

# Nuovi sviluppi della ricerca sugli acciai da c.a.: duttilità, fatica oligociclica, acciaio zincato e prove su colonne in c.a. per zone ad alto rischio sismico

A. Franchi<sup>1</sup>, P. Crespi<sup>1</sup>, R. Fratesi<sup>2</sup>, G. Plizzari<sup>3</sup>, P. Riva<sup>3</sup>, P. Ronca<sup>1</sup>

1. Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano, Italy.
2. Dipartimento di Scienze dei Materiali e della Terra, Università di Ancona, Italy.
3. Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Brescia, Italy.

## *Introduzione*

In questo lavoro si vuole passare in rassegna una serie di ricerche appena terminate o attualmente in corso sugli acciai da c.a. Tali ricerche sono frutto della collaborazione industria-università, con una motivazione primaria che scaturisce da problemi di carattere normativo, che passano successivamente attraverso un percorso proprio della ricerca scientifica e che si spera possano alla fine del percorso contribuire ad una migliore conoscenza del prodotto e quindi sottintendere alle scelte che la normativa sia nazionale che europea dovranno prendere.

I problemi aperti nel dibattito nazionale ed internazionale sugli acciai da c.a. riguardano principalmente i seguenti punti:

1. *Il controllo della duttilità, particolarmente intesa sia come deformazione a carico massimo sia come rapporto tra lo sforzo di rottura e quello di snervamento; controllo della vita a fatica oligociclica o all'urto, intesa come proprietà indispensabile per la dissipazione dell'energia cinetica trasmessa alla struttura in cemento armato da un sisma o da evento eccezionale quale una esplosione;*
2. *Il controllo della durabilità delle armature e degli effetti della corrosione sulle loro proprietà meccaniche;*
3. *Lo studio dello sviluppo della cerniera plastica su prototipi di colonne in c.a. soggetti a carichi orizzontali che simulano l'azione del sisma;*
4. *sviluppo di una normativa cogente adeguata sia alle nuove tecnologie produttive che ad un utilizzo in cantiere semplice ed efficiente.*

Nel seguito vengono riferiti alcuni risultati delle ricerche effettuate o in corso su tali argomenti presso l'Università di Brescia ed il Politecnico di Milano con la collaborazione di imprese quali Ferriere Valsabbia, gruppo Leali, Ferriere Nord del gruppo Pittini, gruppo Alfa, gruppo Lucchini, Galtarossa del gruppo Riva, Feralpi.

In particolare :

- *con riferimento al primo punto si riferisce circa lo sviluppo di un modello analitico predittivo per l'acciaieria delle caratteristiche meccaniche delle barre d'armatura in funzione della composizione chimica, del trattamento termico e del raggio della barra che si vuole ottenere; si riferisce altresì su alcuni risultati sulle prove a fatica oligociclica;*
- *con riferimento al secondo si riferisce circa le prove meccaniche e di aderenza su barre zincate;*
- *con riferimento al terzo punto si presentano i risultati di prove su prototipi di colonne soggetti a carichi ciclici;*
- *con riferimento al quarto punto verranno esposte le linee principali della proposta Unsider al MMLL come contributo alla revisione del DM in corso.*

1. Un modello analitico per la predizione delle caratteristiche delle barre in funzione delle variabili di produzione e le prove di fatica oligociclica

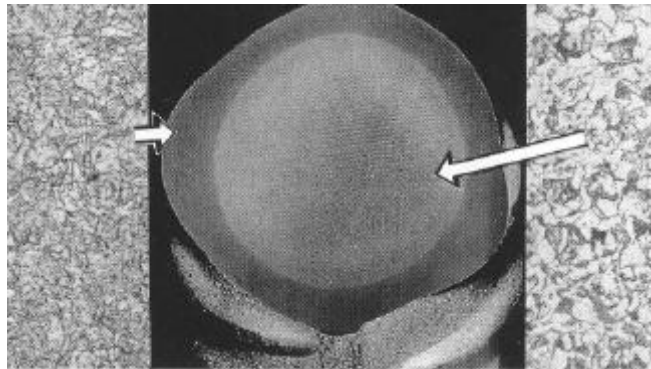


Figura 1.1: tipica micrografia al microscopio di barra “Tempcore o Termex”

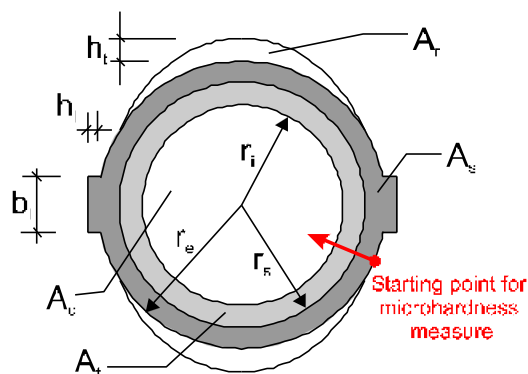


Figura 1.2: modello della sezione di una barra “Tempcore/Termex”

Si assumono come variabili di produzione:  $C_{eq}$ ,  $T_{eq}$ ,  $r_e$ ; il modello viene definito attraverso i seguenti punti:

1. La sezione viene suddivisa in un cuore, una corteccia ed una zona di transizione (si veda la micrografia e il modello geometrico sopra riportati); una tale geometria viene identificata tramite una campagna sperimentale ed un modello lineare di correlazione delle variabili geometriche (i raggi delle varie zone) e le variabili indipendenti di produzione ( $C_{eq}$ ,  $T_{eq}$ ,  $r_e$ )

2. Il raggio interno del cuore ed il raggio interno della corteccia vengono ben descritti tramite le seguenti relazioni:

$$r_i = 3.8414 \cdot C_{eq} + 0.0140 \cdot T_{eq} + 0.5887 \cdot r_e - 9.7029$$

$$r_s = 3.5320 \cdot C_{eq} + 0.0118 \cdot T_{eq} + 0.9539 \cdot r_e - 9.8056$$

3. Le aree delle varie porzioni sono funzioni quadratiche dei raggi:

$$A_c = \pi \cdot r_i^2, \quad A_t = \pi \cdot (r_s^2 - r_i^2), \quad A_s = \pi \cdot (r_e^2 - r_s^2), \quad A_r = \pi \cdot (r_{nom}^2 - r_e^2), \quad A_{nom} = \pi \cdot r_{nom}^2$$

