

CARATTERISTICHE MECCANICHE E DI ADERENZA AL CALCESTRUZZO DI BARRE DI ARMATURA IN ACCIAIO ZINCATO

Alberto FRANCHI¹, Romeo FRATESI², Giacomo MORICONI², Giovanni A. PLIZZARI³

¹ Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano, Via Leonardo da Vinci, 20133 Milano

² Dipartimento di Scienze dei Materiali e della Terra, Università di Ancona, Via Breccie Bianche, 60131 Ancona

³ Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Brescia, Via Branze 38, 25123 Brescia

SOMMARIO

Nel lavoro vengono presentati i risultati di una ampia indagine atta a determinare l'eventuale variazione della resistenza meccanica di barre di acciaio ad aderenza migliorata di tipo Tempcore in seguito al trattamento di zincatura.

Un'indagine altrettanto estesa è stata condotta per studiare l'influenza della zincatura sull'aderenza delle barre di armatura al calcestruzzo. A tal fine sono state effettuate prove di estrazione sia con barre lisce che nervate e prove di *beam-test*, utilizzando sia barre zincate, che di acciaio nero come riferimento. I risultati ottenuti evidenziano la pratica ininfluenza del trattamento termico dovuto alla zincatura sulle caratteristiche meccaniche dell'acciaio e il positivo ruolo giocato dal rivestimento di zinco nei confronti dell'aderenza con il calcestruzzo.

SUMMARY

In this paper the experimental results of an extensive research to determine possible change of the mechanical strength of ribbed steel bars for concrete reinforcement, due to the galvanization process, are discussed.

A detailed study to determine the influence of steel galvanization on the bond stress between concrete and reinforcing bars was also carried out. With this aim, pull-out tests and beam-tests were performed on both smooth and ribbed bars, by using bare steel bars were as reference. The results show no practical influence of the heat treatment due to the galvanization process on the mechanical strength of the steel rebars and the positive role played by the zinc coating on the adherence between galvanized rebars and concrete.

1. INTRODUZIONE

I limiti di durabilità delle opere in calcestruzzo armato hanno determinato un notevole impulso alla ricerca, consentendo di raggiungere un adeguato livello nello sviluppo delle conoscenze sulle proprietà di questo materiale [1]. Si può quindi sicuramente affermare che 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 questo aspetto sia stato ormai ampiamente studiato e documentato [2], esso ancor oggi costituisce la forma sicuramente più insidiosa di danneggiamento strutturale che condiziona la durabilità di un'opera in calcestruzzo armato. Quando, poi, l'aspetto economico, attraverso una contrazione dei tempi di costruzione e la riduzione della qualità dei materiali, condiziona la corretta esecuzione

del lavoro, allora la durabilità di una struttura può risultare compromessa anche in ambienti non particolarmente aggressivi.

Le soluzioni correntemente proposte per aumentare la resistenza alla corrosione delle armature sono costituite da rivestimenti protettivi della superficie del calcestruzzo o delle barre di armatura, dalla protezione catodica o dall'impiego di acciaio inossidabile. Anche se è evidente che ciascuna di queste soluzioni aumenta il costo iniziale della struttura, sarebbe errato limitarsi a quest'ultima considerazione, in quanto è necessario riferirsi al costo totale della struttura nell'arco della sua vita, considerando quindi anche i costi di eventuali (per quanto prevedibili) interventi manutentivi, per valutare correttamente e complessivamente l'economicità delle scelte progettuali iniziali.

Fra i possibili accorgimenti 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 [3].

Le ragioni per le quali l'utilizzo di barre zincate incrementa la durabilità delle strutture in calcestruzzo armato risiedono nel fatto che lo zinco all'interno del calcestruzzo si passiva e, al contrario di quanto accade per l'acciaio non zincato, mantiene la sua passività anche quando la pasta di cemento subisce un abbassamento del pH ($\text{pH} < 11$) a causa della carbonatazione o quando il tenore di ioni cloruro supera quello considerato critico per l'acciaio. Riguardo alla concentrazione critica di cloruri all'interfaccia fra armatura zincata e calcestruzzo, necessaria per innescare la corrosione delle armature zincate, non esistono dati assoluti, poiché questo valore dipende da fattori difficilmente standardizzabili, come la microstruttura porosa del calcestruzzo, l'alcalinità della soluzione contenuta nei pori, l'equilibrio termogravimetrico del calcestruzzo con l'ambiente, etc. Tuttavia, prove sperimentali condotte nelle stesse condizioni ambientali indicano che tale concentrazione di soglia in cloruri risulta essere circa 3 volte superiore a quella che provoca l'insorgere della corrosione sulle armature di acciaio non zincato [4]. Il ritardo nella corrosione dell'acciaio, nel caso di armature zincate, comunque, non dipende solo dal maggior tempo necessario affinché le specie aggressive raggiungano i valori critici sulle armature, ma anche dal fatto che lo zinco, pur corrodendosi, esplica la sua funzione protettiva nei confronti dell'acciaio sottostante. In questo periodo, contrariamente a quanto accade alle armature di acciaio non rivestite, i prodotti di corrosione dello zinco non provocano danneggiamenti meccanici al calcestruzzo circostante, non essendo prodotti espansivi (a meno di concentrazioni elevatissime di cloruro). Al contrario, i prodotti di corrosione dello zinco, sigillando i pori ed eventuali microfessurazioni nell'intorno dell'armatura, rallentano 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.

Le buone prestazioni dell'acciaio zincato sono state riscontrate in pratica su molte strutture costruite soprattutto in Australia, nelle Bermude, negli USA ed in Europa [5, 6].

Nonostante i risultati positivi riportati nella letteratura tecnica relativa all'utilizzo dell'acciaio zincato in strutture reali, esistono ancora alcune perplessità per un impiego estensivo di tale materiale.

Fra i vari aspetti che generano dubbi relativamente all'utilizzo delle armature zincate, soprattutto da parte dei progettisti, si possono citare:

- la variazione della resistenza meccanica dell'acciaio dovuta al trattamento termico subito dallo stesso durante il processo di zincatura,
- la perdita di aderenza fra le barre zincate e il calcestruzzo rispetto alle barre non trattate, causata dalla produzione di idrogeno gassoso durante l'indurimento del calcestruzzo e dalla possibile variazione della geometria delle nervature; questo secondo aspetto è molto legato allo spessore del rivestimento di zinco.

