

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Edile - Architettura

Corso di Laurea in
Ingegneria dei Sistemi Edilizi



***Valutazione del tenore critico di cloruri di armature
in acciaio inossidabile***

Relatore: Prof. Luca BERTOLINI

Correlatore: Ing. Matteo GASTALDI

Tesi di Laurea di:

Anna Maria KOSICKA Matr. 801868

Anna SCHINELLI Matr. 801792

Anno Accademico 2013- 2014

INDICE

INTRODUZIONE	pag. 3
CAPITOLO 1: ARMATURE IN ACCIAIO INOSSIDABILE PER STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO	pag. 5
1.1 Tipologie di acciai inossidabili	pag. 6
1.2 La corrosione	pag. 7
1.2.1 Comportamento a corrosione degli acciai inossidabili	pag. 9
1.2.2 Prove di corrosione	pag. 11
1.3 Fattori di influenza del tenore critico di cloruri	pag. 13
1.3.1 Tenore critico per gli acciai inossidabili	pag. 13
1.4 Progettazione per la durabilità con armature in acciaio inossidabile	pag. 16
1.4.1 Approccio prestazionale	pag. 17
1.5 Considerazioni economiche	pag. 18
CAPITOLO 2: METODOLOGIA SPERIMENTALE	pag. 21
2.1 Materiali	pag. 21
2.2 Provini e modalità di preparazione	pag. 24
2.3 Prove	pag. 26
2.3.1 Prova di polarizzazione potenziostatica anodica	pag. 26
2.3.2 Prova di ponding	pag. 29
2.3.3 Corrosione libera	pag. 29
2.3.4 Analisi del contenuto di cloruri	pag. 31
CAPITOLO 3: RISULTATI	pag. 33
3.1 Resistenza a compressione del calcestruzzo	pag. 33
3.2 Prove di polarizzazione potenziostatica anodica	pag. 35
3.2.1 Prove di 24 h	pag. 35
3.2.2 Prove di 6 giorni e di 13 giorni	pag. 27
3.2.3 Osservazioni visive svolte su campioni delle prove precedenti	Pag. 70
3.3 Prova di ponding	pag. 78
3.4 Prove di corrosione libera	pag. 82
CAPITOLO 4: DISCUSSIONE DEI RISULTATI	pag. 89
4.1 Comportamento a corrosione dei diversi tipi di acciaio inossidabile	pag. 90

4.2	Analisi dei micropit	pag. 93
4.3	Stima del tenore critico di cloruri per i diversi tipi di acciaio inossidabili.	pag. 98
CONCLUSIONI		pag. 101
BIBLIOGRAFIA		pag. 103

Introduzione

Dalla fine degli anni '70 la necessità di garantire una vita di servizio delle strutture in calcestruzzo armato, almeno pari alla durata di tempo prevista già in fase di progettazione, ha assunto sempre maggiore rilevanza. Difatti, nonostante fino ad allora si ritenessero tali strutture immuni al degrado, i numerosi casi di degrado rilevati, hanno mostrato come la comprensione del processo che porta a corrosione è di fondamentale importanza per la prevenzione dei rischi e delle conseguenze che ne possono derivare in termini sia di sicurezza sia economici.

Le tradizionali strutture in calcestruzzo armato sono soggette a deterioramento soprattutto quando sono esposte ad ambienti contaminati da cloruri e/o a causa della carbonatazione. Il degrado dovuto alla corrosione delle armature in acciaio al carbonio, i costi degli interventi di manutenzione e i problemi di sicurezza che ne derivano, hanno portato allo studio di tecniche di prevenzione per garantire la vita di servizio attesa.

La prevenzione alla corrosione di un'opera si ottiene attraverso una corretta progettazione strutturale iniziale e una scelta accurata dei materiali in base alle loro proprietà, intese sia singolarmente sia in relazione agli elementi contigui; si sviluppa poi con la messa in opera dei costituenti della struttura e termina con gli interventi programmati di ispezione e manutenzione del manufatto edilizio nell'arco della sua vita. [1] A questo scopo sono stati introdotti nel settore delle costruzioni dei codici e normative a livello europeo che forniscono ai progettisti delle linee guida per la realizzazione di opere durevoli, in forma di prescrizioni per gli impasti del calcestruzzo, i rapporti a/c e gli spessori minimi di copriferro in funzione delle classi di esposizione. Tuttavia, nel caso in cui siano richieste vite di servizio particolarmente lunghe o si realizzino strutture in ambienti molto aggressivi, è necessario ricorrere a specifiche misure supplementari di prevenzione.

Una sostituzione parziale o totale delle armature in acciaio al carbonio con barre in acciaio inossidabile può rappresentare una scelta efficace per garantire il requisito di durabilità per strutture in calcestruzzo armato, in particolare in ambienti fortemente inquinati da cloruri. Attualmente, i costi legati alla manutenzione e riparazione di edifici in calcestruzzo con armature in carbonio non sono indifferenti per cui l'utilizzo di acciai più resistenti porterebbe a significativi vantaggi in termini di costi di manutenzione della vita di servizio di una

struttura. Tuttavia l'elevato prezzo sul mercato degli acciai inossidabili contribuisce spesso a limitarne l'utilizzo.

Negli ultimi anni sono stati proposti in commercio nuovi tipi di acciai inossidabili a basso contenuto di nichel per ridurre i costi. Tuttavia le informazioni disponibili riguardo la loro resistenza a corrosione nel calcestruzzo sono limitate o insufficienti. Il presente lavoro di tesi fa parte di una attività di ricerca svolta presso il Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica Giulio Natta del Politecnico di Milano, volta allo studio di una metodologia di prova per stimare il tenore critico di cloruri da impiegare nei modelli di progettazione prestazionale per la durabilità.

In questa tesi si è proseguito il lavoro già avviato in precedenti lavori [20,21] e si è indagato il comportamento a corrosione di armature in diversi tipi di acciai inossidabili in diverse condizioni di temperatura.

In particolare, si sono analizzate le condizioni di innesco e propagazione dell'attacco causato dai cloruri, valutandone il tenore critico.

Nel primo capitolo verrà descritto il comportamento a corrosione delle armature in acciaio inossidabile in calcestruzzo alcalino e introdotto il tenore critico di cloruri. Sarà quindi descritta la metodologia di prova utilizzata nelle prove sperimentali e si mostreranno i risultati ottenuti che hanno richiesto un'indagine ulteriore; difatti, sono stati osservati piccoli inneschi di corrosione di dimensioni inferiori al mezzo millimetro, da noi definiti *micro-pit*, diffusi su barre risultate passive al termine della prova di polarizzazione potenziostatica. Infine, verranno discussi e confrontati gli esiti delle prove in modo da valutare l'influenza dei diversi parametri sulla stima del tenore critico.

Capitolo 1

Armature in acciaio inossidabile per strutture in calcestruzzo armato

Le tipologie di acciai inossidabili per armature disponibili sul mercato sono caratterizzati da composizioni chimiche, microstrutture e condizioni superficiali differenti. Il tenore critico di cloruri per l'innescò della corrosione è il parametro fondamentale per scegliere adeguatamente l'acciaio che meglio risponde alla durabilità richiesta per una struttura in calcestruzzo armato. Nel seguente paragrafo si illustrano i principali tipi di acciaio inossidabile utilizzati come barre di armatura e il loro comportamento a corrosione. Si descrive successivamente l'approccio prestazionale per la progettazione delle strutture in calcestruzzo armato che valuta l'effettivo comportamento dei materiali utilizzati per garantire la vita di servizio attesa. Infine si discute riguardo l'aspetto economico e, in particolare, si fanno considerazioni a proposito del costo iniziale del materiale e i costi di manutenzione, mettendo a confronto l'acciaio al carbonio tradizionale e l'acciaio inossidabile.

1.1 Tipologie di acciai inossidabili

Gli acciai inossidabili presentano una resistenza a corrosione significativamente superiore rispetto a quella degli acciai al carbonio, grazie agli elementi di lega in essi contenuti [2]. In essi, il cromo deve essere presente in quantità $\geq 10,5\%$ [3] in modo da consentire la formazione in superficie di un film di passività che garantisca la resistenza a corrosione, specialmente in ambienti aggressivi. Per migliorare la stabilità del film di passività possono essere aggiunti altri elementi di lega come il Ni, Mo e N, i quali determinano anche la microstruttura dell'acciaio e le sue caratteristiche fisiche e meccaniche (*Figura 1.1*). A seconda che essi siano ferritizzanti, come il Cr, Mo, Si, Al, Nb, oppure austenitizzanti, come Ni, C, Mn, N, Cu, gli acciai inossidabili possono assumere una microstruttura austenitica, ferritica, martensitica o duplex (austeno-ferritici) [4].

A differenza degli acciai al carbonio e degli inossidabili ferritici, *gli acciai austenitici* hanno dilatazione termica maggiore ($16-17 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ invece di $10-11 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), una conducibilità termica minore e una permeabilità magnetica molto bassa; inoltre sono caratterizzati da un potenziale di pitting più alto delle armature al carbonio e necessitano di una quantità di cloruri maggiore per depassivarle [4].

Quando invece si richiede maggiore resistenza meccanica a fronte di una minore duttilità e minore resistenza a corrosione si possono impiegare acciai a strutture martensitica o ferritica, caratterizzati da proprietà differenti.

In particolare *gli acciai martensitici* contengono un'elevata quantità di carbonio e una percentuale di cromo circa del 13%. Essi possono raggiungere resistenze superiori ai 1000 MPa e sono in grado di passivarsi in ambienti non aggressivi.

Gli acciai a struttura *ferritica* hanno invece un basso contenuto di carbonio ma una percentuale di cromo maggiore del 13%. Gli acciai più diffusi di questa famiglia raggiungono una percentuale di Cr del 17%. In confronto agli acciai austenitici, mostrano resistenza a trazione maggiore e una minore duttilità a temperatura ambiente ma soprattutto minore resistenza a corrosione.

Gli acciai duplex austenoferritici mostrano una struttura bifasica di austenite e ferrite. Questa combinazione permette di ottenere buone caratteristiche meccaniche grazie alla struttura ferritica e una resistenza a corrosione dovuta alla struttura austenitica.

Per le strutture in calcestruzzo armato in genere i principali tipi di armature utilizzate sono quelle di *Tabella 1.1*.

Tradizionalmente si sono impiegati come barre d'armatura per calcestruzzo armato acciai austenitici 304 L, 316 L e duplex 22-05.

Tabella 1.1 Composizione chimica approssimata e designazione dei principali tipi di acciaio inossidabile disponibili in commercio come barre d'armatura. [5,6]

Tipo	Designazione AISI	EN 10088-1	Microstruttura	Principali elementi di lega (%in massa)			
				Cr	Ni	Mo	Altri elementi
304L	304L	1.4307	Austenitica	17.5-19.5	8-10	-	-
316L	316L	1.4404	Austenitica	16.5-18.5	10.13	2-2.5	-
22-05	318	1.4462	Duplex	21-23	4.5-6.5	2.5-3.5	0.1-0.22 N
23-04	-	1.4362	Duplex	22-24	3.5-5.5		0.05-0.2 N
21-01	-	1.4162	Duplex	21-22	1.4-1.7		4-6 Mn 0.2-0.25 N
XM-28	-	-	Austenitico al manganese	16.5-19	0.5-2.5	0.5 max	11-14 Mn 0.2-0.45 N

Negli ultimi anni le forti variazioni dei prezzi di mercato delle materie prime che compongono questi acciai, in particolare il Nichel, hanno spinto diversi produttori a proporre nuovi acciai a basso contenuto di Nichel e Molibdeno tra cui l'acciaio 23-04 e il 21-01 [7].

1.2 La corrosione nel calcestruzzo

La corrosione avviene attraverso un processo elettrochimico che nel tempo porta a un consumo del materiale. Questo processo si verifica in sintesi con il manifestarsi di una *reazione anodica* di ossidazione del metallo, che porta alla formazione di prodotti di corrosione, e una *reazione catodica*, generalmente di riduzione dell'ossigeno, in cui vengono consumati gli elettroni prodotti dal processo anodico.

Affinché un metallo si corroda deve trovarsi a contatto con un elettrolita che consenta il trasporto di corrente.

I principi della termodinamica permettono di studiare le condizioni nelle quali una reazione può avvenire in una certa direzione e quindi fornire informazioni riguardo la possibilità che un metallo si corroda o meno in un determinato ambiente. A questo scopo si introduce il parametro del *potenziale di equilibrio* dei processi anodico e catodico, misurato attraverso un voltmetro e un elettrodo di riferimento al calomelano saturo (SCE). Alcuni materiali metallici in determinati ambienti si ricoprono di ossidi protettivi spontanei definiti *film di passività*, che rendono trascurabile la velocità di corrosione. La sua formazione può essere dovuta alla separazione di prodotti di corrosione, in forma di patine o strati spessi, in genere dopo tempi molto lunghi di esposizione all'ambiente (es. il rame quando esposto all'atmosfera) oppure in forma di film sottili, spessi da 1÷10 nm e generati in tempi molto brevi (come nel caso degli acciai inossidabili) [4]. I metalli in grado di passivarsi mostrano una curva di polarizzazione con il tipico andamento mostrato in *Figura 1.1*. In un tratto iniziale il metallo ha comportamento attivo. Successivamente, quando il potenziale raggiunge valori tali per cui si forma il film di passività, la corrente e quindi la velocità di dissoluzione del

metallo si riducono diventando trascurabili. Qui si raggiungono quindi i valori di passività per cui la corrente i_p rimane costante nel tratto di potenziale tra E_p ed E_{tr} . Solo al di sopra del potenziale di transpassività la corrente può crescere ulteriormente.

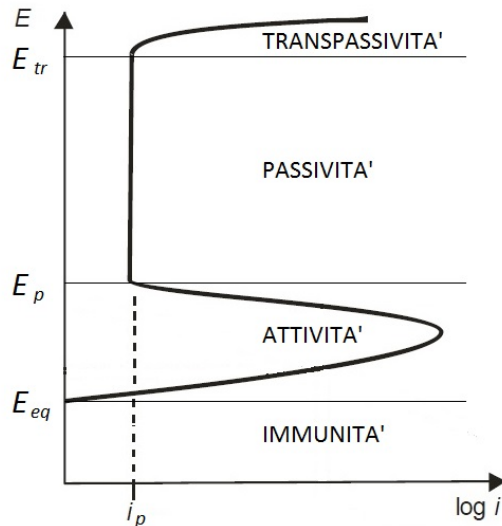


Figura 1.1 Curva di polarizzazione di un materiale a comportamento attivo-passivo [4].

Il comportamento dell'acciaio al carbonio in funzione del potenziale e delle concentrazioni di cloruri è stato studiato e riassunto nel diagramma sperimentale denominato "diagramma di Pedeferrì" (Figura 1.2), nel quale è possibile individuare 4 zone.

- Nel dominio A la corrosione può innescarsi e propagare stabilmente, con un limite inferiore definito dal potenziale di pitting (E_{pit}).
- Il dominio B è il campo della passività imperfetta dove si possono osservare due possibili comportamenti dell'acciaio: se il metallo è in stato passivo rimane tale anche in questo campo, se invece la corrosione si è innescata, questa può propagare.
- La regione C dà le condizioni che non consentono né l'innescò né la propagazione dei pit, ovvero la passività perfetta.

Sulla curva che separa i campi A e B si legge per ogni potenziale il tenore critico di cloruri. Si può osservare come questo aumenti al diminuire del potenziale. Se si considera che la struttura è esposta in atmosfera, il potenziale delle armature può raggiungere valori pari a circa 0 mV vs SCE e dunque l'innescò della corrosione avviene a circa 0,3% di cloruri in massa rispetto al cemento. Invece, per una struttura immersa, il potenziale raggiunge valori anche inferiori a -400 mV vs SCE (a causa del ridotto apporto di ossigeno a livello delle armature) e il tenore critico di cloruri risulta quindi superiore al 2%. Per questa ragione raramente s'innescò la corrosione per pitting nelle armature di strutture totalmente immerse in acqua marina; inoltre, a causa del modesto apporto di ossigeno, la corrosione non propaga [4,8].

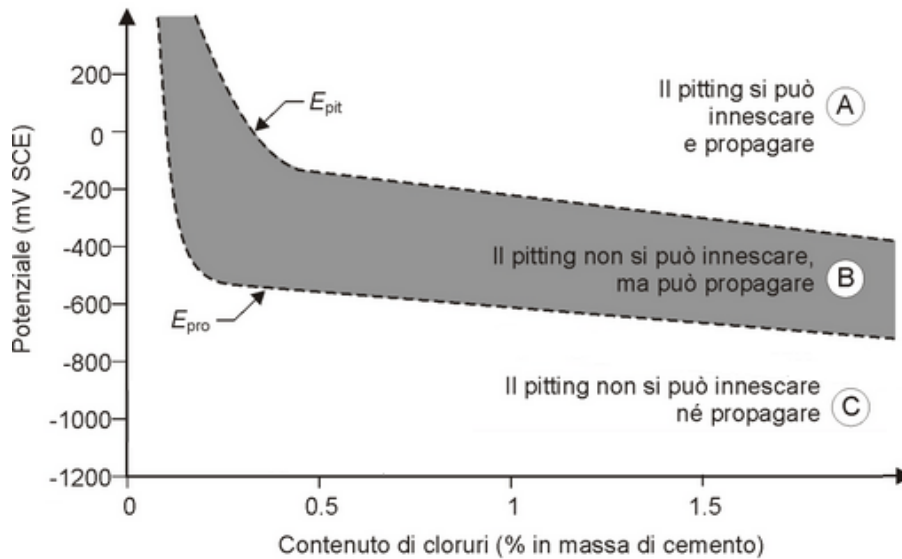


Figura 1.2 condizioni di corrosione e di protezione delle armature nel calcestruzzo in funzione del potenziale e del tenore di cloruri [8].

1.2.1 Comportamento a corrosione degli acciai inossidabili

Negli acciai inossidabili, il cromo ha un ruolo fondamentale nel determinare la resistenza a corrosione. Questo elemento, infatti, rende il film protettivo, composto da ossido di cromo, maggiormente stabile in un campo di condizioni ambientali molto più ampio di quanto non sia quello in cui risulta stabile l'ossido di ferro degli acciai al carbonio. Tale caratteristica permette agli acciai inossidabili di operare in intervalli di pH, tenore di cloruri e di potenziale molto più ampi di quelli in cui risultano passive le armature tradizionali al carbonio.

Oltre al cromo, in *Figura 1.3*, si può osservare come, con i diversi elementi di lega, sia possibile diminuire la densità di corrente di passività (i_p) e soprattutto la corrente critica di passivazione (i_{cp}); è inoltre possibile allargare il campo di potenziali di passività, diminuendo il potenziale di passivazione (E_p) e aumentando il potenziale di pitting (E_{pitt}).

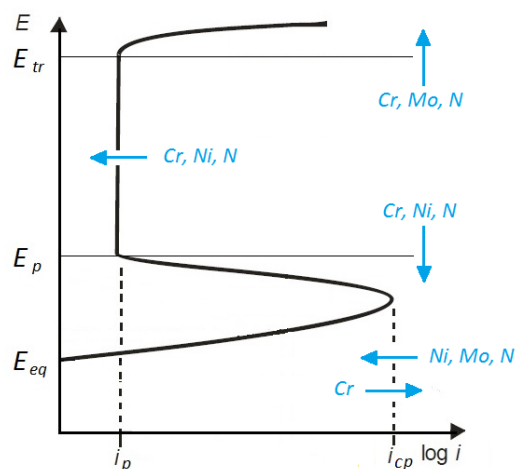


Figura 1.3 Effetto di alcuni elementi di lega sulla curva di polarizzazione anodica degli acciai inossidabili [4].

Nonostante l'instaurarsi delle condizioni di passività che rendono trascurabile la velocità di corrosione, l'efficacia del film può venire meno quando l'acciaio è soggetto ad alcune forme di corrosione che possono essere *generalizzate* o *localizzate*. In particolare, mentre le prime interessano una superficie vasta del metallo, le seconde sono molto insidiose e spesso gli effetti della corrosione non sono visibili esternamente. La zona depassivata corrodendosi si comporta da anodo mentre nelle zone circostanti il metallo risulta ancora passivo e si comporta da catodo. Nella zona anodica si ha una riduzione di pH causato dalla reazione (acidificante), per cui all'interno del pit si crea un ambiente sempre più aggressivo dove la velocità dell'attacco può risultare anche superiore a 1 mm/anno.

In ambiente contenente cloruri, il tratto passivo non termina in corrispondenza della zona di transpassività ma è limitato superiormente da un potenziale di pitting (E_{pit}), in corrispondenza del quale avviene la rottura localizzata del film passivo. Quando il metallo si porta a un potenziale superiore del potenziale di pitting avviene l'inesco (Figura 1.4). La formazione di questi attacchi è favorita dall'aumento di temperatura e dalla presenza di zone della superficie più difficilmente raggiungibili dall'ossigeno, quali quelle schermate da prodotti di corrosione o da polveri o dalla presenza di interstizi [4].

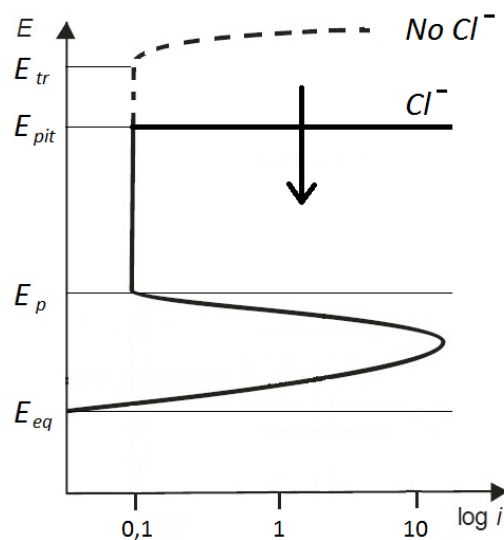


Figura 1.4 Curva di polarizzazione di un materiale attivo-passivo in un ambiente con cloruri.

Per valutare la resistenza alla corrosione localizzata di un acciaio inossidabile, sono stati proposti indici empirici che esprimono una somma pesata degli elementi di lega Cr, Mo e Ni. In soluzioni acide o neutre è stato introdotto il coefficiente o indice di pitting (PREN =Pitting Resistance Equivalence Number) il cui valore si ottiene da:

$$PREN = \%Cr + 3,3\%Mo + 16\%N \text{ (per gli acciai austenitici)}$$

$$PREN = \%Cr + 3,3\%Mo + 30\%N \text{ (per gli acciai duplex)}$$

La presenza di moltiplicatori maggiori dell'unità evidenzia come il molibdeno e l'azoto accrescono la resistenza del film protettivo ottenuto dagli ossidi del cromo. In particolare, nel caso degli acciai di tipo duplex anche piccole percentuali di azoto permettono di raggiungere valori di PREN elevati; infatti il moltiplicatore dell'azoto per questi acciai è notevolmente superiore rispetto a quello degli acciai austenitici.

Nell'ambiente alcalino, tipico del calcestruzzo, l'indice PREN perde la sua validità. È stato infatti osservato che in soluzioni alcaline il molibdeno ha una bassa influenza sulla resistenza a corrosione localizzata e il nichel contribuisce in modo positivo alla resistenza a corrosione delle barre austenitiche.

A causa della molteplicità di fattori che determinano la corrosione da pitting e la natura stocastica del fenomeno, il tenore critico può essere determinato solo in termini probabilistici. Per ogni tipologia di acciaio inossidabile andrebbe valutato il tenore limite di cloruri che porta a corrosione ma questo comporta la conoscenza di un elevato numero di dati non ancora disponibili in letteratura.

Ad oggi non esistono metodi standardizzati e procedure di laboratorio disponibili per la valutazione della concentrazione dei cloruri per l'insorgenza della corrosione, per cui le informazioni disponibili sono spesso il risultato di prove differenti e quindi difficilmente confrontabili. In generale tutte le prove sperimentali di laboratorio per la determinazione della concentrazione limite di cloruri per il principio di corrosione sono legate all'individuazione del momento in cui avviene la depassivazione

1.2.2 Prove di corrosione

Per conoscere gli effetti dell'ambiente sui materiali, si possono svolgere prove accelerate in laboratorio, modificando parametri ambientali quali umidità, temperatura, concentrazione agenti aggressivi [...] per apprezzarne i risultati in tempi brevi. In particolare si possono svolgere prove che misurino i parametri legati direttamente allo svolgimento del processo produttivo come la misura del *potenziale di corrosione* e le *prove di polarizzazione* [4].

Misura del potenziale

Come anticipato in §1.2, la misura del potenziale consiste nella rivelazione del potenziale a cui si trova il metallo, attraverso l'utilizzo di un elettrodo di riferimento. L'elemento metallico di cui si vuole misurare il potenziale viene collegato al polo positivo di un voltmetro ad alta impedenza, mentre l'elettrodo si collega al polo negativo; il circuito si chiude attraverso l'ambiente. La tensione letta dal voltmetro rappresenta il potenziale del metallo rispetto all'elettrodo di riferimento. Spesso per le prove in laboratorio si utilizza il riferimento al calomelano saturo (SCE), costituito da un contenitore all'interno del quale si trova il mercurio in equilibrio con il cloruro di mercurio. Il potenziale di questo elettrodo è di +244 mV rispetto all'elettrodo standard a idrogeno (SHE).

Curve di polarizzazione

Per misurare la velocità di corrosione delle armature si esegue la misura di polarizzazione lineare che, con un'alterazione delle condizioni di corrosione del metallo attraverso l'applicazione di una corrente esterna, consente di valutare la velocità di corrosione dell'armatura, senza modificare significativamente il suo potenziale.

Oltre al metallo che si vuole misurare, (elettrodo di lavoro, W=working) e all'elettrodo di riferimento (R=reference) si prevede l'impiego di un terzo elettrodo, un contro elettrodo (C=counter) che eroga corrente durante la prova per polarizzare catodicamente o anodicamente il metallo. Per garantire il contatto sia tra il provino e il contro elettrodo, sia tra il provino e l'elettrodo di riferimento si usa una spugnetta umida. La corrente viene generalmente erogata da un potenziostato che, grazie ad un circuito di retroazione, è in grado di imporre un determinato potenziale al metallo, facendo circolare la corrente necessaria per polarizzarlo a tale valore. In base alla teoria formulata da Stern e Geary, la pendenza della retta che lega E e i (Figura 1.5) nell'intorno di E_{corr} (detta resistenza di polarizzazione, R_p , $\Omega \cdot m^2$) è inversamente proporzionale alla velocità di corrosione (mA/m^2) secondo l'equazione:

$$i_{corr} = B / R_p$$

La costante B (mV) è caratteristica di ogni accoppiamento materiale-ambiente, e può essere in prima approssimazione assunta pari a 26 mV per le armature nel calcestruzzo. Sapendo che per il ferro, ad una densità di corrente nella regione anodica pari a $1 mA/m^2$, corrisponde una velocità di corrosione di $1.17 \mu m/anno$, dal valore di i_{corr} si può ricavare una velocità di penetrazione media della corrosione. Questi valori di velocità sono indicativi e sono da intendersi come valori medi sull'intera superficie dell'armatura [4, 10]

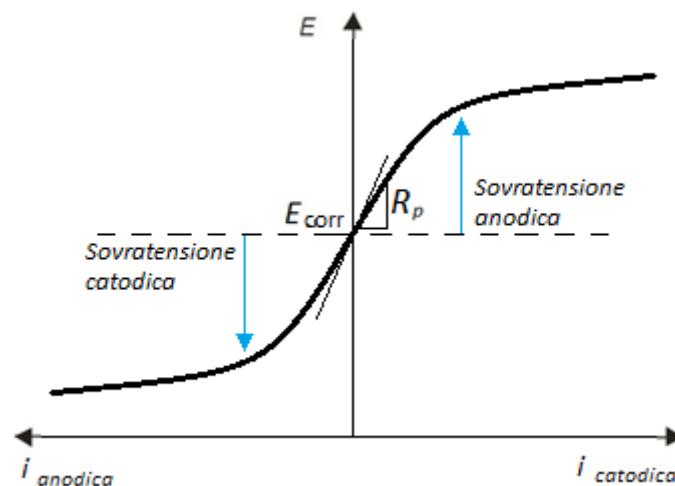


Figura 1.5 Esempio di curva potenziodinamica tracciata in scala lineare [4].

1.3 Fattori di influenza del tenore critico di cloruri

Il tenore critico di cloruri per l'innesco della corrosione dipende da diversi fattori tra cui:

- *potenziale delle armature*: Questo parametro è legato principalmente al contenuto di umidità del calcestruzzo, il quale determina la disponibilità di ossigeno sulla superficie dell'acciaio. In strutture esposte all'atmosfera l'ossigeno può raggiungere facilmente tale superficie attraverso i pori non saturi d'acqua [4].
- *pH della soluzione nei pori del calcestruzzo*: Il contenuto critico di cloruri diminuisce al diminuire del pH della soluzione acquosa contenuta nei pori del materiale [11] e la presenza di vuoti può derivare da una cattiva compattazione del calcestruzzo [12]. Come già accennato precedentemente (§1.2) l'attacco per pitting può innescarsi solo quando il rapporto di concentrazione di ioni cloruro e ioni idrossili presenti nelle soluzioni dei pori raggiungono valori sufficientemente elevati.
- *Temperatura*: La temperatura influisce sulla cinetica dei processi di corrosione e in particolare il suo aumentare comporta una crescita della velocità di corrosione in presenza di acqua; provoca, inoltre, cambiamenti delle caratteristiche protettive dello strato di prodotti della corrosione.
- *Presenza di bolle d'aria intrappolate all'interfaccia tra l'armatura e il calcestruzzo*;
- *Condizioni superficiali*.

1.3.1 Tenore critico di cloruri per gli acciai inossidabili

Le armature in acciaio inossidabile, in confronto a quelle al carbonio, hanno un tenore critico di cloruri molto più elevato. In presenza di cloruri la curva di polarizzazione anodica è limitata superiormente dal potenziale di pitting (E_{pitt}) (Figura 1.4) il cui valore diminuisce all'aumentare dei cloruri.

Tra i fattori che influenzano il tenore critico di cloruri per gli acciai inossidabili, recentemente sono stati pubblicati i risultati di una ricerca inerente gli effetti della temperatura sul comportamento a corrosione di armature in acciai duplex a basso contenuto di nichel in calcestruzzo [13]. In particolare, essa ha dimostrato che in ambienti caldi e umidi contaminati da cloruri, gli acciai tradizionali 304 LN (1.4311) e 316 LN (1.4406) hanno resistenza a corrosione maggiore rispetto all'acciaio 23-04 (1.4362) e 21-01 (1.4162) a basso contenuto di nichel. Su questi ultimi, la corrosione per pitting si è innescata con il 3% di cloruri rispetto alla massa di cemento, in ambiente con temperatura pari a 20 °C mentre il successivo aumento di temperatura a 40 °C ha portato a corrosione l'acciaio 21-01 in calcestruzzo confezionato col 2.5% di cloruri. Per quanto riguarda gli acciai austenitici

tradizionali non hanno subito inneschi a 20°C nemmeno in calcestruzzo confezionato con l'8% di cloruri rispetto alla massa.

In generale tutte le prove sperimentali di laboratorio per la determinazione della concentrazione dei cloruri che provoca l'innesco della corrosione, sono legate all'individuazione del momento in cui avviene la depassivazione dell'acciaio. In genere si ricorre a *prove in soluzione o in calcestruzzo/malta*; le prime sono più veloci, mentre le seconde sono più rappresentative ma molto più onerose in termini di costi e tempi [14]. Questo tipo di prove possono essere svolte anche in maniera accelerata tramite l'applicazione di una polarizzazione anodica, permettendo di determinare le condizioni d'innesco della corrosione.

Le prove di *polarizzazione potenziodinamica anodica* permettono di tracciare le curve di polarizzazione dell'acciaio e di rilevare il potenziale di pitting. Per un determinato tenore di cloruri si aumenta il potenziale fino a raggiungere quello di pitting (E_{pitt}) (§ 1.2.1). Le prove di *polarizzazione potenziostatica anodica* hanno lo scopo di individuare l'innesco della corrosione in campioni con diverse concentrazioni di cloruri, mantenendo fisso il potenziale.

Le prove in soluzione

Consistono nell'immersione delle armature in acciaio in soluzione alcalina costituita da idrossidi di calcio, sodio e potassio che simuli quella contenuta nei pori del calcestruzzo di strutture reali. La presenza degli idrossidi determina il pH della soluzione che in genere viene tenuta a pH 12,6 per meglio simulare l'ambiente alcalino oppure a pH 9 quando è carbonatato.

La maggior parte degli studi presenti in letteratura riguardano acciai inossidabili austenitici 304 (1.4301; 18%Cr e 8%Ni) e 316 immersi in soluzioni con aggiunte di NaCl.

Nelle *prove potenziodinamiche* il potenziale viene incrementato fino a determinare il valore di potenziale di pitting.

- Per l'acciaio 304LN, Bertolini e al. con contenuto di NaCl pari al 5% (circa 3% di cloruri), hanno misurato valori di E_{pitt} compresi tra 500 e 600 mV vs SCE per l'acciaio in soluzione satura di $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (pH 12,6) [15]. Con tenori di cloruri maggiori sono stati misurati potenziali di pitting minori, arrivando a valori compresi tra 300 e 400 mV vs SCE con 10% di cloruri.
- le armature in acciaio duplex 23-04 dispongono di meno dati e informazioni essendo molto più recenti. Finora sono state effettuate poche prove. Bautista e al. in soluzione satura di $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (pH 12,6) e con 5% di cloruri NaCl (circa 3% di cloruri) hanno rilevato valori di E_{pitt} pari a circa 550 mV vs SCE [16]. Allo stesso modo, Bertolini e Gastaldi hanno misurato in condizioni analoghe ma con una

concentrazione di cloruri CaCl_2 (pari a circa 5% di NaCl) valori simili di E_{pit} pari a circa 530 mV vs SCE [17].

Sempre per le prove in soluzione, sono state svolte anche *prove potenziostatiche* per cui si applica un potenziale costante monitorando nel tempo la corrispondente corrente di polarizzazione. In questa prova, dopo aver impostato il potenziale si aumenta il contenuto di cloruri fino a raggiungere l'innescò della corrosione. Tramite questa metodologia di prova è possibile misurare il valore del tenore critico di cloruri in corrispondenza di un determinato potenziale che spesso viene impostato a +200 mV vs SCE, in modo da simulare la condizione più critica per una struttura in calcestruzzo armato esposta in atmosfera.

- Per l'acciaio 304L in soluzione a pH 12.6, Randstrom e al. [18] hanno rilevato per l'acciaio un tenore critico di cloruri pari a 2.8 e 10,6% mentre Bertolini e al. [19] hanno misurato un tenore critico compreso tra 6.5 e 10% per lo stesso acciaio.
- Per l'acciaio 23-04, le prove condotte da Randstrom et al. [18], hanno un tenore critico di cloruri compreso tra 4,6 e 10,6%, e in quelle condotte da Bertolini e Gastaldi [19] si sono rilevati valori di cloruri per l'innescò della corrosione di 7,5-8% in massa.

Prove in calcestruzzo/malta

I cloruri possono essere introdotti nel calcestruzzo facendoli penetrare dall'esterno o integrandoli direttamente nel calcestruzzo in fase di getto. Il principale svantaggio delle prove con cloruri penetrati consiste nel fatto che la loro durata può essere elevata (anche alcuni anni), soprattutto nel caso in cui si impieghino armature con un elevato tenore critico di cloruri come quelle in acciaio inossidabile. I primi risultati pubblicati sulla resistenza a corrosione di barre in acciaio inossidabile in calcestruzzo contaminato da cloruri risalgono agli anni settanta. In questi studi si sono utilizzate barre lisce di acciai austenitici, 302 (con contenuto di carbonio maggiore rispetto al 304) e 316, e ferritici (di tipo 405 e 430); sono state effettuate sia prove con cloruri aggiunti sia con cloruri penetrati con esposizione in ambiente marino. I risultati hanno mostrato che non si è osservata corrosione sugli acciai inossidabili austenitici nemmeno dopo 10 anni di esposizione in ambiente marino e in calcestruzzo con 3,2% di cloruri aggiunti in massa rispetto al cemento esposto per 22 mesi all'atmosfera (zona industriale in Inghilterra) mentre gli acciai ferritici, invece, la corrosione si è innescata già con 1% di cloruri [22]. Da allora molte pubblicazioni hanno seguito prove di laboratorio eseguite su armature in acciaio per conoscerne il comportamento a corrosione.

In particolare:

- Prove potenziostatiche effettuate imponendo una polarizzazione anodica a +200 mV vs SCE, condotte da Sorensen et al. [23] in provini di malta, hanno mostrato che la corrosione si è innescata su questi acciai inossidabili per un tenore di cloruri pari a

3.5-5% e che la resistenza alla corrosione dell'acciaio 316L si è dimostrata leggermente superiore rispetto a quella dell'acciaio 304L. Prove di polarizzazione anodica in calcestruzzo alcalino con 5% di cloruri su armature in acciaio 304L e 316L non hanno evidenziato corrosione nemmeno in seguito al raggiungimento di potenziali superiori a +400 mV vs SCE [24].

Nonostante tutte le prove eseguite, non si è stabilito il tenore critico per i vari acciai analizzati ma solamente la percentuale di cloruri con la quale si è avuta o meno corrosione.

1.4 Progettazione per la durabilità con armature in acciaio inossidabile

Nelle Normative Tecniche per le Costruzioni la durabilità è definita come: “conservazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali e delle strutture, è una proprietà essenziale affinché i livelli di sicurezza vengano garantiti durante tutta la vita utile di progetto dell'opera. La durabilità è funzione dell'ambiente in cui la struttura vive e del numero di cicli di carico cui la struttura potrà essere sottoposta” [25]. Da tale definizione consegue che il concetto di durabilità è fortemente legato alla definizione della vita di servizio, quindi una struttura si può considerare durevole solo se la vita di servizio è pari almeno a quella attesa in fase di progettazione.

Per garantire tale requisito è pertanto necessario:

- definire la vita utile di progetto: tale richiesta può essere formulata direttamente dal committente e dal progettista in base alla destinazione d'uso con riferimento alle NTC 2008; [25]
- definire le condizioni ambientali in cui la struttura si troverà ad operare e le azioni che l'ambiente esercita su di essa;
- scegliere i materiali e progettare la struttura in modo tale che, con una prefissata probabilità, il loro degrado nell'arco della vita utile di progetto o attesa sia tale da non compromettere la funzionalità e la sicurezza della struttura stessa;
- prevedere l'evoluzione nel tempo del degrado sui materiali con cui si intende realizzare la struttura;
- formulare prescrizioni sulle modalità di esecuzione della struttura per garantire che in fase di esecuzione vengano attuate le scelte progettuali;
- redigere un programma di ispezioni e manutenzione in modo da garantire il mantenimento delle prestazioni durante la vita di servizio.

Nell'approccio di tipo *prescrittivo* sulla base delle indicazioni fornite dalla norma UNI EN 206-1:2006 [26] per il confezionamento del calcestruzzo e dall'Eurocodice 2 [27] si stabiliscono il rapporto a/c, lo spessore del copriferro, la classe di esposizione e il tipo di cemento per poter garantire una vita di servizio di circa 50 anni per strutture in calcestruzzo armato

ordinarie. Nonostante la semplicità con cui si presenta questo approccio, vari studi hanno mostrato che per elementi strutturali soggetti a penetrazione di cloruri le prescrizioni non sono sempre adeguate. Un altro limite di questo approccio è che i parametri forniti sono utili per una struttura con vita nominale pari a circa 50 anni, e non è possibile operare in casi in cui è richiesta una vita di servizio maggiore; inoltre non consente di considerare l'utilizzo di calcestruzzi differenti o sistemi di protezione aggiuntiva, come le armature in acciaio inossidabile.

1.4.1 Approccio prestazionale

A differenza dell'approccio prescrittivo, con questo criterio è possibile progettare ogni elemento strutturale di un'opera in modo tale da offrire un grado di resistenza alle effettive condizioni ambientali per tutta la vita di servizio attesa. Si parla quindi di un vero e proprio progetto della durabilità dove gli effetti delle azioni ambientali sulle strutture vengono modellati per individuare i tempi entro i quali questi effetti determinano il raggiungimento di uno stato limite al quale il progettista deve far corrispondere il termine della vita utile di servizio. Questo approccio è molto importante soprattutto in quei casi dove il semplice rispetto delle normative vigenti non basta a garantire la durabilità necessaria; si tratta di tutte quelle situazioni in cui si richiedono vite di servizio più lunghe di 50 anni oppure di strutture esposte in zone molto delicate dove la forte presenza di cloruri e ossigeno (es. la zona degli spruzzi sui piloni dei moli) portano a una valutazione del rischio di corrosione molto alta. Per potersi muovere con questo approccio è necessario disporre di modelli che descrivano l'evoluzione nel tempo del degrado.

