

LA PREFABBRICAZIONE

Rivista mensile
della prefabbricazione e

ANNO 22 GIUGNO 1986

6

MAI
RICI

ALL'S

KORRUGAL E'...

ALLUMINIO

Dal principio
alla fine,
per sempre



Lorella Angelini ⁽¹⁾
Mario Collepari ⁽²⁾
Franco Cortiana ⁽³⁾
Silvano Zorzi ⁽⁴⁾

Calcestruzzo reoplastico rinforzato con fibre d'acciaio

Proprietà e applicazione nella realizzazione di tubi di grande diametro

Summary

The properties of a rheoplastic (flowable and non-segregating) steel fiber reinforced concrete have been studied. This concrete has been obtained by using both steel fibers (aspect ratio = 75, length dimension = 60 mm) and a hyperplasticizing admixture which can reduce water/cement ratio of about 40%.

Rheoplastic steel fiber reinforced concrete has been compared with plain concrete, steel fiber reinforced concrete and rheoplastic concrete. It has been tested compressive strength, flexural strength and ductility on prismatic specimens; tensile strength and ductility on small diameter pipes (inside diameter = 300 mm; thickness = 50 mm).

An external load crushing strength test, according to ASTM C497-72, has been conducted on large diameter pipes (inside diameter = 1600 mm; thickness = 140 mm) manufactured with rheoplastic steel fiber reinforced concrete. It has been calculated the equivalent conventional reinforcement on the basis of the 0,25 mm crack load.

The experimental results show that rheoplastic steel fiber reinforced concrete has a very high ductility and can be properly cast without any vibration thanks of the high flowability and loss of segregation.

Ref. Mario Catania

1. Introduzione

È noto che l'introduzione di fibre d'acciaio in un calcestruzzo produce un significativo incremento della resistenza meccanica a trazione per flessione e soprattutto della duttilità, vale a dire della capacità del materiale di continuare a sopportare carico dopo la formazione della prima fessura [1].

L'introduzione delle fibre nell'impasto cementizio produce una sensibile diminuzione della lavorabilità del materiale;

pertanto, a parità di consistenza, il calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio richiede, rispetto al calcestruzzo non fibroso, un maggior quantitativo d'acqua d'impasto. Il più alto rapporto acqua/cemento si traduce in una diminuzione di tutte le caratteristiche meccaniche della pasta cementizia [2] fuorché della resistenza a trazione che viene garantita dalla presenza delle fibre.

Sono attualmente disponibili in commercio additivi superfluidificanti che consentono di produrre calcestruzzi molto fluidi, non segregabili e a basso rapporto acqua/cemento [3]. La riduzione d'acqua con l'impiego dei superfluidificanti è dell'ordine del 25%. Recentemente sono stati prodotti additivi ancor più efficaci, definiti « iperfluidificanti » [4], capaci di ridurre il rapporto acqua/cemento di circa il 40%.

Sulla base delle considerazioni precedenti, si è ritenuto interessante valutare l'azione combinata delle fibre d'acciaio e dell'additivo iperfluidificante al fine di produrre calcestruzzi reoplastici rinforzati con fibre d'acciaio idonei per la realizzazione di strutture di non elevato impegno statico, nelle quali la funzione della armatura lenta tradizionale venga svolta dalle fibre d'acciaio. Una siffatta tecnologia, accanto ai vantaggi tecnici che derivano dallo sfruttare le proprietà del calcestruzzo reoplastico fibroso, presenta l'indubbio vantaggio economico di evitare la realizzazione e la posa in opera della armatura metallica, che in strutture di geometria non standardizzata comporta un notevole allungamento dei tempi di lavoro.

Il presente studio è articolato in due fasi: nella prima si è cercato di evidenziare le proprietà del calcestruzzo reoplastico rinforzato con fibre d'acciaio mediante un confronto con le proprietà del calcestruzzo fibro-rinforzato (non additivato), del calcestruzzo reoplastico (non fibrorinforzato) e del calcestruzzo ordinario (non fibrorinforzato e non additivato); nella seconda, riprendendo un tema che Henry [5] ha iniziato a investigare, sono state studiate le prestazioni di tubi di grande diametro in calcestruzzo reoplastico rinforzato con fibre d'acciaio realizzati con la tecnica del colaggio e senza vibrazione.

2. Parte Sperimentale

2.1 Materiali impiegati

Tutti i calcestruzzi sono stati confezionati impiegando cemento Portland 425 ad un dosaggio nominale di 400 kg/m³ e inerte alluvionale con diametro massimo di 20 mm costituito dal 40% di sabbia con modulo di finezza di 2,95 e dal 60% di ghiaia con modulo di finezza di 6,47. Negli impasti additivati si è fatto uso di un additivo iperfluidificante (RHEOBUILD 2000) dosato a 2 litri per quintale di cemento che consente una riduzione dell'acqua di impasto del 40%. Gli impasti fibrosi sono stati realizzati aggiungendo alla miscela asciutta composta da cemento e inerti, fibre DRAMIX ZC 60/80 aventi lunghezza 60 mm e diametro 0,8 mm, sagomate alle estremità per incrementare l'aderenza alla matrice di calcestruzzo e unite in pacchetti mediante colla idrosolubile.

Negli impasti è stata introdotta una quantità d'acqua necessaria per ottenere una lavorabilità compresa tra 20 e 24 cm di slump.

Il peso specifico dei calcestruzzi è variato dal valore di 2425 kg/m³ per l'impasto non fibrorinforzato e non additivato, al valore 2550 kg/m³ relativo all'impasto fibrorinforzato e additivato.

Le caratteristiche degli impasti studiati sono riportate in tabella 1.

⁽¹⁾ Centro Ricerche MAC Treviso.

⁽²⁾ Dipartimento di Scienza dei Materiali, Facoltà di Ingegneria, Università Ancona.

⁽³⁾ Studio IN.CO., Milano.

⁽⁴⁾ Studio IN.CO., Milano.

Tabella 1. Caratteristiche degli impasti confezionati con 400 kg/m³ di cemento Portland 425 e inerte alluvionale avente diametro massimo di 20 mm

	<i>a</i> calcestruzzo ordinario	<i>b</i> calcestruzzo fibro-rinforzato	<i>c</i> calcestruzzo reoplastico	<i>d</i> calcestruzzo reoplastico fibro-rinforzato
Add. iperfluidificante (%)	/	/	2	2
Fibre d'acciaio (kg/m ³)	/	75	/	75
Slump (cm)	22	20	24	22,5
Acqua/cemento	0,59	0,62	0,32	0,36
Peso specifico (kg/m ³)	2425	2437	2500	2550

2.2 Tipologia dei manufatti e modalità di realizzazione

Impiegando gli impasti specificati in tabella 1 sono stati realizzati 40 cubetti 10 × 10 × 10 cm, 25 travetti 10 × 10 × 40 cm e 8 tubi aventi DN (diametro nominale) = 30 cm (diametro interno = 30 cm, diametro esterno = 40 cm, lunghezza = 70 cm). Impiegando il solo impasto *d* (calcestruzzo reoplastico fibrorinforzato) sono stati confezionati 2 tubi DN = 160 (diametro interno = 160 cm, diametro esterno = 188 cm, lunghezza = 100 cm).

