

TEMA C

CALCESTRUZZI FIBROSI

RELAZIONE GENERALE

CALCESTRUZZI FIBROSI: TECNOLOGIE ED APPLICAZIONI

BASSAN Mario

Facoltà di Ingegneria
Politecnico di Milano

CALCESTRUZZI FIBROSI: TECNOLOGIE ED APPLICAZIONI

Mario BASSAN

Ordinario di Ergotecnica Edile
Facoltà di Ingegneria - POLITECNICO DI MILANO

SOMMARIO

Si esaminano in dettaglio le differenti caratteristiche prestazionali ed i conseguenti settori applicativi dei materiali composti a matrice cementizia, sia in relazione alle diverse tipologie di armature fibrose utilizzabili che in rapporto alle varie tecnologie produttive impiegate per la produzione di manufatti ed elementi in F.R.C. (Fibre Reinforced Concrete).

SUMMARY

The different performance characteristics and application field of concrete-based composite materials are thoroughly examined: both in relation to the range of fibrous reinforcements available for use and to the various technologies employed in the production of F.R.C. manufactures and components.

1. PREMESSA

Che in un seminario concernente i calcestruzzi speciali una mattinata venga dedicata alla trattazione dei calcestruzzi fibrosi è cosa del tutto naturale; più complesso peraltro appare a ns. avviso il compito di esaurire il tema delle tecnologie e delle possibilità applicative di questi materiali entro un tempo di soli 30 minuti.

Il discorso dovrà quindi essere necessariamente sintetico, come del resto s'addice a una trattazione in sede A.I.C.A.P. nella quale convergono essenzialmente colleghi "addetti ai lavori" e quindi già specificamente competenti in ordine alle problematiche di questo settore.

2. CONSIDERAZIONI GENERALI

In linea preliminare osserviamo subito come, a differenza degli altri più usuali materiali da costruzione (acciai, materiali lapidei, legno, conglomerati cementizi, laterizi ecc.) per ciascuno dei quali è possibile l'individuazione di caratteristiche prestazionali sufficientemente definite, i materiali composti siano costituiti da una prima fase di armatura fibrosa diffusa all'interno di una seconda fase di inviluppo detta matrice.

Ne consegue che, al variare della natura dell'una e dell'altra fase (matrice e armatura fibrosa) così come modificando il dosaggio o l'orientamento delle armature fibrose all'interno della matrice, si possono ottenere materiali composti con caratteristiche prestazionali estremamente differenziate.

Ecco quindi che i Compositi si presentano quali materiali da costruzione dotati di ampi gradi di libertà e possono essere progettati in funzione del prodotto finale da realizzare.

Le loro caratteristiche prestazionali non si presentano più quindi come dati di "input" dei quali il progettista debba verificare l'accettabilità in relazione alle ipotizzate condizioni d'esercizio, ma bensì come "output" risultanti, da perseguire e conseguire proprio in funzione delle condizioni d'esercizio assunte.

Anche limitando l'esame ai soli compositi a matrice cementizia (che formano appunto l'oggetto del nostro interesse), la possibilità di utilizzare matrici di pasta o malta o calcestruzzo cementizio e soprattutto armature fibrose di acciaio, di vetro, di amianto o di polipropilene (tanto per citare le più usuali) o di nylon, cellulosa, sisal, carbonio o aramidiche ecc., ciascuna con le varie caratteristiche di rapporto L/ϕ , di sagomatura, fibrillatura, orientamento ecc. dà luogo ad una ampia e assai diversificata famiglia di materiali compositi: tutti a matrice cementizia ma con caratteristiche prestazionali (e, conseguentemente, con campi d'applicazione) estremamente differenziati.

Alla data odierna i materiali compositi a matrice cementizia non rappresentano certamente una novità ed hanno infatti da tempo trovato una precisa collocazione nel campo dei materiali da costruzione con le loro indiscutibili caratteristiche prestazionali ma anche con i loro limiti, ragion per la quale i relativi campi di applicazione appaiono ormai universalmente riconosciuti e sufficientemente delimitati; non altrettanto possiamo affermare per quanto concerne la tecnologia produttiva, per la quale accanto a procedimenti ormai consolidati, si vanno sviluppando ed affinando altri e più sofisticati sistemi, finalizzati al raggiungimento di obiettivi particolari.

In Italia l'utilizzo di questi materiali ha peraltro avuto inizio con un certo ritardo temporale rispetto ad altri paesi europei (Inghilterra, Francia e Germania Federale) ed extraeuropei (Stati Uniti, Australia, India ecc.) e di conseguenza, presso taluni operatori del settore edile (e civile in generale) non sembra siano ancora del tutto scomparse talune eccessive aspettative o certi ingiustificati pregiudizi che inevitabilmente conducono sia ad errate conclusioni come pure (per altri versi) a scorretto utilizzo dei materiali stessi.

Una migliore conoscenza della tecnologia e delle possibilità di impiego dei compositi a matrice cementizia appare quindi d'obbligo per chiunque intenda utilizzare correttamente questi materiali da costruzione sotto molti aspetti insostituibili e comunque di estremo interesse.

3 . CARATTERISTICHE DEI COMPOSITI A MATRICE CEMENTIZIA

Prescindendo delle varie e differenziate proprietà prestazionali ottenibili attraverso l'utilizzo delle diverse variabili progettuali (quali le caratteristiche della matrice cementizia; tipo e materiale della armatura fibrosa diffusa; dosaggio dell'armatura stessa; diffusione casuale randomizzata o orientata dell'armatura stessa ecc.) possiamo affermare che in generale con i compositi a matrice cementizia si possono ottenere ottime caratteristiche per quanto concerne la duttilità e la resilienza (quasi sempre nettamente superiori a quelle della matrice cementizia), analogamente la meccanica di diffusione delle microfessurazioni e di arresto o ritardo della loro crescita (con conseguente miglioramento delle resistenze al gelo, all'usura ecc.) costituisce uno degli aspetti più interessanti di questi materiali.

Al contempo si riscontra altresì un sostanziale aumento della consistenza che potrà rappresentare, a seconda dei casi, un inconveniente per la diminuzione della lavorabilità oppure una prerogativa vantaggiosa soprattutto con l'adozione di tecnologie produttive di gunitaggio, per l'aumento di quella caratteristica di adesione ai supporti (spesso impropriamente definita "tissotropia").

Chiarito così il quadro delle caratteristiche precipue di questi materiali appare del tutto naturale ritrovare il campo di una loro razionale utilizzabilità proprio in quelle applicazioni nelle quali le citate prerogative siano richieste e necessarie mentre non risulterà conveniente o potrà divenire addirittura scorretto il loro impiego ogniquale volta la domanda sia orientata verso prestazioni di altra e diversa natura.

4. UTILIZZO DEI COMPOSITI A MATRICE CEMENTIZIA

Agli inizi degli anni 70 , molti operatori ritenevano che i calcestruzzi fibrosi avrebbero potuto entro un lasso di tempo ragionevolmente breve , configurarsi quale materiale da costruzione alternativo e magari addirittura sostitutivo del cemento armato:

Militavano a favore di tale speranza il diffusissimo interesse per la razionalizzazione dei processi di prefabbricazione attraverso l'adozione di tecniche di automazione spinta del processo produttivo e come ben sappiamo nel processo prefabbricativo la posa in opera delle armature convenzionali d'acciaio , rappresenta la fase che meno si presta ad uno sviluppo automatizzato .

Le armature fibrose diffuse (fibre corte randomizzate soprattutto d'acciaio) aggiunte all'impasto quasi come un ulteriore componente oltre al legante ed agli inerti avrebbero permesso una facile e totale automazione del processo .

Tale considerazione, che conserva anche oggi inalterata tutta la sua validità, indusse quindi a procedere con crescente interesse all'utilizzo di calcestruzzi fibrosi per la realizzazione di elementi entro certi limiti classificabili come elementi strutturali : tipici i grandi pannelli portanti prefabbricati diffusamente utilizzati in quel periodo e che oltre tutto presentavano anche il grande vantaggio di essere soggetti a sollecitazioni quasi sempre modeste .