Da qualche anno sono disponibili dei modelli di calcolo basati su approcci prestazionali di tipo probabilistico, analoghi a quelli usati nella progettazione strutturale. In particolare, la Federazione Internazionale del Calcestruzzo Strutturale (FIB), partendo da un precedente progetto europeo chiamato DuraCrete [28,29], ha sviluppato un codice di calcolo per il progetto della vita di servizio di strutture in c.a. che riporta delle procedure per la sua valutazione quantitativa. Come dati in ingresso al modello si utilizzano spesso i risultati di prove accelerate. Il risultato di tali prove viene modificato da una serie di coefficienti che servono a correlare i risultati di queste con le condizioni reali.

Lo stato limite viene definito considerando i fattori ambientali (carichi agenti sulla struttura $S(t)$) e le proprietà dei materiali (resistenze $R(t)$) come funzioni stocastiche.

La *Figura 1.6* mostra un esempio di evoluzione nel tempo della funzione resistenza $R(t)$ e della funzione sollecitazione $S(t)$: l'intersezione delle due curve tratteggiate definisce il valore medio della vita di servizio, ovvero l'istante in cui la probabilità di raggiungere lo stato limite è il 50% [4]. Tale comportamento strutturale è quindi descritto dall'equazione dello stato limite in funzione del tempo:

$$g(t) = R(t) - S(t) \quad [4]$$

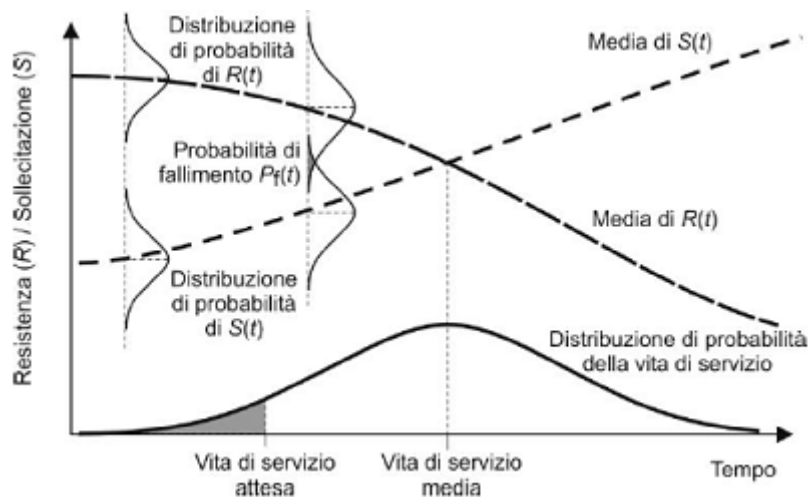


Figura 1.6 Esempio di andamento delle curve $S(t)$ e $R(t)$ in funzione del tempo per la distribuzione statistica

Nota la distribuzione probabilistica dei tenori critici di un acciaio inossidabile, si può quindi procedere con una progettazione di tipo prestazionale in base alla vita di servizio richiesta. Si può anche effettuare una analisi comparativa tra le varie protezioni aggiuntive considerate, valutando anche la scelta di diversi tipi di armature in acciaio inossidabile con diverso costo e resistenza al degrado.

1.5 Considerazioni economiche

Sebbene a lungo termine la scelta dell'impiego di barre in acciaio inossidabile possa rappresentare un'efficace alternativa all'acciaio tradizionale in termini di costi, il suo costo iniziale elevato spesso ne ha limitato l'uso. Per diminuire il costo di queste strutture, sono state studiate due possibilità basate sulla scelta selettiva delle barre in acciaio inossidabile ovvero limitandone l'uso alle sole parti vulnerabili della struttura o alla riduzione del costo del materiale utilizzando tipi di acciaio inossidabile più economici rispetto a quelli tradizionali.

Per ciò che riguarda la seconda scelta bisogna sottolineare come il nichel è soggetto a variazioni di prezzo in funzione della borsa che hanno addirittura portato al raddoppio del suo valore monetario (*Figura 1.7*). Per questa ragione i nuovi acciai austenitici sono stati sviluppati sostituendo parzialmente il contenuto di nichel con altri elementi. In particolare, è stato aggiunto l'azoto per la sua capacità di rendere stabili gli acciai e rinforzarli allo stato solido oltre alla buona resistenza a corrosione da pitting. Anche il manganese è usato per la sua efficacia nell'incrementare sia la solubilità dell'azoto nell'acciaio allo stato liquido sia una parte di austenite durante la solidificazione [29]. L'uso di un nuovo austenitico con minore contenuto di nichel potrebbe portare ad un risparmio del 15-20% rispetto al convenzionale

austenitico AISI 304, come dimostrano i dati ottenuti da una ricerca sviluppata da C. Monticelli e al. [31].

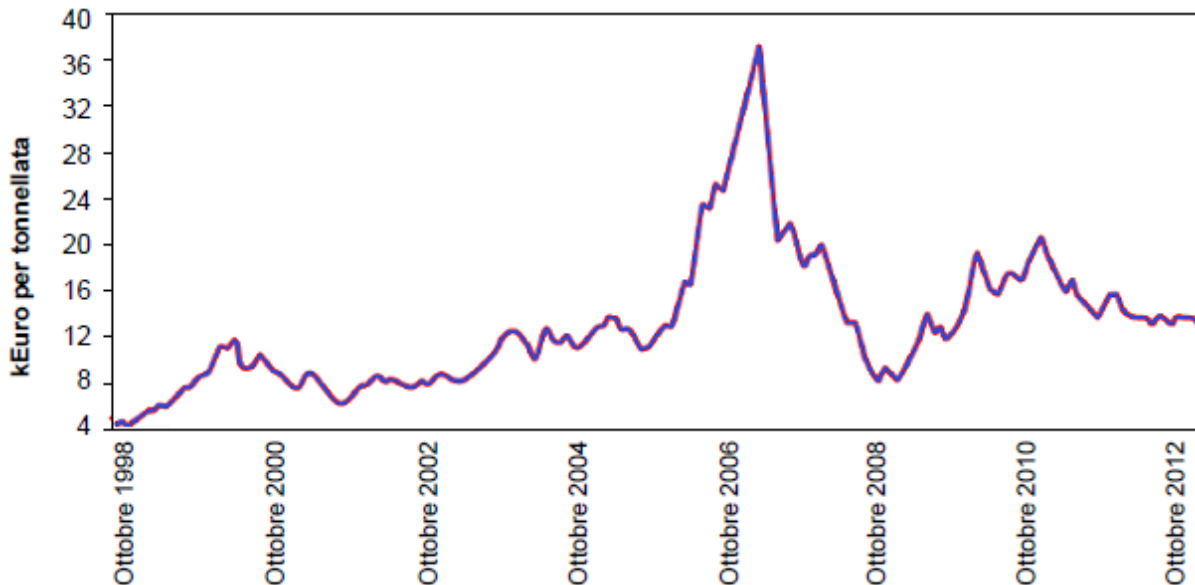


Figura 1.7 Andamento del prezzo del nichel rilevato negli ultimi 15 anni dalla World Bank.

Per quanto riguarda invece l'utilizzo contemporaneo di acciai tradizionali e inossidabili, sebbene in passato si è temuta la possibilità di corrosione per accoppiamento galvanico, è stato dimostrato che non comporta rischi di corrosione per le armature tradizionali [32]. Dalla medesima ricerca è risultato inoltre che qualora sulle barre al carbonio si inneschi la corrosione per raggiungimento dei cloruri o carbonatazione sulla loro superficie, le conseguenze dell'accoppiamento tra acciaio al carbonio e acciaio inossidabile rimangono trascurabili. In effetti, si forma una macrocoppia nella quale le zone di corrosione sull'acciaio al carbonio si comportano da anodo, e quindi subiscono un'accelerazione dell'attacco. Il catodo di questa macrocoppia è però costituito sia dall'acciaio inossidabile, che rimane passivo in quanto non si corrode in calcestruzzo carbonatato o in presenza di tenori di cloruri anche elevati, sia dalle parti di armatura di acciaio al carbonio che sono ancora passive (ad esempio, le barre poste a profondità maggiore). Poiché l'acciaio inossidabile è un catodo notevolmente meno efficiente rispetto all'acciaio al carbonio passivo, la presenza delle barre di acciaio inossidabile, nella maggior parte dei casi, dà un contributo trascurabile rispetto alla macrocoppia che comunque si forma con le armature passive al carbonio.

Da queste due alternative proposte per il risparmio legato ai costi delle strutture, bisogna comunque tener conto che il costo iniziale elevato delle armature in acciaio inossidabile è ripagato dalla maggiore durabilità dell'opera. Difatti, per formulare una corretta valutazione tecnico-economica non ci si può limitare a considerare solo il costo iniziale, ma va fatto riferimento all'intero ciclo di vita della struttura attraverso un'analisi di tipo "Life Cycle Cost"

[33]. Questa analisi parte dalla vita di servizio richiesta e prevede l'identificazione preventivamente di tutti gli scenari di intervento possibili e i relativi costi associati [4].

Studi su diversi ponti autostradali hanno mostrato che l'utilizzo di armature in acciaio inossidabile comporta un incremento sul costo iniziale della struttura compreso tra l'1% e 1,5%, a seconda della complessità della struttura stessa. Un esempio è il caso della soletta del ponte costruito sopra al fiume Reno a Sciaffusa, (Svizzera), in cui l'utilizzo di armature in acciaio inossidabile di tipo 304 ha portato un incremento del costo iniziale dell'opera pari all'1-2% [34] ma da un'analisi Life Cycle Cost del ponte i calcoli mostrano che mettendo a confronto tre tipi di materiali diversi impiegati, (acciaio al carbonio, con e senza rivestimento in resine epossidiche, e acciaio inossidabile) il costo dell'utilizzo di armature in acciaio inossidabile comporta un risparmio del 15%, considerando una vita di servizio di 80 anni.

E' pertanto compito del progettista operare la scelta migliore considerando tutte le condizioni al contorno e i costi, i quali possono essere ridotti scegliendo l'acciaio inossidabile più economico in grado di soddisfare le esigenze di durabilità previste nel progetto.

Capitolo 2

Metodologia sperimentale

In questo lavoro di tesi sono state svolte prove con diversi tenori di cloruri sugli acciai 316LN, 23-04 e XM-28, già analizzati nei lavori precedenti, per poter completare le curve di distribuzione del tenore critico di cloruri già avviate nella tesi precedente. Inoltre sono state avviate anche prove sull'acciaio austeno-ferritico 22-05 e il tradizionale 304LN.

Per stimare il tenore critico di cloruri per l'innesco della corrosione di armature in acciaio inossidabile con diversa composizione chimica e microstruttura sono state realizzate una serie di prove sperimentali su provini in calcestruzzo armato inquinato da cloruri.

In particolare, sono state effettuate le prove di polarizzazione potenziostatica anodica (con potenziale fisso a +200 mV vs SCE) e di libera corrosione su provini in calcestruzzo con diversi tenori di cloruri aggiunti in fase di getto e la prova con cloruri penetranti.

Per quanto riguarda le prove di polarizzazione potenziostatica anodica, esse sono state effettuate a diverse temperature e con diverse durate, per poter valutare l'effetto di questi due fattori sul tenore critico.

2.1 Materiali

Per confezionare i provini sono stati utilizzati i seguenti materiali di seguito descritti.

Armature

Le armature oggetto dell'analisi sono state fornite dall'acciaieria Valbruna S.p.A. Le barre sono tutte state sottoposte in stabilimento ad un trattamento di sabbiatura e decapaggio per rimuovere gli ossidi di lavorazione. Tutte le barre sono armature nervate per calcestruzzo armato e hanno diametro di 20 mm.

Le prove sperimentali sono state eseguite su due tipi di barre in acciaio austenitico tradizionali (304LN e 316LN), un tipo in acciaio austenitico al manganese (XM-28) e due tipologie di barre in acciaio duplex (22-05 e 23-04).

Nella *Tabella 2.1* e *Tabella 2.2* sono riportate rispettivamente le caratteristiche meccaniche e i principali elementi di lega (% in massa) degli acciai sottoposti alle prove. L'acciaio 316LN presenta una duttilità A_{gt} pari a 26,2% maggiore tra quelli analizzati nel presente lavoro di tesi. E' caratterizzato da un basso tenore di carbonio pari al 0,022%, 17,2% di cromo, 10,21% di nichel, 2,04% di molibdeno e una aggiunta di azoto 0,141%. L'acciaio 304LN, in confronto al 316LN, si differenzia per caratteristiche meccaniche inferiori ed è caratterizzato da un più basso tenore di molibdeno pari a 0,5%. Per quanto riguarda l'acciaio XM-28 la sua composizione è differente rispetto agli altri acciai presi in considerazione in quanto, il tenore

di carbonio pari a 0,11%, è molto superiore rispetto a quelli precedenti (circa 0,02-0,03). Il tenore di nichel è particolarmente basso (2,23%) poiché in parte è stato sostituito dal manganese (12,02%) e dall'azoto (0,30%). Questo tipo di acciaio presenta un carico a rottura R_m pari a 923 MPa, maggiore tra tutti quelli riportati. L'acciaio 23-04 è composto da un'alta percentuale di cromo (23,58%) e basso tenore di nichel pari a 4,61%, oltre a basse percentuali di azoto (0,13%) e di molibdeno (0,45% - più basso contenuto rispetto gli altri acciai utilizzati). Per quanto riguarda il tenore di carbonio esso è presente in percentuale pari a 0,029%. Anche l'acciaio 22-05 è caratterizzato da un'alta percentuale di cromo (22,74%) e basso tenore di nichel pari a 4,9%, oltre che da basse percentuali di azoto (circa 0,1%) e di carbonio (0,018%). In particolare contiene il molibdeno in percentuale pari a 2,84%; per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche è importante notare la sua duttilità A_{gt} pari a 22%.

Tabella 2.1 Caratteristiche meccaniche degli acciai sottoposti alle prove (dati forniti dal produttore).

CARATTERISTICHE MECCANICHE	304LN	316LN	XM-28	22-05	23-04
R_m (N/mm ²)	797	856	923	856	819
R_p 0,2% (N/mm ²)	580	676	-	676	618
R_m/R_p 0,2%	1,37	1,491	-	1,27	1,325
A_{gt} %	18	26,2	*	22	13

*non stato possibile rilevare l'allungamento in quanto il provino è scivolato nei morsetti prima di arrivare a rottura. È stato riprelevato uno spezzone per ricavare un provino di trazione tornito da cui abbiamo ricavato il carico di rottura R_m .

Tabella 2.2 Principali elementi di lega (% in massa) degli acciai sottoposti alle prove (dati forniti dal produttore).

ELEMENTI DI LEGA	304LN	316LN	XM-28	22-05	23-04
C	0,023	0,022	0,11	0,018	0,029
Si	0,55	0,48	0,4	0,57	0,52
Mn	1,24	1,36	12,02	1,42	1,41
Cr	18,53	17,2	17,41	22,74	23,58
Ni	8,5	10,21	2,23	4,9	4,61
N	0,136	0,141	0,3005	0,1084	0,1335
Mo	0,5	2,04	0,18	2,84	0,45

Calcestruzzo

Il calcestruzzo utilizzato per il confezionamento dei provini è stato preparato con la seguente miscela:

- 400 kg/m³ di cemento portland (tipo CEM I 52.5 R)
- 200 l /m³ di acqua deionizzata
- rapporto acqua/cemento pari a 0.5;
- 1704 kg/m³ di aggregato frantumato di tipo calcareo suddiviso in cinque frazioni granulometriche (la combinazione granulometrica con D_{max} pari a 9 mm utilizzata è stata scelta considerando una distribuzione prossima a quella di Füller).

La quantità d'acqua aggiunta è stata corretta in base alle condizioni di umidità degli aggregati.

Per lo sviluppo della ricerca sono stati confezionati impasti con diverso contenuto di cloruri pari a 2%, 4%, 5% e 7% rispetto alla massa del cemento.

I cloruri sono stati aggiunti come cloruro di calcio (CaCl₂) sciolto 24 h prima del getto in circa 20% dell'acqua d'impasto. La soluzione è stata quindi posta a temperatura pari a circa 4°C assieme alla restante acqua di impasto, in modo da rallentare la velocità di presa del calcestruzzo, accelerata dalla presenza del cloruro di calcio. Poco prima del getto è stato aggiunto all'acqua d'impasto, priva di cloruri, un additivo superfluidificante a base acrilica (1,5 % in massa rispetto al cemento), in modo da ottenere una lavorabilità idonea al riempimento dei casseri (classe di lavorabilità S4).

Tabella 2.3 Mix design del calcestruzzo utilizzato.

Ingrediente	Tipo	Mix proposto [kg/m ³]
Acqua (l/m³)	deionizzata	200
Cemento (kg/m³)	CEM I 52.5 R	400
Aggregati (kg/m³)	Frantumato calcareo	1704
	Polvere	596,4
	Calc1	255,6
	Calc2	255,6
	Calc3	255,6
	Calc4	340,8
	Additivo superfluidificante	1,5 %

2.2 Provini e modalità di preparazione

Per lo svolgimento delle prove sono stati preparati tre diversi tipi di provini: provini cilindrici, un provino cilindrico a bicchiere, in calcestruzzo armato, e provini cubici non armati.

Provini cilindrici

I provini cilindrici armati presentano un diametro pari a 75 mm e altezza di circa 100 mm. Le armature, dopo essere tagliate in pezzi di 100 mm, sono state forate su un'estremità, per garantire il collegamento elettrico esterno per le misure. Successivamente sono state pulite con acetone e ultrasuoni per rimuovere i residui di lavorazione e sgrassare. Tutte le barre sono state numerate con un codice alfanumerico, tramite bulinatura, per poterle identificare e sono state osservate ad occhio nudo per individuare la presenza di eventuali imperfezioni legate alla produzione, alla movimentazione e allo stoccaggio del materiale. Le estremità dell'armatura sono state protette per un tratto pari circa a 3 cm sul lato in cui è stato realizzato il foro e 1 cm dall'altro, lasciando così un tratto utile di 60 mm (Figura 2.1).

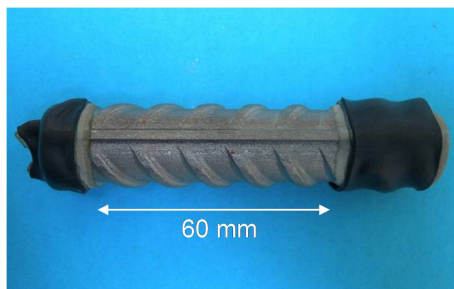


Figura 2.1 Barra d'armatura preparata per l'inserimento nei provini

L'isolamento è stato garantito da uno spessore sottile di malta a sua volta ricoperto da una guaina termorestringente (Figura 2.1). La malta utilizzata è stata confezionata con cemento tipo CEM I 52.5 R, una emulsione di gomma stirene-butadiene-stirene e sabbia con dimensione massima 90 μm nelle seguenti proporzioni 1,2 parti di sabbia, 1 parte di cemento, 0,5 parti di lattice SBR e 0,3 parti di acqua deionizzata.

L'armatura preparata in questo modo è stata inserita in un apposito cassero (Figura 2.3), che permette di confezionare fino ai 15 provini con copriferro regolare di 25 mm e mantiene l'armatura ferma durante l'operazione di getto. Durante il riempimento di cilindri cassero è stato posto su un tavolo vibrante per favorire la compattazione. Per ogni tenore di cloruri e tipo di armatura sono stati confezionati 11 provini (Figura 2.2) di cui 10 per le prove di polarizzazione anodica e 1 per le prove di corrosione libera. Al termine del getto i provini sono stati posti a stagionare nei casseri coperti con un telo di plastica per 24 ore in una camera climatica a 23°C.

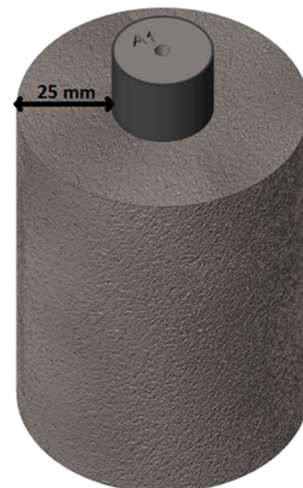


Figura 2.2 Rappresentazione schematica del provino cilindrico armato

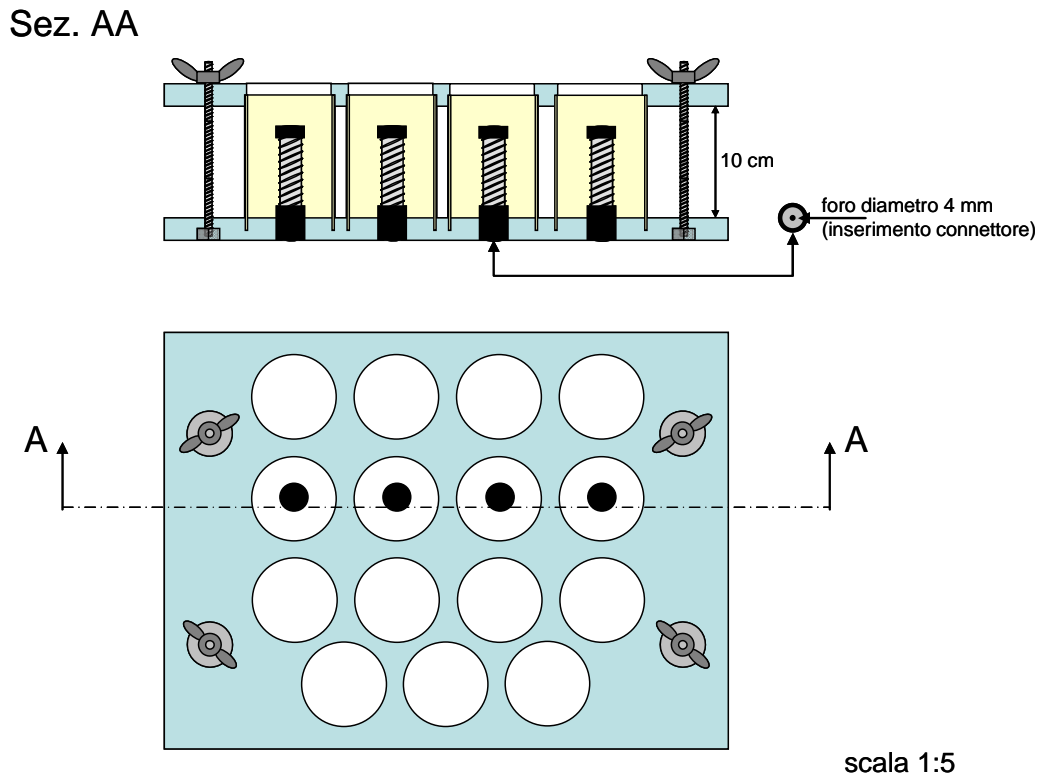


Figura 2.3 Rappresentazione schematica della cassaforma utilizzata per il confezionamento dei provini cilindrici.

Provini cubici non armati

In successione al getto dei provini armati di forma cilindrica sono stati confezionati anche, con i calcestruzzi con diverso contenuto di cloruri, i provini non armati cubici, di lato pari a 100 mm, da utilizzare per la caratterizzazione meccanica del calcestruzzo. Sono stati realizzati per mezzo di cassero metallico (*Figura 2.8*) posizionato anch'esso sul tavolo vibrante per favorire la compattazione.



Figura 2.8 Cassaforma per ottenere provini cubici non armati per la prova di resistenza a compressione

Al termine del getto i provini sono stati posti anch'essi a stagionare nei casseri per 24 ore, sono quindi stati scasserati e lasciati per altri 27 giorni a stagionare in una camera di stagionatura a U.R. > 95%. I provini cubici dopo la stagionatura di 28 giorni sono stati pesati e sottoposti a prova di compressione. In alcuni casi, con più elevati contenuti di cloruri, non è stato possibile confezionare i provini cubici a causa della rapidità della presa dell'impasto provocata dalla quantità di cloruri introdotta.

Provino cilindrico a bicchiere

Il provino per la prova con cloruri penetranti (ponding) è stato realizzato durante un lavoro di tesi precedente [20] ed è stato confezionato con il calcestruzzo privo di cloruri. La sua forma cilindrica a bicchiere (*Figura 2.4*) è stata ottenuta utilizzando un apposito cassero. Il provino realizzato in questo modo, presenta nella parte esterna un copriferro di 1 cm. Inoltre, la sua configurazione permette di destinare una zona, posta tra le armature, per l'estrazione di campioni in calcestruzzo per l'analisi del contenuto di cloruri. Per quanto riguarda le armature sono state utilizzate 10 barre in acciaio inossidabile di tipo 23-04 (di lunghezza pari a 15 cm) e sono state preparate nello stesso modo di quelle utilizzate per gli provini cilindrici armati. Il provino dopo il getto è stato lasciato nel cassero in camera climatica a 23°C per una settimana.

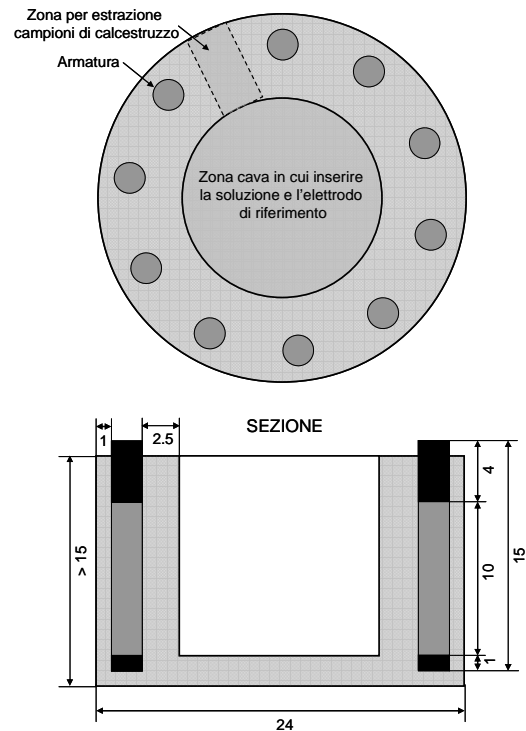


Figura 2.4 Rappresentazione schematica del provino (dimensioni in centimetri) realizzato per le prove di ponding

2.3. Prove

2.3.1. Prova di polarizzazione potenziostatica anodica



Figura 2.5 Provino all'interno del contenitore

Queste prove sono state eseguite sui provini cilindrici armati (§2.1). I provini rimossi dai casseri 24 ore dopo il getto sono stati immersi singolarmente in appositi contenitori in una soluzione satura di idrossido di calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ per 6 giorni (*Figura 2.5*) e posti all'interno di una camera climatica alla temperatura a cui è stata svolta la prova. All'interno dei contenitori, oltre ai provini, è stata posizionata una rete in titanio attivato avente funzione di contro elettrodo e un elettrodo di riferimento in argento/argento cloruro (Ag/AgCl) calibrato rispetto ad un elettrodo di riferimento al calomelano saturo (SCE), in modo da riferire tutte le misure all'elettrodo al calomelano.

I provini preparati in questo modo sono stati collegati elettricamente ad una strumentazione di acquisizione dati ed è stato monitorato il potenziale di libera corrosione durante il periodo di stagionatura, per verificare il corretto cablaggio del sistema. Successivamente, i provini sono stati polarizzati anodicamente a +200 mV vs SCE utilizzando un potenziostato in grado di imporre il prefissato potenziale ad ogni singolo provino (Figura 2.6).

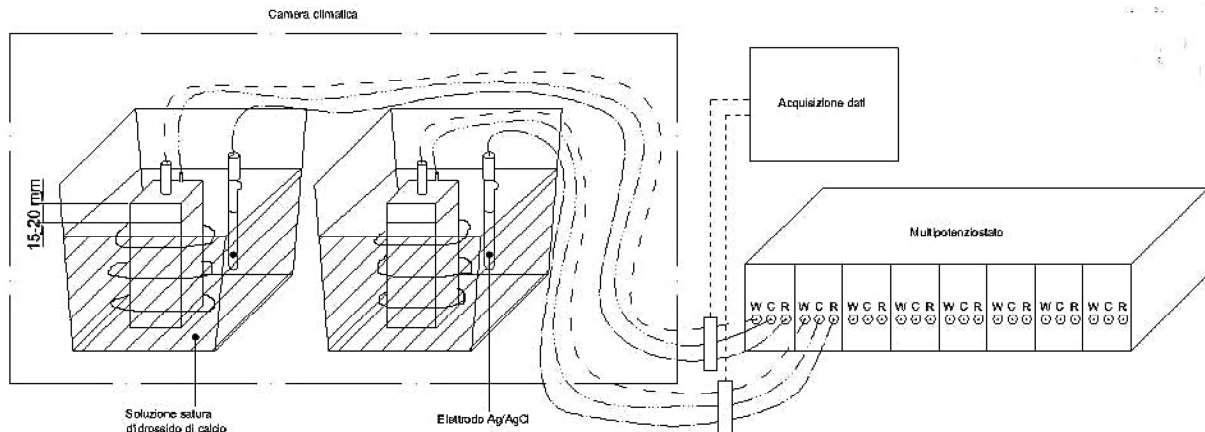


Figura 2.6 Esempio della strumentazione per la prova di polarizzazione potenziostatica

La polarizzazione è stata mantenuta in genere per 24 ore; su alcuni acciai sono state svolte anche prove in cui la polarizzazione è stata mantenuta fissa per 6 e 13 giorni. Sono stati registrati nel tempo il potenziale e la corrente circolante per mantenere il potenziale (misurata mediante la caduta di tensione rilevata a cavallo di una resistenza di 47 Ω , inserita in serie al contro elettrodo). Dopo l'interruzione della polarizzazione si è continuato a monitorare i potenziali della depolarizzazione dei provini per le successive 4 ore (fase di depolarizzazione).

Tabella 2.4 Prove di polarizzazione potenziostatica anodica effettuate durante questo lavoro di tesi.

ACCIAIO	CLORURI (vs massa cemento)	TEMPERATURA	DURATA DELLE PROVA
304LN	4%	23°C	24 h
304LN	4%	23°C	24 h
304LN	4%	23°C	13 giorni
304LN	5%	23°C	24 h
316LN	7%	23°C	24 h
XM-28	2%	23°C	24 h
XM-28	2%	23°C	6 giorni
22-05	5%	23°C	24 h
22-05	5%	40°C	24 h
23-04	5%	30°C	24 h

Rottura dei provini

Al termine della prova potenziostatica ogni provino è stato rotto trasversalmente mediante una pressa idraulica (Figura 2.7), scoprendo così la barra d'armatura che sono state sottoposte a un'accurata osservazione visiva per individuare l'eventuale presenza di corrosione; è stata osservata ad occhio nudo, con l'utilizzo della lente di ingrandimento (ingrandimento 8 volte) oppure con un visore stereoscopico (fino a 50 volte). Le condizioni delle superfici sono state documentate e fotografate.

A seguito è stato prelevato del calcestruzzo dalla sede dove erano posizionate le barre d'armatura e in alcuni casi sulla superficie esterna del provino. Il campione è stato sottoposto a macinazione per ottenere circa 4 grammi di polvere, per l'analisi del contenuto di cloruri (§2.3.4).



Figura 2.7 Pressa idraulica

Inoltre sono state eseguite le osservazioni visive su tutte le barre provate nelle tesi precedenti [20,21] (Tabella 2.5).

Tabella 2.5 Prove di polarizzazione potenziostatica anodica effettuate nell'ambito di lavori di tesi precedenti [20,21] sulle quali è stata effettuata un'ulteriore osservazione.

ACCIAIO	CLORURI (vs massa cemento)	TEMPERATURA
316LN	5%	23°C
316LN	6%	23°C
XM-28	2%	23°C
XM-28	3%	23°C
XM-28	4%	23°C
XM-28	2%	30°C
XM-28	3%	30°C
XM-28	3%	40°C
23-04	2,7%	23°C
23-04	3%	40°C
23-04	4%	30°C
23-04	5%	23°C
23-04	5%	10°C
23-04	5%	40°C

2.3.2. Prove di ponding

Per le prova di corrosione con cloruri penetranti (ponding) è stato realizzato nell'ambito della tesi precedente [20,21] il provino di forma cilindrica a bicchiere (§2.2). Il provino è stato interamente immerso nella soluzione satura di $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con 15% in massa di NaCl . Nel recipiente contenente il provino e la soluzione, è stata inserita inoltre, una rete di titanio attivato (controlettrodo) per fare circolare la corrente ed è stato posizionato l'elettrodo di riferimento all'interno della cavità del provino stesso (Figura 2.8). Successivamente è stato misurato il potenziale di tutte le armature con un voltmetro e sono state tutte collegate tra di loro. Tramite un potenziostato si è imposto un potenziale pari a +200 mV vs SCE e sono state registrate nel tempo, attraverso un sistema di acquisizione dati, i valori di corrente delle 10 armature.

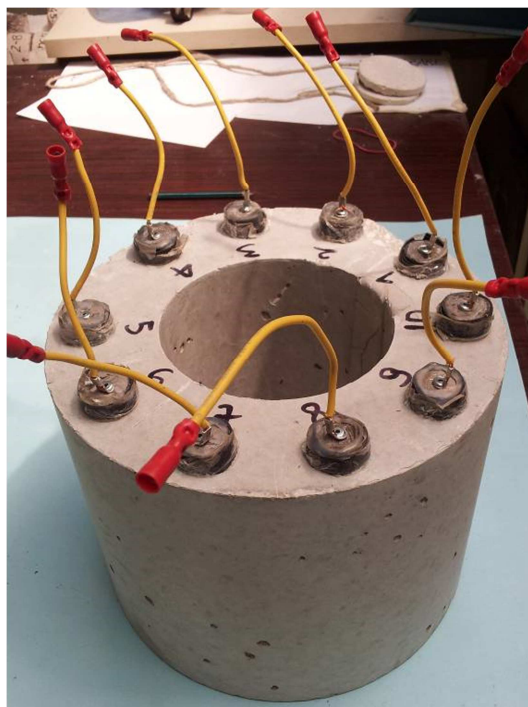


Figura 2.8 Immagine del provino dopo il confezionamento

2.3.3. Corrosione libera

Un altro aspetto, oggetto della ricerca, è il comportamento degli stessi acciai alle condizioni atmosferiche. Per far questo i provini armati con acciaio inossidabile, con cloruri aggiunti all'interno, sono stati esposti all'atmosfera di Milano.

Alcuni dei provini armati con acciaio inossidabile sono stati confezionati in un lavoro di tesi precedente [20,21]; sono riportati in *Tabella 2.6*.

Tabella 2.6 I provini esposti all'atmosfera di Milano, confezionati nell'ambito di lavoro di tesi precedenti [20,21].

Armatura	Conglomerato	Sale	Esposizione	Tenore di cloruri (% massa vs cemento)
23-04	Malta	CaCl_2	Atmosfera	3%, 3.5% e 5%
23-04	Calcestruzzo	CaCl_2	Atmosfera	4%
23-04	Calcestruzzo	CaCl_2	T=23°C U.R.75%	3% e 5%
XM-28	Calcestruzzo	CaCl_2	Atmosfera	3% e 4%
XM-28	Calcestruzzo	NaCl	Atmosfera	4% e 5%
316LN	Calcestruzzo	CaCl_2	Atmosfera	5% e 6%

Per quanto riguarda le nuove prove, sono state effettuate su provini confezionati con le armature e con le percentuali di cloruri riportati nella *Tabella 2.7*.

Tabella 2.7 I provini esposti all'atmosfera di Milano, confezionati nell'ambito di questo lavoro di tesi.

Armatura	Conglomerato	Sale	Condizioni	Tenore di cloruri (% massa vs cemento)
316LN	Calcestruzzo	CaCl ₂	Atmosfera	7%
304LN	Calcestruzzo	CaCl ₂	Atmosfera	4%
22-05	Calcestruzzo	CaCl ₂	Atmosfera	4% e 5%
XM-28	Calcestruzzo	CaCl ₂	Atmosfera	2%

La misura del potenziale di corrosione a cui si trovano le armature è stata eseguita con un voltmetro ad alta impedenza, al quale l'armatura è stata collegata al polo positivo, mentre l'elettrodo di riferimento al calomelano saturo (SCE) è stato collegato al polo negativo. La tensione letta dal voltmetro rappresenta il potenziale del metallo, misurato rispetto all'elettrodo di riferimento (Figura 2.9).

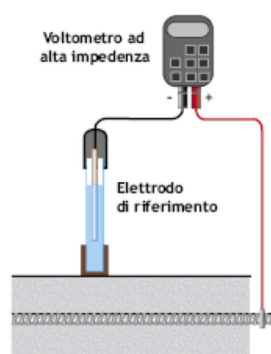


Figura 2.9 Misura di potenziale di una barra di armatura, mediante voltmetro ad alta impedenza

Per misurare la velocità di corrosione delle armature è stata eseguita la misura di polarizzazione lineare che, con una leggera alterazione delle condizioni di corrosione del metallo attraverso l'applicazione di una corrente esterna, consente di valutare la velocità di corrosione dell'armatura, senza modificare significativamente il suo potenziale; come controelettrodo si è utilizzata una rete in titanio attivato a contatto con il provino e un elettrodo al calomelano saturo come elettrodo di riferimento.

Per erogare la corrente si utilizza il potenziostato (Figura 2.10) che, grazie ad un circuito di retroazione, è in grado di imporre un determinato potenziale al metallo, facendo circolare la corrente necessaria per polarizzarlo a tale valore. La prova prevede di polarizzare il metallo, per 30 secondi, in un intervallo molto piccolo (± 10 mV) nell'intorno del suo potenziale di corrosione libera, al termine del periodo considerato il valore della corrente viene registrato e successivamente viene calcolata la velocità di corrosione

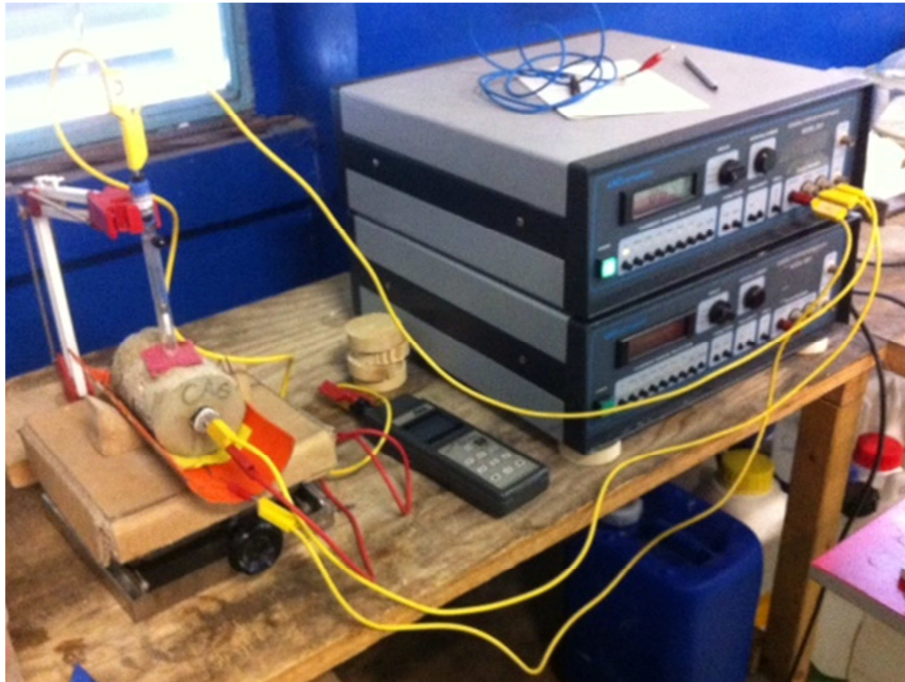


Figura 2.10 La prova di polarizzazione potenziostatica lineare.

2.3.4. Analisi del contenuto di cloruri

L'analisi del contenuto di cloruri è stata effettuata in due casi:

- per provini al termine della prova potenziostatica per determinare il contenuto di cloruri presenti a livello delle armature
- per provini sottoposti alla prova di corrosione libera per determinare la quantità dei cloruri rimasti
- per le porzioni della carota prelevata dal provino di ponding

La polvere ottenuta è stata pesata e quindi essiccata in forno a 105°C per 24 ore. Successivamente, dopo averla pesata, la polvere secca è stata sciolta in soluzione di 25 ml di acido nitrico e 50 ml di acqua distillata, e il tutto è stato portato ad ebollizione su una piastra elettrica. La soluzione così ottenuta è stata lasciata raffreddare all'interno di matracci ed è stata portata a volume noto pari a 100 ml. Successivamente sono stati prelevati 25 ml (in alcuni casi 10 ml) di soluzione, messi in un beaker, per valutare la concentrazione di cloruri nella soluzione, mediante titolazione (Figura 2.11) con AgNO_3 che reagisce con i cloruri per formare AgCl :

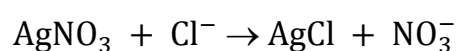




Figura 2.11 Titolatore con un beaker in cui è disciolta la polvere di calcestruzzo

Tramite il titolatore, è stato possibile determinare la concentrazione di cloruri disciolti nella soluzione (in ppm) e da questa si è ottenuta la quantità di cloruri nel calcestruzzo tramite la formula:

$$[Cl^-]_{CLS}^i = \frac{V_d \cdot ppm_{Cl^-}^i}{P^i} \quad (2.1)$$

$[Cl^-]_{CLS}^i$: percentuale di cloruri rispetto al calcestruzzo disciolto relativa alla polvere considerata [%];

V_d : volume disciolto sottoposto a titolazione [ml];

$ppm_{Cl^-}^i$: parti per milione di cloruri della polvere disciolta in soluzione;

P^i : peso netto secco della polvere [g].