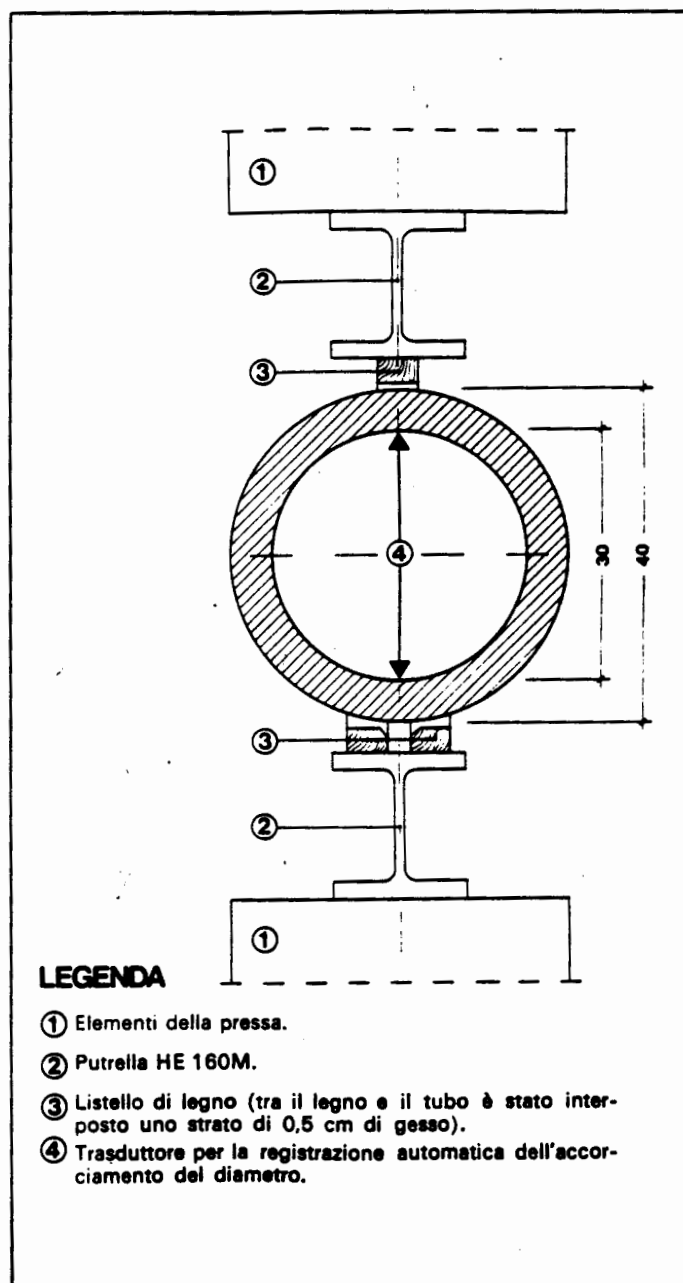
I cubetti 10 × 10 × 10 cm, i travetti 10 × 10 × 40 cm e i tubi DN = 30 cm sono stati realizzati gettando il calcestruzzo all'interno di casseri metallici ancorati su una piattaforma vibrante. Per i due tubi in calcestruzzo reoplastico fibrorinforzato aventi DN = 160 cm, si è impiegato un cassero di legno poggiato al suolo e, in mancanza di un vibratore a parete, si è rinunciato all'uso di un vibratore ad ago che avrebbe favorito l'iso-orientamento delle fibre; il calcestruzzo è stato gettato all'interno del cassero in un caso procedendo con getti di piccolo spessore (10-20 cm) e pestellando accuratamente (tubo I) e nell'altro realizzando due grossi strati (40-50 cm) in modo continuo ed evitando qualunque sistema di compattazione (tubo II).

Tutti i manufatti sono stati maturati alle condizioni termogrometriche di 20 °C e U.R. = 95% all'infuori dei tubi aventi DN = 160 cm che sono stati maturati all'aperto ad una temperatura ambiente variabile tra 5-10 °C durante la notte e 20-25 °C durante il giorno.

2.3 Apparecchiatura e modalità di prova

I cubetti 10 × 10 × 10 cm realizzati con gli impasti *a*, *b*, *c*, *d* sono stati sottoposti a 1, 3, 7 e 28 giorni alla prova di rottura a compressione in accordo con la normativa UNI 6132-72.

I travetti 10 × 10 × 40 cm confezionati con gli impasti *a*, *b*, *c*, *d*, sono stati sottoposti a 7 e 28 giorni di stagionatura alla prova di rottura a flessione con doppio carico simmetrico, in accordo con la normativa ASTM C-78-82 e UNI 6133-83. A 28 giorni di stagionatura i travetti 10 × 10 × 40 cm, realizzati con gli impasti *a*, *b*, *d* sono stati sottoposti ad una prova di rottura a flessione condotta registrando i valori della deflessione in mezz'ora in corrispondenza di ogni aumento del carico applicato. Tali valori hanno permesso di ricavare le curve carico-deflessione che consentono una valutazione della duttilità del materiale, vale a dire della sua capacità di continuare a sopportare carico a

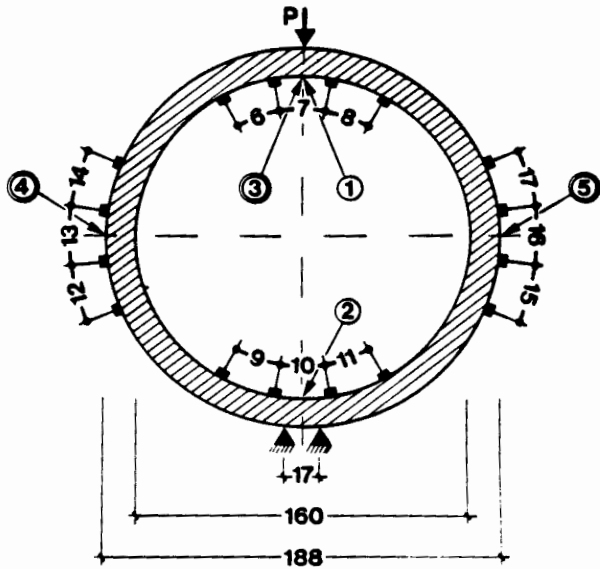


LEGENDA

- ① Elementi della pressa.
- ② Putrella HE 160M.
- ③ Listello di legno (tra il legno e il tubo è stato interposto uno strato di 0,5 cm di gesso).
- ④ Trasduttore per la registrazione automatica dell'accorciamento del diametro.

Fig. 1. Schema dell'apparecchiatura per la prova di rottura allo schiacciamento relativo al tubo DN = 30 cm.

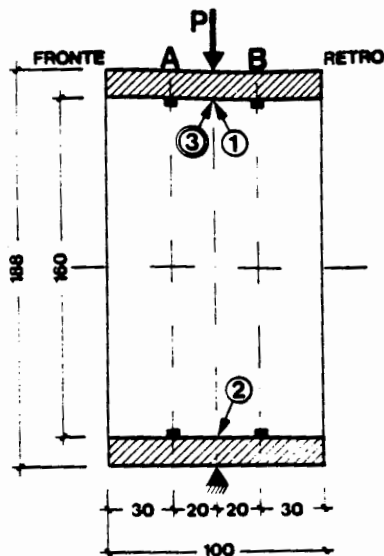
SEZIONE TRASVERSALE



LEGENDA

- ① ② : Comparatori elettrici millesimali con base = 10 cm.
- ③ ④ ⑤ : Flessimetri centesimali.
- 6 - 7 - 10 - 16 - 17 : Misurazioni con estensimetro meccanico (precisione 0,00254 mm) su basi poste a 25,4 cm di distanza reciproca.

SEZIONE LONGITUDINALE



deformazione pronunciata, quando sono comparse una o più fessure.

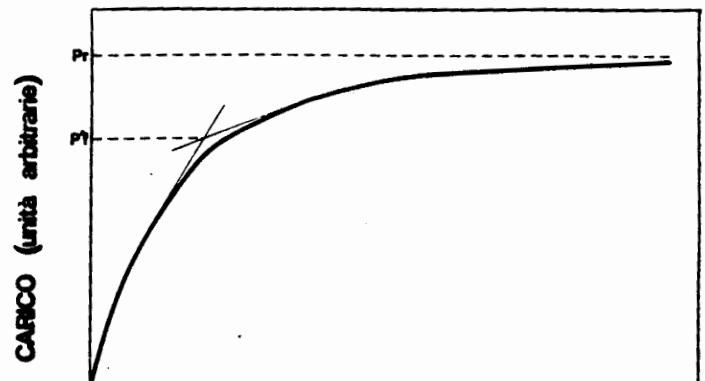
Sui tubi DN = 30 cm confezionati con gli impasti *a*, *b*, *c*, *d*, sono state svolte a 28 giorni prove di rottura alla pressione interna secondo le raccomandazioni dell'Associazione Nazionale di Ingegneria Sanitaria [6]: è stata rilevata la pressione in corrispondenza della quale sono comparsi trasudii localizzati (pressione di trasudamento), e la pressione coincidente con la formazione di fessure passanti nella parete del tubo e visibile fuoriuscita d'acqua (pressione di rottura). Impiegando gli impasti *a*, *b*, *d*, su tubi DN = 30 cm sono state condotte a 28 giorni prove di rottura allo schiacciamento in accordo con le raccomandazioni dell'Associazione Nazionale di Ingegneria Sanitaria e con la normativa ASTM C-497-72. L'apparecchiatura di prova è illustrata in figura 1 in cui è stato schematicamente rappresentato anche il trasduttore inserito verticalmente all'interno della direttrice mediana del tubo che ha permesso la registrazione automatica dell'accorciamento del diametro in funzione del carico applicato.

Sui tubi DN = 160 cm confezionati con l'impasto *d*, è stata svolta a 90 giorni una prova di rottura allo schiacciamento secondo le sopracitate normative impiegando l'apparecchiatura di controllo e misura illustrata nelle figure 2 e 3 in cui sono riportate rispettivamente la sezione trasversale e longitudinale del manufatto. L'apparecchiatura risultava costituita da due comparatori elettrici per la misura della deformazione del tubo lungo la direttrice mediana, da tre flessimetri per la misura dell'accorciamento e dell'allungamento del diametro mediano del tubo rispettivamente in direzione verticale e orizzontale, da trentadue basi per rilevazione con estensimetro meccanico della deformazione del tubo lungo due direttrici simmetriche rispetto alla centrale. Per ognuno dei due tubi, i dati raccolti mediante la suddetta apparecchiatura hanno permesso di definire ventotto curve carico deformazione dalle quali è stato possibile ricavare i valori medi del carico di prima fessurazione (P_f) e del carico massimo raggiunto (P_r). Come illustrato in figura 4, il carico P_f è stato ricavato per estrapolazione individuando nella curva i due rami a diversa pendenza, mentre il carico P_r è stato ottenuto individuando l'asintoto cui tende la curva per deformazione tendente all'infinito.

