



Armature zincate per strutture in calcestruzzo

Un'introduzione per ingegneri e progettisti



Contenuti

Introduzione	1
Il costo della corrosione	2
Il processo di zincatura a caldo	2
Corrosione delle armature in acciaio non protette	3
Carbonatazione	3
Attacco dei cloruri	4
Allungare la durata di vita del cemento armato	4
Perché le armature in acciaio zincate sono così efficaci?	5
Formazione della pellicola protettiva di passivazione	5
Resistenza alla carbonatazione	5
Resistenza all'attacco dei cloruri	6
Barriera protettiva	6
Minimo pregiudizio alla massa del calcestruzzo	6
Protezione sacrificale	6
Adesione	7
Profilo di corrosione di acciaio d'armatura non rivestito rispetto ad acciaio zincato	7
Vantaggi di progettazione	8
Specifiche di un rivestimento zincato per armature in acciaio	8
Il costo delle armature zincate	9
Piegatura, saldatura, riparazioni, movimentazione, trasporto e stoccaggio	9
Installazione e copertura	10
Combinazione di armature in acciaio zincato a caldo con armature non rivestite	10
Motivi per utilizzare armature in acciaio zincato a caldo	11
Fonti	12
Ringraziamenti	12

Introduzione

La zincatura a caldo viene impiegata da oltre 100 anni quale soluzione ottimale per prolungare la vita delle armature in cemento armato. Un primo esteso utilizzo delle armature in acciaio zincato è stato fatto per la realizzazione di serbatoi d'acqua in cemento, per i quali veniva utilizzato del filo zincato per il pretensionamento delle pareti del serbatoio.

A partire dagli anni '50, l'uso delle armature zincate cominciò a diffondersi rapidamente in diversi paesi stranieri fintanto che, negli anni '60 e '70, quantità considerevoli di armature in acciaio zincato a caldo furono utilizzate per la costruzione di ponti e autostrade negli Stati Uniti. In Australia, un utilizzo di rilievo delle armature in acciaio zincato a caldo fu fatto per la realizzazione degli elementi componenti le volte in cemento armato dell'imponente tetto dell'Opera di Sydney, i quali furono installati nel 1963 e ancora oggi si conservano intatti, puliti e privi di segni di corrosione.

Negli ultimi 25-30 anni si è registrato un costante aumento dell'uso delle armature in acciaio zincato a livello mondiale per la realizzazione di un'ampia varietà di costruzioni ed in diverse condizioni di esposizione. Dal 1995 tutte le armature in cemento armato utilizzate per la costruzione dei ponti realizzati dalla New York Thruway Authority sono state realizzate in acciaio zincato. Sempre negli Stati Uniti, numerosi ponti sono sottoposti periodicamente a controlli per verificare lo stato delle armature in acciaio zincato. Ad oggi tutti i controlli operati sui ponti realizzati originariamente con armature zincate hanno dato ottimi risultati.

In Italia si è fatto uso delle armature zincate soprattutto per applicazioni in ambienti particolarmente aggressivi come ad esempio le zone costiere oppure per la costruzione

di sistemi fognari, gallerie stradali, ecc. (per esempio sono state utilizzate delle armature zincate per la costruzione di diversi elementi e strutture in calcestruzzo nei porti italiani di La Spezia, Olbia, Salerno, Taranto e Trieste).

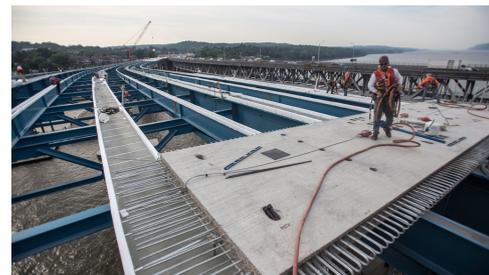
Oltre a questo tipo di applicazioni, l'utilizzo delle armature zincate può servire a risolvere problemi tecnici, a realizzare design leggeri e sottili e a massimizzare risultati architettonici. L'utilizzo delle armature zincate non è ancora molto diffuso nonostante i molteplici benefici ad esse connessi. La ragione principale di questa circostanza è la scarsa conoscenza di questi benefici. Le armature zincate non solo rappresentano un'ottima soluzione per i clienti finali, ma possono costituire una scelta molto vantaggiosa in termini economici, tecnici ed ambientali, anche per i costruttori ed i prefabbricatori di strutture in cemento armato.

Oggigiorno, l'armatura in acciaio zincato a caldo è riconosciuta come una soluzione efficace ed economica per eliminare gli effetti della carbonatazione e ritardare, in modo significativo, l'insorgenza della corrosione provocata dai cloruri che invece interessa le armature non protette presenti in ambienti costieri ed industriali. Le armature zincate a caldo rappresentano una soluzione ideale anche per facciate esterne, giunti di pannelli prefabbricati ed elementi di superficie in quanto proteggono tali elementi dalle macchie di ruggine e dallo sfaldamento.

Il successo riportato da queste strutture, dovuto all'impiego di armature zincate, rappresenta la ragione principale del crescente interesse verso la progettazione con armature zincate a caldo.



Il ponte Mario M. Cuomo, completato recentemente, rappresenta il più grande progetto di ponte nella storia dello stato di New York. Il nuovo ponte ha sostituito il precedente, il Tappan Zee Bridge, situato sul fiume Hudson a nord della città di New York.



L'impalcato del ponte Mario M. Cuomo comprende circa 6000 pannelli prefabbricati lunghi 3,66m e larghi 6,7-13,7m per le campate di avvicinamento e 963 pannelli per le campate principali. Il raccordo dei pannelli è stato effettuato mediante dei getti di calcestruzzo eseguiti attorno all'armatura sporgente in acciaio zincato. (Immagine gentilmente concessa dalla New York State Thruway Authority)



Il Ponte di Saint-Nazaire, costruito negli anni '70, è ancora oggi il ponte più lungo di Francia. Per la maggior parte delle sue armature non fu prevista una protezione contro la corrosione, il che ha reso necessario nel tempo un vasto programma di manutenzione e riparazione. Circa 63 tonnellate di armature zincate sono state utilizzate in punti ben precisi: le estremità delle flange delle travi a T e le solette di collegamento gettate in opera posizionate all'altezza delle flange (foto in alto). Non è stata necessaria alcuna riparazione nei punti in cui sono state utilizzate armature zincate a caldo.



Il ponte Mario M. Cuomo è un ponte sospeso, a doppia campata, lungo 5 km, a 8 corsie. Il ponte è progettato per raggiungere una durata di vita minima di 100 anni mediante l'utilizzo di armature zincate a caldo.

Il costo della corrosione

Uno studio pubblicato nel 2016 ha evidenziato che il costo globale della corrosione nel 2013 si è attestato a 2.5 mila miliardi di dollari (2.16 mila miliardi di euro) pari a circa il 3,4 percento del prodotto interno lordo globale (PIL). Lo studio, che ha esaminato l'impatto della corrosione e della gestione della stessa sull'economia reale, ha rivelato che l'applicazione delle migliori tecniche per prevenire problemi di corrosione potrebbe tradursi in un risparmio effettivo del 15-35 percento annuo (dai 324 ai 755 miliardi di euro).

Il processo di zincatura a caldo

Il processo di zincatura a caldo inizia dalle operazioni di pulizia superficiale degli articoli in acciaio da zincare attraverso l'immersione degli stessi in una serie di vasche di pretrattamento. Una volta pulito, l'acciaio viene immerso in un bagno di zinco fuso. Lo zinco fuso reagisce con l'acciaio per formare il rivestimento zincato (reazione metallurgica).

I tondini d'acciaio possono essere zincati in gruppi (ad es. mediante l'utilizzo di speciali gabbioni). Invece le reti di acciaio utilizzate per la realizzazione di armature vengono generalmente sospese ad agganci ed immerse nel bagno di zinco fuso.

