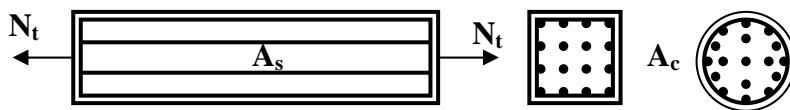


TIRANTI IN CONGLOMERATO ARMATO

Consideriamo un elemento teso di conglomerato armato. La sezione dell'elemento sia regolare e simmetrica, preferibilmente circolare o quadrata e l'armatura sia disposta in maniera simmetrica e diffusa, in maniera che gli interspazi siano ridotti. Ciò al fine di evitare fessurazioni premature negli interspazi stessi che, nel caso di ampiezze eccessive di essi, causerebbero il raggiungimento della deformazione di picco nel conglomerato provocando l'innesco della fessurazione e la sua propagazione in tutta la sezione.

Tale disposizione di armatura favorisce il softening del conglomerato teso, consentendo dilatazioni consistenti di esso prima della fessurazione visibile.

La distribuzione degli sforzi all'interno della sezione si consideri uniforme.



L'equilibrio tra forza di trazione e risultante degli sforzi interni fornisce

$$N_t = \sigma_c A_c + \sigma_s A_s$$

Introduciamo le relazioni costitutive di riferimento, in trazione monoassiale, dei due materiali.

Per il conglomerato, in regime di softening

$$\sigma_c = \frac{f'_t}{\beta}$$

mentre per l'acciaio la legge di Hooke, essendo per congruenza le deformazioni nell'acciaio di entità ridotta e quindi lo sforzo in esso distante dallo snervamento nello stato di incipiente fessurazione.

Infatti, per un conglomerato di 30 MPa, la deformazione di picco è 0.0002, mentre per un indice di deformazione 5 essa raggiunge il valore 0.001. Ne consegue, essendo il modulo elastico dell'acciaio circa 200000 MPa, uno sforzo nell'acciaio di 200 MPa, ben distante dal valore di snervamento.

Possiamo scrivere, quindi

$$N_t = \frac{f'_t}{\beta} A_c + \varepsilon_s E_s A_s = \frac{f'_t}{\beta} A_c + \beta \varepsilon'_t E_s A_s = f'_t A_c \left(\frac{1}{\beta} + \beta \frac{2}{E_c} E_s \frac{A_s}{A_c} \right) = f'_t A_c \left(\frac{1}{\beta} + 2e \rho_{st} \beta \right)$$

dove e è il rapporto tra i moduli di deformazione dei due materiali e ρ_{st} è il rapporto geometrico di armatura.

Adimensionalizzando, si ha

$$n_t = \frac{N_t}{A_c} = \frac{1}{\beta} + 2e\rho_{st}\beta$$

L'equazione è composta da due termini, uno relativo al conglomerato che decresce con l'indice di deformazione, l'altro relativo all'armatura che cresce con il detto indice e con la quantità di armatura e decresce con e , e cioè con l'aumentare della resistenza del conglomerato.

Fissato il tipo di conglomerato, la curva corrispondente del tiro specifico in funzione dell'indice di deformazione e al variare della percentuale di armatura mostra gli andamenti descritti nella figura seguente.

Per valori ridotti di armatura, la curva è decrescente, raggiunge un minimo relativo e poi riprende a crescere. Per un certo valore critico di armatura, il punto di minimo cade nel punto di ascissa 1 e la curva è sempre crescente.

Annullando la derivata prima della funzione, si ottiene

$$\beta^2 = \frac{1}{2e\rho_{st}}$$

che fornisce l'ascissa del punto di minimo.

Per $\beta = 1$, si ottiene

$$\rho_{st}^* = \frac{1}{2e}$$

valore critico di armatura. Per esso, la curva è a tangente orizzontale nel punto di ascissa $\beta = 1$ ed è sempre crescente nel suo intervallo di definizione.