Scopo del presente lavoro è stato quello di indagare sulla eventuale variazione di resistenza meccanica di barre in acciaio ad aderenza migliorata di tipo Tempcore, zincate in un normale bagno di zincatura, alla temperatura di 445°C. Inoltre, mediante prove di *pull-out* e *beam-test* si è voluto indagare sul ruolo giocato dal rivestimento di zinco nei confronti dell'aderenza delle barre al calcestruzzo.

2. MATERIALI

2.1 Acciaio

Sono stati utilizzati due tipi di acciaio:

- Fe 430 sotto forma di barre cilindriche lisce ($\phi = 16$ mm, $L = 55$ cm) per una parte delle prove di estrazione.
- Acciaio ad aderenza migliorata tipo Tempcore B500 laminato a caldo, di diverso diametro, per prove di resistenza meccanica, estrazione e *beam-test*. Quest'ultimo tipo di acciaio è stato caratterizzato anche dal punto di vista chimico, microstrutturale e della microdurezza al fine di valutare eventuali variazioni indotte dal processo di zincatura. In particolare è stato scelto un acciaio con un contenuto di Si = 0.17% e P = 0.008%, particolarmente idoneo quindi alla zincatura.

2.2 Zinco

Per la zincatura a caldo delle barre ($T = 445^\circ\text{C}$) è stata utilizzata una lega di zinco tipica dei comuni bagni di zincatura commerciale, la cui composizione è riportata nella Tab. 1.

Tab. 1 – Composizione chimica del bagno di zincatura

Al%	Cd%	Cu%	Fe%	Ni%	Pb%	Sn%
0.002	0.01	0.03	0.022	0.002	1.10	0.08

Il rivestimento di zinco delle barre utilizzate nella sperimentazione è stato controllato in modo da evitare spessori eccessivi di ricoprimento che potessero modificare la geometria delle nervature.

2.3 Soluzione passivante

Per passivare parte delle barre zincate è stata utilizzata una soluzione di cromato di sodio, con le

modalità indicate dalla normativa ASTM A 767/A 767/M-90.

2.4 Cemento

Sono stati utilizzati due tipi di cemento, entrambi ad elevato contenuto di alcali, così da verificare l'effettivo comportamento del rivestimento di zinco in un ambiente molto alcalino, considerato critico per l'aderenza dell'acciaio zincato al calcestruzzo.

- Per le prove di estrazione con barre lisce è stato utilizzato un cemento portland CEM I 52.5R con contenuto di alcali totali pari a 1.11 e alcali solubili pari a 0.83 (espressi come Na₂O%).

- Per le prove di estrazione con barre nervate e di *beam-test* è stato utilizzato un cemento portland al calcare CEM II/A-L 42.5R con contenuto di alcali totali pari a 1.04 e alcali solubili pari a 0.76 (espressi come Na₂O%).

2.5 Aggregati

Per il confezionamento dei calcestruzzi utilizzati per le varie prove sono stati impiegati aggregati silicei, di forma tondeggianti e con un diametro massimo pari a 15 mm, la cui distribuzione granulometrica è riportata in Tab. 2.

Tab. 2 – Distribuzione granulometrica degli aggregati impiegati per la confezione dei calcestruzzi.

Diametro (mm)	Peso (Kg)	Percentuale (%)
0.00-0.35	27.5	14.0
0.35-0.45	4.1	2.1
0.45-0.60	5.3	2.7
0.60-1.50	23.1	11.8
1.50-2.50	18.2	9.3
2.50-3.50	21.6	11.0
4.00-6.00	23.1	11.8
7.00-12.0	36.7	18.7
10.0-15.0	36.5	18.6
Totale	196.1	100

2.6 Calcestruzzi

Con i materiali sopra descritti sono stati confezionati due tipi di calcestruzzo secondo le indicazioni delle normative utilizzate per le relative prove. In particolare, la composizione e le principali caratteristiche del calcestruzzo fresco utilizzato per le prove di estrazione su barre lisce sono riportate in Tab. 3.

Tabella 3 – Composizione e caratteristiche del calcestruzzo utilizzato per le prove di estrazione con barre lisce.

Aggregati [kg/m ³]	Acqua [l/m ³]	Cemento [kg/m ³]	a/c	Slump [mm]	f _{c,cub28} [MPa]
1990	179	270	0.66	60	37.6

I provini per le prove di estrazione ed i beam test sulle barre nervate sono state effettuate impiegando la composizione del calcestruzzo richiesta dalla normativa CNR-UNI 10020 (1971), le cui principali caratteristiche sono riportate in Tab. 4.

Tabella 4 – Composizione e caratteristiche del calcestruzzo utilizzato per le prove di *beam-test* su barre nervate.

Aggregati [kg/m ³]	Acqua [l/m ³]	Cemento [kg/m ³]	a/c	Slump [mm]	f _{c,cub28} [MPa]
1960	165	250	0.66	55	27.5

Nelle Tabb. 3 e 4 è anche riportato il valore della resistenza a compressione determinata su cubetti dopo 28 giorni di maturazione (f_{c,cub28}).

Le prove di compressione sono state effettuate seguendo le indicazioni della norma UNI 6132/72.

3. APPARECCHIATURE DI PROVA

Le prove meccaniche di trazione sulle barre di acciaio zincato e non, così come quelle di estrazione con barre nervate, sono state eseguite mediante una macchina di prova servocontrollata Instron 2714 con elettronica 8500 plus; per le prove di estrazione con barre lisce è stata utilizzata una macchina servocontrollata Metrocom U160C.

Le prove di microdurezza sull'acciaio sono state eseguite mediante microduremetro Leitz con penetratore Vickers e carico di 200 g.

4. MODALITÀ DI PROVA

4.1 Caratterizzazione chimico-fisica dei materiali

L'acciaio tipo Tempcore è stato caratterizzato oltre che dal punto di vista meccanico, anche dal punto di vista chimico, microstrutturale e della microdurezza. In particolare, le prove di trazione e le misure di microdurezza sono state ripetute per barre zincate con diversi tempi di immersione nel bagno di zinco a 445°C.

