

L'IMPIEGO DELLE ARMATURE IN ACCIAIO INOSSIDABILE NELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO

Pietro Pedferri

Sommario

La memoria illustra il comportamento delle armature in acciaio inossidabile. Vengono riportati i tipi di armatura più utilizzati, le loro principali proprietà non corrosionistiche (composizione, struttura, proprietà meccaniche, saldabilità, dilatazione e conducibilità termica, proprietà magnetiche, lavorabilità e costo) e corrosionistiche. In particolare per quanto riguarda queste ultime verrà descritto il comportamento delle armature in presenza di cloruri in calcestruzzo alcalino e in quello carbonatato e discusso il tenore critico di cloruri per i differenti tipi di acciaio. Verrà quindi mostrato come l'impiego delle armature in acciaio inossidabile possa essere limitato alla parte superficiale della struttura ('armature di pelle') o alle parti più critiche lasciando nelle altre zone le usuali armature in acciaio al carbonio senza che intervengano problemi di accoppiamento galvanico. Infine l'impiego delle armature di acciaio inossidabile verrà confrontato in termini di prestazioni e di costo con quello delle protezioni aggiuntive concorrenti quali gli inibitori di corrosione, i rivestimenti, trattamenti superficiali, le armature zincate, quelle in acciaio inossidabile e la prevenzione catodica.

Considerazioni introduttive

La prevenzione della corrosione delle armature e più in generale del degrado di una struttura in calcestruzzo armato o precompresso inizia in sede di progetto dell'opera, nel momento della concezione e del calcolo della struttura, del disegno dei suoi particolari costruttivi, della scelta dei materiali da utilizzare e delle loro proporzioni ottimali. Si sviluppa poi nella fase della sua realizzazione con la preparazione, la messa in opera, la costipazione e la maturazione del calcestruzzo. Continua infine per tutta la sua vita di servizio con interventi programmati di ispezione e manutenzione. K. Metha ha definito questo approccio alla durabilità 'olistico' proprio per sottolineare il fatto che la prevenzione non va considerata come una serie di possibili misure alternative, ma come un complesso organico di interventi da applicare congiuntamente dal momento del progetto della struttura fino alla sua dismissione.

Seguendo indicazioni riportate le normative (ad esempio la EN 206 e l'Eurocodice 2), che in pratica definiscono al variare delle condizioni di esposizione la qualità del calcestruzzo che ricopre le armature e il suo spessore, è possibile, nella maggioranza delle condizioni ambientali garantire alle strutture in c.a. una vita di servizio di almeno 50 anni e anche più, almeno in climi temperati. Peraltro, in condizioni di esposizione di particolare aggressività, anche rispettando queste indicazioni si possono avere livelli di corrosione inaccettabili in tempi molto più brevi. Questo succede, ad esempio, nel caso di strutture che vengono nel tempo contaminate da cloruri, come le solette di ponti su cui si spargono sali antigelo, oppure nel caso di strutture marine nella zona degli spruzzi o in quelle che vengono a contatto non permanente con acqua di mare, come può avvenire all'interno di serbatoi, nel caso di bacini galleggianti, e così via.

In questi casi e in altre situazioni o condizioni caratterizzate da aggressività molto elevata, impossibilità di avere spessori di copriferro adeguati, indisponibilità di calcestruzzi di qualità, vita di servizio particolarmente lunga, impossibilità di interventi di manutenzione, può risultare necessario o opportuno aumentare la durabilità della struttura facendo ricorso a specifiche misure supplementari di prevenzione basate su interventi che modificano le caratteristiche del calcestruzzo o delle armature o dell'ambiente esterno o della struttura stessa. Le misure di protezione aggiuntiva operano attraverso le modalità illustrate in Fig. 1 e 2 e agiscono: impedendo alle specie aggressive di raggiungere le armature, oppure controllando il fenomeno corrosivo attraverso il blocco del processo anodico o della circolazione di corrente nel calcestruzzo. Non è invece possibile impedire la reazione catodica. Nessuna tecnica oggi disponibile riesce ad annullare l'apporto di ossigeno alle armature, a meno che la struttura non sia completamente e permanentemente satura d'acqua.