Fig. 2. Schema della strumentazione di controllo e misura relativa al tubo DN = 160 cm; sezione trasversale.

Fig. 3. Schema della strumentazione di controllo e misura relativa al tubo DN = 160 cm; sezione longitudinale.

Fig. 4. Schematizzazione del procedimento grafico seguito per estrapolare i valori P_f e P_r .



3. Risultati e discussione

3.1 Resistenza meccanica a compressione e flessione su provini

Nella tabella 2 sono raccolti i risultati delle prove di resistenza a compressione (R_c) e a flessione (R_f) condotte sui quattro impasti definiti in tabella 1. Come era facile ipotizzare e come è noto nella letteratura tecnica [7], la resistenza meccanica a compressione dei calcestruzzi non viene sostanzialmente modificata dalla presenza delle fibre e, a parità di grado di compattazione, dipende soltanto, e in maniera direttamente proporzionale, dal rapporto acqua/cemento.

Al contrario, la resistenza meccanica a flessione risulta funzione sia del rapporto acqua/cemento che dell'azione delle fibre, come si può verificare paragonando in tabella 2 le prestazioni degli impasti *b* e *c*: il calcestruzzo fibrorinforzato mostra una resistenza a flessione superiore a quella del calcestruzzo reoplastico, nonostante che la resistenza a compressione del calcestruzzo reoplastico sia più del doppio di quella del calcestruzzo fibrorinforzato.

Le prove di flessione condotte rilevando la curva carico-deflessione, come descritto al paragrafo 2.3, sono riportate in figura 5. Assumendo come misura della duttilità del materiale l'area sottesa dalla curva [8], si osserva il comportamento fragile del calcestruzzo ordinario, il comportamento duttile del calcestruzzo fibrorinforzato e l'incremento di duttilità che consegue all'impiego di calcestruzzo reoplastico fibrorinforzato.

3.2 Rottura per pressione interna e allo schiacciamento su tubi DN = 30 cm

I risultati della prova di rottura alla pressione interna, sono riportati in tabella 3 e possono essere interpretati nel modo seguente. L'incremento di prestazioni che si riscontra nel

calcestruzzo fibrorinforzato passando dalla pressione di trasudamento a quella di rottura si deve all'azione delle fibre d'acciaio che contengono il fenomeno di propagazione delle fessure. La coincidenza del carico di fessurazione con quello di rottura evidenziata nei tre restanti impasti, nel caso del calcestruzzo ordinario e del calcestruzzo reoplastico rappresenta una conferma del comportamento fragile del materiale; nel caso del calcestruzzo reoplastico fibrorinforzato si deve all'elevato grado di compattazione raggiunto nel conglomerato e alle particolari modalità di esecuzione della prova che ha seguito tempi più veloci rispetto a quelli richiesti dalle raccomandazioni dell'Associazione Nazionale d'Ingegneria Sanitaria per il test di impermeabilità.

I risultati della prova di rottura allo schiacciamento, riportati in figura 6 confermano in maniera precisa quanto già osservato mediante la prova condotta su travetti di cui al paragrafo precedente: il calcestruzzo ordinario presenta comportamento fragile, il calcestruzzo fibrorinforzato comportamento duttile, il calcestruzzo reoplastico fibrorinforzato comportamento duttile con i più elevati valori del carico poiché quanto più compatta è la matrice cementizia tanto maggiore risulta l'energia richiesta per il graduale sfilamento delle fibre.

3.3 Rottura allo schiacciamento su tubi DN = 160 cm

Nella serie di figure che va da 7 a 12 sono riportate le curve carico-deformazione ricavate mediante la prova di rottura allo schiacciamento condotta sul tubo I (vedi paragrafo 2.2); nella serie che va da 13 a 18 sono riportate le curve relative alla prova condotta sul tubo II. Facendo riferimento all'apparecchiatura di controllo e misura descritta al paragrafo 2.3, nell'ambito di ciascuna serie la prima figura (7 e 13) riporta l'andamento carico-deformazione unitaria rilevato mediante comparatori elettrici; la seconda figura (8 e 14) l'andamento carico-deformazione assoluta rilevato mediante flessimetri; le restanti quattro figure l'anda-

Tabella 2. Resistenze meccaniche medie in MPa a compressione (R_c) e a flessione (R_f) relativamente agli impasti specificati in tabella 1

Tempo (giorni)	a calcestruzzo ordinario		b calcestruzzo fibro-rinforzato		c calcestruzzo reoplastico		d calcestruzzo reoplastico fibro-rinforzato	
	R_c	R_f	R_c	R_f	R_c	R_f	R_c	R_f
1	11,0	—	10,9	—	31,8	—	26,9	—
3	23,5	—	21,9	—	57,3	—	56,0	—
7	31,4	6,1	32,6	7,2	71,5	7,1	70,3	8,7
28	42,8	6,6	38,5	10,6	85,0	8,4	83,5	12,0

Tabella 3. Pressioni di trasudamento e di rottura a 28 giorni su tubi DN = 30 cm

	a calcestruzzo ordinario	b calcestruzzo fibro-rinforzato	c calcestruzzo reoplastico	d calcestruzzo reoplastico fibro-rinforzato
Pressione di trasudamento (atm)	11,0	7,0	13,0	15,0
Pressione di rottura (atm)	11,0	10,0	13,0	15,0

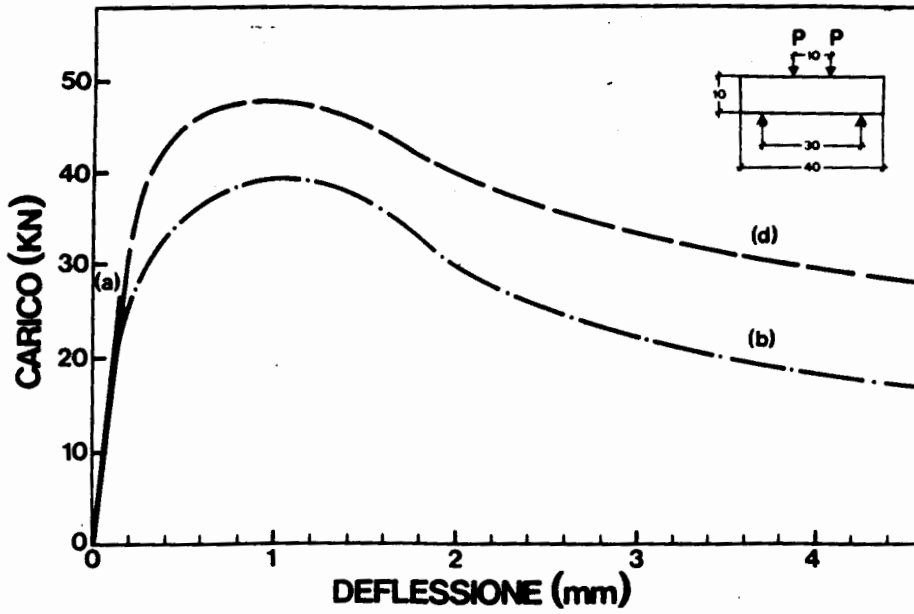


Fig. 5. Curve carico-deflessione a 28 giorni di travetti 10 x 10 x 40 cm confezionati in calcestruzzo ordinario (a), fibrorinforzato (b), reoplastico fibrorinforzato (d).