Infine, conoscendo il dosaggio di cemento nel calcestruzzo, è stato possibile stimare il contenuto di cloruri come percentuale di massa rispetto al calcestruzzo con la seguente formula:

$$[Cl^-]_{CEM}^i = \frac{[Cl^-]_{CLS}^i}{d_c / \delta} \quad (2.2)$$

Dove:

$[Cl^-]_{CEM}^i$: percentuale di cloruri rispetto al cemento disciolto relativa alla polvere considerata [%];

d_c : dosaggio di cemento nella miscela [kg/m^3];

δ : densità del calcestruzzo considerato [kg/m^3];

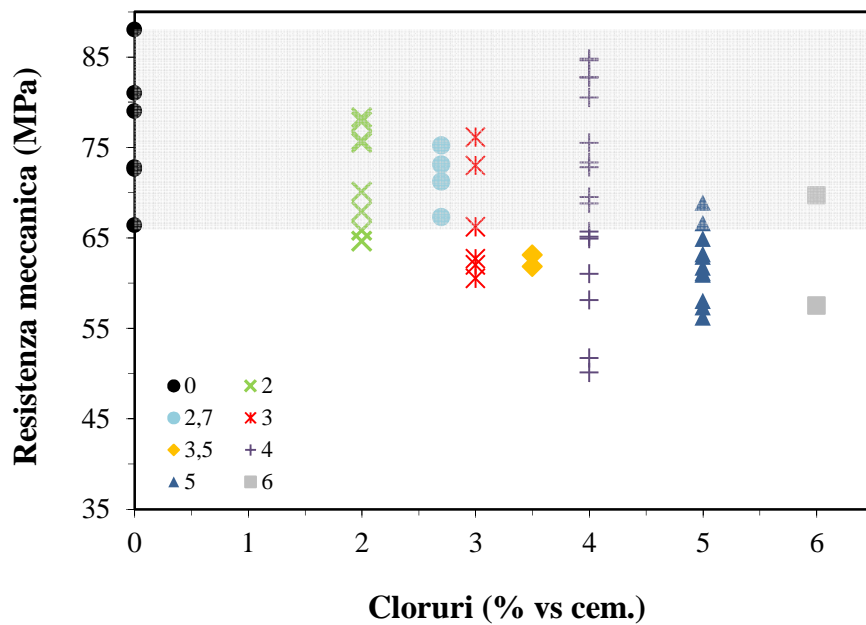


Figura 3.2 Risultati delle prove di resistenza meccanica effettuate su cubi a diversi tenori di cloruri, stagionati per 28 giorni in camera di stagionatura ($T=23^{\circ}\text{C}$ e U.R. > 95%).

3.2 Prove di polarizzazione potenziostatica anodica

In seguito sono riportati i risultati delle prove di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV vs SCE e l'osservazione visiva delle barre d'armatura svolta a fine prova. La prova solitamente è stata effettuata in un intervallo di tempo pari a 24 ore. Per verificare se i micro-pit osservati con una lente sono in grado di propagare avendo a disposizione più tempo è stata proposta una prova di maggiore (6 giorni e 13 giorni). Infine si riportano i risultati delle analisi per la verifica del contenuto di cloruri.

3.2.1 Prove di 24h

Queste prove sono state eseguite a 23°C sulle armature in acciaio inossidabile tipo 304LN, 316LN, 22-05 e XM-28; a 30°C sulle armature tipo 23-04 e a 40°C su quelle tipo 22-05.

304LN

Per l'acciaio 304LN sono state effettuate tre prove, due al 4% (di cui la seconda è stata effettuata per la verifica dei risultati della prova precedente, su provini confezionati in contemporanea a quelli usati anche per le prove di durata maggiore della polarizzazione) ed una al 5%. Tutte le barre presentano diversi tipi di imperfezioni superficiali (*Tabella 3.1-3.3*). In particolare quelle maggiormente riscontrate sono state le scalfitture e le deformazioni, mentre le macchie di ruggine si sono verificate solo su due campioni C4-AA-05 e C4-AB-19). Nelle prove con 4% di cloruri aggiunti all'impasto, il potenziale di libera corrosione (*Figura 3.3, Figura 3.8*) presenta valori che variano tra -90 e -270 mV vs SCE. Tutte le armature evidenziano una densità di corrente simile (*Figura 3.4, Figura 3.9*) e andamento decrescente nelle 24 ore fino ad un valore pari a circa 1 mA/m². In entrambe le prove non si sono rilevati inneschi su nessuna delle armature alla rottura dei provini; confermato anche dal potenziale di depolarizzazione superiore a -150 mV vs SCE. A distanza di 7 giorni la prima serie ha manifestato la presenza di micro-pit su 6 barre e la seconda serie su 4 barre. Per tutte e due le prove i cloruri rilevati tramite titolazione corrispondono alla quantità aggiunta nella fase di getto; i risultati ottenuti su 4 campioni prelevati su 4 provini differenti (C4-AA-02, C4-AA-07, C4-AA-08, C4-AB-12) hanno fornito un contenuto di cloruri compreso tra 3.9% e 4.2%.

Per quanto riguarda la prova con contenuto di cloruri pari a 5% i potenziali di libera corrosione (*Figura 3.13*) mostrano i valori tra -250 e -330 mV vs SCE, inferiori quindi rispetto a quelli rilevati nelle prove al 4%. Tuttavia anche in questo caso, l'andamento della densità di corrente (*Figura 3.14*) è decrescente nel tempo; solo per l'armatura C5-AA-09 dopo circa 3 ore dall'inizio della prova si osserva un temporaneo aumento della densità di corrente che dopo poche ore si assesta nuovamente sui valori assunti dalle altre barre al termine delle 24 ore, tutte come per 4% pari a 1 mA/m². L'osservazione visiva svolta dopo la demolizione dei provini riportata nella *Tabella 3.3* e nella *Figura 3.17* mostra che sull'armatura del provino C5-AA-09 è presente un innesco chiaramente rilevabile ad occhio nudo (di dimensione >0,5 mm). L'osservazione con l'ausilio della lente ha permesso inoltre di rilevare la presenza di un micro-pit sull'armatura C5-AA-02. Dopo 7 giorni si sono verificati su tutte e 7 armature.

316LN

Nella prova svolta con barre in acciaio 316LN, con 7% di cloruri rispetto alla massa del cemento (*Tabella 3.4, Figura 3.18-3.23*) il potenziale di libera corrosione (*Figura 3.18*) di tutte le armature presenta valori superiori a -200 mV vs SCE; solo l'armatura contenuta nel provino C7-A2-02 presenta un potenziale inferiore e pari a -240 mV vs SCE. In seguito alla polarizzazione a +200 mV vs SCE si osserva che inizialmente la densità di corrente rilevata aveva andamento decrescente e dopo i primi 15 minuti si è verificato il primo aumento per il campione C7-A2-02, seguito successivamente dai campioni C7-A2-09, C7-A2-10 e C7-A2-11. Al termine delle 24 ore la densità assunta da questi provini è stata superiore a 80 mA/m²; l'innescò nelle armature dei provini C7-A2-02 e C7-A2-09 è confermato anche dal potenziale durante le 4 ore di depolarizzazione in cui si sono misurati valori inferiori di -400mV vs SCE per il primo e prossimi a -300 mV vs SCE per il secondo a fine prova. Le altre armature invece non hanno mostrato cambiamenti nell'andamento della densità di corrente nel tempo e anche i valori di potenziale dopo la depolarizzazione non indicano le condizioni d'innescò. Il successivo esame visivo (*Tabella 3.4*), effettuato subito dopo la rottura dei provini ha mostrato la presenza di attacchi penetranti visibili ad occhio nudo su tutte le barre su cui si era osservato l'incremento di densità di corrente. Inoltre questo tipo di attacco è stato individuato anche sull'armatura n°4. Per questa prova l'osservazione visiva a 1 giorno non è stata effettuata. Dopo qualche settimana dalla rottura dei provini, invece, le armature sono state nuovamente analizzate ed è stata osservata la presenza di ulteriori attacchi di dimensioni molto piccole (minore di 0,5 mm) distinguibili chiaramente con l'ausilio di una lente o tramite il visore stereoscopico con il quale sono state misurate in alcuni casi le dimensioni massime dei attacchi. A titolo d'esempio in *Figura 3.23* si riporta un dettaglio di quelli relativi ai campioni C7-A2-04 e C7-A2-10. Per quanto riguarda la percentuale di cloruri presente nell'impasto, la prova di titolazione ha mostrato un contenuto leggermente inferiore rispetto a quello aggiunto nei campioni prelevati.

22-05

Le *Figure 3.24-3.28* e la *Tabella 3.5* riportano gli esiti delle prove eseguite sull'acciaio 22-05 in calcestruzzo al 5% di cloruri in massa rispetto cemento. Il potenziale di libera corrosione per tutte le armature è compreso tra -100 e -200 mV vs SCE. Per un problema di acquisizione dati, sono stati registrate solo le correnti rilevate nell'ultima ora di polarizzazione. Tutte le armature hanno i valori di densità di corrente compresi tra 6 e 8 mA/m² (*Figura 3.26*). Al termine delle 4 ore di depolarizzazione tutti potenziali hanno raggiunto valori circa di 0 mV vs SCE. In *Tabella 3.5* e *Figura 3.28* sono riportate le osservazioni visive effettuate a fine prova sulle barre. Su nessuna di queste sono stati riscontrati inneschi di corrosione visibili ad occhio nudo. Inoltre è stata effettuata un'osservazione visiva, a distanza di qualche settimana, con l'utilizzo della lente di ingrandimento. Per questo getto, in particolare, il controllo dello stato delle armature è stato fatto con intervalli di tempo regolari. Come si può osservare il fenomeno di micro-pit è stato avvistato su 9 armature su 10.

XM-28

Su questo acciaio si sono effettuate prove aggiungendo il 2% di cloruri rispetto alla massa di cemento. Le *Figure 3.29-3.33* e la *Tabella 3.6* riportano i risultati ottenuti. L'andamento della corrente di polarizzazione è decrescente (*Figura 3.30*) e la densità di corrente tra 1 e 14 ore è prossima a 10 mA/m^2 per decrescere fino a 2 mA/m^2 tra 12 e 24 ore ed infine si porta a circa su 1 mA/m^2 al termine della prova potenziostatica. Anche la depolarizzazione (*Figura 3.32*) e l'osservazione visiva a fine prova non evidenziano la presenza di inneschi di corrosione sulla superficie delle armature, nonostante la presenza di imperfezioni. Un giorno dopo l'estrazione delle barre dal calcestruzzo si è osservata la presenza di micro-pit (minore di 0,5 mm), non rilevati nell'osservazione svolta precedentemente su due barre; dopo più di 7 giorni dall'estrazione di queste il numero di armature interessate a questo fenomeno corrosivo è aumentato a 5. Il contenuto di cloruri rilevato in un campione di calcestruzzo prelevato vicino l'armatura del provino C2-X-9 ha rilevato un contenuto di cloruri pari a 1,7% nel campione.

23-04

Le prove sull'acciaio 23-04 sono state effettuate a 30°C (*Tabella 3.7*, *Figure 3.34 - 3.38*) e in provini di calcestruzzo confezionati con 5% di cloruri rispetto alla massa di cemento. Dalla *Figura 3.34* si osserva che i potenziali di libera corrosione sono superiori a -150 mV vs SCE per tutti campioni, questo indica che la corrosione non si è innescata, a causa della temperatura. L'andamento della densità di corrente (*Figura 3.35 e Figura 3.36*) durante la prova è stato regolare e decrescente, fino a portarsi ai valori pari a circa 8 mA/m^2 al termine della polarizzazione. Al termine delle 4 ore di depolarizzazione i potenziali raggiunti erano maggiori di -50 mV vs SCE . L'osservazione visiva cui i risultati sono riportati nella *Tabella 3.7* e nella *Figura 3.38*, evidenzia la presenza di un attacco superficiale chiaramente osservabile ad occhio nudo di dimensione maggiore a 0,5 mm, sulla barra del provino C5-30-5. L'osservazione visiva con una lente è stata effettuata qualche settimana dopo la rottura dei provini dalla quale si è verificato che tutte le armature presentavano dei micropit. Durante la verifica del contenuto di cloruri svolta su 3 campioni di calcestruzzo prelevati dai provini C5-30-02, C5-30-05 e C5-30-10 si è rilevato un contenuto compreso tra 4,1 e 4,5%, leggermente inferiore rispetto la quantità aggiunta nella fase di getto.

22-05

Le prove a 40°C sono state eseguite sulle armature in acciaio inossidabile di tipo 22-05. Questa prova è stata effettuata per poter valutare, rispetto alla prova a 23°C descritta in precedenza, se l'aumento della temperatura provoca l'innescò della corrosione per questo tipo di acciaio. Dalla *Figura 3.39* si può osservare come il potenziale di libera corrosione assume valori superiori a -200 mV vs SCE per tutte le barre. In seguito alla la densità di corrente misurata a 24 ore era 10 mA/m^2 , analoga a quella rilevata nelle prove a 23°C . L'osservazione visiva svolta dopo la demolizione, ad occhio nudo, non ha rilevato attacchi evidenti (*Tabella 3.8*), con utilizzo di una lente di ingrandimento, si sono riscontrati micro-pit su 5 armature su 10 (C5-DX-01, -02, -04, -06 e -08).

304LN – 4%CaCl₂ – 1° prova

Tabella 3.1 Osservazione della superficie delle armature di tipo 304LN effettuata prima della prova e in seguito alla demolizione dei provini, in calcestruzzo con 4% di cloruri (CaCl₂), al termine del periodo di polarizzazione (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; “-” = non si è evidenziato nulla; “ ” = non è stata effettuata).

Provino	Osservazione pre-prova				Osservazione post-prova			Osservazione post-prova a lungo termine	
	R	S	B	D	N° pit	Dim. max pit (mm)	Tipo di attacco	N° micropit	
								1g	≥7g
C4-AA-01	-	X	X	X	-	-	-	-	-
C4-AA-02	-	X	-	X	-	-	-	-	-
C4-AA-03	-	X	X	X	-	-	-	1	1
C4-AA-04	-	X	-	X	-	-	-	1	1
C4-AA-05	X	X	-	X	-	-	-	1	3
C4-AA-06	-	X	-	X	-	-	-	-	-
C4-AA-07	-	X	-	X	-	-	-	-	2
C4-AA-08	-	X	X	X	-	-	-	-	-
C4-AA-09	-	X	X	X	-	-	-	-	1
C4-AA-10	-	X	X	X	-	-	-	1	2

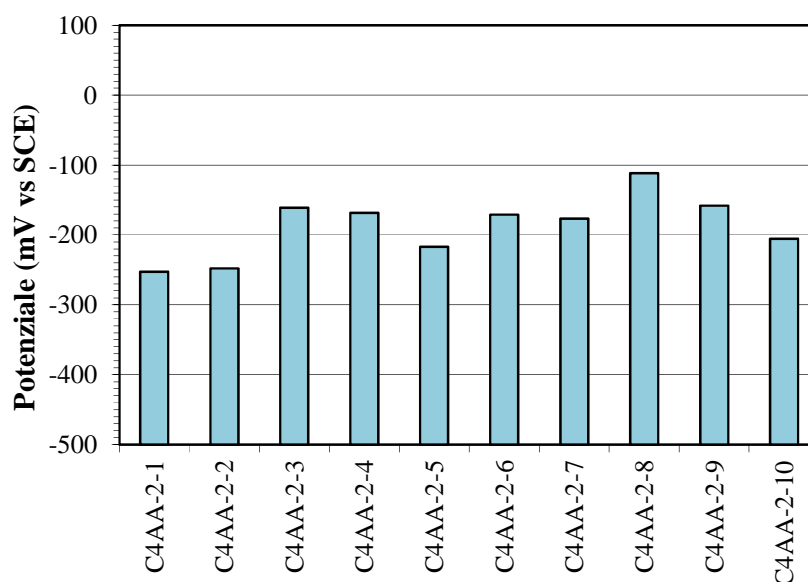


Figura 3.3 Potenziale di corrosione libera delle armature di tipo 304LN nei provini in calcestruzzo con 4% di cloruri (CaCl₂) in massa rispetto al cemento, prima dell'avvio della prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE (T = 23°C).

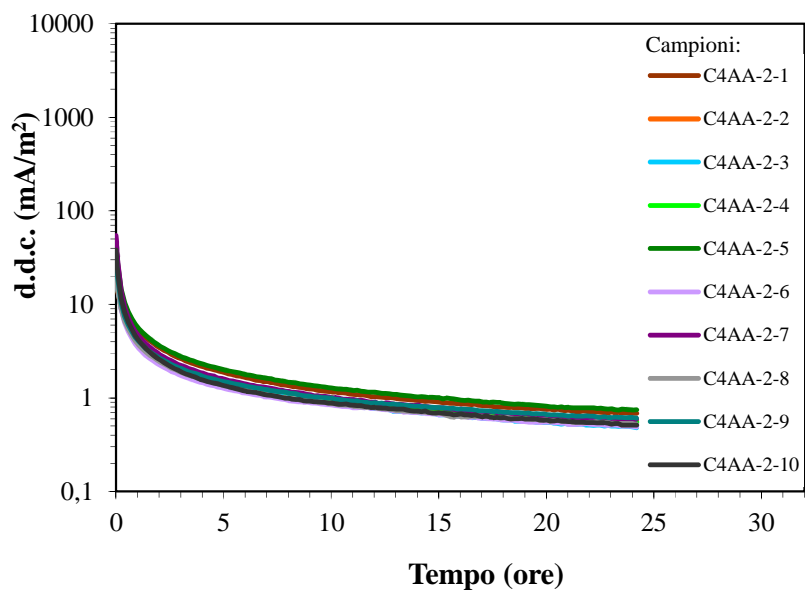


Figura 3.4 Andamento della densità di corrente di polarizzazione delle armature di tipo 304LN nei provini in calcestruzzo con 4% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, durante la prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

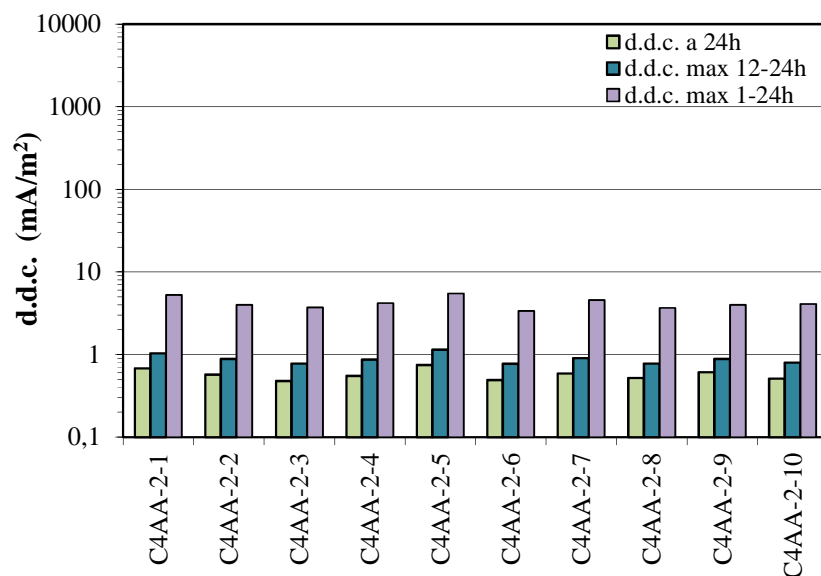


Figura 3.5 Confronto densità di corrente di polarizzazione delle armature di tipo 304LN nei provini in calcestruzzo con 4% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, durante la prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

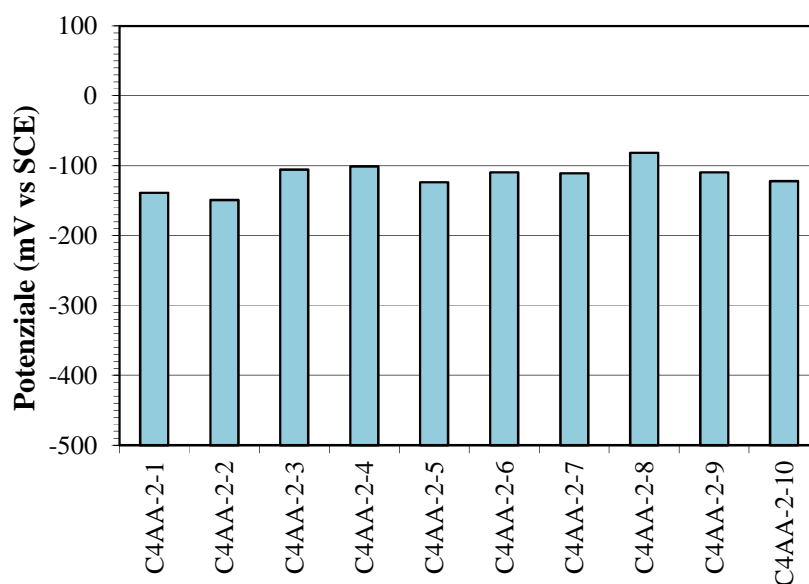


Figura 3.6 Potenziale di corrosione libera delle armature di tipo 304LN nei provini in calcestruzzo con 4% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, dopo la depolarizzazione di 4 ore successiva alla prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

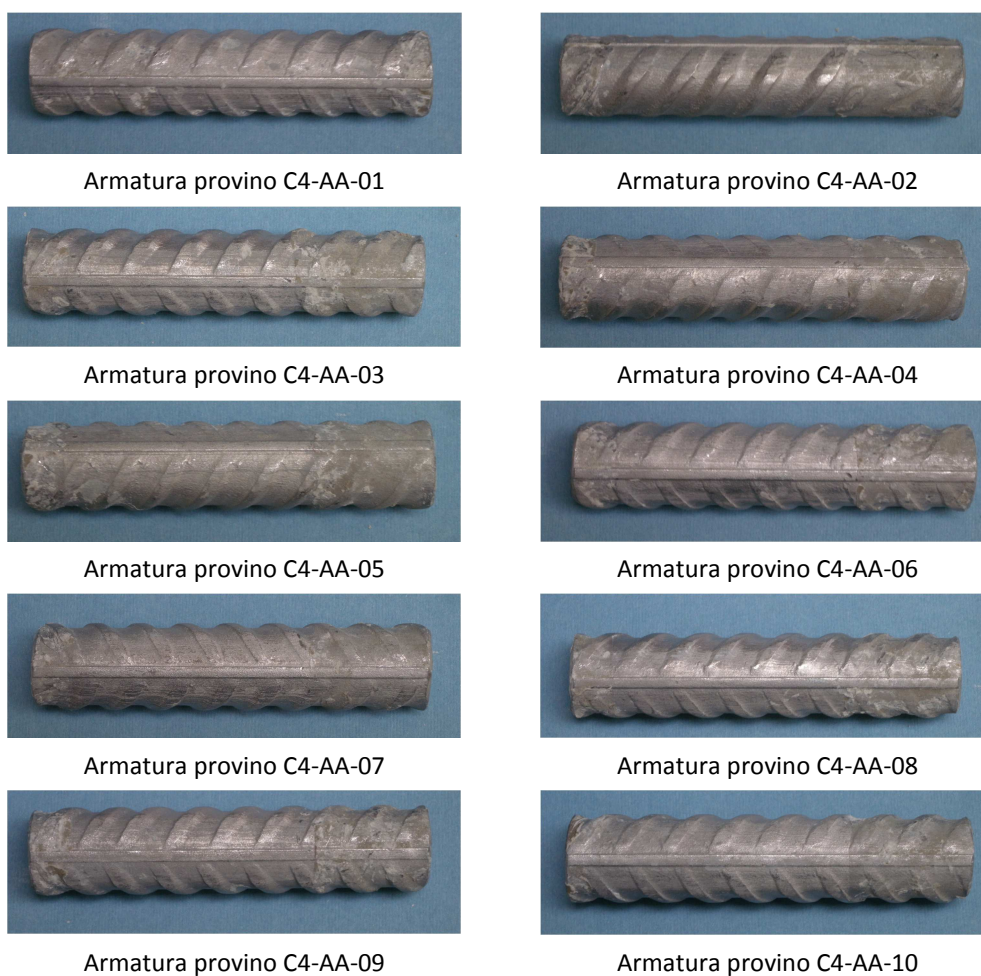


Figura 3.7 Armature estratte dai provini di calcestruzzo con 4% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento al termine delle prove di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

304LN - 4%CaCl₂ - 2° prova

Tabella 3.2 Osservazione della superficie delle armature di tipo 304LN effettuata prima della prova e in seguito alla demolizione dei provini, in calcestruzzo con 4% di cloruri (CaCl₂), al termine del periodo di polarizzazione (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; "-" = non si è evidenziato nulla; " " = non è stata effettuata).

Provino	Osservazione pre-prova				Osservazione post-prova			Osservazione post-prova a lungo termine	
	R	S	B	D	N° pit	Dim. max pit (mm)	Tipo di attacco	N° micropit	
								1g	≥7g
C4-AB-12	-	X	-	X	-	-	-	-	-
C4-AB-13	-	X	-	-	-	-	-	-	6
C4-AB-14	-	X	-	X	-	-	-	-	1
C4-AB-15	-	X	X	X	-	-	-	-	-
C4-AB-16	-	X	X	X	-	-	-	1	4
C4-AB-17	-	X	-	X	-	-	-	-	-
C4-AB-18	-	X	-	X	-	-	-	-	-
C4-AB-19	X	X	-	X	-	-	-	-	3
C4-AB-20	-	X	-	X	-	-	-	1	2
C4-AB-21	-	X	-	X	-	-	-	-	3

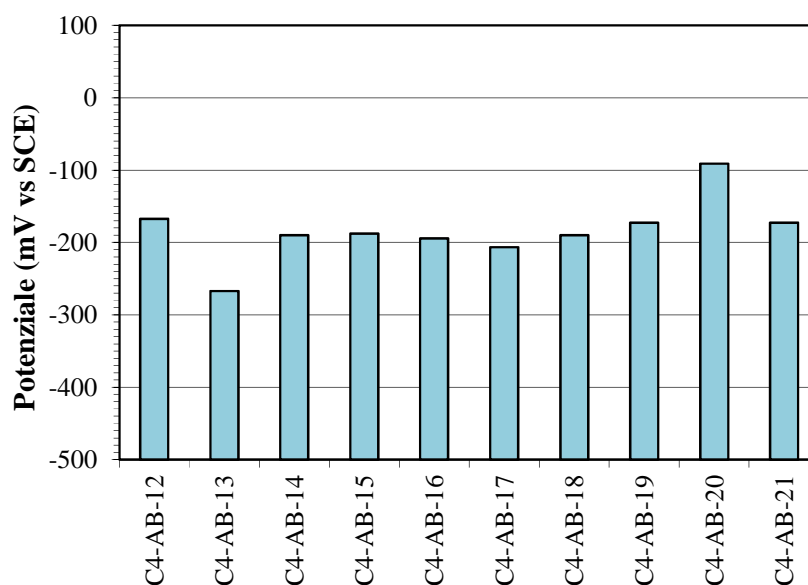


Figura 3.8 Potenziale di corrosione libera delle armature di tipo 304LN nei provini in calcestruzzo con 4% di cloruri (CaCl₂) in massa rispetto al cemento, prima dell'avvio della prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE (T = 23°C).

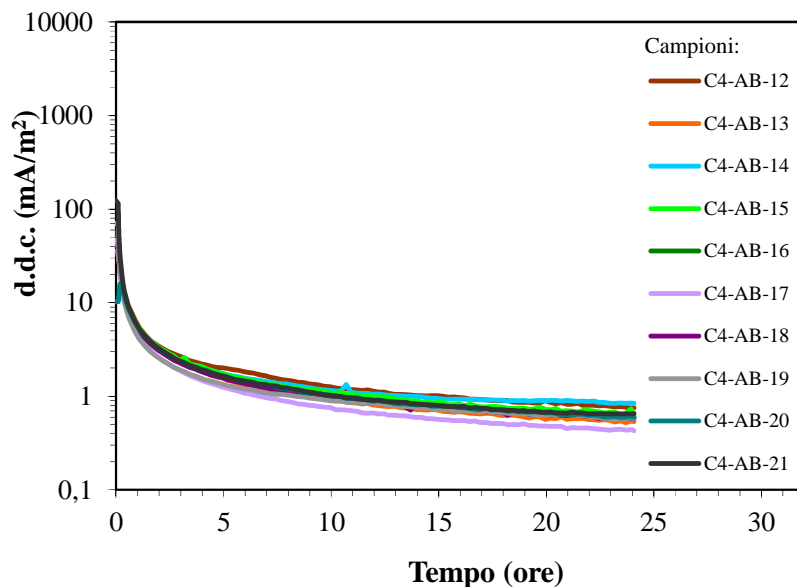


Figura 3.9 Andamento della densità di corrente di polarizzazione delle armature di tipo 304LN nei provini in calcestruzzo con 4% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, durante la prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

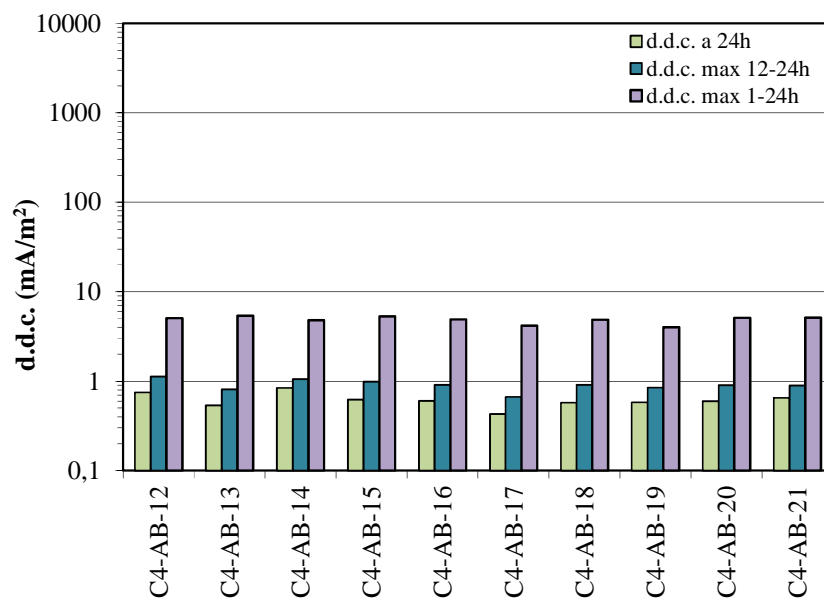


Figura 3.10 Confronto densità di corrente di polarizzazione delle armature di tipo 304LN nei provini in calcestruzzo con 4% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, durante la prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

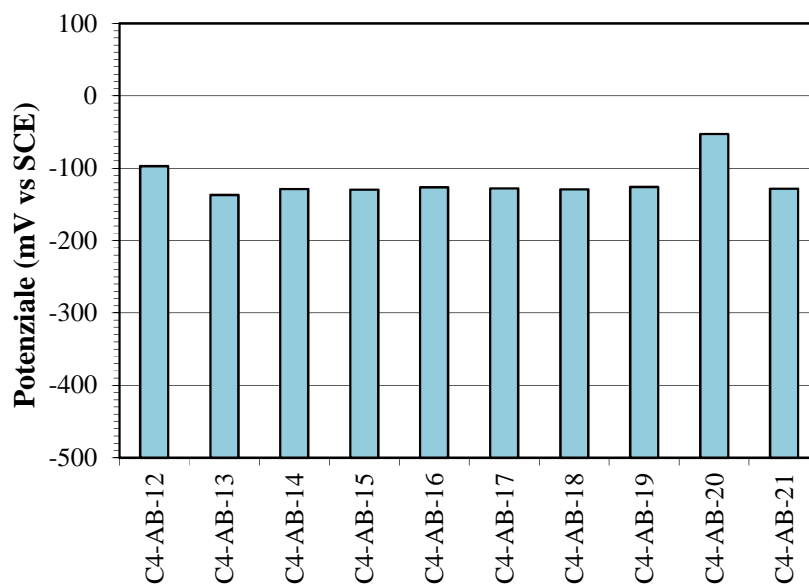


Figura 3.11 Potenziale di corrosione libera delle armature di tipo 304LN nei provini in calcestruzzo con 4% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, dopo la depolarizzazione di 4 ore successiva alla prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

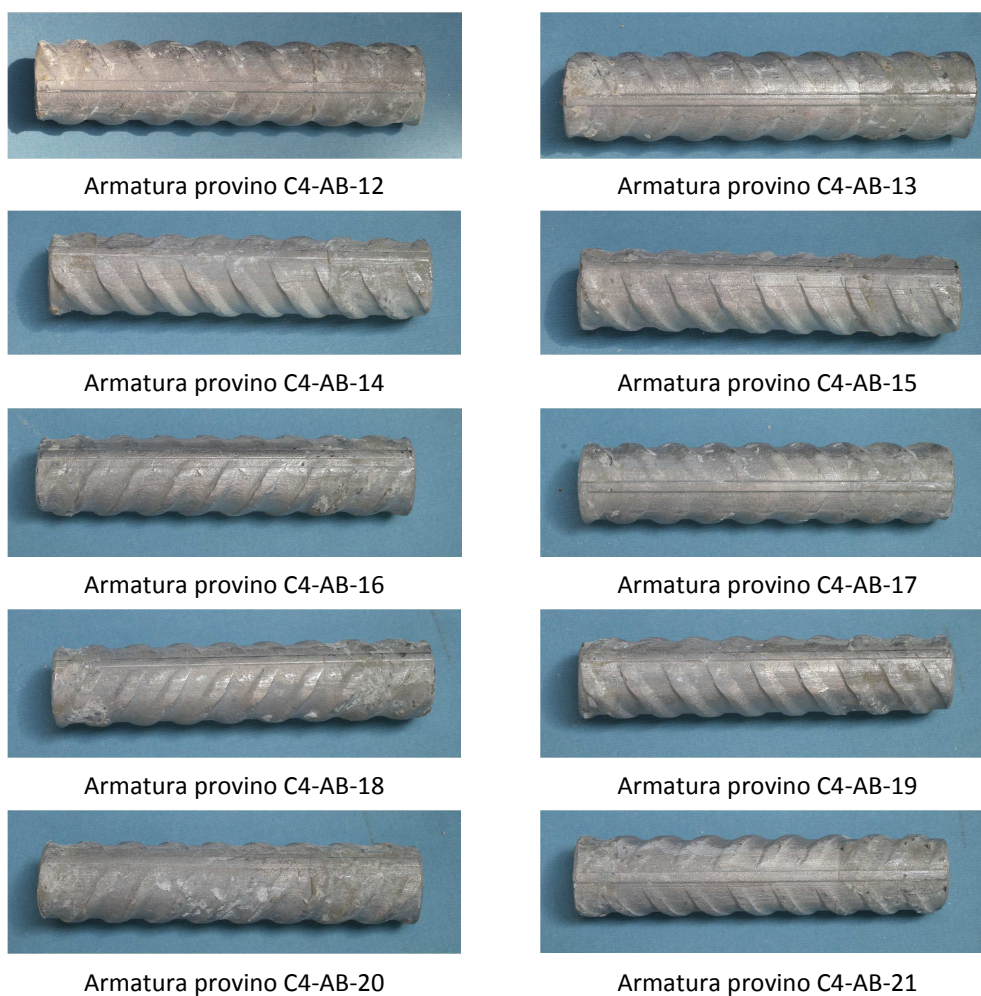


Figura 3.12 Armature estratte dai provini di calcestruzzo con 4% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento al termine delle prove di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

304LN – 5%CaCl₂

Tabella 3.3 Osservazione della superficie delle armature di tipo 304LN effettuata prima della prova e in seguito alla demolizione dei provini, in calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl₂), al termine del periodo di polarizzazione (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; “-” = non si è evidenziato nulla; “ ” = non è stata effettuata).

Provino	Osservazione pre-prova				Osservazione post-prova			Osservazione post-prova a lungo termine	
	R	S	B	D	N° pit	Dim. max pit (mm)	Tipo di attacco	N° micropit	
								1g	≥7g
C5-AA-01	-	X	X	X	-	-	-	-	1
C5-AA-02	-	X	-	X	1	<0,5	Micropit	1	3
C5-AA-03	-	X	X	X	-	-	-	-	1
C5-AA-04	-	X	-	X	-	-	-	-	-
C5-AA-05	-	X	X	X	-	-	-	-	1
C5-AA-06	-	X	-	X	-	-	-	-	-
C5-AA-07	-	X	X	X	-	-	-	-	2
C5-AA-08	-	X	-	X	-	-	-	-	-
C5-AA-09	-	X	-	X	1	>0,5	Penetrante	1	4
C5-AA-10	-	X	-	X	-	-	-	-	3

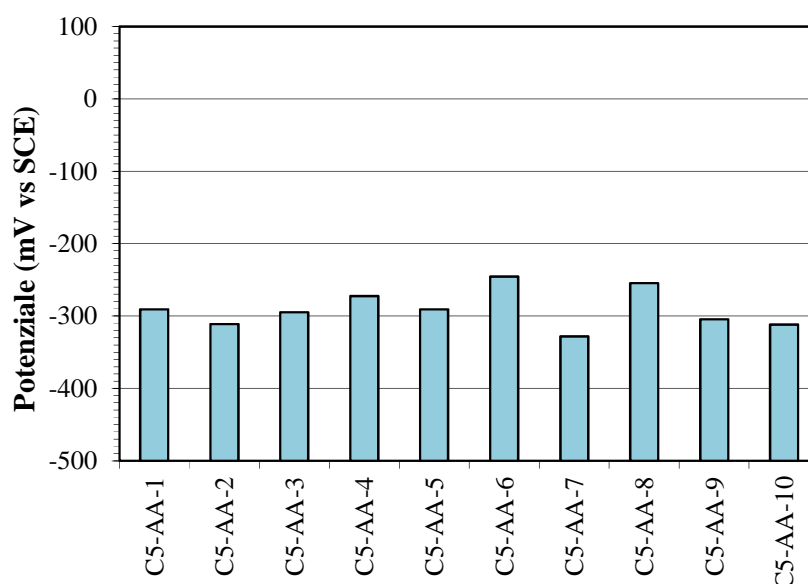


Figura 3.13 Potenziale di corrosione libera delle armature di tipo 304LN nei provini in calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl₂) in massa rispetto al cemento, prima dell'avvio della prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE (T = 23°C).

