



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE

TECHNICAL REPORT

Tondo zincato a caldo per l'edilizia

Alberto Franchi¹, Romeo Fratesi² e Giovanni A. Plizzari³

¹ *Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano*

² *Dipartimento di Scienze dei Materiali e della Terra, Univ. di Ancona*

³ *Dipartimento di Ingegneria Civile, Università' di Brescia*

1. INTRODUZIONE

I limiti di durabilità delle opere in calcestruzzo hanno determinato un notevole impulso alla ricerca, consentendo di raggiungere un adeguato livello nello sviluppo delle conoscenze sulle proprietà di questo materiale (Collepari, 1991). L'attuale livello di conoscenza raggiunto nella tecnologia del calcestruzzo, correttamente applicata, è tale da consentire la progettazione della vita media di una struttura in calcestruzzo armato.

Il maggior limite alla durabilità di tali strutture è attualmente costituito dalla corrosione delle armature. Nonostante anche questo aspetto sia ormai ampiamente studiato e documentato (Pedefferri, 1991; 1996), esso ancor oggi costituisce la forma sicuramente più insidiosa di danneggiamento strutturale che condiziona la durabilità di un'opera in calcestruzzo armato. Quando, poi, intervengono fattori che allungano i tempi di costruzione, con strutture non protette e materiali esposti per lungo tempo, allora la durabilità di una struttura può risultare compromessa anche in ambienti non particolarmente aggressivi.

Le condizioni necessarie per avere corrosione delle armature di acciaio nel calcestruzzo sono: la presenza di acqua e di ossigeno. Tuttavia queste due condizioni non sono sufficienti poichè l'acciaio, comunemente è allo stato passivo nell'ambiente alcalino generato dalla idratazione del cemento. Per avere corrosione occorrono quindi delle condizioni in grado di depassivare l'acciaio.

L'ingresso dell'anidride carbonica attraverso la porosità del calcestruzzo determina una reazione di neutralizzazione della calce presente come soluzione satura all'interno dei pori capillari. Questo fenomeno, noto come "carbonatazione", causa l'abbassamento dei valori di pH da 12.5-13 fino a valori intorno alla neutralità (7-8), cioè ben al di sotto della soglia (pH=11.5) che garantisce le condizioni di passività. In presenza di umidità sufficiente e di ossigeno, la corrosione dell'acciaio procede in modo generalizzato dando luogo a prodotti di corrosione espansivi che in tempi, anche relativamente brevi, possono portare al fenomeno di "spalling" con espulsione del copriferro di calcestruzzo.

In strutture esposte ad un'atmosfera marina o addirittura a contatto con acqua di mare potrebbe verificarsi l'ingresso dei cloruri nella matrice cementizia. Le condizioni di insorgenza dell'attacco sono collegate al tenore critico di cloruri che di solito, per i comuni cementi Portland, è intorno a 0.35-0.4% rispetto al peso di cemento. Per questo motivo la nuova norma sui cementi (UNI ENV 197/1) prescrive, fra i requisiti chimici dei cementi, il limite massimo per il contenuto in cloruro pari a 0.10%.

Il modello tradizionale che consente di predire la vita funzionale di un'armatura di acciaio nel calcestruzzo è basato sul meccanismo riportato in Fig. 1: la corrosione inizia a propagarsi dopo un periodo di incubazione, durante il quale avviene la rimozione delle condizioni di passività dell'armatura.

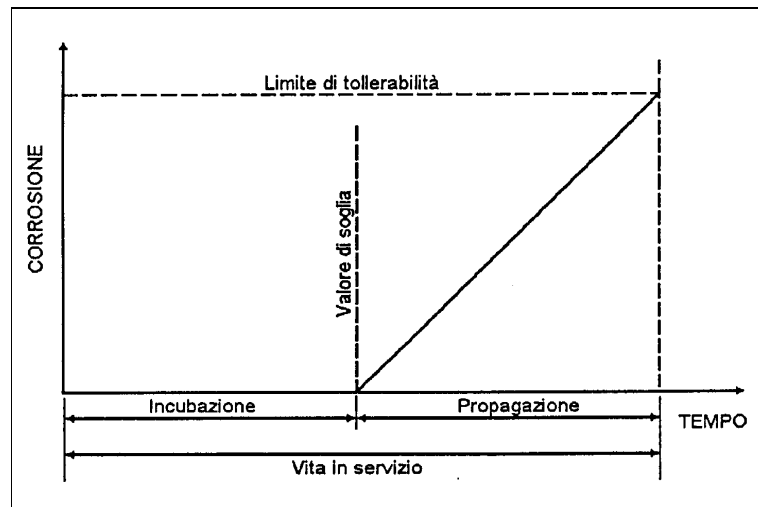


Fig. 1 : Modello per la corrosione delle armature in acciaio nel calcestruzzo (Yeomans, 1994a).

I vari metodi di prevenzione nei confronti della corrosione dell'armatura attualmente proposti per incrementare la durabilità di un'opera in calcestruzzo armato sono di due tipi:

- interventi sul calcestruzzo;
- interventi sull'armatura.

Fra i primi si possono indicare:

- l'aumento dello spessore del copriferro;
- l'incremento dell'impermeabilità del calcestruzzo agendo sul mix-design;
- l'utilizzo di inibitori di corrosione nel mix-design del calcestruzzo;
- l'impermeabilizzazione delle superfici del calcestruzzo.

Fra i secondi si possono indicare:

- l'utilizzo di materiali più resistenti alla corrosione, come l'acciaio inossidabile;
- la protezione catodica;
- il rivestimento protettivo delle barre di armatura o mediante zincatura dell'acciaio o mediante rivestimento con resine polimeriche.

Fra i possibili accorgimenti sopra ricordati per migliorare la resistenza alla corrosione delle armature nel calcestruzzo, recentemente è stato preso in maggior considerazione l'utilizzo di barre d'armatura zincate. Ciò è dovuto al loro costo moderato rispetto ad altri sistemi di

protezione preventiva ed al fatto che i rivestimenti delle barre a base di resine polimeriche hanno dato esiti anche molto negativi in presenza di calcestruzzo contaminato da cloruri (Segues, 1995).

2 MECCANISMO DI PROTEZIONE DELLA ZINCATURA

Il modello concettuale che descrive il meccanismo della corrosione delle armature di acciaio zincato nel calcestruzzo è rappresentato in Fig. 2: si può osservare come, rispetto al precedente modello, esista un'ulteriore fase, dopo il periodo di incubazione e prima della propagazione della corrosione, indicata come protezione, durante la quale il rivestimento di zinco, sacrificandosi, protegge l'acciaio sottostante fino alla completa dissoluzione dello zinco. L'azione benefica della zincatura si esplica, tuttavia, anche nella prima fase di incubazione, durante la quale le condizioni di passività dello zinco vengono mantenute anche a valori di pH inferiori a 11, campo in cui invece l'acciaio perde la capacità di passivarsi.

Non esistono attualmente dati certi sulla concentrazione critica di cloruri all'interfaccia fra armatura zincata e calcestruzzo capace di dare origine a corrosione, poichè questo valore dipende da fattori difficilmente standardizzabili, come la microstruttura del calcestruzzo, la sua alcalinità, l'equilibrio termo-igrometrico fra calcestruzzo e ambiente. Tuttavia, prove sperimentali condotte nelle stesse condizioni ambientali indicano che tale concentrazione di soglia in cloruri risulta circa 3 volte superiore a quella che provoca l'innescò della corrosione sulle armature di acciaio non zincato (Yeomans, 1994b).

La zincatura, quindi, ritarda l'innescò della corrosione semplicemente perché, a parità di microstruttura e di spessore del copriferro, è necessario un tempo maggiore per raggiungere un livello più elevato di ioni cloruro all'interfaccia fra armatura e calcestruzzo. Il periodo successivo alla distruzione del film passivo causata dai cloruri è quello in cui lo zinco, pur corrodendosi in modo attivo, esplica la sua funzione protettiva nei confronti dell'acciaio sottostante. E' importante notare come in questo periodo, contrariamente a quanto accade alle armature di acciaio non rivestito, i prodotti di corrosione dello zinco non provochino danneggiamenti meccanici al calcestruzzo circostante, non essendo tali prodotti espansivi, ma sigillando i pori ed eventuali microfessurazioni nell'intorno dell'armatura, addirittura rallentino la velocità di corrosione. Inoltre, durante questo periodo, lo zinco esercita anche una

protezione catodica sull'acciaio che viene progressivamente scoperto dalla graduale corrosione del rivestimento.

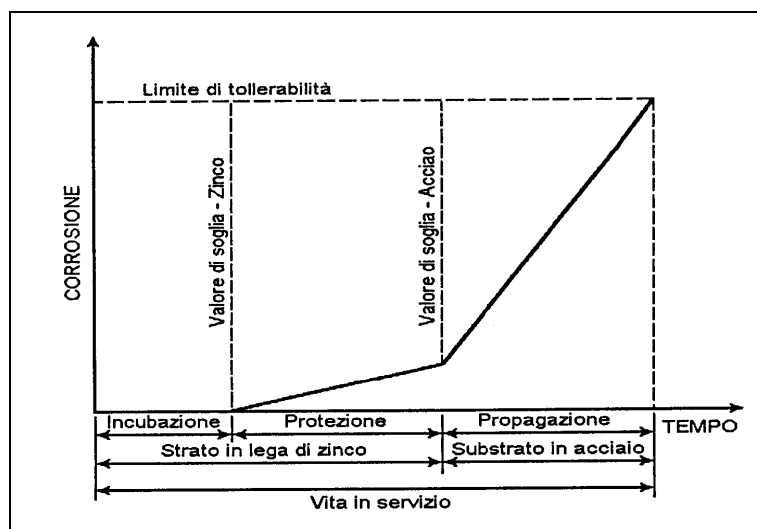


Fig. 2: Modello proposto per la corrosione delle armature in acciaio zincato nel calcestruzzo (Yeomans, 1994a).

Confrontando le Figg. 1 e 2 si può osservare come la zincatura delle armature si traduca in un allungamento della vita di una struttura, e quindi come in definitiva contribuisca all'aumento della durabilità del calcestruzzo armato. Il modello esposto è ampiamente accettato dalla letteratura internazionale sulla base della effettiva maggiore resistenza alla corrosione dell'acciaio zincato rispetto al comune acciaio in presenza di carbonatazione e/o di cloruri nel calcestruzzo (Swamy, 1990).

Riguardo al fenomeno della carbonatazione si può affermare con certezza che, al contrario delle armature non ricoperte, le armature zincate non risentono affatto dell'abbassamento del pH della pasta cementizia poichè lo zinco rimane allo stato passivo anche a valori di pH raggiunti da un calcestruzzo carbonatato. Su questo argomento non esistono contraddizioni poichè tutti i risultati sperimentali e di campo evidenziano il buon comportamento delle armature zincate in presenza di carbonatazione.

Con riferimento ai cloruri, dai risultati sperimentali si evidenzia che il rivestimento di zinco offre buoni risultati fino a concentrazioni di circa 1.2-1.5% rispetto al peso di cemento (CEB, 1992).