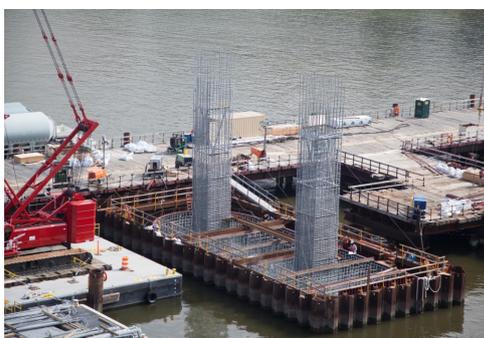


La corrosione comporta costi significativi per la società

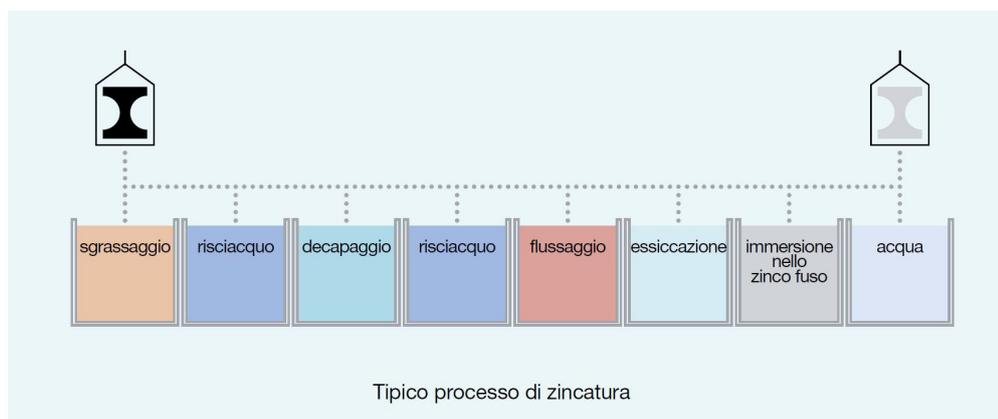


L'applicazione delle migliori tecniche, per prevenire problemi di corrosione, condurrebbe ad un risparmio annuo globale compreso tra 324 e 755 miliardi di euro.

Prima di scegliere l'acciaio zincato per la realizzazione del ponte Mario M. Cuomo, la New York Thruway Authority ha sviluppato un piano di protezione dalla corrosione per identificare l'esposizione, i meccanismi di degrado, le strategie di progettazione e di costruzione ed i costi del ciclo di vita.



Oltre 27.000 tonnellate di armature in acciaio zincato garantiscono una durata di vita prolungata alle torri delle campate principali, ai pilastri della campate di accesso, alle spalle e ai pannelli dell'impalcato stradale del Ponte Mario M. Cuomo.



La zincatura consiste nell'immersione di acciaio opportunamente pulito in un bagno di zinco fuso per l'applicazione metallurgica di un rivestimento coeso alla superficie e con alti livelli di durabilità.

Corrosione delle armature in acciaio non protette

L'ambiente altamente alcalino del calcestruzzo consente all'acciaio delle armature convenzionali non protette di sviluppare una patina stabile di ossido di ferro, detta strato di passivazione, sulla sua superficie. Questa patina protegge l'acciaio dalla corrosione; tuttavia, il calcestruzzo è un materiale disomogeneo, composto principalmente da prodotti di idratazione del cemento (pasta di cemento), sabbia e aggregati. La caratteristica porosità del calcestruzzo indurito fornisce un accesso utile per la diffusione di specie gassose e acquose che, nel tempo, possono abbattere la passività dell'acciaio e dare inizio alla corrosione.

La corrosione dell'acciaio delle armature non protette immerse nel calcestruzzo inizia quando lo strato di ossido protettivo presente sulla loro superficie viene depassivato. La depassivazione può avvenire tramite due meccanismi diversi:

1. La carbonatazione del calcestruzzo oppure
2. La corrosione indotta da cloruri.

Una volta iniziato il processo di corrosione delle armature per cemento armato, i prodotti



Fessurazione e sfaldamento del calcestruzzo dovuti alla corrosione dell'acciaio dell'armatura

di corrosione cominciano a formarsi sulla superficie delle armature. Tali prodotti hanno un volume nettamente superiore rispetto al volume originario dell'elemento in acciaio (la ruggine, prodotto dell'ossidazione del ferro nell'acciaio delle armature, è caratterizzata da un volume 7 volte maggiore del volume del ferro consumato). Questo aumento di volume provoca notevoli tensioni interne al calcestruzzo fino a causare la formazione e la propagazione di crepe. Le crepe, così formatesi, forniscono a loro volta un percorso ideale per il facile accesso di agenti aggressivi all'interno delle armature in calcestruzzo. Tale circostanza comporta l'accelerazione del processo di corrosione dell'acciaio e causa danni seri quali la delaminazione o lo sfaldamento del copriferro.

Il processo di corrosione delle armature in acciaio non protette è rappresentato graficamente nel modello Tuutti adattato qui di seguito, dove ritroviamo:

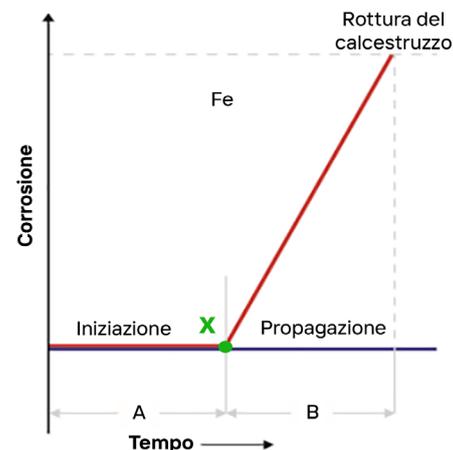
A. La fase iniziale - il periodo in cui l'armatura in acciaio rimane passivata (fino al punto X).



B. La fase di propagazione - la distruzione dello strato di passivazione sulle armature si è verificata e l'acciaio si sta corrodendo. Alla fine di questa fase si verificano la delaminazione o la rottura del calcestruzzo.

Il processo di corrosione viene molto spesso attivato dalla neutralizzazione dell'area circostante alle armature in acciaio, come accade ad esempio nella carbonatazione, oppure per attivazione della superficie da parte di anioni fortemente corrosivi, come nel caso della corrosione dovuta all'attacco di cloruri. L'intervallo di tempo necessario perché il processo di corrosione abbia inizio è determinato: dalla concentrazione e dalla velocità di flusso delle sostanze che penetrano nel copriferro e dalla soglia di concentrazione necessaria per l'avvio della corrosione.

Modello schematico sull'evoluzione della corrosione delle armature d'acciaio nel calcestruzzo, secondo Tuutti 1982



Il volume della ruggine delle armature non rivestite può svilupparsi fino a 7 volte rispetto al volume di ferro consumato dalla corrosione portando alla formazione e alla propagazione di crepe nel calcestruzzo

Carbonatazione

La carbonatazione è un processo naturale che si verifica quando l'elevata alcalinità del copriferro in calcestruzzo viene neutralizzata a causa di una reazione che si innesca tra il calcestruzzo e l'anidride carbonica atmosferica. Nel tempo il fronte di carbonatazione migra attraversando la massa di calcestruzzo riducendone il pH a livelli quasi neutri (pH 7). Quando il pH del calcestruzzo si riduce, l'acciaio delle armature all'interno del calcestruzzo diventa più suscettibile alla corrosione. Alcune caratteristiche tipiche della carbonatazione del calcestruzzo:

- La carbonatazione avviene più lentamente al crescere dello spessore di cemento di copriferro;
- La penetrazione della carbonatazione

dipende dalla permeabilità del calcestruzzo e dalla presenza in esso di eventuali crepe, vuoti e pori;

- Quando il pH del calcestruzzo si riduce al di sotto di 11,5 l'acciaio dell'armatura inizia a corrodersi;
- La tendenza del cemento alla neutralizzazione e l'insorgenza degli effetti correlati sono accelerati in caso di esposizione all'anidride solforosa (SO₂) e al biossido di azoto (NO₂) che, reagendo con l'acqua, formano soluzioni altamente acide. Una maggiore concentrazione di tali prodotti chimici è presente negli ambienti delle aree industriali.

