nelle misure in tempi differenti, in relazione ai diversi tempi in cui l'acqua ha raggiunto le diverse profondità. Questo comporta una difficile correlazione tra i valori di resistività e di velocità di corrosione (Fig. 8).

Si osserva che le misure effettuate con la sonda *F3* e gli elettrodi 1-2 della sonda *Av*, che risentono prima della bagnatura, mostrano una riduzione della resistività, con valori inferiori a $300 \Omega \times m$, anche quando le armature presentano ancora velocità di corrosione trascurabili. Viceversa, con le altre sonde di resistività, che sono raggiunte dall'acqua successivamente rispetto alle armature, si continuano a rilevare resistività elevate, in genere superiori a $10000 \Omega \times m$ (caratteristiche di un calcestruzzo asciutto), anche quando sulle armature si misurano velocità di corrosione superiori a 2 mA/m^2 .

Si ottiene una buona correlazione tra resistività e velocità di corrosione solo quando l'acqua ha raggiunto sia le sonde, sia l'armatura (resistività inferiori a $200 \Omega \times m$ con velocità di corrosione superiori a 10 mA/m^2). Anche durante il ciclo di bagnatura le misure di resistività rilevate con le sonde esterne forniscono valori che si discostano maggiormente dalle condizioni presenti a livello delle armature.

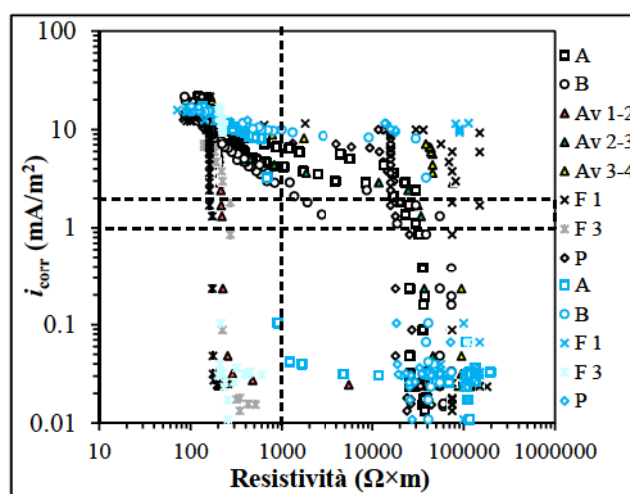


Fig. 8 Resistività del calcestruzzo, misurata con sonde esterne ed interne, e velocità di corrosione rilevate, nel medesimo istante, durante i cicli di bagnatura; confronto con la curva ottenuta interpolando i dati sperimentali, riferiti alle misure di resistività ottenute con le sonde poste in prossimità all'armatura durante i cicli di asciugatura.

Una misura di resistività effettuata sulla superficie esterna del calcestruzzo, pertanto, può sottostimare o sovrastimare considerevolmente la velocità di corrosione se il copriferro non si trova in condizioni omogenee di umidità. In una struttura reale queste condizioni non sono frequenti; una misura di resistività realizzata sulla superficie esterna del calcestruzzo può quindi portare ad una stima errata della velocità di corrosione delle armature.

Conclusioni

I risultati ottenuti con le prove sperimentali hanno mostrato che per ottenere una corretta stima della velocità di corrosione delle armature in calcestruzzo carbonatato attraverso la misura della resistività elettrica del calcestruzzo è necessario che questa misura sia eseguita alla stessa profondità delle armature.

Le misure acquisite durante i cicli di asciugatura, che avviene lentamente nel tempo, mostrano una buona correlazione tra le resistività ottenute con le sonde interne poste in prossimità alle armature e le misure di velocità di corrosione.

La correlazione tra queste grandezze nei cicli di bagnatura è stata rilevata solo quando l'acqua ha raggiunto sia le sonde interne sia le armature; la penetrazione dell'acqua, tuttavia, avviene molto rapidamente e quindi queste condizioni si raggiungono in tempi brevi; il tempo in cui si misurano valori in disaccordo è pertanto molto breve e diminuisce più la misura di resistività è fatta in prossimità del copriferro.