4. Le tensioni di snervamento e di rottura sono state identificate mediante una campagna di prove meccaniche successive alle prove di cui in 1 e hanno fornito le seguenti relazioni lineari:

$$R_{ec} = 413.85 \cdot C_{eq} - 0.376 \cdot T_{eq} + 538.55$$

$$R_{mc} = 742.29 \cdot C_{eq} - 0.147 \cdot T_{eq} + 378.41$$

$$R_{es} = 353.33 \cdot C_{eq} - 0.765 \cdot T_{eq} + 1006.63$$

$$R_{ms} = 668.33 \cdot C_{eq} - 1.271 \cdot T_{eq} + 1275.00$$

$$R_{er} = 151.43 \cdot C_{eq} - 1.027 \cdot T_{eq} + 1067.42$$

$$R_{mr} = 351.09 \cdot C_{eq} - 0.437 \cdot T_{eq} + 682.96$$

Per la zona di transizione, di cui non sono state eseguite prove meccaniche dirette si è assunta una media dei valori tra cuore e corteccia:

$$R_{et} = \frac{R_{ec} + R_{es}}{2} \quad , \quad R_{mt} = \frac{R_{mc} + R_{ms}}{2}$$

5. La forza di snervamento e quella di rottura si ottengono adottando un modello in parallelo della barra come somma del contributo di cuore, cortecchia e zona intermedia:

Forza e tensione di snervamento:

$$F_e = R_{es} \cdot A_s + R_{ec} \cdot A_c + R_{et} \cdot A_t + R_{er} \cdot A_r \quad \rightarrow \quad R_e = \frac{F_e}{A_{nom}}$$

Forza e tensione ultima:

$$F_m = R_{ms} \cdot A_s + R_{mc} \cdot A_c + R_{mt} \cdot A_t + R_{mr} \cdot A_r \quad \rightarrow \quad R_m = \frac{F_m}{A_{nom}}$$

Nella seguente Figura 1.3 vengono riportati i risultati del modello analitico (linea continua) confrontati con i valori sperimentali della ricerca italiana (puntini) e i valori sperimentali (con interpolazione lineare) di una precedente ricerca portoghese.

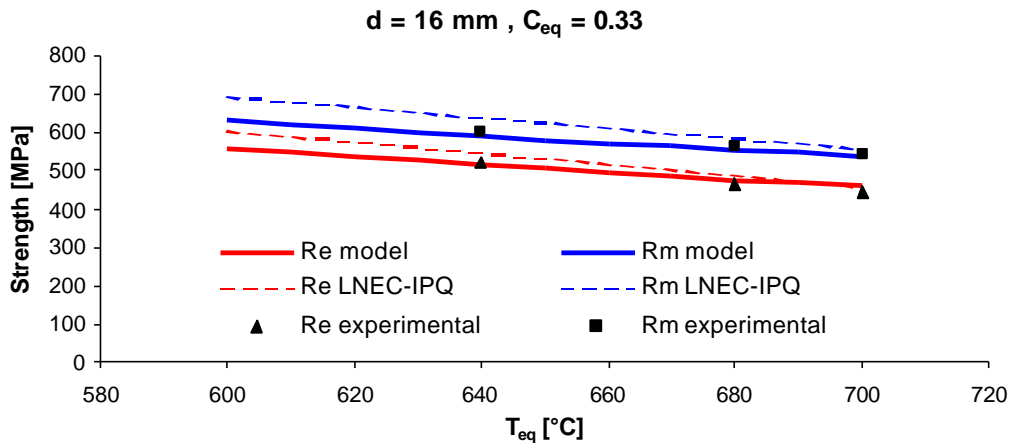


Figura 1.3: confronto tra modello e risultati sperimentali

Nel seguito viene riportata una tabella con i risultati delle prove oligocicliche su barre diametro 14 mm ottenute da una colata con i seguenti parametri chimici e di processo: C<sub>eq</sub> = 0.35%, T<sub>eq</sub> = 675÷685 °C. Le prove sono state eseguite su spezzoni di barra avente una lunghezza libera tra le teste della macchina di prova pari a l<sub>0</sub> = 10-diametri = 140 mm, in controllo di spostamento imponendo tre diversi valori dello spostamento massimo Δl: Δl/l<sub>0</sub> = 1%, 2.5%, 4%, ad una frequenza di 1 Hz. Sono stati provati tre differenti livelli di nervatura aventi un indice di aderenza pari a f<sub>R</sub> = 0.040, 0.056, 0.070.

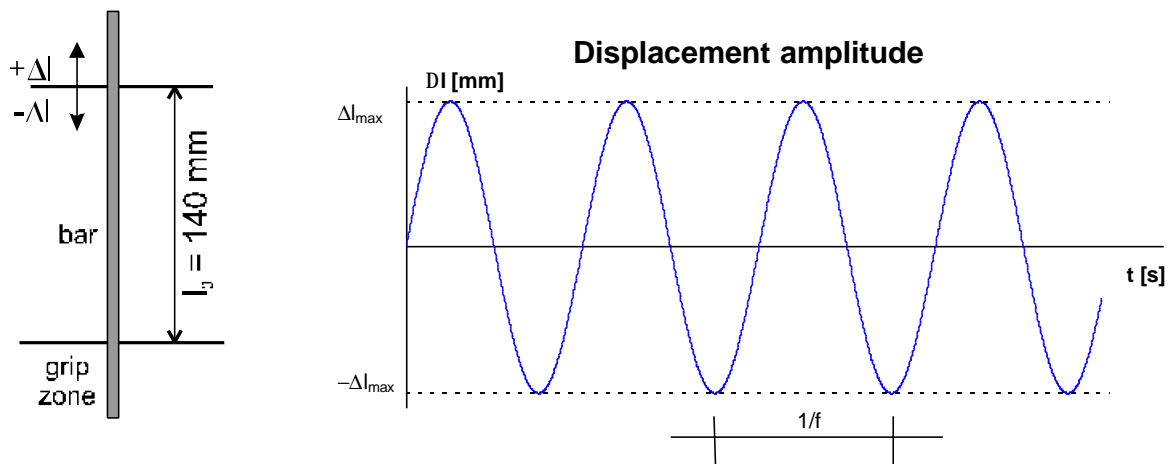


Figura 1.4: schema di prova e storia di carico

Tabella 1.1: riepilogo dei risultati delle prove di fatica oligociclica su barre di diametro 14 mm