Sulla base di misurazioni effettuate sul campo, la qualità del calcestruzzo rappresenta un aspetto fondamentale per ridurre gli effetti della carbonatazione. I test hanno rivelato che:

- Nel calcestruzzo strutturale di buona qualità, la carbonatazione può essere rilevata in soli 5-10 mm dopo 20 anni di esposizione atmosferica (un esempio sono gli elementi strutturali di edifici situati in ambiente urbano);
- Nel calcestruzzo di scarsa qualità, la completa carbonatazione di pannelli a parete con spessori di 200 mm (da entrambi i lati) si verifica in soli 5 - 8 anni (un esempio è rappresentato dagli edifici a basso costo).

Attacco dei cloruri

La corrosione indotta dai cloruri rappresenta la principale causa di corrosione delle armature per cemento armato e dei conseguenti danni derivanti alle strutture in cemento armato di tutto il mondo. Gli ioni di cloruro possono migrare attraversando il calcestruzzo e raggiungere livelli tali da causare la depassivazione dell'acciaio da armatura, iniziandone così la corrosione. Gli ioni di cloruro attivano la superficie dell'acciaio e formano un anodo nei confronti della parte di superficie rimasta passivata, che invece funge da catodo. Gli ioni di cloruro attaccano l'ossido ferroso formando i composti che si staccano dall'acciaio e costituiscono la ruggine. Gli atomi di ferro, che restano successivamente esposti, formano ulteriori ossidi di ferro e continuano così ad alimentare il processo di corrosione.

I cloruri entrano nel calcestruzzo attraverso:

- Aggregati contaminati, sabbie marine e additivi
- Acqua salmastra o salata usata per miscelare e / o indurire il cemento
- Esposizione ad ambienti marini e costieri
- Uso di sali antigelo

I cloruri penetrano nel calcestruzzo per diffusione, causando l'aumento delle concentrazioni di cloruro sulla superficie dell'acciaio delle armature. Un livello di cloruri tra lo 0,2 e lo 0,4% del contenuto del cemento (oppure 0,6 kg/m³ di calcestruzzo) è considerato essere una soglia sufficiente per innescare il processo di corrosione dell'acciaio delle armature non protette.



Deterioramento dell'armatura e del calcestruzzo in un ambiente costiero ad alto contenuto di cloruri

La corrosione indotta dai cloruri è la principale causa di corrosione dell'acciaio da armatura

Allungare la durata di vita del cemento armato

La necessità di introdurre il requisito della durabilità in tutte le fasi di progettazione, costruzione e manutenzione delle strutture in calcestruzzo al fine di prevenirne il deterioramento precoce, è ormai condizione ben nota.

La pianificazione della durabilità consiste complessivamente nella selezione e nell'utilizzo di materiali, processi di progettazione e metodi di costruzione volti a garantire il raggiungimento della durata di vita della struttura prevista dal cliente e ad escludere interventi prematuri ed imprevisti di manutenzione.

Un'analisi tecnica può essere utilizzata per determinare la natura e il tasso di deterioramento dei materiali in determinate condizioni macro e micro ambientali e per pianificare di conseguenza la progettazione, la costruzione e la manutenzione di una struttura in calcestruzzo durante la sua vita.

Esistono 3 metodi principali per prevenire il fenomeno della corrosione dell'acciaio nel calcestruzzo:

1. Modifica del calcestruzzo

- Aggiunta di materiali cementizi integrativi (ad esempio: ceneri volanti, scorie e fumo di silice)
- Impregnazione (ad esempio i polimeri)
- Inibitori (ad esempio i nitrati)
- Strati di barriera (ad esempio le membrane e le vernici)

2. Modifica delle armature per calcestruzzo

- Rivestimenti per armature (ad esempio il rivestimento zincato)
- Metalli resistenti alla corrosione (ad esempio l'acciaio inossidabile)
- Materiali non metallici (ad esempio: polimeri rinforzati con fibre, fibre polimeriche rinforzate con vetro, ecc.)
- Protezione catodica (ad esempio attraverso corrente impressa ed anodi sacrificali)

3. Aumento dello spessore del copriferro

L'aumento dello spessore del copriferro consente di allungare il tempo necessario alla carbonatazione, che si genera a partire dalla superficie, per raggiungere l'acciaio delle armature, ed i tempi necessari alle concentrazioni di cloruro presenti sulla superficie delle armature per raggiungere dei livelli critici nella diffusione all'interno; tuttavia vi è un paradosso da considerare in questo approccio poiché più spesso sarà il copriferro e maggiore sarà la tensione interna dovuta all'espansione causata dalla corrosione dell'acciaio e la dimensione delle eventuali crepe che si formeranno come conseguenza.

I 3 metodi precedentemente elencati possono essere utilizzati singolarmente oppure in combinazione. Ogni metodo ha i suoi vantaggi e svantaggi. L'approccio da utilizzare dovrebbe essere sviluppato in base alla situazione specifica, all'ambiente e all'aspettativa di vita prevista per la struttura.



I pontili galleggianti del porto turistico di Sandringham, Victoria (Australia) sono stati realizzati con armature zincate.

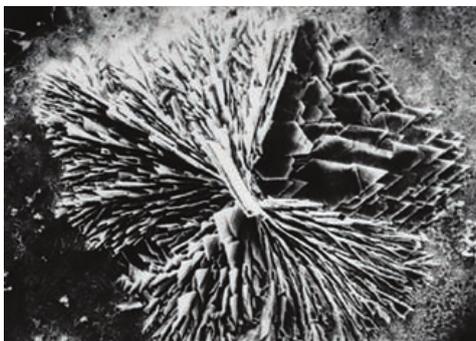
La zincatura fornisce una protezione dalla corrosione a lungo termine e consente di realizzare un copriferro più sottile permettendo di risparmiare risorse

Perché le armature zincate sono così efficaci?

Formazione della pellicola protettiva di passivazione

Come accade per le armature non rivestite, anche le armature in acciaio zincate a caldo producono uno strato passivante protettivo quando sono immerse nel calcestruzzo.

Lo zinco in soluzioni cementizie fortemente alcaline (pH 12,5 - 13,2) si passiva attraverso la formazione di uno strato di cristalli di idrossizincato di calcio - $\text{Ca}(\text{Zn}(\text{OH})_2)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, adesi alla superficie dell'armatura zincata. Questa reazione comincia immediatamente quando l'acciaio zincato entra in contatto con la soluzione umida del cemento, formando uno strato superficiale che stabilizza lo zinco e lo isola dall'ambiente circostante. I prodotti finali della passivazione sono composti da cristalli di CaHZn che si formano sulla superficie delle armature in acciaio zincate.