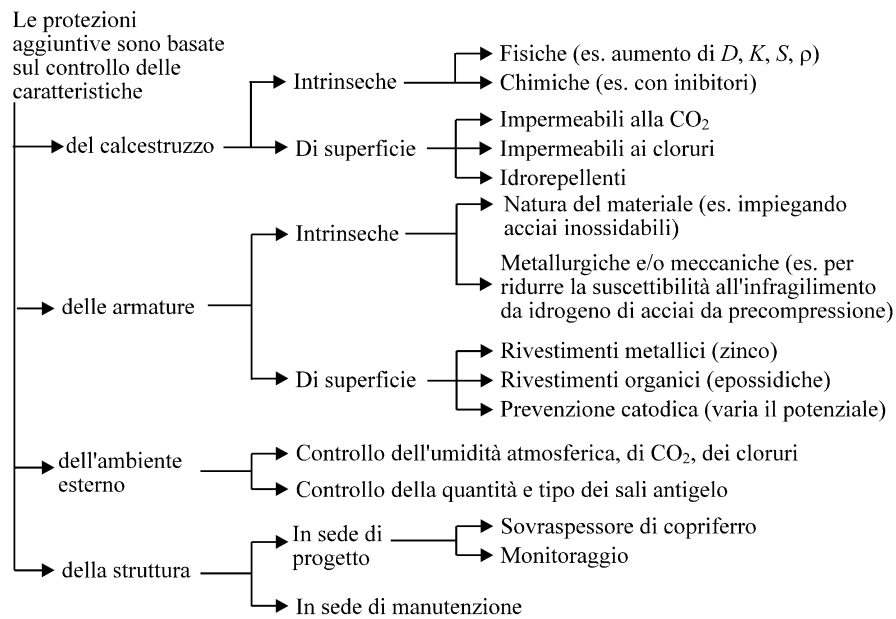


Fig. 1. Classificazione dei metodi di protezione aggiuntiva. (D , K , S e ρ sono rispettivamente le costanti di diffusione, di assorbimento, di permeabilità e di resistività che entrano nelle leggi di Fick, Darcy, dell'assorbimento capillare e di Ohm).

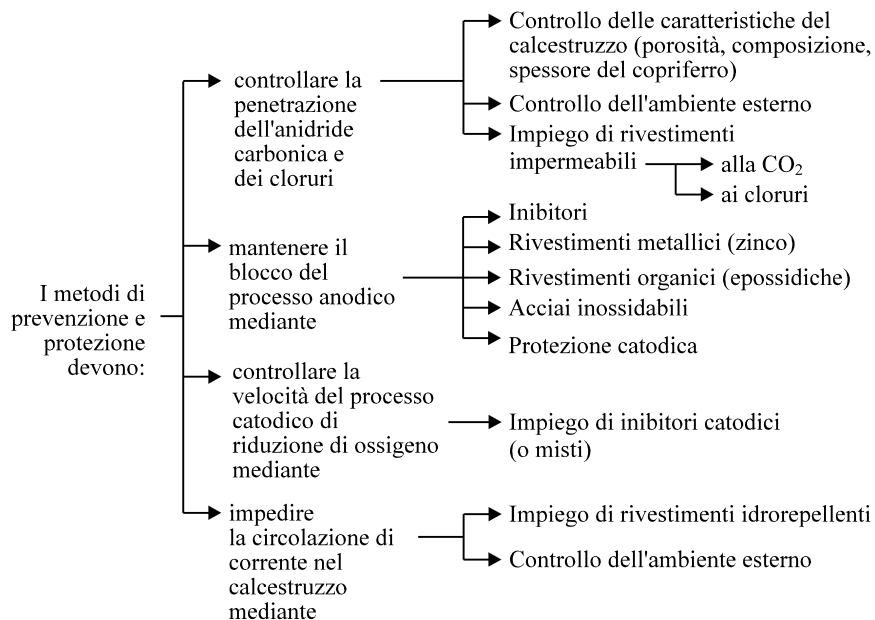


Fig. 2. Meccanismi con cui operano i metodi di protezione aggiuntiva.

In questa memoria viene illustrata solo una di queste misure, cioè quella che fa ricorso alle armature in acciaio inossidabile. L'impiego di queste armature è normalmente limitato a costruzioni aeree che si ritiene possano nel tempo essere pesantemente inquinate da cloruri (quali ad esempio: le parti di strutture operanti zona degli spruzzi di strutture marine, le solette di ponti su cui si impiegano sali antigelo, garages) per cui potranno trovarsi ad operare in condizioni in cui le altre misure di protezione aggiuntiva o non siano applicabili, o presentino vite di servizio troppo ridotte, oppure richiedano controlli e manutenzioni troppo onerose e frequenti. Per quanto riguarda le strutture soggette soltanto a carbonatazione, la vita di servizio richiesta può essere in generale ottenuta con una scelta oculata della qualità del calcestruzzo e dello spessore di copriferro, o, se questo non dovesse bastare, ricorrendo a misure di prevenzione poco costose (ad esempio ad armature zincate). Solo nel caso siano previste vite di servizio estremamente lunghe (e cioè dell'ordine di alcune centinaia di anni, come potrebbe essere il caso di monumenti, di chiese, di edifici pubblici particolarmente importanti o di costruzioni come quelle utilizzate per il confinamento di scorie nucleari) si ricorre alle armature di acciaio inossidabile.

Le proprietà non corrosionistiche delle armature in acciaio inossidabile

Gli acciai inossidabili sono una numerosa famiglia di materiali con proprietà di resistenza alla corrosione, meccaniche, di saldabilità e di costo diverse. Possono essere divisi in base alla loro struttura in quattro gruppi: ferritici, austenitici, martensitici e austeno-ferritici (o duplex). Nel calcestruzzo si impiegano attualmente solo gli austenitici l'AISI 304L (1.4307) e l'AISI 316L (1.4404), e il duplex 318 (1.4462) (Tabella. 1). È stata proposta anche l'utilizzazione di un acciaio ferritico con il 12% di cromo. Una versione economica, che finora ha limitate applicazioni e per la quale non esiste ancora un'esperienza in campo sufficientemente lunga, è quella che utilizza armature costituite da un nucleo centrale di acciaio al carbonio rivestite da un sottile strato di acciaio inossidabile.