$f_R$	Test	$F_{max}$ [kN]	$\Delta l_{max}$ [mm]	$F_{min}$ [kN]	$\Delta l_{min}$ [mm]	n° cycles	$E_d$ [J]	
$\Delta l_{max}/l_0 = 1\%$	No ribs	A	72,64	1,413	-73,98	-1,417	158	20439
		B	72,41	1,413	-77,23	-1,416	159	20602
		C	77,56	1,413	-73,22	-1,415	168	22089
		D	72,96	1,415	-77,00	-1,418	192	23452
		mean	73,89	1,414	-75,36	-1,417	169	21646
	0,040	A	73,66	1,412	-77,33	-1,422	76	10742
		B	74,46	1,412	-78,90	-1,421	77	11045
		C	75,94	1,414	-78,45	-1,395	66	9908
		D	74,52	1,397	-78,35	-1,400	63	9896
		mean	74,64	1,409	-78,26	-1,410	71	10398
	0,056	A	75,74	1,396	-78,66	-1,390	119	17913
		B	73,52	1,397	-78,62	-1,413	94	13601
		C	77,29	1,395	-78,84	-1,397	104	15674
		D	76,06	1,405	-78,86	-1,401	95	13943
		mean	75,65	1,398	-78,75	-1,400	103	15283
0,070	A	78,95	1,409	-82,65	-1,421	102	14967	
	B	77,40	1,411	-82,55	-1,424	71	10869	
	C	78,47	1,410	-81,98	-1,394	101	15335	
	D	78,10	1,392	-81,30	-1,393	74	9140	
	mean	78,23	1,406	-82,12	-1,408	87	12578	
$\Delta l_{max}/l_0 = 2,5\%$	0,040	A	77,24	3,548	-75,34	-3,550	15	4895
		B	77,18	3,549	-72,14	-3,546	15	4785
		mean	77,21	3,549	-73,74	-3,548	15	4840
	0,056	A	81,01	3,503	-78,23	-3,537	18	5995
		B	78,47	3,541	-77,30	-3,559	17	5706
		mean	79,74	3,522	-77,77	-3,548	18	5851
	0,070	A	81,92	3,553	-79,41	-3,558	13	4615
		B	82,03	3,552	-81,30	-3,561	17	5448
		mean	81,98	3,553	-80,35	-3,560	15	5032
$\Delta l_{max}/l_0 = 4\%$	0,040	A	78,61	5,662	-61,84	-5,651	8	4136
		B	78,77	5,661	-62,00	-5,655	8	4211
		mean	78,69	5,662	-61,92	-5,653	8	4174
	0,056	A	79,82	5,699	-64,30	-5,682	8	4436
		B	77,96	5,661	-62,73	-5,653	8	4325
		mean	78,89	5,680	-63,51	-5,668	8	4381
	0,070	A	83,01	5,706	-72,49	-5,690	8	4331
		B	82,52	5,703	-70,32	-5,691	7	3956
		mean	82,76	5,705	-71,41	-5,691	8	4144

## 2. La ricerca sulla protezione alla corrosione: gli acciai zincati

Fra i possibili accorgimenti per migliorare la resistenza alla corrosione delle armature nel calcestruzzo [1], 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 [2].

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 termoigrometrico 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'innescare della corrosione sulle armature di acciaio non zincato [3]. Il ritardo nella corrosione dell'acciaio, nel caso di armature zincate, comunque, non dipende solo dal maggior tempo necessario alle sostanze aggressive per raggiungere 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 rivestito, 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 [4, 5].

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 Figura 2.1. 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. La variazione della geometria delle nervature, che potrebbe influenzare l'aderenza della barra al calcestruzzo, è in realtà ininfluente se si controlla lo spessore di zinco applicato alla barra.

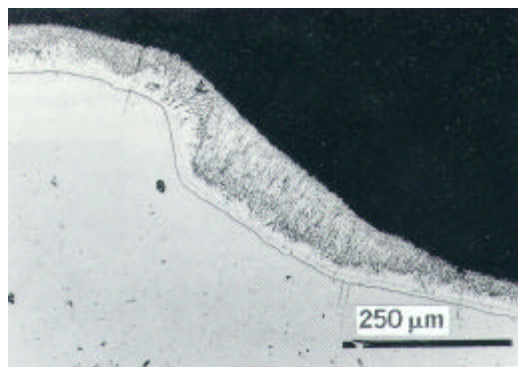


Figura 2.1 – Microstruttura del rivestimento di zinco in corrispondenza della base di una nervatura su una barra con diametro di 12 mm.

Alcune ricerche finanziate dalla società Galvarebar [6,7] hanno evidenziato che 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. Inoltre, l'aderenza di una barra nervata, dovuta soprattutto all'interazione meccanica tra 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 (Fig. 2.2 e 2.3). La Fig. 2.3c mostra che l'indice di aderenza  $I_R$  o  $F_R$  (D.M. 9.1.1996) in barre con valori appena superiore al minimo potrebbe risultare non verificato se lo spessore dello strato di zinco fosse eccessivo e riempisse le gole tra le nervature; come mostrato nella stessa figura, questo fenomeno si può evitare controllando lo spessore dello strato di zinco con un processo industriale.

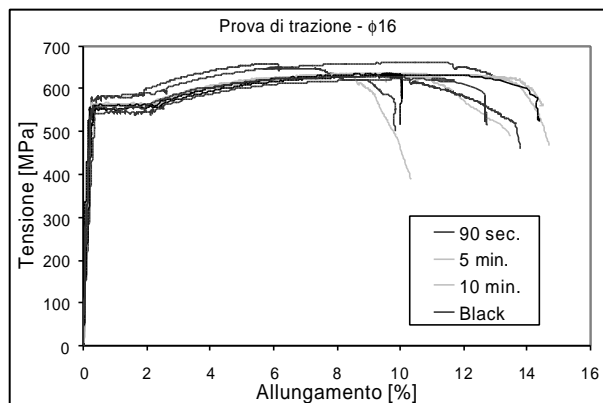


Figura 2.2 – Curve sforzo (di trazione) - deformazione per barre di acciaio Tempcore,  $\phi 16$ , non zincate e zincate a diversi tempi di immersione [6].