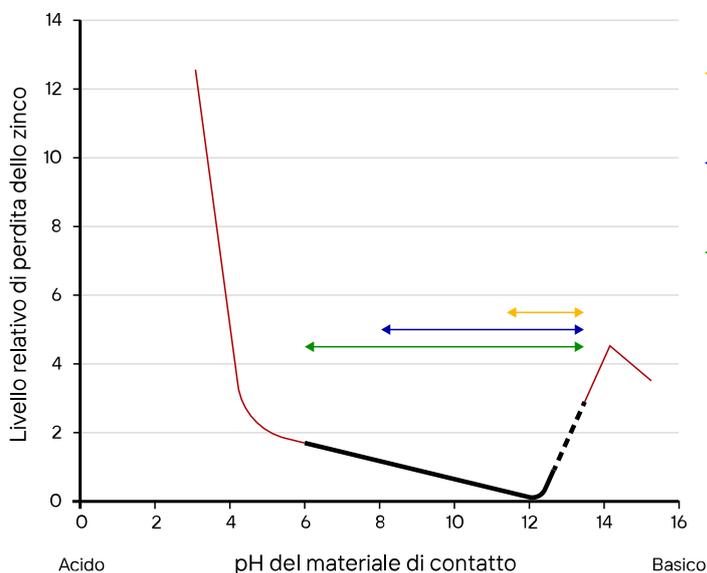


Cristalli di CaHZn dopo 24h in una soluzione di $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a pH 12,6

Durante il processo di formazione dello strato passivo, vengono consumati circa 10 μm dello strato esterno originale di zinco puro del rivestimento. Si tratta di una piccola porzione di rivestimento. La reazione con lo zinco cessa quando il calcestruzzo si indurisce. Dopo 28 giorni, periodo in cui il calcestruzzo ha sviluppato la sua normale capacità di adesione e di resistenza alla compressione, la formazione dello strato di idrossizincato di calcio comporta che l'acciaio delle armature zincate sviluppi una maggiore forza di adesione e un minor scivolamento sotto carico rispetto a quanto avviene per le armature non zincate.

Le proprietà dello strato passivante sono fondamentali per garantire l'efficienza delle armature zincate nel calcestruzzo, in particolare la loro stabilità chimica in ambienti con pH neutri e in caso di esposizione ad alte concentrazioni di cloruro.

L'acciaio zincato d'armatura sviluppa una forza di adesione maggiore rispetto a quella dell'acciaio d'armatura non rivestito



Valori di stabilità per armature non rivestite

Tipici valori del pH del calcestruzzo

Valori di stabilità per armature zincate

Protetto contro questo livello di perdita dallo strato passivante

Resistenza alla carbonatazione

Un rivestimento zincato a caldo conserva un livello di corrosione molto basso in un ampio intervallo di valori di pH (6 - 12,5). Per questo motivo, le armature zincate si conservano stabili anche quando il livello di pH del calcestruzzo diminuisce a causa della carbonatazione che si genera nel tempo. Al contrario, l'acciaio di un'armatura non rivestita rimane stabile solo all'interno di un piccolo intervallo di valori (pH 11,5 - 13,2) e inizia a corrodersi quando il livello di pH del calcestruzzo è inferiore a 11,5. Nei calcestruzzi con un pH compreso tra 12,5 e 13,2, l'acciaio delle armature zincate è protetto dalla formazione dello strato passivo di idrossizincato di calcio e ciò impedisce allo zinco di subire perdite rilevanti in ambienti altamente alcalini. Nel tempo, il fronte di carbonatazione migra e attraversa la massa del calcestruzzo, riducendone il pH a livelli quasi neutri (pH 7). Come illustrato nel grafico a fianco, le armature zincate non sono minimamente influenzate dalla carbonatazione del calcestruzzo.

L'intervallo di stabilità del pH delle armature nel calcestruzzo

Resistenza all'attacco dei cloruri

L'acciaio zincato possiede una migliore resistenza all'attacco dei cloruri rispetto all'acciaio non zincato.

Uno studio recente su questo argomento (Jaśniok, Sozańska, Kołodziej e Chmiela, 2020) ha dimostrato che: *"Risultati ottenuti dai test di corrosione (LPR, EIS) e dalle prove strutturali (SEM, EDS) su campioni di calcestruzzo armato realizzati con acciaio B500SP dimostrano che il rivestimento in zinco sulle armature in acciaio ha un effetto estremamente favorevole ed offre una protezione efficace contro la corrosione in ambienti con cloruri"*.

La soglia di resistenza ai cloruri dell'acciaio non zincato è stata fissata nella misura dello 0,06% del peso del calcestruzzo sulla base di una probabilità del 20% di iniziare la corrosione. L'acciaio zincato può tollerare concentrazioni di cloruro ben superiori a quelle che causano la corrosione nell'acciaio

non rivestito. Ciò è dovuto alla stabilità della pellicola di idrossizincato di calcio. Sebbene non vi sia un accordo unanime, un attento esame della letteratura evidenzia come la soglia di concentrazione dei cloruri per l'acciaio delle armature zincate sia 2-6 volte più alta che per l'acciaio non rivestito. In generale, il valore critico per la soglia dei cloruri è, in via precauzionale, considerato essere da 2 a 2,5 volte quello relativo all'acciaio non rivestito.

Inoltre, la velocità di diffusione dei cloruri nel cemento non è costante: diminuisce nel tempo, in modo che, in termini pratici, ad una più alta soglia critica dei cloruri corrisponda un tempo molto maggiore per l'inizio della corrosione per l'acciaio zincato rispetto all'acciaio non rivestito – almeno due volte maggiore e, in alcuni resoconti, fino a 10 volte più lungo.

Dal momento che l'attacco dei cloruri rappresenta, presa singolarmente, la causa più

evidente di danneggiamento delle strutture in cemento nelle infrastrutture di tutto il mondo, esso deve essere considerato con cautela in tutte le previsioni di durabilità. La zincatura a caldo è un metodo semplice e conveniente per migliorare la resistenza ai cloruri, e quindi la durabilità delle strutture in cemento e le prestazioni rispetto all'acciaio non rivestito possono essere considerate con modelli convenzionali di diffusione dei cloruri. Un fatto importante su cui porre attenzione è che il modello deterministico della diffusione dei cloruri riguarda solo l'intervallo temporale fino all'inizio della corrosione, che è indipendente dallo spessore del rivestimento di zincatura. Considerando la fase di propagazione della corrosione, durante la quale il rivestimento zincato si corrode con una velocità inferiore rispetto all'acciaio, la durabilità si incrementa ulteriormente.

Barriera protettiva

Un altro vantaggio connesso all'utilizzo del rivestimento in zinco per le armature è che il processo di zincatura a caldo garantisce un rivestimento totale di tutte le superfici trattate. Questo rivestimento protettivo, ottenuto attraverso una reazione metallurgica, costituisce un'efficace barriera di difesa tra l'acciaio e l'atmosfera.

L'eccellente resistenza e tenacità del rivestimento zincato a caldo protegge le armature durante il trasporto in cantiere e le fasi di costruzione di un'opera.

Minimo pregiudizio alla massa del calcestruzzo

Nel caso in cui il rivestimento zincato dovesse iniziare a corrodersi, il processo di corrosione entrerebbe nella fase di propagazione.

I prodotti risultanti dalla corrosione dello zinco sono sottili, simili a polvere e si sviluppano in volume solo fino a 1,3 volte rispetto al volume del rivestimento originale in zinco (mentre un acciaio non rivestito può espandersi fino a 7 volte rispetto al suo volume originale a causa della corrosione).

I prodotti di corrosione dello zinco sono anche più solubili all'interno dei pori alcalini dell'acqua; si allontanano dalle armature e si propagano nei composti del calcestruzzo, a differenza dei prodotti di corrosione del ferro che non migrano dalle armature fino a quando non si sia verificata la rottura del calcestruzzo.

Questa condizione evita che si accumulino pressioni interne che possono causare crepe e spallamenti nel calcestruzzo.