Tipi di acciaio	C max	S M ax	M x	S Ma	Cr	Ni	Mo	P max	N
1.4301 (304L)	0.03	1	2	0.03	17.0-19.5	8.0-10.5	-	0.04	<0.1
1.4436 (316L)	0.03	1	2	0.015	16.5-18.5	10.5-13	2.5-3.5	0.00	<0.1
1.4462(318duplex)	0.03	1	2	0.015	21-23	4.5-6.5	2.5-3.5	0.00	0.1-0.2

Tabella 1. Composizione e struttura dei tre tipi di acciaio più utilizzati per le armature.

In Italia vengono attualmente prodotte alcune migliaia di tonnellate all'anno di armature in acciaio inossidabile che per la maggior parte vengono esportate (soprattutto in Canada per solette di ponti e garages e in Medio Oriente per strutture marine e per opere di prestigio). La richiesta interna privilegia l'inossidabile AISI 304 rispetto all'AISI 316 (80% contro 20%) e non riguarda praticamente il duplex 318. La richiesta esterna, soprattutto quella proveniente dagli Emirati del Golfo, interessa i tre acciai in misura pressappoco uguale.

Proprietà meccaniche. Per trovare applicazione, le armature di acciaio inossidabile devono presentare una resistenza allo snervamento (normalmente valutata come sforzo che lascia una deformazione residua dello 0.2%, in quanto questi materiali non presentano un punto di snervamento ben definito), modulo elastico e duttilità almeno pari a quelle delle comuni armature in acciaio al carbonio. La resistenza a rottura degli acciai inossidabili austenitici allo stato ricotto (pari a circa 220 MPa) è troppo ridotta per soddisfare i requisiti meccanici richiesti alle armature e pertanto queste devono essere soggette a processi termomeccanici per aumentarne le caratteristiche di resistenza. Gli acciai inossidabili duplex, invece, presentano valori dello snervamento sufficientemente elevati per essere impiegati anche senza aver subito interventi di rafforzamento.

Saldabilità. La saldabilità degli acciai inossidabili dipende dalla loro composizione chimica: cresce al diminuire del tenore di carbonio e con l'aumentare di quello di nichel. Tutti gli acciai inossidabili per armature devono essere saldabili senza particolari accorgimenti. Tuttavia la saldatura in campo non è generalmente raccomandata a meno che non si disponga di un adeguato controllo delle condizioni operative. La saldatura può presentare alcuni conseguenze negative (a parte quelle legate alla precipitazione dei carburi che non sussistono se, come in genere avviene, si scelgono acciai a basso tenore di carbonio). Gli acciai incruditi possono infatti perdere in parte la loro resistenza meccanica. In secondo luogo la formazione di film superficiali di ossido, che danno luogo a colori di interferenza, diminuisce la resistenza al pitting e aumenta gli effetti galvanici in presenza di eventuali accoppiamenti con l'acciaio al carbonio (vedi avanti).

Dilatazione termica e conducibilità termica. Il coefficiente di dilatazione termica del calcestruzzo è circa $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Quello degli acciai ferritici non è molto diverso ($\sim 1,2 \cdot 10^{-5}$); quello degli austenitici è più elevato ($\sim 1,8 \cdot 10^{-5}$); in posizione intermedia quello degli austenoferritici. Il maggior coefficiente di dilatazione termica degli acciai austenitici e austeno-ferritici non crea problemi nel calcestruzzo e, infatti, nessun danno da dilatazione differenziale è stato riportato anche in caso di incendi. Questo buon comportamento è dovuto anche al fatto che la conducibilità termica delle armature in acciaio inossidabile è molto minore di quella delle normali armature.

Proprietà magnetiche. Gli acciai austenitici sono considerati non-magnetici,

anche se la loro permeabilità magnetica può aumentare quando gli acciai vengono deformati a freddo. Questa proprietà, apprezzata per alcune specifiche applicazioni (bioedilizia, laboratori fisici), deve essere tenuta in conto quando si impiegano gli usuali pacometri magnetici che ovviamente non sono in grado di evidenziare la presenza di queste armature e tanto meno lo spessore di copriferro.

Lavorabilità. Per quanto riguarda la pratica di cantiere le armature di acciaio inossidabile possono essere piegate, lavorate e movimentate esattamente come quelle in acciaio al carbonio. A questo proposito è opportuno precisare che a differenza di altri tipi di armature resistenti a corrosione (come le armature con rivestimenti epossidici o quelle zincate), la resistenza alla corrosione di quelle di acciaio inossidabile (salvo alcune precisazioni dette più avanti) è una proprietà intrinseca del materiale e non della sua superficie. Pertanto la loro integrità non viene compromessa in seguito a tagli delle armature oppure a causa di danneggiamenti superficiali che si possono produrre nel trasporto o nei lavori di movimentazione in cantiere.