La caratterizzazione microstrutturale e della microdurezza è stata eseguita su sezioni trasversali delle barre che, dopo apposita lappatura, lucidatura ed attacco metallografico, sono state osservate con l'ausilio di un microscopio ottico.

Mediante microscopia ottica è stato anche misurato lo spessore e caratterizzata la microstruttura del rivestimento di zinco sulle barre nervate.

4.2 Prove di trazione

Le prove di resistenza meccanica sono state effettuate sia su barre nervate tradizionali (non zincate) che su barre zincate con diametro di 10, 12, 16, 20 e 24

mm. Le barre con lo stesso diametro erano 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 0.055% della lunghezza di base. I cinque supporti sono stati posizionati in maniera simmetrica a partire dalla mezziera della barra, a 80 mm di distanza l'uno dall'altro, in tal modo si sono individuati quattro tratti che ricoprono una lunghezza totale di 320 mm (Fig. 1). Le barre avevano una lunghezza totale imposta dalla normativa, per la quale la distanza netta fra gli afferraggi non deve essere inferiore a $15\phi+2L$, avendo indicato con ϕ il diametro della barra e con L la lunghezza della zona in cui viene misurata la deformazione dopo rottura (assunta pari a 160 mm nella presente sperimentazione).

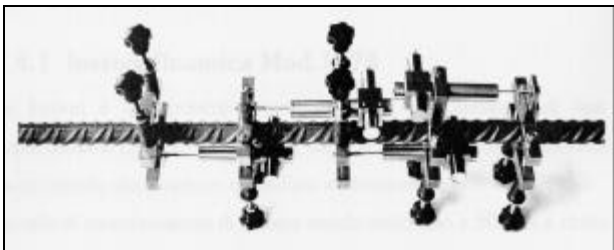


Fig. 1 – Barra strumentata per la prova di trazione.

4.3 Prove di aderenza

Una buona aderenza tra l'armatura ed il calcestruzzo è essenziale per il buon funzionamento delle strutture in calcestruzzo armato. Nel caso delle armature zincate, nonostante esistano delle opinioni discordanti, la valutazione dei dati riportati in bibliografia porta a concludere che, per barre lisce, la resistenza dell'aderenza dell'acciaio zincato varia e può diventare fino al 50% superiore di quella di barre simili non zincate [7, 8].

Durante il processo di zincatura delle barre ad aderenza migliorata, attualmente utilizzate per la realizzazione delle strutture in calcestruzzo armato, si può verificare che parte dello zinco si deposita, per coesione, fra le nervature diminuendone l'altezza, e conseguentemente l'indice di aderenza (I_R ; M.LL.PP., 1996).

Per effettuare un'indagine completa sull'aderenza acciaio zincato/calcestruzzo, le prove di aderenza sono state effettuate sia su barre lisce, per verificare l'adesione chimica acciaio-calcestruzzo, che su barre ad aderenza migliorata per osservare l'interazione meccanica tra i due materiali. Le prove effettuate sono descritte nel seguito.

4.3.1 Prove di estrazione su barre lisce

Le prove di aderenza fra barre lisce e calcestruzzo sono state eseguite su una barra ancorata in un cubo di calcestruzzo di lato 20 cm, estratta da una estremità mediante l'applicazione di una forza di trazione. All'estremità libera è applicato un trasduttore di spostamento per misurare lo scorrimento fra barra e calcestruzzo. Il carico è stato incrementato fino ad annullare completamente l'aderenza fra barra ed il calcestruzzo. Le prove sono state effettuate su barre di acciaio tradizionale, acciaio zincato e acciaio zincato e cromatato. Le prove sono iniziate dopo 60 giorni di stagionatura all'aria dei provini di calcestruzzo e quindi sono state ripetute ad intervalli di circa 3 mesi mantenendo il calcestruzzo in contatto con una soluzione aggressiva al 3% di cloruro di sodio. Per ogni tipologia di barra inglobata e per ogni prova, sono stati utilizzati tre provini uguali.

4.3.2 Beam-test su barre ad aderenza migliorata

Le prove di aderenza su barre ad aderenza migliorata sono state inizialmente condotte utilizzando il *Beam-test* previsto dalla CNR UNI 10020 (1971). Tali prove sono state condotte su barre zincate, zincate e passivate mediante cromatazione e su barre di acciaio tradizionali. I diametri delle barre utilizzate erano 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 prevista dalla normativa era costituita da acciaio non zincato.

4.3.3 Prove di estrazione su barre con nervature

Il comportamento strutturale degli ancoraggi è fortemente influenzato dalla spinta radiale delle nervature e dall'azione di contenimento presente lungo la barra [9]. Il trattamento di zincatura a caldo, cambiando sia morfologicamente che chimicamente la barra, può influenzare tale forza radiale e la formazione di fessure da spacco longitudinali [10].

Il *Beam-test* richiesto dalla Normativa Italiana prevede l'utilizzo di provini di trave con una percentuale di armatura trasversale molto superiore a quella normalmente usata nella pratica progettuale, necessaria anche per evitare il collasso per taglio prima del collasso per aderenza [11]. Allo scopo di simulare una situazione più vicina alla realtà, studiando il comportamento di una barra nella zona d'influenza di una singola staffa, sono state effettuate prove di estrazione a contenimento controllato [12]. Infatti, le prove di estrazione sono spesso influenzate dall'azione di contenimento che si ottiene per l'attrito fra la superficie dei provini a contatto con 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. Allo

scopo di ottenere risultati più significativi, le prove sono state eseguite utilizzando un banco che consente la libera apertura della fessura da spacco principale [13], attraverso un contrasto costituito da due piastre separate lungo il piano della fessura stessa (Fig. 2). Tale sistema garantisce l'esclusiva dipendenza dell'aderenza dal contenimento delle staffe e del calcestruzzo, escludendo qualsiasi altra azione non valutabile.