Per valori del grado di armatura, definito dal valore del rapporto

$$i = \frac{\rho_{st}}{\rho_{st}^*}$$

superiori a 1, la curva è sempre crescente con tangente inclinata di un angolo superiore a zero nel punto con $\beta = 1$.

L'equazione del tiro specifico, tenuto conto dell'espressione dell'armatura critica, può scriversi

$$n_t = \frac{1}{\beta} + 2e\rho_{st}\beta = \frac{1}{\beta} + i\beta$$

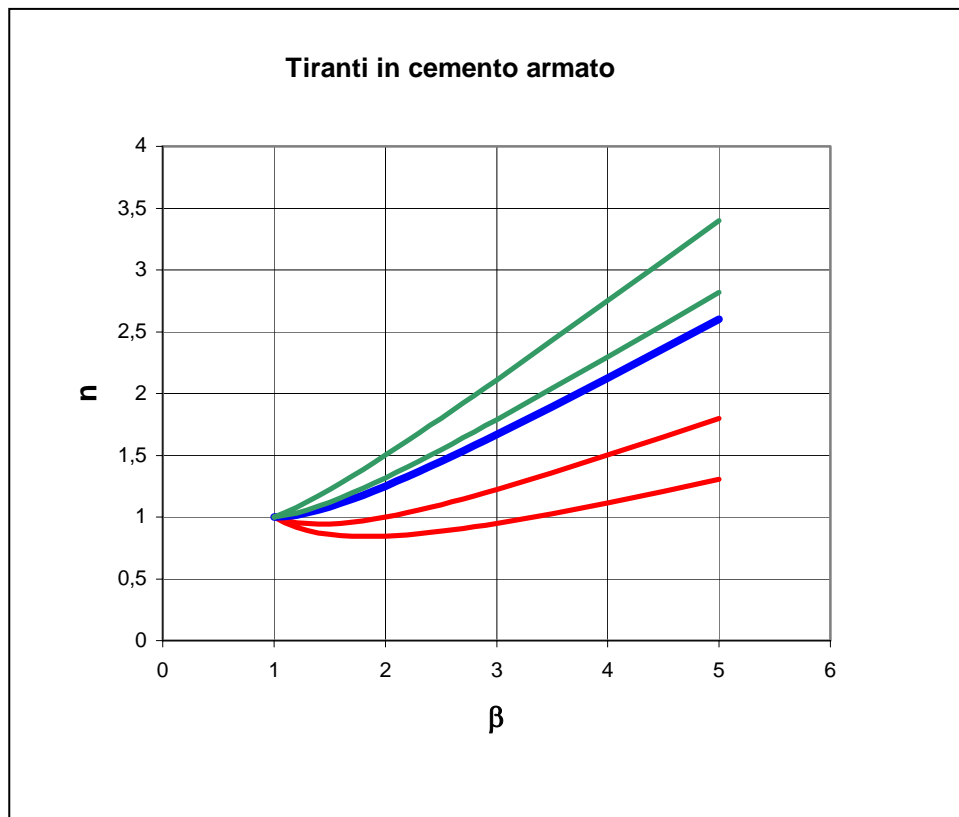
Per $\beta = 1$, si ha

$$n'_t = 1 + 2e\rho_{st} = 1 + i$$

e il rapporto

$$n = \frac{n_t}{n'_t} = \left(\frac{1}{\beta} + i\beta\right)/(1 + i)$$

Nella figura seguente sono descritte le curve costitutive di un tirante in conglomerato di resistenza 30MPa, per valori di $i=0.3; 0.5; 1; 1.2; 2$.



L'esperienza mostra che, quando l'indice di armatura i è minore di 1, il tirante si fessura al valore di picco della deformazione del conglomerato, mentre, per valori uguali o superiori a 1, la fessurazione visibile si manifesta per indici di deformazione superiori al valore di picco, tanto più elevati quanto maggiore è l'indice di armatura.

Verifiche sperimentali

Per verificare l'attendibilità dei risultati analitici ottenuti, è stata condotta una sperimentazione, nel nostro laboratorio, su elementi prismatici in conglomerato armato, di lunghezza 400 mm e sezione quadrata di lato 100 mm..