Costo. Il costo delle armature di acciaio inossidabile cresce all'aumentare del tenore degli elementi di lega (indicativamente ponendo 1 il costo del ferro, quello del cromo è 5, quello del nichel, peraltro variabilissimo, è 40 e quello del molibdeno 50) e in relazione al tipo di lavorazione e di finitura del materiale. Si possono dare le indicazioni seguenti: se 1 è il costo delle armature in acciaio al carbonio all'uscita dell'acciaieria, 5 è quello per le armature in acciaio inossidabile ferritico (12%Cr), 9 è per le armature in acciaio inossidabile austenitico senza molibdeno (ad esempio il tipo AISI 304) e 10 è per le armature in acciaio inossidabile contenente molibdeno (ad esempio i tipi AISI 316 e duplex 318). Passando dall'austenitico al duplex a parità di molibdeno il costo dovrebbe diminuire perché i risparmi consentiti dalla riduzione del nichel dal 10 al 5% superano i costi aggiuntivi derivanti dalla crescita del tenore di cromo dal 18 al 22%. Il costo di lavorazione, piegatura, movimentazione delle armature è identico per tutti i tipi di materiale, per cui di fatto il rapporto tra i costi in opera degli acciai inossidabili per unità di massa e quello degli acciai al carbonio risulta di un punto o due inferiore rispetto ai dati sopra riportati. In ogni caso il costo delle armature rispetto a quello totale dell'opera rimane comunque molto ridotto. Ad esempio nel caso di una soletta di un ponte può essere pari all'1-2% dell'intera opera. Si ricorda peraltro che questa percentuale può essere ulteriormente ridotta attraverso l'impiego dell'acciaio inossidabile limitato alle parti più vulnerabili dell'opera. Sulla base dei costi iniziali e di quelli di gestione e manutenzione relativi ad un completo ciclo di vita di strutture operanti in ambienti pesantemente inquinati da cloruri l'economicità della scelta degli acciai inossidabili è in genere dimostrata per vite di servizio superiori ai 25-30 anni.

Comportamento alla corrosione delle armature di acciaio inossidabile

In assenza di cloruri o finché il loro tenore non raggiunge il valore critico che si preciserà più avanti, le armature in acciaio inossidabile rimangono in condizioni di passività in calcestruzzo sia alcalino che carbonatato. In presenza di cloruri in tenori superiori a un valore critico, possono invece essere soggette ad attacco localizzato per pitting¹.

Il cromo gioca il ruolo principale nel determinare la resistenza a corrosione degli acciai inossidabili. Questo elemento fa sì che alla superficie si formi un film protettivo costituito principalmente da ossido di cromo stabile in un campo di condizioni molto più ampio di quanto non sia quello in cui è stabile l'ossido di ferro. È questo il motivo per cui gli acciai inossidabili risultano perfettamente protetti e quindi possono operare in intervalli di pH, di tenore di cloruri e di potenziale molto più ampi di quelli in cui risultano passive le usuali armature in acciaio al carbonio.

In presenza di molibdeno o di azoto la resistenza del film protettivo cresce ulteriormente. In generale, almeno in ambienti neutri, la capacità di un acciaio inossidabile di contrastare l'attacco da cloruri e quindi nell'aumentare il tenore critico, è quantificata dal cosiddetto indice di pitting: $PRE = \%Cr + 3,3 \times \%Mo + 16 \times \%N$. Nell'ambiente alcalino tipico del calcestruzzo l'effetto del molibdeno sulla resistenza al pitting, pur risultando positivo, risulta meno importante che non in ambienti neutri e di conseguenza anche le differenze di comportamento tra gli acciai contenenti o meno molibdeno tendono a ridursi almeno in climi temperati. Peraltro la sua presenza risulta consigliata per le temperature tipiche dei paesi tropicali o se il calcestruzzo è fortemente fessurato.

Il tenore di cloruri critico. In Fig. 3 è riportato al variare del pH del calcestruzzo il tenore di cloruri critico per le armature di acciaio inossidabile in strutture operanti a temperature di 20°C o di 40°C. I valori riportati sono stati individuati utilizzando risultati di laboratorio ed esperienze in campo. Per l'utilizzazione corretta di questo grafico è necessario sottolineare che i valori riportati possono variare.

¹ In linea di principio, gli acciai inossidabili possono essere soggetti anche ad altre forme di corrosione localizzata: intergranulare e sotto sforzo. Tuttavia queste forme di corrosione non si riscontrano sulle armature immerse nel calcestruzzo. La corrosione intergranulare può insorgere solo su materiali sensibilizzati, ad esempio nelle zone termicamente alterate a seguito di processi di saldatura. Tuttavia nel calcestruzzo (e negli ambienti naturali) non si producono attacchi intergranulari; la sensibilizzazione può però ridurre la resistenza all'attacco per pitting. La corrosione sotto sforzo si verifica solo per la congiunta presenza di specifiche condizioni ambientali (per gli acciai inossidabili austenitici: contenuto di cloruri, pH acido e temperatura superiore a 60°C) che non si riscontrano nel calcestruzzo.