Inoltre, il propagarsi di questi microscopici prodotti della corrosione dello zinco nei prodotti del calcestruzzo riduce la permeabilità del calcestruzzo stesso, riempiendone i pori ed i vuoti, rallentando in questo modo il passaggio di specie aggressive dalla superficie del calcestruzzo all'acciaio delle armature. Da questo processo ne deriva una significativa dilatazione dell'intervallo di tempo necessario perché la fase di propagazione della corrosione abbia inizio e un corrispondente allontanamento nel tempo dell'inizio della fase di rottura del calcestruzzo.

Protezione sacrificale

La serie galvanica di metalli consiste in un elenco di metalli e leghe ordinati secondo i loro potenziali relativi in ciascun ambiente. L'immagine a destra mostra una serie di metalli disposti in ordine di attività elettrochimica nell'acqua di mare (l'elettrolita).

I metalli sono ordinati dall'alto verso il basso in funzione della loro capacità sacrificale; i metalli collocati in alto forniscono protezione catodica o sacrificale ai metalli posti in basso. Lo zinco è anodico rispetto all'acciaio; pertanto il rivestimento di zincatura fornisce protezione

catodica all'acciaio esposto. Quando zinco e acciaio sono posti in contatto in presenza di un elettrolita, lo zinco viene lentamente consumato mentre l'acciaio viene protetto.

L'azione sacrificale dello zinco offre protezione all'acciaio in caso di discontinuità del rivestimento locale o in caso di notevole abrasione superficiale che potrebbe verificarsi durante gli spostamenti o il sollevamento in cantiere.

Lo zinco protegge l'acciaio



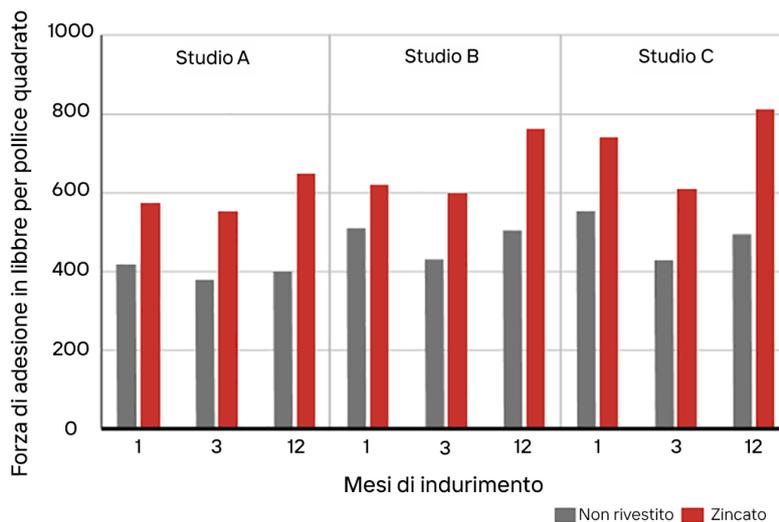
Posizione dello zinco nella serie galvanica

Adesione

Ci sono numerose prove che dimostrano che le armature di acciaio zincato sono caratterizzate da una maggiore adesione al cemento rispetto all'acciaio non rivestito.

La maggiore adesione è dovuta alla formazione dello strato di passivazione composto di idrossizincato di calcio. L'effetto per cui, in test accelerati, nelle prime 1 – 2 settimane l'adesione dell'acciaio zincato al cemento è inferiore a quella dell'acciaio non rivestito, è dovuto alla reazione iniziale dello zinco in quelle condizioni altamente alcaline.

Dopo 28 giorni, quando il calcestruzzo sviluppa la sua normale adesione e resistenza alla compressione, l'acciaio zincato sviluppa una capacità di adesione maggiore rispetto all'acciaio non rivestito. Ciò è dovuto alla precipitazione del film di idrossizincato di calcio all'interfaccia acciaio/calcestruzzo.



Risultati del test sulla forza di adesione; confronto tra l'acciaio d'armatura non rivestito con l'acciaio d'armatura zincato (Fonte: Università della California)

Profilo di corrosione di acciaio d'armatura non rivestito rispetto ad acciaio zincato

Lo schema adattato di seguito mostra le prestazioni dell'acciaio per cemento armato zincato rispetto all'acciaio non rivestito nel calcestruzzo.

La soglia di cloruro più elevata dell'acciaio d'armatura zincato e la sua immunità agli effetti della carbonatazione, ritardano l'inizio del processo di corrosione (spostamento dal punto x al punto y).

La protezione barriera offerta dallo zinco, combinata con la minima disgregazione dei prodotti di corrosione dello zinco stesso, serve a prolungare la fase di propagazione del processo.

Ogni fase della corrosione è descritta di seguito:

A. Fase iniziale – Periodo in cui il calcestruzzo è progressivamente esposto a prodotti corrosivi (cloruri/carbonatazione) e l'armatura non rivestita rimane passivata (fino al punto x). Il tempo che precede l'inizio della corrosione può essere quantificato mediante modelli deterministici di diffusione del cloruro e carbonatazione (richiesti solo per l'acciaio di rinforzo non rivestito) che si basano sulla seconda legge di Fick.

B. Fase di propagazione – Distruzione dello strato passivante sull'armatura non rivestita e corrosione dell'armatura fino al limite accettabile di deterioramento del calcestruzzo.

Al termine di questo periodo si verificano fessurazioni e rigonfiamenti del calcestruzzo.

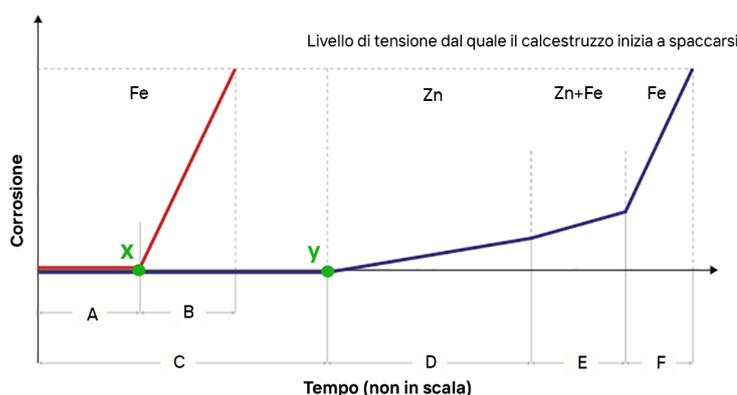
C. Durata dello strato passivante su acciaio d'armatura zincato. La fase di inizio della corrosione è prolungata grazie alla maggiore tolleranza all'attacco dei cloruri e alla completa assenza della depassivazione per carbonatazione del calcestruzzo.

D. Periodo di protezione dell'acciaio d'armatura zincato dalla ruggine. I cloruri attaccano una piccola porzione di strato di zinco puro sulla superficie dell'acciaio e i prodotti della corrosione si diffondono lontano dall'acciaio d'armatura.

E. Periodo di protezione aggiuntiva in cui la corrosione provoca la dissoluzione degli strati di lega ferro/zinco.

F. Fase successiva al consumo totale del rivestimento zincato. In questa fase la velocità di corrosione dell'acciaio d'armatura diventa identica all'acciaio non rivestito esposto nella fase B. Tuttavia, in questa fase, il rivestimento di zincatura ha già svolto il suo lavoro e il tempo necessario per l'inizio della fessurazione del calcestruzzo risulta notevolmente aumentato.

Modello schematico sull'evoluzione della corrosione delle armature d'acciaio nel calcestruzzo, secondo Tuutti 1982



Vantaggi di progettazione

Un rivestimento realizzato con zincatura a caldo garantisce un aumento significativo della durata di vita delle strutture in calcestruzzo armato. La formazione di uno strato passivo di idrossizincato di calcio sulla superficie in acciaio dell'armatura zincata aumenta significativamente la soglia di tolleranza dell'acciaio zincato ai cloruri, in tal modo ritardando considerevolmente il momento di inizio della corrosione. Questo ritardo nell'inizio della corrosione può essere quantificato usando modelli convenzionali di diffusione del cloruro deterministico basati sulla Seconda Legge di Fick.

