

IGF 12 - XII CONVEGNO NAZIONALE

Gruppo Italiano Frattura

Parma, 12 - 13 giugno 1996

APPLICAZIONE DELLA MECCANICA DELLA FRATTURA LINEARE ALLE STRUTTURE INFLESSE IN C.A.P. CON CAVI INIETTATI

Luigi Goffi

Ordinario di Tecnica delle Costruzioni al Politecnico di Torino

Corso Duca degli Abruzzi, 24 - 10129 - Torino

PAROLE CHIAVE: c.a.p. - calcestruzzi ad alta resistenza

SOMMARIO

Al XI Convegno Nazionale del Gruppo Italiano Frattura era stata proposta dallo scrivente l'applicazione della LEFM a strutture precomprese a cavi non iniettati. In un successivo congresso, FRAMCOS - 2 del luglio 1995 a Zurigo, lo scrivente proponeva lo studio di strutture precomprese a cavi iniettati, cioè resi solidali con il corpo della struttura.

Il presente rapporto riprende le trattazioni precedenti e giunge ad un esempio concreto con l'indicazione dei valori delle tensioni nelle condizioni critiche.

1. INTRODUZIONE

La presente trattazione si situa nell'ambito delle ipotesi della LEFM, la cui applicazione appare particolarmente proponibile nel caso di calcestruzzi ad alta resistenza, (HSC = High Strength Concretes o meglio HPC = High Performance Concretes).

Per tali calcestruzzi, all'incremento delle caratteristiche di resistenza meccanica rispetto ai calcestruzzi ordinari, non si registra un corrispondente incremento della energia di frattura, anzi talora addirittura si hanno più ridotte energie di frattura. In tali casi può verificarsi un comportamento fragile la cui trattazione può in particolare svolgersi nell'ambito della LEFM. Si intende pertanto che la nostra trattazione si applica a strutture realizzate con calcestruzzi HSC o HPC o comunque con calcestruzzi di caratteristiche meccaniche assai elevate, con resistenze cilindriche in ogni caso non inferiori a 55 N/mm^2 .

2. STRUTTURE A CAVI NON INIETTATI

Nel rapporto per l'XI Convegno Nazionale (IGF 11 - Brescia, luglio 95) lo scrivente giungeva a proporre l'applicazione della LEFM a strutture precomprese "unbonded" [1].

Lo studio si situava nell'ambito di un rinnovato interesse per le strutture a cavi non iniettati, a seguito della corrosione osservata nei casi di strutture postese a cavi iniettati, ove l'iniezione non era risultata efficace ai fini della protezione dell'armatura.

Il Ministero inglese dei Trasporti di fatto ha, sino a poco tempo fa, proibito il sistema di precompressione a cavi scorrevoli, a seguito di gravi incidenti (crolli di impalcati da ponte) verificatisi a seguito di corrosione dell'armatura metallica (specie in corrispondenza della soletta), risultata non protetta, in particolare dall'azione dei sali antigelo, a seguito di iniezioni inadeguate.

Un possibile rimedio è l'impiego di cavi interni o esterni in guaine piene di grasso, atto a proteggere meglio della malta cementizia di iniezione i cavi stessi e consentirne l'ispezione, la ritaratura e, se necessario, la sostituzione.

Nel caso di precompressione a cavi non iniettati, in prima istanza si può ritenere che la mancata aderenza implichi una sostanziale costanza dello sforzo dei cavi, senza apprezzabili variazioni in funzione dei carichi esterni.

Di fatto noi assumiamo, trascurando l'attrito, che la tensione nel cavo sia costante lungo la sua lunghezza e che l'incremento delle tensioni per i carichi esterni sia in relazione al valore medio dell'allungamento, valore certamente inferiore a quello delle strutture iniettate, dove l'incremento delle tensioni è funzione del valore della sollecitazione in ogni sezione.