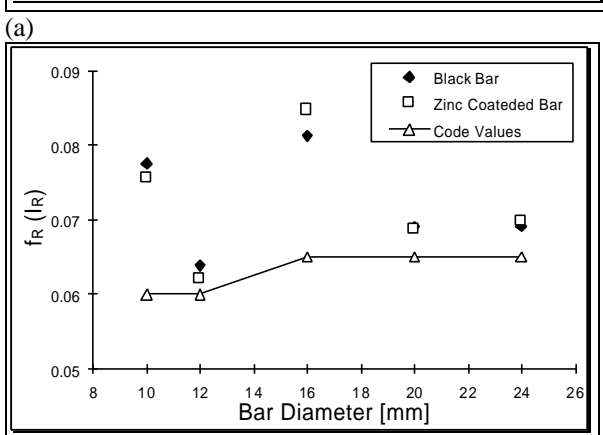
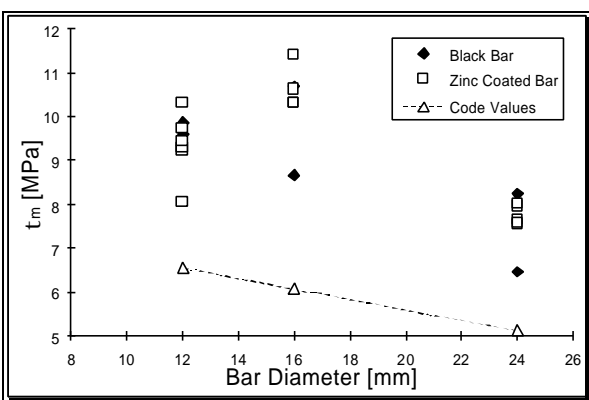
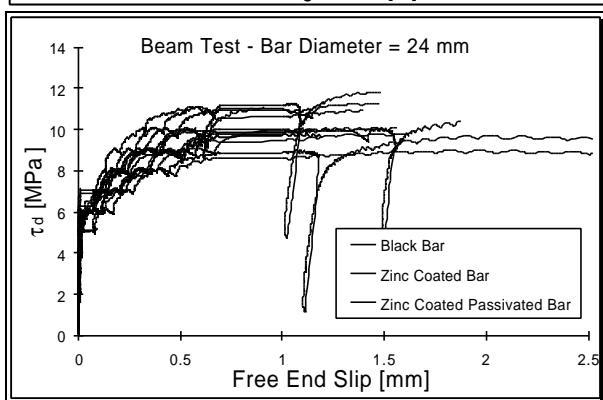


Figura 2.3 – (a) Diagramma dello sforzo di aderenza ( $\tau_d$ ) in funzione dello scorrimento dell'estremo libero della barra. (b) diagramma della resistenza media  $\tau_m$  con i valori minimi richiesti dalla normativa CNR UNI 10020 (1971); (c) diagramma dei valori di  $I_R$  in funzione del diametro della barra [6].

## 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 ambienti aggressivi di particolare entità (urbani, marini, industriali) e in tutti quegli ambienti ritenuti a rischio, come i 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 [5], 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%). Sicuramente le percentuali date sono destinate a crescere negli anni poichè ormai è noto che la durabilità delle strutture si migliora con minori investimenti effettuando una buona progettazione.

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 [9].

### ***NORMATIVE DI RIFERIMENTO***

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).

L'Ente Italiano di Normazione per l'Acciaio UNSIDER ha ottenuto, recentemente, il Segretariato per la stesura di una norma EN sugli acciai da c.a. zincati.

### ***3. Prove cicliche su prototipi di colonne in c.a.***

In questa sezione vengono riassunti i risultati sperimentali su 5 paia di prototipi di colonne in c.a. soggetti a carichi ciclici orizzontali a simulare l'effetto del sisma sugli stessi [21]. Un paio di prototipi è armata con barre tradizionali, mentre le altre quattro sono armate con barre zincate a due a due differenti vuoti per il processo di zincatura vuoti per il trattamento superficiale di passivazione. Vengono analizzati i tipici diagrammi isteretici carico – spostamento, momento – rotazione della cerniera plastica al piede della colonna, il degrado della resistenza con il numero dei cicli.

Cinque diversi tipi di rivestimento delle barre, tutte provenienti da una stessa colata, sono stati presi in considerazione dalla ricerca:

- Barre non zincate come prodotte dall'acciaieria;
- Barre zincate, così come prodotte dal normale processo di zincatura che prevede l'immersione nel bagno di zinco per circa 6-7 minuti, senza nessun trattamento superficiale di passivazione o protezione;
- Barre zincate mediante un processo di zincatura innovativo che prevede, dopo il bagno di zinco, un trattamento con aria insuflata in modo da eliminare lo zinco depositato in maniera non desiderata, senza nessuna protezione superficiale;
- Barre zincate come al punto precedente ma protette da uno strato superficiale a base di cromo esavalente; un tale trattamento è stato ottenuto mediante immersione delle barre zincate in una soluzione acquosa contenente ioni di cromo esavalente, in accordo alla norma ASTM A7676/A767 M-90, seguita da asciugatura a temperatura ambiente;
- Barre zincate con il processo innovativo di cui sopra, con un trattamento superficiale costituito da un film sottile di polimero acrilico ottenuto per immersione della barra in una soluzione acquosa contenente la suddetta sostanza organica seguita da asciugatura a 60°C.

La tensione media di snervamento delle barre è risultata di 582 MPa, la tensione di rottura pari a 668 MPa ( $f_u/f_y = 1.14$ ), mentre la deformazione a rottura misurata su 5 diametri è risultata pari al 22%.

Il calcestruzzo è stato confezionato con cemento classe 42.5R tipo CEM II/A-M (UNI-ENV 197) con un contenuto di alcali totale e solubili rispettivamente pari 1.04% e 0.76%, sotto forma di Na<sub>2</sub>O. Si sono utilizzati aggregati silicei, di forma arrotondata con diametro non superiore a 15 mm.

Il mix del calcestruzzo ha previsto le seguenti proporzioni: 250 kg/mc di cemento, 1960 kg/mc di aggregati; rapporto acqua/cemento (w/c) = 0.66. Tale rapporto è stato scelto appositamente in modo da rappresentare un calcestruzzo molto vicino a quelli prodotti nella pratica corrente. La resistenza media a compressione, su cubi di calcestruzzo, è risultata pari a 30 MPa.

La figura 3.1 seguente illustra la geometria e l'armatura del prototipo, che risulta simile a quella utilizzata in precedenza da Macchi et al. [17], Pipa e Carvahò [18], e Franchi et al. [19]. Tale prototipo è inteso simulare la risposta di una colonna in c.a. di 3.0 m di altezza (distanza tra la fondazione ed il primo piano), sotto l'ipotesi che la rotazione del primo piano sia impedita o trascurabile.