La zincatura costituisce, senza dubbio, un mezzo per incrementare la durata dell'armatura e allontanare l'inizio di un'aggressione significativa; è tuttavia ancora difficile quantificare a priori con precisione l'allungamento della vita di servizio di una struttura in calcestruzzo

armato protetta mediante zincatura. Sicuramente, per quanto detto in precedenza, l'allungamento della vita sarà elevatissimo se le cause dell'aggressione possono imputarsi a carbonatazione, mentre stime più imprecise riguardano la contaminazione da cloruri.

Numerosi studi in ambito internazionale consentono di proporre dei confronti significativi rispetto alla durabilità delle barre di acciaio non rivestito nei confronti della corrosione. Particolare importanza, a questo proposito, rivestono i risultati di un programma di indagine svolto negli anni '70 da parte di alcuni enti di ricerca statunitensi per determinare il comportamento dell'armatura zincata in solette e strutture portanti di ponti e moli esposti all'azione aggressiva dell'acqua di mare delle Bermuda. Le conclusioni di tale indagine furono particolarmente positive: anche per le strutture più vecchie (oltre 23 anni al momento del controllo) lo spessore medio del rivestimento zincato era presente per più del 90% di quello originario (Stark, 1978; Tab.1). Questo portò ad ipotizzare una durata ulteriore del rivestimento di circa 80 anni prima dell'innesco della corrosione dell'acciaio. Altri risultati di esperienze pratiche, molte delle quali attinte da strutture reali in USA, Australia ed Europa, sono riportati nel Bolletino 211 del CEB (1992).

Da dette esperienze e da dati reperibili dalla bibliografia specializzata si possono trarre le seguenti conclusioni:

le barre di acciaio zincato sono particolarmente idonee come armature in calcestruzzi soggetti al fenomeno della carbonatazione, in questo caso l'incremento di durabilità può superare tranquillamente i 50-70 anni;

le armature zincate tollerano concentrazioni di ioni cloruro assai più elevate di quelle delle barre di acciaio (fino a 3-4 volte), la durabilità in questo caso dipende e dalla velocità con cui si raggiungono concentrazioni critiche di cloruri sull'armatura e dallo spessore dello strato di zincatura;

in strutture esposte all'atmosfera marina il degrado del copriferro è fortemente ritardato con l'uso dell'acciaio zincato.

Campione	Età [anni]	Contenuto di ioni Cl ⁻ nel calcestruzzo [Kg/m ³]	Spessore medio di corrosione [mm]	Rivestimento rimasto [%]
St. George	7	2.96	0.1	98
Bermuda Yacht Club	8	3.62	--	100
Hamilton	10	1.89	0.2	95
Hamilton	10	3.56	0.3	96
St. George	10	4.57	0.2	99
St. George	12	6.35	0.5	92
Longbird	23	4.33	0.2	98

Tab.1: Risultati di un programma di indagine svolto negli anni '70 in solette di ponti esposti all'azione aggressiva dell'acqua marina delle Bermuda (Stark, 1978).

Come precedentemente evidenziato, essendo il potenziale dello zinco più basso di quello dell'acciaio, il rivestimento diventa l'anodo sacrificale; di conseguenza, qualora si verificasse un danneggiamento locale del rivestimento, i prodotti della corrosione (dello zinco) si depositerebbero nella zona danneggiata proteggendo l'acciaio sottostante con l'arresto del processo corrosivo (Yeomans, 1994b). Questo effetto favorevole non si verifica con l'uso della resina epossidica che non reagisce con l'acciaio, o con l'uso di metalli più elettropositivi dell'acciaio che diventerebbero catodici nei confronti dello stesso (Fig. 3). Per questo motivo, le superfici scoperte da semplici microfessure originate in fase di piega o in fase di saldatura non sono considerate pericolose ai fini della resistenza alla corrosione, poichè di dimensioni ridotte rispetto all'intera area zincata (CEB, 1992). Quando le superfici scoperte sono invece dell'ordine dei cm², è consigliabile riprendere le zone scoperte con vernici zincanti oggi comunemente reperibili sul mercato.

Tutti i tipi di acciaio sono idonei alla zincatura, ad esclusione di quelli con un contenuto critico di silicio. Tuttavia da prove sperimentali di zincatura a caldo è stato osservato che le barre di acciaio prodotte con il metodo Tempcore si prestano meglio ad essere zincate; infatti, la parte centrale delle barre ha una microstruttura ferritico-perlitica interna, mentre la parte perimetrale ha una microstruttura costituita da martensite rinvenuta la quale, oltre a conferire maggiore resistenza meccanica, risulta meno reattiva nei confronti dello zinco puro, con conseguente minore sviluppo di composti intermetallici interfacciali che contribuiscono alla fragilità del rivestimento.

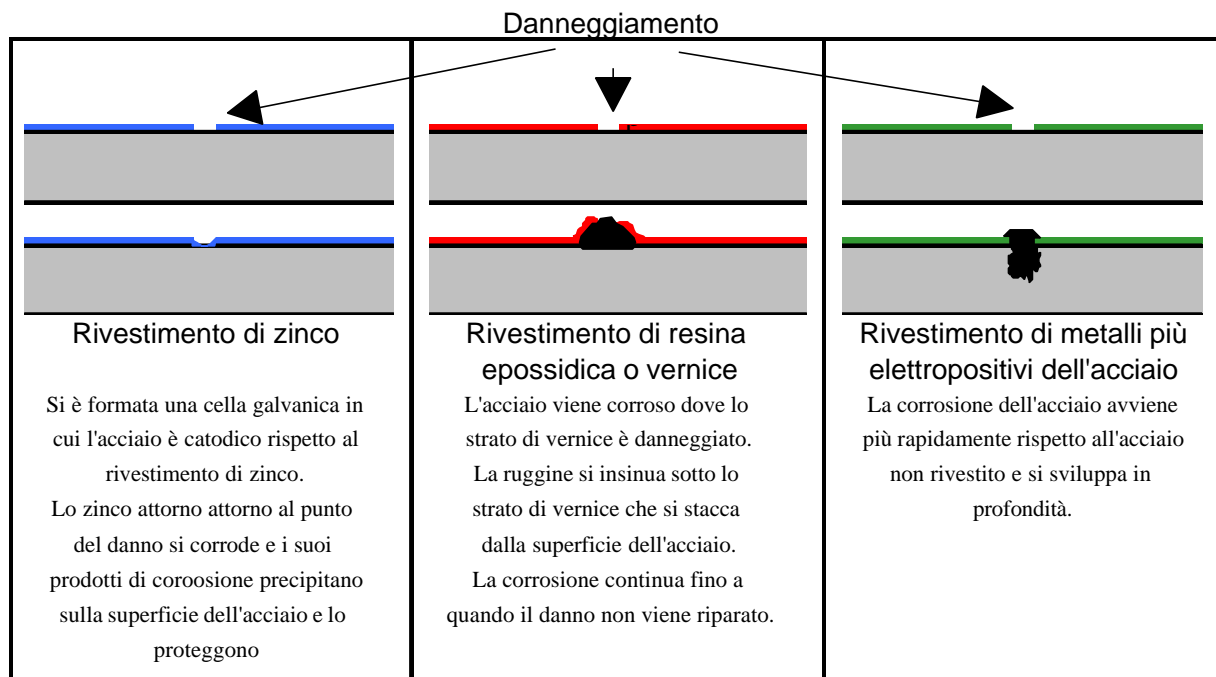


Fig. 3: *Illustrazione schematica delle conseguenze del danno in diversi tipi di rivestimento che prevengono la formazione della ruggine (Di Casola, 1995).*

Nonostante i buoni risultati pratici riportati nella letteratura tecnica relativa all'utilizzazione dell'acciaio zincato in strutture reali, esistono delle perplessità per un impiego estensivo di tale materiale dovute soprattutto alla tecnologia di applicazione della zincatura. Fra le argomentazioni che vengono addotte a sfavore delle armature zincate spesso si parla:

- di diminuzione della resistenza meccanica dell'acciaio dovuta al trattamento termico subito dallo stesso durante il processo di zincatura
- di perdita di aderenza fra barre zincate e calcestruzzo rispetto alle barre non trattate, causata dalla presenza del rivestimento e dalla possibile variazione della geometria delle nervature.

Si ritiene pertanto utile che tale prodotto venga controllato rispetto a tali parametri anche dopo la zincatura.

Nel seguito si riportano i risultati di prove di trazione diretta, di fatica, di piegatura e di aderenza su tondi di acciaio zincato con impianto in semicontinuo dalla Società Galvarebar. Il processo di zincatura prevede l'immersione automatizzata delle barre in un bagno di zinco fuso alla temperatura di 460°C per circa 90 secondi. Il processo prevede la rimozione dello zinco in eccesso dalla superficie della barra.

L'acciaio ad aderenza migliorata, utilizzato per la zincatura, è Tempcore B500 laminato a caldo.

3 RESISTENZA A TRAZIONE

Una leggera modificazione delle caratteristiche meccaniche non si può escludere per quelle barre che rimangono per diversi minuti nel bagno di zinco fuso, comunque, da prove effettuate in Germania e in Australia, sull'acciaio tipo Tempcore non sono state trovate variazioni (CEB, 1992). Comunque, se leggere variazioni delle caratteristiche meccaniche potrebbero verificarsi, esse avranno luogo nel caso della zincatura delle barre in fasci o di gabbie preformate e non nella zincatura da impianto in semicontinuo, dal momento che il tempo di immersione delle barre in quest'ultimo caso è al massimo di 90 secondi. Le prove di trazione effettuate in diversi laboratori su barre di acciaio Tempcore zincate in quest'ultimo modo, non hanno evidenziato variazioni significative dei parametri meccanici caratteristici dell'acciaio (Luminari et al., 1997). In Tabella 2 sono riportati i risultati di alcune prove di trazione su barre Galvarebar, effettuate presso l'Università di Ancona ed i laboratori della Società Autostrade S.p.A.

Laboratorio	Diam. Nom. [mm]	Zincatura	Tens. Snerv. [MPa]	Tens. Rott. [MPa]	Allung. a rott. (%)
Autostrade S.p.A.	10	NO	555	669	18.1
	10	SI	586	670	18.9
	16	NO	593	679	22.8
	16	SI	587	641	21.7
Università Ancona	12	NO	551	641	20.0
	12	SI	548	645	20.3
	20	NO	560	657	21.2
	20	SI	566	650	19.8

Tab.2: Risultati delle prove di trazione su barre di acciaio Tempcore ad aderenza migliorata.

Prove di trazione su barre Galvarebar sono state effettuate anche presso il laboratorio P.Pisa del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Brescia. Le prove hanno riguardato sia barre zincate che barre non zincate, del diametro di 10, 12, 16, 20 e 24 mm; le barre con lo stesso diametro erano tutte provenienti dalla stessa colata.