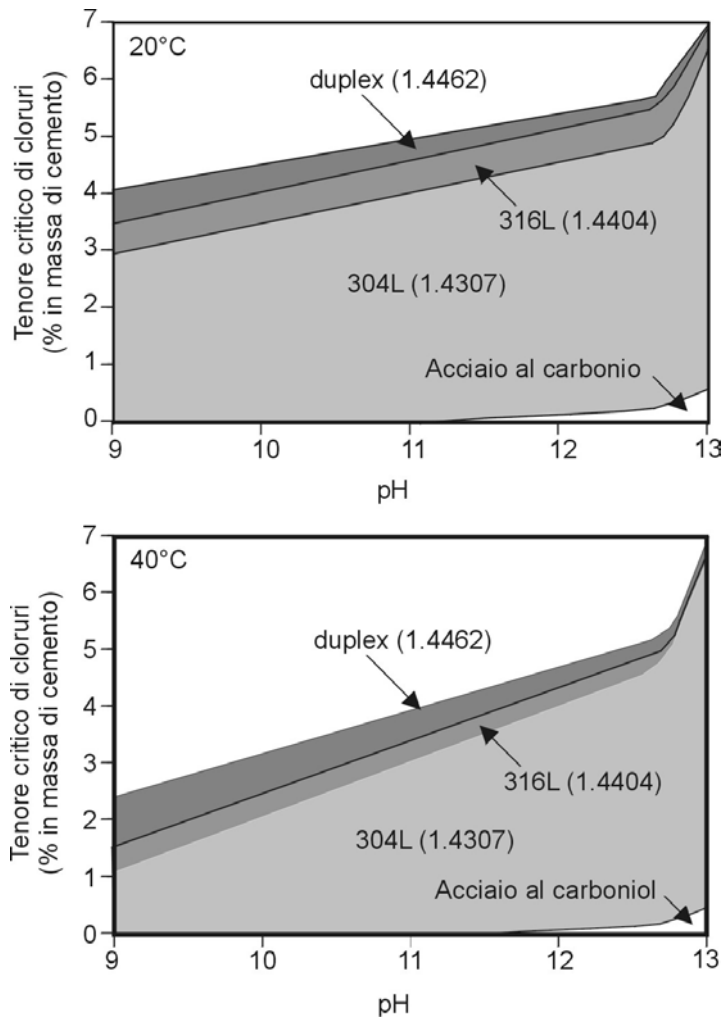


Fig. 3. Tenore critico dei cloruri per differenti tipi di armature di inox (decappate) al variare del pH. I valori riportati sono solo indicativi. Infatti tendono ad aumentare quando il potenziale di corrosione si abbassa per ridotto apporto di ossigeno alle armature o in seguito a polarizzazioni catodiche; mentre diminuiscono in presenza di ossidi da saldatura o di finiture superficiali che non puliscono perfettamente la superficie dell'acciaio dalla scaglia di laminazione, oppure ancora in seguito a polarizzazioni anodiche ad esempio prodotte da correnti vaganti.

Ad esempio aumentano quando il potenziale di corrosione si abbassa per ridotto apporto di ossigeno alle armature, come succede ad esempio per calcestruzzo permanentemente immerso in acqua di mare o in seguito a polarizzazioni catodiche; mentre diminuiscono in presenza di ossidi da saldatura o di finiture superficiali diverse da quelle ottenute per decapaggio che non puliscono perfettamente la superficie dell'acciaio dalla scaglia di laminazione, oppure ancora in seguito a polarizzazioni anodiche ad esempio prodotte da correnti vaganti.

In calcestruzzo alcalino gli acciai austenitici o duplex senza molibdeno possono in genere essere impiegati fino a tenori di cloruri del 5 % mentre quelli con molibdeno anche a valori più elevati. Le cose cambiano se l'armatura presenta alla sua superficie film colorati di ossidi da saldatura. In questi casi il tenore massimo da accettare è il 3,5% indipendentemente dal tipo di acciaio. Si tratta comunque di valori molto elevati difficilmente raggiungibili in pratica. Lo stesso valore del 3,5% deve essere ritenuto valido per tutti gli acciai se la loro superficie è coperta dalla scaglia nera che si forma ad alta temperatura durante i trattamenti termomeccanici cui nel processo di fabbricazione sono soggetti. Siccome il decapaggio delle armature a differenza di altri trattamenti, rimuove completamente questa scaglia, questa operazione di finitura è più efficiente nel mantenere elevato il tenore critico rispetto ad esempio alla sabbiatura.

Nel calcestruzzo carbonatato ($\text{pH}\approx 9$) il tenore critico risulta sensibilmente più basso che non in quello alcalino. Anche strutture fortemente fessurate, ancorché il pH del calcestruzzo risulti alcalino, si comportano nei confronti delle armature in inox come quelle carbonatate. Situazioni in cui il calcestruzzo è carbonatato e nello stesso tempo contiene alti livelli di cloruri sono abbastanza rare ma si possono trovare ad esempio all'interno di tunnel autostradali. In questi casi sono da preferire gli acciai contenenti molibdeno.

Accoppiamento acciaio inossidabile - acciaio al carbonio

A volte l'uso delle armature in acciaio inossidabile può essere limitato alla parte superficiale della struttura ('armature di pelle') o alle sue parti più critiche lasciando nelle altre zone quelle in acciaio al carbonio. In questi casi i progettisti e i costruttori esprimono spesso preoccupazioni per il fatto che le armature di acciaio inossidabile possano risultare collegate elettricamente a quelle di acciaio al carbonio. Temono infatti che l'accoppiamento degli acciai possa causare l'insorgenza di quel tipo di corrosione che viene detto 'corrosione galvanica'. Questo timore è infondato. Negli ultimi anni è stato provato che l'impiego di barre di acciaio inossidabile connesse elettricamente a barre di acciaio al carbonio non peggiora la situazione corrosionistica rispetto a quanto si verificherebbe in presenza di sole barre di acciaio al carbonio. Analizziamo le due situazioni che si possono presentare.