Il tempo per l'innesco della corrosione è ulteriormente prolungato poiché l'armatura in acciaio zincato è immune dagli effetti della carbonatazione. Se l'armatura in acciaio zincato dovesse depassarsi, i prodotti risultanti dalla corrosione dello zinco sarebbero meno voluminosi rispetto ai prodotti di corrosione del ferro non rivestito e quindi causerebbero una frattura lievissima della massa del calcestruzzo. Questo eviterebbe l'accumulo di pressioni interne che causano crepe e spallamenti.

La migrazione dei prodotti microscopici dovuti alla corrosione dello zinco verso il calcestruzzo riduce la permeabilità dello stesso riempiendone i pori ed i vuoti, rallentando così l'apporto di specie aggressive dalla superficie del calcestruzzo all'acciaio delle armature. Il risultato di questo processo è un significativo posticiparsi della fase di propagazione della corrosione e un corrispondente ritardo nel tempo di inizio della rottura del calcestruzzo.



Mensole in cemento armato realizzate con acciaio zincato a caldo per i balconi di un elegante appartamento a Genova. L'armatura in acciaio zincato è stata scelta per preservare al meglio le mensole nel tempo, in particolare per proteggerle da smog, piogge, gelo e umidità. (Immagini gentilmente concesse dall'azienda Prefabbricati Torti di Pietro e Lino Torti snc)

Un rivestimento zincato a caldo su acciaio d'armatura fornisce un aumento significativo della durata di vita delle strutture in cemento armato

Specifiche di un rivestimento zincato per armature in acciaio

I requisiti per le armature in acciaio zincato per calcestruzzo armato sono specificati nella norma UNI EN 10348:2024 (Acciaio per calcestruzzo armato - Prodotti in acciaio zincato per calcestruzzo armato).

La norma EN 10348 definisce i requisiti per le armature in acciaio zincato realizzate con barre che hanno soddisfatto i requisiti definiti nella norma EN 10080. I requisiti per la zincatura delle barre sono conformi allo standard internazionale per la zincatura a caldo - EN ISO 1461, con l'eccezione che i requisiti di spessore del rivestimento per le armature in acciaio sono specificatamente definiti nella tabella a destra.

La norma EN 10348 assicura inoltre che la geometria della nervatura (altezza della nervatura o profondità della rientranza) sia mantenuta in modo soddisfacente dopo la zincatura. Per evitare eventuali effetti sulle proprietà meccaniche, la norma stabilisce i diametri minimi di piegatura per le barre che vengono piegate prima della zincatura.

Requisiti di spessore del rivestimento secondo la norma EN 10348:2024

Diametro dell'acciaio (mm)	Peso del rivestimento (g/m ²)	Spessore del rivestimento (µm)
> 6	610	85
≤ 6	505	70

Il costo delle armature zincate



Nel progetto residenziale "Zac Seguin", realizzato nella zona ovest di Parigi, sono state utilizzate delle armature zincate per la costruzione dei balconi prefabbricati in calcestruzzo bianco realizzati con fioriere integrate. Tale soluzione è stata scelta per conservare l'aspetto pulito degli elementi prefabbricati in calcestruzzo bianco nel tempo e per proteggerli dalle macchie di ruggine. L'uso delle armature zincate ha altresì permesso di ridurre il copriferro di tali elementi e di ottenere un design più sottile. (Immagini concesse da Aldric Beckmann Architectes/ Françoise N'Thépé Architecture & Design.Paris)



Il costo complessivo dell'impiego delle armature zincate nelle costruzioni in calcestruzzo dipende in larga misura dalle proporzioni in cui vengono utilizzate in tutta la struttura.

Ad esempio, raramente è necessario zincare il nucleo strutturale o gli elementi interni di un edificio alto o i pilastri e le fondazioni di grandi dimensioni. In molte situazioni, potrebbe essere necessario ricorrere alle armature zincate per realizzare elementi a vista, di superficie o qualora le fondazioni possano essere interessate da ambienti aggressivi (acque sotterranee o fluttuanti).

Nella costruzione di edifici, si riscontra generalmente che il costo della zincatura incrementa il costo complessivo del calcestruzzo di circa il 6-10% a seconda delle dimensioni e del tipo di armature utilizzate, del prezzo della zincatura e della quantità di acciaio per metro cubo di calcestruzzo. In media, il costo dell'acciaio per armature non supererebbe il 25% circa del costo totale del calcestruzzo utilizzato. Considerando che il costo della parte strutturale e dell'involucro di un edificio normalmente rappresenta solo circa il 25-30% dei costi totali dell'edificio, il costo aggiuntivo della zincatura si riduce dall'1,5 al

3,0% dei costi totali dell'edificio. Questo costo si riduce fino allo 0,5-1,0% se la zincatura è limitata ai soli pannelli di superficie; tuttavia, se confrontato con il costo totale del progetto o il prezzo finale di vendita dell'intera opera, il costo aggiuntivo della zincatura diventa davvero irrisorio, spesso non superando lo 0,1-0,2%.

In un'analisi effettuata nel 2017, il professor Richard Weyers, della Virginia Tech University, ha analizzato i processi di diffusione del cloruro e la durata di vita dei ponti di calcestruzzo costruiti in Virginia, negli Stati Uniti, nei casi di utilizzo di armature con rivestimento epossidico, rivestimento da zincatura a caldo e nei casi di utilizzo dell'acciaio inossidabile 316LN. I dati relativi ai costi e al ciclo di vita mostrano che le armature zincate forniscono la protezione più economica per i ponti in cemento armato garantendo una durata di vita di almeno 100 anni.

Quando si analizzano i costi dovuti alla corrosione di un edificio in cemento armato, il costo aggiuntivo per la zincatura delle armature si dimostra essere un investimento minimo ma conveniente data la protezione dalla corrosione offerta per lungo tempo.

Piegatura, saldatura, riparazioni, movimentazione, trasporto e stoccaggio

Le linee guida e i requisiti relativi a piegatura, saldatura, riparazione e altri aspetti di lavorazione sono riportati nella norma EN 10348:2024

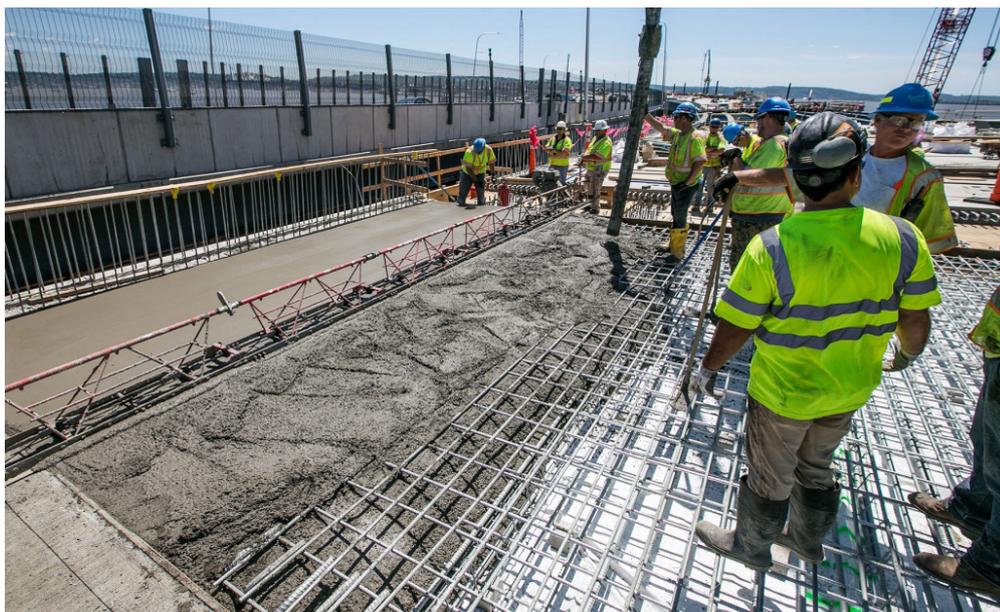
La maggiore durata offerta dal rivestimento in zinco non rende necessaria alcuna particolare operazione o cura durante il trasporto delle armature zincate. Alcune informazioni per il trasporto:

- L'uso di catene, funi metalliche o cavi per il sollevamento è ammissibile;
- I fasci di acciaio (ad es. i tondini) dovrebbero essere sollevati con un numero adatto di punti di appoggio;
- Si consiglia l'utilizzo di una barra di sollevamento per evitare che si producano abrasioni dovute al contatto tra le barre nel caso di fasci più lunghi;
- Non è necessario alcun posizionamento speciale; tuttavia l'acciaio e le reti di rinforzo dovrebbero essere stoccati in modo tale da consentire il drenaggio e il flusso d'aria per evitare il formarsi di macchie di umidità;
- Le armature zincate possono essere conservate ovunque poiché non sono sensibili ai raggi UV.



Installazione e copertura

Le armature zincate sono resistenti all'abrasione; per cui non sono necessarie cautele particolari per l'installazione delle stesse. Questa circostanza, in aggiunta alla migliorata forza di adesione delle armature zincate, rende inutile sovradimensionamenti (diversamente alcuni rivestimenti protettivi richiedono sovrapposizioni per lunghezze che sono maggiori del 20% - 50% rispetto alle armature non rivestite). Come accade per le armature non rivestite, non sono richieste condizioni meteorologiche specifiche per eseguire l'installazione di armature zincate. Inoltre il rivestimento superficiale permette un lavoro più agevole e pulito. Le armature zincate a caldo difficilmente si danneggiano durante l'installazione poiché il rivestimento è metallurgicamente legato all'acciaio.

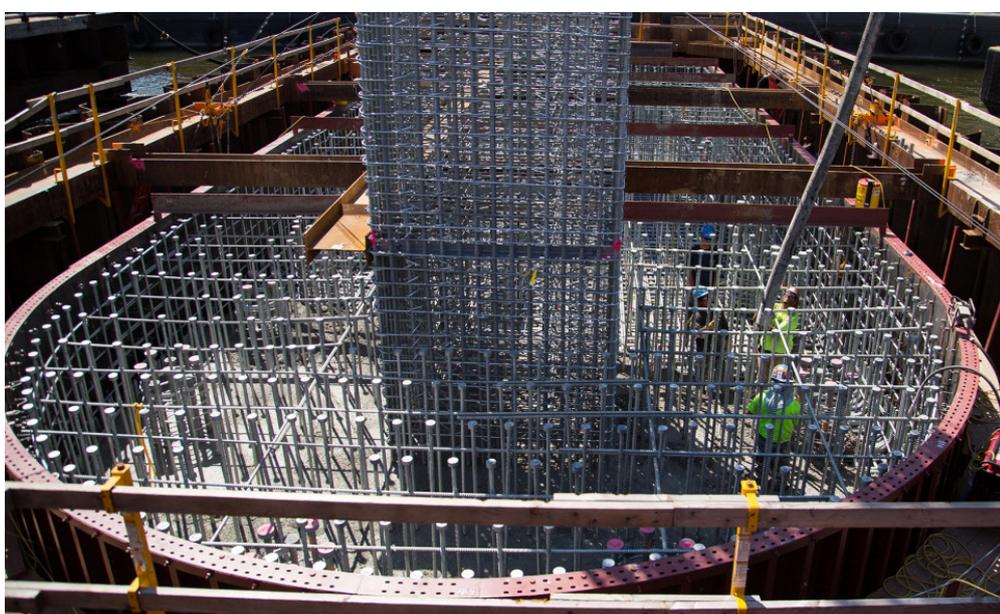
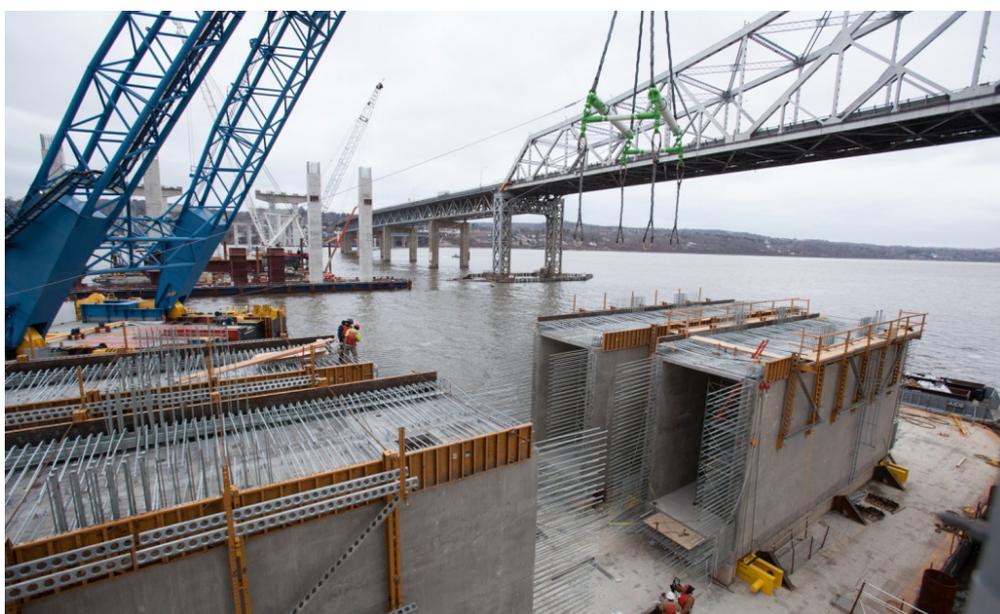


Combinazione di armature in acciaio zincato a caldo con armature non rivestite

All'interno del calcestruzzo non si dovrebbero produrre reazioni corrosive tra armature zincate e armature non rivestite fintanto che i due metalli restano passivi. Per assicurarsi che questo avvenga, il copriferro dell'armatura non rivestita e tutte le relative legature non devono avere uno spessore inferiore a quello normalmente previsto per proteggere le armature non rivestite nelle condizioni specifiche.

Laddove venga utilizzato un acciaio zincato a caldo, è consigliabile che tutto l'acciaio a contatto con le armature zincate sia anch'esso zincato, compresi il filo per le legature, gli inserti e i distanziatori, oppure che vengano utilizzate fascette e distanziatori non metallici o plastificati. Se le armature zincate entrano in contatto con le armature non protette in aree soggette a corrosione, l'acciaio zincato proteggerà l'acciaio non rivestito sacrificandosi in suo favore, con conseguente riduzione della durata del rivestimento vicino all'area di contatto.

Qualora il contatto con le armature non rivestite sia inevitabile o rappresenti una preoccupante eventualità, possono essere utilizzati il polietilene e il nastro dielettrico per fornire isolamento elettrico tra i due metalli. Per l'assemblaggio o l'installazione di armature zincate, è raccomandabile utilizzare filo zincato o legature di plastica. Anche i supporti delle barre devono essere in acciaio zincato, plastica o di altri materiali inerti come la muratura. Se si utilizzano accoppiatori meccanici, anche questi devono essere zincati.



Le armature delle 43 coppie di pilastri in cemento armato del ponte Mario M. Cuomo sono realizzate con gabbie in acciaio zincato.