Per la misura degli allungamenti sono stati utilizzati quattro trasduttori di spostamento induttivi con una precisione di 1 μm , nel rispetto della normativa che prevede che l'estensimetro debba permettere determinazioni a meno di 0.05% della lunghezza di base. I cinque supporti sono stati posizionati in maniera simmetrica a partire dalla mezzeria della barra, a 80 mm di distanza uno dall'altro, in tale modo si sono individuati quattro tratti che ricoprono una lunghezza totale di 320 mm (Fig. 4). Questa scelta è accettabile, secondo la norma ISO/DIS 10606, se l'allungamento percentuale sotto carico massimo (A_{gt}) è maggiore di 5. I supporti sono stati fissati alla barra tramite un intaglio lungo la nervatura longitudinale della barra, realizzato con seghetto per ferro. La barra è fissata nei morsetti della Instron 1274 per una lunghezza di 100 mm. Le barre avevano una lunghezza totale imposta dalla normativa, per la quale la distanza netta tra gli afferraggi non deve essere inferiore a $(15d+2L)$, avendo indicato con d il diametro della barra e con L la lunghezza della zona in cui viene misurata la deformazione dopo la rottura. Tale lunghezza è stata scelta pari a 160 mm, in accordo con la normativa francese NF A 03-162, avendo presupposto che l' A_{gt} sia superiore a 5.

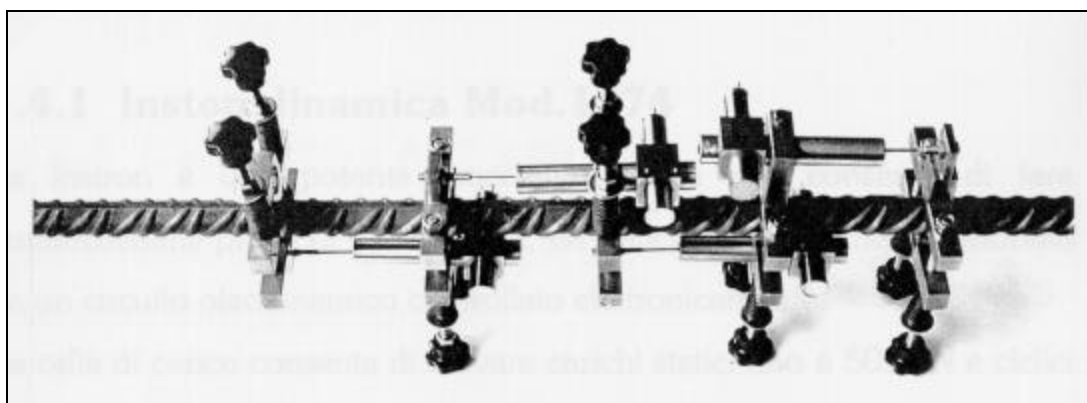


Fig. 4: Barra strumentata per la prova di trazione.

Le prove hanno fornito il diagramma completo sforzi-deformazioni ed hanno consentito di determinare il valore dell'allungamento totale percentuale sotto carico massimo, valutato come:

$$A_{gt} = \frac{\Delta L_{\max}}{L} * 100$$

dove: ΔL_{\max} è l'allungamento del tratto considerato sotto carico massimo;

L è la lunghezza iniziale del tratto considerato (160 mm).

I diagrammi sforzo-deformazione sono raccolti nelle Figg. 5-9, dalle quali si evince come la zincatura Galvarebar non modifichi le caratteristiche meccaniche dell'acciaio ad aderenza migliorata Tempcore, sul quale è applicato il rivestimento di zinco.

Infatti, le piccole differenze di tensione di snervamento rilevata dalle barre con diametro di 10 mm (Fig. 5) e di 12 mm (Fig. 6), rientrano nella normale dispersione dei risultati sperimentali che si rileva nelle prove di trazione. La tensione di snervamento rimane comunque superiore al minimo richiesto dalla Normativa Italiana per l'acciaio FeB44k (M.LL.PP., 1996). La tensione di snervamento delle armature zincate con diametro di 16, 20 e 24 mm risultano quasi coincidenti con i valori delle corrispondenti barre non zincate (Figg. 7-9).

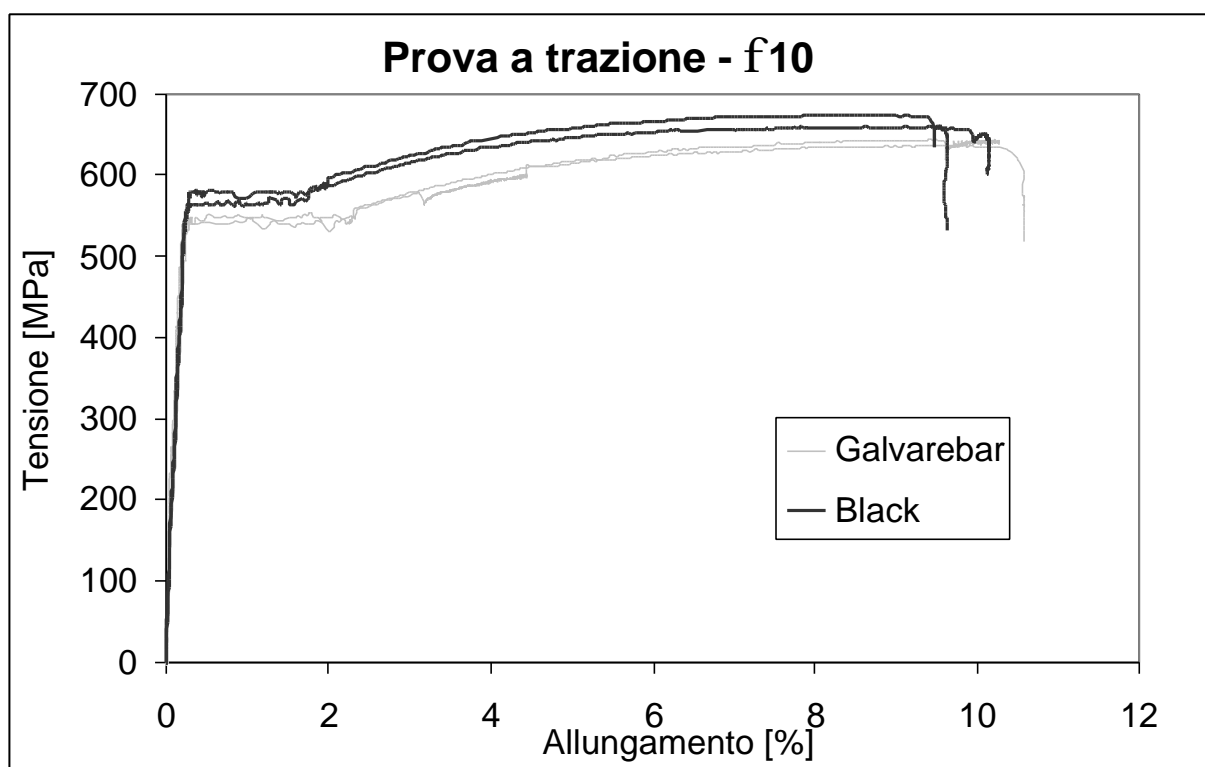


Fig. 5: Diagramma sforzo-deformazione relativo alla prove di trazione sulla barra f10.

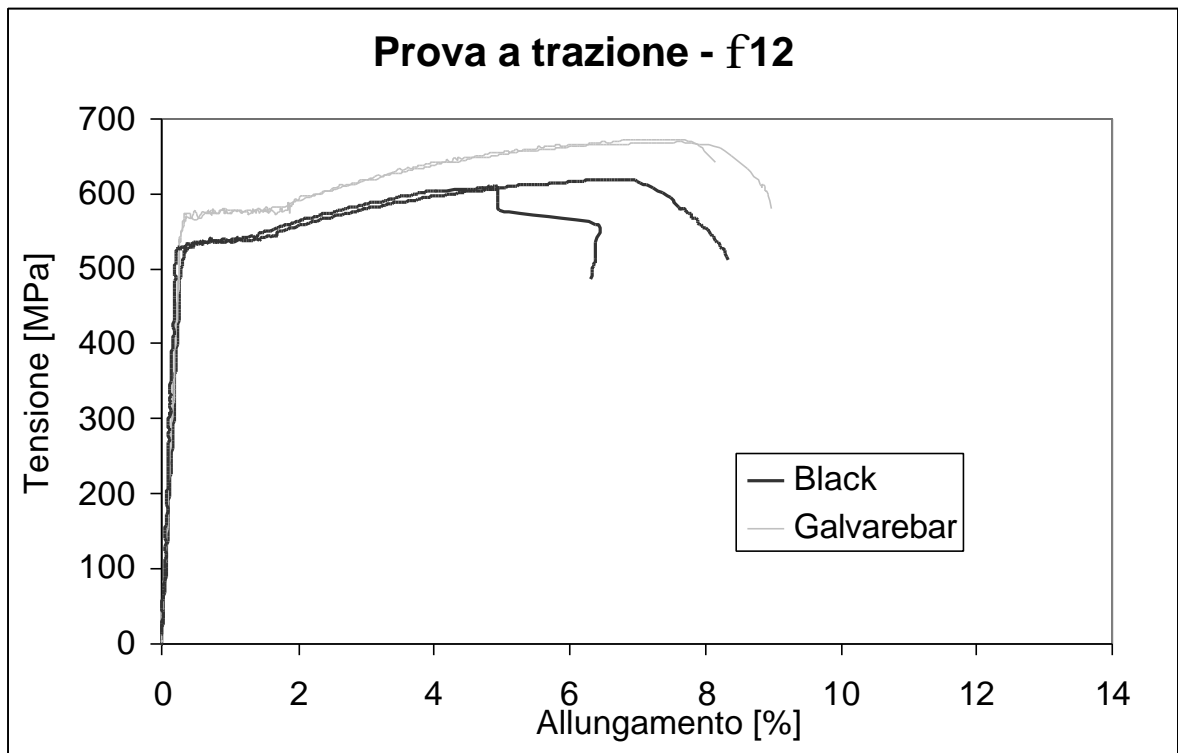


Fig. 6: Diagramma sforzo-deformazione relativo alla prove di trazione sulla barra f12.