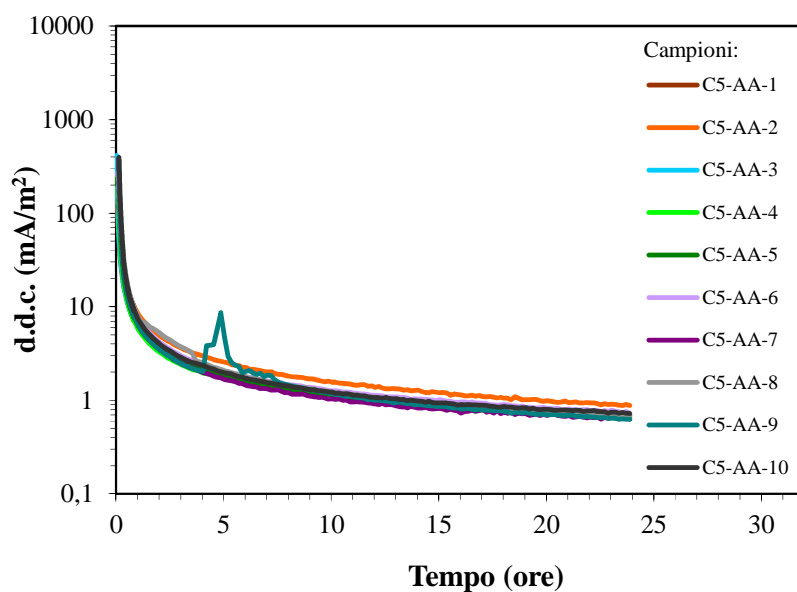


Figura 3.14 Andamento della densità di corrente di polarizzazione delle armature di tipo 304LN nei provini in calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, durante la prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

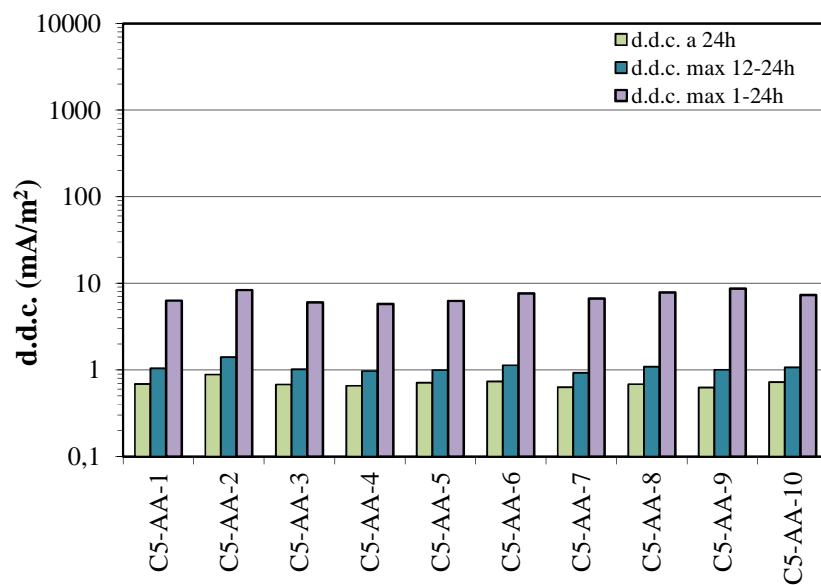


Figura 3.15 Confronto densità di corrente di polarizzazione delle armature di tipo 304LN nei provini in calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, durante la prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

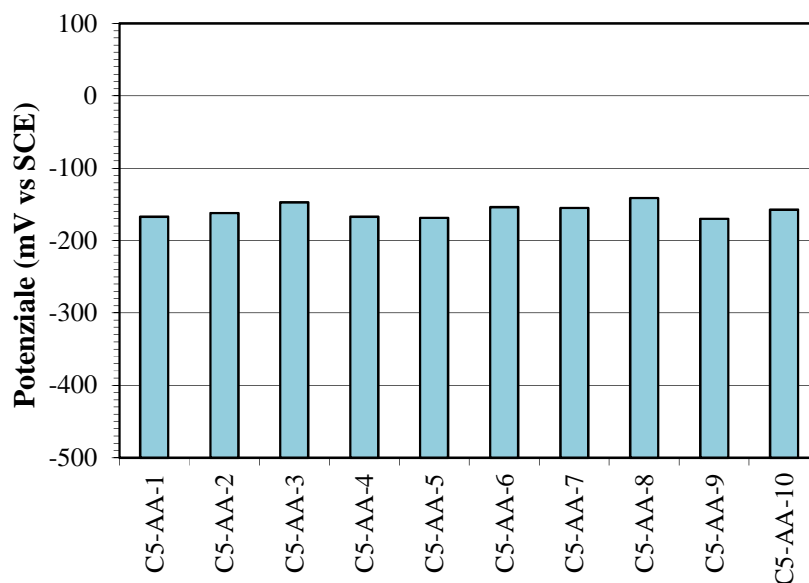


Figura 3.16 Potenziale di corrosione libera delle armature di tipo 304LN nei provini in calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, dopo la depolarizzazione di 4 ore successiva alla prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).



Figura 3.17 Armature estratte dai provini di calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento al termine delle prove di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

316LN – 7%CaCl₂

Tabella 3.4 Osservazione della superficie delle armature di tipo 316LN effettuata prima della prova e in seguito alla demolizione dei provini, in calcestruzzo con 7% di cloruri (CaCl₂), al termine del periodo di polarizzazione (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; “-” = non si è evidenziato nulla; “ ” = non è stata effettuata).

Provino	Osservazione pre-prova				Osservazione post-prova			Osservazione post-prova a lungo termine	
	R	S	B	D	N° pit	Dim. max pit (mm)	Tipo di attacco	N° micropit	
								1g	>7g
C7A-2-01	-	X	X	X	-	-	-		>5
C7A-2-02	-	X	X	X	>5	3	Penetrante		>5
C7A-2-03	X	X	X	X	-	-	-		>5
C7A-2-04	-	X	X	X	1	<0,5	Micropit		>5
C7A-2-06	X	-	-	X	-	-	-		>5
C7A-2-07	-	X	X	X	-	-	-		>5
C7A-2-08	-	X	X	X	-	-	-		>5
C7A-2-09	X	-	X	X	>5	4	Penetrante		>5
C7A-2-10	X	X	X	X	3	>0.5	Penetrante		>5
C7A-2-11	-	X	-	X	4	1.5	Penetrante		>5

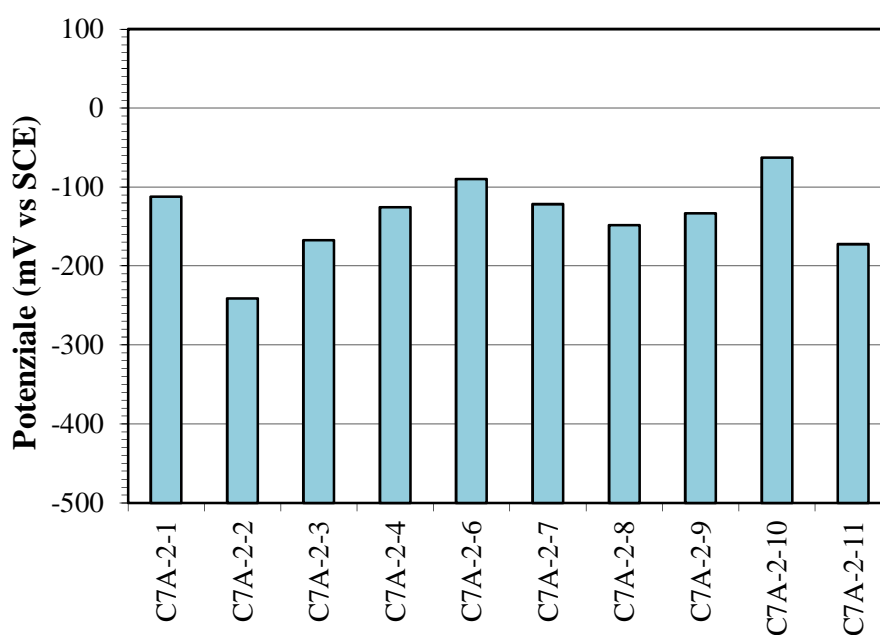


Figura 3.18 Potenziale di corrosione libera delle armature di tipo 316LN nei provini in calcestruzzo con 7% di cloruri (CaCl₂) in massa rispetto al cemento, prima dell'avvio della prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE (T = 23°C).

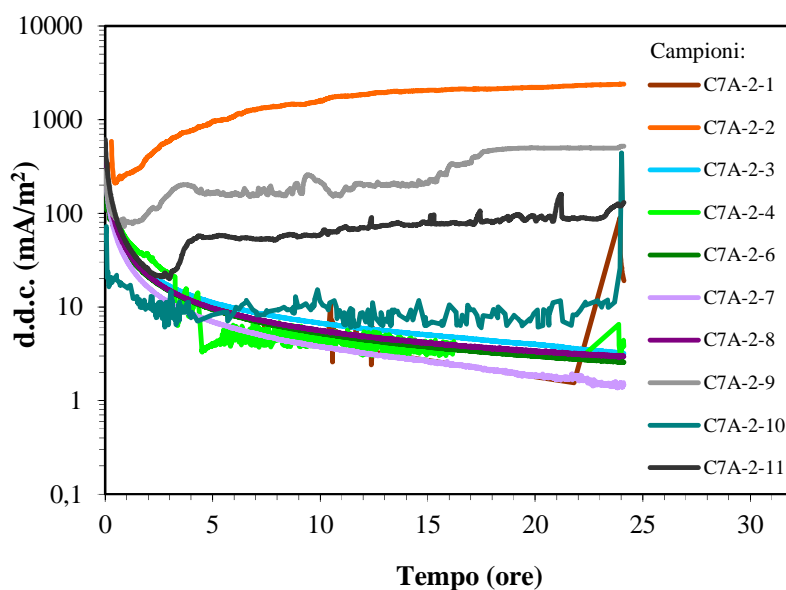


Figura 3.19 Andamento della densità di corrente di polarizzazione delle armature di tipo 316LN nei provini in calcestruzzo con 7% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, durante la prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

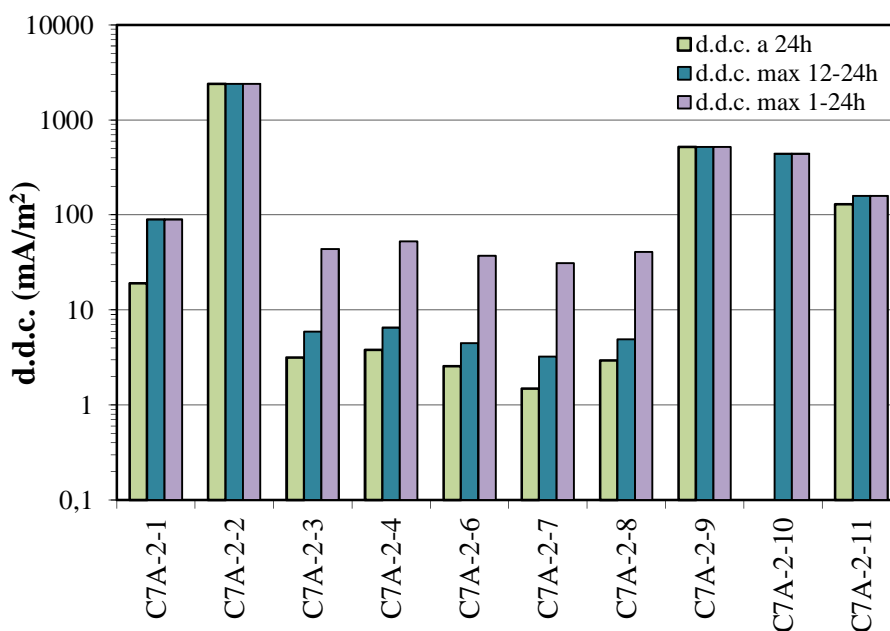


Figura 3.20 Confronto densità di corrente di polarizzazione delle armature di tipo 316LN nei provini in calcestruzzo con 7% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, durante la prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

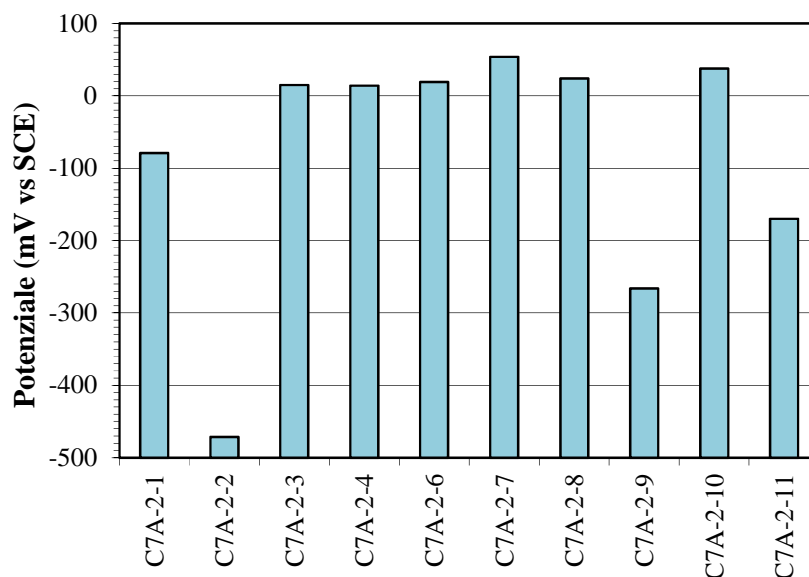


Figura 3.21 Potenziale di corrosione libera delle armature di tipo 316LN nei provini in calcestruzzo con 7% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, dopo la depolarizzazione di 4 ore successiva alla prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

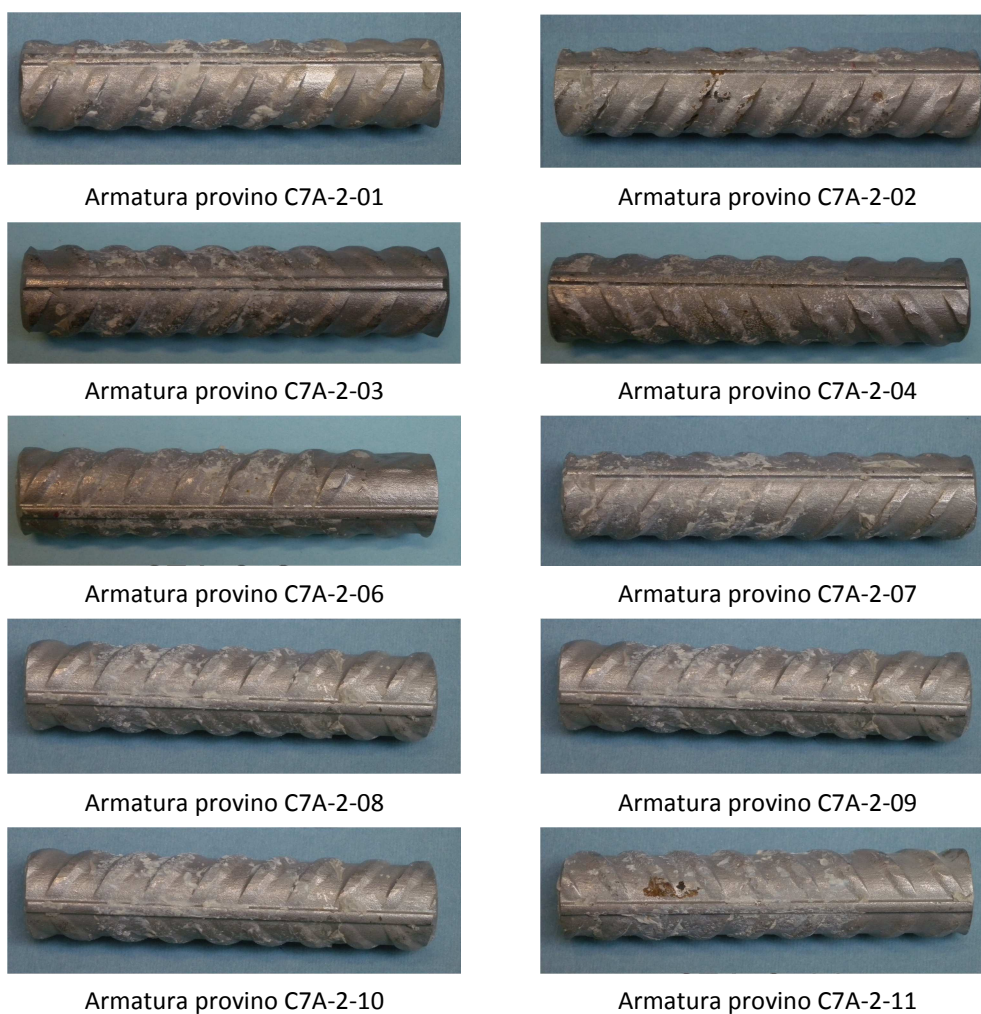


Figura 3.22 Armature estratte dai provini di calcestruzzo con 7% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento al termine delle prove di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

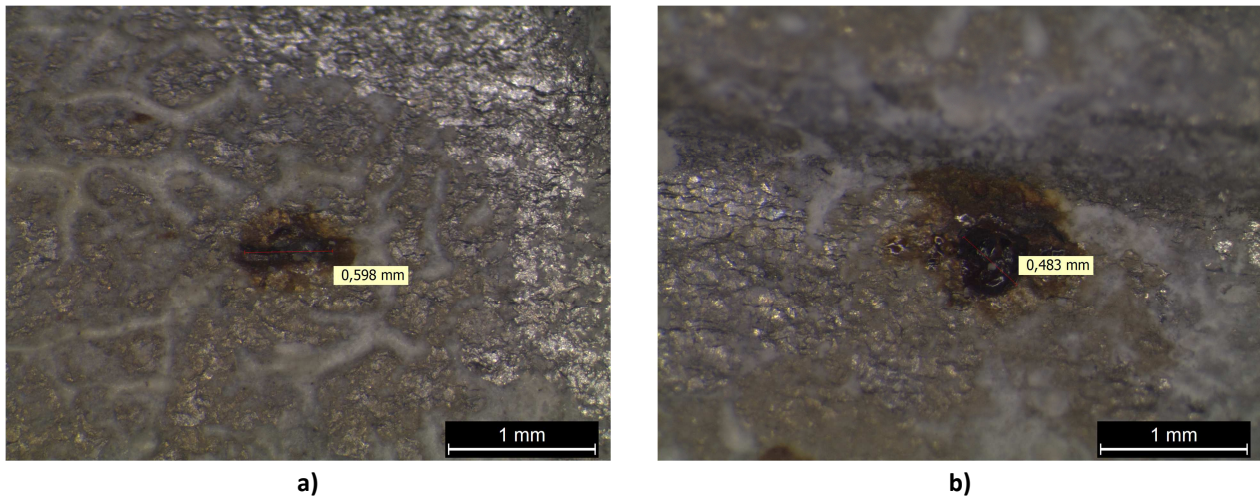


Figura 3.23 Esempio di un principio di innesco di corrosione rilevato, mediante l'ausilio di un visore stereoscopico, sulla superficie della barra in tempi successivi alle prove di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE: innesco ingrandito 25 volte, con misura della dimensione massima (a) C7-A2-4 (b) C7-A2-10

22-05 – 5%CaCl₂

Tabella 3.5 Osservazione della superficie delle armature di tipo 22-05 effettuata prima della prova e in seguito alla demolizione dei provini, in calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl₂), al termine del periodo di polarizzazione (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; “-” = non si è evidenziato nulla; “ ” = non è stata effettuata).

Provino	Osservazione pre-prova				Osservazione post-prova			Osservazione post-prova a lungo termine	
	R	S	B	D	N° pit	Dim. max pit (mm)	Tipo di attacco	N° micropit	
								1g	>7g
C5- DX-01	-	-	X	-	-	-	-	1	
C5- DX-02	-	-	X	-	-	-	-	-	
C5- DX-03	-	-	X	-	-	-	-	3	
C5- DX-04	X	-	X	-	-	-	-	3	
C5- DX-05	-	-	X	-	-	-	-	2	
C5- DX-06	X	-	X	-	-	-	-	3	
C5- DX-07	-	-	X	-	-	-	-	4	
C5- DX-08	X	-	X	-	-	-	-	1	
C5- DX-09	-	-	X	-	-	-	-	5	
C5- DX-10	-	-	X	-	-	-	-	2	

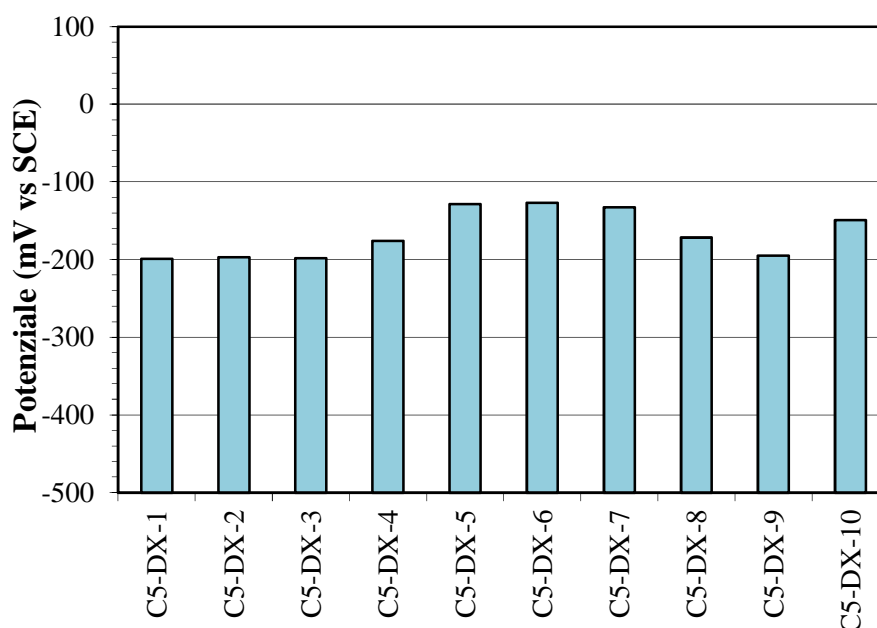


Figura 3.24 Potenziale di corrosione libera delle armature di tipo 22-05 nei provini in calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl₂) in massa rispetto al cemento, prima dell'avvio della prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE (T = 23°C).

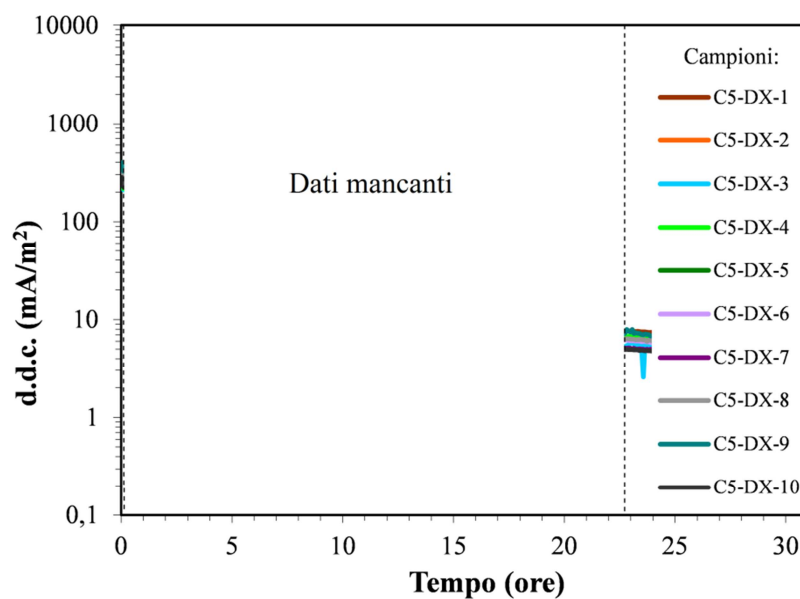


Figura 3.25 Andamento della densità di corrente di polarizzazione delle armature di tipo 22-05 nei provini in calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, durante la prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

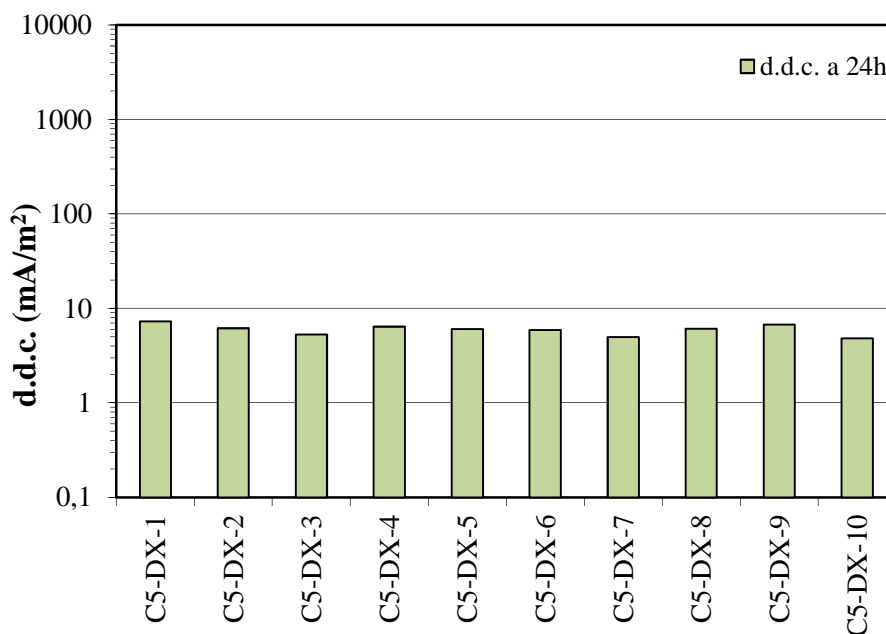


Figura 3.26 Densità di corrente di polarizzazione delle armature di tipo 22-05 nei provini in calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, durante la prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

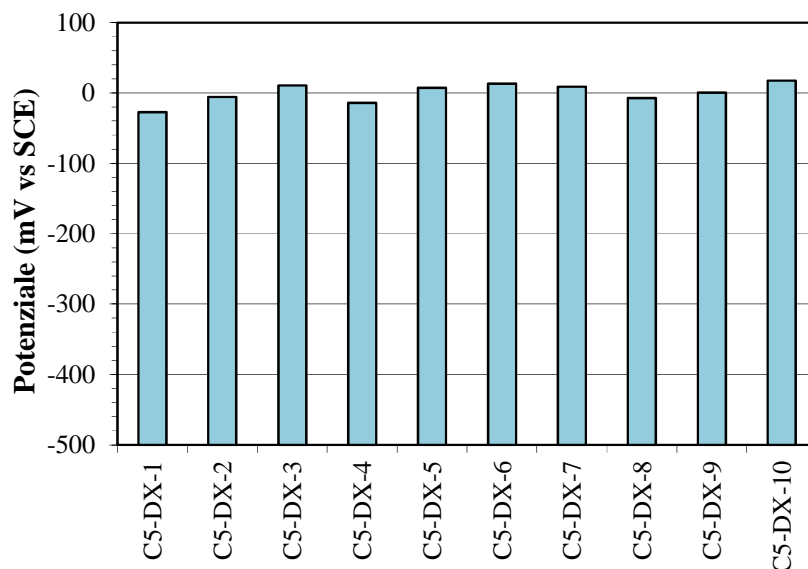


Figura 3.27 Potenziale di corrosione libera delle armature di tipo 22-05 nei provini in calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, dopo la depolarizzazione di 4 ore successiva alla prova di polarizzazione potenziostatica anodica a $+200 \text{ mV/SCE}$ ($T = 23^\circ\text{C}$).



Figura 3.28 Armature estratte dai provini di calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento al termine delle prove di polarizzazione potenziostatica anodica a $+200 \text{ mV/SCE}$ ($T = 23^\circ\text{C}$).

XM-28 – 2%CaCl₂

Tabella 3.6 Osservazione della superficie delle armature di tipo XM-28 effettuata prima della prova e in seguito alla demolizione dei provini, in calcestruzzo con 2% di cloruri (CaCl₂), al termine del periodo di polarizzazione (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; “-” = non si è evidenziato nulla; “ ” = non è stata effettuata).

Provino	Osservazione pre-prova				Osservazione post-prova			Osservazione post-prova a lungo termine	
	R	S	B	D	N° pit	Dim. max pit (mm)	Tipo di attacco	N° micropit	
								1g	≥7g
C2-X-01	X	X	-	X	-	-	-	-	-
C2-X-02	X	X	-	X	-	-	-	1	1
C2-X-03	X	X	-	X	-	-	-	-	-
C2-X-04	X	X	-	X	-	-	-	1	1
C2-X-05	-	X	X	X	-	-	-	-	-
C2-X-06	-	X	X	X	-	-	-	-	-
C2-X-07	X	X	-	X	-	-	-	-	1
C2-X-08	-	X	-	X	-	-	-	-	-
C2-X-09	-	X	-	X	-	-	-	-	-
C2-X-10	-	X	-	X	-	-	-	-	-

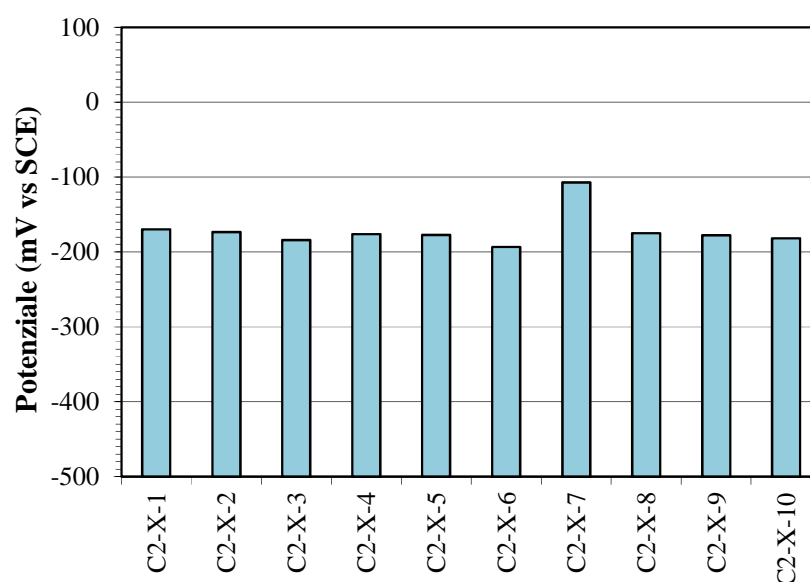


Figura 3.29 Potenziale di corrosione libera delle armature di tipo XM-28 nei provini in calcestruzzo con 2% di cloruri (CaCl₂) in massa rispetto al cemento, prima dell'avvio della prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE (T = 23°C).

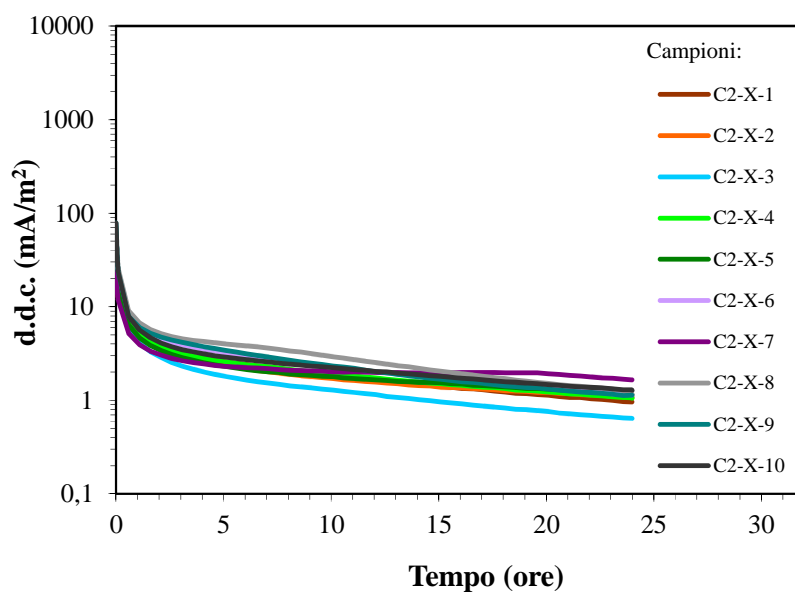


Figura 3.30 Andamento della densità di corrente di polarizzazione delle armature di tipo XM-28 nei provini in calcestruzzo con 2% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, durante la prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

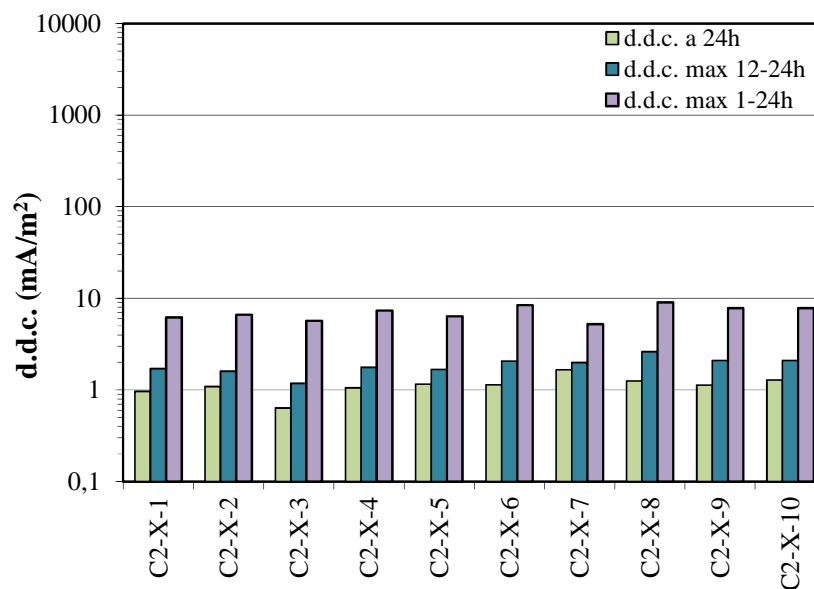


Figura 3.31 Confronto densità di corrente di polarizzazione delle armature di tipo XM-28 nei provini in calcestruzzo con 2% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, durante la prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

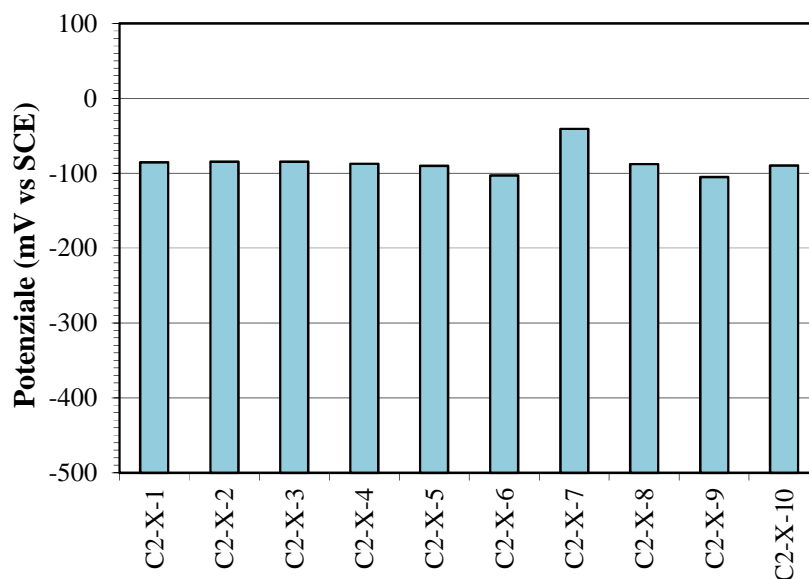


Figura 3.32 Potenziale di corrosione libera delle armature di tipo XM-28 nei provini in calcestruzzo con 2% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, dopo la depolarizzazione di 4 ore successiva alla prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

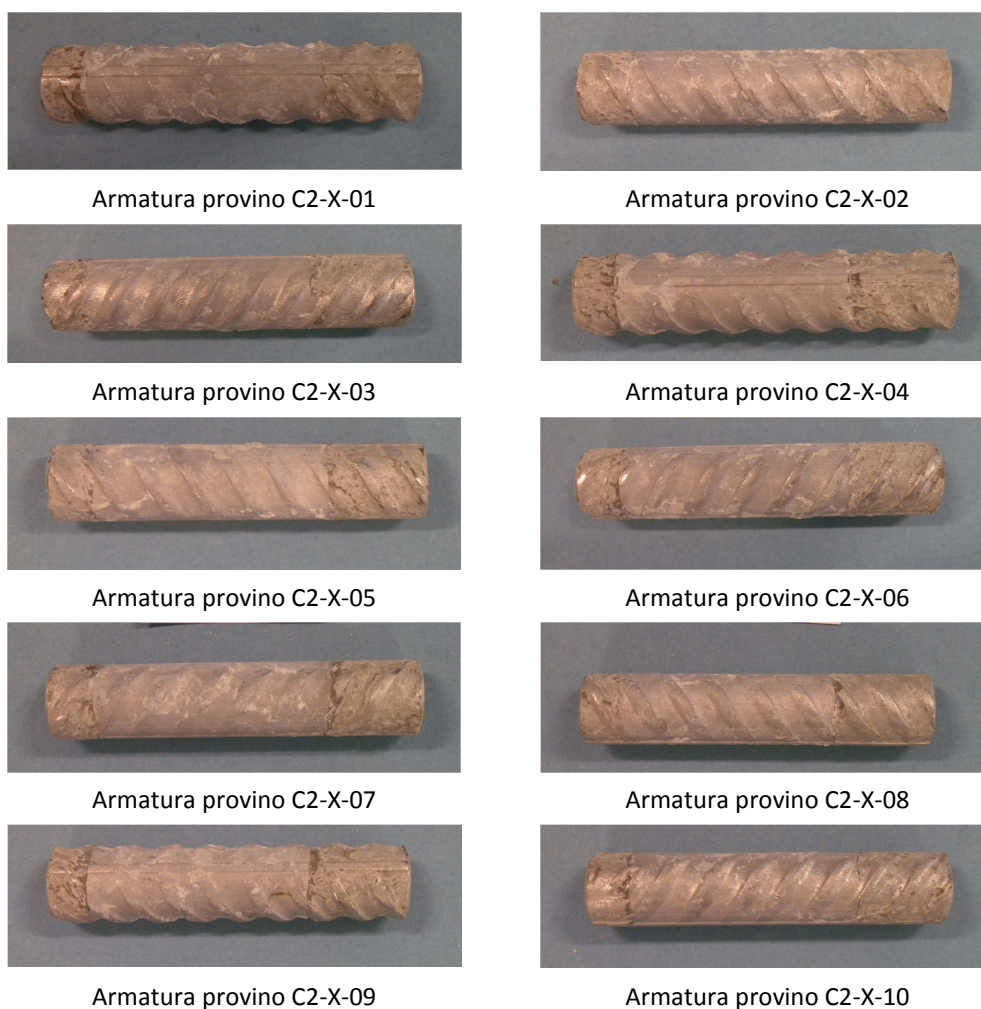


Figura 3.33 Armature estratte dai provini di calcestruzzo con 2% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento al termine delle prove di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

23-04 – 5%CaCl₂ -30°C

Tabella 3.7 Osservazione della superficie delle armature di tipo 23-04 effettuata prima della prova e in seguito alla demolizione dei provini, in calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl₂), al termine del periodo di polarizzazione (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; “-” = non si è evidenziato nulla; “ ” = non è stata effettuata).

Provino	Osservazione pre-prova				Osservazione post-prova			Osservazione post-prova a lungo termine	
	R	S	B	D	N° pit	Dim. max pit (mm)	Tipo di attacco	N° micropit	
								1g	>7g
C5-30-01	-	-	X	-	-	-	-	3	
C5-30-02	-	-	X	-	-	-	-	1	
C5-30-03	-	-	X	-	-	-	-	>5	
C5-30-04	-	-	X	-	-	-	-	>5	
C5-30-05	X	-	X	-	1	>0,5	Superficiale	>5	
C5-30-06	-	-	X	-	-	-	-	3	
C5-30-07	-	-	X	-	-	-	-	>5	
C5-30-08	-	-	X	-	-	-	-	>5	
C5-30-09	-	-	X	-	-	-	-	>5	
C5-30-10	-	-	X	X	-	-	-	>5	

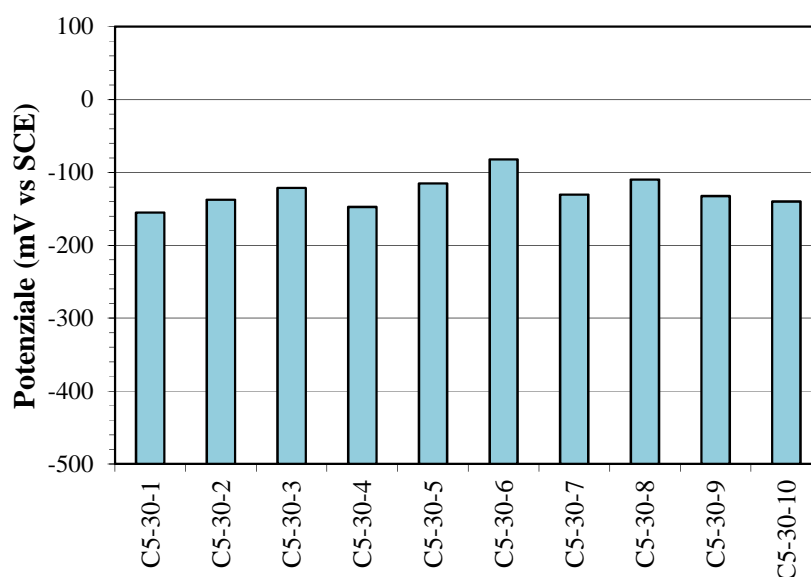


Figura 3.34 Potenziale di corrosione libera delle armature di tipo 23-04 nei provini in calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl₂) in massa rispetto al cemento, prima dell'avvio della prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE (T = 30°C).

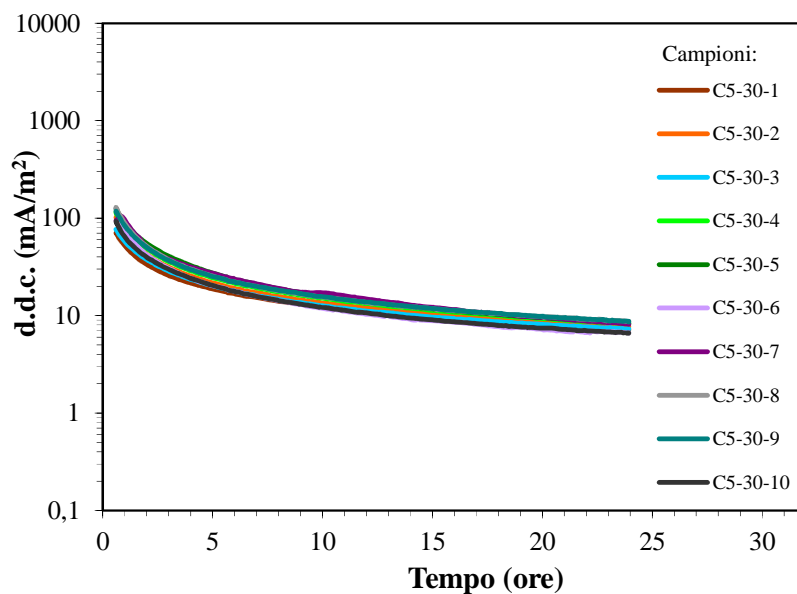


Figura 3.35 Andamento della densità di corrente di polarizzazione delle armature di tipo 23-04 nei provini in calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, durante la prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 30^\circ\text{C}$).