Successivamente venuto meno l'interesse per i sistemi prefabbricativi a grandi pannelli (cosiddetti pesanti) ed anche in parte ridimensionate le attese per le metodologie prefabbricative in genere, quando si esaminarono le possibilità di estendere l'utilizzo dei compositi a matrice cementizia ad altri e più impegnativi elementi strutturali , apparve ben chiaro (e del resto lo era fin dall'inizio) che il calcestruzzo fibrorinforzato non è in grado di proporsi quale materiale alternativo al cemento armato ordinario (e quindi tanto meno al C.A.P.) per la realizzazione di elementi strutturali ad alto tasso di sollecitazione (travi, pilastri ecc.) .

Tale limitazione (a parte casi e condizioni del tutto particolari ad es. per elementi di modestissima importanza) resterà valida a ns. avviso per lo meno fino a quando non saranno stati ottenuti sostanziali progressi tecnologici in ordine allo sfruttamento totale della resistenza delle armature fibrose .

Ricordiamo a tale riguardo che lo sfruttamento massimo della resistenza meccanica delle armature fibrose può essere conseguito solo quando il collasso dell'elemento realizzato è preceduto dalla rottura delle fibre mentre ogniqualevolta il cedimento si verifica con sfilamento delle fibre stesse (pull out) , il rendimento della armatura decresce.

D'altraparte occorre anche tenere presente che una delle più interessanti prerogative (quella della duttilità) è strettamente legata al fenomeno del "pull out" mentre la rottura delle armature fibrose può condurre ad un cedimento fragile del componente.

Ulteriori considerazioni circa il rendimento delle armature fibrose , sono connesse al loro orientamento spaziale per il quale si può assumere, in linea di massima, un coefficiente di riduzione del rendimento pari a 0,6 per una randomizzazione a 2D e pari a 0,4 a 3D.

Un caso particolare è rappresentato dal GRC nel quale peraltro le specifiche prerogative del materiale (analoghe a quelle del fibro-cemento-amianto) e la tecnologia ormai consolidata sui sistemi di gunitaggio, portano a ipotizzare talvolta anche la realizzazione di elementi con caratteristiche di portanza strutturale ma sempre sviluppati quali componenti soggetti a stati di sollecitazione membranale o con rigidezza conseguita attraverso la forma di elementi corrugati o ondulati a parete sottile .

Chiarita quindi la non sostituibilità del cemento armato con il calcestruzzo fibroso, per quest'ultimo risultano di estremo interesse tutte le applicazioni nelle quali le sollecitazioni d'urto e le azioni di usura appaiono prevalenti quali ad esempio :

Pavimentazioni industriali

Piste areoportuali

Costruzioni di pavimentazioni stradali

Pareti antiscoppio

Ricoveri e fortificazioni (in questi ultimi per lo più in unione ad armature convenzionali)

Anche i pannelli di tamponamento autoportanti per edifici con struttura astiforme in acciaio o C.A., trovano nei composti a matrice cementizia un materiale sotto molti aspetti vantaggioso , in particolare il GRC con le sue possibilità di estrema riduzione degli spessori e quindi dei pesi appare interessante e potrebbe divenirlo ancor più se talune remore per quanto concerne la durabilità (specie in ambienti caldi e umidi) non ne consigliassero una doverosa prudenza nella adozione.

Il controllo della fessurazione, (altra prerogativa caratteristica dei composti a matrice cementizia), porta a vantaggiose possibilità di impiego per la realizzazione di elementi di condotte idrauliche (tubazioni) e per elementi sottoposti a condizioni ambientali aggressive quali i moli per attracco natanti o i tetrapodi utilizzati per le dighe foranee .

5. TECNOLOGIE PRODUTTIVE E APPLICAZIONI SPECIALI

A parte la più semplice tecnologia basata sull'inserimento delle armature fibrose durante la fase di mescolamento della matrice cementizia (tipica dei compositi con armature fibrose d'acciaio), la facile formabilità di elementi complessi attraverso la tecnologia del gunitaggio ha permesso la realizzazione di svariati componenti quali ad es.: cabine telefoniche, componenti di completamento, casseforme a perdere per la esecuzione di getti, elementi di controsoffittature, predalles, embrici per coperture di abitazioni, finte rocce per la formazione di ambientazioni particolari ecc.

Si tratta dunque di una pluralità di applicazioni (forse speciali e particolari), che sotto un certo aspetto esulano dal settore delle vere e proprie applicazioni strutturali quali tradizionalmente siamo abituati a considerare, ma tutte certo rientranti nella competenza dell'ingegneria civile e della architettura e quindi di interesse dei progettisti edili e civili.

Ho volutamente lasciato per ultimo un campo che solo in tempi più recenti ha cominciato a trovare sviluppi applicativi ma che probabilmente è destinato a divenire il settore più importante per l'utilizzo dei compositi a matrice cementizia: mi riferisco al gunitaggio diretto, finalizzato al consolidamento dei terreni franosi, degli scavi in galleria ed alla riparazione superficiale di elementi di calcestruzzo degradato; settore applicativo questo che sfrutta al meglio la possibilità di impiego dei calcestruzzi fibrosi.

Come noto infatti la tecnica del gunitaggio per questi materiali a matrice cementizia ha sempre costituito la tecnologia dominante per la produzione di manufatti con armatura fibrosa di vetro alcali-resistente (GRC) dato che gli altri sistemi di miscelazione o di impregnazione non permettono con le fibre di vetro, il conseguimento di risultati altrettanto brillanti.

Per il gunitaggio di compositi a matrice cementizia con armatura di fibre d'acciaio SFRC, in passato si erano al contrario riscontrate difficoltà operative: vuoi per una certa inadeguatezza delle apparecchiature di gunitaggio (non sempre in grado di far fronte alle particolari caratteristiche del SFRC), vuoi per una insufficiente esperienza degli operatori; d'altraparte la più semplice e sicura tecnologia della mescolazione diretta del SFRC con susseguente getto in opera risultava ampiamente idonea alla realizzazione di manufatti anche complessi ed ha forse ritardato l'interessamento degli operatori circa l'utilizzo di SFRC per il gunitaggio.

In seguito sono state però sviluppate anche attrezzature particolari e più idonee al gunitaggio del SFRC ragione per la quale, allo stato attuale possiamo affermare che la maggior parte delle difficoltà sono state ormai rimosse ed il gunitaggio del SFRC viene oggi praticato correntemente con rilevanti vantaggi economici, di sicurezza, e di rapidità operativa.

La elevata consistenza dell'impasto conseguente alla presenza dell'armatura fibrosa diffusa diviene in questo caso la carta vincente per le applicazioni specie se essa venga controllata anche dal punto di vista della evoluzione temporale con un contestuale impiego di additivi (superfluidificanti) particolarmente scelti e dosati.

In relazione a ciò sono state quindi sviluppate tecniche particolari per il consolidamento e lo scavo di gallerie in terreni argillosi che prevedono anche l'iniezione di calcestruzzo fibroso per la realizzazione in opera di gusci atti a garantire condizioni facilitate per un rapido e sicuro avanzamento degli scavi in galleria.

Il gunitaggio di calcestruzzi armati con fibre metalliche è stato spesso eseguito premiscelando l'impasto fibroarmato a secco e operando l'iniezione dell'acqua per l'idratazione del legante in corrispondenza dell'ugello (in tal caso parliamo di gunitaggio con impasto a secco).

Altri operatori preferiscono procedere alla formazione dell'impasto di S.F.R.C. tradizionale procedendo quindi successivamente al suo gunitaggio con aria compressa (e in questo secondo caso parliamo di gunitaggio a umido).

Nell'uno e nell'altro caso le difficoltà o se preferite i limiti del sistema sono costituiti dal fatto che anche per macchine dotate di sufficiente capacità di trasferimento con tubazioni ed ugelli di grosso diametro, una eccessiva consistenza dell'impasto o un eccesso di attrito dell'impasto possono provocare ostruzioni ed occlusioni all'interno della condotta con conseguenti irregolarità di funzionamento.

Purtroppo il verificarsi di simili inconvenienti cresce ovviamente al crescere del rapporto $L/\emptyset$ e conseguentemente gli operatori spesso sono stati indotti a ridurre tale rapporto caratteristico delle armature fibrose per i calcestruzzi con armatura di fibre d'acciaio destinati al gunitaggio.