L'armatura degli elementi è costituita, in generale, da 8 ferri longitudinali disposti sul perimetro della sezione e da un ferro centrale che fuoriesce dalle estremità dei provini per consentire l'afferraggio ai morsetti della macchina di tiro.

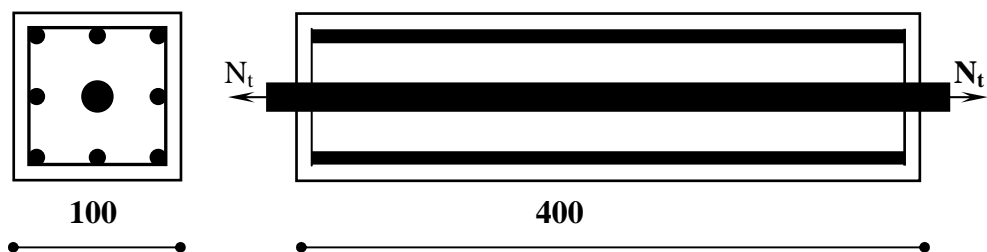
I ferri di contorno sono di diametro di 6, 8 o 10 mm. Il ferro centrale è sempre di 26 mm.

Dei 28 provini confezionati, 24 sono armati in maniera completa con 8+1 ferri; 2 sono armati con il solo ferro centrale, per simulare una distribuzione di ferro anomala e non corretta; 2 sono armati con il solo ferro centrale, ma interrotto in corrispondenza della sezione centrale del provino, per simulare un tirante in semplice conglomerato.

Con queste distribuzioni di ferri e variando il diametro di quelli di contorno si ottengono diversi rapporti di armatura e, in relazione alle differenti resistenze di conglomerato dei manufatti, si conseguono differenti indici di armatura i .

Nei provini sono state inserite alle estremità alcune staffe necessarie per costruire le gabbie dei ferri da inserire nelle cassaforme per il getto.

Con tale geometria dei provini, si confidava in una distribuzione di sforzi uniforme almeno nella zona centrale degli elementi.



Nelle tabelle seguenti sono illustrate le caratteristiche geometriche e meccaniche dei provini, i calcoli dei carichi limite per $\beta=1$ e $k/2$, i carichi sperimentali e i confronti di essi con i valori analitici.

Sono indicati con N_{cr1} , N_{cr2} e N_{cr3} i carichi ai diversi stadi di apparizione di fessure e con N_f il carico di fine prova.

Con $N_f/A_T f'_t$ è indicato il rapporto tra il carico finale e la resistenza a trazione diretta della sezione senza armatura.

Gli elementi senza armatura hanno manifestato una rottura centrale netta per distacco con carichi di rottura nettamente inferiori alla resistenza a trazione diretta, a causa della non uniforme distribuzione di sforzo nelle sezioni, derivante dalla presenza della barra centrale di tiro interrotta nella sezione centrale.

I due provini con armatura concentrata, costituita dalla sola barra centrale, hanno manifestato fessurazione centrale estesa per valori ridotti del carico.

I provini ad armatura diffusa ridotta hanno esibito delle lesioni longitudinali prodotte dalla contrazione trasversale della barra centrale, interrotta al centro dell'elemento.

Tutti gli altri provini, aventi indice di armatura intorno a 1 o superiore a 1, non hanno manifestato lesioni di distacco fino al carico di fine prova. Lesioni a ventaglio si sono prodotte, invece, alle estremità, a causa della concentrazione localizzata di sforzi, prodotta dalla barra centrale, e della contrazione trasversale di essa derivante dall'elevata tensione prodotta dalla forza di tiro.

In diversi di tali elementi, in particolare quelli più armati, nessun accenno di fessura di distacco si è manifestata fino al raggiungimento del carico massimo corrispondente alla portata della macchina (circa 32 t)

In tale gruppo di provini, il carico di fine prova concorda con il carico calcolato per il valore massimo dell'indice di deformazione in trazione del conglomerato ($k/2$). Il carico di fine prova è risultato, per essi, da 5 a 8 volte la resistenza del conglomerato a trazione diretta.