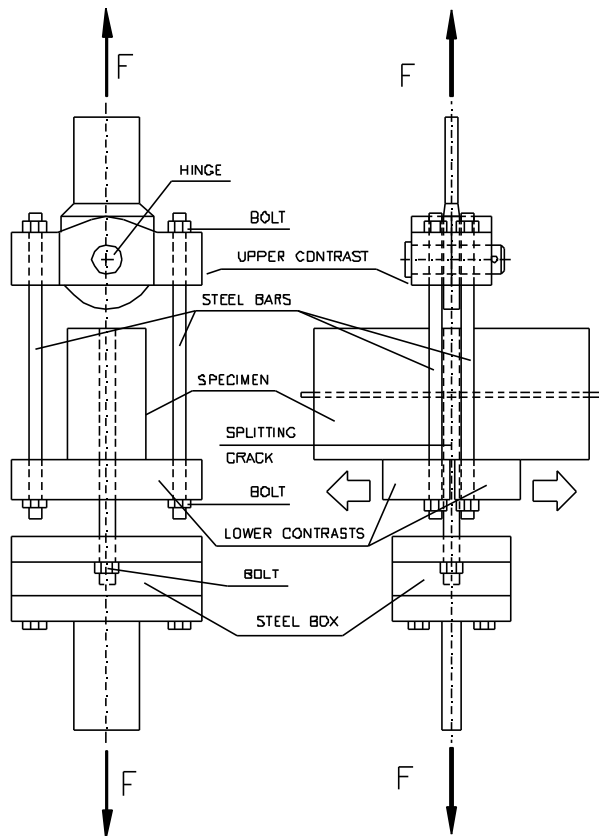


Fig. 2 – Banco per l'esecuzione di prove di estrazione con libera apertura della fessura principale da spacco.

Le prove di estrazione sono state eseguite su provini con barre aventi diametro di 16, 20 e 24 mm, con armature trasversali di diverso diametro.

L'armatura trasversale è costituita due barre di acciaio non zincato disposte perpendicolarmente al piano AA della fessura principale da spacco. (Fig. 3).

Quando si progettano ancoraggi di armature ad aderenza migliorata, si deve fare riferimento a due parametri particolarmente significativi [12]. 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; e n_{st} e A_{st} sono rispettivamente il numero e l'area delle staffe nella zona di influenza Δz di una staffa. Il secondo è l'Indice di Contenimento del Calcestruzzo, definito come:

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

dove b è la larghezza della trave.

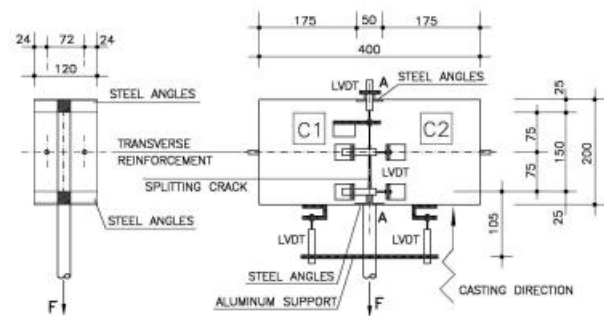


Fig. 3 – Provino utilizzato per le prove di estrazione con libera apertura della fessura principale da spacco su una barra $\phi 24$, con indicata la strumentazione utilizzata la misura degli spostamenti.

La Tab. 5 riporta le caratteristiche geometriche dei provini, i due indici di contenimento ed il rapporto tra la lunghezza di ancoraggio (l_b) ed il diametro dell'armatura ancorata.

Tabella 5 – Caratteristiche geometriche dei provini utilizzati per le prove di estrazione su barre ad aderenza migliorata.

ϕ_p [mm]	Δz [mm]	b [mm]	ϕ_{st} [mm]	Ω	B	l_b/ϕ_p
16	120	80	6	0.027	4	7.5
20	160	100	8	0.031	4	8
24	200	120	5	0.008	4	8.3
24	200	120	6	0.012	4	8.3
24	200	120	8	0.021	4	8.3
24	200	120	10	0.033	4	8.3

Durante le prove è stato rilevato il carico, misurato dalla cella di carico della macchina di prova, e lo scorrimento fra acciaio e calcestruzzo sia all'estremo caricato che all'estremo scarico della barra, l'apertura della fessura da spacco (valutata in corrispondenza dell'armatura trasversale) per mezzo di trasduttori di spostamento induttivi (LVDT) applicati sui provini. La presenza di estensimetri elettrici sulle staffe dei provini con armature di 24 mm di diametro ha consentito di misurare la tensione nelle armature trasversali (Fig. 3).

5. RISULTATI SPERIMENTALI

5.1 Caratterizzazione delle barre nervate

La Fig. 4 mostra la sezione trasversale di una barra di acciaio tipo Tempcore utilizzata ($\phi=20$ mm), in cui è possibile notare la differenza di microstruttura fra il cuore e la parte esterna della barra stessa. Ciò è dovuto al trattamento di bonifica superficiale che subisce la barra subito dopo la laminazione a caldo. La microstruttura interna è costituita da ferrite e perlite, mentre quella esterna è martensite rinvenuta che contribuisce a conferire una maggiore resistenza meccanica all'acciaio.

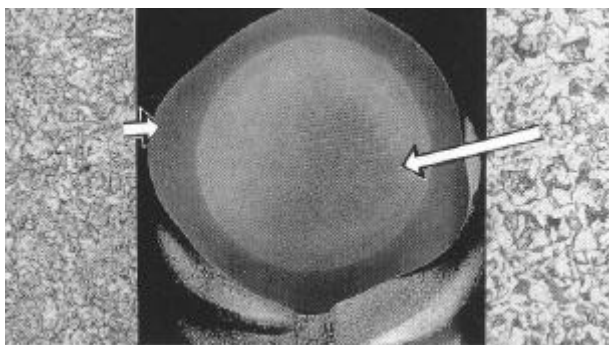


Figura 4 – Sezione di una barra di acciaio Tempcore ($\phi=20$) dopo attacco metallografico; in evidenza la struttura martensitica (esterna) e ferritico-perlitica (interna).