Hanno quindi trovato impiego fibre troppo corte (25,30,35 mm.) e di diametro non sempre ottimale (0,4 ; 0,5 ; 0,6 mm.), con valori del rapporto $L/\emptyset$ pari a 50 o anche meno.

Questi accorgimenti se da un lato permettono di superare gli inconvenienti citati, riducono anche contestualmente il rendimento dell'armatura fibrosa con conseguente riduzione delle caratteristiche di qualità del composito.

Gli sforzi dei vari produttori e degli operatori in genere sono stati quindi rivolti a cercare una soluzione di compromesso ottimale fra le esigenze operative delle attrezzature di gunitaggio e le esigenze tecnologiche della produzione di SFRC.

Praticamente questo compromesso è stato trovato con l'impiego di armature fibrose aventi rapporti $L/\emptyset$ pari a 60 - 70 (massimo 80) mentre per impasti mescolati e gettati si possono raggiungere valori di tale rapporto pari a 100 e (con particolari accorgimenti) anche 120.

Solo in tempi molto recenti si è compiuto un passo avanti anche in questo settore ma si tratta di un sistema a mio avviso non ancora uscito dalla fase sperimentale e del quale si conoscono solo poche applicazioni.

E' stata infatti sviluppata un'attrezzatura che permette il gunitaggio con alimentazione di fibre d'acciaio continue.

Il sistema in se e per se non può definirsi originalissimo in quanto ricalca abbastanza da vicino i principi delle attrezzature usate per lo spruzzo del GRC solo che mentre per quest'ultimo le taglierine rotanti destinate al taglio dei Roving di fibre di vetro esistono da lunga data e funzionano senza porre particolari problemi, le difficoltà connesse con il taglio rapido in continuo del filo di acciaio realizzato con un dispositivo sufficientemente maneggevole e sicuro, fino a qualche tempo fa non erano state ancora risolte.

Ora sembrerebbe che i maggiori problemi di usura, di velocità, di raffreddamento, di quantità di fibre e quindi di resa siano stati superati e non è quindi da escludersi che almeno per talune applicazioni si potrà assistere in un prossimo futuro ad una piccola rivoluzione nel settore.

Certamente l'adozione di una simile attrezzatura permetterà un salto di qualità nei rapporti $L/\emptyset$ potendosi raggiungere lunghezze delle armature fibrose fino a 200 mm. il che significa arrivare a rapporti $L/\emptyset$ di 400 con rendimenti dell'armatura fibrosa elevatissimi.

D'altraparte il gunitaggio con fibre tanto lunghe conduce ad un parziale orientamento dell'armatura fibrosa che per spessori sottili risulterà tutt'al più randomizzata in 2 D ed anche questo risultato può essere per certi versi vantaggioso.

Non credo di dover aggiungere ulteriori considerazioni in ordine a questa tecnologia trattandosi di un sistema che si avvale di un'attrezzatura troppo recente, se però la sperimentazione dovesse confermarne la funzionalità sono certo che le applicazioni potranno risultare di estremo interesse.

Sempre per restare nel settore della tecnologia osserviamo come notevoli progressi siano stati fatti nello sviluppo di attrezzature automatiche per il dosaggio e la distribuzione delle armature fibrose d'acciaio nel mescolatore.

Se in tempi lontani infatti, le armature fibrose venivano setacciate manualmente attraverso una rete metallica per evitare la formazione di ricci, ora le stesse vengono convogliate al miscelatore con l'impiego di nastri o con dosatori a coclea che oltre ad assicurare una uniforme distribuzione delle fibre all'interno dell'impasto della matrice permettono di eseguire automaticamente l'intera operazione di miscelazione del SFRC.

Parimenti, la stesura del SFRC per l'esecuzione di pavimentazioni industriali o piste stradali ecc. realizzata in passato con i tradizionali sistemi basati sull'impiego di stagie manuali viene ormai quasi sempre eseguita con macchine finitrici vibranti il che era probabilmente nella logica conseguente alla realizzazione di opere sempre più ampie anche sotto l'aspetto dimensionale.

6. PROSPETTIVE DI SVILUPPO:

Come certamente sarà stato rilevato, abbiamo volutamente tralasciato di affrontare gli aspetti più specificamente connessi con le problematiche progettuali di calcolo e di verifica delle condizioni di stabilità dei componenti realizzati in FRC, in quanto oggetto del prossimo intervento che sarà tenuto dal collega Prof. Goffi.

Da quanto fin qui sinteticamente esposto, crediamo peraltro possa risultare un quadro di massima in ordine allo stato dell'arte (alla data attuale) per quanto riguarda i più importanti aspetti tecnologici ed applicativi.

Certamente sarà stato rilevato come nella trattazione siano stati trascurati molti altri materiali composti a matrice cementizia quali il fibrocemento-amianto, i PFRC, i composti con armatura di fibre vegetali ecc.

Si tratta infatti per il primo di un materiale che appare ormai per svariati motivi in fase di recessione e la cui importanza (un tempo rilevantissima) sembra destinata a ridursi sempre più in futuro e per gli altri, di materiali talvolta assai promettenti ma le cui applicazioni sono ancora troppo ridotte per poter trarre conclusioni definitive circa la loro utilizzabilità.

Certamente però uno sguardo alle prospettive di applicazione dei FRC non può prescindere dall'apporto che i composti a matrice cementizia ed armature fibrose a base di resine potranno dare in futuro.

I problemi attualmente oggetto di studio vanno dalla ricerca di materiali effettivamente alternativi e sostitutivi del fibrocemento-amianto alla risoluzione dei problemi connessi con la durabilità dei manufatti in FRC.

Su quest'ultimo tema (attualissimo non solo per i composti ma per tutti i materiali a base cementizia) sono in corso in tutti i paesi numerose sperimentazioni e si attendono risultati auspicabilmente definitivi.

Si tratta di argomenti assai complessi stante l'elevatissimo numero di variabili parametriche influenti sui processi del degrado e quindi sulla durabilità.

Si può tuttavia ritenere che entro il prossimo quinquennio, la durata di vita efficiente dei manufatti e componenti, assunta quale prestazione qualitativa, potrà essere predeterminata (quantomeno per classi di durabilità) grazie ad una migliorata conoscenza delle dinamiche dei fenomeni di degrado.

Naturalmente per i composti a matrice cementizia potranno assumere importanza rilevante i trattamenti combinati con la polimero-impregnazione (di cui fra breve avrà modo di parlare il collega Prof. Rio) così come l'utilizzo di più moderne ed innovative matrici cementizie di alta ed altissima qualità quali quelle trattate e illustrate nella riunione seminariale di ieri.

7. CONCLUSIONI :

Possiamo quindi così riassumere quanto fin qui esposto:

-I materiali composti a matrice cementizia si collocano in un campo ben definito nel settore dei materiali da costruzione.

-Dalla combinabilità fra diversificate matrici cementizie con differenti armature fibrose, è possibile ottenere caratteristiche finali adeguate alla domanda prestazionale purché la stessa rimanga confinata entro il campo della capacità tecnologica dei FRC.

-Allo stato attuale i FRC non si presentano quindi quali materiali alternativi (né tantomeno sostitutivi) del C.A. o del C.A.P.

-L'utilizzo di FRC quali matrici rinforzate e duttili per la realizzazione di speciali elementi in C.A. (e cioè dotati anche di armature convenzionali) può peraltro risultare di particolare interesse per il superamento di condizioni particolari di sollecitazione (ad es. d'urto, sismiche ecc.) .

-L'impiego di FRC nelle diverse combinazioni ed entro il relativo campo di utilizzabilità per la realizzazione di elementi e componenti, non può prescindere da un accurato studio preliminare delle condizioni di costruzione e di esercizio per una corretta progettazione del materiale stesso e per l'individuazione delle tecnologie più idonee alla sua produzione.

-Gli aspetti connessi con la durabilità degli elementi realizzandi (ove perseguita), dovranno formare oggetto di particolare attenzione stanti le obiettive incertezze ancora sussistenti in ordine alla loro valutazione.