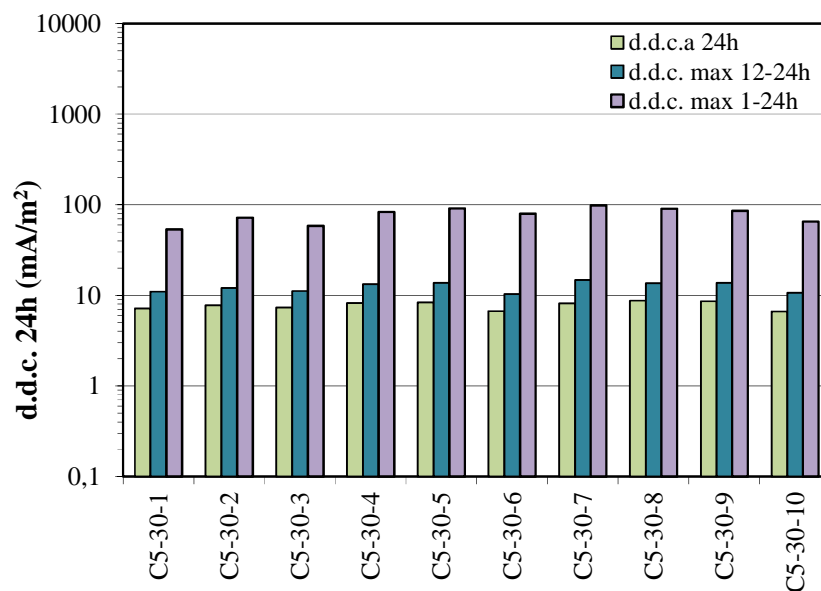


Figura 3.36 Confronto densità di corrente di polarizzazione delle armature di tipo 23-04 nei provini in calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, durante la prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 30^\circ\text{C}$).

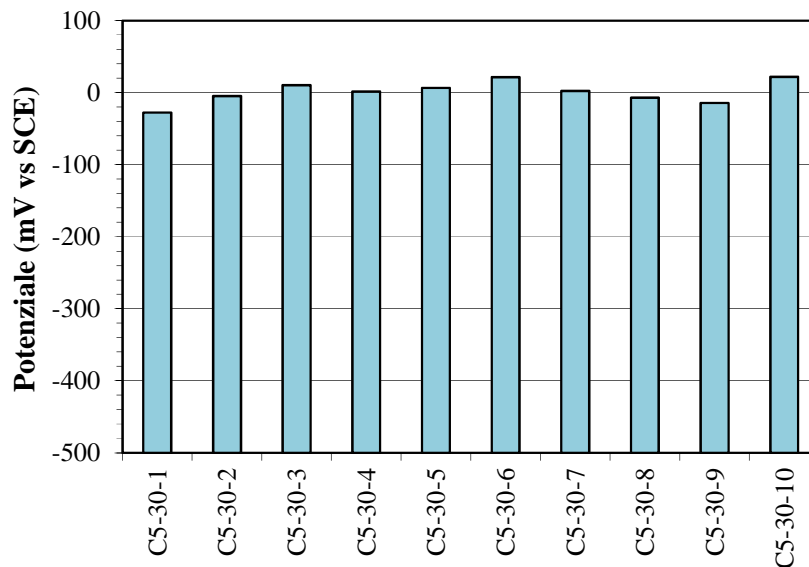


Figura 3.37 Potenziale di corrosione libera delle armature di tipo 23-04 nei provini in calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, dopo la depolarizzazione di 4 ore successiva alla prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 30^\circ\text{C}$).

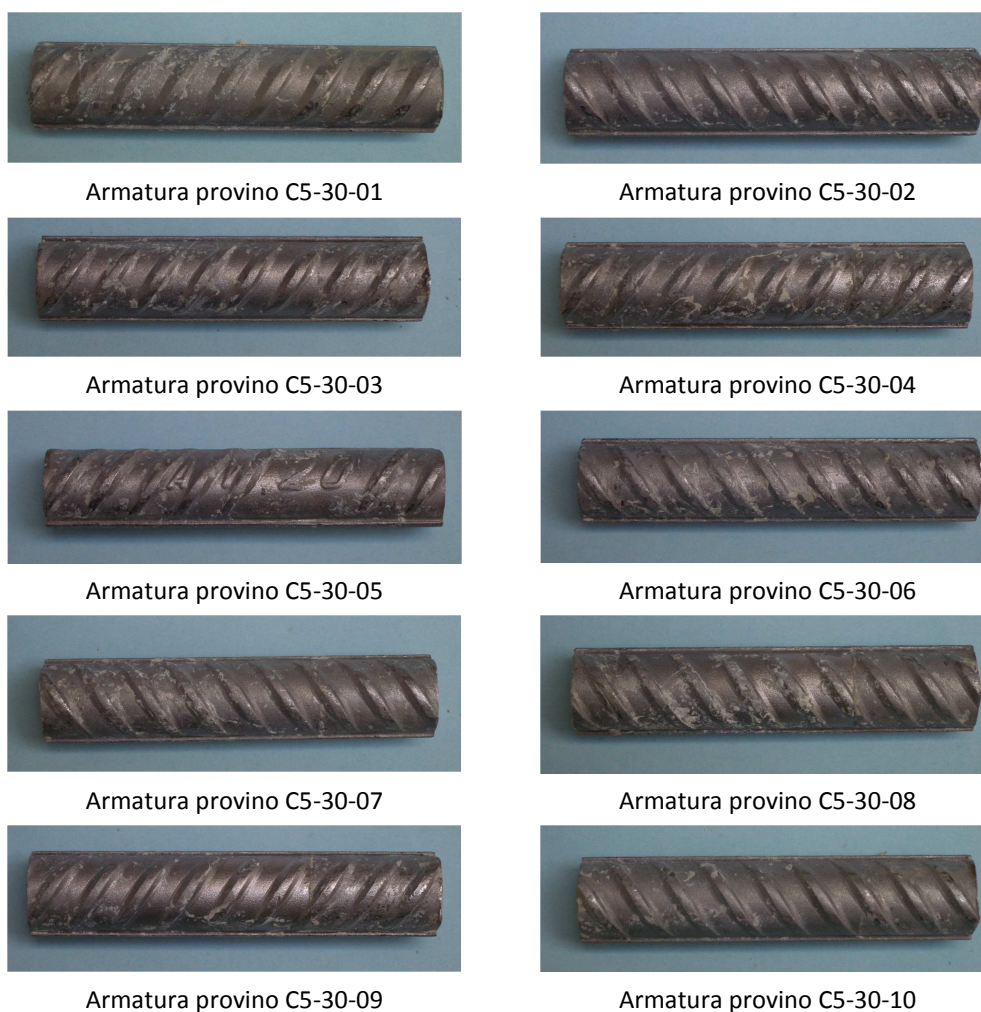


Figura 3.38 Armature estratte dai provini di calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento al termine delle prove di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 30^\circ\text{C}$).

22-05 – 5%CaCl₂ -40°C

Tabella 3.8 Osservazione della superficie delle armature di tipo 22-05 effettuata prima della prova e in seguito alla demolizione dei provini, in calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl₂), al termine del periodo di polarizzazione (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; “-” = non si è evidenziato nulla; “ ” = non è stata effettuata).

Provino	Osservazione pre-prova				Osservazione post-prova			Osservazione post-prova a lungo termine	
	R	S	B	D	N° pit	Dim. max pit (mm)	Tipo di attacco	N° micropit	
								1g	>7g
C5- DX-40-01	X	X	X	X	2	<0,5	Micropit		3
C5- DX-40-02	X	X	X	X	2	<0,5	Micropit		2
C5- DX-40-03	X	X	X	X	-	-	-		1
C5- DX-40-04	X	X	X	X	1	<0,5	Micropit		2
C5- DX-40-05	X	X	X	X	-	-	-		4
C5- DX-40-06	-	X	X	X	1	<0,5	Micropit		3
C5- DX-40-07	X	-	X	X	-	-	-		1
C5- DX-40-08	X	-	X	X	1	<0,5	Micropit		3
C5- DX-40-09	X	X	X	X	-	-	-		2
C5- DX-40-10	X	-	X	X	-	-	-		1

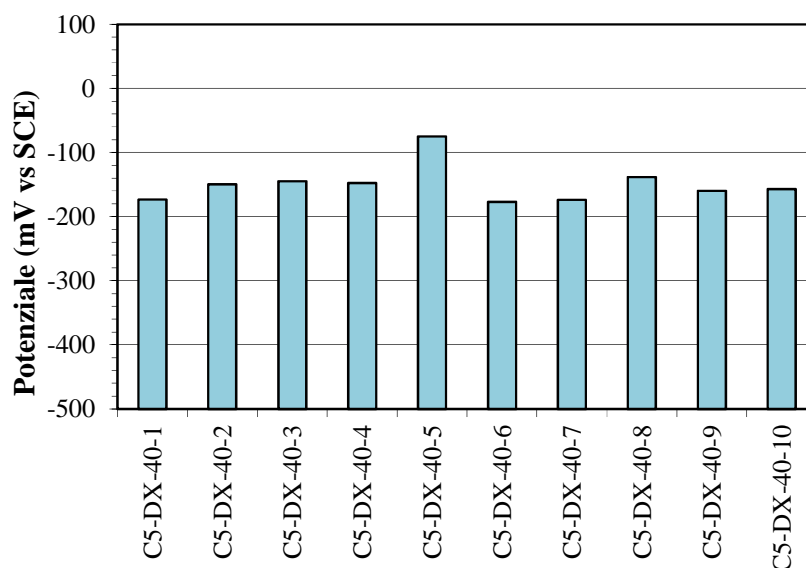


Figura 3.39 Potenziale di corrosione libera delle armature di tipo 22-05 nei provini in calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl₂) in massa rispetto al cemento, prima dell'avvio della prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE (T = 40°C).

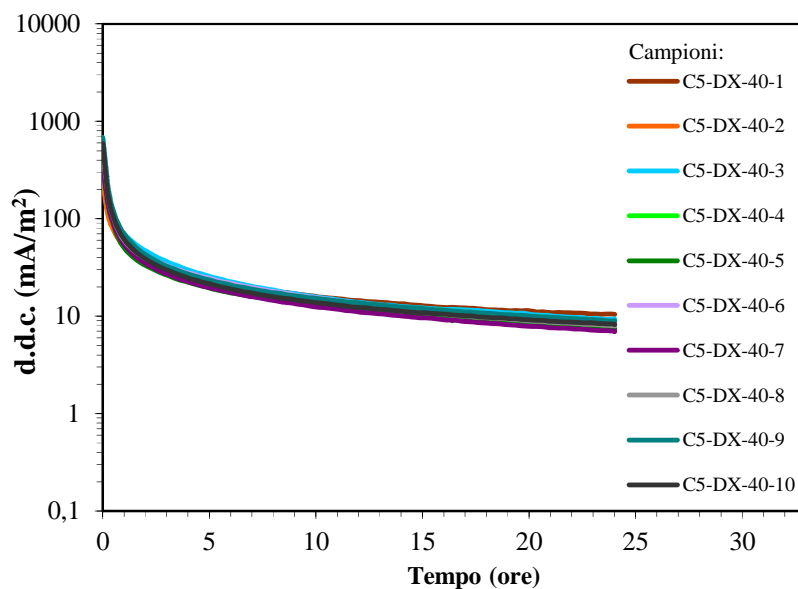


Figura 3.40 Andamento della densità di corrente di polarizzazione delle armature di tipo 22-05 nei provini in calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, durante la prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 40^\circ\text{C}$).

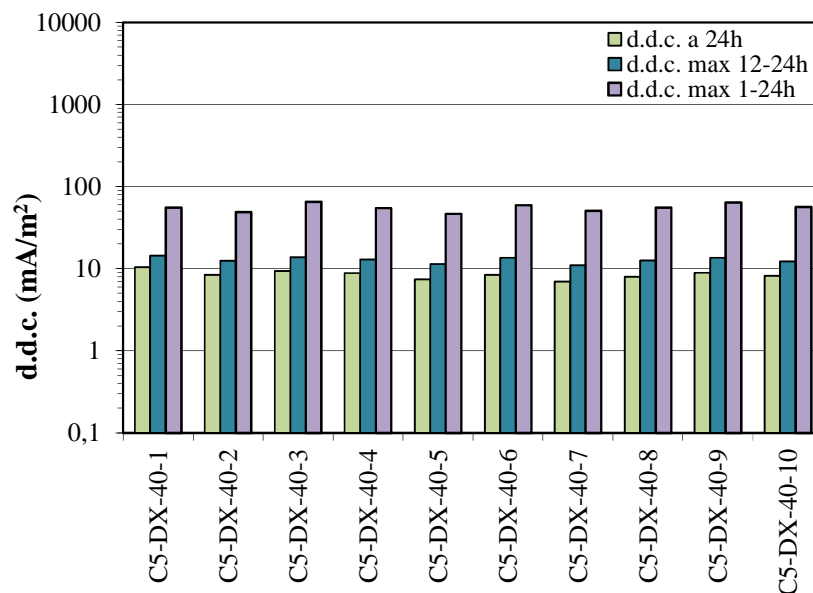


Figura 3.41 Confronto densità di corrente di polarizzazione delle armature di tipo 22-05 nei provini in calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, durante la prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 40^\circ\text{C}$).

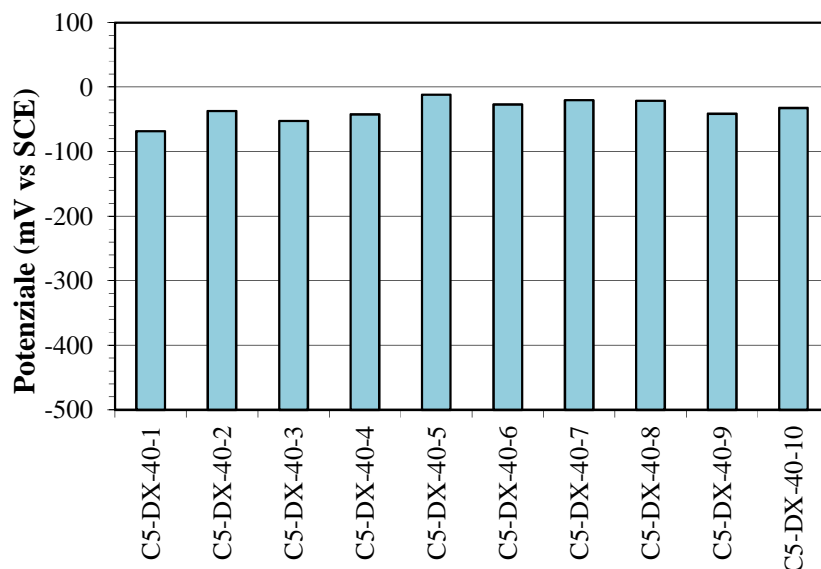


Figura 3.42 Potenziale di corrosione libera delle armature di tipo 22-05 nei provini in calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, dopo la depolarizzazione di 4 ore successiva alla prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 40^\circ\text{C}$).

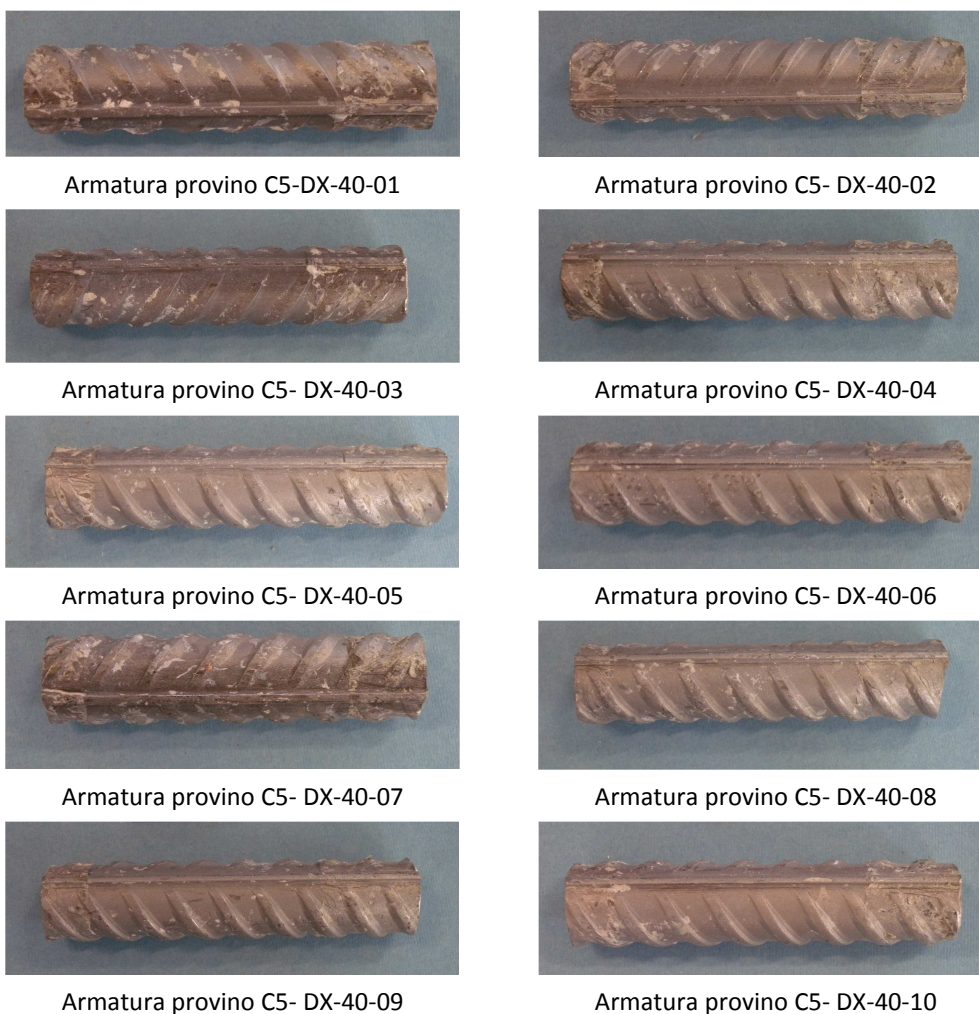


Figura 3.43 Armature estratte dai provini di calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento al termine delle prove di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 40^\circ\text{C}$).

3.2.2 Prove di 6 giorni e 13 giorni

Le prove lunghe sono state effettuate sugli acciai di tipo 304LN e XM-28 per poter analizzare se l'aumento della durata della polarizzazione a +200mV vs SCE influenza sulla propagazione dei micro-pit, individuati nelle prove a 24 ore.

XM-28

Le prove sull'acciaio XM-28 con la percentuale di cloruri aggiunti pari a 2% sono state ripetute anche mantenendo la depolarizzazione per 6 giorni (*Tabella 3.9, Figure 3.44-3.48*). I potenziali di libera corrosione sono superiori a -250 mV vs SCE (*Figura 3.44*). Le densità di corrente (*Figura 3.45*) mostrano l'andamento della curva decrescente e per tutto il periodo di polarizzazione per 9 su 10 provini fino a raggiungere dopo 140 ore valori di 1 mA/m². L'armatura del provino C2-X-22 dopo 5 ore di polarizzazione mostra un aumento della densità da 1,5 mA/m² fino al valore di 5 mA/m², successivamente la densità di corrente torna a decrescere e al termine della prova assume valore pari a circa 1 mA/m². Il potenziale dopo 4 ore di depolarizzazione si porta per tutte le barre su valori superiori a -50 mV vs SCE (*Figura 3.46*) non evidenziando la presenza di attacchi che propagano. L'osservazione visiva conferma che non sono presenti inneschi di corrosione di dimensione superiore a 0,5 mm, e quindi chiaramente visibili ad occhio nudo, ma sono presenti micro-pit sulle armature dei provini 13, 18 e 20. Dopo 7 giorni dalla demolizione dei provini il numero di armature che presentano micro-pit è passato da 3 a 8. Il contenuto di cloruri è stata verificato tramite la titolazione su campione di calcestruzzo C2-X-17 ed è risultato pari a 1,8% vs cemento.

304LN

Per provini armati con l'acciaio 304LN e contenuto di cloruri aggiunti pari a 4% rispetto alla massa di cemento, la prova è stata ripetuta allungando la durata di polarizzazione a 13 giorni. I potenziali di libera corrosione (*Figura 3.49*) assunti dai campioni in questione sono stati compresi tra -190 e -330 mV vs SCE, nonostante alcune barre evidenzino valori di potenziale di corrosione libera inferiori a -300 mV vs SCE; l'avvio della prova di polarizzazione evidenzia che si trovavano in condizioni di passività. Dopo l'avvio della polarizzazione a +200mV vs SCE l'andamento della densità di corrente (*Figura 3.50*) è stato decrescente fino a circa 20 ore per tutte le barre successivamente le barre nei provini n°26, 31 e 32 mostrano un temporaneo lieve incremento nella densità di corrente; tuttavia dopo 300 ore la densità di corrente di tutti i provini è stata inferiore a 0,3 mA/m². Tra 170 e 200 ore di prova si può osservare un anomalo aumento della densità di corrente di tutte le armature, questo è stato causato da un problema temporaneo con il controllo della temperatura. Alla fine della depolarizzazione (*Figura 3.52*) si misurano potenziali superiori a -50 mV vs SCE su tutte le barre. Non sono quindi stati evidenziati inneschi di corrosione con questa misura. Dopo la rottura su 2 armature dei provini 27 e 31 sono stati notati, con l'ausilio della lente, micropit (*Tabella 3.10 e Figura 3.53*). A 7 giorni dalla rottura il numero di barre su cui si sono osservati i micropit è passato da 2 a 7.

XM-28 – 2%CaCl₂ -2° prova

Tabella 3.9 Osservazione della superficie delle armature di tipo XM-28 effettuata prima della prova e in seguito alla demolizione dei provini, in calcestruzzo con 2% di cloruri (CaCl₂), al termine del periodo di polarizzazione (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; “-” = non si è evidenziato nulla; “ ” = non è stato effettuato).

Provino	Osservazione pre-prova				Osservazione post-prova			Osservazione post-prova a lungo termine	
	R	S	B	D	N° pit	Dim. max pit (mm)	Tipo di attacco	N° micropit	
								1g	7g
C2-X-13	X	X	-	X	1	<0,5	Micropit	3	5
C2-X-14	X	X	-	X	-	-	-	-	-
C2-X-15	X	X	X	X	-	-	-	1	2
C2-X-16	X	X	-	X	-	-	-	-	-
C2-X-17	-	X	X	X	-	-	-	-	3
C2-X-18	-	X	X	X	1	<0,5	Micropit	1	2
C2-X-19	X	X	-	X	-	-	-	-	3
C2-X-20	-	X	-	X	2	<0,5	Micropit	3	6
C2-X-21	X	X	-	X	-	-	-	0	4
C2-X-22	X	X	X	X	-	-	-	2	5

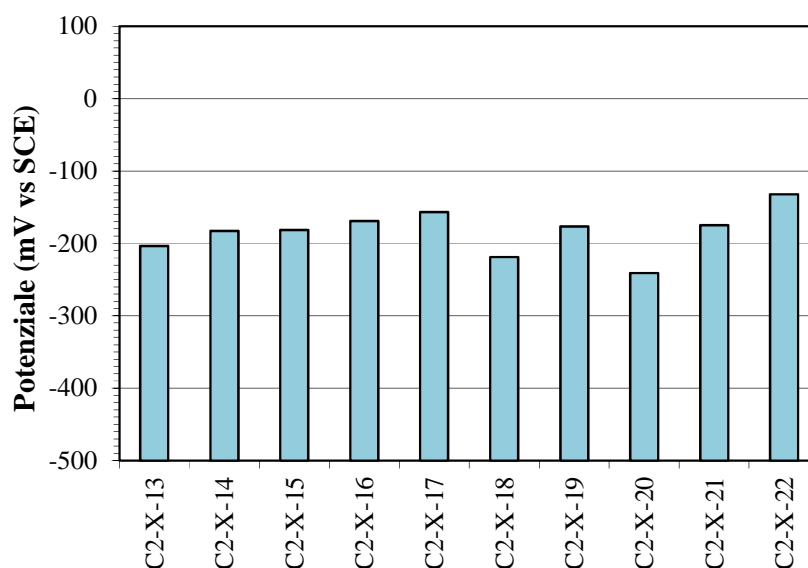


Figura 3.44 Potenziale di corrosione libera delle armature di tipo XM-28 nei provini in calcestruzzo con 2% di cloruri (CaCl₂) in massa rispetto al cemento, prima dell'avvio della prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE (T = 23°C).

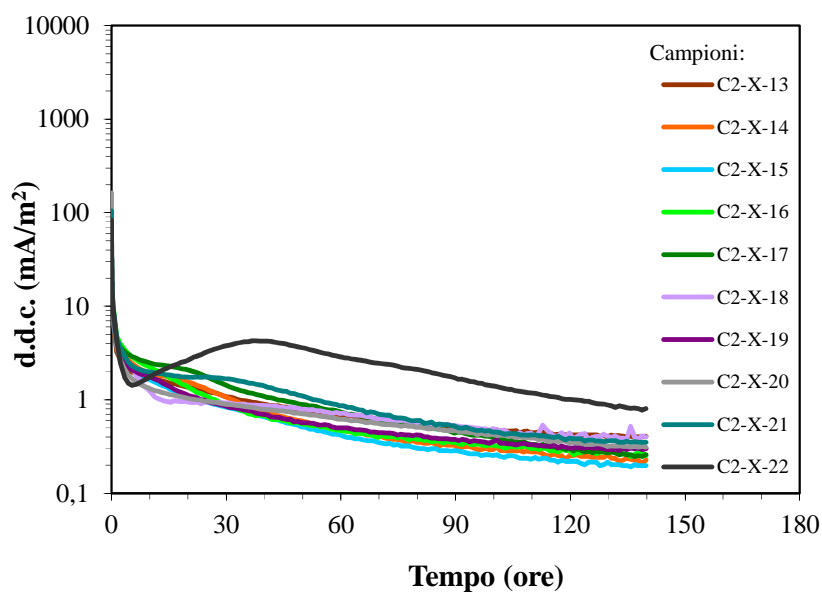


Figura 3.45 Andamento della densità di corrente di polarizzazione delle armature di tipo XM-28 nei provini in calcestruzzo con 2% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, durante la prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

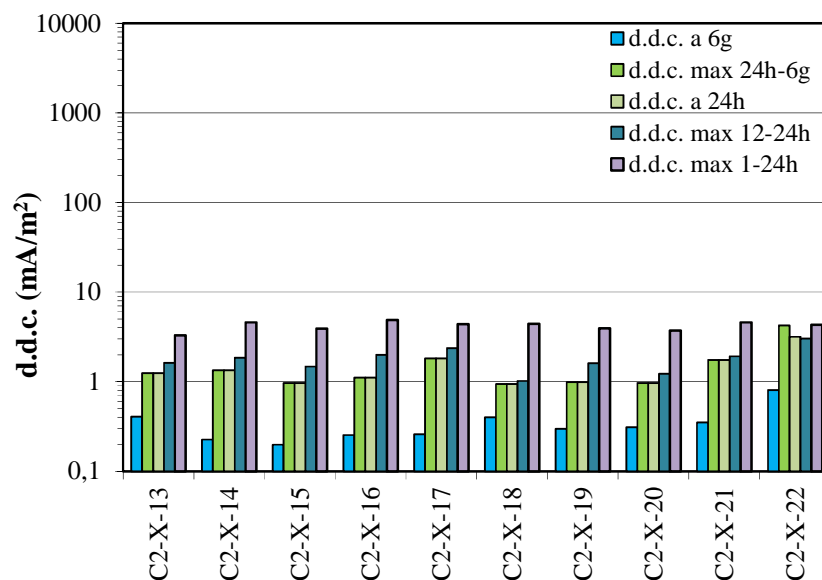


Figura 3.46 Confronto densità di corrente di polarizzazione delle armature di tipo XM-28 nei provini in calcestruzzo con 2% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, durante la prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

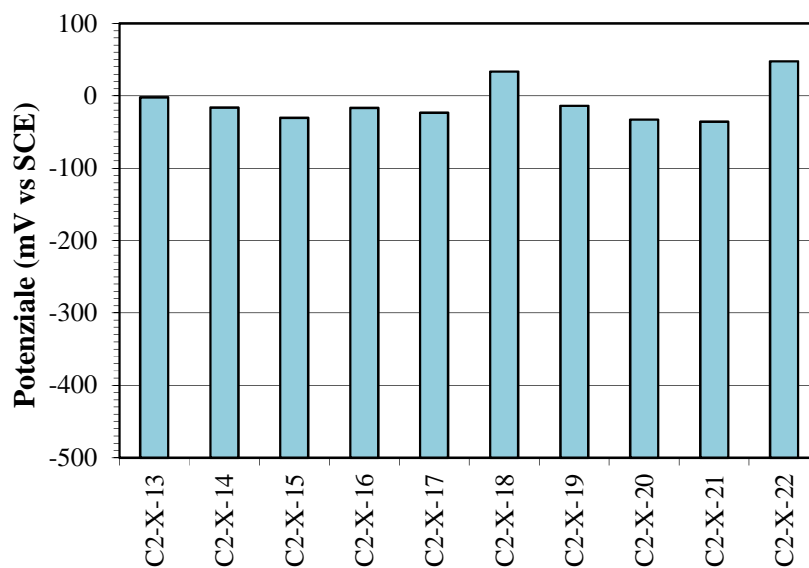


Figura 3.47 Potenziale di corrosione libera delle armature di tipo XM-28 nei provini in calcestruzzo con 2% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, dopo la depolarizzazione di 4 ore successiva alla prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

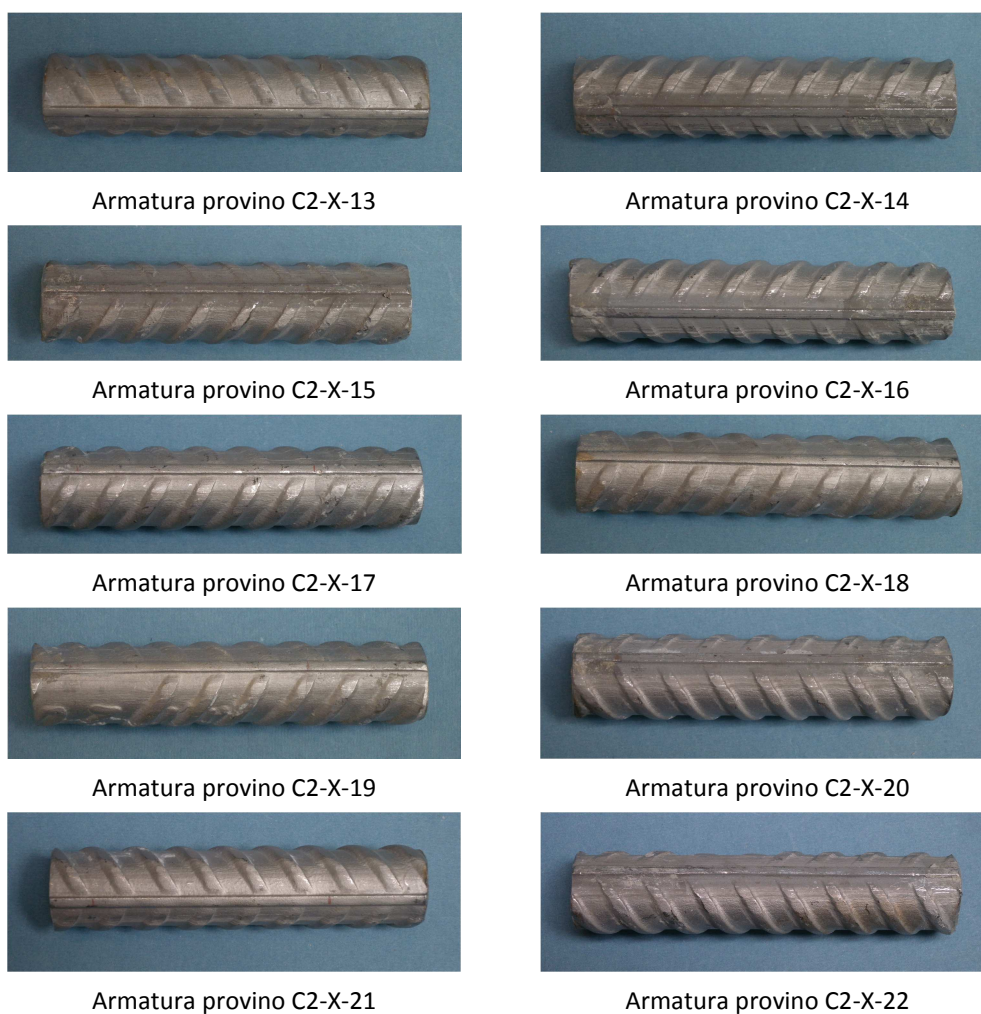


Figura 3.48 Armature estratte dai provini di calcestruzzo con 2% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento al termine delle prove di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

304LN - 4%CaCl₂ - 3° prova

Tabella 3.10 Osservazione della superficie delle armature di tipo 304LN effettuata prima della prova e in seguito alla demolizione dei provini, in calcestruzzo con 4% di cloruri (CaCl₂), al termine del periodo di polarizzazione (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; “-” = non si è evidenziato nulla; “ ” = non è stato effettuato).

Provino	Osservazione pre-prova				Osservazione post-prova			Osservazione post-prova a lungo termine	
	R	S	B	D	N° pit	Dim. max pit (mm)	Tipo di attacco	N° micropit	
								1g	≥7g
C4-AL-23	-	X	X	X	-	-	-	2	3
C4-AL-24	-	X	X	X	-	-	-	-	2
C4-AL-25	-	X	-	X	-	-	-	-	3
C4-AL-26	-	X	-	X	-	-	-	-	-
C4-AL-27	-	X	-	X	1	< 0,5	Micropit	1	4
C4-AL-28	-	X	X	X	-	-	-	-	-
C4-AL-29	X	X	-	X	-	-	-	1	1
C4-AL-30	X	X	X	X	-	-	-	1	4
C4-AL-31	X	X	X	X	1	< 0,5	Micropit	2	4
C4-AL-32	-	X	-	X	-	-	-	-	-

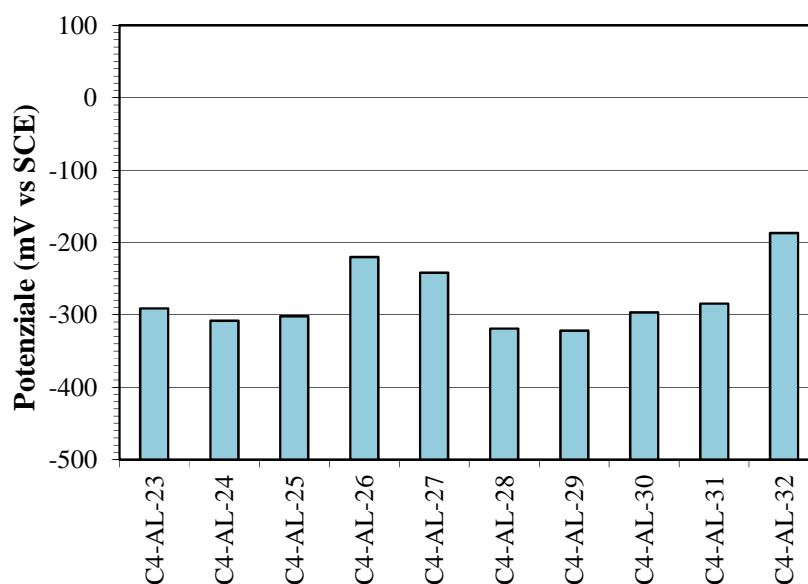


Figura 3.49 Potenziale di corrosione libera delle armature di tipo 304LN nei provini in calcestruzzo con 4% di cloruri (CaCl₂) in massa rispetto al cemento, prima dell'avvio della prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE (T = 23°C).

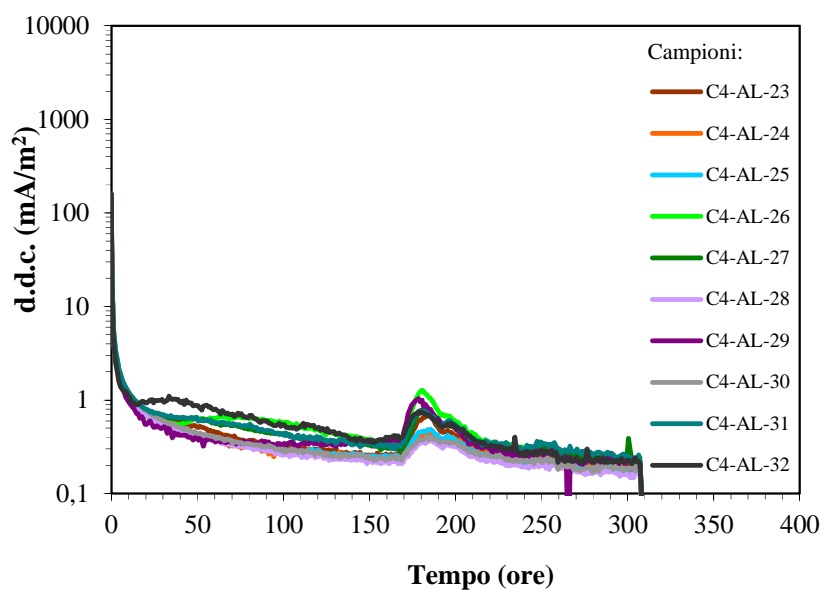


Figura 3.50 Andamento della densità di corrente di polarizzazione delle armature di tipo 304LN nei provini in calcestruzzo con 4% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, durante la prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

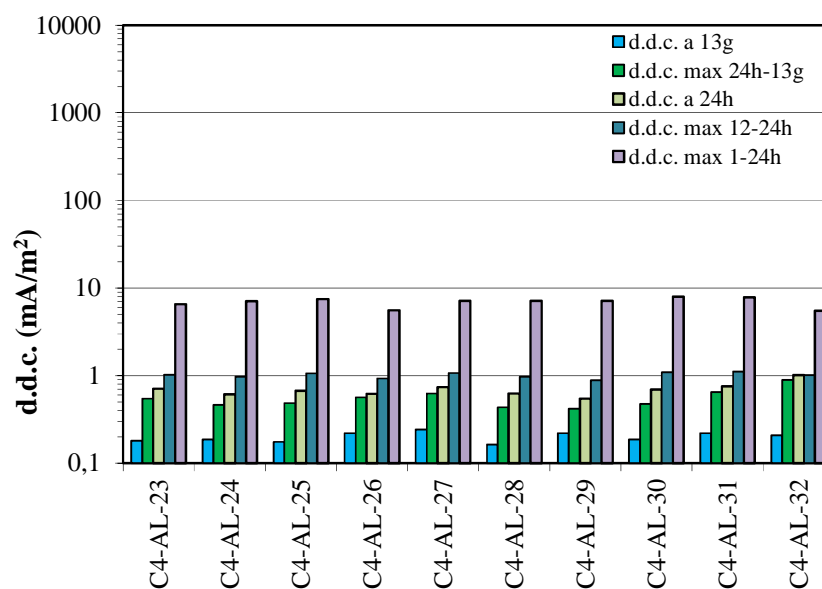


Figura 3.51 Confronto densità di corrente di polarizzazione delle armature di tipo 304LN nei provini in calcestruzzo con 4% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, durante la prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

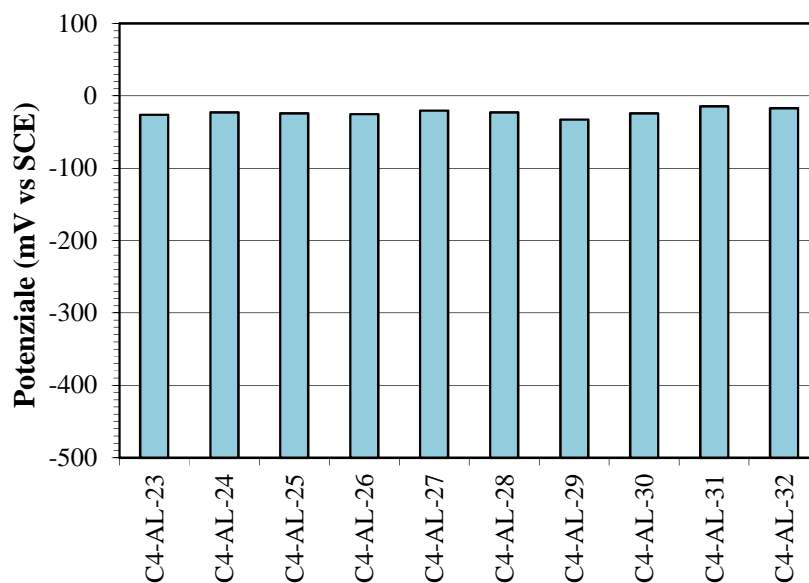


Figura 3.52 Potenziale di corrosione libera delle armature di tipo 304LN nei provini in calcestruzzo con 4% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento, dopo la depolarizzazione di 4 ore successiva alla prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

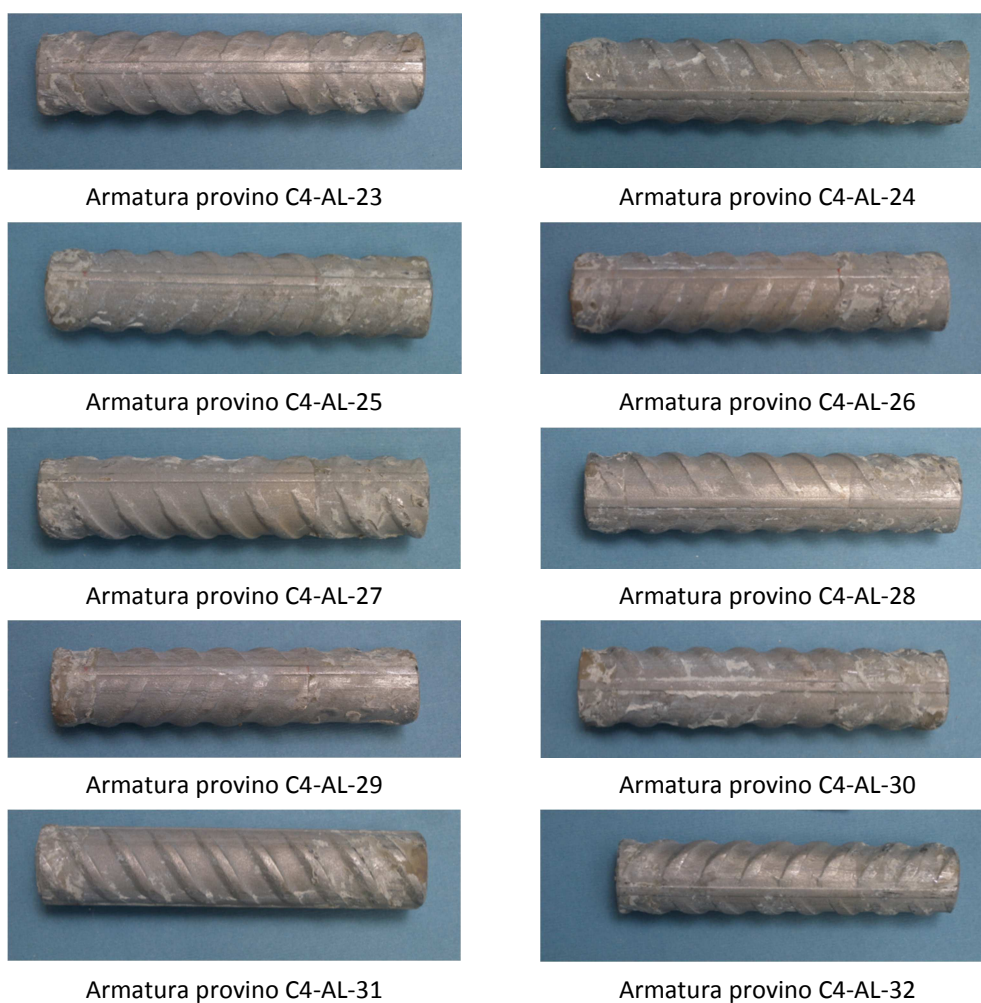


Figura 3.53 Armature estratte dai provini di calcestruzzo con 4% di cloruri (CaCl_2) in massa rispetto al cemento al termine delle prove di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV/SCE ($T = 23^\circ\text{C}$).