Conferme di questa impostazione si hanno nell'EC2 - part 1-5: General Rules - Structures with unbonded external prestressing tendons, al punto 2.5.3 "Methods of calculation" ed al punto 4.3 "Ultimate limit states" dove per cavi a tracciato interno l'incremento di tensione è considerato non oltre i 100 N/mm^2 nel caso di cavi di lunghezza non superiore ad una singola campata e proporzionalmente ridotto per cavi di lunghezza maggiore.

Perciò nel caso di cavi non iniettati lo stato limite ultimo è di norma da porsi in relazione al cedimento del calcestruzzo.

Riprendendo quanto sviluppato in [1], con riferimento ad una sezione rettangolare di altezza d e di larghezza b , in presenza di uno sforzo di precompressione F ed un momento esterno M , si registra un valore di K_I (stress intensity factor) all'apice della fessura pari a

$$K_I = \frac{MY_m}{bd^{3/2}} - \frac{F\Psi}{bd^{1/2}}$$

secondo le notazioni di fig. 1 e del rif. [1], essendo Y_p e Y_m funzioni di a/d , essendo a la profondità della fessura, posto al solito $\Psi = Y_p + (1/2 - h/d) Y_m$, essendo questa volta F noto a priori e costante.

Inversamente il momento nella solita formulazione adimensionale, assume l'espressione:

$$\bar{M} = \frac{M}{K_{IC} bd^{3/2}} = \frac{1}{Y_m} \left\{ 1 + \frac{F\Psi}{K_{IC} bd^{1/2}} \right\}$$