-Le differenziate ed articolate tecnologie produttive finora utilizzate e quelle prevedibili per il prossimo futuro, lasciano prevedere ampi sviluppi del campo di applicazione dei FRC demandati e proposti alla fantasia ed allo spirito di innovazione degli operatori (progettisti ed esecutori) nel settore dell'ingegneria civile.

-Tali sviluppi applicativi non potranno peraltro prescindere dall'apporto di una articolata attività di ricerca sperimentale parallelamente condotta.

In questa ottica appare quindi non solo opportuna ma addirittura indispensabile una stretta ed integrata collaborazione fra i ricercatori operanti nei vari settori (universitario, industriale ecc.) e gli operatori del mondo della produzione.

In molti paesi europei ed extraeuropei una simile interrelazione fra gli ambienti della ricerca e quelli della produzione appare da tempo assai più diffusa di quanto non lo sia stata finora in Italia ; è quindi altamente auspicabile che la prossima integrazione europea (prevista a partire dal 1993) ci trovi preparati anche a questo riguardo.

=====

BIBLIOGRAFIA :

N.B.

La bibliografia concernente la tecnologia e le applicazioni dei FRC appare ricchissima e si va ampliando ad un ritmo crescente.

Vengono pertanto citate solamente alcune delle pubblicazioni dalle quali potranno essere tratte più ampie informazioni in ordine agli argomenti trattati:

-RILEM, Proceedings of symposium 1975 London : "Fibre Reinforced Cement & Concrete" , The Construction Press Ltd. 1975

-RILEM, Proceedings of symposium 1978 Sheffield : "Testing and Test Methods of Fibre Cement Composites" , The Construction Press Ltd. 1978

-A.I.C.A.P. "Raccomandazioni tecniche AICAP per l'impiego del conglomerato cementizio fibroso" , Notiziario AICAP N° 9 / 1982

-A.C.I. Proceedings of international symposium 1982 Detroit : "Fiber Reinforced Concrete" , ACI Publication SP-81 - 1984

-RILEM, Proceedings of symposium 1986 Sheffield: "Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete" , Rilem Publication TC 49 TFR / 1986

-"The international Journal of CEMENT COMPOSITES and Lightweight Concrete" , Longman Group UK Ltd. , annate dal 1979 al 1988.

Numerosissimi sono inoltre gli articoli comparsi sulle riviste specializzate del settore e in particolare: "Materiaux et Construction"; "ACI Journal"; "Cement and Concrete Research"; "Magazine of Concrete Research" .

RELAZIONE GENERALE

CALCESTRUZZI FIBROSI: SPERIMENTAZIONE E PROGETTAZIONE

GOFFI Luigi

**Dipartimento di Ingegneria Strutturale
Politecnico di Torino**

SPERIMENTAZIONE E PROGETTAZIONE DEI CALCESTRUZZI FIBROSI (F.R.C.)

Luigi GOFFI

Professore Ordinario
Dipartimento di Ingegneria Strutturale
Politecnico di Torino

SOMMARIO

I calcestruzzi armati con fibre in acciaio vengono studiati sia dal punto di vista delle teorie tradizionali, sia secondo la Meccanica delle Fratture. Viene sottolineata l'importanza della sperimentazione ai fini di delineare un possibile criterio di progettazione secondo il principio del "Design by testing".

SUMMARY

Steel Fibres in Concrete are considered by us as traditional reinforcement of a cementitious matrix and through the Fracture Mechanics approach. The author outlines the function of testing in order to give a design criterion through the "Design by Testing approach".

1. GENERALITA'

In questa sede prenderemo in considerazione essenzialmente le fibre di acciaio, in pratica le uniche a presentare moduli elevati e pertanto idonee a mobilitare forze rilevanti in corrispondenza alle deformazioni della matrice cementizia. Poichè la matrice cementizia non accetta grandi deformazioni per le sue caratteristiche di fragilità, occorre un modulo elevato della fibra perchè a modeste ϵ (compatibili con l'integrità della matrice) nascano in essa σ elevate e pertanto efficaci sul piano strutturale.

Comunque la presenza di fibre, anche se ad elevato modulo, non conferisce di fatto incrementi significativi per la resistenza della matrice (sia a trazione che a compressione).

Pertanto non si deve pensare di sostituire con le fibre le armature (c.a.o. oppure

re c.a.p.); non si deve cioè attribuire alle fibre il ruolo delle armature del c.a.o. e del c.a.p. (1).

Di fatto l'apporto delle fibre registra soprattutto:

- 1) un miglioramento della deformabilità a rottura (compressione e trazione);
- 2) un miglioramento del comportamento fessurativo per elementi tesi o inflessi, anche in presenza di armature di tipo classico (c.a. e c.a.p.);
- 3) un aumento di resistenza all'impatto (urto);
- 4) un aumento di resistenza al gelo;
- 5) un aumento di resistenza all'usura.

Le caratteristiche strutturali più interessanti che vengono messe in evidenza dalla presenza delle fibre sono l'aumento della resistenza alla deformabilità del materiale: cioè il conferimento di plasticità al materiale e quindi di duttilità alle strutture: requisito questo importante per molti aspetti. Si cercano oggi materiali resistenti alla deformazione in quanto c'è l'esigenza di realizzare strutture duttili, cioè resistenti alla deformazione. Il caso del cemento sismico può essere uno dei casi di sollecitazione in termini di deformazione impressa per cui vi è una richiesta di duttilità della struttura.

2. CRITERI DI INTERPRETAZIONE DEL COMPORTAMENTO DEL F.R.C.

Il ruolo della fibre nel composito può essere pragmaticamente evidenziato da una prova codificata secondo le ASTM che giunge a definire una cosiddetta Relative Fracture Toughness (Tenacità Relativa alla Frattura - R.F.T.): su di un provino di dimensioni assegnate sottoposto a flessione si determinano le curve carichi-frecce limitate alla freccia di 1.9 mm (vedi fig. 1): se il punto B definisce il limite del tratto lineare del diagramma, la R.F.T. è definita:

$$I = \frac{\text{area ABCD}}{\text{area ABE}}$$

rapporto tra le aree delimitate dai punti in figura.

Si può affermare che per il calcestruzzo semplice è $I \approx 1$ e per F.R.C. $I = 15 \div 20$ a seconda del dosaggio delle fibre.

Questo tipo di prova è stato recepito dalle Raccomandazioni Tecniche AICAP per l'impiego del conglomerato cementizio fibroso.

Una interpretazione più specifica del ruolo delle fibre in un composito si ha essenzialmente attraverso l'istituzione di un modello fisico e matematico di calcolo.

Ci possono essere due approcci:

- 1) considerare le fibre come armature in grado di trasmettere forze attraverso il calcestruzzo fessurato: cioè studiare il comportamento delle fibre (pull-out o rottura) in funzione di parametri geometrici diametro $\emptyset$ e lunghezza l , o il loro rapporto $l/\emptyset$ = rapporto di aspetto e in funzione delle caratteristiche della matrice;
- 2) considerare il calcestruzzo fibroso come un materiale omogeneo cui le fibre impartiscono certe proprietà e interpretarne opportunamente il comportamento.

(1) Solo per manufatti di modesto impegno statico si può pensare al ruolo delle fibre come armatura tradizionale.

Tali proprietà sono vantaggiosamente descritte mediante la Meccanica della Frattura (M.d.F.) in quanto i valori dei parametri caratteristici di questa disciplina sono fortemente influenzati dalla presenza delle fibre.

In ogni caso la complessità delle tematiche in oggetto porta necessariamente al ricorso alla sperimentazione per il procedimento di verifica e dimensionamento di manufatti in F.R.C.

Nel caso del F.R.C. di fatto ci si deve quindi riferire alla sperimentazione e pertanto al "Design by Testing", filosofia di progetto che oggi solleva nuovo interesse e che si avvia anche ad essere codificata a livello Eurocodici.

E' interessante rilevare come nell'epoca dei calcolatori riemerge l'esigenza della sperimentazione con questa duplice impostazione:

- 1) sperimentazione su prototipi per ricavarne per via statistica un valore caratteristico di resistenza da cui dedurre un valore di resistenza di progetto;
- 2) sperimentazione su prototipi per ricavare suggerimenti per un modello matematico di calcolo.