Le mappature di microdurezza effettuate su tre barre di acciaio ($\phi=20$ mm) di cui due zincate a tempi di immersione rispettivamente di 3 minuti e di 10 minuti sono riportate in Fig. 5. Tale figura mette in evidenza che solo il trattamento di zincatura della durata di 10 minuti modifica leggermente la microdurezza della sola parte esterna della barra, variazione che tuttavia, come si noterà più avanti, non influisce sui valori della resistenza meccanica determinati con la prova di trazione.

La morfologia e la microstruttura del rivestimento di zinco ottenuta su una barra di diametro di 12 mm per un tempo di immersione nel bagno di zincatura di 3 minuti, è riportata nella Fig. 6. Sono evidenti nella parte interna del rivestimento i composti intermetallici Zn-Fe formati dalla reazione fra zinco e ferro durante il processo di zincatura e la fase di zinco puro esterna. Per gli eventuali effetti della zincatura sull'aderenza delle barre zincate al calcestruzzo è importante notare, nella stessa figura, come lo zinco tenda a riempire le gole dalla parte bassa delle nervature modificando leggermente la geometria delle nervature stesse. Come detto precedentemente, questo è uno degli argomenti che di solito vengono messi in discussione quando si parla di aderenza delle armature zincate con il calcestruzzo.

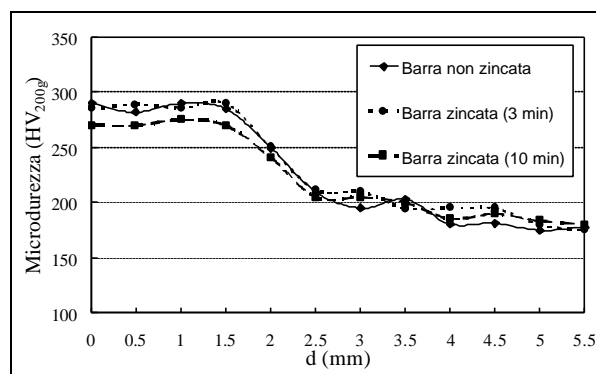


Figura 5 – Profilo dei valori di microdurezza, a partire dalla superficie esterna verso il cuore di barre ($\phi=20$) non zincate e zincate a diversi tempi di immersione.

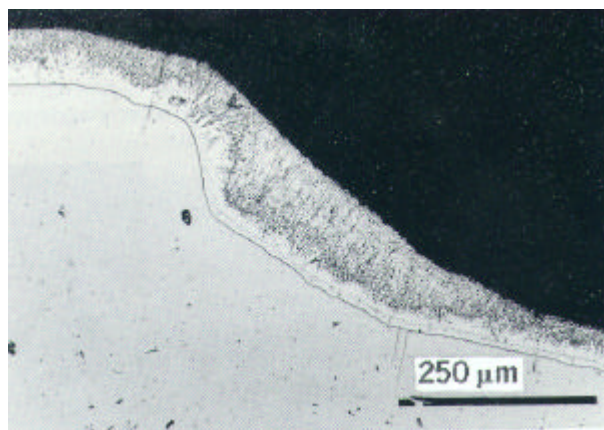


Figura 6 – Microstruttura del rivestimento di zinco in corrispondenza della base di una nervatura su una barra con diametro di 12 mm.

La Fig. 7 mostra, come esempio, le curve tipiche sforzo-deformazione ricavate dalla trazione delle barre con diametro $\phi=16$ mm, sia dell'acciaio tal quale (Black) sia zincato, con tre tempi di permanenza nel bagno di zincatura.

Nella Tab. 6 sono riportati i valori medi della tensione di snervamento (f_y), della tensione di rottura (f_t) e dell'allungamento percentuale a rottura (A_{gt}) per tutte le barre testate.

Considerando che nel processo di zincatura difficilmente si eccede sul tempo di immersione delle barre oltre i 10 minuti, dall'analisi dei risultati si evince come il trattamento termico dell'acciaio dovuto al processo di zincatura non modifichi le caratteristiche meccaniche ad aderenza migliorata tipo Tempcore. Infatti in molti casi la tensione di snervamento delle barre zincate risulta coincidente con i valori delle corrispondenti barre non zincate e comunque anche dove si riscontrano delle differenze di tensione di

snervamento o di rottura, queste rientrano nella normale dispersione dei risultati sperimentali che si rilevano nelle prove di trazione. La tensione di snervamento rimane sempre e comunque superiore al minimo richiesto dalla Normativa Italiana per l'acciaio FeB44K (M.LL.PP., 1996).

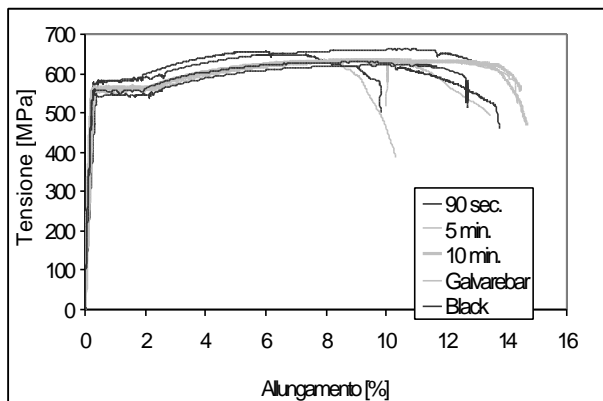


Figura 7 – Curve tensione-deformazione per barre di acciaio Tempcore, $\phi 16$, non zincate e zincate a diversi tempi di immersione.

Tabella 6 – Medie, su due determinazioni, delle tensioni di snervamento, di rottura e dell'allungamento a rottura di barre nervate sottoposte a prove di trazione diretta.