3.2.3 Osservazioni visive svolte su campioni delle prove precedenti

Poiché nell'ambito di questa tesi si è osservato che i "micro-pit" possono comparire anche a distanza di tempo dalla rottura dei provini, si sono analizzate anche le barre sottoposte a prova potenziodinamica nell'ambito di precedenti lavori di tesi [20, 21], nei quali l'osservazione è stata fatta solo al termine della prova. In seguito si riportano i dati relativi alle osservazioni visive effettuate con l'ausilio di lente.

Nelle Tabelle 3.11-3.24 si riportano le osservazioni visive delle armature svolte prima del confezionamento dei provini e al termine della prova potenziostatica. In particolare vengono riportati i difetti riscontrati sulle barre, probabilmente dovuti alle lavorazioni dell'acciaio, alla movimentazione e allo stoccaggio. Si osserva che la maggior parte delle barre presenta deformazioni longitudinali e scagliature. Le osservazioni delle armature post-prova hanno evidenziato un grande cambiamento rispetto a quanto osservato da noi: in particolare alcune armature che non presentavano alcun tipo d'innesco, mostrano oggi attacchi di corrosione di dimensioni minori di 0,5 mm, come nel caso delle barre in acciaio tipo 316LN confezionati con calcestruzzo al 5% di cloruri.

Tabella 3.11 Osservazione della superficie delle armature di tipo 316LN effettuata prima della prova e in seguito alla demolizione dei provini, in calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl_2), al termine del periodo di polarizzazione (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; "-" = non si è evidenziato nulla; "" = non è stato effettuato).

Provino	Osservazione pre-prova				Osservazione post-prova			Osservazione post-prova a lungo termine	
	R	S	B	D	N° pit	Dim. max pit (mm)	Tipo di attacco	N° micropit	
								1g	≥7g
C5A-2-1	X	-	-	X	-	-	-	>5	
C5A-2-2	-	-	-	X	-	-	-	>5	
C5A-2-3	X	X	-	X	-	-	-	>5	
C5A-2-4	-	X	-	X	-	-	-	>5	
C5A-2-5	X	-	-	X	-	-	-	>5	
C5A-2-6	-	X	-	X	-	-	-	>5	
C5A-2-7	X	X	-	X	-	-	-	>5	
C5A-2-8	X	X	-	X	-	-	-	>5	
C5A-2-9	X	X	-	X	3	1	Penetrante	>5	
C5A-2-10	-	X	-	X	-	-	-	>5	

Tabella 3.12 Osservazione della superficie delle armature di tipo 316LN effettuata prima della prova e in seguito alla demolizione dei provini, in calcestruzzo con 6% di cloruri (CaCl_2), al termine del periodo di polarizzazione (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; "-" = non si è evidenziato nulla; "" = non è stato effettuato).

Provino	Osservazione pre-prova				Osservazione post-prova			Osservazione post-prova a lungo termine	
	R	S	B	D	N° pit	Dim. max pit (mm)	Tipo di attacco	N° micropit	
								1g	≥7g
C6A-2-1	-	-	-	X	-	-	-	>5	
C6A-2-2	X	-	-	X	-	-	-	>5	
C6A-2-3	-	X	-	X	1	0,5	Superficiale	>5	
C6A-2-4	-	X	-	X	-	-	-	>5	
C6A-2-5	-	X	-	X	3	1	Penetrante	>5	
C6A-2-6	X	-	-	X	-	-	-	>5	
C6A-2-7	-	X	-	X	-	-	-	>5	
C6A-2-8	-	-	-	X	-	-	-	>5	
C6A-2-9	-	X	-	X	-	-	-	>5	
C6A-2-10	-	X	-	X	7	5	Penetrante	>5	

Tabella 3.13 Osservazione della superficie delle armature di tipo XM-28 effettuata prima della prova e in seguito alla demolizione dei provini, in calcestruzzo con 2% di cloruri (CaCl_2), al termine del periodo di polarizzazione (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; "-" = non si è evidenziato nulla; "" = non è stato effettuato).

Provino	Osservazione pre-prova				Osservazione post-prova			Osservazione post-prova a lungo termine	
	R	S	B	D	N° pit	Dim. max pit (mm)	Tipo di attacco	N° micropit	
								1g	≥7g
C2X-2-1	-	X	-	X	-	-	-	2	
C2X-2-2	-	X	-	X	-	-	-	1	
C2X-2-3	-	X	-	X	-	-	-	2	
C2X-2-4	-	X	-	X	-	-	-	2	
C2X-2-5	-	X	-	X	-	-	-	1	
C2X-2-6	X	X	-	X	-	-	-	0	
C2X-2-7	X	X	-	X	-	-	-	0	
C2X-2-8	-	X	-	X	-	-	-	1	
C2X-2-9	-	X	-	X	-	-	-	0	
C2X-2-10	-	X	-	X	-	-	-	4	

Tabella 3.14 Osservazione della superficie delle armature di tipo XM-28 effettuata prima della prova e in seguito alla demolizione dei provini, in calcestruzzo con 3% di cloruri (CaCl_2), al termine del periodo di polarizzazione (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; "-" = non si è evidenziato nulla; "" = non è stato effettuato).

Provino	Osservazione pre-prova				Osservazione post-prova			Osservazione post-prova a lungo termine	
	R	S	B	D	N° pit	Dim. max pit (mm)	Tipo di attacco	N° micropit	
								1g	≥7g
C3X-2-1	X	X	-	X	-	-	-	>5	
C3X-2-2	-	X	-	X	-	-	-	5	
C3X-2-3	X	X	-	X	>10	2	Penetrante/Intenso	4	
C3X-2-4	-	X	-	X	>10	2	Penetrante/Intenso	5	
C3X-2-5	-	X	-	X	-	-	-	>5	
C3X-2-6	-	X	-	X	-	-	-	2	
C3X-2-7	-	X	-	X	-	-	-	>5	
C3X-2-8	-	X	-	X	-	-	-	>5	
C3X-2-9	-	X	-	X	-	-	-	>5	
C3X-2-10	-	X	-	X	-	-	-	>5	

Tabella 3.15 Osservazione della superficie delle armature di tipo XM-28 effettuata prima della prova e in seguito alla demolizione dei provini, in calcestruzzo con 4% di cloruri (CaCl_2), al termine del periodo di polarizzazione (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; "-" = non si è evidenziato nulla; "" = non è stato effettuato).

Provino	Osservazione pre-prova				Osservazione post-prova			Osservazione post-prova a lungo termine	
	R	S	B	D	N° pit	Dim. max pit (mm)	Tipo di attacco	N° micropit	
								1g	≥7g
C4X-2-1	-	X	-	X	2	2	Penetrante/Intenso	>5	
C4X-2-2	-	X	-	X	>10	3	Penetrante/Intenso	3	
C4X-2-3	-	X	-	X	>10	3	Penetrante/Intenso	2	
C4X-2-4	-	X	-	X	>10	3	Penetrante/Intenso	5	
C4X-2-5	-	X	-	X	>10	4	Penetrante/Intenso	>5	
C4X-2-6	-	X	-	X	3	1	Penetrante	>5	
C4X-2-7	-	X	-	X	-	-	-	>5	
C4X-2-8	-	X	-	X	>10	4	Penetrante/Intenso	5	
C4X-2-9	-	X	-	X	>10	2	Penetrante/Intenso	>5	
C4X-2-10	-	X	-	X	>10	2	Penetrante/Intenso	>5	

Tabella 3.16 Osservazione della superficie delle armature di tipo XM-28 effettuata prima della prova e in seguito alla demolizione dei provini, in calcestruzzo con 2% di cloruri (CaCl_2), al termine del periodo di polarizzazione a $T=30^\circ\text{C}$ (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; “-” = non si è evidenziato nulla; “ ” = non è stato effettuato).

Provino	Osservazione pre-prova				Osservazione post-prova			Osservazione post-prova a lungo termine	
	R	S	B	D	N° pit	Dim. max pit (mm)	Tipo di attacco	N° micropit	
								1g	≥7g
C2X-30-1	-	X	X	-	-	-	-	0	
C2X-30-2	-	X	X	-	-	-	-	0	
C2X-30-3	-	X	X	-	4	<0,5	Micropit	4	
C2X-30-4	-	X	X	-	2	<0,5	Micropit	2	
C2X-30-5	-	X	X	-	2	<0,5	Micropit	2	
C2X-30-6	X	X	X	-	-	-	-	0	
C2X-30-7	-	X	X	-	1	<0,5	Micropit	1	
C2X-30-8	X-	X	X	-	3	<0,5	Micropit	3	
C2X-30-9	-	X	X	X	-	-	-	0	
C2X-30-10	X	X	X	-	1	<0,5	Micropit	1	

Tabella 3.17 Osservazione della superficie delle armature di tipo XM-28 effettuata prima della prova e in seguito alla demolizione dei provini, in calcestruzzo con 3% di cloruri (CaCl_2), al termine del periodo di polarizzazione a $T=30^\circ\text{C}$ (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; “-” = non si è evidenziato nulla; “ ” = non è stato effettuato).

Provino	Osservazione pre-prova				Osservazione post-prova			Osservazione post-prova a lungo termine	
	R	S	B	D	N° pit	Dim. max pit (mm)	Tipo di attacco	N° micropit	
								1g	≥7g
C3X-30-12	-	X	X	-	-	-	-	>5	
C3X-30-13	-	X	X	-	>10	>0,5	Penetrante	>5	
C3X-30-14	-	X	X	-	-	-	-	1	
C3X-30-15	-	X	X	-	1	<0,5	Micropit	>5	
C3X-30-16	-	X	X	-	>10	>0,5	Penetrante	>5	
C3X-30-17	-	X	X	-	-	-	-	>5	
C3X-30-18	X	X	X	-	3	<0,5	Micropit	>5	
C3X-30-19	-	X	X	-	3	0,7	Penetrante	>5	
C3X-30-20	-	X	X	-	8	<0,5	Micropit	>5	
C3X-30-21	-	X	X	-	>10	>0,5	Penetrante	>5	

Tabella 3.18 Osservazione della superficie delle armature di tipo XM-28 effettuata prima della prova e in seguito alla demolizione dei provini, in calcestruzzo con 3% di cloruri (CaCl₂), al termine del periodo di polarizzazione a T=40°C (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; “-” = non si è evidenziato nulla; “ ” = non è stato effettuato).

Provino	Osservazione pre-prova				Osservazione post-prova			Osservazione post-prova a lungo termine	
	R	S	B	D	N° pit	Dim. max pit (mm)	Tipo di attacco	N° micropit	
								1g	≥7g
C3X-40-1	-	X	X	-	>10	<0,5	Micropit	>5	
C3X-40-2	-	X	X	-	3	<0,5	Micropit	>5	
C3X-40-3	-	X	X	-	>10	<0,5	Micropit	>5	
C3X-40-4	-	X	X	-	9	<0,5	Micropit	>5	
C3X-40-5	-	X	X	-	6	<0,5	Micropit	>5	
C3X-40-6	-	X	X	-	1	<0,5	Micropit	>5	
C3X-40-7	-	X	X	-	-	-	-	2	
C3X-40-8	-	X	X	-	1	<0,5	Micropit	>5	
C3X-40-9	-	X	X	-	10	<0,5	Micropit	>5	
C3X-40-10	-	X	X	-	5	<0,5	Micropit	>5	

Tabella 3.19 Osservazione della superficie delle armature di tipo 23-04 effettuata prima della prova e in seguito alla demolizione dei provini, in calcestruzzo con 2,7% di cloruri (CaCl₂), al termine del periodo di polarizzazione (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; “-” = non si è evidenziato nulla; “ ” = non è stato effettuato).

Provino	Osservazione pre-prova				Osservazione post-prova			Osservazione post-prova a lungo termine	
	R	S	B	D	N° pit	Dim. max pit (mm)	Tipo di attacco	N° micropit	
								1g	≥7g
C2.7-2-1	X	-	-	-	-	-	-	>5	
C2.7-2-2	X	-	-	-	-	-	-	-	
C2.7-2-3	X	-	-	-	-	-	-	-	
C2.7-2-4	X	-	-	-	-	-	-	3	
C2.7-2-5	-	-	-	-	-	-	-	-	
C2.7-2-6	-	-	-	-	-	-	-	-	
C2.7-2-7	-	-	-	-	-	-	-	-	
C2.7-2-8	X	-	-	-	-	-	-	3	
C2.7-2-9	X	-	-	-	-	-	-	-	
C2.7-2-10	X	-	-	-	-	-	-	-	

Tabella 3.20 Osservazione della superficie delle armature di tipo 23-04 effettuata prima della prova e in seguito alla demolizione dei provini, in calcestruzzo con 3% di cloruri (CaCl₂), al termine del periodo di polarizzazione (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; “-” = non si è evidenziato nulla; “ ” = non è stato effettuato).

Provino	Osservazione pre-prova				Osservazione post-prova			Osservazione post-prova a lungo termine	
	R	S	B	D	N° pit	Dim. max pit (mm)	Tipo di attacco	N° micropit	
								1g	≥7g
C3-2-1	X	-	X	X	-	-	-	>5	
C3-2-2	-	-	-	-	-	-	-	0	
C3-2-3	X	-	-	-	-	-	-	3	
C3-2-4	-	-	-	-	-	-	-	0	
C3-2-5	X	-	-	X	-	-	-	1	
C3-2-6	-	-	-	X	-	-	-	4	
C3-2-7	-	-	-	-	-	-	-	4	
C3-2-8	X	-	-	X	-	-	-	1	
C3-2-9	-	-	-	-	-	-	-	1	
C3-2-10	-	-	-	x	1	1	Penetrante	1	

Tabella 3.21 Osservazione della superficie delle armature di tipo 23-04 effettuata prima della prova e in seguito alla demolizione dei provini, in calcestruzzo con 4% di cloruri (CaCl₂), al termine del periodo di polarizzazione (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; “-” = non si è evidenziato nulla; “ ” = non è stato effettuato).

Provino	Osservazione pre-prova				Osservazione post-prova			Osservazione post-prova a lungo termine	
	R	S	B	D	N° pit	Dim. max pit (mm)	Tipo di attacco	N° micropit	
								1g	≥7g
C4-2-1	-	-	-	X	-	-	-	2	
C4-2-2	x	-	-	X	-	-	-	4	
C4-2-3	-	X	-	X	-	-	-	>5	
C4-2-4	-	-	-	X	-	-	-	4	
C4-2-5	-	X	-	X	-	-	-	>5	
C4-2-6	-	-	-	X	-	-	-	>5	
C4-2-7	-	X	-	X	-	-	-	>5	
C4-2-8	-	X	-	-	-	-	-	3	
C4-2-9	-	X	-	X	-	-	-	2	
C4-2-10	-	-	-	x	-	-	-	>5	

Tabella 3.22 Osservazione della superficie delle armature di tipo 23-04 effettuata prima della prova e in seguito alla demolizione dei provini, in calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl_2), al termine del periodo di polarizzazione (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; “-” = non si è evidenziato nulla; “ ” = non è stato effettuato).

Provino	Osservazione pre-prova				Osservazione post-prova			Osservazione post-prova a lungo termine	
	R	S	B	D	N° pit	Dim. max pit (mm)	Tipo di attacco	N° micropit	
								1g	≥7g
C5-2-1	X	-	X	X	>5	2	Penetrante/Intenso	>5	
C5-2-2	-	X	-	-	-	-	-	2	
C5-2-3	-	X	-	-	>5	3	Penetrante/Intenso	>5	
C5-2-4	-	X	-	-	-	-	-	4	
C5-2-5	-	-	-	-	>5	1	Penetrante/Intenso	>5	
C5-2-6	-	X	-	-	-	-	-	3	
C5-2-7	-	-	X	-	-	-	-	5	
C5-2-8	-	X	-	-	2	1,5	Penetrante	1	
C5-2-9	-	-	X	-	>5	<1	Penetrante	>5	
C5-2-10	-	X	-	-	>5	4	Penetrante/Intenso	>5	

Tabella 3.23 Osservazione della superficie delle armature di tipo 23-04 effettuata prima della prova e in seguito alla demolizione dei provini, in calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl_2), al termine del periodo di polarizzazione a $T=10^\circ\text{C}$ (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; “-” = non si è evidenziato nulla; “ ” = non è stato effettuato).

Provino	Osservazione pre-prova				Osservazione post-prova			Osservazione post-prova a lungo termine	
	R	S	B	D	N° pit	Dim. max pit (mm)	Tipo di attacco	N° micropit	
								1g	≥7g
C5-10-1	X	-	-	X	-	-	-	0	
C5-10-2	X	-	-	-	-	-	-	1	
C5-10-3	X	-	-	-	1	0,5	Superficiale	>5	
C5-10-4	X	-	X	-	-	-	-	>5	
C5-10-5	X	-	-	-	-	-	-	>5	
C5-10-6	X	X	X	-	-	-	-	3	
C5-10-7	X	X	X	-	-	-	-	5	
C5-10-8	X	X	-	-	-	-	-	>5	
C5-10-9	X	X	X	-	-	-	-	0	
C5-10-10	X	-	-	-	-	-	-	5	

Tabella 3.24 Osservazione della superficie delle armature di tipo 23-04 effettuata prima della prova e in seguito alla demolizione dei provini, in calcestruzzo con 5% di cloruri (CaCl_2), al termine del periodo di polarizzazione a $T=40^\circ\text{C}$ (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; “-” = non si è evidenziato nulla; “ ” = non è stato effettuato).

Provino	Osservazione pre-prova				Osservazione post-prova			Osservazione post-prova a lungo termine	
	R	S	B	D	N° pit	Dim. max pit (mm)	Tipo di attacco	N° micropit	
								1g	≥7g
C5-40-1	X	-	-	-	-	-	-	>5	
C5-40-2	-	-	-	-	>10	3	Penetrante/Intenso	>5	
C5-40-3	X	-	-	-	1	<1	Penetrante/Intenso	>5	
C5-40-4	X	-	X	-	2	2	Penetrante/Intenso	>5	
C5-40-5	-	-	X	-	>10	2	Penetrante/Intenso	>5	
C5-40-6	-	-	-	-	3	<1	Penetrante	>5	
C5-40-7	X	-	-	-	>10	4	Penetrante/Intenso	>5	
C5-40-8	X	-	-	X	>10	3	Penetrante/Intenso	>5	
C5-40-9	-	-	-	X	>10	3	Penetrante/Intenso	>5	
C5-40-10	X	X	X	-	-	-	-	>5	

3.3 Prova di ponding

In queste prove cloruri sono stati fatti penetrare dall'esterno, immergendo il provino inizialmente privo di cloruri in una soluzione contenente cloruri (soluzione 150g/l di NaCl). La prova è stata eseguita a 23°C su armature in acciaio inossidabile di tipo 23-04. In questo tipo di prova, facendo penetrare i cloruri dall'esterno si ottengono le condizioni più simili a quelle delle strutture reali, in modo da confrontarle con le prove precedenti.

La prova ha avuto inizio nell'ambito di un precedente lavoro di tesi [20] il 14.03.2013 ed è stata monitorata costantemente ad eccezione di due periodi brevi (*Figura 3.55 e 3.56*). La prima sospensione è stata dovuta all'innescò della corrosione nella parte esterna, non protetta, delle armature, mentre la seconda al prelievo di un campione tramite carotaggio per verificare l'avanzamento dei cloruri nel calcestruzzo. Nel presente lavoro il monitoraggio è cominciato agli inizi di novembre 2013 fino a luglio 2014.

Nell'ambito di un precedente lavoro di tesi il provino è stato immerso nella soluzione di prova. Dopo aver cortocircuitato le armature è stato imposto il potenziale di +200 mV/SCE (*Figura 3.53*) ed è stata monitorata la densità di corrente. In *Figura 3.54* si vede come, dopo circa due mesi dall'avvio della prova, la corrente di polarizzazione delle armature si è portata a valori pari a circa 1 mA/m²[20].

Nel periodo da 26 luglio a 18 novembre 2013 la prova è stata interrotta, in seguito al verificarsi dell'innescò della corrosione sulla parte esterna delle armature che ha causato l'aumento della densità di corrente. Il provino è stato estratto dalla soluzione ed è stata rimossa un'armatura (la n°10) per valutare tramite osservazione visiva le condizioni della parte di barra a contatto con il calcestruzzo; la superficie in questione è risultata priva d'innescò (*Figura 3.55*). Si è provveduto a pulire le zone d'innescò e proteggere la parte esterna delle armature inglobandole in resina epossidica. Inoltre sono stati prelevati 4 campioni di calcestruzzo, due in prossimità all'armatura e due sulla superficie esterna del provino. I risultati ottenuti hanno mostrato che sulla parte esterna la quantità di cloruri è compresa tra 3,8 e 4,1%, mentre nelle vicinanze dell'armatura è tra 2,5 e 2,7% (*Figura 3.56*).

La prova è stata ripresa e la *Figura 3.54* mostra i potenziali di libera corrosione delle armature misurati dopo l'immersione nella soluzione di prova, prima del riavvio della polarizzazione. I valori sono risultati pari a circa -60 mV vs SCE tranne che per l'armatura CP2-6 per la quale si osservato -100 mV vs SCE. Le armature sono state nuovamente cortocircuitate ed è stato imposto il potenziale a +200 mV vs SCE per poter monitorare la densità di corrente. Dopo circa due giorni, la corrente di polarizzazione delle armature si è portata a valori inferiori a 1 mA/m².

Dopo 323 giorni, dall'avvio, la prova è stata interrotta per effettuare il prelievo del calcestruzzo e valutare ulteriormente dei cloruri. La carota è stata tagliata in modo tale da ottenere "fette" da 5 mm di spessore ciascuna che sono state sottoposte ad analisi chimica. Nel campione superficiale esterno si è individuata una concentrazione di cloruri pari circa a 4,51%. All'aumentare della profondità il contenuto di cloruri riscontrato diminuisce, a livello di copriferro (10 mm) si sono

raggiunti valori di circa 2% di cloruri fino ad arrivare ad un contenuto di circa 0,5% oltre i 20 mm dalla superficie esterna (Figura 3.58) dopo circa un anno di immersione nella soluzione; invece a partire da 30 mm i valori aumentano di nuovo, poiché la particolare geometria del provino, a forma di bicchiere, permette la penetrazione della soluzione con cloruri sia dalla superficie esterno sia da quella interna del provino. Rispetto alla misura precedente il livello di cloruri è aumentato come si può osservare nella Figura 3.58.

Nonostante il lungo periodo di monitoraggio fino ad oggi, sulle armature non si sono rilevati valori di densità di corrente che indicano un chiaro innesco della corrosione, la prova è ancora in corsa.

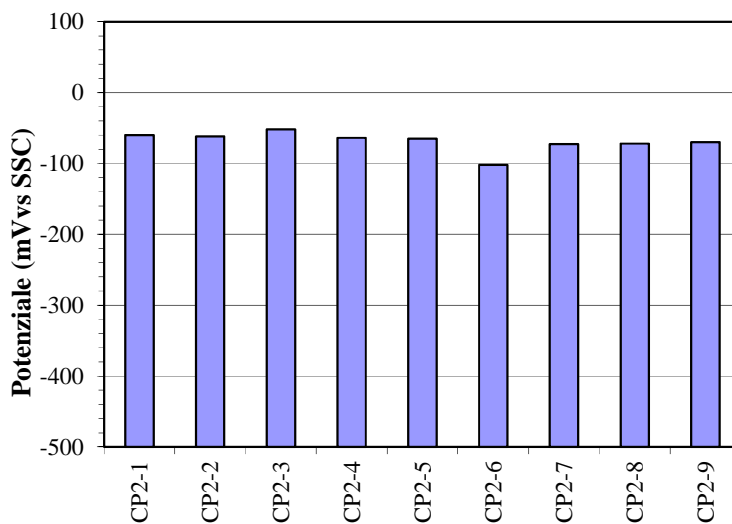


Figura 3.54 Potenziale di corrosione libera, dopo la prima interruzione, delle armature di tipo 23-04 nel provino in calcestruzzo senza cloruri aggiunti nel getto, sottoposto a prova di *ponding*.

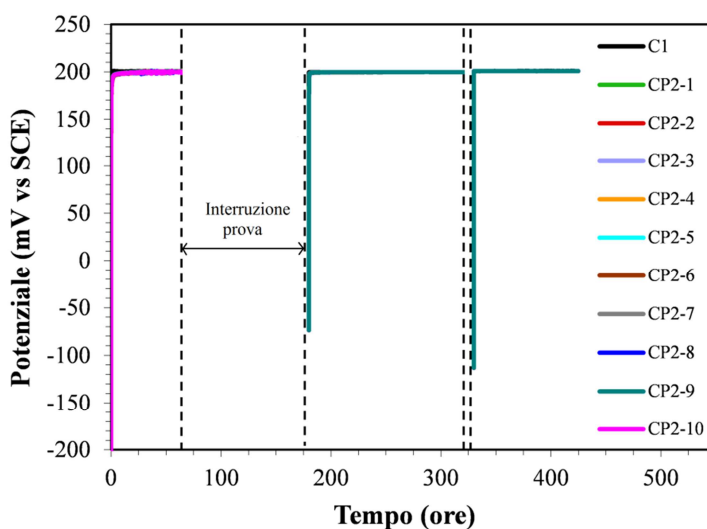


Figura 3.55 Andamento del potenziale delle armature di tipo 23-04 nei provini in calcestruzzo inizialmente privi di cloruri e soggetti a *ponding* durante la polarizzazione a +200 mV/SCE (T = 23°C).

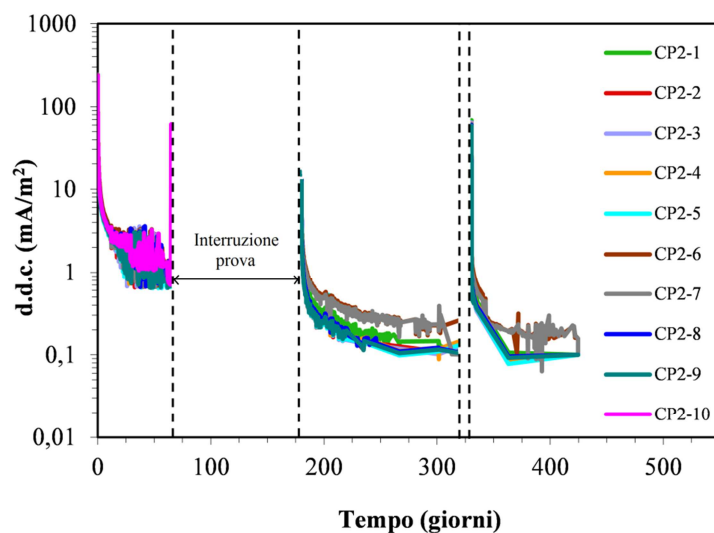


Figura 3.56 Densità di corrente di polarizzazione delle armature di tipo 23-04 nel provino in calcestruzzo senza cloruri aggiunti nel getto sottoposto a prova di *ponding*.

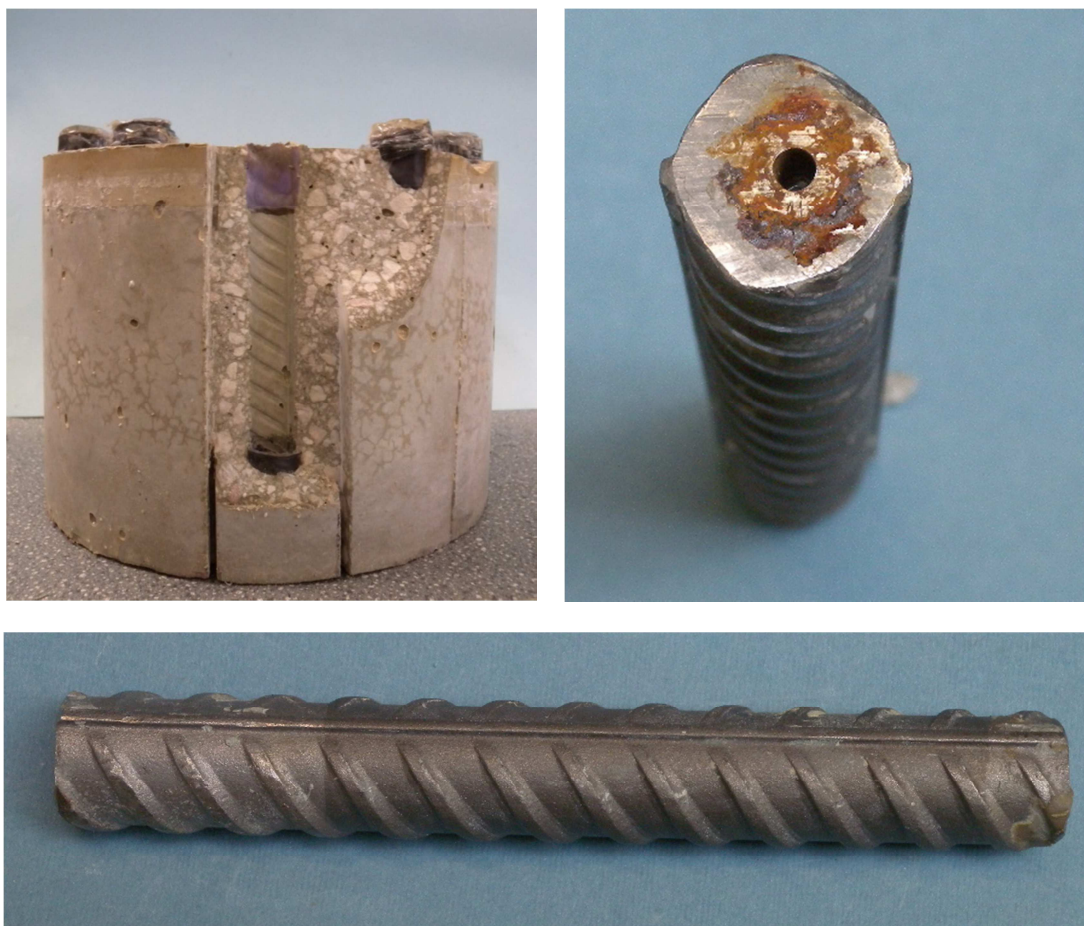


Figura 3.57 Il provino di ponding dopo l'estrazione dell'armatura e la relativa barra.

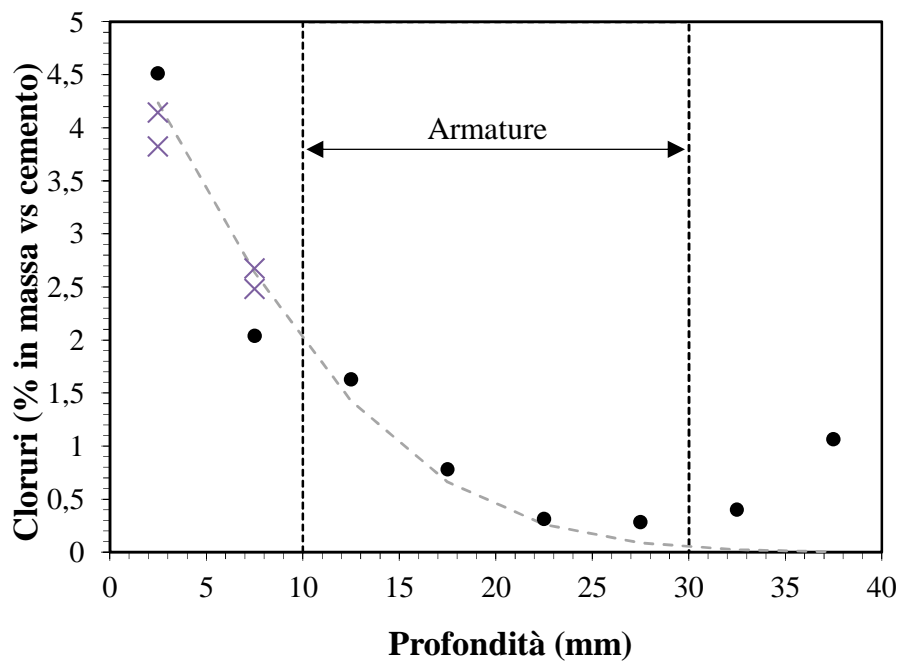


Figura 3.58 Profilo di cloruri rilevato alle diverse profondità nel campione di calcestruzzo prelevato dal provino sottoposto a prova di *ponding*. (x = primo prelievo di calcestruzzo; • = secondo prelievo di calcestruzzo)

3.4 Prove di corrosione libera

In parallelo alle prove di polarizzazione potenziostatica anodica si sono eseguite le prove di corrosione libera posizionando i provini sulla copertura di un edificio del Dipartimento così da esporli all'atmosfera di Milano. Tali provini sono stati confezionati assieme a quelli utilizzati nella prova di polarizzazione e pertanto con le medesime caratteristiche. Le barre d'armatura in acciaio inossidabile utilizzate per questa prova sono state di tipo 23-04, XM-28, 316LN, 304LN e 22-05. Nella *Tabella 3.25* sono state riportate le osservazioni visive delle imperfezioni presenti sulle armature, effettuate prima di ogni getto.

In *Figura 3.59* si riporta l'andamento della temperatura media giornaliera (in rosso) e dell'umidità relativa (in verde) in prossimità del centro di registrazione meteorologica di Milano Linate durante il periodo di esposizione. I giorni caratterizzati da un'elevata umidità dovuta da pioggia, precipitazioni nevose o nebbia sono segnalati con cerchi.

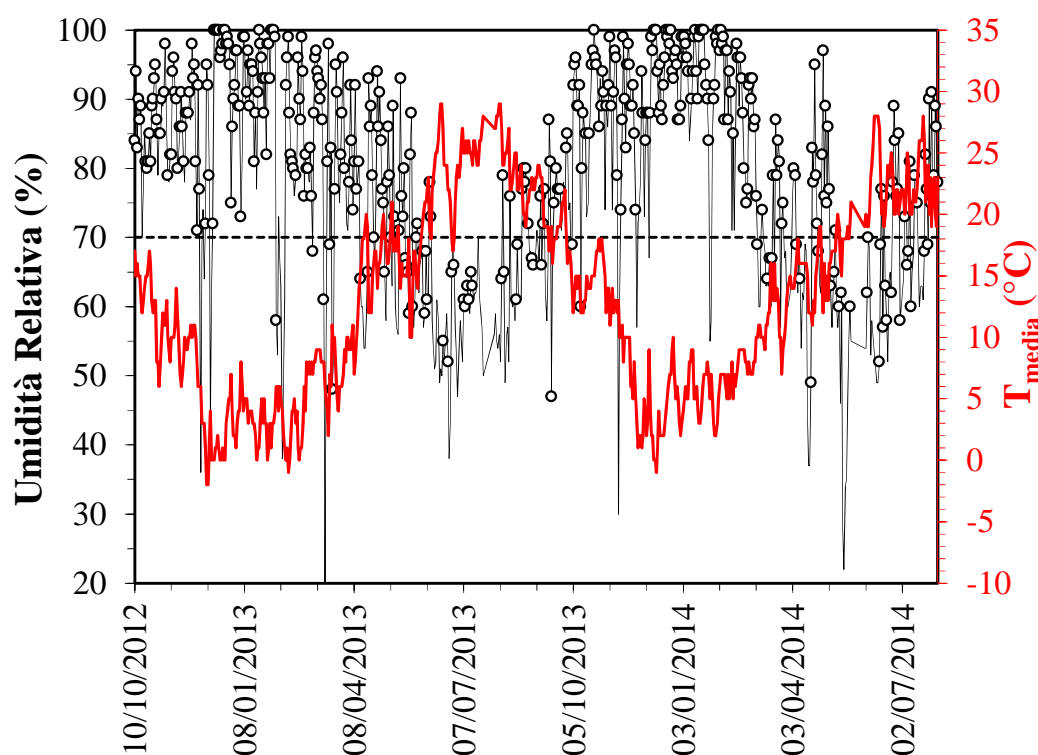


Figura 3.59 Umidità relativa (in nero) e temperatura (in rosso) registrate a Milano (rilevazioni della stazione meteorologica di Milano Linate) nel periodo di esposizione dei provini (o = pioggia, nebbia o neve). Valori medi giornalieri.

Queste prove sono iniziate nell'ambito di un precedente lavoro di tesi [20, 21], nell'ambito di questo lavoro si è continuato di misurare potenziale e la velocità di corrosione, di provini confezionati in precedenza e quelli realizzati durante svolgimento di tesi, a partire dall'inizio di ottobre 2013. Inoltre le prove di questo tipo dovranno essere continuate. Per maggior chiarezza le misure ottenute per i diversi tipi di acciai sono presentate separatamente.

Tabella 3.25 Osservazione della superficie delle armature utilizzate, effettuata prima della prova, in calcestruzzo e in malta con diversi tenori di cloruri (CaCl_2), utilizzati per la prova di corrosione libera (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; “-” = non si è evidenziato nulla; “ ” = non è stato effettuato).