2. CRITERI DI VERIFICA DEL F.R.C.

2.1 L'approccio tradizionale

Consideriamo innanzitutto la prima forma di approccio, quella che considera le fibre come armatura che consente la trasmissione di sforzi anche attraverso la matrice fessurata.

Per semplicità parliamo di fibre isoorientate (in caso di distribuzione random nel piano o nello spazio si apportano coefficienti correttivi).

Sono parametri significativi:

- il volume critico, cioè il volume di fibre (rapportato al volume del composito) necessario perchè dopo la rottura per trazione della matrice possa ancora essere sopportato il carico che il composito sopportava prima della fessurazione;
- la lunghezza critica l_c delle fibre, che è la lunghezza della fibra che cede contemporaneamente per sfilamento (pull-out) e per rottura a trazione, ove la fibra stessa sia immersa in una matrice fessurata in corrispondenza della mezzatura della fibra stessa: tale lunghezza critica si deduce facilmente dalla relazione

$$\sigma_R \cdot \frac{\pi \phi^2}{4} = \tau_R \pi \phi \frac{l_c}{2}$$

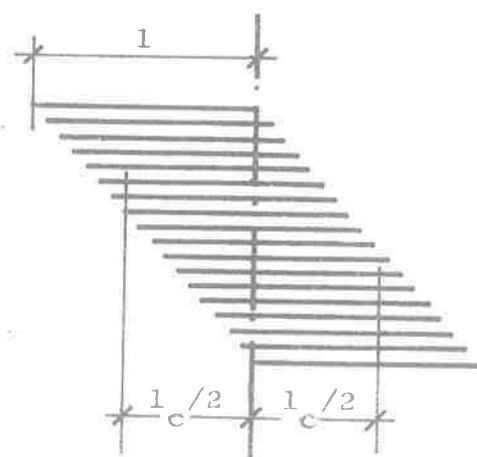
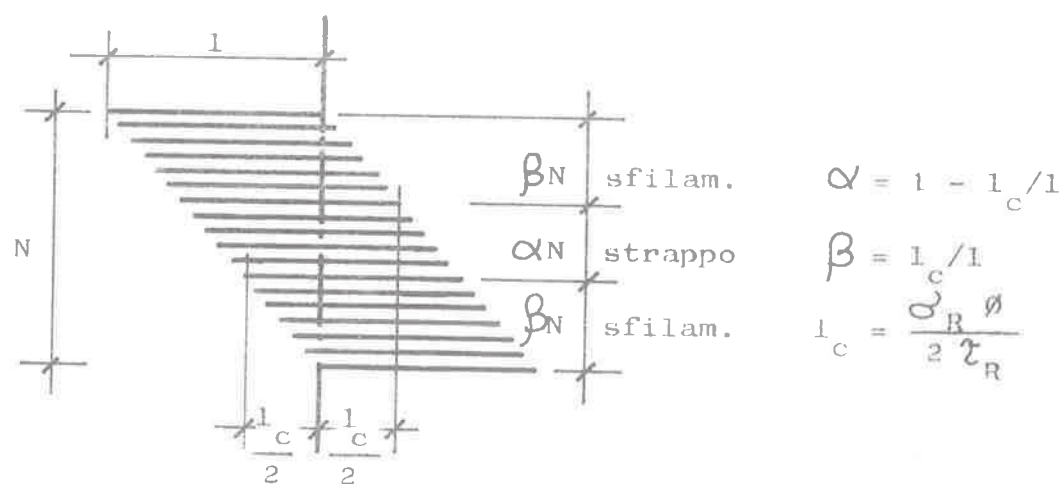
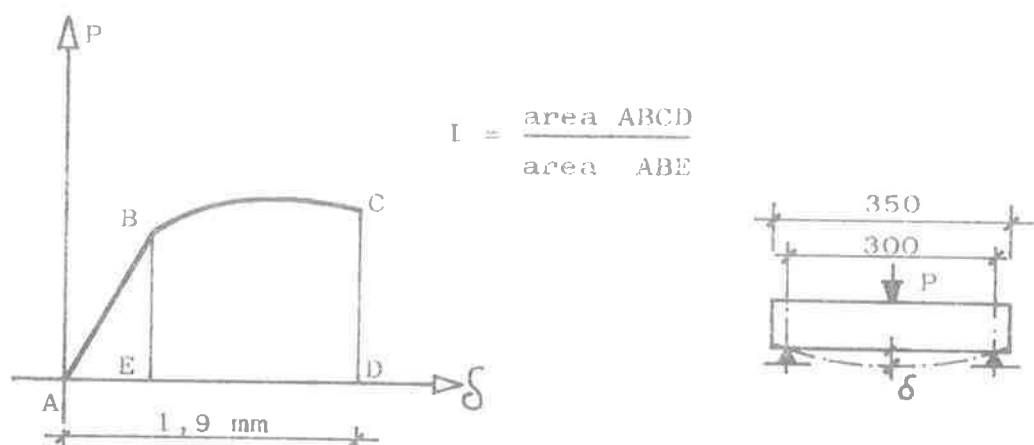
donde

$$l_c = \frac{\sigma_R \phi}{2 \tau_R}$$

essendo

l_c e ϕ rispettivamente la lunghezza ed il diametro della fibra,

σ_R e τ_R rispettivamente le tensioni di rottura della fibra e di aderenza tra



fibra e matrice (2).

Il disegno di fig. 2 mostra le disposizioni delle fibre a cavallo di una fessura nell'ipotesi che sia $l > l_c$.

In tale caso è facile individuare le fibre che si trovano in condizioni di sfilamento per rottura dell'aderenza e quelle per le quali potrà avvenire la rottura della sezione metallica.

Se N è il numero complessivo di fibre che attraversano una sezione unitaria, αN è il numero di fibre che si rompono e $2\beta N$ è il numero di fibre che si sfilano. Da semplici considerazioni geometriche sulla fig. 2 risulta

$$\alpha = 1 - \frac{1}{21} \frac{c}{l} \quad \text{dove, essendo } \alpha + 2\beta = 1, \quad \text{sarà:}$$

$$\beta = \frac{1}{21} \frac{c}{l}$$

Le $2\beta N$ fibre che si sfilano presentano lunghezze di ancoraggio comprese tra $\frac{1}{2} \frac{c}{l}$ e 0 e pertanto una lunghezza media di ancoraggio pari a $\frac{1}{4} \frac{c}{l}$.

Lo sforzo totale ripreso dalle fibre su di una sezione unitaria di composito risulterebbe:

$$\alpha N \sigma_R \frac{\pi \phi^2}{4} + 2\beta N \tau_R \cdot \pi \cdot \phi \cdot \frac{1}{4} \frac{c}{l} = (\alpha + \beta) N \sigma_R \frac{\pi \phi^2}{4} = \left(1 - \frac{1}{21} \frac{c}{l}\right) N \sigma_R \frac{\pi \phi^2}{4}$$

$$\text{tenuta presente la relazione } l_c = \frac{\sigma_R \phi}{2 \tau_R}.$$

La tensione media su sezione unitaria di composito sarà pertanto

$$\sigma_{cu} = \left(1 - \frac{1}{21} \frac{c}{l}\right) N \sigma_R \frac{\pi \phi^2}{4} = \left(1 - \frac{1}{21} \frac{c}{l}\right) \sigma_R V_f = \left| 1 - \frac{\sigma_R}{4 \tau_R} \cdot \frac{1}{l/\phi} \right| \sigma_R V_f$$

essendo il numero delle fibre $N = V_f / (\pi \phi^2 / 4)$, ove sia V_f il volume delle fibre contenute nell'unità di volume del composito.

- (2) L'aderenza tangenziale all'interfaccia fibra-matrice dipende da molti fattori, in particolare dalla geometria delle fibre, ed è di norma compresa tra 4 e 8 N/mm². Nel caso di fibre trafilate, ove sia $\sigma_R = 1200$ N/mm², assunto $\tau_R = 6$ N/mm², sarà:

$$(l/\phi)_{crit} = \frac{1200}{2 \times 6} = 100;$$

si avrà sfilamento delle fibre per rapporti di aspetto inferiori a 100, cioè nella maggioranza dei casi.