Il carico viene applicato imponendo lo spostamento orizzontale dell'estremo libero della colonna, a una distanza di 1.35 m dalla fondazione, attraverso un martinetto elettromeccanico e un telaio di contrasto, disponibile presso il Laboratorio

del Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano. Il blocco di calcestruzzo che simula la fondazione è stato fissato al pavimento mediante 8 tiranti di diametro 22 mm in acciaio al fine di evitare ogni possibile moto rigido. I provini sono stati strumentati in modo da poter misurare la forza orizzontale applicata, lo spostamento orizzontale della sezione caricata e la rotazione della cerniera plastica alla base della colonna. Le componenti di spostamento desiderate sono state acquisite mediante LVDTs (Linear Variable Differential Transformer) mentre la forza orizzontale esercitata dal martinetto mediante una cella di carico montata sul banco di prova in linea con il martinetto stesso. Le rotazioni della cerniera plastica della base della colonna sono state misurate mediante due coppie di LVDTs, collocate su una base di misura verticale rispettivamente di 90 e 180 mm, posizionate sul lato lungo della sezione rettangolare ad una distanza orizzontale di 180 mm. Tutti i dati sono stati acquisiti e memorizzati tramite PC.

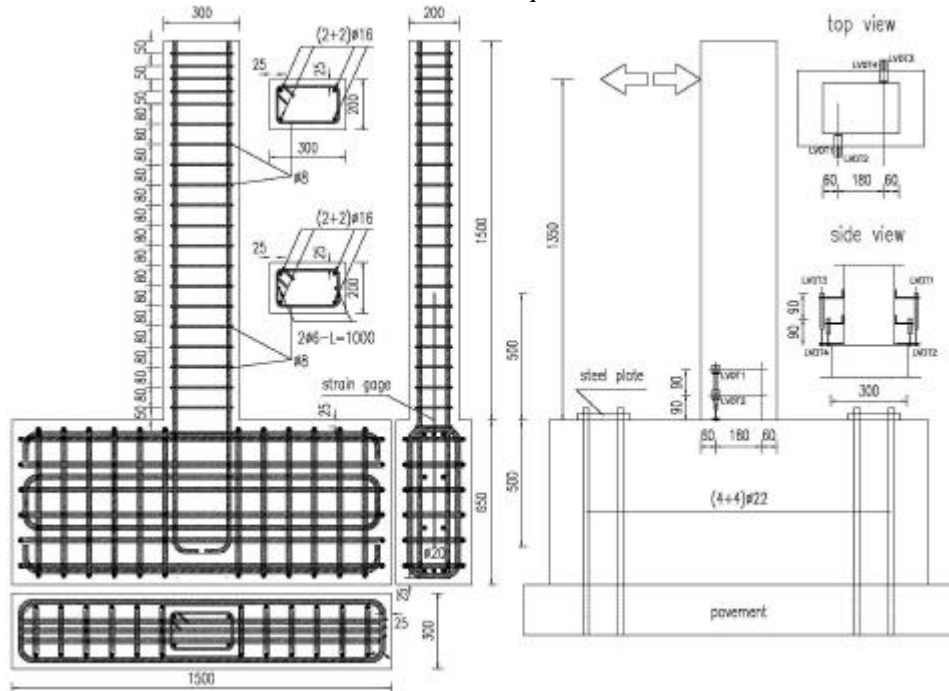


Figura 3.1 Geometria del prototipo colonna, armatura e strumentazione

Le Figure 3.2 e 3.3 mostrano il tipico comportamento isteretico carico – spostamento di una colonna duttile; esse corrispondono rispettivamente ai prototipi armati con barre tradizionali e con barre zincate secondo il processo di zincatura innovativo messo a punto dalla GALVAREBAR. Nel 1° ciclo, viene imposto uno spostamento orizzontale tale da indurre la prima plasticizzazione delle barre tese nella sezione di incastro della colonna; il valore assoluto di tale spostamento viene indicato con il simbolo di  $\delta_y$ . Nella seconda metà del 1° ciclo il segnale viene invertito fino al raggiungimento dello spostamento  $-\delta_y$ . Il 2°, 3° e 4° ciclo vengono effettuati pilotando lo spostamento fino a  $\pm 3 \delta_y$ . Il 5°, 6° e 7° ciclo con lo spostamento massimo e minimo pari a  $\pm 6 \delta_y$ . L'8° e il 9° ciclo rispettivamente a  $\pm 7 \delta_y$  e  $\pm 8 \delta_y$ . I valori della forza massima registrata nella prima parte del ciclo ( $F_{max}$ ) risulta sempre differente dalla forza minima registrata nella seconda metà del ciclo ( $F_{min}$ ); l'interpretazione di un tale comportamento sembra vada ricercata nella risposta inelastica del provino (acciaio – calcestruzzo) sin dalla prima metà del 1° ciclo, che disimmetrizza immediatamente il comportamento della colonna. Si può osservare che le curve sono sostanzialmente simili al variare del rivestimento e protezione delle barre.



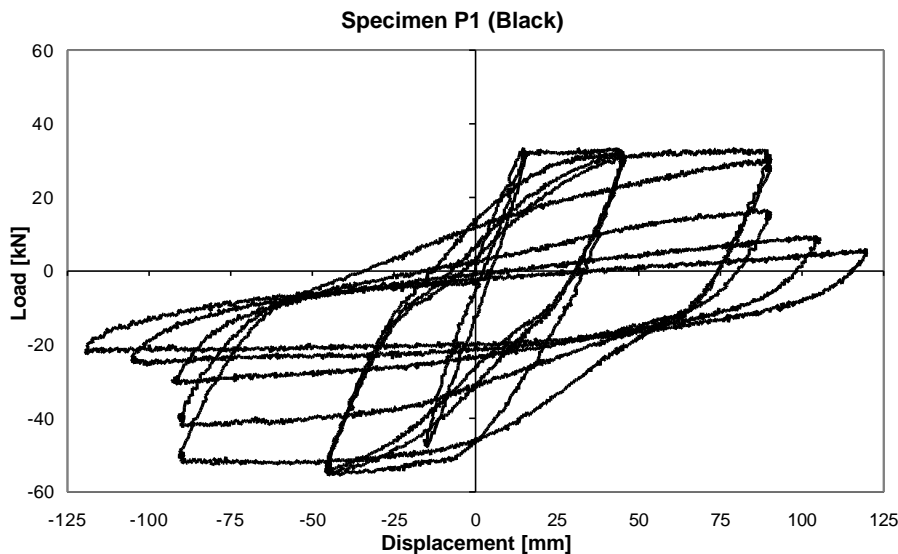


Figura 3. 2: Curva tipica carico-spostamento prototipo (P1) con barre senza protezione.