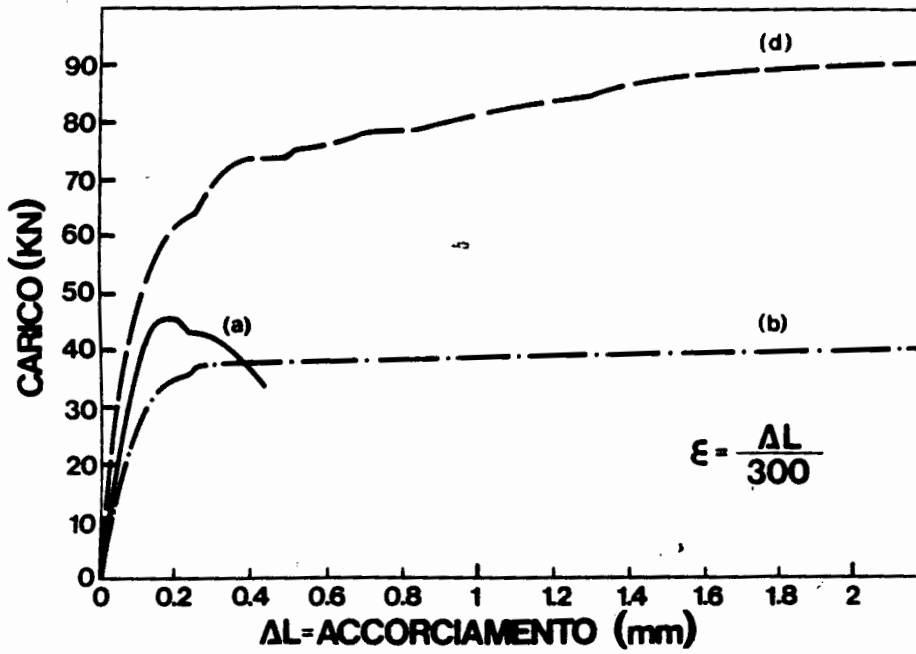


Fig. 6. Curve carico-deformazione a 28 giorni dei tubi DN = 30 cm confezionati in calcestruzzo ordinario (a), fibrorinforzato (b), reoplastico fibrorinforzato (d).

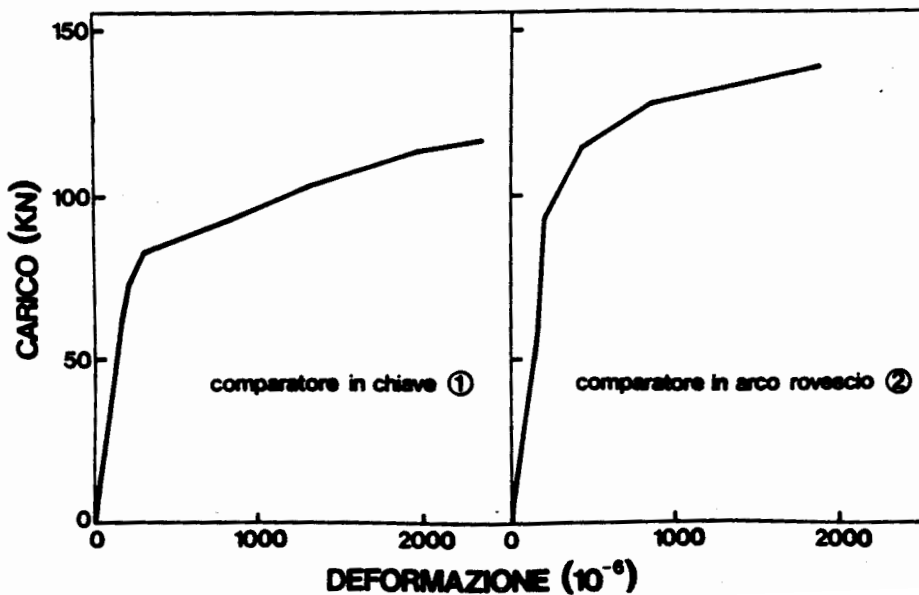


Fig. 7. Tubo I: curve carico-deformazione unitaria rilevata mediante comparatori elettrici ① - ②.

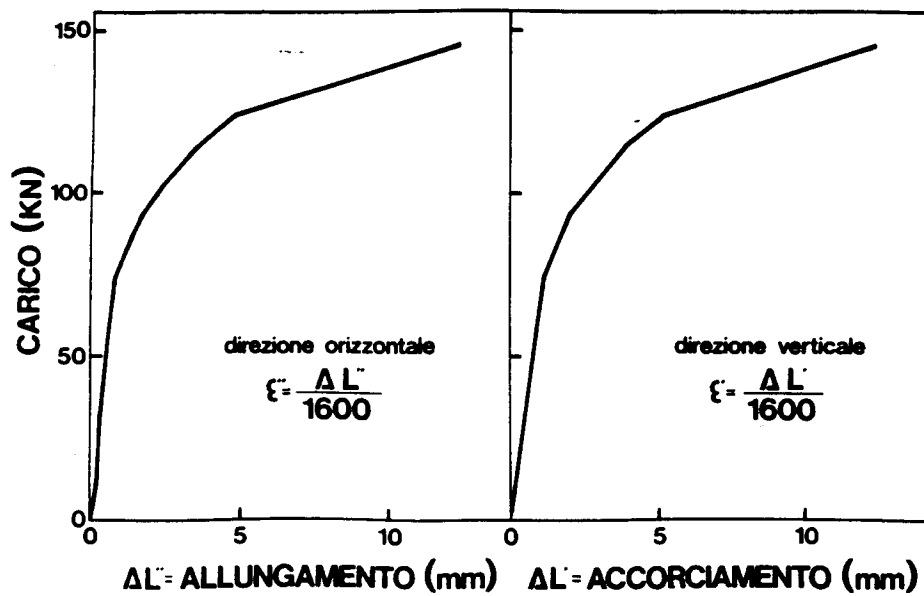


Fig. 8. Tubo I: curva carico-deformazione rilevata mediante flessimetri in chiave ③ e alle reni ④ e ⑤ (vedi figg. 2 e 3).

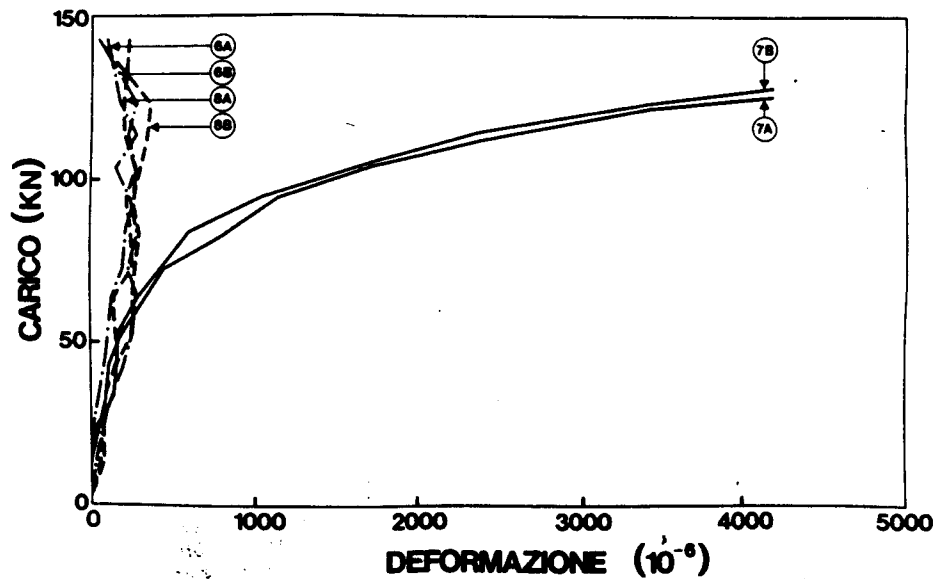


Fig. 9. Tubo I: curva carico-deformazione unitaria in chiave rilevata mediante estensimetro meccanico (vedi figg. 2 e 3).

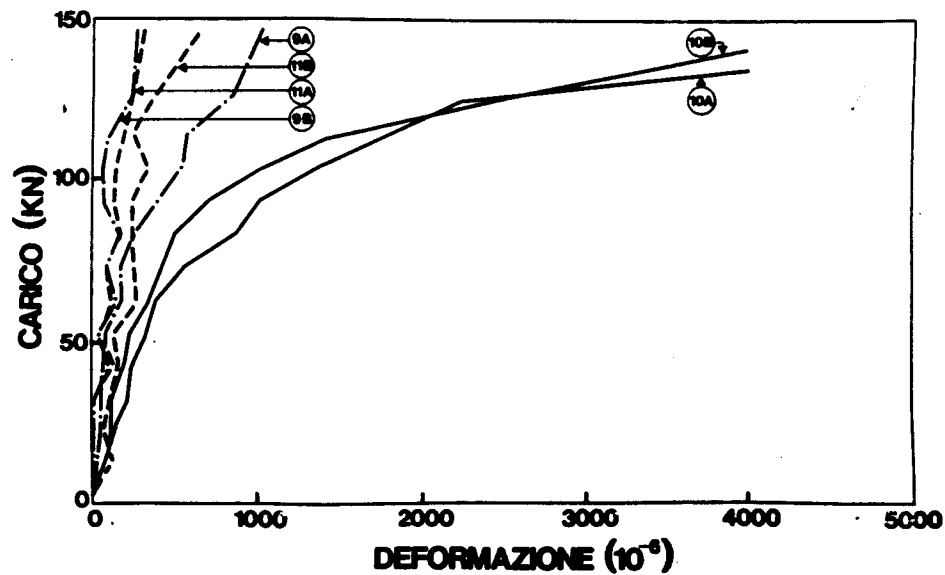


Fig. 10. Tubo I: curva carico-deformazione unitaria in arco rovescio rilevata mediante estensimetro meccanico (vedi figg. 2 e 3).