Caratteristiche geometriche

PROVINO	No.		A_{s1}	A_{s2}	A_s	A_T	$A_c=A_T$	
	Ferri	Ferri					A_s	$\rho_s=A_s/A_c$
2	1 dia 26	8 dia 6	531	28	757	10000	9243	0,082
4	1 dia 26	8 dia 6	531	28	757	10000	9243	0,082
6	1 dia 26	8 dia 6	531	28	757	10000	9243	0,082
8	1 dia 26	8 dia 6	531	28	757	10000	9243	0,082
21	1 dia 26	8 dia 6	531	28	757	10000	9243	0,082
23	1 dia 26	8 dia 6	531	28	757	10000	9243	0,082
24	1 dia 26	8 dia 6	531	28	757	10000	9243	0,082
25	1 dia 26	8 dia 6	531	28	757	10000	9243	0,082
1	1 dia 26	8 dia 8	531	50	933	10000	9067	0,103
3	1 dia 26	8 dia 8	531	50	933	10000	9067	0,103
5	1 dia 26	8 dia 8	531	50	933	10000	9067	0,103
7	1 dia 26	8 dia 8	531	50	933	10000	9067	0,103
22	1 dia 26	8 dia 8	531	50	933	10000	9067	0,103
26	1 dia 26	8 dia 8	531	50	933	10000	9067	0,103
27	1 dia 26	8 dia 8	531	50	933	10000	9067	0,103
28	1 dia 26	8 dia 8	531	50	933	10000	9067	0,103
9	1 dia 26	8 dia 10	531	79	1159	10000	8841	0,131
10	1 dia 26	8 dia 10	531	79	1159	10000	8841	0,131
11	1 dia 26	8 dia 10	531	79	1159	10000	8841	0,131
12	1 dia 26	8 dia 10	531	79	1159	10000	8841	0,131
16	1 dia 26	8 dia 10	531	79	1159	10000	8841	0,131
20	1 dia 26	8 dia 10	531	79	1159	10000	8841	0,131
15	0	8 dia 10	0	79	628	10000	9372	0,067
18	0	8 dia 10	0	79	628	10000	9372	0,067
14	1 dia 26	0	531	0	531	10000	9469	0,056
19	1 dia 26	0	531	0	531	10000	9469	0,056
13PC	0	0	0	0	0	10000	10000	0,000
17PC	0	0	0	0	0	10000	10000	0,000

Caratteristiche meccaniche

f'_c (kg/cm ²)	f'_c (MPa)	k	f'_t	E_c	e	ε'_t	ρ_s^*	i
462	45,3	11,839	3,83	35854	5,75	0,000214	0,087	0,94
462	45,3	11,839	3,83	35854	5,75	0,000214	0,087	0,94
462	45,3	11,839	3,83	35854	5,75	0,000214	0,087	0,94
462	45,3	11,839	3,83	35854	5,75	0,000214	0,087	0,94
547	53,7	12,839	4,18	38102	5,41	0,000219	0,092	0,89
547	53,7	12,839	4,18	38102	5,41	0,000219	0,092	0,89
547	53,7	12,839	4,18	38102	5,41	0,000219	0,092	0,89
547	53,7	12,839	4,18	38102	5,41	0,000219	0,092	0,89
472	46,3	11,956	3,87	36145	5,70	0,000214	0,088	1,17
472	46,3	11,956	3,87	36145	5,70	0,000214	0,088	1,17
472	46,3	11,956	3,87	36145	5,70	0,000214	0,088	1,17
472	46,3	11,956	3,87	36145	5,70	0,000214	0,088	1,17
573	56,2	13,145	4,28	38701	5,32	0,000221	0,094	1,09
573	56,2	13,145	4,28	38701	5,32	0,000221	0,094	1,09
573	56,2	13,145	4,28	38701	5,32	0,000221	0,094	1,09
573	56,2	13,145	4,28	38701	5,32	0,000221	0,094	1,09
484	47,5	12,098	3,92	36484	5,65	0,000215	0,089	1,48
484	47,5	12,098	3,92	36484	5,65	0,000215	0,089	1,48
484	47,5	12,098	3,92	36484	5,65	0,000215	0,089	1,48
484	47,5	12,098	3,92	36484	5,65	0,000215	0,089	1,48
480	47,1	12,051	3,91	36372	5,66	0,000215	0,088	1,48
480	47,1	12,051	3,91	36372	5,66	0,000215	0,088	1,48
480	47,1	12,051	3,91	36372	5,66	0,000215	0,088	0,76
480	47,1	12,051	3,91	36372	5,66	0,000215	0,088	0,76
480	47,1	12,051	3,91	36372	5,66	0,000215	0,088	0,63
480	47,1	12,051	3,91	36372	5,66	0,000215	0,088	0,63
480	47,1	12,051	3,91	36372	5,66	0,000215	0,088	0,00
480	47,1	12,051	3,91	36372	5,66	0,000215	0,088	0,00