Diam. [mm]	Zincatura [min.]	f_v [MPa]	f_t [MPa]	f_t/f_v	A_{gt} [%]
10	0	580	665	1.15	9.87
	1.5	546	638	1.17	10.17
	5	560	644	1.15	6.61
	10	565	653	1.16	7.87
12	0	537	614	1.14	7.32
	1.5	587	672	1.14	8.31
	5	586	675	1.15	9.19
	10	586	668	1.14	7.12
16	0	551	624	1.13	13.25
	1.5	557	631	1.13	12.18
	5	558	629	1.13	11.89
	10	562	633	1.13	14.55
20	0	545	635	1.17	13.42
	1.5	548	645	1.18	13.81
	5	550	644	1.17	14.42
	10	551	645	1.17	16.39
24	0	538	622	1.16	15.56
	1.5	549	615	1.12	10.23
	5	527	604	1.15	12.10

5.2 Prove di estrazione su barre lisce

La Fig. 8 mostra la media, su tre prove, dello sforzo di aderenza delle barre di acciaio zincato, zincato

romato e acciaio non ricoperto, in funzione dello scorrimento acciaio-calcestruzzo delle barre stesse. I valori più alti dello sforzo di aderenza (dopo 2 mesi di stagionatura del calcestruzzo) sono stati registrati per le barre zincate, mentre valori intermedi sono stati ottenuti per le barre di acciaio non zincato. I valori massimi della resistenza dell'aderenza sono riportati, in Fig. 9, in funzione del tempo di esposizione dei provini in condizione di parziale immersione in soluzione di cloruri.

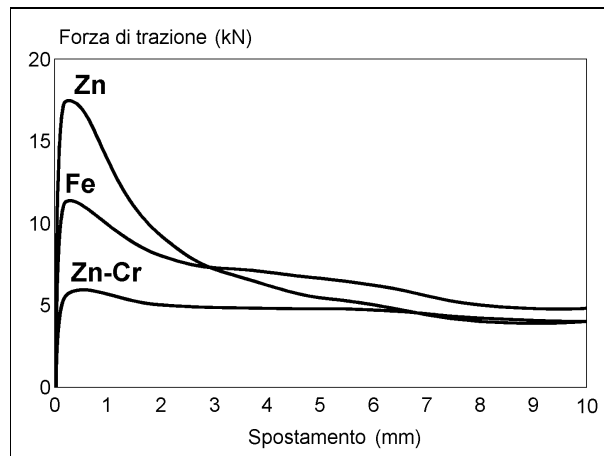


Figura 8 – Sforzo di aderenza in funzione dello scorrimento relativo rilevato su barre lisce di acciaio zincato, zincato cromato e acciaio non ricoperto, dopo 60 giorni di stagionatura all'aria.

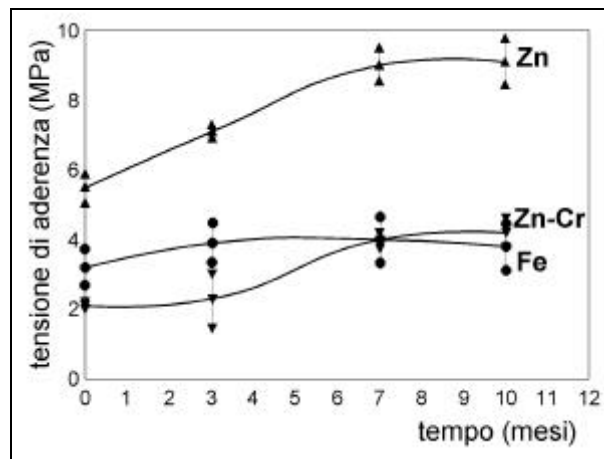


Figura 9 – Sforzo di aderenza massimo registrato per ogni campione di barra liscia in funzione del tempo di parziale immersione in soluzione di cloruri.

Durante i dieci mesi di parziale immersione nella soluzione al 3% di cloruri è stato osservato un incremento dell'aderenza per tutti i tipi di barra, la variazione è comunque diversa a seconda per i diversi

tipi di barra. La resistenza dell'aderenza delle barre zincate rimane comunque sempre molto più elevata rispetto agli altri due tipi di barra, anche dopo l'esposizione in ambiente aggressivo.

Dopo rottura di alcuni provini sono stati osservati dei frammenti di pasta di cemento aderente alla superficie dello zinco, mentre le superfici delle barre di acciaio e quelle di acciaio zincato cromatato erano pulite, a riprova che il film di cromato non si è deteriorato in contatto con il calcestruzzo. Il significato della maggiore aderenza fra barre zincate e calcestruzzo sta nel fatto che lo zinco durante la fase di indurimento del calcestruzzo reagisce con la calce d'idrolisi, ed i suoi prodotti di reazione, non espansivi, penetrano nei pori della pasta di cemento densificando la zona di transizione fra zinco e calcestruzzo. Così questi prodotti contribuiscono a sigillare i pori ed i microvuoti nella zona interfacciale causando la formazione di ponti tra il metallo e il calcestruzzo, come già riportato in letteratura [14]. Questa interpretazione è supportata dall'aumento della resistenza dell'aderenza nel tempo delle barre zincate e cromatate (Fig. 9). Infatti, inizialmente il valore è il più basso fra tutti e tre i tipi di barre a causa dello strato passivante che inibisce la corrosione dello zinco ma poi, man mano che il film di cromati viene distrutto, lo zinco viene attaccato e la tensione di aderenza incrementa.

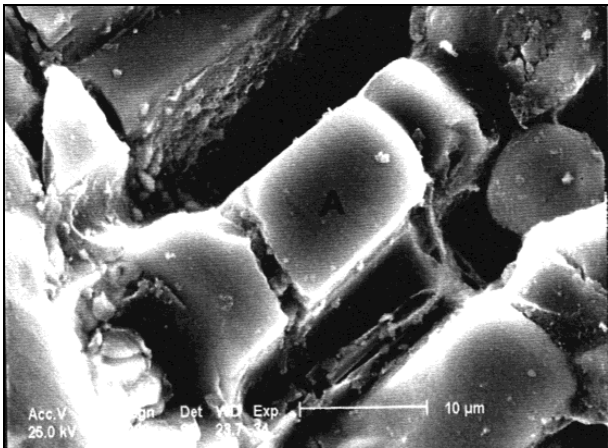


Figura 10 – Cristalli di idrossizincato di calcio formati all'interfaccia barra zincata/calcestruzzo.