Misure di resistività realizzate sulla superficie esterna del calcestruzzo possono fornire una valida stima della velocità di corrosione delle armature solo nel caso in cui il calcestruzzo presenti in tutto il copriferro una resistività uniforme. Tuttavia non è facile che questa condizione si verifichi in una struttura reale esposta in ambiente esterno, pertanto le misure svolte sulla superficie del calcestruzzo possono sovrastimare o sottostimare le condizioni di corrosione delle armature.

Ringraziamenti

Si ringrazia il Comune di Milano per il supporto finanziario alla ricerca svolta nell'ambito delle attività di "Monitoraggio calcestruzzo e corrosione travi metalliche", previste nell'ambito della "Convenzione tra il Comune di Milano ed il Politecnico di Milano per l'attivazione di un sistema di monitoraggio strutturale permanente e per l'effettuazione dell'analisi modale dello stadio G. Meazza – 4^a parte di attività".

Riferimenti bibliografici

- [1] L. BERTOLINI, B. ELSENER, P. PEDEFERRI, E. REDAELLI, R. POLDER, Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair - 2nd edition, Wiley VCH, Weinheim, (2013).
- [2] R. POLDER, W. H. A. PEELLEN, M. RAUPACH, K. REICHLING, Materials and Corrosion, Vol. 64 (2013), no. 2, page 105.
- [3] C. ANDRADE, C. ALONSO, Construction and Building Materials, Vol. 10 (1996), no.5, page 315.
- [4] L. BERTOLINI, R. POLDER, Concrete resistivity and reinforcement corrosion rate as a function of temperature and humidity of the environment, TNO Report – TNO Building and Construction Research, 97-BT-R0574 (1997).
- [5] C. ALONSO, C. ANDRADE, J. GONZALEZ, Cement and Concrete research, Vol. 18 (1988), no. 5, page 687.
- [6] J. GULIKERS, Materials and Corrosion, Vol. 56 (2005), no. 6, page 393.
- [7] K. HORNBOSTEL, C. K. LARSEN, M. R. GEIKER, Cement & Concrete Composites, Vol. 39 (2013), page 60.
- [8] M. CASTELLOTE, C. ANDRADE, C. ALONSO, ACI Materials journal, Vol. 99 (2002), no. 2, page 119.

- [9] T.M. CHRISP, G. STARRS, W.J. MC CARTER, E.H. OWENS, S.V. NANUKUTTAN, Developments in intelligent monitoring of concrete structures, Dublin institute of Technology, Conference Papers (2010).
- [10] O. SENGUL, Construction and Building Materials, Vol. 73 (2014), page 434.
- [11] R. POLDER, Construction and Building Materials, Vol. 15 (2001), page 125.
- [12] U. ANGST, B. ELSENER, ACI Materials Journal, Vol. 111 (2014), no. 1-6, page 1-11.
- [13] S.G. MILLARD, K.R. GOWERS, Resistivity assessment of in-situ concrete: the influence of conductive and resistive surface layers, Proc. Instn. Civ. Engrs. Structs. and Bldgs, Paper 9876, Vol. 94 (1992), page 389.
- [14] DURACRETE, Probabilistic performance based durability design of concrete structures, Final technical report, The European Union, Brite EuRam III (2000).

I testi di questo Cd-Rom sono stati pubblicati riproducendo la versione originale trasmessa dagli Autori.

ISBN: 978-88-98990-04-7

Copyright © 2015 Associazione Italiana di Metallurgia

Tutti i diritti sono riservati. Questa pubblicazione, né qualunque parte della stessa, può essere riprodotta in nessuna forma senza l'autorizzazione scritta dell'Associazione Italiana di Metallurgia.

L'Associazione Italiana di Metallurgia non è da ritenersi responsabile per le affermazioni e le opinioni espresse in questa pubblicazione.

Proprietà letteraria riservata



**ASSOCIAZIONE
ITALIANA
DI METALLURGIA**

I – 20121 Milano
Piazzale Rodolfo Morandi, 2
tel. 02/76397770 – 02/76021132
fax. 02/76020551
e-mail: info@aimnet.it
www.aimnet.it