Non così nel caso di fibre melt-extracted e anche nel caso di calcestruzzi trattati con procedimenti "vacuum", ove si assiste alla rottura delle fibre a causa dell'incrementata aderenza. Si tenga presente che allo sfilamento delle fibre è legato il comportamento duttile del manufatto in F.R.C.

Se σ_{mu} è la tensione di rottura della matrice, il $(V_f)_{crit}$ risulterà dalla relazione

$$\sigma_{mu} = \sigma_{cu}$$

e pertanto

$$(V_f)_{crit} = \frac{\sigma_{mu}}{\sigma_R \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right)} = \frac{\sigma_{mu} \cdot \frac{1}{\phi}}{\sigma_R \left(\frac{1}{\phi} - \frac{\sigma_R}{4\tau_R}\right)}$$

Per il caso $l < l_c$, con riferimento alla fig. 3, si registrerà soltanto lo sfilamento delle fibre.

Evidentemente la lunghezza di ancoraggio sarà compresa tra i valori $l/2$ e 0 e pertanto varrà mediamente $l/4$.

Sarà pertanto

$$\sigma_{cu} = N \tau_R \pi \phi l/4 = \frac{1}{\phi} \tau_R V_f$$

donde

$$(V_f)_{crit} = \frac{\sigma_{mu}}{\tau_R l/\phi} \quad (3)$$

Il diagramma di fig. 4 illustra la funzione $(V_f)_{crit}$ in dipendenza del rapporto di aspetto l/ϕ , secondo le relazioni in precedenza scritte, rispettivamente per $l > l_c$ e per $l < l_c$.

I metodi di calcolo proponibili conseguono dall'accertamento della resistenza ultima del composito in funzione di l/ϕ , σ_R , τ_R , V_f , secondo le formule scritte in precedenza.

Sulla scorta di studi di numerosi ricercatori [Austen, Mercer, Sillwood, Hannant (I), Calcerano (II)], si può proporre un diagramma di tensioni allo stato limite ultimo secondo lo schema di fig. 5. In flessione semplice è facile dedurre

$$x = \frac{\sigma_{cu} \cdot d}{\sigma_{cu} + \sigma_{compr u}}$$

essendo $\sigma_{compr u}$ il carico di rottura a compressione del composito e quindi

- (3) Nel caso di fibre "random" nello spazio a due o tre dimensioni occorre introdurre coefficienti correttivi al $(V_f)_{crit}$ che risulterà moltiplicato, rispetto al valore monodimensionale (fibre isoorientate), di $\pi/2$ e di 2 volte, rispettivamente per il caso bidimensionale e tridimensionale.

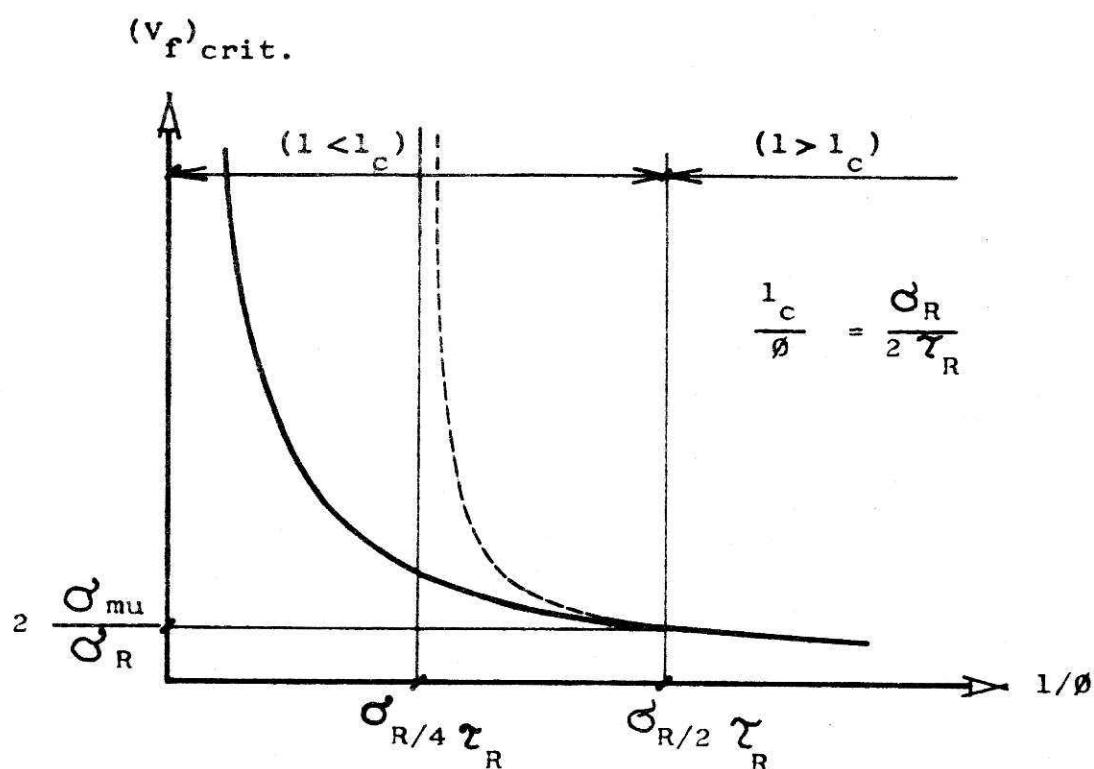


Fig.4 - Volume critico delle fibre $[(v_f)_{crit}]$ in funzione di $1/\phi$

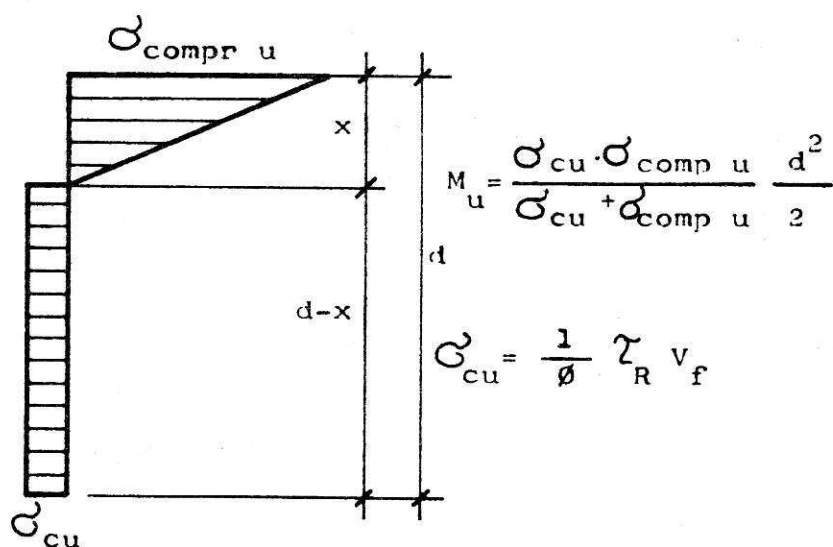


Fig.5 - Diagramma tensioni nel composito fessurato
(per $1 < l_c$)

$$M_u = \frac{\sigma_{cu} \cdot \sigma_{compr u}}{\sigma_{cu} + \sigma_{compr u}} \cdot \frac{d^2}{2}$$

Valori attendibili per le σ potranno essere (4)

$$\sigma_{cu} = 2,4 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{compr u} = 30 \text{ N/mm}^2$$

Un approccio teorico-sperimentale, nella filosofia del "Design by Testing" è quello di Babut e Brandt (III) che fa appello ad alcune determinazioni sperimentali deducibili dall'elemento in prova integrate da relazioni di equilibrio globale (alla traslazione ed alla rotazione), per una compiuta informazione sul comportamento dell'elemento stesso; e ciò in corrispondenza degli stati limite di fessurazione ed ultimo.

Nella verifica alla fessurazione si individuano come incognite la posizione dell'asse neutro nonché il rapporto tra i moduli elastici della matrice a compressione ed a trazione, deducibili, tramite le equazioni di equilibrio, dalle informazioni sperimentali e cioè dal momento di fessurazione e dai valori delle corrispondenti ϵ registrate ai lembi dell'elemento (fig. 6).