L'osservazione al microscopio elettronico di sezioni di calcestruzzo contenenti barre zincate dopo rottura dei campioni di calcestruzzo hanno evidenziato effettivamente una densificazione della zona interfacciale fra zinco e calcestruzzo. L'analisi EDX ha dimostrato che la pasta di cemento che circonda la barra zincata è permeata da prodotti di reazione dello zinco per una certa profondità e un'analisi a maggiori ingrandimenti nelle zone interfacciali, dove lo zinco

risulta leggermente attaccato, permette di rilevare la formazione di cristalli di calcio-idrossizincato perpendicolari alla superficie della barra (Fig. 10).

La presenza di questi cristalli che crescono all'interno delle porosità del calcestruzzo e che agiscono come ponti tra il metallo e il calcestruzzo stesso, confermano il meccanismo ipotizzato per spiegare l'incremento dell'aderenza fra barre zincate ed il calcestruzzo.

5.3 Beam-test su barre ad aderenza migliorata

Un tipico diagramma dello sforzo di aderenza medio (t_d), ipotizzato uniformemente distribuito lungo il tratto ancorato, in funzione dello scorrimento dell'estremo libero, ottenuto da una prova su una barra con diametro 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.

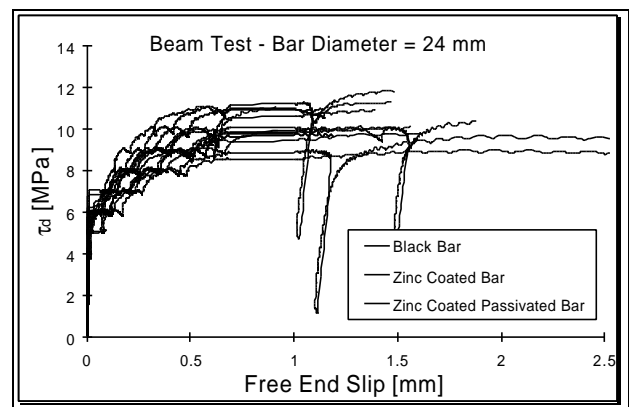


Figura 11 – Diagramma dello sforzo di aderenza (t_d) in funzione dello scorrimento dell'estremo libero della barra.

La norma CNR UNI 10020 (1971) richiede di riportare la tensione di aderenza ad una resistenza nominale del calcestruzzo di 27 MPa. Nel diagramma di Fig. 12 sono rappresentati i valori della resistenza dell'aderenza normalizzati 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 a quelli minimi richiesti dalla normativa.

La Normativa Italiana (M.L.L.P.P., 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 può modificare la geometria delle nervature e ridurre l'indice di aderenza (Fig. 6).

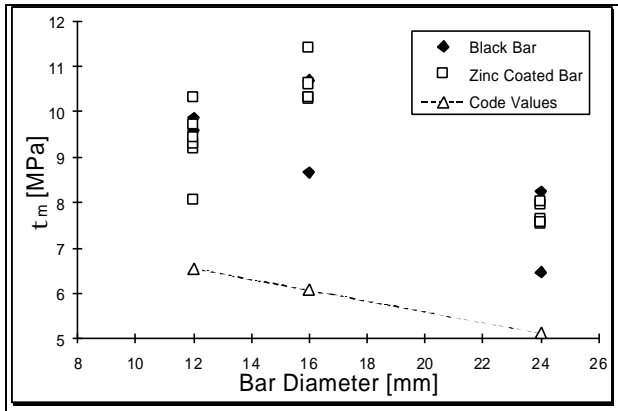


Figura 12 – Diagramma della resistenza media t_m con i valori minimi richiesti dalla normativa CNR UNI 10020 (1971).

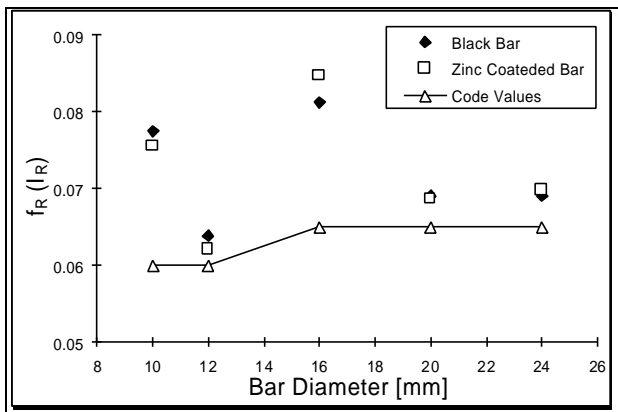


Figura 13 – Diagramma dei valori di I_R in funzione del diametro della barra.

Nel diagramma di Fig. 13 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 del valore dell'indice di aderenza misurato sulle diverse barre di acciaio zincato 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.

5.4 Prove di estrazione su barre nervate

La Fig. 14 mostra un tipico diagramma dello sforzo di aderenza in funzione dello scorrimento dell'estremo caricato del provino con una barra di diametro 24 mm e con due armature trasversali da 5 mm. La Fig. 15 mostra, per lo stesso provino e relativamente alla fase iniziale della prova, 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 zincate e quelle non zincate, sia per lo sforzo di aderenza che per l'apertura della fessura da spacco.

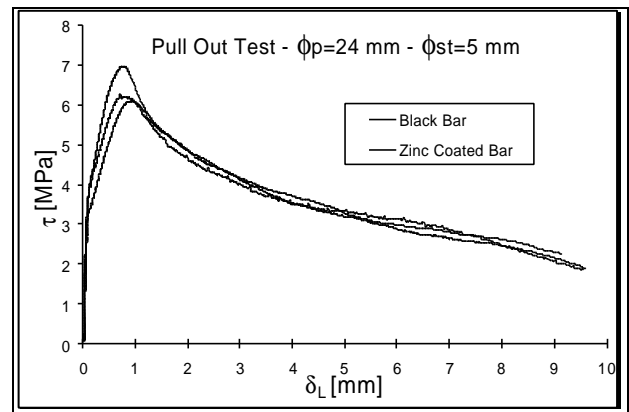


Figura 14 – Diagramma dello sforzo di aderenza in funzione dello scorrimento dell'estremo caricato dei provini con barre $\phi 24$ e armatura trasversale $\phi 5$.