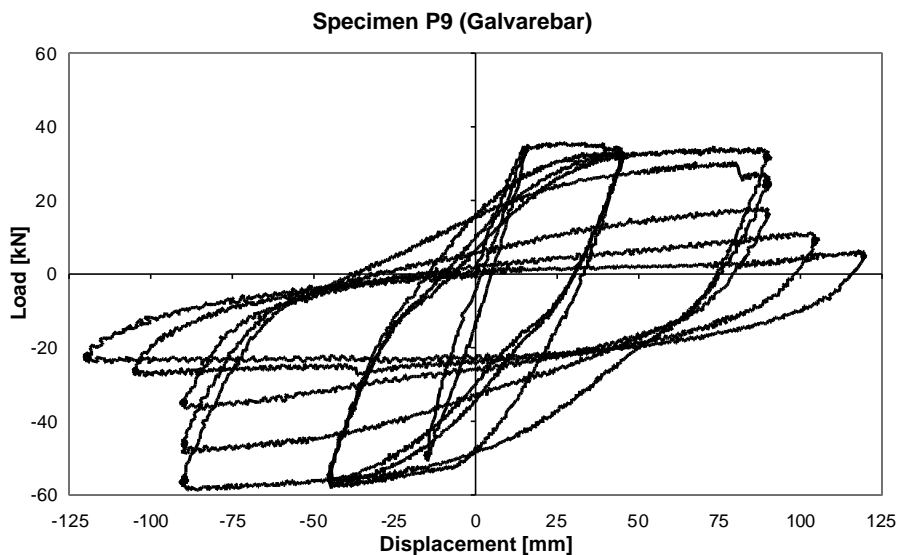


Figura 3. 3: curva tipica carico-spostamento del prototipo (P9) con barre protette mediante tecnologia innovativa.

Un tale comportamento viene ben evidenziato in Figura 3.4, dove si diagramma l'ampiezza del carico in ciascun ciclo ( $|F_{\max}|+|F_{\min}|$ ) in funzione del numero del ciclo. Si può osservare che tutte le curve sono simili e che le differenze possono essere attribuite ad una fisiologica variabilità di prototipi in c.a. La riduzione nella resistenza ultima del prototipo risulta primariamente dovuta alla inflessione delle barre compresse [19,20] nella cerniera plastica e allo schiacciamento ed espulsione del calcestruzzo compresso in corrispondenza dei cicli a  $\pm 6 \delta_y$  [17,18,19]. Curve simili si possono ottenere per come danno della rigidità strutturale.

La improvvisa variazione di resistenza durante il secondo ciclo a  $\pm 6 \delta_y$  nella curva di Fig. 3.3 è imputabile alla rottura della barra  $\phi 6$  utilizzata per il monitoraggio delle deformazioni nell'acciaio.

La Fig. 3.5 mostra un tipico diagramma sperimentale momento – rotazione della cerniera plastica, in questo caso riferita ai provini con barre zincate secondo il processo ottimizzato, tali curve si riferiscono al comportamento della cerniera fino all'espulsione del copriferro, quando la strumentazione (LVDTs) alla base della colonna è stata rimossa per evitare il possibile danneggiamento stesso degli strumenti e quando l'attendibilità delle misure stesse diventava dubbia. Una tale situazione si è verificata al cicli con spostamenti massimi pari a  $6 \delta_y$  (si veda Fig. 3.6).

Al termine delle prove il rivestimento di zinco non ha mostrato danneggiamenti significativi, anche nella zona della cerniera plastica dove il fenomeno della piega, raddrizzamento e ripiega avviene per tutti i cicli, oltre a fenomeni di attrito con il calcestruzzo che viene fessurato, schiacciato e quindi espulso.

La Fig. 3.6 mostra alcune fotografie dello sviluppo della cerniera plastica, con riferimento al pilastro (P3) costituito da barre rivestite dal film sottile di polimero acrilico; in particolare si può osservare la distribuzione delle fessure nel calcestruzzo teso dopo il sesto ciclo (a); l'espulsione del copriferro in calcestruzzo e l'instabilità della barra compressa (b); un dettaglio della barra presso in flessa (c). L'estensione della cerniera plastica, leggibile dall'estensione del calcestruzzo danneggiato (più di 3 staffe) risulta notevole ed indice di una eccellente duttilità. Ulteriori dettagli e commenti si possono trovare in [20].

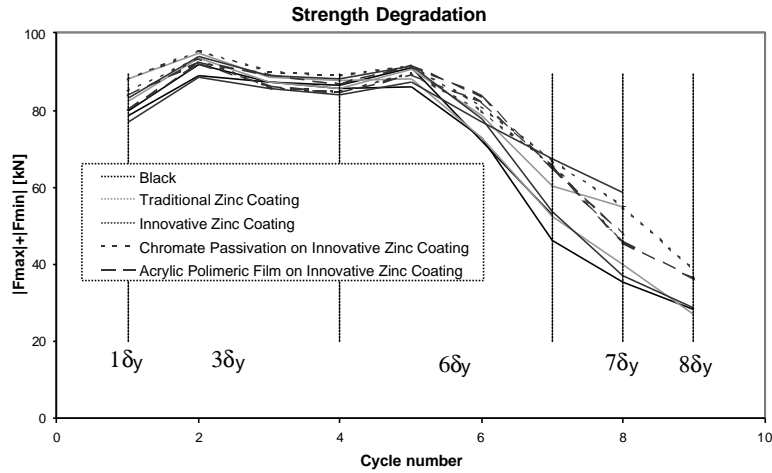


Figure 3. 4: Degrado della resistenza con il variare del numero di cicli.

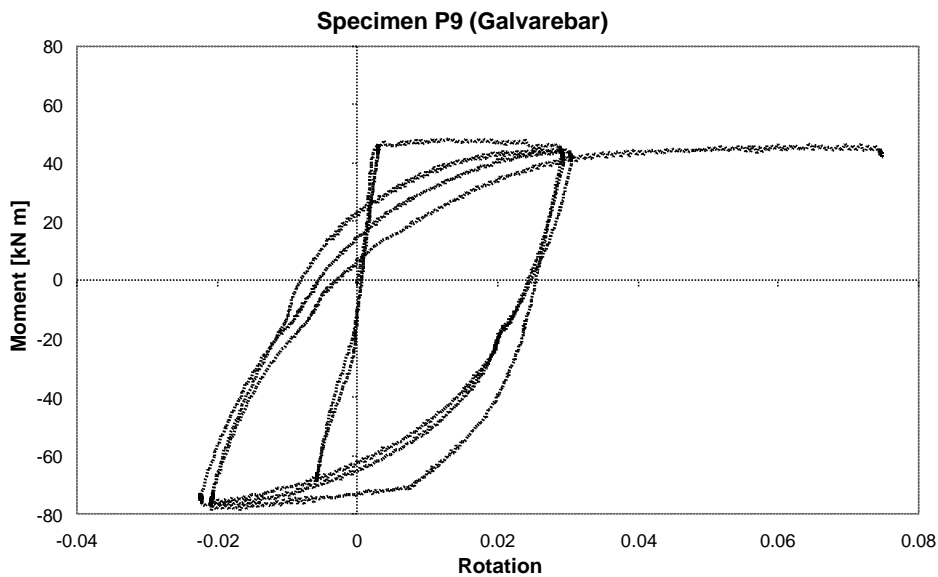


Figura 3.5: Curva momento–rotazione ottenuta dal prototipo (P9) con barre protette mediante processo innovativo.