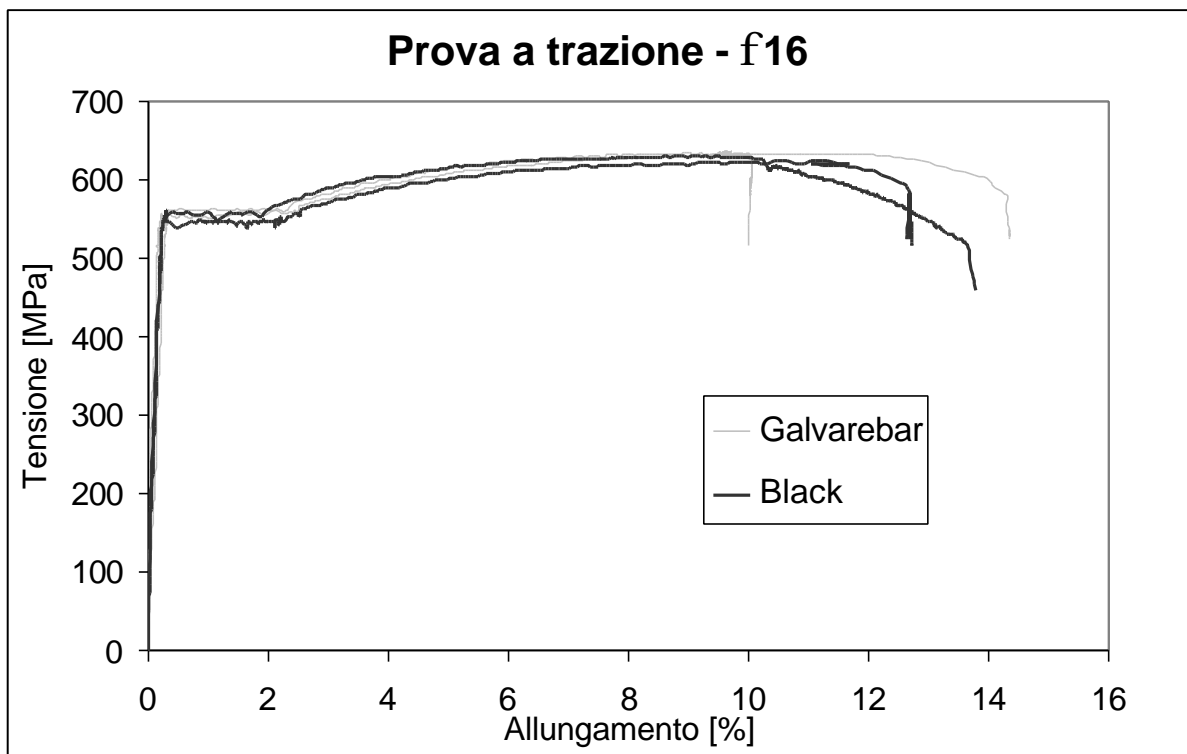


Fig. 7: Diagramma sforzo-deformazione relativo alla prove di trazione sulla barra f16.

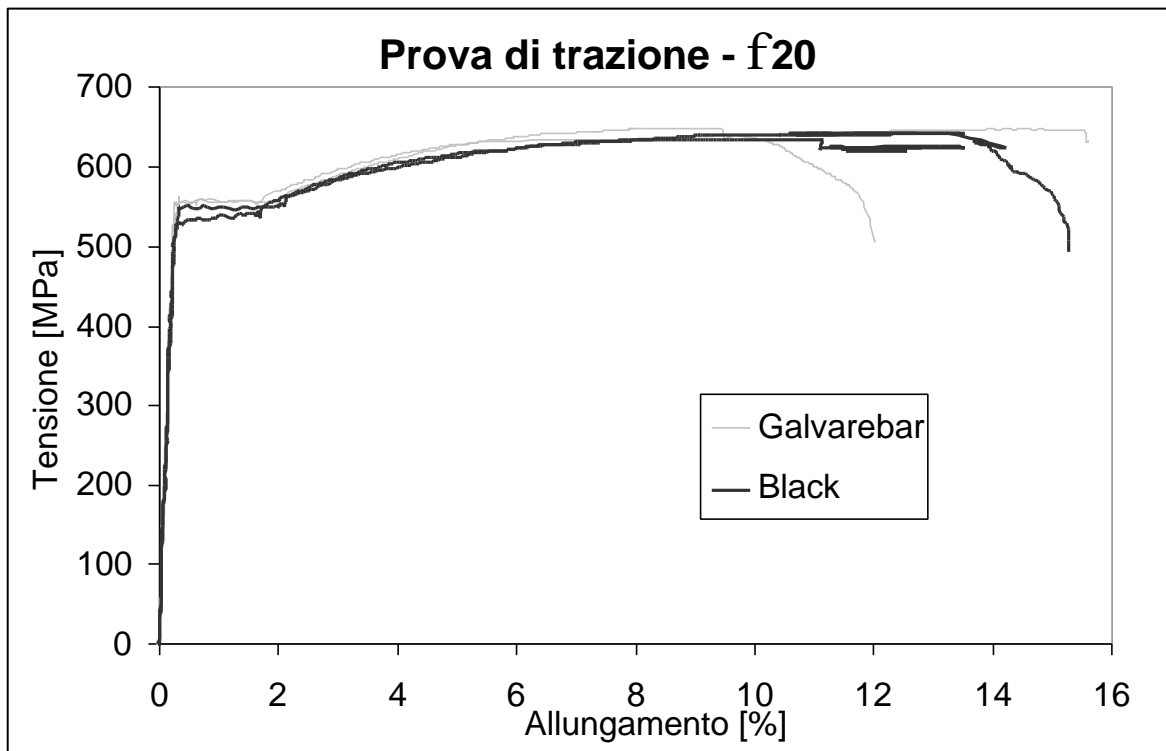


Fig. 8: Diagramma sforzo-deformazione relativo alla prove di trazione sulla barra f20.

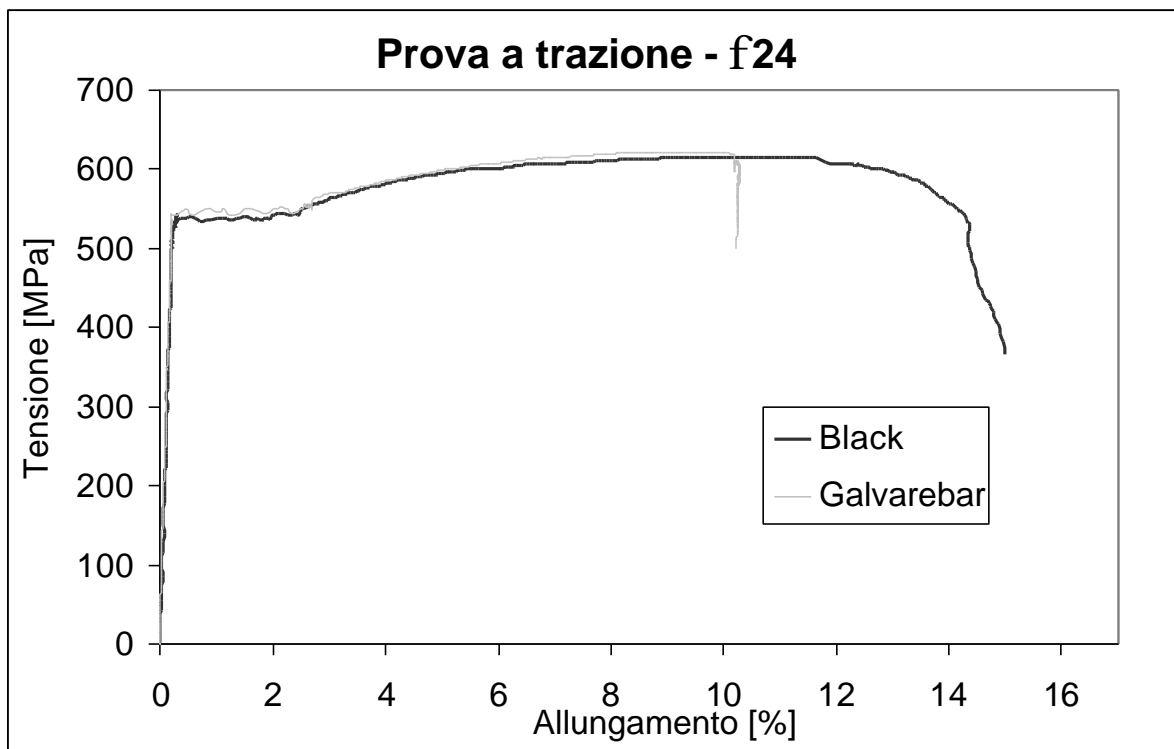


Fig. 9: Diagramma sforzo-deformazione relativo alla prove di trazione sulla barra f24.

4 RESISTENZA A FATICA

Per la verifica della resistenza a fatica si è utilizzata come normativa di riferimento la ENV 10080 (1995), che prevede che il provino, sottoposto a trazione, debba sopportare almeno 2 milioni di cicli, con ampiezza di sollecitazione pari al 36% della tensione nominale di snervamento nominale, e con sollecitazione massima non superiore al 60% della tensione di snervamento.

Le prove sono state condotte su barre zincate con metodologia Galvarebar con diametro di 12 mm, superando i 10 milioni di cicli senza rottura, e su barre di 16 mm, raggiungendo gli 8 milioni di cicli anche in questo caso senza rottura.

5 PIEGATURA

Le lavorazioni delle barre zincate per formare gabbie d'armatura come ad esempio il taglio, la piegatura e la saldatura, possono creare delle discontinuità nel rivestimento, a causa della sua grande fragilità, e quindi scoprire l'acciaio sottostante. Le discontinuità derivanti dalla piegatura potrebbero essere evitate utilizzando barre zincate che abbiano l'opportuno rivestimento di zinco. Le Fig. 10 e 11 mostrano due barre del diametro di 16 mm, piegate con lo stesso mandrino da 50 mm, una zincata in modo tradizionale (immersione in un bagno di zinco per 5 min; Fig. 10) e l'altra con metodologia Galvarebar (Fig. 11). Il mandrino da 50 mm, di diametro inferiore al minimo richiesto dalla normativa (M.LL.PP., 1996), è stato utilizzato per verificare il comportamento della barra nelle condizioni molto sfavorevoli che potrebbero verificarsi in cantiere. Le figure mostrano chiaramente che la barra Galvarebar, al contrario della barra zincata in modo tradizionale, non evidenzia alcun danneggiamento superficiale.



Fig. 10: Particolare di una barra zincata con tecnologia di zincatura non controllata, piegata con un mandrino di 50 mm.