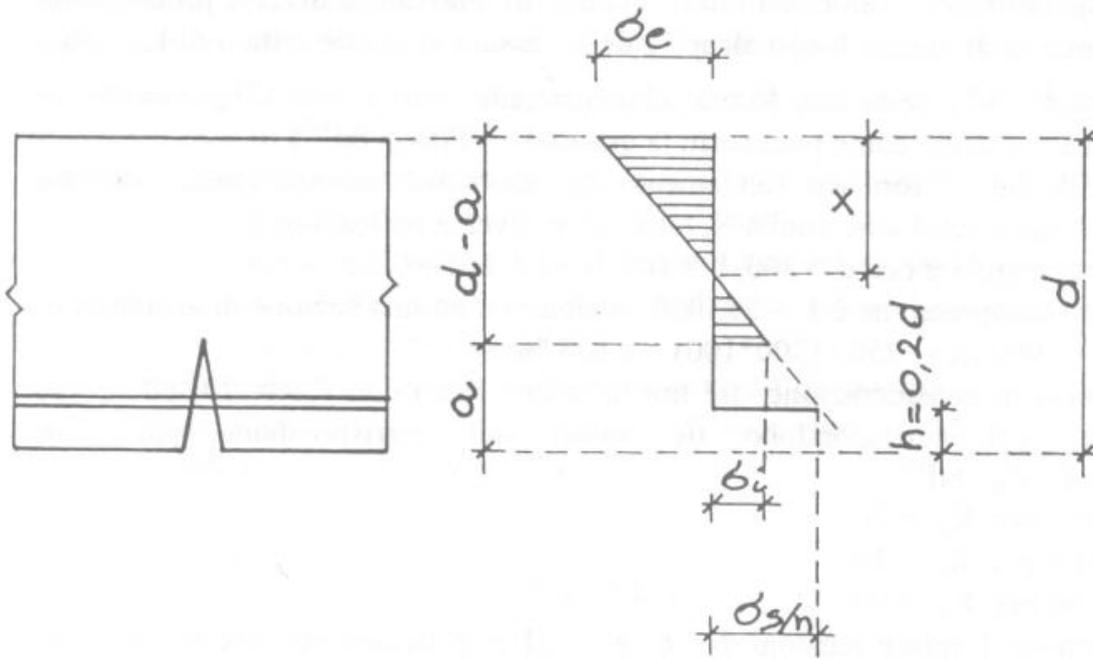


FIG. 1

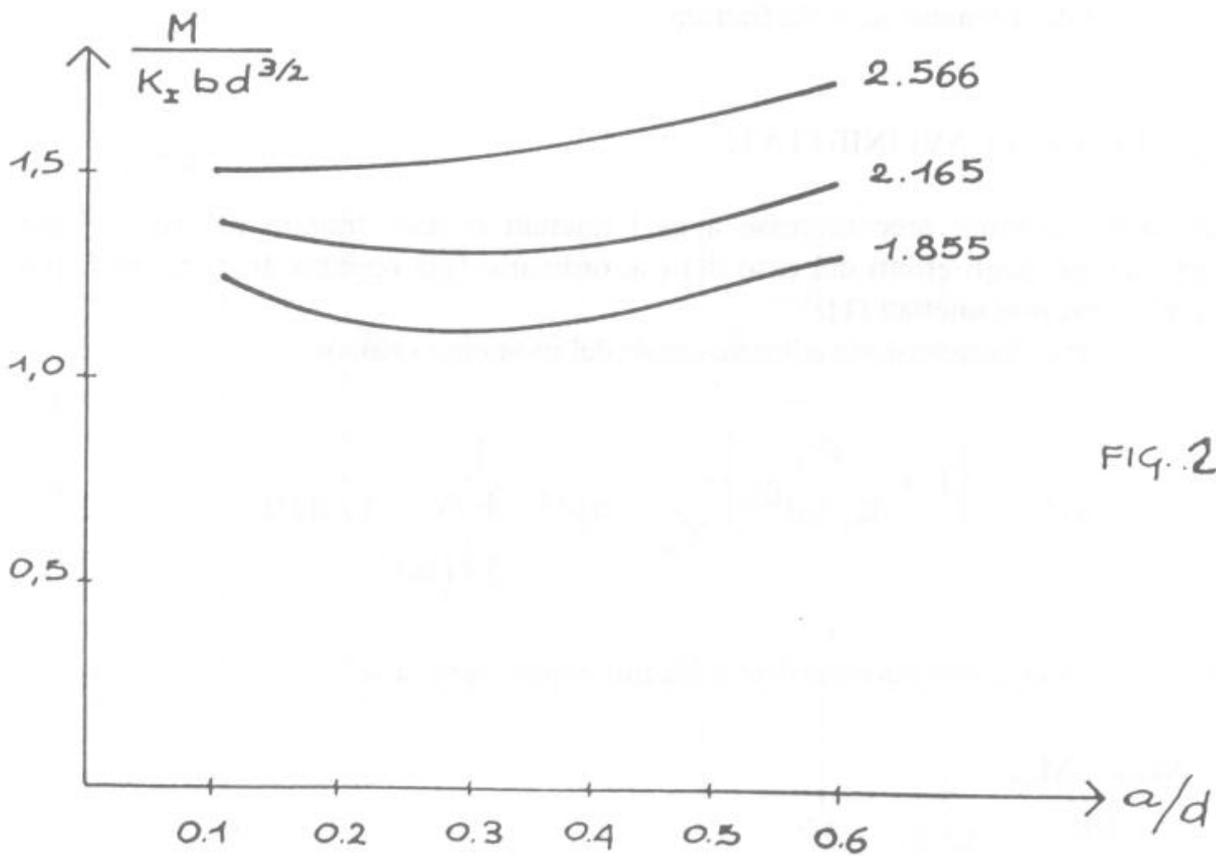


FIG. 2

Tale espressione definisce i valori dei momenti che, in relazione a diverse progressioni della fessurazione (a/d), danno luogo all'apice delle fessura al valore critico di $K_I = K_{IC}$.

Il momento totale \bar{M} , nella sua forma adimensionale, può essere diagrammato in funzione di a/d assumendo come parametro la quantità $F/(K_{IC} bd^{1/2})$.