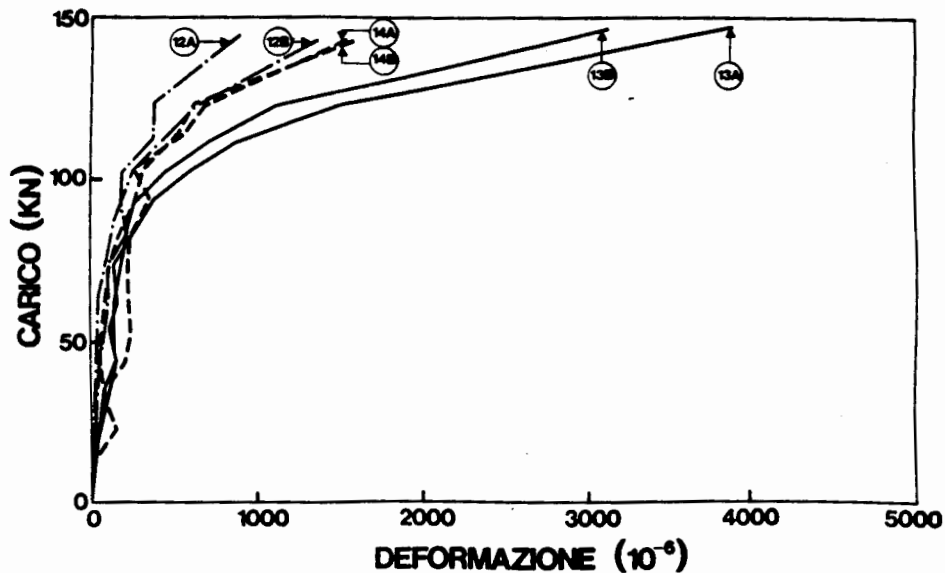


Fig. 11. Tubo I: curva carico-deformazione unitaria al rene sinistro rilevata mediante estensimetro meccanico (vedi figg. 2 e 3).

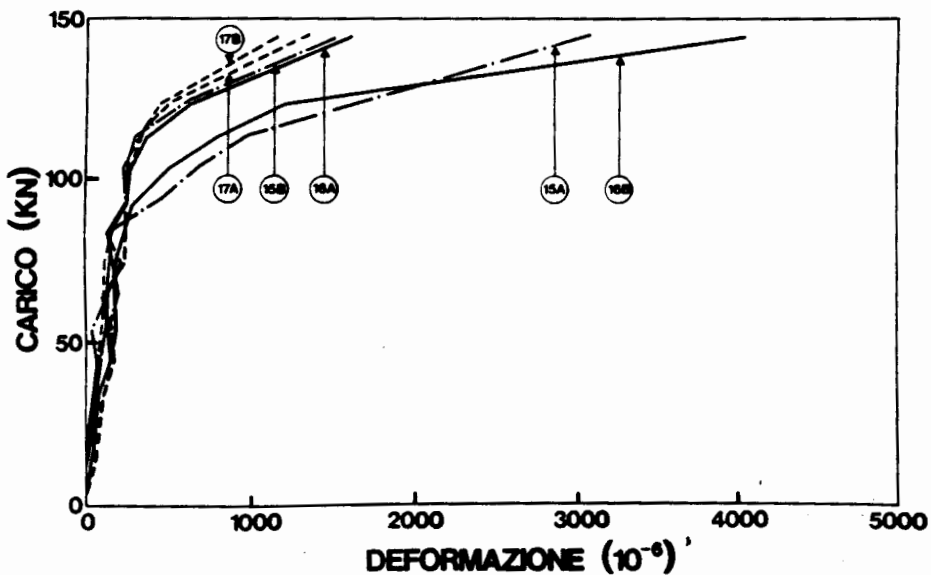


Fig. 12. Tubo I: curva carico-deformazione unitaria al rene destro rilevata mediante estensimetro meccanico (vedi figg. 2 e 3).

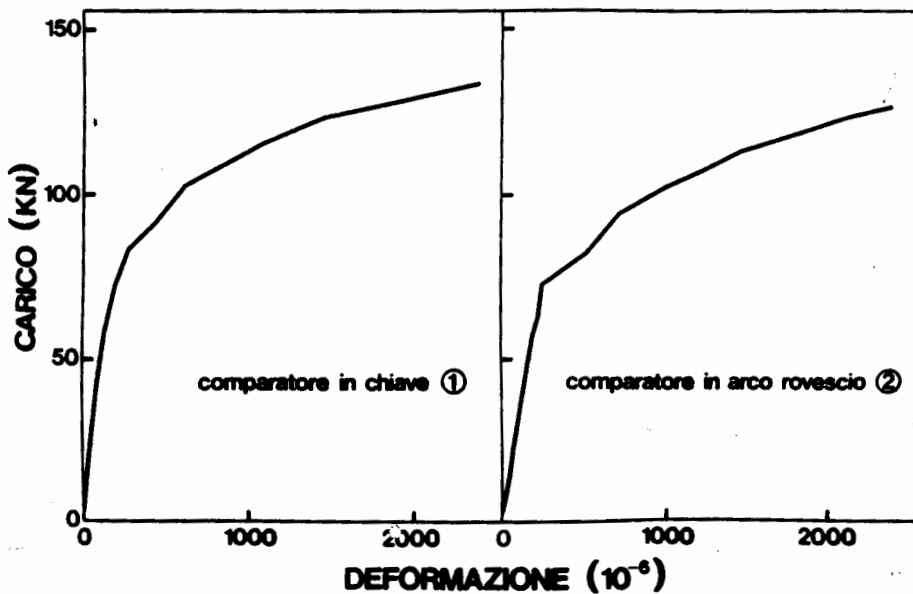


Fig. 13. Tubo II: curva carico-deformazione unitaria rilevata mediante comparatori elettrici ① e ② (vedi figg. 2 e 3).

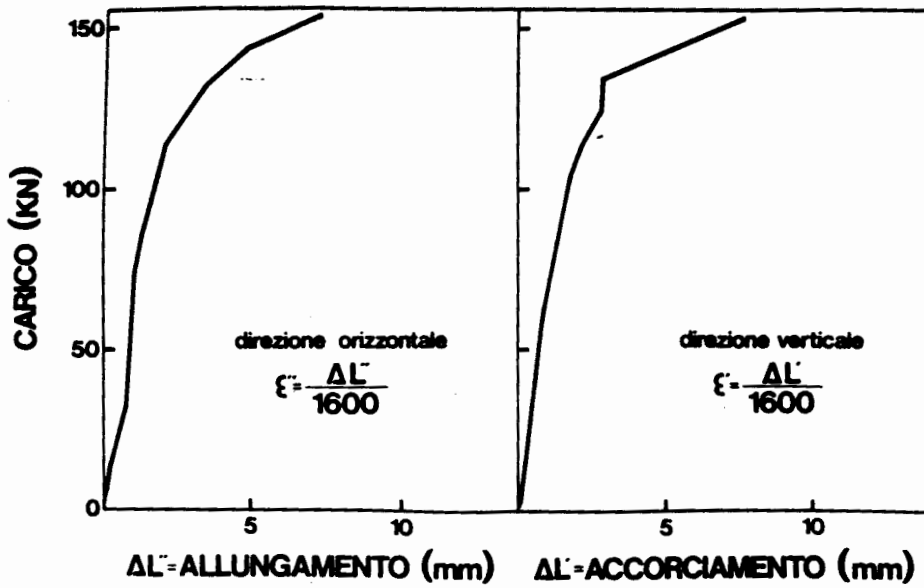


Fig. 14. Tubo II: curva carico-deformazione rilevata mediante flessimetri in chiave ③ ed alle reni ④ e ⑤ (vedi figg. 2 e 3).