Nelle verifiche a rottura le incognite assunte sono ancora la posizione dell'asse neutro e la profondità della fessurazione. Tali incognite sono deducibili sempre in funzione dei dati sperimentali relativi al momento ultimo ed alla deformazione ultima a compressione della matrice (il corrispondente valore a trazione è già dedotto dalla precedente prova a trazione).

Il momento M_u , ricavato teoricamente, o sperimentalmente, o in forma mista, potrà avere un significato per la definizione dello stato limite ultimo attraverso una opportuna definizione dei parametri in gioco per il tramite di coefficienti di sicurezza sui materiali γ_m .

Ulteriori coefficienti di sicurezza γ_s sulle azioni (carichi) potranno infine stabilire le condizioni progettuali, nel caso di manufatti di modesto impegno strutturale.

2.2 L'interpretazione secondo la Meccanica delle Fratture (M.d.F.)

Altro modo di interpretare il comportamento dei materiali fibro armati è il riferimento al composito considerato come un continuo omogeneo al quale le fibre

(4) Assunto:

$$\sigma_{mu} = 3 \text{ N/mm}^2, \quad \tau_R = 6 \text{ N/mm}^2,$$

$$1/\phi = 80, \quad V_f = 0,005,$$

$$\text{dalla } \sigma_{cu} = \frac{1}{\phi} \tau_R V_f \quad \text{si ha: } \sigma_{cu} = 80 \times 6 \times 6 \times 0,005 = 2,4 \text{ N/mm}^2$$

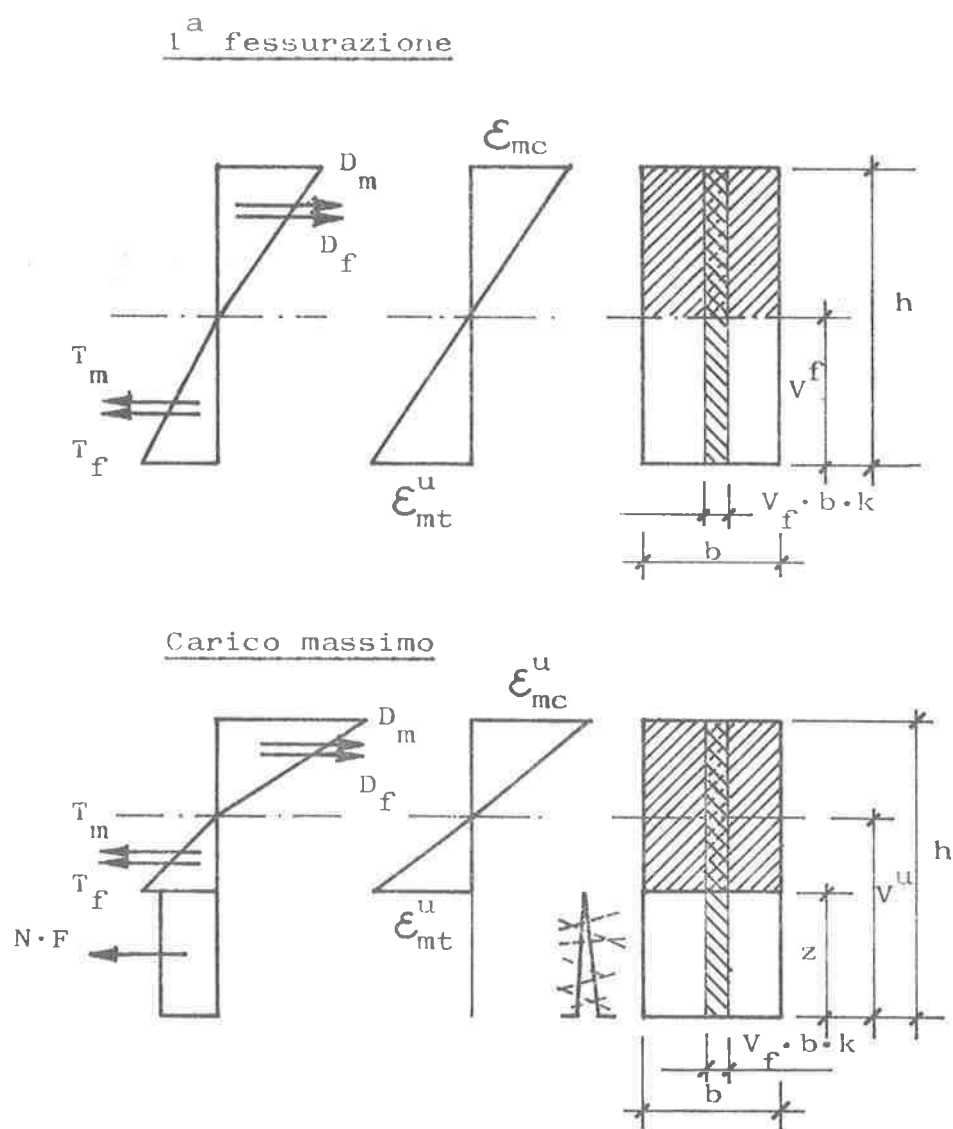


Fig. 6 - Diagrammi di tensioni e deformazioni nella sezione di mezzeria agli stati limite di 1^a fessurazione e di massimo carico.

[Da Babut e Brandt (III)]

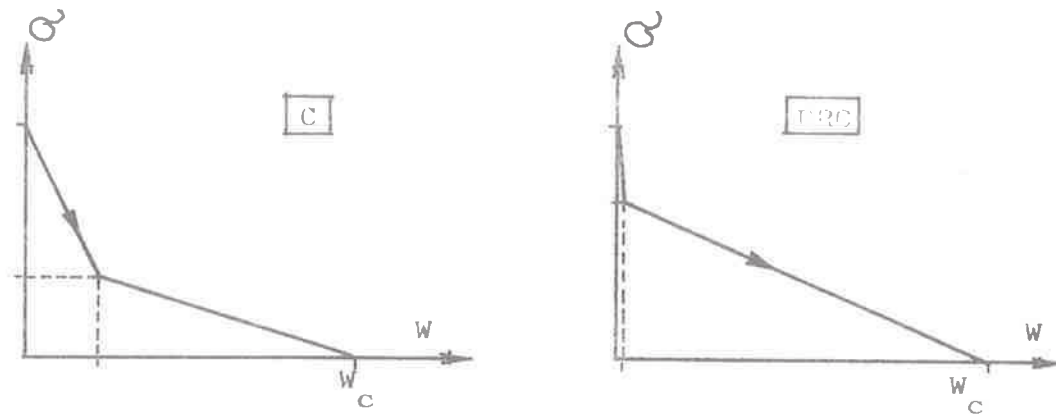


Fig. 7 - Diagramma ϵ - W per calcestruzzo semplice (C) e per calcestruzzo fibroso (FRC).-