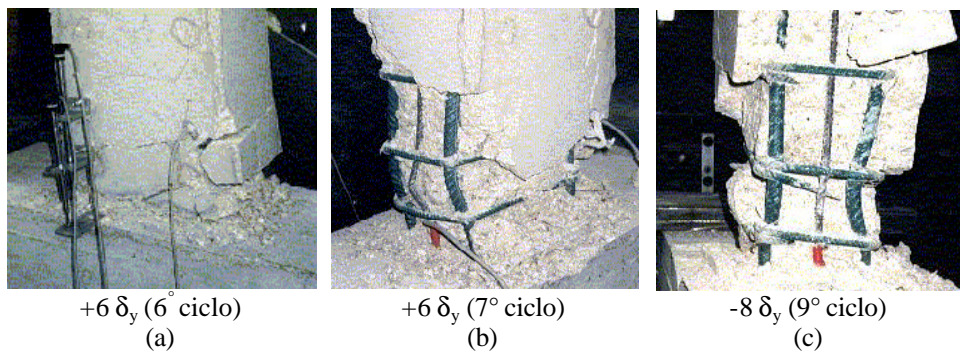


Figure 3.6: fotografie delle cerniere alla base delle colonne del prototipo con barre protette con film di polimero acrilico

#### 4. Aspetti normativi

Qui di seguito vengono ripresi alcuni punti qualificanti della proposta di revisione del D.M 1996 presentata al Ministero LLPP da UNSIDER.

I punti salienti di tale proposta sono:

1. viene considerato un solo tipo di acciaio B450;
2. per i rotoli è stato introdotto il diametro 5,5 mm ed eliminati i diametri 9 e 11 mm;
3. per le proprietà meccaniche viene proposto:
  - $(R_m/R_e)_{k=0,90} \geq 1,15$  per diametri > 16 mm;
  - $(R_m/R_e)_{k=0,90} \geq 1,13$  per diametri  $\leq 16$  mm;
  - $A_{gtk=0,90} \geq 7,5\%$  per diametri > 16 mm;
  - $A_{gtk=0,90} \geq 7\%$  per diametri  $\leq 16$  mm;
4. per le sagome d'armatura sono state introdotte alcune prescrizioni per:
  - le tolleranze geometriche per il taglio, la piega e la sagomatura;
  - la loro identificazione;
5. sono state introdotte prescrizioni per l'acciaio zincato.

Il sistema di certificazione segue la falsa riga della proposta contenuta nella prEN10080, Appendice ZA.

Di seguito vengono riportate le Tabelle D1 e D2 che riassumono i diametri e le proprietà meccaniche proposte.

Tabella D.1: Diametro nominale, area nominale della sezione trasversale e massa nominale

Diametro nominale mm	Barre	Rotoli e prodotti raddrizzati	Area nominale della sezione trasversale mm <sup>2</sup>	Massa nominale kg/m
	B450	B450		
5,5		x <sup>a</sup>	23,8	0,187
6,0	x	x	28,3	0,222
7,0		x <sup>a</sup>	38,5	0,302
8,0	x	x	50,3	0,395
10,0	x	x	78,5	0,617
12,0	x	x	113	0,888
14,0	x	x	154	1,21
16,0	x	x	201	1,58
20,0	x <sup>b</sup>		314	2,47
25,0	x <sup>b</sup>		491	3,85
28,0	x <sup>b</sup>		616	4,83
32,0	x <sup>b</sup>		804	6,31
40,0	x <sup>b</sup>		1256	9,86

a) Da impiegarsi solamente per la produzione di reti e tralicci.

b) Per le reti elettrosaldate e i tralicci il valore massimo del diametro nominale è 16 mm.

**Tabella D.2: Riassunto delle proprietà dei prodotti**

Tipo di prodotto	Barre	Rotoli <sup>a</sup>	Reti elettrosaldate	Tralicci
Geometria superficiale	Nervata	Nervata	Nervata	Nervata
Diametro nominale <sup>b</sup> [mm]	6 ÷ 40	5,5 ÷ 16	5,5 ÷ 16	5,5 ÷ 16
Tensione di snervamento $R_e$ [N/mm <sup>2</sup> ]	450 [ $C_v p=0,95$ ]		450 [ $C_v p=0,95$ ]	450 [ $C_v p=0,95$ ]
Rapporto $R_{e,act}/R_{e,nom}$ [-]	≤ 1,20 [ $C_v p=0,10$ ]		≤ 1,20 [ $C_v p=0,10$ ]	≤ 1,20 [ $C_v p=0,10$ ]
Rapporto $R_m/R_e$ [-]	≥ 1,13 [ $C_v p=0,90$ ] per d < 16 mm ≥ 1,15 [ $C_v p=0,90$ ] per d ≥ 16 mm ≤ 1,35 [ $C_v p=0,10$ ]		≥ 1,13 [ $C_v p=0,90$ ] ≤ 1,35 [ $C_v p=0,10$ ]	≥ 1,13 [ $C_v p=0,90$ ] ≤ 1,35 [ $C_v p=0,10$ ]
Allungamento al carico massimo $A_{gt}$ [%]	7,0 [ $C_v p=0,90$ ] per d < 16 mm 7,5 [ $C_v p=0,90$ ] per d ≥ 16 mm		7,0 [ $C_v p=0,90$ ]	7,0 [ $C_v p=0,90$ ]
Resistenza a fatica $2\sigma_A$ [N/mm <sup>2</sup> ]	150 [vedi 6.4.1.1]		100 [vedi 6.4.2.2]	-
Idoneità alla piega [-]	Prova di piega		Prova di piega sui componenti	Prova di piega sui componenti
Resistenza a taglio della saldatura [N]	-		0,3 $A \mathcal{R}_e$ <sup>c</sup>	vedi punto 5.4.6.4
Indice di aderenza $f_R$ [-]	Vedi Tabella 4			
Deviazione dalla massa nominale (singola barra o filo) [%]	± 4,5		± 4,5	± 4,5
Composizione chimica <sup>d</sup> [% in massa]	Carbonio ≤ 0,22 (0,24) <sup>e</sup> ; Zolfo ≤ 0,050 (0,055); Fosforo ≤ 0,050 (0,055); Azoto ≤ 0,012 (0,014) <sup>f</sup> , Rame ≤ 0,80			
Carbonio equivalente <sup>d</sup> [% in massa]	$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \leq 0,50(0,52) \text{ } ^f$			
a) Le prescrizioni sulle proprietà vanno applicate sui prodotti raddrizzati. b) Per i valori dei diametri individuali vedi la Tabella D.1. c) A: area nominale della sezione trasversale del filo. d) Tra parentesi: valore sul prodotto finito. e) È consentito superare il valore massimo del carbonio dello 0,03% in massa, a patto che il valore del carbonio equivalente sia diminuito dello 0,02% in massa. f) Contenuti di azoto più elevati sono consentiti in presenza di una sufficiente quantità di elementi fissanti l'azoto stesso.				