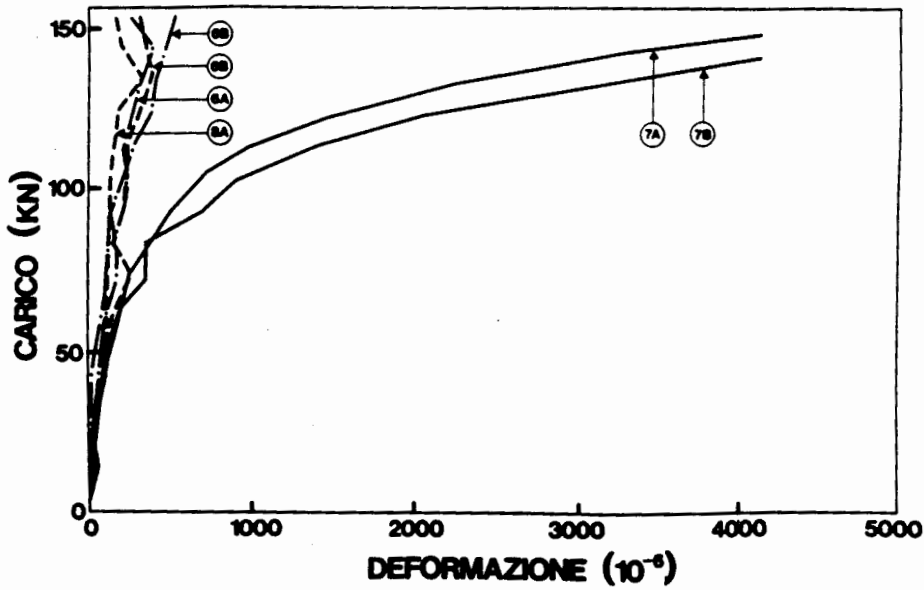


Fig. 15. Tubo II: curva carico-deformazione unitaria in chiave rilevata mediante estensimetro meccanico (vedi figg. 2 e 3).

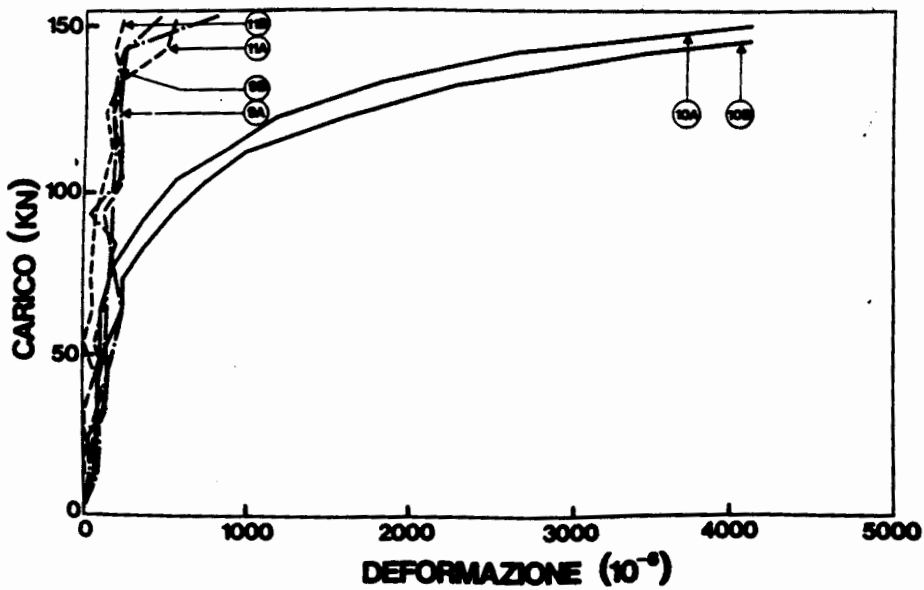


Fig. 16. Tubo II: curva carico-deformazione unitaria in arco rovescio rilevata mediante estensimetro meccanico (vedi figg. 2 e 3).

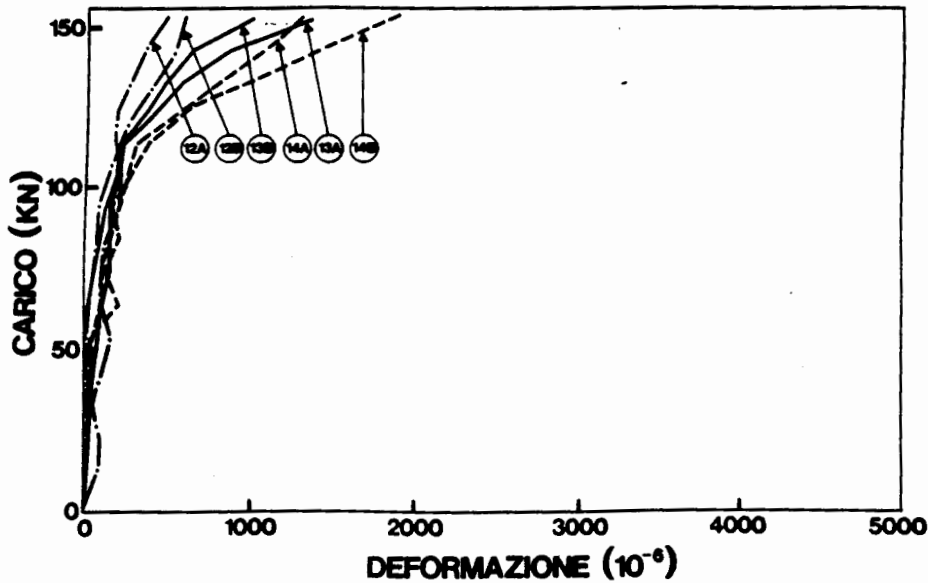


Fig. 17. Tubo II: curva carico-deformazione unitaria al rene sinistro rilevata mediante estensimetro meccanico (vedi figg. 2 e 3).

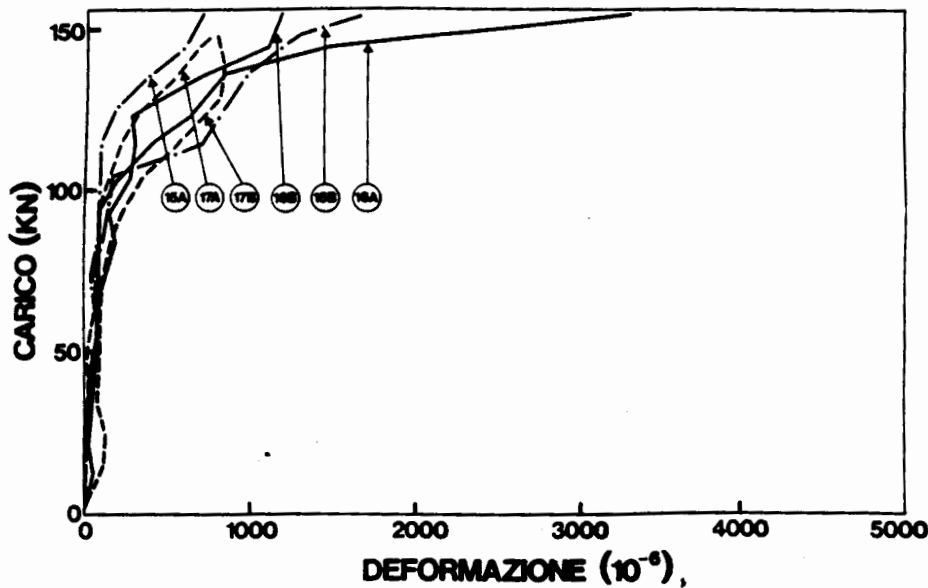


Fig. 18. Tubo II: curva carico-deformazione unitaria al rene destro rilevata mediante estensimetro meccanico (vedi figg. 2 e 3).

Tabella 4. Valori del momento flettente (M) e dello sforzo assiale (N) nelle diverse sezioni del tubo in calcestruzzo reoplastico rinforzato con fibre d'acciaio soggetto al solo peso proprio (vedi figura 19)

φ ($^{\circ}$)	N (KN/m)	M (KNm/m)
0	-1,465	1,287
15	-1,213	1,156
30	-0,487	0,784
45	0,623	0,232
60	1,977	-0,408
75	3,398	-1,018
90	4,893	-1,471
105	5,668	-1,647
120	6,152	-1,441
135	6,014	-0,782
150	5,180	0,356
165	3,642	1,954
174,393	2,347/1,430	3,157
180	1,465	3,138

Tabella 5. Valori del momento flettente (M) e dello sforzo assiale (N) nelle diverse sezioni del tubo in calcestruzzo reoplastico rinforzato con fibre d'acciaio soggetto ad un carico concentrato $P = 100$ KN/m (vedi figura 20)

φ ($^{\circ}$)	N (KN/m)	M (KNm/m)
0	0,152	27,627
15	13,088	16,373
30	25,132	5,895
45	35,463	- 3,093
60	43,377	- 9,979
75	48,336	-14,293
90	50,000	-15,741
105	48,257	-14,224
120	43,225	- 9,847
135	35,248	- 2,907
150	24,868	6,124
165	12,794	16,828
174,393	4,734/-0,151	23,641
180	-0,152	23,641

mento carico-deformazione unitaria rilevato mediante estensimetro meccanico.

L'osservazione delle due serie di grafici permette di rilevare immediatamente come i due tubi abbiano fornito prestazioni grosso modo identiche; ciò permette di affermare che anche in presenza di fibre d'acciaio il calcestruzzo reoplastico può essere posto in opera senza alcun sistema di compattazione con la garanzia di ottenere in servizio un calcestruzzo di elevate prestazioni.