Il diagramma di fig. 2 fornisce l'andamento del momento adimensionale predetto ipotizzando le segg. circostanze (unità N, mm, salvo diversa indicazione):

- la sezione è rettangolare con $d = 300$, $b = 100$, $h = 60$, $h/d = 0.2$;
- lo sforzo di precompressione è $F = 225000$, attribuibile ad una sezione di armatura di 250 per una $\sigma = 900$ ($\mu = 250 / (300 \cdot 100) = 0.833 \%$) ;
- sono stati presi in considerazione tre tipi di calcestruzzo con $K_{IC} = 70, 80$ e 90 rispettivamente, cui corrispondono tre valori del corrispondente parametro adimensionale $F/(K_{IC} bd^{1/2})$:

1.855 per $K_{IC} = 70$

2.165 per $K_{IC} = 80$

2.566 per $K_{IC} = 90$.

La precompressione fornisce tensioni di -6 e $+21$ rispettivamente all'estradosso ed all'intradosso (segno + indica compressione).

I diagrammi piatti individuano la scarsa dipendenza dei momenti critici dal livello di fessurazione.

Nel caso di $K_{IC} = 70$ le tensioni sono state individuate all'incirca come segue (per $a/d = 0.2 - 0.3$):

calcestruzzo estradosso + 25

calcestruzzo intradosso - 6

acciaio intradosso - 900 .

In corrispondenza dei momenti critici appaiono trazioni relativamente limitate, il che indica possibile il fenomeno della frattura.

3. STRUTTURE A CAVI INIETTATI

Il caso delle strutture precomprese a cavi iniettati è stato trattato nel rif. [2] per sovrapposizione degli effetti del caso del c.a. ordinario (già oggetto di studio in [3]) e del c.a.p. a cavi non iniettati [1].

Il risultato porta all'espressione adimensionale del momento critico:

$$\bar{M} = \frac{M_{cr}}{K_{IC} bd^{3/2}} = \left\{ 1 + \frac{F\Psi}{K_I bd^{1/2}} \right\} \frac{1}{Y_m - \frac{n\mu(1 - h/d - x/d)\Psi}{J/(bd^3)}}$$

L'espressione può essere anche scritta nella forma più espressiva:

$$\bar{M} = \frac{\bar{M}_{unb} \cdot \bar{M}_{ca}}{\bar{M}_o}$$

ove \bar{M}_{unb} è il momento critico della sezione non iniettata, \bar{M}_{ca} è il momento di pertinenza di una sezione in c.a.o. la cui armatura presenti la stessa sezione dell'armatura di precompressione, mentre \bar{M}_o è il momento critico della sola sezione di calcestruzzo in assenza di armatura.

Il confronto tra travi a cavi scorrevoli ed iniettati si deduce dalla fig.3, ove sono indicati i momenti critici nei due casi, per $n = 6$, $\mu = 0.833\%$, $\eta\mu = 0.05$, $K_{IC} = 70$.

Le differenze appaiono notevoli all'incrementarsi del rapporto a/d , ove cresce il momento critico della trave iniettata a fronte della costanza del momento corrispondente della trave non iniettata.

Ove l'iniezione dei cavi avvenga dopo l'intervento di una quota dei carichi (ad es. il peso proprio) cui corrisponda una quota di momento ΔM , il momento critico adimensionale assumerebbe l'espressione

$$\bar{M} = \frac{\bar{M}_{ca} - \bar{M}_{unb}}{\bar{M}_o} + \Delta \bar{M} \left(1 - \bar{M}_{ca} / \bar{M}_o \right)$$

con il significato dei simboli come in precedenza indicato, posto:

$$\Delta \bar{M} = \frac{\Delta M}{K_{IC} b d^{3/2}}$$

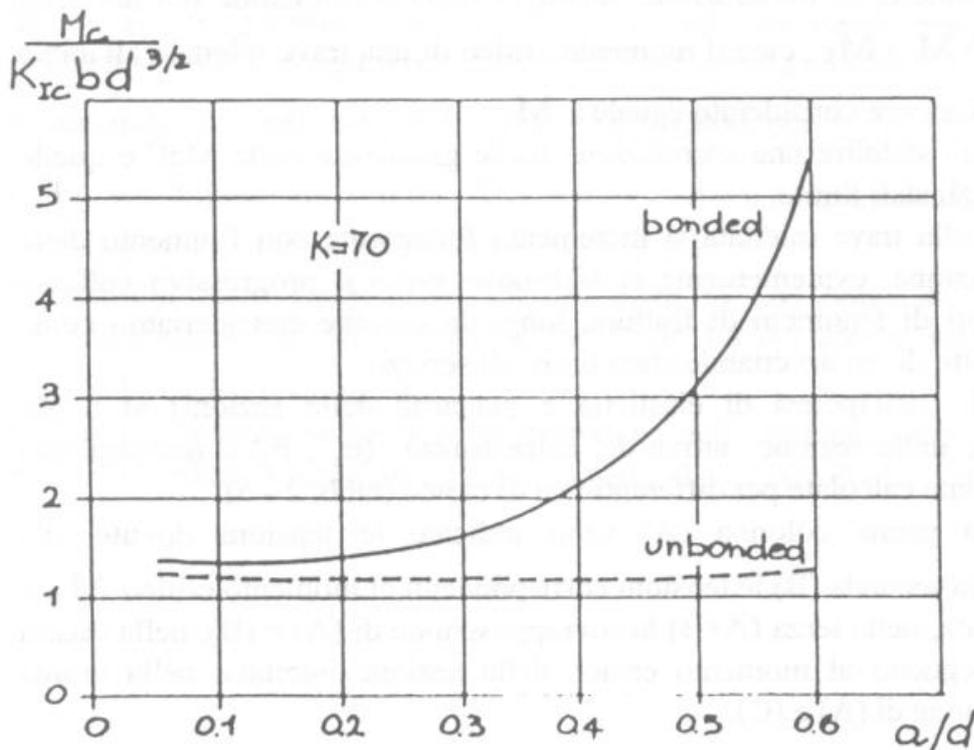


FIG. 3

4. RISULTATI NUMERICI

Sono state condotti i calcoli numerici derivanti dall'applicazione delle formule di cui ai precedenti paragrafi.

In tutti i casi considerati abbiamo assunto (unità N e mm) $K_{IC} = 70$, $b = 100$, $h/d = 0.2$, $\mu = 0.833 \%$, $n = 6$, $n\mu = 0.05$, $\sigma_s = 900$; abbiamo considerato due altezze di trave (300 e 600). Per le due altezze sono risultati sforzi di precompressione $F = 225000$ e 450000 rispettivamente; inoltre sono stati considerati due rapporti profondità della fessura/altezza di trave: $a/d = 0.2$ e 0.3 .

I valori dei corrispondenti momenti (adimensionali) per i quattro casi considerati sono raccolti nella tab. 1.

Nella colonna \bar{M}_u sono riportati i momenti utili.

Nelle assunzioni fatte la precompressione su sezione interamente reagente per entrambe le altezze di trave studiate comporta tensioni di -6 all'estradosso e $+21$ all'intradosso. I momenti utili, rispettivamente pari a 33000000 e 132000000 (adimensionalmente 0.9073 e 1.283), sono stati calcolati in modo tale da generare tensioni che, sovrapposte a quelle di precompressione, diano luogo complessivamente a tensioni pari a $+16$ e -1 rispettivamente all'estradosso ed all'intradosso, ammissibili in rapporto alla classe del calcestruzzo ipotizzata.

Nelle colonne seguenti i momenti critici \bar{M}_{unb} e \bar{M}_o possono confrontarsi con i corrispondenti momenti di fessurazione $\bar{M}_f = M_f / (K_{IC} b d^{3/2})$, rispettivamente per travi non iniettate ($^\circ$) ed iniettate ($^\circ^\circ$), calcolati secondo le norme italiane per un calcestruzzo C50/55. Si nota la buona coincidenza tra i momenti critici per le travi non iniettate ed i momenti di fessurazione per le travi iniettate. In altri termini, il momento critico della trave non iniettata, poco influenzato dall'incremento della fessurazione, è praticamente eguale al momento critico della trave iniettata.