## 6. Conclusioni

La ricerca sui prodotti in acciaio da c.a. in Italia rappresenta uno stimolo per l'Università, una possibilità di crescita nel settore dello sviluppo di prodotto da parte del sistema delle imprese, una base di partenza solida per il formatore.

I problemi di comportamento legati ai cicli di carico ambientali, fatica elastica – fatica oligociclica – corrosione sotto sforzo sono dei traguardi che ci si pone per rispondere ad una domanda di strutture sempre più sicure (sisma) e durevoli (corrosione). La proposta normativa che prevede su tutto il territorio Italiano un acciaio 450 MPa estremamente duttile e con le stesse proprietà in tutte le parti componenti le gabbie d'armatura costituisce il punto più avanzato riscontrabile nei paesi d'Europa.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] P.Pedefferri – 1991, “Corrosione e protezione di strutture metalliche e in cemento armato negli ambienti naturali”, Edizioni CLUP, Milano.
- [2] A.A.Segues – 1995, “An Update on Corrosion Processes and Field Performance of Epoxy-Coated Reinforcing Steel”, Annual Report of COST 509 Workshop, Sevilla.
- [3] S.R.Yeomans – 1994, “Performance of Black, Galvanized, and Epoxy-Coated Reinforcing Steel in Chloride-Contaminated Concrete”, *Corrosion*, 50(1), 72-81.
- [4] D.Stark – 1984, “Measurements Techniques and Evaluation of Galvanized Reinforcing Steel in Concrete Structures in Bermuda”, ASTM-STP 713, 132-141.
- [5] CEB (Comité Euro-International du Béton) – 1992, “Protection Systems for Reinforcement”, Bulletin d'Information N.211.
- [6] A.Franchi, R.Fratesi, G.Moriconi e G.A.Plizzari, G.A. – 1999, “Caratteristiche meccaniche e di aderenza al calcestruzzo di barre di armatura in acciaio zincato”, Atti del Convegno *Giornate AICAP 99*, Torino, 4-6 Novembre 1999, Vol. 1, 53-62.
- [7] A. Franchi, R. Fratesi, G.A.Plizzari – 2001, “Seismic behavior of R.C. Columns with Zinc Coated Rebars”, in *CONSEC01*, Banthia N. Ed., Vancouver, BC, Canada, 18-20 Giugno 2001, (*In corso di pubblicazione*).
- [8] M.Luminari, M.Donferri, G.Bastianelli, E.Proverbio, M.Meloni, R.Rigacci – 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, ??.
- [9] EUROCODE No. 2, “Design of Concrete Structures - Part 1: General Rules and Rules for Buildings”, ENV 1992-1-1.
- [10] Sagues, A.A., Powers, R.G. and Kessler, R., “An update on corrosion processes and field performance on epoxy-coated reinforcing steel”, Proceed. of COST 521 workshop on Corrosion and protection of metals in contact with concrete, Sevilla (E), 4-9 Sept. 1995.
- [11] Stark, D. “Corrosion of reinforcing steel in concrete”, Ed. D.E. Tonini and J.M. Gaidis; ASTM STP 713, American Society for Testing Materials, Philadelphia, (1980), 132.
- [12] Andrade, M.C. and Macias, A., “Galvanized reinforcements in concrete”, *Surface Coatings-2*, Editors: A.D. Wilson, J.W. Nicholson and H.J. Prosser, Elsevier Applied Science, New York (1988) 137-182.
- [13] Fratesi, R., Moriconi, G. and Coppola, L., “The influence of steel galvanization on rebars behaviour in concrete”, in *Corrosion of reinforcement in concrete construction*, Edited by C.L. Page, P.B. Bamforth and J.W. Figg, Pub. By Royal Society of Chemistry (1996) 630-641.
- [14] EEC 94/60 directive of 20 december 94 with the XIV modify of EEC 76/769 directive.
- [15] Almeida, E., Diamantino, T.C., Figueiredo, M.O. and Sa, C., “Oxidising alternative species to chromium VI in zinc galvanized steel surface treatment. Part 1-A morphological and chemical study”, *Surface Coatings and Technology*, **106** (1998) 8-17.
- [16] EUROCODE No. 8, “Design provisions for earthquake resistance of structures”, ENV 1998-1-1 (1994).
- [17] Macchi, G., Pinto, P. and Sanpaolesi, L., “Ductility requirements for reinforcement under Eurocodes”, *Structural Engineering International*, **4** (1996) 249-254.
- [18] Pipa, M. and Carvaho, E.C., “Reinforcing steel characteristics for earthquake resisting structures”, Proceedings 10<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering, Vienna (1994) 2887-2892.
- [19] Franchi, A., Riva, P., Ronca, P., Roberti, R. and La Vecchia, M., “Failure modalities of reinforcement bars in reinforced concrete elements under cyclic loading”, *Studi e Ricerche*, Milan University of Technology, **17** (1996) 157-187.
- [20] Monti, G. and Nuti, C., “Nonlinear cyclic behaviour of reinforcing bars including buckling”, *Journal of Structural Engineering*, **118** (12) (1992) 3268-3284.
- [21] Franchi, A., Fratesi, R. and Plizzari, G.A., “Experimental study or R.C. columns with galvanized bars under cyclic loads”, Technical Report, Department of Civil Engineering, University of Brescia (2000).