Nell'ambito di una qualunque delle due serie, i grafici delle ultime quattro figure, relative a misurazioni con estensimetro meccanico, evidenziano il diverso comportamento deformativo del tubo in chiave e in arco rovescio rispetto alle reni. Utilizzando le notazioni di figura 2, in chiave e in arco rovescio la deformazione è concentrata nelle zone d'asse (7 e 10) e non investe le parti adiacenti (6 e 8; 9 e 11); alle reni la deformazione risulta distribuita e non sono percettibili variazioni sensibili nell'andamento carico-deformazione tra le zone d'asse (13 e 16) e quelle attigue (12 e 14; 15 e 17). Il differente comportamento deformativo è ovviamente in accordo con la distribuzione del momento flettente che, sotto l'azione del carico di prova,

ha un valore accentuato in chiave e in arco rovescio ove raggiunge i valori massimi, mentre ha andamento diffuso alle reni. Il calcolo degli sforzi è stato eseguito applicando il teorema dei lavori virtuali secondo i metodi della scienza delle costruzioni. Nelle figure 19 e 20 e nelle tabelle 4 e 5 sono riportati rispettivamente diagrammi e valori del momento flettente e dello sforzo assiale sotto l'effetto separato del peso proprio e del carico di prova. Quest'ultimo è stato assunto pari a 100 KN/m che per entrambi i tubi rappresenta un valore intermedio tra il carico di prima fessurazione (P_f) già definito al paragrafo 2.3 e il carico di fessurazione (P_r) definito dalla normativa ASTM C-497-72 e dalle raccomandazioni dell'Associazione Nazionale d'Ingegneria Sanitaria come il carico corrispondente alla formazione di una fessura di 0,25 mm di ampiezza.

Dai dati raccolti al momento della prova e dalle interpolazioni effettuate sulle curve carico-deformazione come indicato al paragrafo 2.3, sono stati ricavati per i tubi I e II valori del carico di prima fessurazione (P_f), di fessurazione (P_r) e di rottura (P_r) in corrispondenza delle sezioni dove per prima è avvenuta la crisi. In tali sezioni sono stati quindi calcolati i valori degli sforzi e le conseguenti tensioni

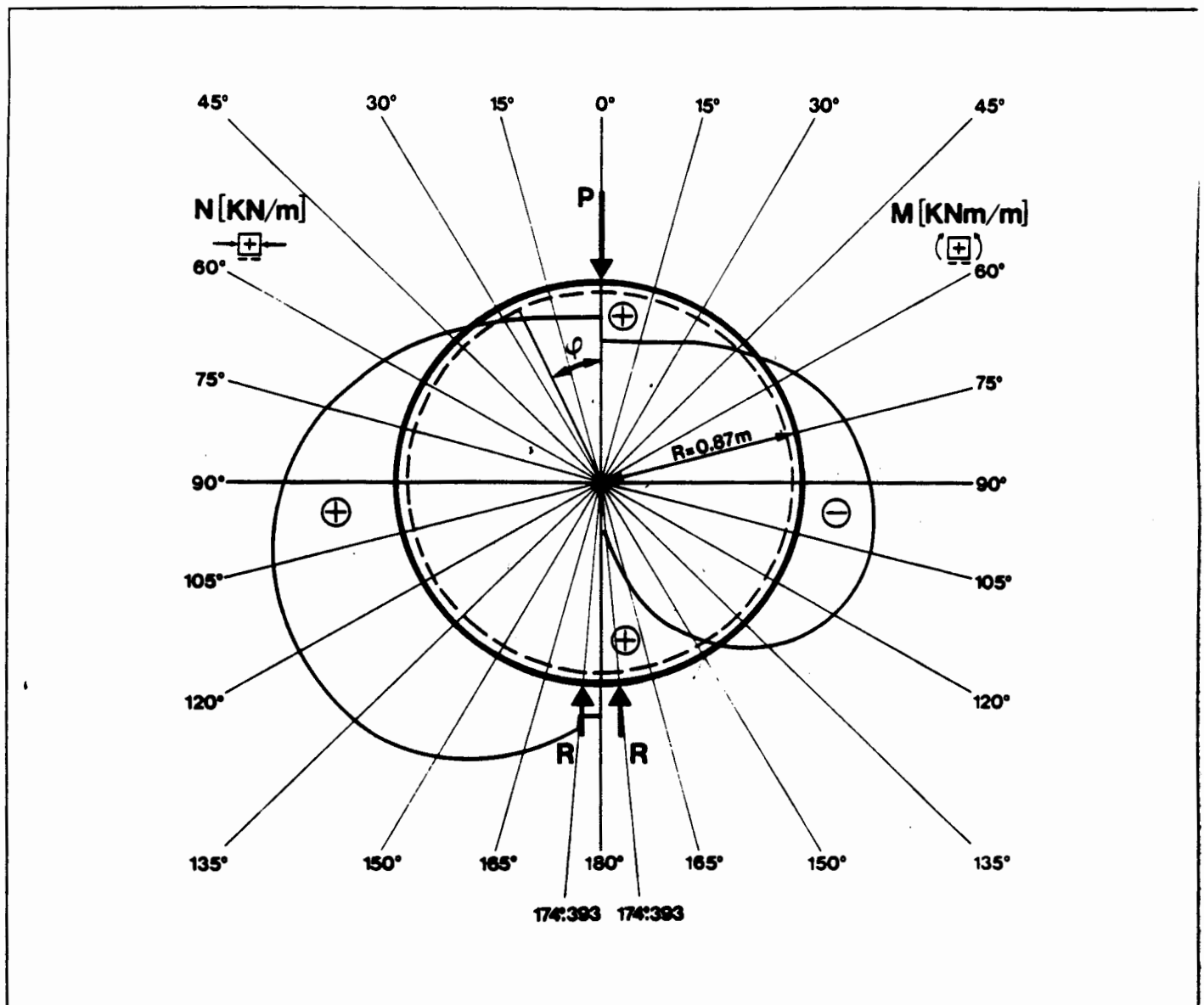


Fig. 19. Diagrammi del momento flettente (M) e dello sforzo assiale (N) nel tubo in calcestruzzo reoplastico rinforzato con fibre d'acciaio soggetto al solo peso proprio.

circonfenziali, σ_e sul bordo esterno e σ_i sul bordo interno, nelle ipotesi di sezione del calcestruzzo interamente reagente e di trascurare lo spessore nei confronti del raggio. I valori dei carichi, degli sforzi e delle tensioni sono riportati in tabella 6.

Secondo le raccomandazioni dell'Associazione Nazionale di Ingegneria Sanitaria, i tubi I e II rientrano nella categoria tubi per irrigazione che è definita da $P_i = 80$ KN/m e $P_r = 120$ KN/m, mentre la categoria superiore, tubi per acquedotto, risulta definita da $P_i = 104$ KN/m e $P_r = 156$ KN/m.

Secondo la normativa ASTM C-76-72a, i tubi I e II rientrano nella classe II Wall A definita da $P_i = 76,64$ KN/m e $P_r = 114,88$ KN/m, mentre la classe III risulta definita da $P_i = 103,36$ KN/m e $P_r = 152,96$ KN/m. In accordo con tale normativa la sezione minima di armatura che deve essere prevista in un tubo in calcestruzzo armato avente $P_i = 76,64$ KN/m, $P_r = 114,88$ KN/m, DN = 160 cm e spessore = 14 cm è 7,4 cm² per la gabbia interna e 5,5 cm² nella gabbia esterna.

Imponendo un medesimo carico di fessurazione (P_f) con ampiezza delle fessure pari a 0,25 mm, è stato effettuato

un calcolo per valutare l'armatura circonfenziale che deve essere prevista per conferire a un tubo in calcestruzzo armato le stesse prestazioni del tubo in calcestruzzo reoplastico rinforzato con fibre d'acciaio. Il calcolo si è svolto nella ipotesi di impiegare barre di armatura ad aderenza migliorata in acciaio tipo FeB44K controllato in stabilimento ed il calcestruzzo (c) di tabella 2 avente una resistenza meccanica caratteristica a compressione $R_{bk} = 81,5$ MPa ed una resistenza a trazione per flessione a 28 giorni pari a 8,4 MPa.