Ora per limitate profondità di fessurazione, all'inizio della fessurazione noi abbiamo $\bar{M} = M_{unb}$ e perciò $\bar{M} = \bar{M}_f$: cioè il momento critico di una trave iniettata all'inizio della fessurazione può essere considerato eguale a \bar{M}_f .

In questo senso si può stabilire una correlazione tra le grandezze della MdF e quelle della teoria classica agli stati limite.

Il momento critico della trave iniettata si incrementa fortemente con l'aumento della profondità di fessurazione; evidentemente ci si muove verso il progressivo collasso della trave, al di fuori di fenomeni di frattura, lungi da ciò che consideriamo come fessurazione nell'ambito di un accettabile stato limite di servizio.

Le tensioni nominali (nell'ipotesi di elasticità e planarità delle sezioni) al bordo superiore ed inferiore della sezione attiva del calcestruzzo (σ_e , σ_i) e nell'armatura metallica (σ_s) sono state calcolate per differenti fasi di carico (tabb. 2 - 5).

In tali tabelle nella prima colonna (A) sono indicate le tensioni dovute alla precompressione, nella seconda (B) le tensioni corrispondenti al momento critico \bar{M}_{unb} della trave non iniettata, nella terza (A+B) la sovrapposizione di (A) e (B), nella quarta (C) le tensioni conseguenti al momento critico della sezione iniettata, nella quinta (A+C) la sovrapposizione di (A) e (C).

Praticamente nella quinta colonna sono indicate le tensioni nominali per i momenti critici su di una sezione precompressa ed iniettata nell'ipotesi di intervento del carico esterno dopo la totale precompressione ed iniezione.

E' necessario rilevare che la prima colonna (A) riporta le tensioni riferentisi solo alla precompressione in un'area ridotta della trave (limitata dall'assunta posizione dell'apice della fessura); questa assunzione porta a tensioni eccessivamente alte e come tali non ammissibili nelle ipotesi assunte (colonna A). Di fatto la precompressione all'inizio dovrebbe essere riferita correttamente alla sezione totale (non fessurata), cui corrisponderebbero tensioni ammissibili anche in assenza di carichi esterni ($\sigma_e = -6$, $\sigma_i = +21$), tensioni che non sono tali da compromettere le successive evoluzioni dello stato di tensione riferibile alla sola sezione non fessurata.

In tal senso nelle colonne seguenti la sovrapposizione degli effetti è correttamente riferita alle tensioni di precompressione nella sezione attiva, cioè delimitata dall'apice della fessura.

I valori indicati nella colonna (A+C) sono al limite compatibili con le ipotesi di elasticità per un calcestruzzo di notevoli caratteristiche di resistenza meccanica come supposto nel presente studio (tensioni entro i 2/3 dei presunti carichi di rottura del conglomerato). Peraltro sembra corretto far riferimento al valore minimo dei momenti critici, cioè a quello corrispondente ad una fessurazione $a/d = 0.2$ per cui le tensioni di compressione e di trazione sono ancora notevolmente contenute. In questo senso i momenti critici possono essere agevolmente raggiunti e perciò può intervenire il fenomeno della frattura fragile. Solo la prima fessurazione avrebbe quindi luogo in ambito di rottura fragile, mentre il prosieguo della fessurazione richiamerebbe progressivamente tensioni elevate nel calcestruzzo, atte a raggiungere il livello di collasso.

La fragilità si esalterebbe in presenza di calcestruzzi con più ridotti valori di K_{IC} e su travi di altezza superiore.

Se poi supponiamo che prima dell'iniezione una parte del momento esterno (ad es. dovuto al peso proprio.) sia già attivo contemporaneamente alla precompressione, il momento critico conseguirebbe dalla formula di cui al precedente paragrafo.