Calcolo dei carichi limite

N_{t1}	k/2	f_tA_c	1/β	N_{t,k/2}
68676	5,92	35386	0,169	203033
68676	5,92	35386	0,169	203033
68676	5,92	35386	0,169	203033
68676	5,92	35386	0,169	203033
72830	6,42	38631	0,156	225560
72830	6,42	38631	0,156	225560
72830	6,42	38631	0,156	225560
72830	6,42	38631	0,156	225560
76282	5,98	35115	0,167	251977
76282	5,98	35115	0,167	251977
76282	5,98	35115	0,167	251977
76282	5,98	35115	0,167	251977
81227	6,57	38774	0,152	284933
81227	6,57	38774	0,152	284933
81227	6,57	38774	0,152	284933
81227	6,57	38774	0,152	284933
86053	6,05	34700	0,165	316363
86053	6,05	34700	0,165	316363
86053	6,05	34700	0,165	316363
86053	6,05	34700	0,165	316363
85833	6,03	34548	0,166	314739
85833	6,03	34548	0,166	314739
64418	6,03	36621	0,166	173561
64418	6,03	36621	0,166	173561
60490	6,03	37002	0,166	147664
60490	6,03	37002	0,166	147664
39075	6,03	39075	0,166	6485
39075	6,03	39075	0,166	6485

Carichi sperimentali

PROVINO	i	N _{cr1} (kg)	N _{cr2} (kg)	N _{cr3} (kg)	N _f =N _{finale} (kg)	N _{cr1} (N)	N _{cr2} (N)	N _{cr3} (N)	N _f (N)
2	0,94	16000	17680	21553	21553	156960	173441	211435	211435
4	0,94	18400			21553	180504			211435
6	0,94	20000			21553	196200			211435
8	0,94	24000			24000	235440			235440
21	0,89	14000	22449	23940	23940	137340	220225	234851	234851
23	0,89	22000	23940		23940	215820	234851		234851
24	0,89	22000	23940		23940	215820	234851		234851
25	0,89	14000	18707	23940	23940	137340	183516	234851	234851
1	1,17	15700	19625	23350	26620	154017	192521	229064	261142
3	1,17	13500	15700	23550	26620	132435	154017	231026	261142
5	1,17	19625	23550	26620	26620	192521,3	231026	261142	261142
7	1,17	23550	26620	26620	26620	231026	261142	261142	261142
22	1,09	14000	20875	25050	28000	137340	204784	245741	274680
26	1,09	16000	20875	25050	30130	156960	204784	245741	295575
27	1,09	14000	16700	20875	28000	137340	163827	204784	274680
28	1,09	16000	20875	25050	28000	156960	204784	245741	274680
9	1,48	14000	170086	29945	30517	137340	1668544	293760	299372
10	1,48	18000	25629	29945	30517	176580	251420	293760	299372
11	1,48	14000	21357	29945	30517	137340	209512	293760	299372
12	1,48	20000	25629	29945	30000	196200	251420	293760	294300
16	1,48	17028	21285	29940	32000	167044,7	208806	293711	313920
20	1,48	10000	17028	25542	27000	98100	167045	250567	264870
15	0,76	5000	6293	7000	7000	49050	61734	68670	68670
18	0,76	8000	9000	10000	10000	78480	88290	98100	98100
14	0,63	6500		8500	8500	63765		83385	83385
19	0,63	6000	9222	12296	13000	13000	90468	120624	127530
13PC	0,00	2000			2000	2000			19620
17PC	0,00	1500			1500	1500			14715