Le barre, il cui proporzionamento permetterà di sopportare i massimi valori del momento flettente dovuto ai carichi di esercizio, dovranno essere disposte su due strati con ricoprimento minimo di 2 cm: il 40% dell'armatura totale verrà disposto in prossimità del bordo esterno con $1 \text{ } \varnothing 10/13,5$ cm pari a 5,81 cm²/m ed il 60% in prossimità del bordo interno con $1 \text{ } \varnothing 10/9$ cm pari a 8,72 cm²/m. Seguendo le istruzioni relative alle norme tecniche vigenti, con tale armatura si otterrà per la sezione in chiave sottoposta al carico P_i , una distanza media fra le fessure pari a 97 mm, nella condizione di fessurazione stabilizzata in corrispondenza del livello baricentrico dell'armatura all'interno del-

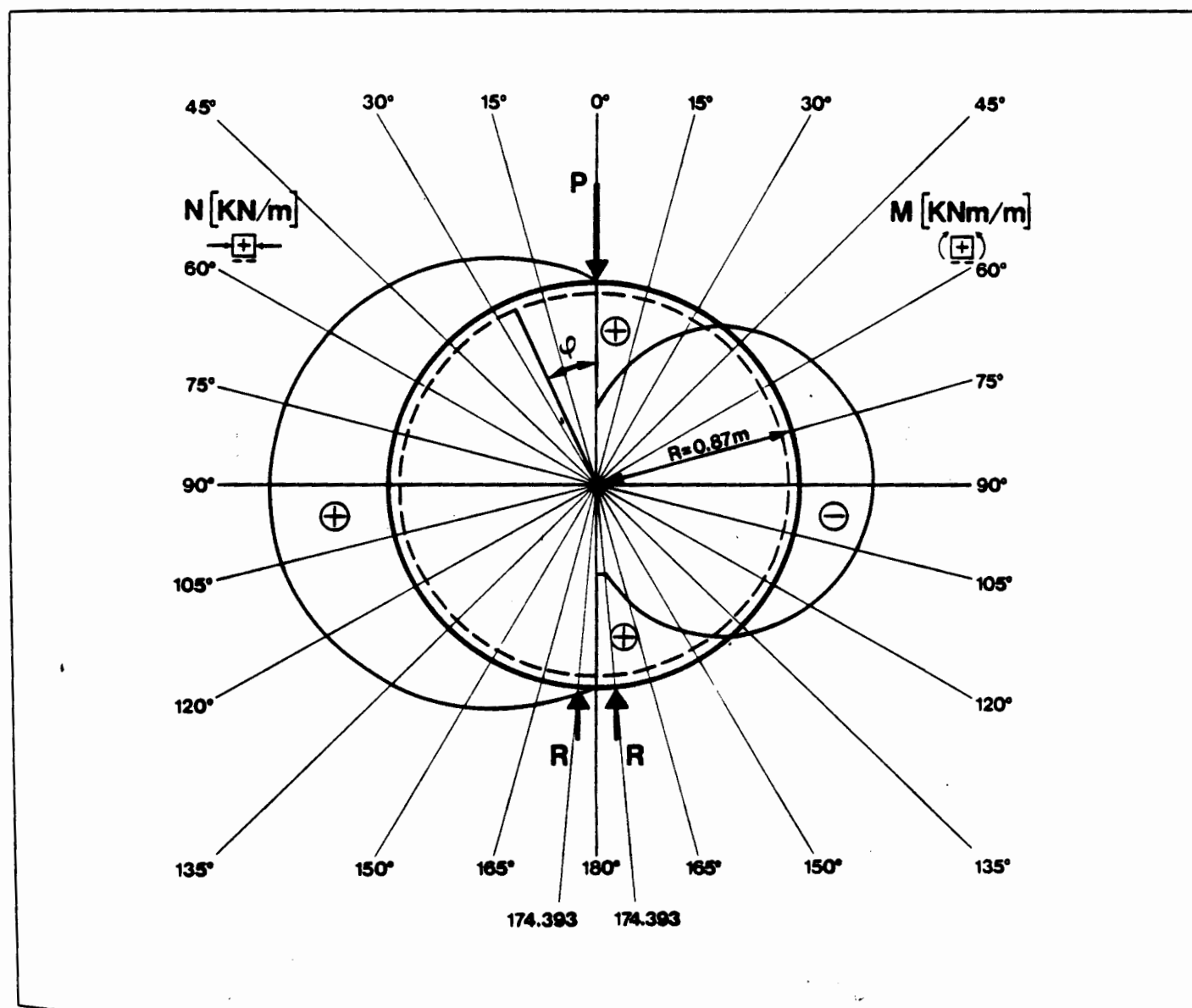


Fig. 20. Diagrammi del momento flettente (M) e dello sforzo assiale (N) nel tubo in calcestruzzo reoplastico rinforzato con fibre d'acciaio soggetto ad un carico verticale concentrato $P = 100$ KN/m.

Tabella 6. Nelle sezioni del tubo I e II dove per prima è avvenuta la crisi, valori dello sforzo assiale (N) e del momento flettente (M), delle tensioni circonferenziali nel bordo esterno (σ_e) e nel bordo interno (σ_i), in corrispondenza dei carichi di prima fessurazione (P'_i), di fessurazione (P_i) e di rottura (P_r)

	Tubo I - Sezione in chiave			Tubo II - Sezione d'arco rovescio		
	$P'_i = 80$ KN	$P_i = 115$ KN	$P_r = 130$ KN	$P'_i = 73$ KN	$P_i = 135$ KN	$P_r = 140$ KN
N (KN/m)	-1,343	-1,290	-1,268	1,354	1,260	1,252
M (KNm/m)	23,389	33,058	37,202	20,396	35,054	36,236
σ_e (MPa)	+7,1	+10,1	+11,4	+6,3	+10,7	+11,1
σ_i (MPa)	-7,2	-10,1	-11,4	-6,2	-10,7	-11,1

Tabella 7. Nelle sezioni del tubo I e II dove per prima è avvenuta la crisi, valori della posizione dell'asse neutro (x), delle tensioni sul calcestruzzo (σ_c) e sull'acciaio (σ_s), in corrispondenza dei carichi di prima fessurazione (P'_i), di fessurazione (P_i) e di rottura (P_r)

	Tubo I - Sezione in chiave			Tubo II - Sezione di arco rovescio		
	$P'_i = 80$ KN	$P_i = 115$ KN	$P_r = 130$ KN	$P'_i = 73$ KN	$P_i = 135$ KN	$P_r = 140$ KN
x (cm)	3,861	3,863	3,864	3,877	3,873	3,873
σ_c (MPa)	11,5	16,3	18,3	10,1	17,3	17,9
σ_s (MPa)	297,5	420,0	472,5	257,7	443,6	458,6

l'area efficace. La deformazione unitaria media dell'armatura risulterà pari a $1,472 \times 10^{-3}$ da cui consegue un'ampiezza media delle fessure pari a 0,143 mm e quindi un valore caratteristico di 0,243 mm. In tabella 7 è riportato il valore delle tensioni nei materiali, calcolato a sezione parzializzata, trascurando quindi il contributo del calcestruzzo in zona tesa e valutando la collaborazione delle armature poste in zona compressa mediante un coefficiente convenzionale di omogeneizzazione $n = 15$.

4. Conclusioni

– Il connubio fibre d'acciaio additivo iperfluidificante permette di ottenere un calcestruzzo reoplastico fibrorinforzato con elevate resistenze a compressione e con più elevate resistenze a flessione.

– Il calcestruzzo reoplastico con fibre d'acciaio presenta una duttilità, vale a dire una capacità di continuare a deformarsi sopportando carico dopo la formazione della prima fessura, notevolmente superiore rispetto a quella di un ordinario calcestruzzo fibrorinforzato.

– Il calcestruzzo reoplastico fibrorinforzato può essere con successo posto in opera non facendo uso di alcun sistema di compattazione.

– Tubi di DN = 160 cm in calcestruzzo reoplastico fibrorinforzato rientrano con largo margine nella categoria tubi per irrigazione delle raccomandazioni dell'Associazione Nazionale di Ingegneria Sanitaria e possono essere equiparati a tubi in calcestruzzo armato con doppia gabbia in cui

l'armatura viene calcolata nel rispetto delle tensioni ammissibili sulla base dei valori del momento flettente e dello sforzo assiale che producono una fessurazione caratteristica di 0,25 mm di ampiezza.

Bibliografia

- [1] A.C.I. Committee 544.1R, *ACI Manual of Concrete Practice*, 5, (1982).
- [2] A. M. Neville, *Properties of Concrete*, 233-239, Ed. Pitman, London (1975).
- [3] M. Collepardi, *Influenza degli additivi sulle caratteristiche reologiche del calcestruzzo*, *Il Cemento*, 4, 289-316, (1982).
- [4] *Modern Advanced Concrete*, 1, 28-69, Treviso (1984).
- [5] R. L. Henry, *An investigation of Large Diameter Fiber Reinforced Concrete Pipe*, ACI Publication SP-44, 435-454 (1979).
- [6] *Ingegneria Sanitaria*, 2, (1966).
- [7] D. J. Hannat, *Fibre Cements and Fibre Concretes*, 68-69, Ed. John Wiley & Sons (1978).
- [8] A.C.I. Committee 544.2R, *ACI Manual of Concrete Practice*, 5, (1982).

La sperimentazione è stata condotta presso il Laboratorio della MAC di Treviso, ad eccezione delle prove su tubi DN = 160 cm che si sono svolte presso il Laboratorio RDB di Pontenure (PC).