Acciaio	Cl ⁻	Provino	Osservazione pre-prova				Acciaio	Cl ⁻	Provino	Osservazione pre-prova			
			R	S	B	D				R	S	B	D
23-04	3%	C-16	-	X	-	X	316LN	7%	C7-A-2-11	X	X	X	X
23-04	3.5%	C3.5-16	-	-	X	-	XM-28	2%	C2-X-11	X	X	-	X
23-04	5%	C5-16	-	-	-	-	XM-28	2%	C2-X-12	X	X	-	X
23-04	3%	M3-11	X	-	X	-	XM-28	3%	C3X-2-11	-	-	-	X
23-04	3.5%	M3.5-11	-	-	X	-	XM-28	3%	C3X-2-11-2°	-	-	X	-
23-04	5%	M5-11	X	X	X	-	XM-28	4%	C4X-2-11	-	X	-	X
23-04	3%	C3-II	-	-	-	-	304LN	4%	C4-AA-11	X	X	X	X
23-04	5%	C5-II	-	X	-	-	304LN	4%	C4-AB-22	X	X	X	X
316LN	5%	C5-A-2-11	-	-	-	X	304LN	4%	C4-AL-33	-	X	X	X
316LN	6%	C6-A-2-11	-	X	-	X	22-05	5%	C5-DX-11	-	X	-	X

23-04

Per il confezionamento di provini contenenti acciaio inossidabile tipo 23-04 sono stati impiegati sia calcestruzzi sia malte con cloruri da 3 a 5% vs cemento. Le *Figure 3.60(a),(b)* rappresentano i potenziali di corrosione e la velocità di corrosione misurate una volta a settimana e le *Figure 3.61(a),(b)* confrontano valori medi di 100 giorni di esposizione. I due campioni di calcestruzzo, C5-75% e C3-75%, sono stati mantenuti in camera climatica a 23°C ad una umidità relativa costante pari al 75% a differenza degli altri, esposti all’atmosfera di Milano.

I potenziali di corrosione di tutte le armature nei provini a diversi tenori di cloruri sono sempre risultati superiori a -200 mV vs SCE (*Figura 3.60(a)*) che negli ultimi 100 giorni assumevano i valori intorno a 0 mV vs SCE (*Figura 3.61(a)*). Per quanto riguarda le velocità di corrosione (*Figura 3.60(b)*) queste nel tempo hanno subito un aumento, portandosi a valori pari a circa 6 $\mu\text{m}/\text{anno}$ per il provino C5-16 e circa 4 $\mu\text{m}/\text{anno}$ per quelli mantenuti in camera climatica (*Figura 3.61(b)*). I restanti provini hanno la velocità media pari a circa 2 $\mu\text{m}/\text{anno}$.

Dopo 538 giorni di esposizione di esposizione si è decisa l’interruzione della prova e rottura dei provini per verificare lo stato delle armature. In *Figura 3.62* sono riportate le immagini delle armature estratte dai provini sulle quali non si sono verificati inneschi visibili ad occhio nudo, per cui è stata utilizzata la lente (ingrandimento massimo 8 volte) con la quale sono stati osservati solo micro-pit su 3 armature su 8, quali sono C5-16, M3-11 e M5-11 (*Tabella 3.26*). Anche in questo caso come per la prova di polarizzazione potenziostatica anodica, le armature sono state osservate nel tempo. Dopo 7 giorni due barre non presentavano in superficie micro-pit.

Infine per verificare il contenuto dei cloruri presenti nel calcestruzzo si sono svolte analisi chimiche. E’ stata verificata una deviazione rispetto alla percentuale di cloruri reali aggiunte all’impasto nella fase di getto; a titolo d’esempio si riporta il campione C3-16 per il quale i cloruri rilevati sono stati 2,8% in massa vs cemento rispetto a 3% introdotti.

XM-28

Le misure effettuate su provini con 2-3-4% di cloruri sono state riportate in *Figura 3.63 e 3.64*. Per quanto riguarda i potenziali si osserva che aumentano nel tempo, assumendo i valori maggiori di -100 mV vs SCE negli ultimi giorni, mentre la velocità di corrosione evidenzia che tutti i provini mostrano valori compresi tra 0,1 e 0,3 $\mu\text{m}/\text{anno}$; valori di circa un ordine di grandezza inferiori rispetto all'acciaio 23-04. In base ai dati riportati si può concludere che ad oggi i provini non si sono innescati.

304LN, 316 LN e 22-05

Nella *Figura 3.65 e Figura 3.66* si può osservare l'andamento del potenziale e della velocità di corrosione riferita ai tre diversi tipi di armature 304 LN con 4-5%, 316LN con 5-6-7% e 22-05 con 5% di cloruri. Si nota che il potenziale dei provini con barre d'armatura in acciaio 316 LN è più elevato rispetto agli altri due tipi di acciaio. L'acciaio 304LN ha il potenziale più basso con valori tra -150 e -250 mV vs SCE anche in corrosione libera prima di prova potenziostatica. Per quanto riguarda la velocità di corrosione l'acciaio duplex 22-05 presenta valori fino a 2 $\mu\text{m}/\text{anno}$ che sono superiori agli altri, ma simili a quelli dell'altro duplex 23-04. Allo stesso modo si osserva che la velocità per l'acciaio 316 LN assume valori minori di 1 $\mu\text{m}/\text{anno}$ e per 304 LN intorno 0,1 $\mu\text{m}/\text{anno}$. Anche in questo caso i provini non si sono innescati.

23-04

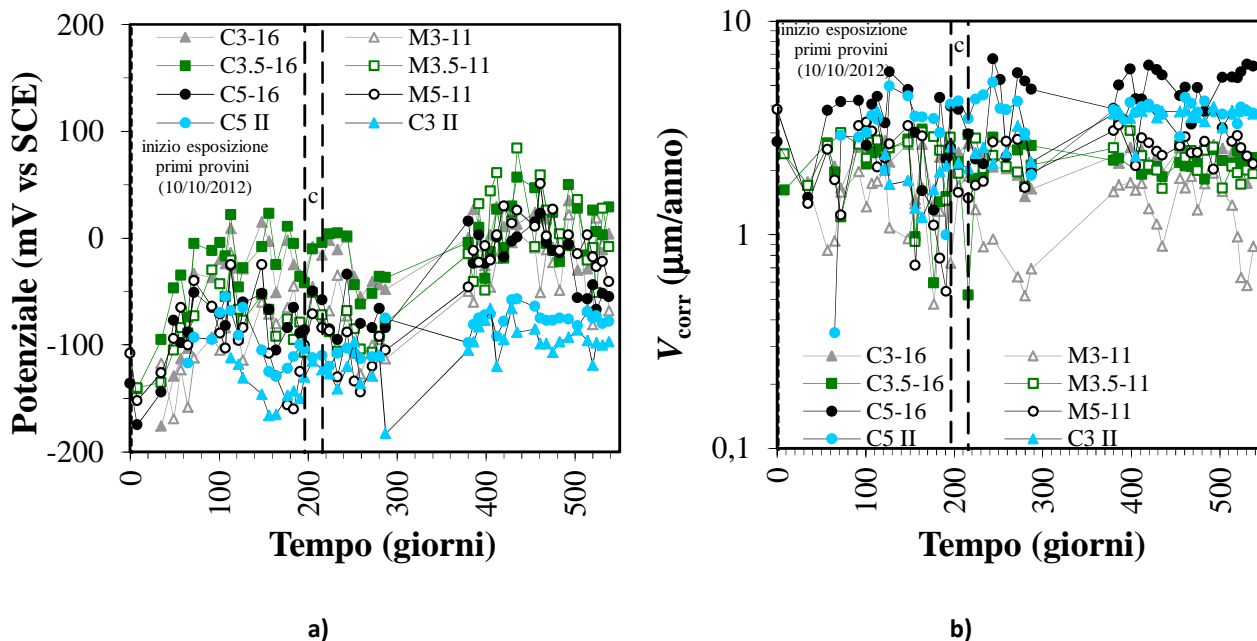


Figura 3.60 Potenziale di corrosione libera (a) e velocità di corrosione (b), rilevati sulle armature di acciaio inossidabile 23-04 poste nei campioni a diversi tenori di cloruri in condizioni di corrosione libera ed esposte all'atmosfera di Milano; i provini C5-II e C3-II sono stati posti in laboratorio al 75% di U.R. (c=periodo di mantenimento in camera climatica a 23°C e 95% U.R.).

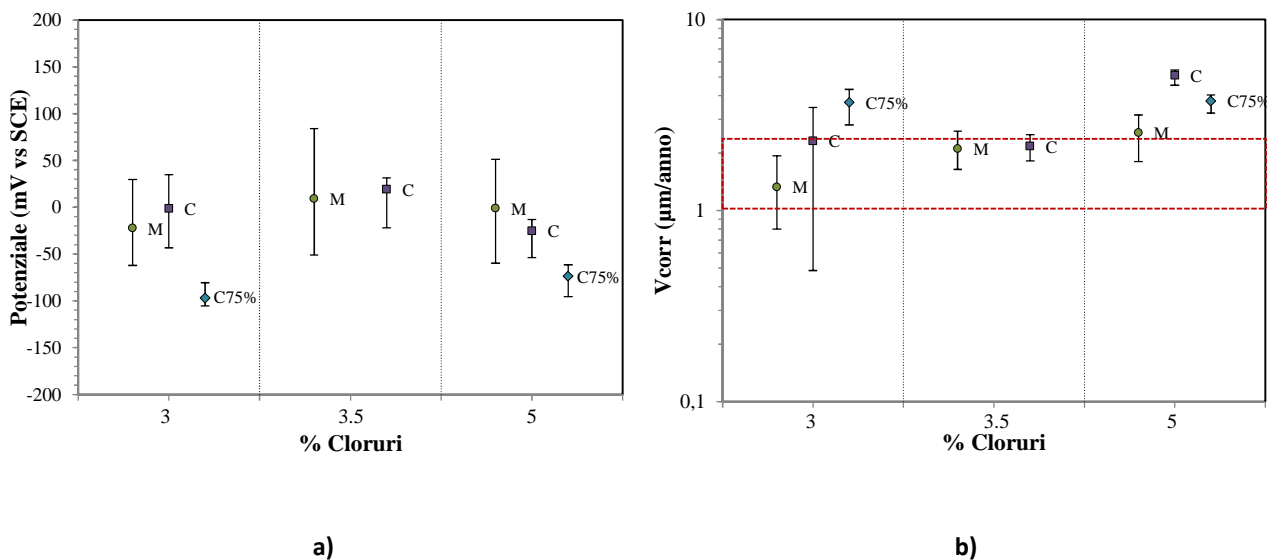


Figura 3.61 Potenziale medio di corrosione libera (a) e velocità media di corrosione (b), rilevati, durante ultimi 100 giorni, sulle armature in acciaio inossidabile 23-04 poste nei campioni a diversi tenori di cloruri in condizioni di corrosione libera ed esposte all'atmosfera di Milano; i provini C5-II e C3-II sono stati posti in laboratorio al 75% di U.R.

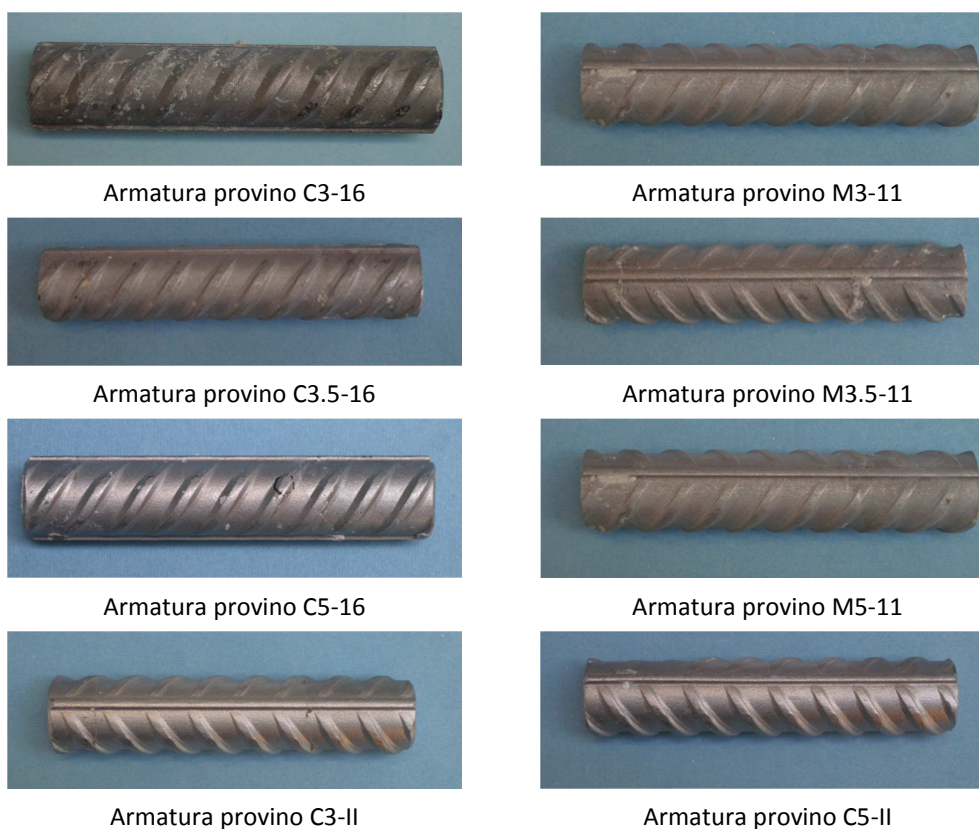


Figura 3.62 Armature in acciaio inossidabile 23-04 estratte dai provini di calcestruzzo con cloruri aggiunti (CaCl_2) al termine di esposizione alle condizioni atmosferiche di Milano.

Tabella 3.26 Osservazione della superficie delle armature di tipo 23-04 effettuata prima della prova e in seguito alla demolizione dei provini, in calcestruzzo con diversi contenuti di cloruri (CaCl_2), al termine del periodo di esposizione all'atmosfera (R = presenza di macchie di ruggine; S = presenza di scaglie/scalfitture; B = presenza di zone scure; D = presenza di incisioni; "-" = non si è evidenziato nulla; " " = non è stato effettuato).

Provino	Osservazione pre-prova				Osservazione post-prova			Osservazione post-prova a lungo termine	
	R	S	B	D	N° pit	Dim. max pit (mm)	Tipo di attacco	N° micropit	
								1g	≥7g
C3-16	-	X	X	X	-	-	-	1	2
C3.5-16	-	X	X	X	-	-	-	-	1
C5-16	-	X	-	X	1	< 0,5	Micropit	2	2
M3-11	-	X	-	X	2	< 0,5	Micropit	2	3
M3.5-11	-	X	-	X	-	-	-	-	-
M5-11	-	X	X	X	>5	< 0,5	Micropit	>5	>5
C3-II	X	X	-	X	-	-	-	-	-
C5-II	X	X	X	X	-	-	-	1	1

XM-28

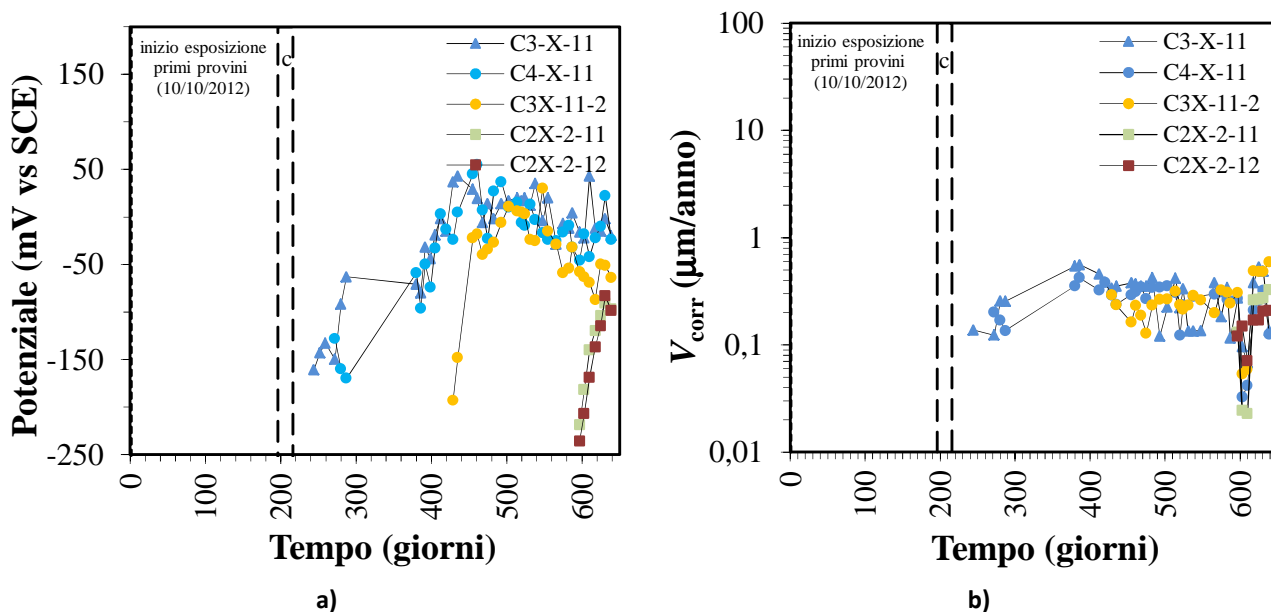


Figura 3.63 Potenziale di corrosione libera (a) e velocità di corrosione (b), rilevati sulle armature XM-28 poste nei campioni a diversi tenori di cloruri in condizioni di corrosione libera ed esposte all'atmosfera di Milano (c=periodo di mantenimento in camera climatica a 23°C e 95% U.R.).

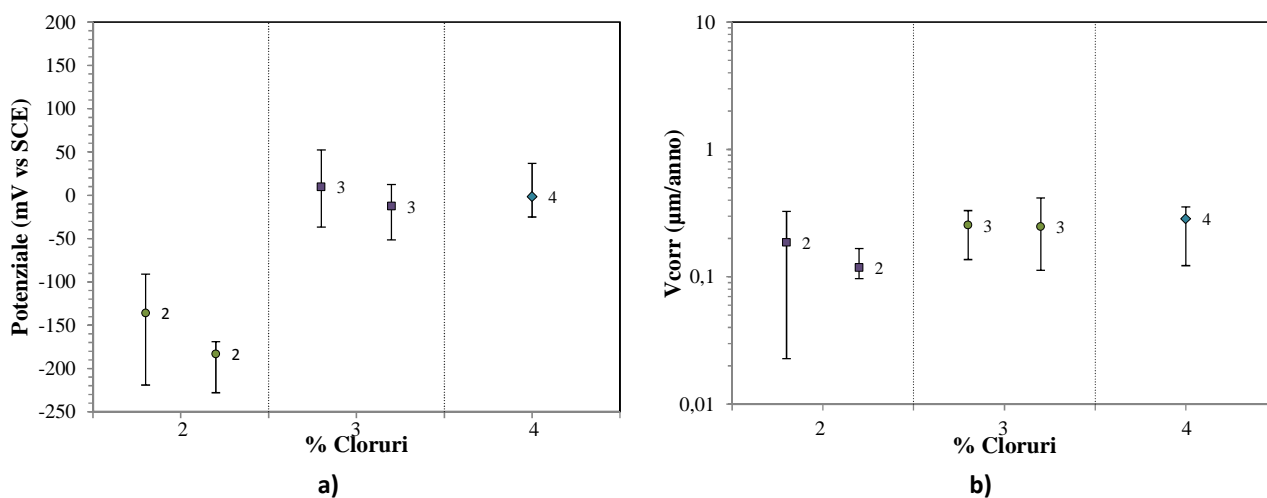


Figura 3.64 Potenziale medio di corrosione libera (a) e velocità media di corrosione (b), rilevati, durante ultimi 100 giorni, sulle armature XM-28 poste nei campioni a diversi tenori di cloruri in condizioni di corrosione libera ed esposte all'atmosfera di Milano.

316LN, 304LN, 22-05

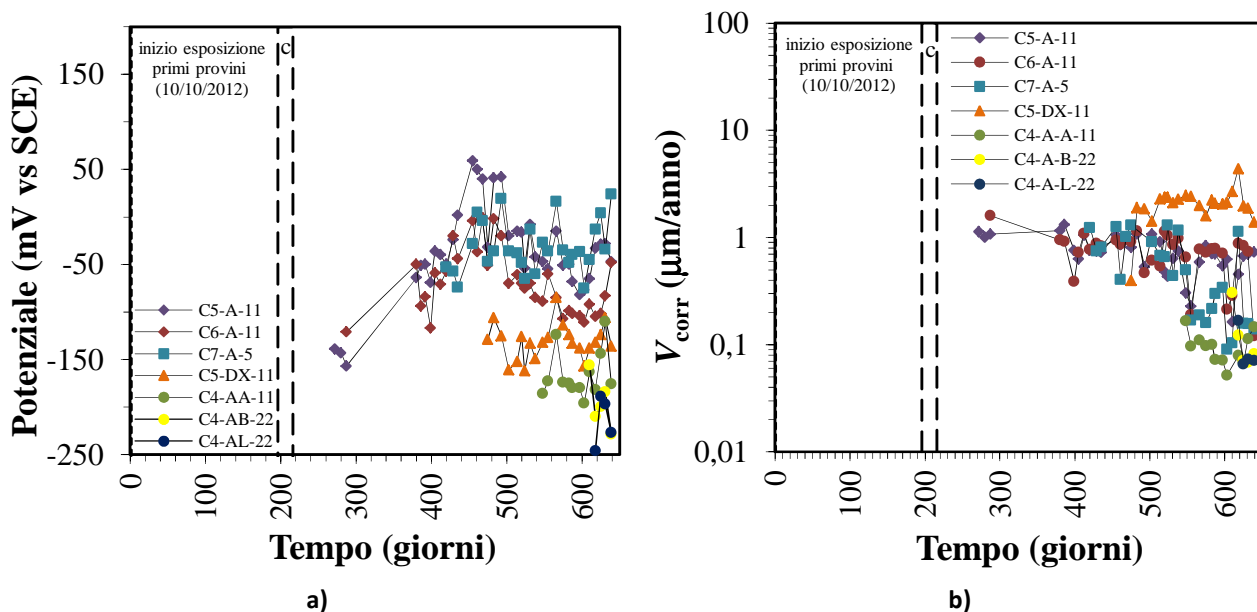


Figura 3.65 Potenziale di corrosione libera (a) e velocità di corrosione (b), rilevati sulle armature poste nei campioni a diversi tenori di cloruri in condizioni di corrosione libera ed esposte all'atmosfera di Milano (c=periodo di mantenimento in camera climatica a 23°C e 95% U.R.).

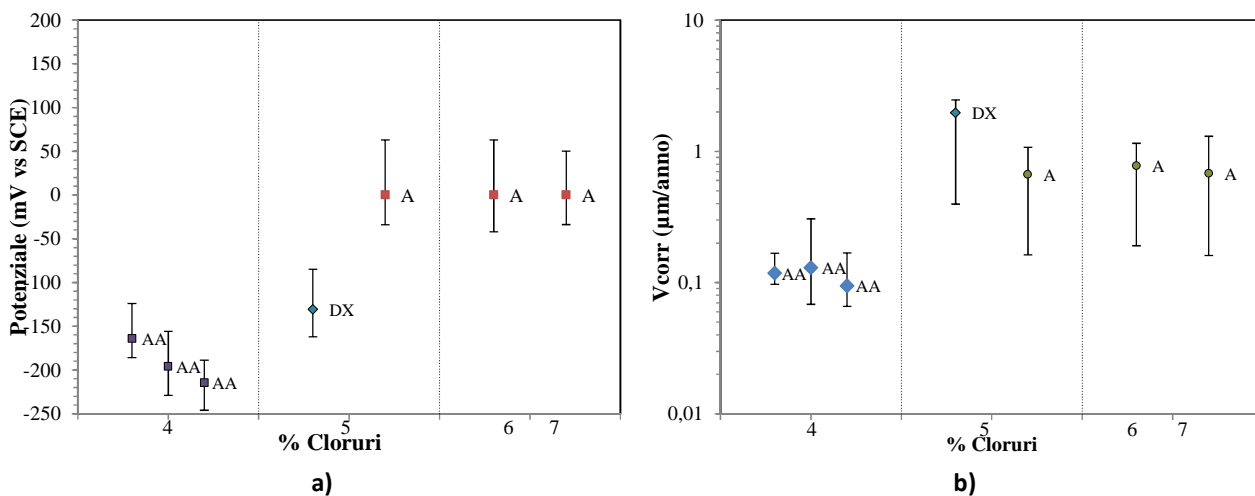


Figura 3.66 Potenziale medio di corrosione libera (a) e velocità media di corrosione (b), rilevati, durante ultimi 100 giorni, sulle armature poste nei campioni a diversi tenori di cloruri in condizioni di corrosione libera ed esposte all'atmosfera di Milano; (DX = 22-05; A = 316LN; AA = 304LN)

Capitolo 4

Discussione dei risultati

Ad oggi non esiste ancora una metodologia di prova standardizzata per la stima del tenore critico dei cloruri di armature in acciaio inossidabile in strutture in calcestruzzo, parametro fondamentale per la progettazione prestazionale. Questa ricerca ha avuto inizio in tesi precedenti [20,21] in cui sono state eseguite prove di polarizzazione anodica a diversi potenziali mantenuti costanti o variabili nel tempo. I risultati ottenuti hanno rivelato che la prova con potenziale fisso + 200 mV vs SCE per 24 h, scelto in quanto più rappresentativo delle strutture marine esposte agli spruzzi, mostra intervalli di valori di potenziale più simili alle condizioni reali [20].

Con questo presupposto, nell'ambito della presente tesi sono state svolte prove con diversi tenori di cloruri sugli acciai inossidabili 316LN, 23-04 e XM-28 già avviate nei lavori precedenti, per poter completare le curve di distribuzione del tenore critico di cloruri. Inoltre, sono stati sottoposti allo studio anche l'acciaio austenitico 304LN e l'austeno-ferritico tipo 22-05. Tra gli acciai studiati, alcuni sono stati confezionati per valutare la resistenza a corrosione a temperature caratteristiche dei climi caldi di 30 e 40 °C.

Allo stesso tempo sono state proseguite prove di corrosione libera su provini esposti all'atmosfera di Milano e di valutazione dell'innesco della corrosione con cloruri penetranti in un provino mantenuto in camera climatica a 23 °C per poter verificare i risultati ottenuti con le prove accelerate.

Tutte le prove potenziostatiche sono state succedute da un'osservazione visiva delle superfici delle armature che ha rivelato la presenza di inneschi di corrosione di dimensione inferiore a 0,5 mm, non rivelati né dai potenziali né dalle densità di corrente valutate a termine della polarizzazione. Per valutarne l'importanza e l'influenza sulla stima del tenore critico sono state eseguite prove di polarizzazione potenziostatica a + 200 mV vs SCE per durate di 6 o 13 giorni.

4.1 Comportamento a corrosione dei diversi tipi di acciaio inossidabile

Le prove sperimentali svolte hanno coinvolto lo studio di 5 acciai differenti: due austenoferritici, 22-05 e 23-04, due austenitici tradizionali 316LN e 304 LN e uno al manganese di tipo XM-28. Considerando le armature in cui non è avvenuto l'innescò della corrosione, si possono valutare le differenze in termini di caratteristiche elettrochimiche dei diversi tipi di acciai in condizioni di passività. Nelle *Figure 4.1 e 4.2* sono messe a confronto le correnti di tutte le armature rimaste passive, misurate nella prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV vs SCE effettuata a 23 °C. In particolare, si può osservare nel grafico di *Figura 4.1*, che le densità di corrente degli acciai XM-28, 304LN e 22-05 sono comprese tra i 3 e i 10 mA/m², mentre per gli acciai 316LN e il 23-04 i valori si aggirano tra i 10 e i 110 mA/m². Al termine delle 24 h (*Figura 4.2*), tranne il 22-05, le correnti sono scese tutte di un ordine di grandezza. L'acciaio XM-28 e il 304LN si portano alla stessa densità di corrente intorno ai 1 mA/m² mentre il duplex 23-04, pur diminuendo la sua densità, raggiunge valori poco inferiori a 20 mA/m². Si osserva pertanto che l'acciaio 23-04 ha una densità di corrente maggiore degli acciai austenitici, sia dopo un'ora sia a termine della prova. Si evidenzia pertanto un comportamento anodico differente dei diversi materiali, confermato anche dalle densità di corrente misurate sui provini in corrosione libera confezionati con i medesimi tenori di cloruri.

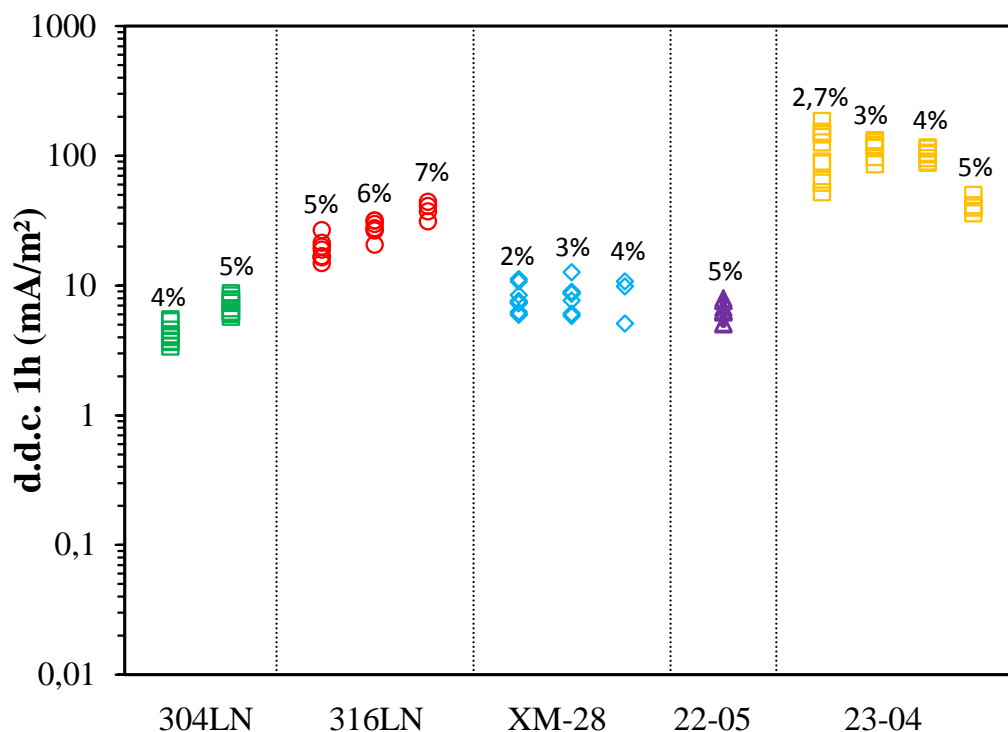


Figura 4.1 Densità di corrente di polarizzazione rilevata dopo la prima ora prova potenziostatica anodica di 24 h a potenziale fisso +200 mV vs SCE a T=23 °C sugli acciai XM-28, 304LN, 316LN, 22-05 e 23-04.

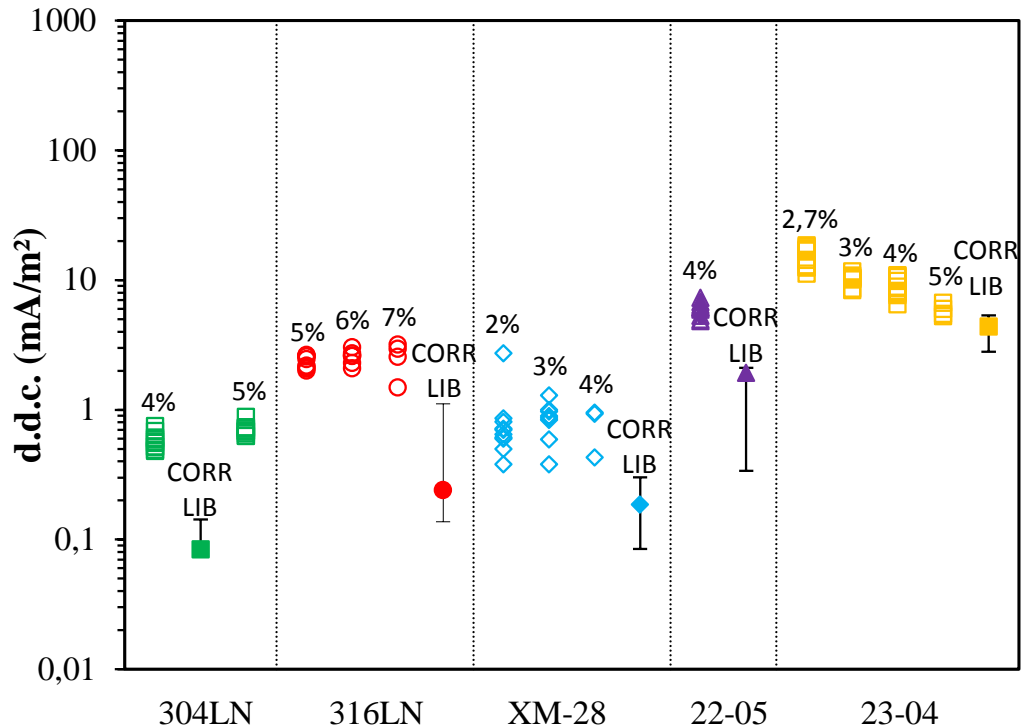


Figura 4.2 Densità di corrente rilevata al termine della prova di polarizzazione potenziostatica anodica di 24 h a potenziale fisso +200 mV vs SCE a T=23 °C sugli acciai XM-28, 304LN, 316LN, 22-05 e 23-04. Sono inoltre riportati i valori medi della densità di corrente misurata sui provini in libera corrosione.

I valori delle densità di corrente sui provini in libera corrosione risultano inferiori a quelli dei provini valutati con la prova di polarizzazione potenziostatica poiché rappresentano la corrente di passività in condizioni reali e non ricavata da prove accelerate a potenziale fisso come la prova di 24 h.

Nonostante i diversi acciai dei grafici (Figura 4.1, 4.2) mostrino già una prima disuguaglianza riguardo al loro comportamento a corrosione a partire dalla corrente di passività, la differenza più rilevante si ottiene dall'analisi del numero di armature innescate in funzione del tenore critico con cui i provini di calcestruzzo sono stati confezionati. Prima di proseguire la trattazione si definiscono le condizioni secondo le quali la corrosione è stata considerata innescata:

- Dopo 24 ore di polarizzazione la densità di corrente supera gli 80 mA/m².
- Durante la polarizzazione, la curva si discosta dall'andamento regolare decrescente, cambiando la pendenza della tangente alla curva.
- Gli inneschi hanno dimensioni maggiori di 0,5 mm.

E' sufficiente che si verifichi una sola delle condizioni elencate perché l'elemento risulti innescato.

Definito l'innescio di corrosione, si riporta l'istogramma di *Figura 4.3* dove si comparano i risultati ottenuti dalle prove di polarizzazione potenziostatica anodica a + 200 mV vs SCE per i diversi tipi di acciaio inossidabile. Vengono indicati anche i risultati ottenuti da prove

effettuare in tesi precedenti [20]. L'acciaio tipo 304LN e 316LN risultano essere i più resistenti a corrosione con comportamento molto simile; entrambi mostrano l'innescò del 10% delle armature a partire da prove effettuate a $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ e con 5% di cloruri, condizioni che identificano ambienti molto aggressivi.

Di contro, l'acciaio XM-28 è quello che ha mostrato meno resistenza in ambiente alcalino a $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ per cui si verifica il 30% d'innescò delle armature per tenori di cloruri pari al 3% rispetto alla massa di cemento; al 4% risultano innescate il 90 % delle armature. La minor resistenza a corrosione rispetto agli acciai 304LN e 316LN può essere giustificata dal basso contenuto di Molibdeno. L'acciaio austeno-ferritico 23-04 presenta una media resistenza a corrosione, infatti già in calcestruzzo confezionato con 3% di cloruri la corrosione si è innescata sul 10% delle armature. Questo acciaio non ha mostrato una variabilità crescente della percentuale di armature soggette a corrosione visibili a occhio nudo e confezionate in calcestruzzo con 4% di cloruri. Al 5% invece il 60% delle armature ha mostrato corrosione. Il 22-05 per ora è stato valutato solo al 5% di Cl⁻ dove non sono stati riscontrati inneschi di corrosione.

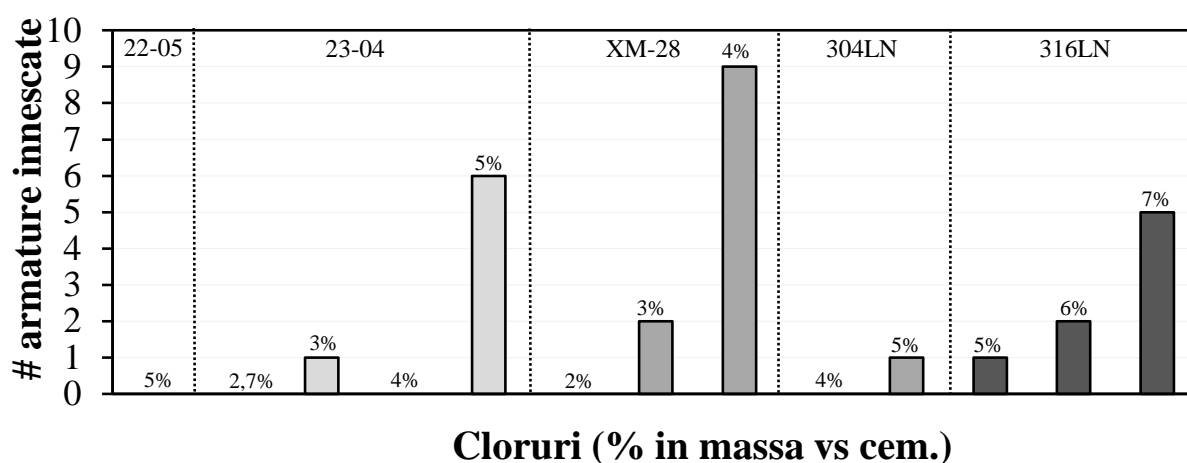


Figura 4.3 Numero di armature innescate nella prova di polarizzazione potenziostatica anodica di 24 h a potenziale fisso +200 mV vs SCE a $T=23\text{ }^{\circ}\text{C}$ sugli acciai 22-05, 23-04, XM-28, 304LN, e 316LN.

Per quanto riguarda le prove effettuate a diverse temperature, esse hanno permesso di valutarne gli effetti sul tenore critico di cloruri a partire dal numero di barre risultate innescate al termine della prova di polarizzazione. Ad alte temperature, come nel caso dei climi caldi (es. Dubai, Emirati Arabi Uniti), le condizioni di esposizione risultano favorevoli all'innescò della corrosione; difatti, dal grafico di *Figura 4.4*, si osserva il numero crescente di inneschi, per i vari tipi di acciaio, all'aumentare della temperatura. L'acciaio 22-05 ha mostrato una buona resistenza a corrosione in ambienti caldi per cui non ha dato segni di inneschi neanche al 5% di cloruri. Di contro, l'acciaio XM-28 ha mostrato al 3% un brusco incremento di armature innescate che conferma la scarsa resistenza a corrosione già evidenziata per le esposizioni a $23\text{ }^{\circ}\text{C}$. L'acciaio 23-04 mostra invece una variabilità di risultati non coerente con le aspettative; infatti, a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ mostra una resistenza a corrosione maggiore rispetto a quella osservata a $23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Di questa anomalia viene discusso nel §4.3. In generale, si

può dire che per quanto riguarda i climi freddi (10 °C), la prova condotta sull'acciaio 23-04 al 5% di cloruri non mostra segni di corrosione.

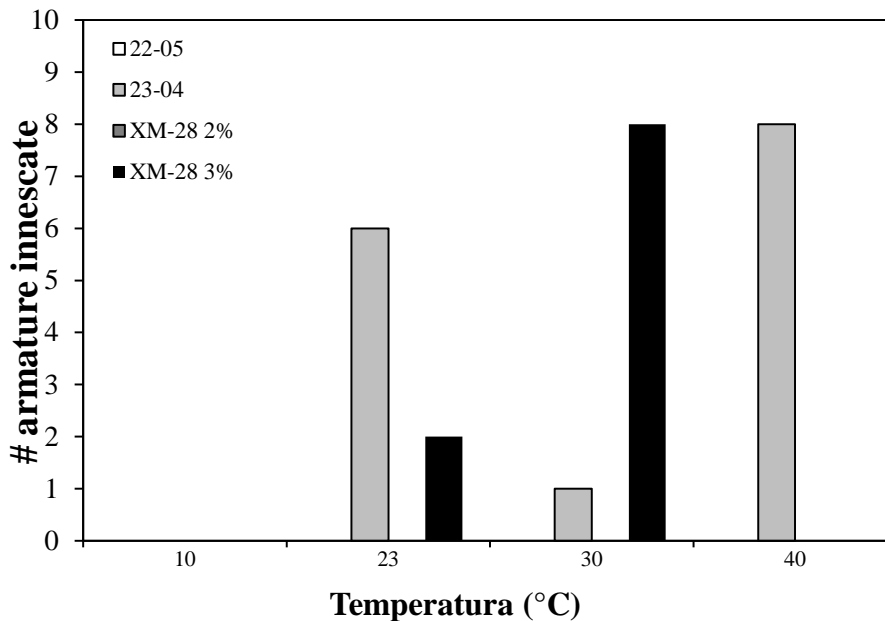


Figura 4.4 Numero di armature innescate nella prova di polarizzazione potenziostatica anodica di 24 h a potenziale fisso +200 mV vs SCE a diverse temperature sugli acciai 22-05, 23-04, XM-28, 304LN, e 316LN.