Confronti

N_{cr1}/N_{t1}	N_{cr2}/N_{t1}	$N_f/N_{tk/2}$	$N_f/A_T f'_t$
2,29	2,53	1,041	5,52
2,63		1,041	5,52
2,86		1,041	5,52
3,43		1,160	6,15
1,89	3,02	1,041	5,62
2,96	3,22	1,041	5,62
2,96	3,22	1,041	5,62
1,89	2,52	1,041	5,62
2,02	2,52	1,036	6,74
1,74	2,02	1,036	6,74
2,52	3,03	1,036	6,74
3,03	3,42	1,036	6,74
1,69	2,52	0,964	6,42
1,93	2,52	1,037	6,91
1,69	2,02	0,964	6,42
1,93	2,52	0,964	6,42
1,60	19,39	0,946	7,63
2,05	2,92	0,946	7,63
1,60	2,43	0,946	7,63
2,28	2,92	0,930	7,50
1,95	2,43	0,997	8,03
1,14	1,95	0,842	6,78
0,76	0,96	0,396	1,76
1,22	1,37	0,565	2,51
1,05		0,565	2,13
0,21	1,50	0,864	3,26

La sperimentazione ha confermato le risultanze del modello analitico proposto, ha mostrato l'elevata resistenza alla fessurazione degli elementi testati, frutto di una consistente duttilità in trazione del conglomerato sviluppatasi nei provini, grazie alla presenza di armatura diffusa nella sezione e in quantità adeguata alla manifestazione di tale comportamento .

Bibliografia

- 1983** L. Bortolotti. *Relazioni di interdipendenza delle caratteristiche di resistenza del conglomerato. Atti della Facoltà di Ingegneria*, V.22, Ottobre 1983, Cagliari.
- 1984** L. Bortolotti. *Relazioni costitutive per il conglomerato negli stati di sforzo monoassiali. Atti della Facoltà di Ingegneria*, V.24, Maggio 1984, Cagliari.
- 1986** L. Bortolotti. *Analisi plastica e relazioni costitutive per il conglomerato negli stati di tensione monoassiali. VIII Congresso AIMETA*, V.1, Politecnico di Torino, Facoltà di Ingegneria, 29 Sett.-3 Ott. 1986.
- 1988** L. Bortolotti. *Softening and Stress-Strain Relation in Direct Tension for Concrete. Atti della Facoltà di Ingegneria*, V. 30, N. 1, Mag. 1988, Cagliari, pp. 99-108.

- 1988** L. Bortolotti. *Sul carico di prima fessurazione di un tirante in cemento armato.* *Atti della Facoltà di ingegneria*, V. 31, N. 2, Ottobre 1988, Cagliari, pp. 141-148.
- 1990** L. Bortolotti. *Interdependence of Concrete Strength Parameters.* *ACI Materials Journal*, V. 87, No. 1, Jan.-Feb. 1990, pp. 25-26.
- 1991** L. Bortolotti. *First Cracking Load of Concrete Subjected to Direct Tension.* *ACI Materials Journal*, V. 88, No. 1, Jan.-Feb. 1991, pp. 70-73.
- 1992** L. Bortolotti, S. Lai. *Duttilità di elementi tesi in conglomerato armato. IX Congresso C.T.E., "Industrializzazione edilizia tecnologia e qualità".* Arezzo, 5-7 Nov. 1992.