Motivi per utilizzare armature zincate a caldo

1 Le armature zincate si passivano una volta immerse nel calcestruzzo bagnato attraverso la formazione di uno strato aderente di idrossizincato di calcio. Nel formarsi, questo strato **augmenta l'aderenza tra l'armatura zincata e il calcestruzzo.**

2 Le armature zincate restano stabili su un'ampia scala di valori di pH e **non risentono della carbonatazione del calcestruzzo.**

6 Nelle applicazioni con esposizione alla carbonatazione, **l'armatura zincata consente di utilizzare un copriferro più sottile** rispetto a quello previsto per le armature non rivestite, garantendo al contempo la stessa durata di vita dell'elemento. Non esistono requisiti speciali per la progettazione di elementi in calcestruzzo con armature zincate e non sono necessari sovradimensionamenti dell'acciaio e/o sovrapposizioni maggiorate.

7 In caso di depassivazione delle armature zincate, lo zinco si corroderà ad una velocità inferiore rispetto a quella del ferro. Il rivestimento di zinco costituisce una barriera contro la corrosione del ferro. A differenza del ferro, i prodotti di corrosione dello zinco migreranno dal rivestimento zincato e, riducendo la porosità del cemento circostante, rallenteranno la velocità d'ingresso del cloruro. Il volume nettamente inferiore dei prodotti di corrosione dello zinco rispetto a quelli del ferro riduce la pressione espansiva generata dal processo di corrosione, **limitando così le dimensioni di eventuali crepe che possono formarsi nell'elemento in calcestruzzo.**

8 Le armature zincate rappresentano una soluzione efficace per garantire la durabilità di una struttura in calcestruzzo a **costi nettamente inferiori rispetto all'utilizzo dell'acciaio inossidabile.**

10 A differenza dei rivestimenti epossidici, **i rivestimenti zincati sulle armature forniscono una protezione-barriera, una maggiore forza di adesione, uno strato passivante superiore e fungono da anodo sacrificale in caso di esposizione dell'acciaio dell'armatura.** Il rivestimento di zinco offre **un'eccellente resistenza all'abrasione, non è pregiudicato dai raggi UV e non richiede cautele speciali per lo stoccaggio, il trasporto, la manipolazione e il fissaggio.**

3 In base ad una ipotesi precauzionale, le armature zincate hanno una soglia di resistenza all'attacco di cloruri da 2 a 2,5 volte superiore rispetto a quella delle armature non rivestite: questa circostanza si traduce in tempi doppi perché si verifichi la depassivazione dell'acciaio zincato e perché il processo di corrosione abbia inizio. Tipicamente, le armature zincate **augmentano la durata di vita di una struttura in calcestruzzo armato di 4 - 5 volte.**

4 Il lasso di tempo perché **inizi la corrosione dell'acciaio delle armature zincate nel calcestruzzo può essere calcolato** utilizzando modelli convenzionali di diffusione del cloruro basati sulla Seconda Legge di Fick.

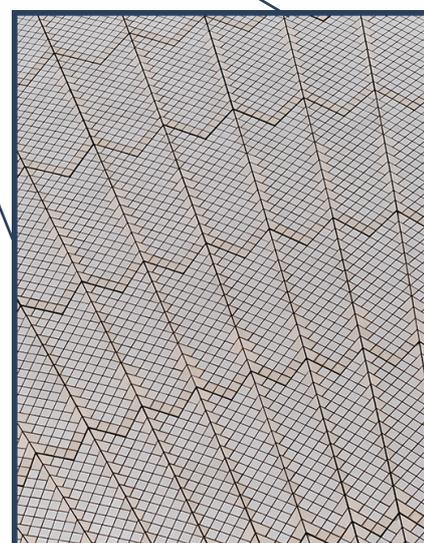
5 La condizione di passivazione delle armature zincate rende tali armature idonee all'uso in ambienti aggressivi ed ideali per facciate esterne, giunti di pannelli prefabbricati ed elementi di superficie. In effetti il loro impiego diventa opportuno **in qualsiasi applicazione in cui la carbonatazione o l'ingresso di cloruri siano possibili.**



9 Le armature zincate **non comportano i costi di collaudo, esercizio e manutenzione** associati ai sistemi di protezione catodica.

11 Il processo di zincatura **non ha effetti significativi sulle proprietà meccaniche delle armature** e tutti i gradi disponibili di acciaio possono essere zincati a caldo con successo.

12 La zincatura è un'opzione sostenibile. È disponibile una dichiarazione ambientale di prodotto (EPD) per l'acciaio zincato. Al termine della durata di vita utile della struttura, qualsiasi porzione di rivestimento di zinco residua può essere riciclata insieme all'acciaio. Il ridotto impatto ambientale relativo al processo di zincatura è compensato dagli enormi risparmi di CO₂ associati alla maggiore durata di vita della struttura in cemento armato costruita con armature in acciaio zincato.



Gli elementi componenti le volte in cemento armato del tetto dell'Opera di Sydney sono stati realizzati con armature in acciaio zincato a caldo.

Fonti

American Galvanizers Association, Armature in Acciaio Zincato a Caldo: una guida per i progettisti, AGA, Centennial, CO, USA, 2012.

Concrete Institute of Australia, L'uso delle armature zincate a caldo nel calcestruzzo, Nota di pratica corrente 17, 2008, Concrete Institute of Australia, Sydney.

Concrete Institute of Australia (2014), "Serie sulla durabilità del calcestruzzo: Z7/O5 Modellazione della Durabilità", Sydney.

Concrete Institute of Australia (2018), "Serie sulla durabilità del calcestruzzo: Z7/O2 Classificazioni Durabilità e Classi di Esposizione", Sydney.

ILZRO, Armature in Acciaio Zincato per Calcestruzzo - II, 1981, International Lead Zinc Research Organisation, NC, USA

Mariusz Jaśniok, Maria Sozańska, Jacek Kołodziej e Bartosz Chmiela, "Una valutazione, su un periodo di due anni, dei danni indotti dalla corrosione alle armature in acciaio zincato a caldo B500SP in calcestruzzo contaminato da cloruri" 2020

NACE International, "Misure internazionali di Prevenzione, Utilizzo ed Economia della Tecnologia di Corrosione (IMPACT)" CONFERENZA SULLA CORROSIONE 2016, Vancouver, Canada

Tuutti, K. (1982) "Corrosione dell'acciaio nel calcestruzzo". Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm

Yeomans S R (a cura di), Armature in Acciaio Zincato nel Calcestruzzo, Elsevier UK, dicembre 2004, ISBN 008044511

Yeomans, S R (2004), "Capitolo 1 - Acciaio zincato nel calcestruzzo: una panoramica", in Yeomans, S R (ed.) Armature in Acciaio Zincato nel Calcestruzzo, Elsevier Science, pagg. 1-7.

Zhao Y, Jin W, Analisi dei danni e modello di fessurazione delle strutture in cemento armato con corrosione dell'acciaio da armatura nei casi di fessurazione del calcestruzzo dovuti alla corrosione dell'acciaio, 2016

Ringraziamenti

Crediti per le immagini

Copertina, pagine 1, 2, 9, 10:	New York Thruway Authority
Pagine 3, 4, 5, 7:	Galvanizers Association of Australia
Pagine 3, 4:	Shutterstock.com
Pagina 11:	stock.adobe.com

Si ringrazia la Galvanizers Association of Australia per la preziosa assistenza fornitaci per la preparazione di questo documento.

Per ulteriori informazioni riguardo alle armature zincate per calcestruzzo:

AIZ - Associazione Italiana Zincatura

Via Luigi Lilio, 62 - 00142 Roma

www.aiz.it
mail: info@aiz.it



European General Galvanizers Association

14-16 Reddicroft
B73 6AZ
United Kingdom

Boulevard du Souverain 68
1170 Brussels
Belgium

www.egga.com
mail: mail@egga.com