La prima situazione è quella in cui le armature in acciaio inossidabile sono poste nelle zone in cui si prevedono alti tenori di cloruri e quelle in acciaio al carbonio solo nelle parti non aggressive della struttura per cui i cloruri non superano la soglia critica dello 0,4%. Con questa soluzione, che è quella corretta, tutte le armature operano in condizioni di passività e quindi il loro accoppiamento non dà luogo alla formazione di coppie galvaniche. Infatti nel calcestruzzo il potenziale dell'acciaio al carbonio passivo è uguale a quello degli acciai inossidabili.

Il comportamento delle armature di acciaio al carbonio in questa condizione - che ripetiamo è quella in cui dovrebbero trovarsi - non viene assolutamente influenzato dal collegamento con quelle di acciaio inossidabile.

Supponiamo ora che le armature in acciaio al carbonio siano state collocate anche dove non dovrebbero essere, cioè in una zona aggressiva, per cui si corrodono. In questo caso si forma effettivamente una coppia galvanica tra le armature in acciaio inossidabile e quelle in acciaio al carbonio perché le prime vengono a trovarsi a un potenziale superiore di 100-300 mV rispetto alle seconde. Ma anche in questo caso le conseguenze dell'accoppiamento risultano modeste e comunque trascurabili rispetto a quelle indotte dall'acciaio al carbonio passivo che sempre circonda l'area che si corrode. Infatti l'aumento della velocità di corrosione sulle armature in acciaio al carbonio in seguito ad accoppiamento con altre di acciaio inossidabile è notevolmente più basso da quello prodotto dallo pari superficie di armature di acciaio al carbonio perché l'acciaio inossidabile è un pessimo catodo rispetto all'acciaio al carbonio passivo e quindi eroga meno corrente. Se poi si tiene conto del rapporto effettivo tra le aree dei due materiali passivi le cose migliorano ulteriormente.

Quanto detto perde in parte la sua validità se le armature sono ricoperte da ossidi nelle zone di saldatura o dalla scaglia nera di laminazione. Infatti questi ossidi favoriscono la riduzione catodica dell'ossigeno come e in qualche caso ancor più dell'acciaio al carbonio passivo. (Peraltro nel valutare l'effetto delle zone saldate deve essere sempre considerato il fatto che la loro superficie è in genere ridotta rispetto a quella dell'intera armatura.) Naturalmente questo rischio può essere eliminato rimuovendo gli ossidi.

Armature di acciaio inossidabile e restauro di opere interessate da corrosione

L'acciaio inossidabile può essere utilizzato accoppiato con l'acciaio al carbonio anche nel caso di recupero di strutture in calcestruzzo armato interessate localmente da corrosione perché minimizza i problemi che possono prodursi sulle armature presenti nelle zone circostanti a quella recuperata proprio a causa dell'intervento effettuato. In generale la strada maestra per annullare effetti di contatto galvanico è quella di usare un solo tipo di materiale. In questo caso non è così in quanto l'acciaio inossidabile: a) non accelera l'attacco dell'acciaio al carbonio passivo, b) si comporta meglio dei quest'ultimo quando è a contatto con l'acciaio al carbonio che si sta corrodendo e, comunque, c) dopo l'intervento di recupero non sarà soggetto né a corrosione da carbonatazione né a quella da cloruri.

Per approfondimenti vedi [1-6].

Alcune applicazioni

Il primo esempio di applicazione dell'acciaio inossidabile nelle costruzioni in calcestruzzo armato riguarda un pontile lungo più di 2 km nella penisola dello Yucatan in Messico, noto come pontile Progreso. Quest'opera venne realizzata tra il 1937 e il 1941 impiegando armature di acciaio austenitico con 18% cromo e 8% di nichel e quindi di composizione simile a quella di un moderno acciaio inossidabile austenitico 1.401. Un'ispezione effettuata nel 1998, dopo sessant'anni di servizio in assenza di qualsiasi intervento di manutenzione, ha mostrato un ottimo stato di conservazione della struttura. In particolare le armature di acciaio inossidabile inglobate nel calcestruzzo sono risultate intatte anche nelle zone di modesto spessore di copriferro. Solo le armature non ricoperte dal calcestruzzo e quindi direttamente a contatto con l'acqua di mare hanno subito attacchi localizzati. La Fig. 4 mostra sullo sfondo il pontile Progreso praticamente intatto e, in primo piano, quello che rimane di un secondo pontile realizzato negli anni sessanta con le armature in acciaio al carbonio.

Dopo questa prima realizzazione l'impiego di armature di acciaio inossidabile è stato del tutto trascurabile fino ad anni recenti. Negli ultimi anni sono stati realizzati numerose costruzioni con questo tipo di armature, soprattutto strutture marine e ponti autostradali. Nelle figure 5 e 6 sono riportati due esempi di applicazione delle armature di acciaio inossidabile.