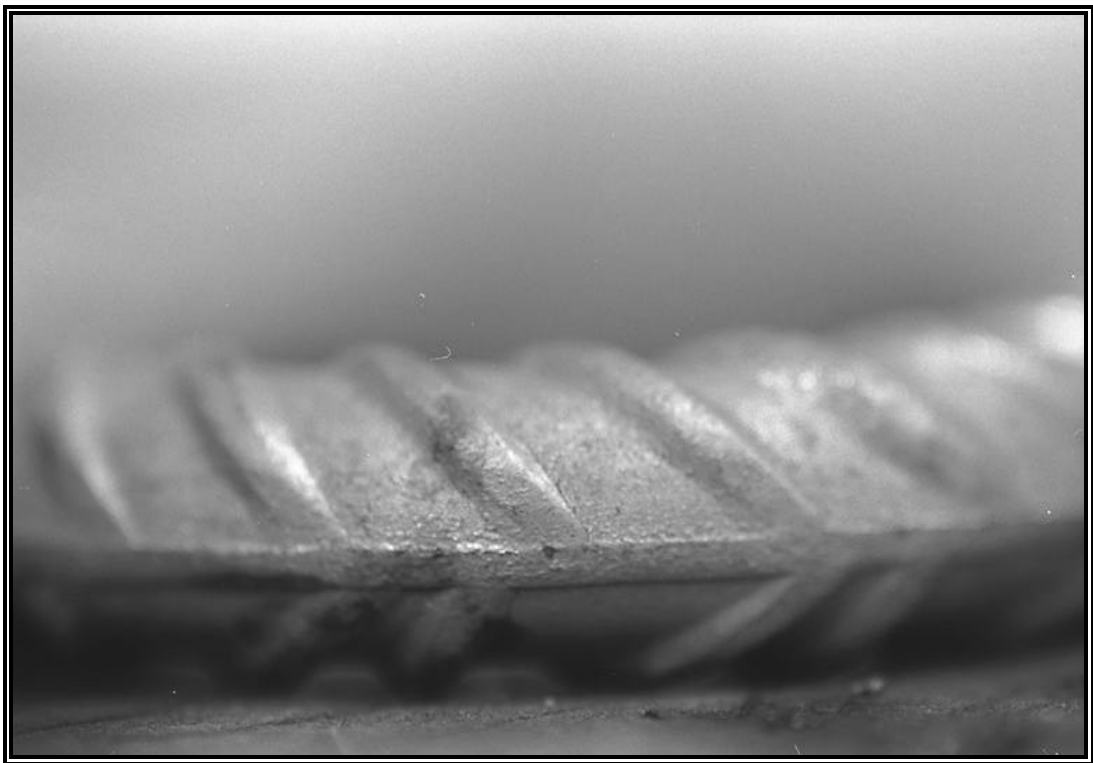


Fig. 11: Particolare di una barra zincata con tecnologia di zincatura controllata piegata con un mandrino di 50 mm.

6 ADERENZA

Una buona aderenza tra l'armatura ed il calcestruzzo è essenziale nelle strutture di calcestruzzo armato. Nel caso di armature zincate, nonostante esistano delle opinioni discordanti, la valutazione dei dati riportati già da tempo in bibliografia porta a concludere che, per barre lisce, le tensioni di aderenza sull'acciaio zincato variano e possono diventare fino al 50% superiori rispetto a barre simili non zincate (Lewis, 1962; Bresler, 1964). Infatti, l'aderenza tra una barra liscia è dovuta soprattutto ad un'interazione chimico fisica fra materiale metallico e pasta cementizia.

L'aderenza di una barra nervata è soprattutto dovuta all'interazione meccanica tra le nervature ed il calcestruzzo circostante. Durante il processo di zincatura, si potrebbe verificare la possibilità che, nella fase di emersione dal bagno, parte del materiale di ricoprimento si depositi, per coesione, fra le nervature diminuendone l'altezza e, conseguentemente, l'indice di aderenza (I_R ; M.LL.PP., 1996). Per confrontare l'aderenza delle barre zincate Galvarebar con quelle non trattate, sono state eseguite sia Beam-Tests, previsti dalla CNR UNI 10020 (1971), che prove di estrazione.

Tutti i getti sono stati realizzati utilizzando la miscela di calcestruzzo richiesta dalla normativa CNR-UNI 10020 (1971) per il Beam Test che, per ogni metro cubo di calcestruzzo, prevede l'utilizzo di 250 kg di cemento CE 42,5 R, 165 litri d'acqua e 1960 kg di aggregati.

6.2 Beam Test su barre ad aderenza migliorata

Le prove di aderenza col Beam Test sono state condotte sia su barre zincate Galvarebar, passivate e non, con diametro di 12, 16 e 24 mm; le barre con lo stesso diametro (zincate e non) erano tutte provenienti dalla stessa colata. L'armatura integrativa del provino era costituita da acciaio non zincato.

Un tipico diagramma dello sforzo di aderenza medio (τ_d , ipotizzato uniformemente distribuito lungo il tratto ancorato) in funzione dello scorrimento dell'estremo libero, ottenuto da una prova su una barra con diametro di 24 mm, è mostrato in Fig. 11. Si può notare che non esistono sostanziali differenze tra le barre zincate, quelle non trattate e le zincate passivate. Lo stesso comportamento è stato osservato dalle prove su barre con diametro di 12 e 16 mm.

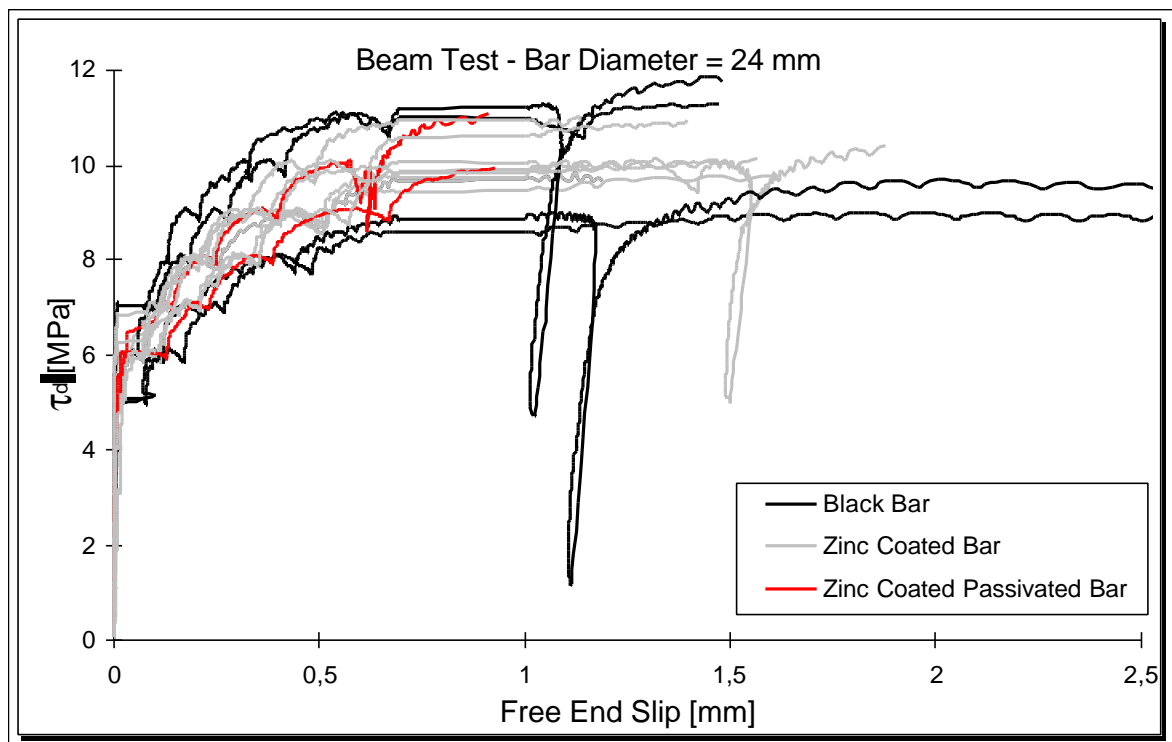


Fig. 12: Diagramma dello sforzo di aderenza (τ_d) in funzione dello scorrimento dell'estremo libero della barra.

La CNR UNI 10020 (1971) richiede di rapportare la tensione di aderenza ad una resistenza nominale del calcestruzzo di 27 MPa. Nel diagramma di Fig. 13 sono rappresentati i valori dello sforzo di aderenza medio in funzione del diametro della barra, relativo a tutti i provini testati. La normativa indica con t_m la media delle tensioni di aderenza corrispondenti a scorrimenti di 0.01, 0.1 e 1 mm dell'estremo libero della barra. Nella stessa figura sono riportati, per i diversi diametri della barra, i valori minimi richiesti dalla normativa. Si può notare come i risultati sperimentali ottenuti dalle barre zincate siano vicini ai valori ottenuti dalle barre non ricoperte, e come tutti i valori siano superiori ai valori minimi richiesti dalla normativa.

La Normativa Italiana (M.LL.PP., 1996) prevede anche la verifica della geometria delle nervature attraverso la determinazione dell'Indice di Aderenza (I_R); tale indice, che influenza notevolmente l'aderenza di una barra nervata, diventa ancor più significativo nel caso di acciaio zincato in quanto, come precedentemente evidenziato, il processo di zincatura potrebbe modificare la geometria delle nervature e ridurre l'indice di aderenza.

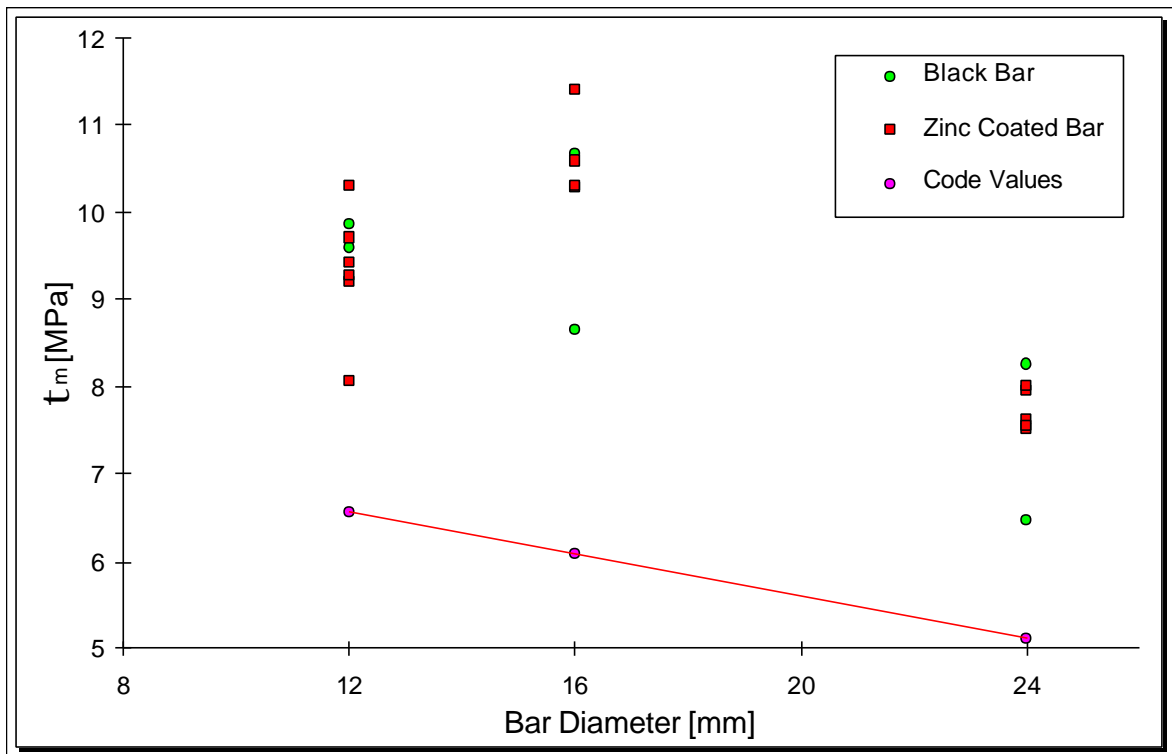


Fig. 13: Diagramma riassuntivo della resistenza media t_m .