Assumendo: $d = 600$, $a/d = 0.3$, $\bar{M}_u = 132000000$, donde $\bar{M}_u = M_u / (K_1 b d^{3/2}) =$

1.283 , $F = 450000$, $n\mu = 0.05$, $\Delta\bar{M} = 0.25 \cdot \bar{M} = 0.320$, otteniamo:

$$\bar{M} = 2.293 - 0.320 (0.2196 / 0.152 - 1) = 2.150.$$

Le tensioni sono riportate in tab. 6, dove in (A) sono indicate le tensioni di precompressione, in (B) le tensioni dovute ad 1/4 del carico utile, in (C) le tensioni indotte dal carico residuo ($\bar{M} = 2.150$).

Nell'ultima colonna si ha la sovrapposizione delle fasi precedenti, ove le tensioni di trazioni eccedono i valori ammissibili rispetto alle ipotesi di elasticità.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Applicazione della Meccanica della Frattura Lineare alle strutture inflesse in c.a.p. con cavi non aderenti - IGF 11 - XI Convegno Nazionale - Brescia, 4 - 6 luglio 1995.
- [2] Application of Linear Elastic Fracture Mechanics to reinforced and prestressed concrete structures - FRAMCOS - 2 - Zurigo, 25 - 28 luglio 1995
- [3] I calcestruzzi armati ad alta resistenza: proposte di verifica mediante criteri di frattura - L'Industria Italiana del Cemento - n.669 - luglio 1992

Tab. 1

d	a/d	\bar{M}_u	\bar{M}_o	\bar{M}_{umb}	$\bar{M}_f^{(°)}$	\bar{M}_{ca}	\bar{M}	$\bar{M}_f^{(°°)}$
300	0,2	0,9073	0,1994	1,1588	(1,059)	0,2155	1,2525	(1,144)
	0,3		0,152	1,1672		0,2196	1,6836	
600	0,2	1,2830	0,1994	1,556	(1,497)	0,2155	1,6821	(1,6181)
	0,3		0,152	1,587		0,2196	2,293	

Momenti di fessurazione (°) sezione non iniettata
 (°°) sezione iniettata

Tab. 2

d x b = 300 x 100

a/d = 0.2

	A	B	A + B	C	A + C
σ_e	- 18,7	+ 43,9	+ 25,2	+ 42,7	+ 24
σ_i	+ 37,5	- 43,9	- 6,2	- 37,9	- 0,4
σ_s	- 900	-----	- 900	- 227,7	- 1127,7

Tab. 3

d x b = 300 x 100

a/d = 0,3

	A	B	A + B	C	A + C
σ_e	- 30,6	+ 57,7	+ 27,1	+ 67,7	+ 37,1
σ_i	+ 52	- 57,7	- 5,7	- 57,5	- 5,50
σ_s	- 900	-----	- 900	- 452	- 1352

Tab. 4

$d/b = 600 \times 100$

$a/d = 0,2$

	A	B	A + B	C	A + C
σ_e	- 18,7	+ 41,7	+ 23	+ 39,35	+ 20,6
σ_i	+ 37,5	- 41,7	- 4,2	- 37,12	- 0,3
σ_s	- 900	-----	- 900	- 222,7	- 1122,7

Tab. 5

$d \times b = 600 \times 100$

$a/d = 0,3$

	A	B	A + B	C	A + C
σ_e	- 30,6	+ 55,5	+ 25,1	+ 65,7	+ 35,1
σ_i	+ 52	- 55,5	- 3,5	- 55,28	- 3,28
σ_s	- 900	-----	- 900	- 435	- 1335

Tab. 6

$d \times b = 600 \times 100$

$a/d = 0,3$

	A	B	C	A+B+C
σ_e	- 30,6	+ 11,2	+ 61,7	+ 42,3
σ_i	+ 52	- 11,2	- 51,8	- 11
σ_s	- 900	-----	- 407	- 1307