Fig. 4. La foto riporta sullo sfondo il pontile Progreso realizzato alla fine degli anni trenta con armature in acciaio inossidabile austenitico con 18% cromo e 8% nichel e, in primo piano, quello che rimane di un pontile con armature di acciaio al carbonio costruito agli inizi degli anni sessanta.

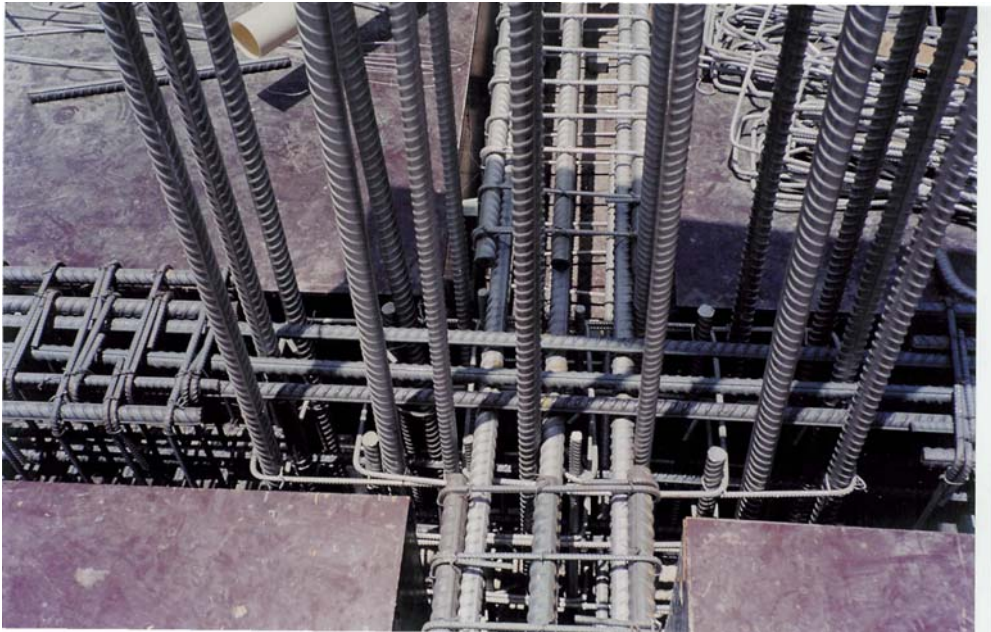


Fig. 5. Armature di acciaio inossidabile utilizzate in una costruzione in ambiente marino.

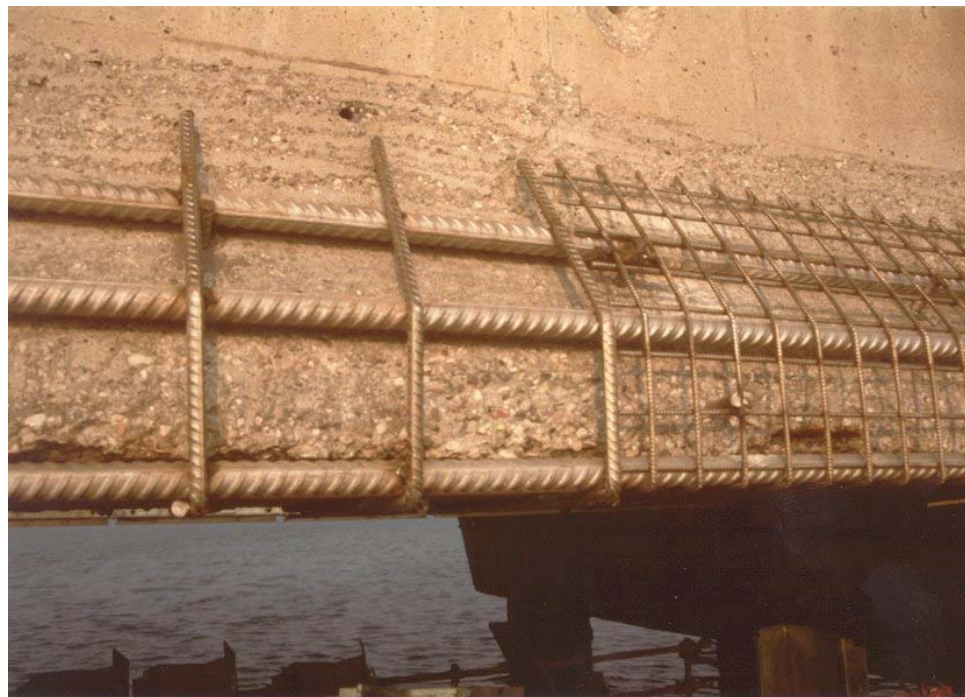


Fig. 6 - Ripristino di una struttura marina interessata da corrosione con armature in acciaio inossidabile.

Il confronto con le altre protezioni aggiuntive

Per la scelta della misura di protezione aggiuntiva è importante conoscere l'ambiente in cui la struttura deve operare, la vita di servizio richiesta alla struttura, i limiti di applicabilità delle varie protezioni, la loro vita di servizio, i costi iniziali e quelli di esercizio.