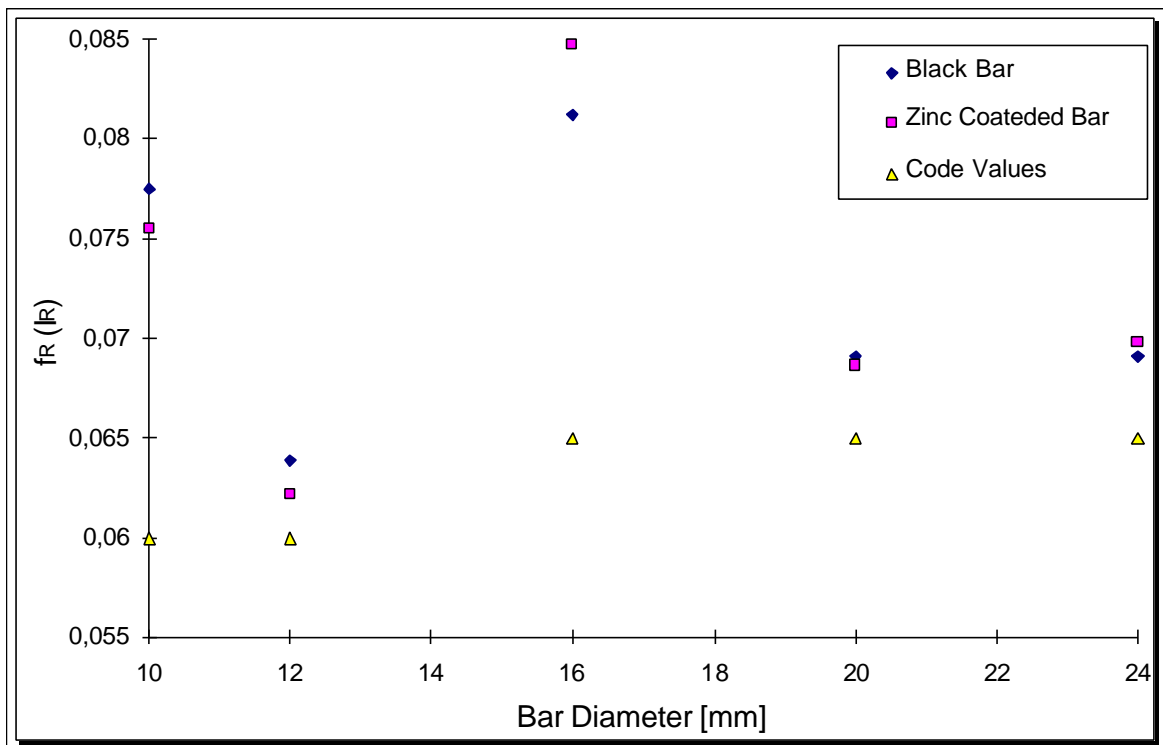


Fig. 14: Diagramma dei valori dell' I_R in funzione del diametro della barra.

Nel diagramma di Fig. 14 vengono rappresentati il valore dell'indice di aderenza in funzione del diametro della barra misurato su barre di diverso diametro zincate e non. Si può notare che il valore dell'indice di aderenza misurato sulle diverse barre zincate Galvarebar è molto simile a quello misurato sulle barre non zincate, tant'è che la differenza tra le due rientra nella normale variazione che si verifica tra i diversi punti di una stessa barra. E' evidente, anche in questo caso, come tutti i valori siano risultati superiori ai minimi imposti dalla Normativa Italiana.

6.2 Prove di estrazione

Il comportamento strutturale degli ancoraggi è fortemente influenzato dalla spinta radiale delle nervature e dall'azione di contenimento presente lungo la barra (Giuriani et al., 1991). Il trattamento di zincatura a caldo, cambiando sia morfologicamente che chimicamente la barra, può influenzare tale forza radiale e la formazione di fessura da spacco longitudinali.

Il Beam-Test prevede l'utilizzo di provini di trave con armatura trasversale molto superiore a quella normalmente usata nella pratica progettuale, necessaria ad evitare il collasso per taglio prima del collasso per aderenza. Allo scopo di simulare una situazione più vicina alla realtà, studiando il comportamento di una barra nella zona d'influenza di una singola staffa (Fig. 15), sono state effettuate prove di estrazione a contenimento controllato (Plizzari e Franchi, 1996)

Le prove di estrazione sono spesso influenzate dall'azione di contenimento che si ottiene per l'attrito fra la superficie di testa dei provini e le piastre di contrasto che, al contrario dell'azione di contenimento dovuta all'armatura trasversale ed al calcestruzzo, è legata solamente alla prova sperimentale e non è presente in barra ancorata in una struttura reale. Per evitare il disturbo dovuto all'attrito fra la superficie di testa dei provini e le piastre di contrasto, non presente in barra ancorata in una struttura reale, le prove sono state eseguite utilizzando il banco realizzato da Plizzari, Deldossi e Massimo (1998) che consente la libera apertura della fessura da spacco principale, attraverso un contrasto costituito da due piastre separate lungo il piano della fessura stessa (Fig. 15). Tali piastre, dallo spessore di 60 mm, sono collegate ai contrasti superiori per mezzo di barre in acciaio bullonate che, comportandosi come bielle, non esercitano alcuna azione di contenimento sul provino. Tale sistema garantisce l'esclusiva dipendenza dell'aderenza dal contenimento delle staffe, dal calcestruzzo e da una eventuale pressione esterna, escludendo qualsiasi altra azione non valutabile.

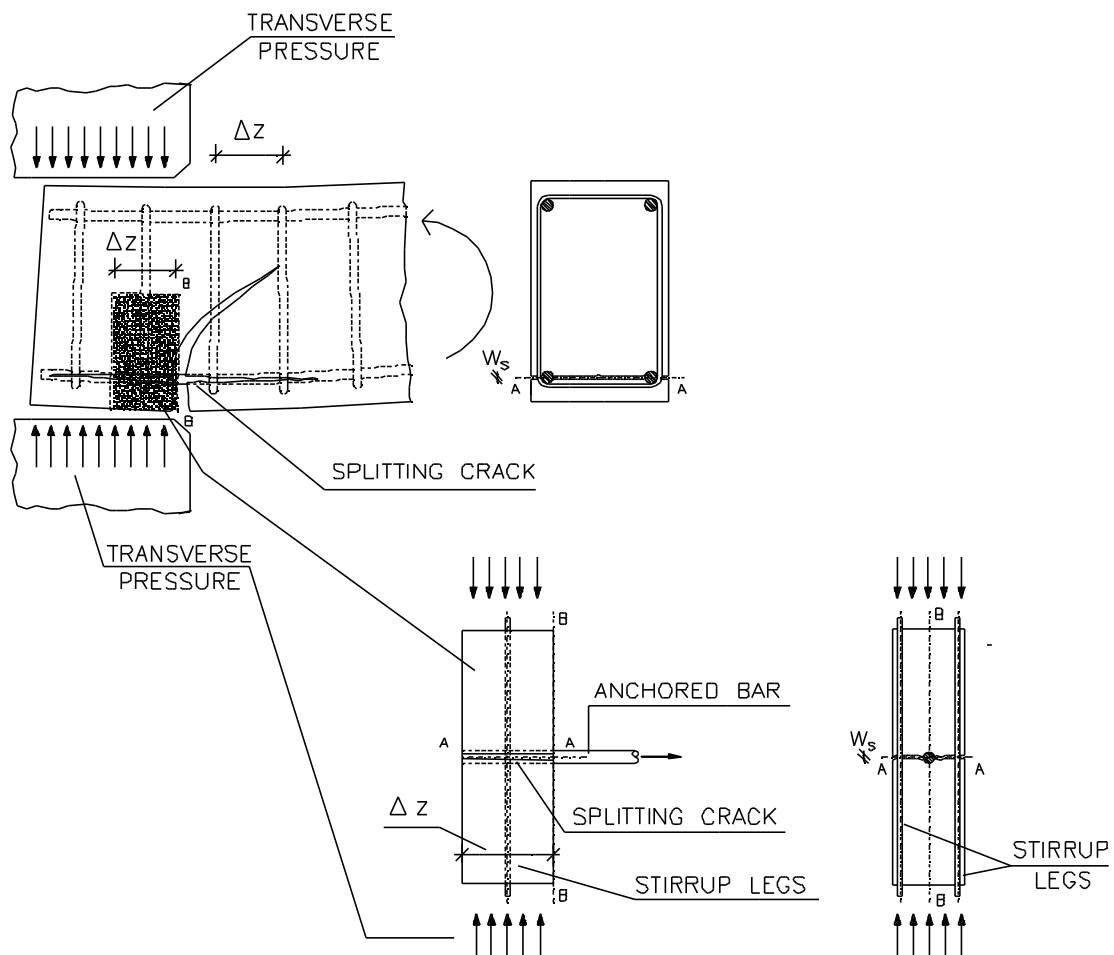


Fig. 15: Schema del provino sperimentale.

Le prove di estrazione sono state eseguite su barre del diametro di 16, 20 e 24 mm, al variare del contenimento offerto dall'armatura trasversale e dal tipo di cemento utilizzato nell'impasto del calcestruzzo. L'armatura trasversale è costituita da acciaio non zincato.

Quando si progettano ancoraggi di armature ad aderenza migliorata, si deve fare riferimento a due parametri particolarmente significativi (Giuriani et al., 1991):

- Il primo è l'*Indice di Contenimento delle Staffe*, definito come:

$$\Omega = \frac{A_{st}}{A_p} = \frac{n_{st} A_{st}}{n_p \phi_p \Delta z}$$

dove n_p e ϕ_p sono rispettivamente il numero e il diametro delle barre principali; n_{st} e A_{st} sono rispettivamente il numero e l'area delle staffe nella zona di lunghezza Δz (Fig. 16).

- Il secondo è l'*Indice di Contenimento del Calcestruzzo* (Giuriani et al., 1991), definito come:

$$B = \frac{(b - n_p f_p)}{n_p f_p}$$

dove b è la larghezza della trave (Fig. 17).

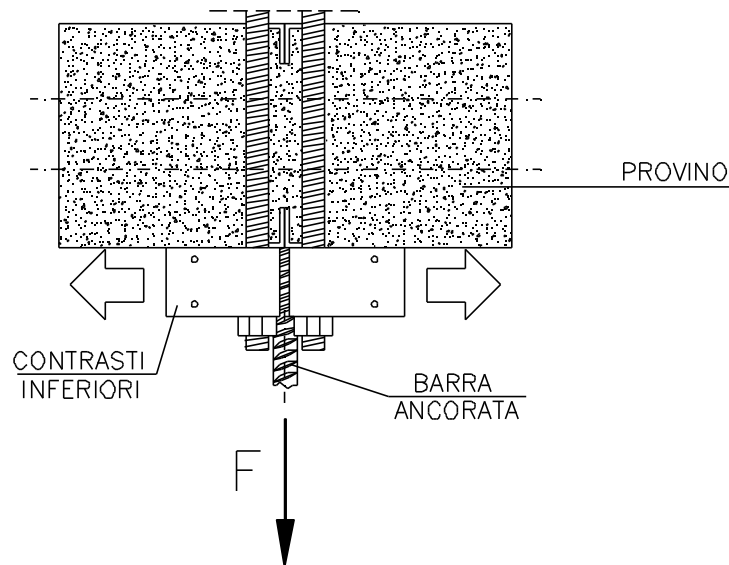


Fig. 16: Particolare delle piastre di contrasto inferiori del banco.