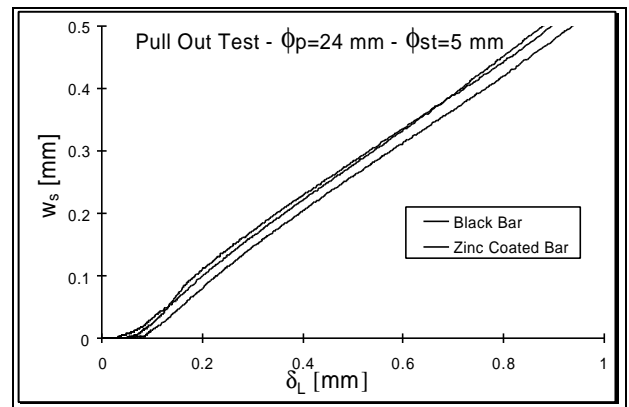


Figura 15 – Diagramma dell'apertura della fessura da spacco in funzione dello scorrimento dell'estremo caricato nella parte iniziale della prova.

Nel diagramma di Fig. 16 è rappresentata la resistenza allo sfilamento misurata su tutti i provini, in funzione dell'indice di contenimento delle staffe (Ω). Si può notare che tale resistenza 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.

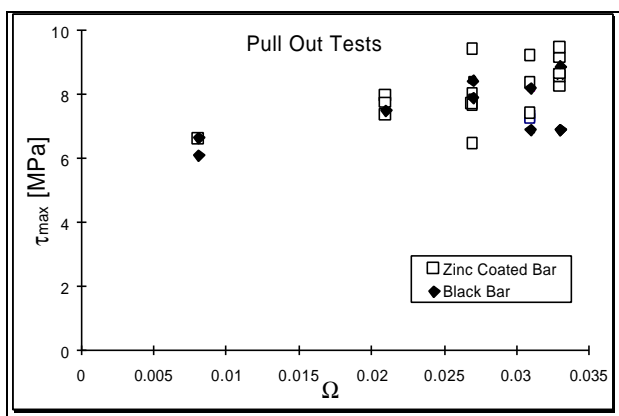


Figura 16 – Diagramma del massimo sforzo di aderenza in funzione dell'indice di contenimento delle staffe tra barre zincate e barre non ricoperte.

6. CONCLUSIONI

La resistenza a trazione di una barra Tempcore ricoperta di zinco, anche con una permanenza di 10 minuti nel bagno di zinco, non viene modificata dal trattamento termico necessario per l'applicazione del rivestimento.

L'aderenza tra barra liscia e calcestruzzo, dovuta soprattutto all'interazione chimico-fisica fra materiale metallico e pasta cementizia, migliora in presenza di un rivestimento di zinco. L'aderenza di una barra nervata, dovuta soprattutto all'interazione meccanica fra le nervature ed il calcestruzzo circostante, non viene modificata dalla presenza del rivestimento di zinco se il suo spessore è tale da modificare solo leggermente l'altezza delle nervature, condizione necessaria anche ad evitare il distacco del rivestimento in fase di piegatura delle barre.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] M.Collepari - 1991, "Scienza e tecnologia del calcestruzzo", III Ed., Hoepli, Milano.
- [2] P.Pedeferrì - 1991, "Corrosione e protezione di strutture metalliche e in cemento armato negli ambienti naturali", Edizioni CLUP, Milano.
- [3] A.A.Segues - 1995, "An Update on Corrosion Processes and Field Performance of Epoxy-Coated Reinforcing Steel", Annual Report of COST 509 Workshop, Sevilla.
- [4] S.R.Yeomans - 1994, "Performance of Black, Galvanized, and Epoxy-Coated Reinforcing Steel in Chloride-Contaminated Concrete", *Corrosion*, 50(1), 72-81.
- [5] D.Stark - 1984, "Measurements Techniques and Evaluation of Galvanized Reinforcing Steel in

Concrete Structures in Bermuda", ASTM-STP 713, 132-141.

- [6] CEB (Comité Euro-International du Béton) - 1992, "Protection Systems for Reinforcement", Bulletin d'Information N.211.
- [7] D.A.Lewis - 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.
- [8] B.Bresler, I.Cornet - 1964, "Galvanized Steel Reinforcement in Concrete", Proc. 7th Congress of the International Association of Bridge and Structural Engineers, Rio de Janeiro.
- [9] E.Giuriani, G.A.Plizzari, C.Schumm - 1991, "Role of Stirrups and Residual Tensile Strength of Cracked Concrete on Bond", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 117(1), pp. 1-18.
- [10] R.Tepfers - 1973, "A theory of bond applied to overlapped tensile reinforcement splices for deformed bars", Chalmers University of Technology, Publ. 73/2, Goteborg.
- [11] G.A.Plizzari, A.Franchi - 1996, "Le prove di aderenza nelle normative nazionali di alcuni paesi europei", Technical Report N.5.4, Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Brescia.
- [12] E.Giuriani, G.A.Plizzari - 1985, "Legami locali dell'aderenza in presenza di fessure di splitting", *Studi e Ricerche*, Scuola di specializzazione per le costruzioni in c.a., Politecnico di Milano, Vol. 7, 57-118.
- [13] G.A.Plizzari, M.A.Deldossi, S.Massimo - 1998, "Transverse reinforcement effects on anchored deformed bars.", *Magazine of Concrete Research*, 50(2), 161-177.
- [14] R.Fratesi, G.Moriconi, L.Coppola - 1996, "The Influence of Steel Galvanization on Rebars Behaviour in Concrete", in *Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction*, SCI, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, 630-641.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano gli ingegneri. Riccardo Canini, Enrico Guardini e Nausicaa Sartori per l'aiuto fornito nella conduzione delle prove di laboratorio e le elaborazioni numeriche. Si ringrazino anche i tecnici del Laboratorio Pietro Pisa dell'Università di Brescia e quelli del Laboratorio di Prove Materiali e Strutture dell'Università di Ancona per l'assistenza fornita nella preparazione dei provini e nella conduzione delle prove sperimentali.

La ricerca sperimentale per la caratterizzazione meccanica e l'aderenza dell'acciaio zincato è stata finanziata dalla Società Galvarebar S.p.A.