Ad esempio per quanto riguarda i limiti di applicabilità in ambienti contenenti cloruri è possibile far riferimento ai seguenti valori indicativi: il tenore di cloruri massimo, che per le armature di acciaio al carbonio è di 0,4 % rispetto al peso di cemento, passa a 1,2% per le armature zincate; a valori compresi tra 1 e 3% per gli inibitori a seconda del loro tipo e della loro concentrazione, ma anche della qualità del calcestruzzo; dal 3,5 all'8% per gli acciai inossidabili al variare della loro composizione e delle loro condizioni superficiali; e a valori ancora maggiori per la prevenzione catodica.

Per quanto riguarda la vita di servizio alcune indicazioni di massima sono le seguenti. La durata dei trattamenti idrorepellenti o dei rivestimenti barriera nei confronti della carbonatazione o dei cloruri può essere di 10-15 anni, quella dei rivestimenti di zinco delle armature di 50-100 anni o più ancora a seconda dello spessore del rivestimento (il consumo di zinco è fino a 10 micron iniziali più un micron/anno circa sia in calcestruzzo carbonatato che in quello che contiene cloruri fino a tenori pari a 1,2%, per cui, ad esempio, un rivestimento di 120 micron porta il tempo di innesco della corrosione a 110 anni, un rivestimento di 60 micron a 50 anni. Alcuni autori riportano durate maggiori di circa il 30%). L'acciaio inossidabile austenitico e quello austeno-ferritico (duplex) non subiscono praticamente corrosione (purchè il tenore di cloruri non superi il limite critico sopra indicato). La prevenzione catodica con anodi di titanio attivato viene progettata per durare fino a 40 anni e non ci sono limiti per la concentrazione di cloruri.

Per quanto riguarda il costo delle diverse misure di prevenzione sono disponibili solo indicazioni di larga massima e comunque incomplete, anche perché il costo effettivo varia da un'applicazione all'altra e comunque le prestazioni non sono confrontabili. Ciò premesso, rispetto alle normali armature di acciaio al carbonio, le armature zincate e quelle rivestite con resine epossidiche hanno un costo circa doppio. L'impiego degli inibitori nei dosaggi più elevati aumenta il costo del calcestruzzo approssimativamente di 30 €/m³. Il ricorso ai rivestimenti superficiali ha un costo aggiuntivo indicativamente variabile da 7 a 50 €/m² di superficie del calcestruzzo, i trattamenti idrofobici di circa 10 €/m². Quello della prevenzione catodica di 75-100 €/m² (a seconda del tipo di anodo impiegato). La completa sostituzione delle armature in acciaio al carbonio con quelle in acciaio inossidabile comporta un costo 5-8 volte maggiore. La sostituzione selettiva dell'acciaio al carbonio con inox nelle zone più critiche della struttura può dimezzare tranquillamente questi costi. Esiste anche la possibilità di impiegare armature in acciaio al carbonio placcate con acciaio inossidabile.

Oltre ai vantaggi appena evidenziati l'impiego di armature di acciaio inossidabile ne consente altri. I requisiti relativi al copriferro e al calcestruzzo che garantiscono una determinata vita di servizio vanno riconsiderati nel momento in cui si impiega un materiale resistente a corrosione, risultando evidentemente meno stringenti rispetto a quelli proposti per struttura in c.a. con le armature tradizionali. Ad esempio secondo le nuove linee guida della British Stainless Steel Association [7] l'utilizzo di armature in acciaio inossidabile consente di ridurre lo spessore di copriferro a 3 cm e di aumentare la massima ampiezza accettabile delle fessure ad esempio portandola a 0,3 mm.

Comunque le varie opzioni devono essere confrontate non solo sulla base del costo iniziale, ma sulla base del costo di un completo ciclo di vita della struttura (*Life Cycle Cost*).

Esistono ormai diverse valutazioni tecnico-economiche che documentano come la scelta degli acciai inossidabili, in ambiente aggressivo collegato con la presenza dei cloruri per vite di servizio superiori ai 30 anni, sia la scelta vincente. [8]

Bibliografia

1. L. Bertolini, B.Elsener, P. Pedefferri, R. Polder, Corrosion and protection of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair; Wiley, 2004.
2. L.Bertolini, F.Bolzoni, T.Pastore, P.Pedefferri, "The Behaviour of Stainless Steel in Concrete", British Corrosion J., 1996.
3. L.Bertolini, M.Gastaldi, T.Pastore, MP.Pedefferri, P.Pedefferri, "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.
4. L.Bertolini, M.Gastaldi, T.Pastore, MP.Pedefferri, "Corrosion Behaviour of Stainless Steels in Chloride Contaminated and Carbonated Concrete", Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege, Vol. 6, No. 3, 2000, pp. 273-292.
5. L. Bertolini , P.Pedefferri, "Laboratory and field experience on the use of stainless steel to improve durability of reinforced concrete", Corrosion Review, 44, 1497-15153, 2002.
6. L.Bertolini, M.Gastaldi, T.Pastore, P.Pedefferri, E. Redaelli, "Factors influencing the corrosion of austenitic and duplex stainless steel bars in chloride bearing concrete" 15th International Corrosion Congress, Paper 382, Granada, 22-27 september 2002.
7. British Stainless Steel Association, BSSA, Stainless steel reinforcement for concrete , BSSA, April 2003.
8. The Concrete Society, Guidance on the use of stainless steel reinforcement, Technical Report Number 51, The Concrete Society 1998.