4.2 Analisi dei micro-pit

Nonostante le densità di corrente misurate (*Figure 4.1 e 4.2*) mostrassero le armature in condizione di passività, con l'osservazione visiva delle barre effettuata a seguito della rottura dei provini, si sono osservati piccoli inneschi di dimensioni inferiori ai 0,5 mm (micro-pit) non evidenziati nella prova di polarizzazione potenziostatica anodica di 24 h a potenziale fisso + 200 mV vs SCE. Nel precedente lavoro di tesi [20] era già stata riscontrata la presenza dei micro-pit ma le condizioni per cui le armature sono state ritenute corrose non hanno valutato significativo il loro manifestarsi. Il presente lavoro di tesi ha voluto indagare anche la condizione per cui un'armatura soggetta a inneschi di dimensioni inferiori al mezzo millimetro può rivelarsi dannosa per la struttura.

In seguito alle prove di polarizzazione potenziostatica, le armature sono state osservate post rottura dei provini, dopo 24h e durante le due settimane a seguire dando risultati non nell'immediato.

Per accelerarne la comparsa è stata applicata una metodologia che prevedesse il posizionamento delle barre in camera di stagionatura con UR $\geq 95\%$; questa

procedura è stata messa in atto sulla base dell'ipotesi che pur non mostrando densità di correnti tali da presupporre la corrosione, le armature avessero ugualmente subito dei

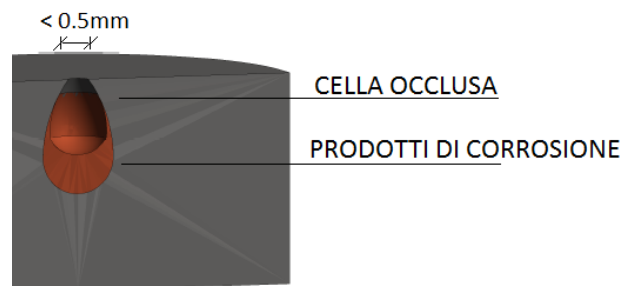


Figura 4.5 Cella occlusa

piccoli inneschi, non visibili immediatamente poiché i prodotti di corrosione rimanevano intrappolati all'interno della cella occlusa (Figura 4.5). Con questa procedura gli ossidi sono stati portati in superficie in tempi più veloci.

Nei seguenti grafici di Figura 4.6-4.9 sono messi a confronto i risultati ottenuti sia dalla polarizzazione potenziostatica sia dall'osservazione visiva effettuata a posteriori. I grafici sono rappresentativi delle prove svolte sull'acciaio 23-04, XM-28, 316LN e 304LN integrando i risultati ottenuti dal lavoro di tesi precedente [20] in funzione del tenore di cloruri. Il grafico di Figura 4.6 mostra che l'acciaio 23-04, al crescere della quantità di cloruri aggiunti all'impasto si innesca una percentuale variabile di armature innescate con pit maggiori di 0,5 mm.

Corrente
 Depolarizzazione
 Macro-pit post rottura
 Micro-pit nel tempo

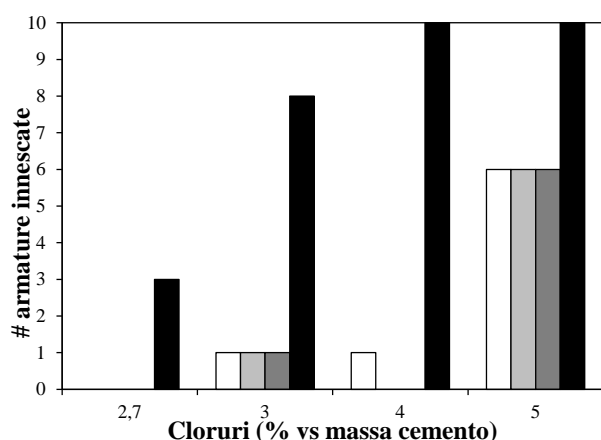


Figura 4.6 Numero di armature (%) con inneschi della corrosione e micro-pit dopo le 24 ore di prova di polarizzazione anodica a +200 mV vs SCE dell'armatura 23-04 in calcestruzzo confezionato con diverse percentuali di cloruri rispetto alla massa. (T= 23°C)

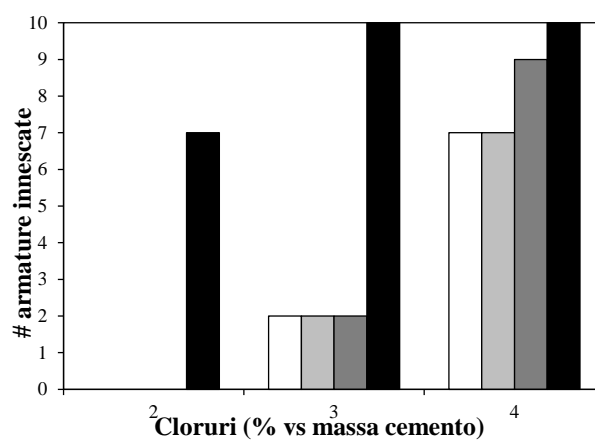


Figura 4.7 Numero di armature (%) con inneschi della corrosione e micro-pit dopo le 24 ore di prova di polarizzazione anodica a +200 mV vs SCE delle armature XM-28 in calcestruzzo confezionato con diverse percentuali di cloruri rispetto alla massa. (T= 23°C)

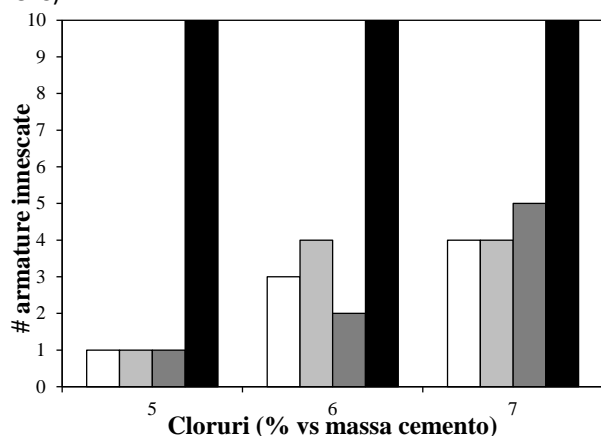


Figura 4.8 Numero di armature (%) con inneschi della corrosione e micro-pit dopo 24 h di prova di polarizzazione a +200 mV vs SCE delle armatura 316LN in calcestruzzo confezionato con diverse percentuali di cloruri rispetto alla massa. (T= 23°C)

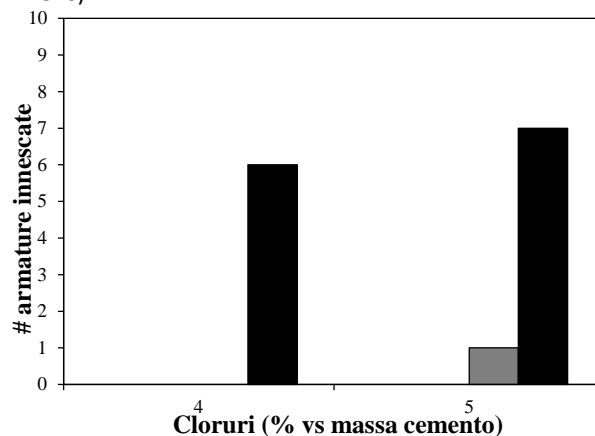


Figura 4.9 Numero di armature (%) con inneschi della corrosione e micro-pit dopo le 24 h di prova di polarizzazione a +200 mV vs SCE delle armatura 304LN in calcestruzzo confezionato con diverse percentuali di cloruri rispetto alla massa. (T= 23°C)

Dai grafici di *Figura 4.6-4.9*, si evidenzia il contrasto tra quanto evidenziato dall'andamento della corrente e dalla depolarizzazione della prova potenziostatica a 24 h e l'osservazione visiva della percentuale di armature interessate da micropit.

Per quanto riguarda la temperatura, le armature in acciaio inossidabile esposte in diversi climi mostrano comportamenti a corrosione diversi. In particolare gli istogrammi di *Figura 4.10-4.13*, si osserva che all'aumentare della temperatura, aumenta il numero di armature innescate.

Corrente
 Depolarizzazione
 Macro-pit post rottura
 Micro-pit nel tempo

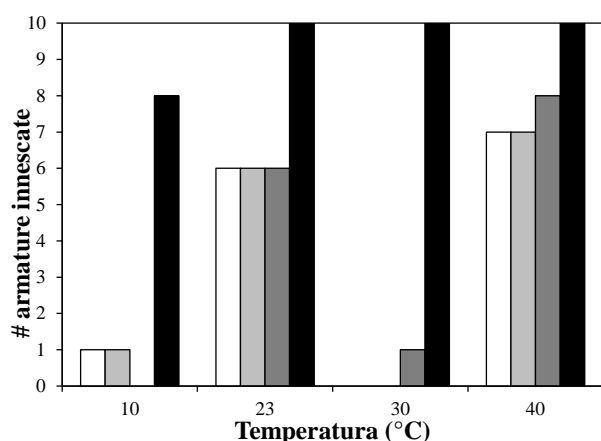


Figura 4.10 Numero di armature (%) con inneschi della corrosione e micro-pit dopo le 24 ore di prova di polarizzazione anodica a +200 mV vs SCE dell'armatura 23-04 in calcestruzzo confezionato con 5% di cloruri rispetto alla massa a diverse T.

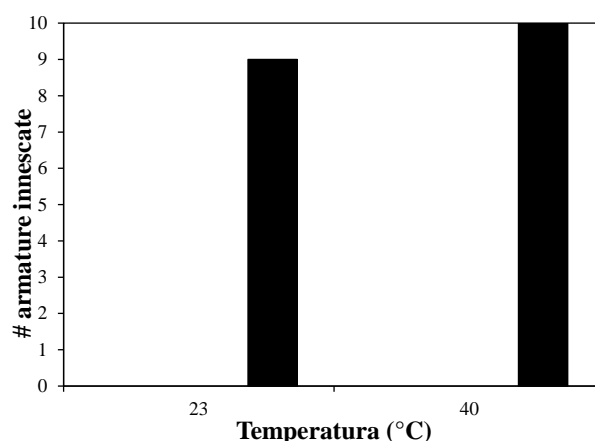


Figura 4.11 Numero di armature (%) con inneschi della corrosione e micro-pit dopo le 24 ore di prova di polarizzazione anodica a +200 mV vs SCE dell'armatura 22-05 in calcestruzzo confezionato con 5% di cloruri rispetto alla massa, a diverse T.

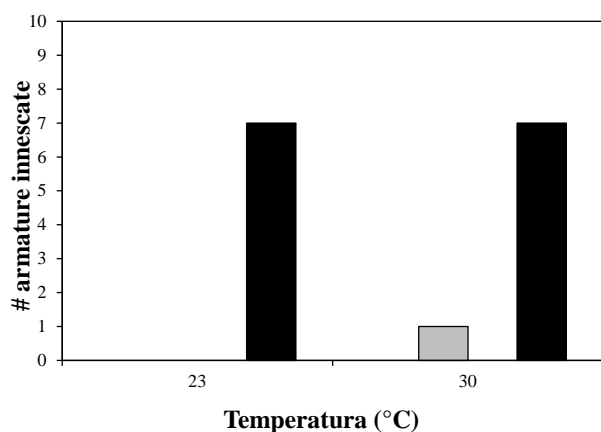


Figura 4.12 Numero di armature (%) con inneschi della corrosione e micro-pit dopo le 24 ore di prova di polarizzazione anodica a +200 mV vs SCE dell'armatura XM-28 in calcestruzzo confezionato con 2% di cloruri rispetto alla massa, a diverse T.

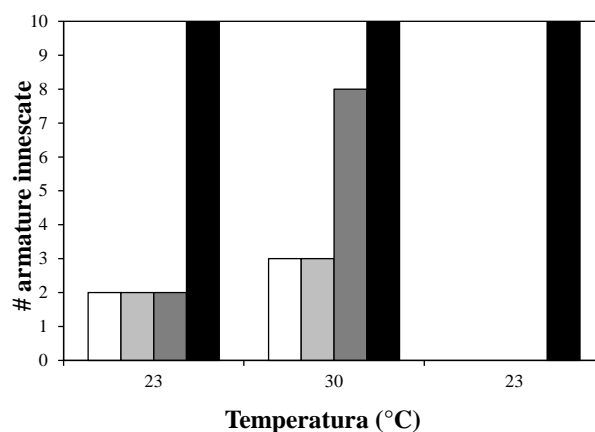


Figura 4.13 Numero di armature (%) con inneschi della corrosione e micro-pit dopo le 24 ore di prova di polarizzazione anodica a +200 mV vs SCE dell'armatura XM-28 in calcestruzzo confezionato con 3% di cloruri rispetto alla massa, a diverse T.

A parità di contenuto di cloruri (5%), che gli acciai duplex 22-05 e 23-04 hanno comportamento simile alle diverse temperature se nell'analisi vengono inclusi i micro-pit rilevati dalle osservazioni visive, mentre a livello macroscopico, l'acciaio 23-04 mostra meno resistenza a corrosione del 22-05 a 40 °C. L'acciaio tipo XM-28 è stato inglobato in provini confezionati con diversi contenuti di cloruri (3% e 4%) e per entrambi si osserva che aumentando la temperatura aumenta anche la densità di corrosione, così come le armature innescate.

E' stata quindi investigata la possibilità di propagazione dei micro-pit nel tempo. A questo scopo, a partire dalle prove avviate nella tesi precedente [20], è stato confezionato il medesimo provino XM-28 al 2% di Cl^- per accertare i risultati delle densità di corrente registrate. Per la stessa ragione sono state realizzate due serie da 10 armature tipo 304LN incorporate in calcestruzzo confezionato con 4% di Cl^- per confrontarle e avere conferma della densità di corrente monitorata durante la prova potenziostatica. Verificate le d.d.c. ottenute dalla doppia prova di polarizzazione eseguita sugli acciai XM-28 e 304LN, le armature hanno nuovamente mostrato passività ma la presenza di micro-pit ha determinato la necessità di indagare più a fondo. Si sono quindi ripetute le prove potenziostatiche anodiche allungando la durata di polarizzazione di 6 e 13 giorni rispettivamente per gli acciai XM-28 e 304LN. I risultati sono confrontati in Fig. 4.14 e 4.15 con le prove di 24 h.

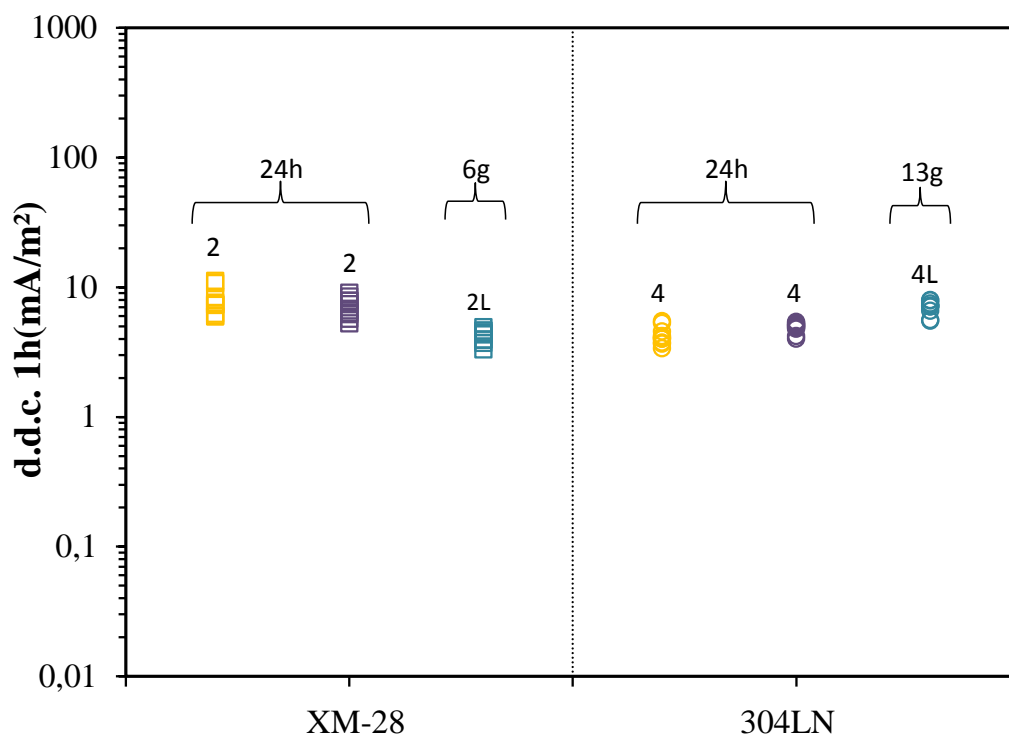


Figura 4.14 Densità di corrente misurata nella prima ora della prova di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV vs SCE a T=23 °C. Confronto delle prove di 24 h con quelle di lunga durata per XM-28 e 304LN.

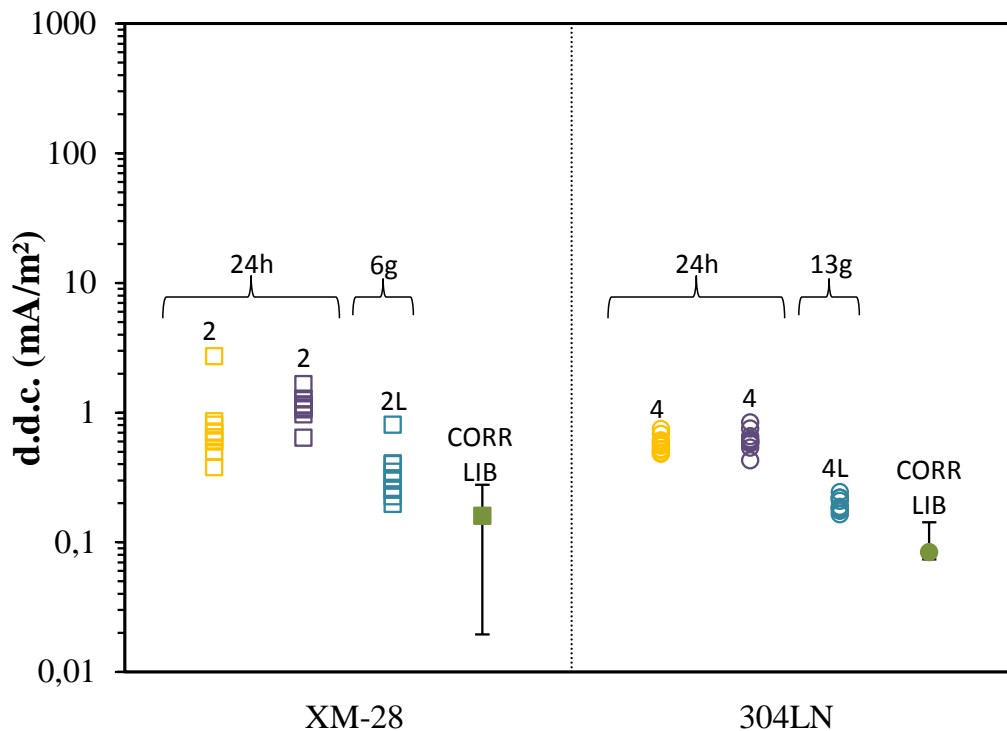


Figura 4.15 Densità di corrente misurata a fine prova di polarizzazione a +200 mV vs SCE a T=23 °C. Confronto delle prove di 24 h con quelle di lunga durata per XM-28 e 304LN e provini in corrosione libera.

In particolare il grafico di *Figura 4.14* mostra le densità di corrente ottenute dalla polarizzazione potenziostatica per diverse durate di tempo; dopo la prima ora, le correnti a confronto sono pressoché costanti intorno ai 10 mA/m² per entrambi gli acciai.

Al termine delle prove invece (*Figura 4.15*) a 6 giorni per l'acciaio XM-28, sia a 13 giorni per l'acciaio 304LN, la densità di corrente si è portata a valori leggermente inferiori, più prossimi a quelli misurati dai provini in libera corrosione. Questo risultato ha condotto a due informazioni importanti:

- aumentando la durata della prova di polarizzazione nel tempo, la densità di corrosione si porta a valori sempre più vicini a quelli misurati dalle condizioni di corrosione libera;
- i piccoli inneschi osservati non sembrano propagare nel tempo.

4.3 Stima del tenore critico di cloruri per i diversi tipi di acciaio inossidabili.

La percentuale di armature con inneschi di corrosione ricavata da prove sperimentali ai diversi tenori di cloruri è stata interpolata per ottenere una distribuzione di probabilità di tipo Beta, come proposta nel Model code for service life design (FIB) [26] per le armature in acciaio al carbonio. I dati sperimentali usati per l'interpolazione sono stati ricavati dalle prove di polarizzazione potenziostatica a +200 mV vs SCE eseguite a 23°C, 30°C e 40°C attraverso la minimizzazione ai minimi quadrati. I parametri delle distribuzioni Beta ottenuti si riportano in *tabella 4.1* per le prove svolte a 23 °C.

Tabella 4.1 Parametri delle distribuzioni di probabilità del tenore critico di cloruri , espressi in % rispetto alla massa di cemento, dei diversi acciai inossidabili e al carbonio ottenuti interpolando i risultati delle prove di polarizzazione potenziostatica a +200 mV vs SCE a 23°C (m=valore medio, σ = deviazione standard, a=limite inferiore, b=limite superiore).

T = 23 °C	Tipi di acciaio			
	XM-28	23-04	304LN	316LN
m [%]	3.39	5.46	6.66	6.88
σ [%]	0.6	1.62	1.3	1.44
a [%]	2.24	2.70	3.7	3.6
b [%]	5.52	9.88	10.5	11.3

Si riportano in seguito gli andamenti delle distribuzioni di probabilità del tenore critico di cloruri degli acciai inossidabili studiati.

Considerando le armature di *Figura 4.16*, le curve di probabilità di inneschi della corrosione degli acciai 304LN e il 316LN risultano molto simili.

L'acciaio 23-04, mostra una curva parallela a quella del 304LN e 316LN ma spostata verso un intervallo di tenore critico di cloruri più basso. E' caratterizzato da una media resistenza a corrosione, infatti già in calcestruzzo confezionato con 3% di cloruri la corrosione si è innescata sul 10% delle armature. Al 5% di cloruri 6 armature su 10 hanno mostrato corrosione mentre al 3% solo 1 su 10.

L'acciaio XM-28 è quello che ha mostrato meno resistenza in ambiente alcalino a 23 °C per cui si verifica il 20% d'innesci delle armature già per un tenore di cloruri pari al 2% rispetto alla massa di cemento; al 4% risultano innescate il 90 % delle armature. La minor resistenza a corrosione rispetto agli acciai 304LN e 316LN può essere giustificata dal contenuto basso di Molibdeno.

Per quanto riguarda l'acciaio 22-05 a basso contenuto di Nichel, non è stata riportata la curva di distribuzione in quanto non c'erano dati sufficienti per poterla tracciare ma ha mostrato una resistenza a corrosione migliore tra tutti gli acciai studiati, non essendosi innescate armature nemmeno in calcestruzzo confezionato al 5% di cloruri rispetto alla massa del cemento.

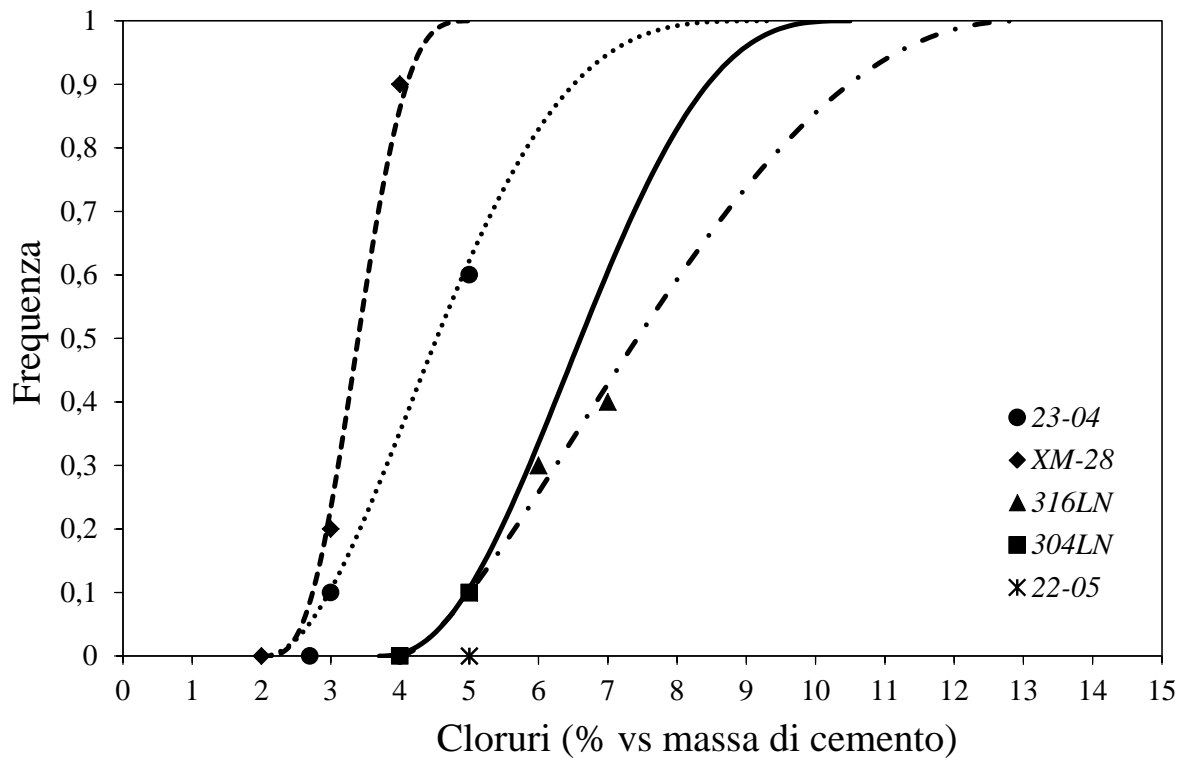


Figura 4.16 Funzione di distribuzione di probabilità del tenore critico di cloruri per l'acciaio inossidabile 304LN, con inneschi di corrosione di dimensioni superiori ai 0,5 mm.

Su alcune armature sono state condotte prove a differenti temperature.

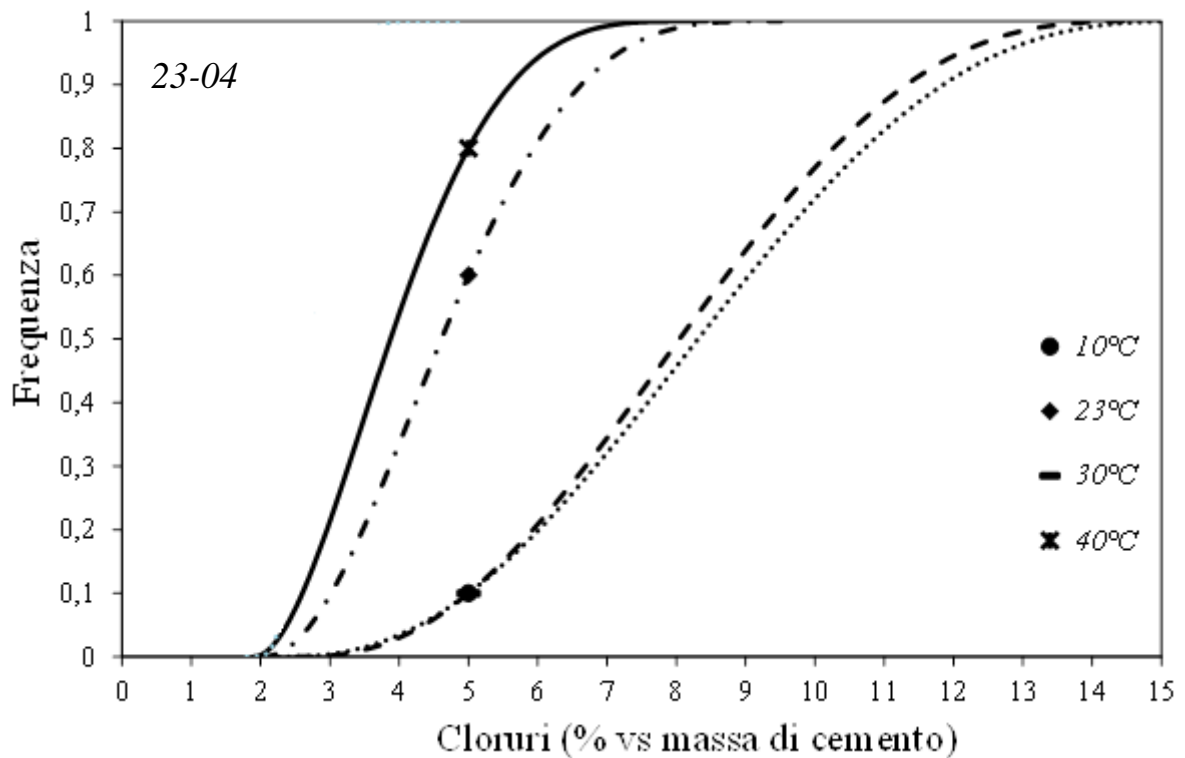


Figura 4.17 Funzione di distribuzione di probabilità del tenore critico di cloruri per l'acciaio inossidabile 23-04 al variare della temperatura nelle prove di polarizzazione potenziostatica anodica a +200 mV vs SCE in calcestruzzo con 5% di cloruri. Confronto tra micro e macro-pit.

In *Figura 4.17*, si riporta la distribuzione di probabilità del tenore critico di cloruri per l'acciaio 23-04 al 5%. A 30 °C, risulta solo il 10% delle armature innescate mentre per temperature di 23 °C e 40°C gli inneschi sono presenti su un numero di armature più elevato. Questo mostra come l'acciaio 23-04 abbia buona resistenza a corrosione anche in ambienti particolarmente aggressivi e a temperature elevate.

Conclusioni

Il degrado della strutture in calcestruzzo armato in ambienti inquinati da cloruri è uno dei problemi maggiormente riscontrati in ambienti marini o quando a contatto con sali disgelanti. Come sistema di prevenzione alla corrosione può essere proposto l'impiego di armature in acciaio inossidabile. Nella valutazione di utilizzo e scelta del tipo di acciaio inossidabile da impiegare, è necessario considerarne le prestazioni in termini di resistenza alla corrosione per cui si necessita la conoscenza del tenore critico di cloruri. Ad oggi non è ancora stata trovata una metodologia per stimarlo che permetta di determinare i parametri di ingresso del modello di calcolo per la progettazione della durabilità. Nell'ambito di questo lavoro è stata studiata una metodologia di prova accelerata per stimare il tenore critico di cloruri in strutture in calcestruzzo armato per armature in acciaio inossidabile. Queste prove consistono nell'imporre un potenziale a +200 mV vs SCE per 24 h e analizzare parametri legati alla corrosione come la corrente e potenziali di polarizzazione, seguiti dall'osservazione visiva. Con questo obiettivo sono stati studiati gli acciai inossidabili austenitici 22-05 e 23-04 a basso contenuto di nichel, gli acciai tradizionali 304LN e 316LN e l'acciaio austenitico al manganese XM-28 a diversi tenori di cloruri.

L'osservazione visiva effettuata sulle armature a termine delle prove, ha rivelato a distanza di giorni la comparsa di piccoli inneschi di corrosione sulla superficie delle barre, difficilmente osservabili a occhio nudo e non individuati dalla prova potenziostatica di 24 h, di dimensioni inferiori al mezzo millimetro (da cui il nome *micro-pit*). Questo fenomeno ha quindi necessitato di un'indagine più approfondita per poter valutare la possibilità di propagazione dei micro-pit nel tempo e l'influenza sulla stima del tenore critico di cloruri. Sono state eseguite prove potenziostatiche con durata di 6 e 13 giorni rispettivamente sugli acciai XM-28 e 304LN, nell'ipotesi che sottoponendo le armature a un potenziale fisso per un tempo prolungato, si potessero ottenere inneschi di entità superiori. Come esito, la prova ha mostrato che nel calcestruzzo i micro-pit non sembrano propagare poiché oltre alle densità di corrente e potenziali nello stesso ordine di grandezza della prova di 24 h, anche il numero di inneschi micro e macro (> 0.5mm) non variano. In base a questi risultati, si è deciso di non considerare i micro-pit come rappresentativi delle condizioni di innesco per la stima del tenore critico del tenore di cloruri.

Si è potuto stimare la distribuzione del tenore critico per diversi acciai anche in base ai risultati di prove precedenti per la stima dei parametri d'ingresso nel modello di progettazione della durabilità.

Analizzando quindi le condizioni di innesco delle armature inossidabili studiate ai diversi tenori di cloruri, le prove hanno mostrato che l'acciaio 22-05 ha ottima resistenza a corrosione, non mostrando inneschi su armature confezionate in calcestruzzi al 5% di cloruri. Anche l'acciaio 316LN si è dimostrato essere molto resistente a corrosione anche in ambienti aggressivi, per cui in calcestruzzo con 5% di cloruri e a 23 °C, solo il 10% delle prove potenziostatiche a +200 mV vs SCE sono state soggette a attacchi di corrosione. L'acciaio

304LN mostra tenori critici di corrosione al 5% uguali al 316LN mentre al 4% non presentano inneschi. Per una comparazione più esauriente è necessario proseguire con altre prove a diversi tenori di cloruri per poter definire meglio l'andamento della curva statistica di distribuzione del tenore critico di corrosione. L'acciaio 23-04 alla stessa temperatura mostra una minore resistenza a corrosione per cui in calcestruzzo al 3% di cloruri mostra corrosione sul 10% delle armature. Anche l'acciaio al manganese XM-28 ha mostrato una resistenza a corrosione molto bassa con l'innesco della corrosione sul 20% delle armature al 3% di cloruri.

Sono stati studiati inoltre gli effetti della temperatura sul tenore critico di cloruri e in particolare l'acciaio 23-04 ha mostrato buona resistenza a temperature basse (10 °C) mentre a 40 °C l'80% delle armature sono state corrose.

Tutti i risultati ottenuti dalle prove potenziostatiche sono valori ottenuti da prove accelerate, pertanto verranno correlati alle condizioni reali attraverso coefficienti correttivi con gli esiti della prova di ponding che ad oggi è stata monitorata per 425 giorni.

I provini in libera corrosione hanno verificato i valori ottenuti dalle prove potenziostatiche a +200 mV vs SCE per cui si ritiene che la metodologia su cui ci si è basati nel presente lavoro di tesi e nel precedente dia risultati attendibili.

Bibliografia

- [1] P. Pedferri, *L'impiego delle armature in acciaio inossidabile*
- [2] P. Pedferri, *Corrosione e protezione dei materiali metallici, Volumi I e II*, Polipress, Milano, 2007.
- [3] EN *Definizione e classificazione dei tipi di acciaio*, 2006.
- [4] L. Bertolini, *Materiali da costruzione, Volume II, - Degradamento, prevenzione, diagnosi, restauro*, CittàStudi Edizioni, 2006.
- [5] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, E. Redaelli, R. Polder, *Corrosion of steel in concrete, Prevention, diagnosis, repair*, 2nd ed., Wiley-VCH, Weinheim, 2013
- [6] L. Bertolini, M. Gastaldi, M. Carsana, F. Lollini, E. Redaelli, *Comportamento a corrosione di armature in acciaio inossidabile nel calcestruzzo*, Structural 186, marzo/aprile 2014.
- [7] L. Bertolini, M. Gastaldi, *Effect of temperature on the corrosion behaviour of low-nickel duplex stainless steel bars in concrete*, Cement and concrete research, 2013.
- [8] P. Pedferri, *Corrosione e Protezione dei Materiali Metallici*, II edizione, CLUP, Milano, 1978.
- [9] Ramana, M. Pidapartia, Long Fangb, Mathew J. Palakalb, *Computational simulation of multi-pit corrosion process in materials*, Computational Materials Science, Vol. 41, 2007.
- [10] R. G. Kelly, J. R. Scully, D. W. Shoesmith, R. G. Buckheit, *Electrochemical techniques in corrosion science and engineering*, Marcel Dekker Inc, 2003.
- [11] L.T Mammoliti, L.C. Brown, C.M. Hanson and B.B. Hope, *The influence of surface finish of reinforcing steel and pH of the test solution on the chloride threshold concentration for corrosion initiation in synthetic pore solutions*, Cement and concrete research, Vol. 26, 1996,
- [12] W.H. Hartt, J. Nam, *Effect of cement alkalinity on chloride threshold and time-to-corrosion of reinforcing steel in concrete*, Corrosion, Vol. 64, 2008
- [13] L. Bertolini, M. Gastaldi, *Effect of temperature on the corrosion behaviour of low-nickel duplex stainless steel bars in concrete*, Cement and concrete research, 2013.
- [14] P. Pedferri, L. Bertolini, *La durabilità del calcestruzzo armato*, McGraw-Hill, Italia, 2000.
- [15] L. Bertolini, M. Gastaldi, P. Pedferri, E. Redaelli, *Factors influencing the corrosion resistance of austenitic and duplex stainless steel bars in chloride bearing concrete*, 15th International Corrosion Congress – ICC, Granada, 2002.
- [16] A. Bautista, G. Blanco, F. Velasco, *Corrosion behaviour of low nickel austenitic stainless steels reinforcements. A comparative study in simulated pore*, Cement in concrete research, 2006.

-
- [17] L. Bertolini, M. Gastaldi, *Corrosion resistance of low-nickel duplex stainless steel rebars*, Materials and Corrosion, 2012.
- [18] S. Randstrom, M. Almen, R. Petterson, *Reproducibility of critical chloride threshold levels for stainless steel reinforcement*, Stainless Steel World, Denver, 2010.
- [19] L. Bertolini, M. Gastaldi, *Corrosion resistance of low-nickel duplex stainless steel rebars*, Materials and Corrosion, 2011, 62, 89-208.
- [20] C. Carani, A. Croce, *Scelta del tipo di acciaio inossidabile per la prevenzione della corrosione in strutture in calcestruzzo armato*, Politecnico di Milano, Tesi di laurea, relatore: prof. L. Bertolini, 2013.
- [21] F. Airoidi, D. Lando, *Resistenza a corrosione di armature in acciaio inossidabile duplex in calcestruzzo*, Politecnico di Milano, Tesi di laurea, relatore: prof. L. Bertolini, 2012.
- [22] B. L. Brown, D. Harrop, K. W. J. Treadaway, *Corrosion testing of steels for reinforced concrete*, Building Research Establishment, Garston, 1978.
- [23] B. Sorensen, P.B. Jensen, E. Maahn, *The corrosion properties of stainless steel reinforcement, in Corrosion of reinforcement in concrete*, Eds. C.L. Page, K.W.J. Treadaway, P.B. Bamforth, Elsevier Applied Science (1990) 601.
- [24] L. Bertolini, M. Gastaldi, P. Pedferri, E. Redaelli, *Factors influencing the corrosion resistance of austenitic and duplex stainless steel bars in chloride bearing concrete*, 15th International Corrosion Congress - ICC, Granada (2002).
- [25] *Norme tecniche per le Costruzioni*, Decreto Ministeriale 14.01.2008
- [26] UNI-EN 206 *Calcestruzzo – Specificazione, prestazione, produzione e conformità*, 2006.
- [27] UNI EN 1992-1, Eurocodice 2: *Progettazione delle strutture di calcestruzzo – Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici*, 2005.
- [28] DuraCrete, *The European Union-Brite Euram III, DuraCrete-Probabilistic performance based durability design of concrete structures*, 2000.
- [29] L. Bertolini, M. Gastaldi, F. Lollini, *Parametri prestazionali per il progetto della durabilità delle strutture in calcestruzzo con armature di acciaio inossidabile*
- [30] A. Pardo, M.C. Merino, A.E. Coy, F. Viejo, R. Arrabal, E. Matykina, *Pitting corrosion behaviour of austenitic stainless steel – combining effects of Mn and Mo additions*, Corrosion Science, Vol 50, pag. 1796-1806, 2008.
- [31] C. Monticelli, M. Criado, S. Fajardo, J.M. Bastidas, M. Abbottoni, A. Balbo, *Corrosion behaviour of a Low Ni austenitic stainless steel in carbonated chloride-polluted alkali-activated fly ash mortar*, Cement and concrete research, 2013.
- [32] L. Bertolini, M. Gastaldi, T. Pastore, M. P. Pedferri, P. Pedferri, *Effects of Galvanic Coupling between Carbon Steel and Stainless Steel Reinforcement in Concrete*, Int. Conf. on "Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures", Federal Highway Administration, Orlando, 7-11 December 1998.
- [33] V. Boneschi, "Gli acciai inossidabili nell'edilizia e nell'architettura di zone costiere", Lamiera, 2007, 160-164.
-

- [34] *Guide on the use of stainless steel reinforcement*, Report of a Concrete Society Steering Committee, Technical Report n°5
- [35] L. Bertolini, M. Gastaldi, F. Lollini, *Performance-based durability design of reinforced concrete structures with stainless steel bars*, La Metallurgia Italiana - n. 7-8/2014