La Tab. 2 riporta le caratteristiche geometriche dei provini di calcestruzzo, i due indici di contenimento ed il rapporto R tra la lunghezza di ancoraggio (l_b) ed il diametro dell'armatura ancorata (ϕ_p).

	L[mm]	Δz [mm]	b[mm]	Φ_{st} [mm]	Ω	B	R
$\Phi 16$	400	120	80	6	0,027	4	7,5
$\Phi 20$	400	160	100	8	0,031	4	8
$\Phi 24$	400	200	120	10	0,033	4	8,3
$\Phi 24$	400	200	120	8	0,021	4	8,3
$\Phi 24$	400	200	120	6	0,012	4	8,3
$\Phi 24$	400	200	120	5	0,0081	4	8,3

Tabella 2: Caratteristiche geometriche dei provini utilizzati per le prove di estrazione.

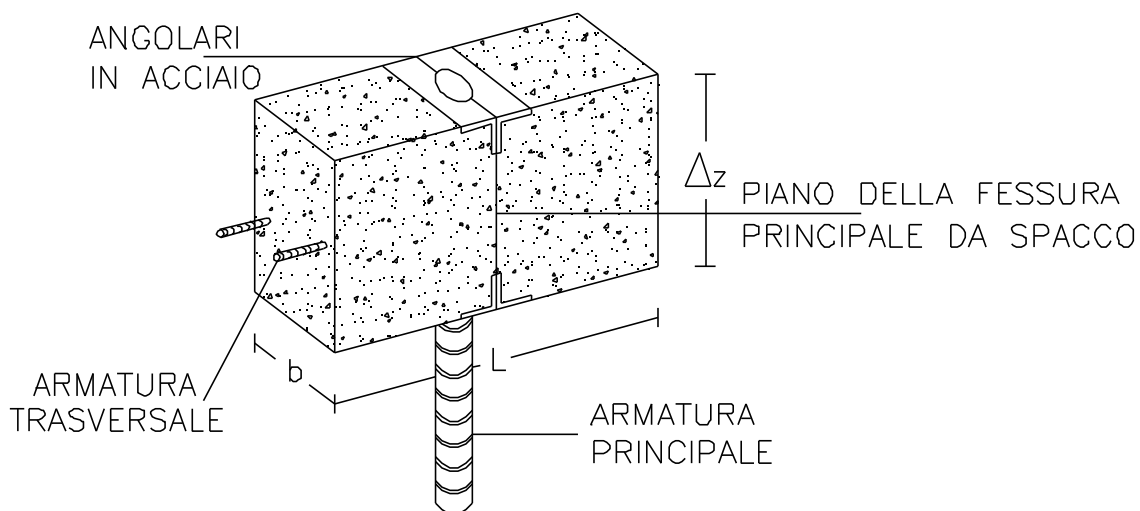


Fig. 17: Caratteristiche geometriche dei provini.

Durante le prove si è rilevato il carico, lo scorrimento acciaio-calcestruzzo sia all'estremo caricato che all'estremo scarico della barra, l'apertura della fessura da spacco (valutata in corrispondenza dell'armatura trasversale) e la tensione nelle armature trasversali (limitatamente ai provini con armature di 24 mm di diametro).

La Fig. 18 mostra un tipico diagramma dello sforzo di aderenza in funzione dello scorrimento dell'estremo caricato del provino con una barra del diametro di 24 mm e con due armature trasversale da 5 mm. La Fig. 19 mostra, per lo stesso provino, l'apertura della fessura da spacco sempre in funzione dello scorrimento della barra. I risultati ottenuti dai diversi provini non hanno evidenziato sostanziali differenze tra le barre Galvarebar e quelle non zincate, sia per lo sforzo di aderenza che per l'apertura della fessura da spacco.

Nel diagramma di Fig. 20 viene rappresentata la resistenza dell'aderenza misurata su tutti i provini, in funzione dell'indice di contenimento delle staffe (Ω). Si può notare che la resistenza dell'aderenza aumenta con l'indice di contenimento delle staffe, senza evidenziare però differenze sostanziali tra i valori ottenuti dalle barre zincate e dalle barre non ricoperte.

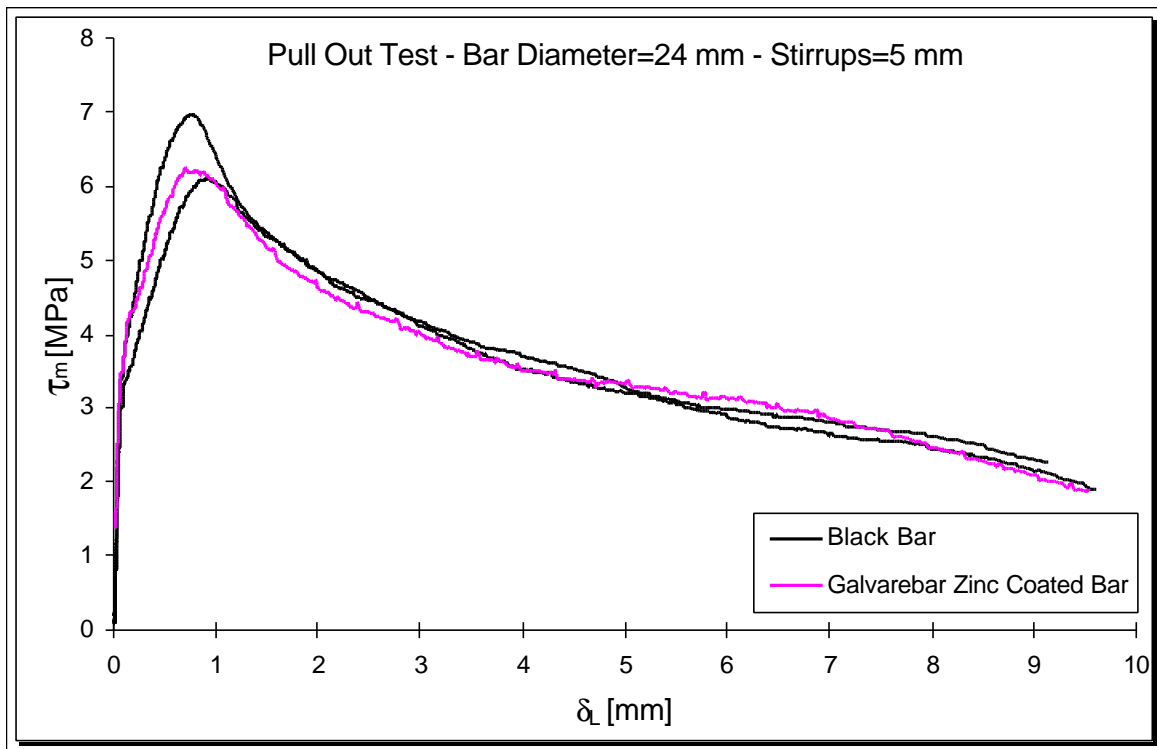


Fig. 18: Diagramma dello sforzo di aderenza in funzione dello scorrimento dell'estremo caricato dei provini con barre f24 e armatura trasversale f5.

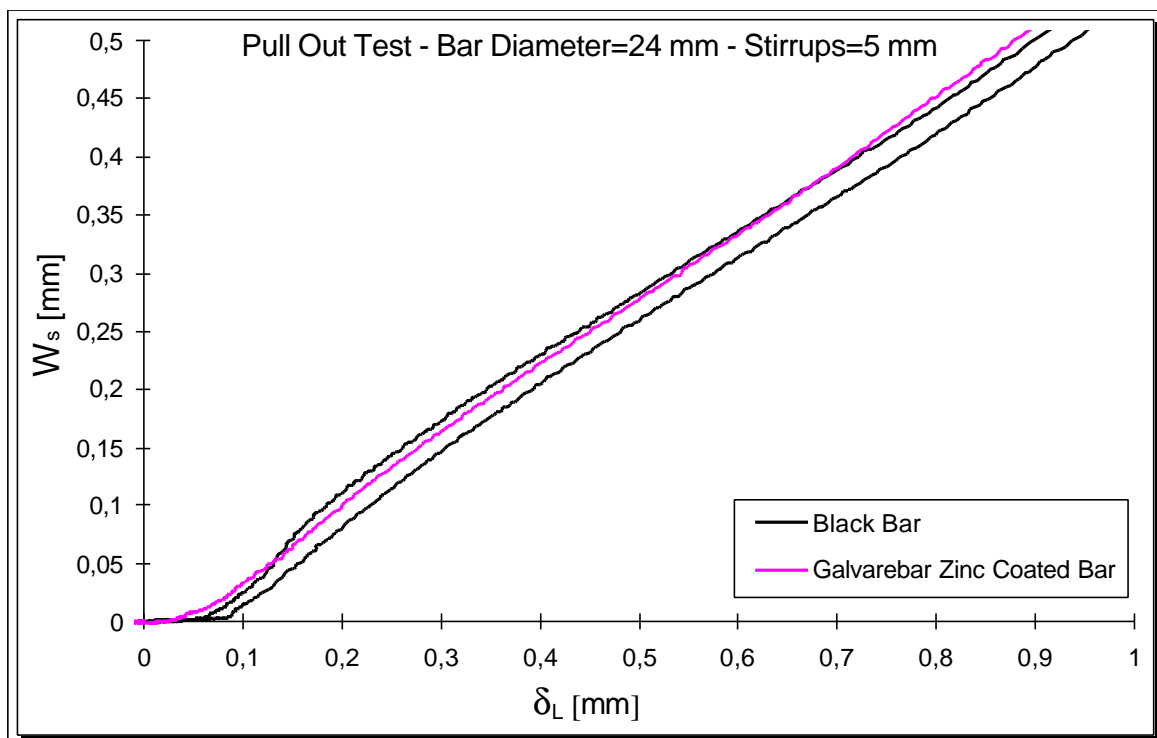


Fig. 19: Diagramma dell'apertura della fessura da spacco in funzione dello scorrimento dell'estremo caricato dei provini con barre f24 e armatura trasversale f5.

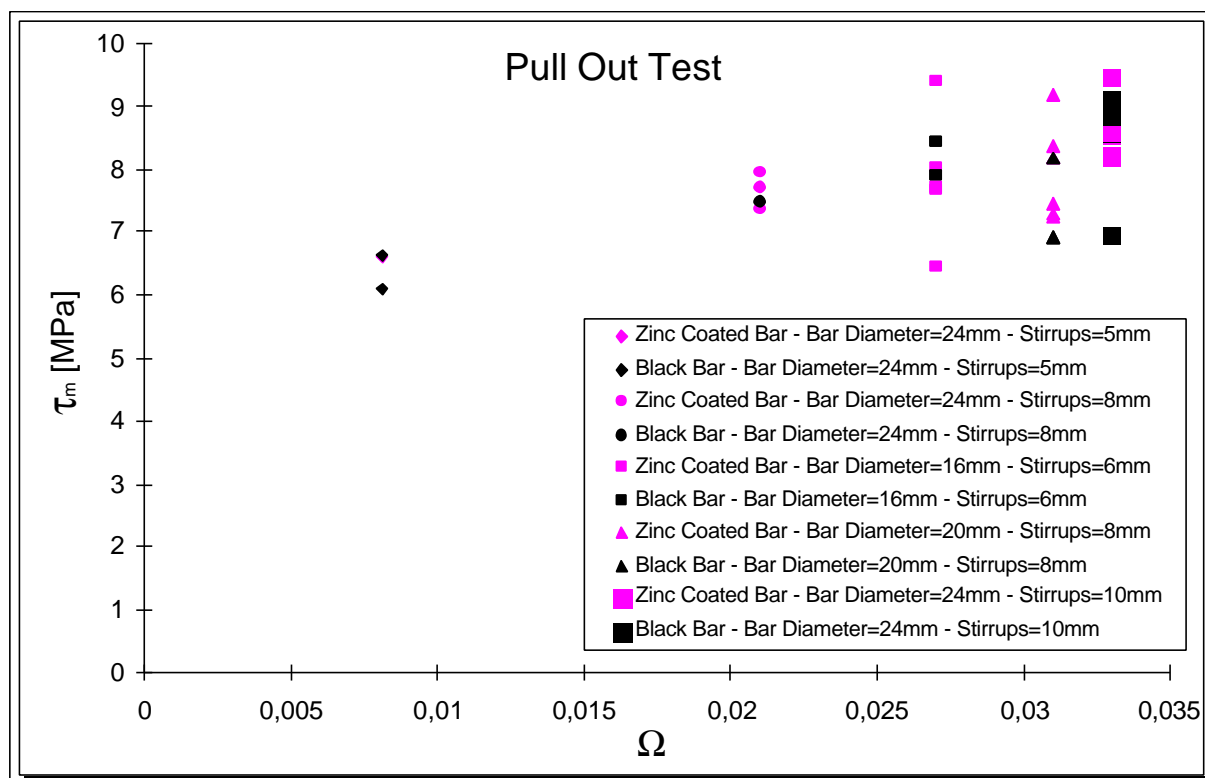


Fig. 20: Diagramma di confronto dello sforzo di aderenza in funzione dell'indice di contenimento delle staffe tra barre zincate e barre non ricoperte.

7. CAMPI DI APPLICAZIONE

L'acciaio ad aderenza migliorata zincato può trovare applicazione quando risulti necessario conferire durabilità ed integrità a strutture:

- prestigiose;
- caratterizzate da particolari soluzioni tecnologiche e progettuali, come ad esempio strutture sottili dove lo spessore del copriferro non può essere elevato;
- inserite in zone costiere e in tutti quegli ambienti ritenuti a rischio (urbani, marini, industriali); particolare attenzione deve essere prestata ai componenti esterni di facciate, gallerie stradali etc., dove il degrado e il successivo progredire dei fenomeni di corrosione comportano interventi di ripristino estesi a tutta la struttura, con conseguente e progressivo abbattimento del livello di sicurezza della stessa.

I dati dell'utilizzo del tondino zincato nel mondo attualmente disponibili si riferiscono a circa 10 anni fa. Nel Bollettino 211 del CEB (1992), i dati riportati evidenziano un impiego

abbastanza consistente di barre zincate rispetto a quelle di acciaio comune in Australia (circa 5%), negli Stati Uniti e Canada (2.1%), in Europa (1%).

In Italia, la maggior parte delle costruzioni lungo le coste, realizzate negli anni '60-'70, hanno già subito interventi di manutenzione o ripristino strutturale. L'esperienza indica che gli interventi si rendono necessari tra i 15 e i 25 anni dalla costruzione. Considerando che la percentuale di cloruri necessaria a stimolare la corrosione nelle armature zincate è circa 3 volte quella necessaria per indurre corrosione sul comune acciaio, l'utilizzo di armature zincate in ambiente costiero, dove la corrosione è imputabile all'azione combinata dei cloruri e dell'anidride carbonica, probabilmente farebbe ritardare gli interventi di manutenzione di oltre 3 volte i valori indicati.

Nonostante i dati poco confortevoli riguardanti la corrosione delle armature, in Italia sono ancora poche le strutture realizzate con armature zincate: è nota la moschea di Roma e la realizzazione di un molo nel porto di Civitavecchia; recentemente è stata ristrutturata una villa patrizia in provincia di Caserta ed un piccolo viadotto autostradale (Luminari et al., 1997).

8. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Le normative più seguite nei capitolati di appalto per le armature zincate sono state quelle americane, comunque attualmente quasi tutti i paesi hanno la propria normativa di riferimento. Di seguito sono riportati alcuni esempi:

ASTM A 767/A 767/M-90 (Stati Uniti);

AS 1650-1989 (Australia);

Zulassungsbescheid N. 215 100 - 1984 (Germania);

AFNOR 35-025, 1992 (Francia)

UNI 10622 - 97 (Italia)

Le varie normative sostanzialmente non differiscono fra loro in modo significativo; le variazioni che si possono trovare riguardano soprattutto i valori della grammatura, e quindi dello spessore del rivestimento di zinco, e i test di prova per qualificare dal punto di vista della qualità il prodotto finale.

9. CONCLUSIONI

Nella maggior parte dei casi di degrado delle opere in calcestruzzo, la causa principale è la corrosione delle armature d'acciaio.

L'utilizzo di barre d'armatura zincate è un metodo preventivo per preservarle dalla corrosione o per dilazionare il tempo di innesco dei fenomeni corrosivi incrementando quindi la durabilità delle opere in calcestruzzo armato.

Nel caso di strutture esposte in atmosfera dove le cause dell'aggressività ambientale siano da imputare alla sola carbonatazione del calcestruzzo, le barre zincate, al contrario delle barre non ricoperte, sono particolarmente idonee allo scopo e l'incremento della vita della struttura può essere pronosticato anche nell'ordine dei cento anni.

Nel caso di strutture esposte all'azione dei cloruri il tempo di innesco dipende dalla loro concentrazione all'interno del calcestruzzo. Comunque, poichè è accettato che la percentuale di cloruri critici per innescare la corrosione sulle barre zincate è circa 3 volte rispetto a quella necessaria sulle barre non ricoperte, si può pronosticare che anche il tempo di innesco della corrosione su acciaio zincato sia almeno tre volte superiore rispetto a quello per l'acciaio non zincato.

Il trattamento di zincatura a caldo effettuato dalla Galvarebar con impianto in semicontinuo che prevede tempi di immersione limitati (circa 90 secondi), non modifica le caratteristiche meccaniche dell'acciaio (Figg. 5-9).

La resistenza dell'aderenza delle barre Galvarebar, misurata sia attraverso Beam Tests che con prove di estrazione, è la stessa delle barre non zincate, in quanto lo spessore controllato di zincatura non modifica in modo significativo la geometria delle nervature (Figg. 13,14,18,20).

BIBLIOGRAFIA

- Bresler B. e Cornet I. (1964), "Galvanized Steel Reinforcement in Concrete", Proceedings of the *Seventh Congress of the International Association of Bridge and Structural Engineers*, Rio de Janeiro, August.
- CNR UNI 10020 (1971), "Prova di aderenza su barre di acciaio ad aderenza migliorata".
- Collepari M. (1991) "Scienza e tecnologia del calcestruzzo", III Ed., Hoepli, Milano.
- Comité Euro-International du Béton (1992), "Protection Systems for Reinforcement", Bulletin d'Information N° 211.
- Di Casola A. (1993), "Zincatura a Caldo. Processo, proprietà e applicazioni", Associazione Italiana Zincatura, Pubblicomit, Napoli.
- ENV 10080 (1995), "Acciaio per cemento armato. Armature per cemento armato saldabili nervate B500."
- Giuriani E., Plizzari G.A. e Schumm C. (1991), "Role of Stirrups and Residual Tensile Strength of Cracked Concrete on Bond", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 117(1), pp. 1-18.
- Lewis D.A. (1962), "Some Aspects of the Corrosion of Steel in Concrete", South Africa CSIR National Bldg. Res. Inst. R. D., Vol 24, n. XIII, 1, 547-555.
- Luminari M., Donferri M., Bastianelli G., Proverbio E., Meloni M. e Rigacci R. (1997), "Un esempio di applicazione autostradale di tipo sperimentale dell'acciaio zincato e di calcestruzzo a migliorate prestazioni per la prevenzione della corrosione di ponti e viadotti", Atti del Convegno *Giornate AICAP 97*, Roma, Vol. 3, pp.283-292.
- Ministero dei Lavori Pubblici (1996), "Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche", D.M. 9 gennaio 1996.
- Pedefferri P. (1991), "Corrosione e protezione di strutture metalliche e in cemento armato negli ambienti naturali", Ed. CLUP, Milano.
- Pedefferri P. e Bertolini L. (1996), "La corrosione nel calcestruzzo e negli ambienti naturali", McGraw-Hill, Milano.

- Plizzari G.A., Deldossi A.M. e Massimo S. (1998), "Transverse Reinforcement Effects on Anchored Deformed Bars", *Magazine of Concrete Research*, Vol.50(2), pp. 161-177.
- Plizzari G.A. e Franchi A. (1996), "Le Prove di Aderenza nelle Normative Nazionali di Alcuni Paesi Europei", *Technical Report N. 5.4*, Università degli Studi di Brescia, Dipartimento di Ingegneria Civile.
- Segues A.A. (1995), "An Update on Corrosion Processes and Field Performance of Epoxy-Coated Reinforcing Steel", *Annual Report of COST 509 Workshop*, Sevilla, September 4-9.
- Stark D. (1978), "Galvanized Reinforcement in Concrete Containing Chloride", *Construction Technology Laboratories*, p. 35.
- Swamy R.N. (1990), "In Situ Behaviour of Galvanized Reinforcement, Durability of Building Materials and Components", *Proceedings of the Fifth International Conference*, Brighton, UK, Edit by J.M. Baker et al, Chapman and Hall, 299-312.
- Yeomans S.R. (1994a), "A Conceptual Model for the Corrosion Galvanized Steel Reinforcement in Concrete", *Proceedings of the Interational Conference on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete*, University of Sheffield, 24-28 July, Vol. II, 1299-1309.
- Yeomans S.R. (1994b), "Performance of Black, Galvanized, and Epoxy-Coated Reinforcing Steel in Chloride-Contaminated Concrete", *Corrosion*, 50(1), 72-81.
- UNI ENV 197/1 (1992), "Cemento. Composizione, specificazioni e criteri di conformità. Cementi comuni".