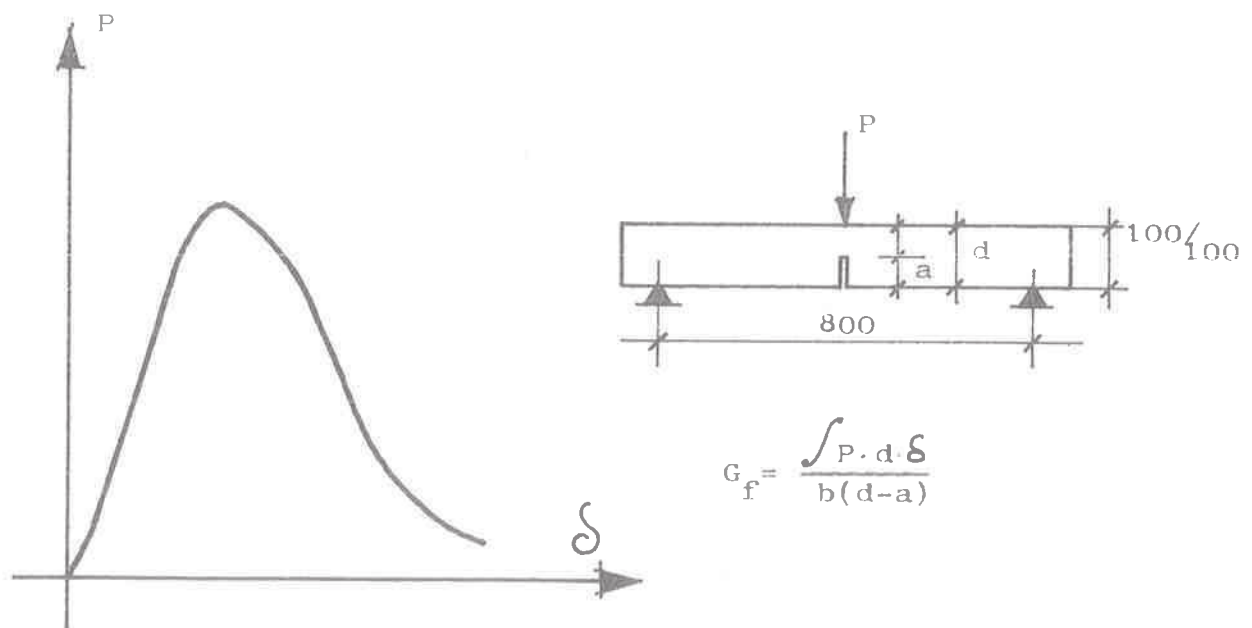


Fig. 8 - Prova a flessione per la determinazione di G_f -
(quote in mm)

conferiscono proprietà differenti da quelle della matrice priva di fibre, proprietà misurabili con particolare efficacia facendo ricorso a parametri caratteristici della M.d.F. quali K_I , G_C , COD, G_F , J-Integral, ecc.

Esistono incertezze e pareri in contrasto tra i vari ricercatori su quale sia la forma migliore di caratterizzare nell'ambito della M.d.F. il comportamento del composito (IV); come è noto, il problema è individuare una grandezza caratteristica del materiale, indipendente in particolare dalla forma e dimensione del provino dalla cui sperimentazione essa si ottiene.

Comunque, se pur sussistono talora incertezze sulla interpretazione delle prove atte a misurare tali grandezze, resta peraltro che le suddette prove evidenziano in modo macroscopico l'effetto delle fibre e del loro dosaggio.

La M.d.F. elastica lineare non pare peraltro essere molto rappresentativa dei fenomeni: è già difficile interpretare per tale via il comportamento dei semplici calcestruzzi che pure sono caratterizzati, come noto, da un comportamento certamente più fragile rispetto ai F.R.C.

Più significativo per questi ultimi in questo senso è il cosiddetto Fictitious Crack Model (F.C.M.) (V).

L'F.C.M. è un codice di calcolo agli elementi finiti che in un ambito di comportamento elastico del materiale propone un modello matematico della sezione ove si ipotizza che la formazione di una fessura di frattura non implichi immediatamente l'annullarsi di ogni trasmissione di sforzi attraverso di essa. Si ipotizza cioè che raggiunto il valore di resistenza a trazione f_t , al crescere della deformazione w tra i lembi della fessura la σ trasmessa decresca al crescere del w stesso sino ad annullarsi con una legge $\sigma(w)$ come in fig. 7. Qui vi sono riportati i diagrammi relativi rispettivamente al calcestruzzo semplice (C.) e fibroarmato (F.R.C.) (5).

Il parametro fondamentale secondo il F.C.M. è G_F , cioè il valore del lavoro di frattura di una sezione inflessa intagliata, misurabile in una normale prova a flessione dividendo in pratica l'area del diagramma carico-freccia in mezzzeria (fig. 8) (rappresentativo del lavoro di rottura) per l'area della sezione intagliata al netto dell'intaglio. G_F si esprime in $N.m/m^2$ cioè in N/m .

Secondo alcuni autori (V) il G_F è parametro caratteristico del materiale la cui determinazione sperimentale si può ritenere sensibilmente indipendente dalle dimensioni del provino; tali dimensioni sembrano notoriamente influenti nell'interpretazione secondo la M.d.F. lineare elastica che ha come equivalente il termine G_C legato a K_I (fattore di intensificazione degli sforzi) dalla relazione :

(5) Quest'ipotesi sembra particolarmente applicarsi al F.R.C. ove di fatto le fibre costituiscono un dispositivo di trasmissione di sforzi attraverso una sezione fessurata la cui efficacia si può correttamente considerare decrescente al crescere dell'apertura della fessura.

$$G_c = \frac{K^2 I}{E_c} \quad (6)$$

Senza soffermarsi sui dettagli del procedimento, si possono fornire (dall'opera citata di Petersson (V)) alcuni risultati circa la progressiva evoluzione dei diagrammi delle tensioni nella sezione fessurata di una trave inflessa in calcestruzzo al procedere della sperimentazione (fig. 9-b con riferimento alle fasi di carico di fig. 9-a): i diagrammi (ricavati dal riferimento bibliografico (V)) conseguono da calcoli condotti con il F.C.M. sull'ipotesi di provino con le caratteristiche geometriche indicate (con intaglio $a/d = 0,25$), ove la resistenza a trazione del calcestruzzo f_t sia di 3 N/mm ed il corrispondente G_F sia di 75 N/m.

La presenza di fibre è notevolmente influente sulla fase postcritica, cioè sul ramo discendente del diagramma carico-freccia in mezzzeria la cui area esprime il G_F . Il valore di G_F è fortemente influenzato dal contenuto di fibre: la fig. 10 illustra alcuni esempi di risultati sperimentali ottenuti dallo scrivente (VI) nel caso di provini di calcestruzzo ad alta resistenza (resistenza cubica media superiore a 100 N.mm⁻²) in assenza ed in presenza (in diversa misura) di armatura fibrosa.

Di fatto in generale i valori di G_F sono almeno di un ordine di grandezza superiori ai corrispondenti valori per la matrice priva di fibre.

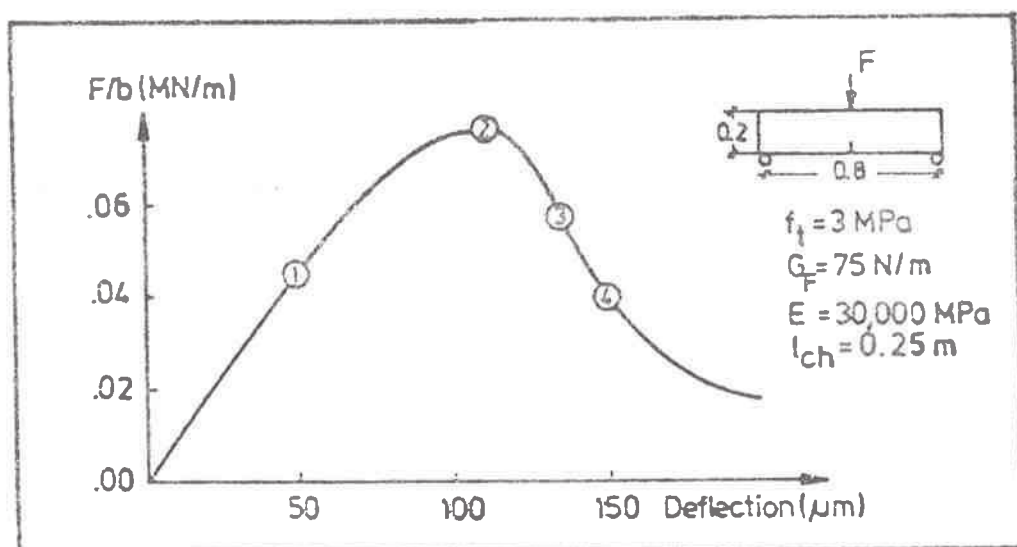
Nel caso dei calcestruzzi fibrosi la determinazione di G_F riesce incerta per la difficoltà del calcolo dell'area sottesa dal diagramma carico-freccia (fig. 11) che si estende in pratica asintoticamente sull'asse delle ascisse.

Per risolvere tale problema ci si può valere di una proprietà del diagramma stesso: a fessurazione avanzata, allorché si può ipotizzare una distribuzione di nel tratto del legamento di tipo triangolare come indicato in fig. 11, è possibile dimostrare almeno in forma approssimata che l'area delimitata in fig. 11 dai punti A B C D è equivalente all'area del residuo tratto di diagramma (tratto asintotico) a partire dall'ascissa D.

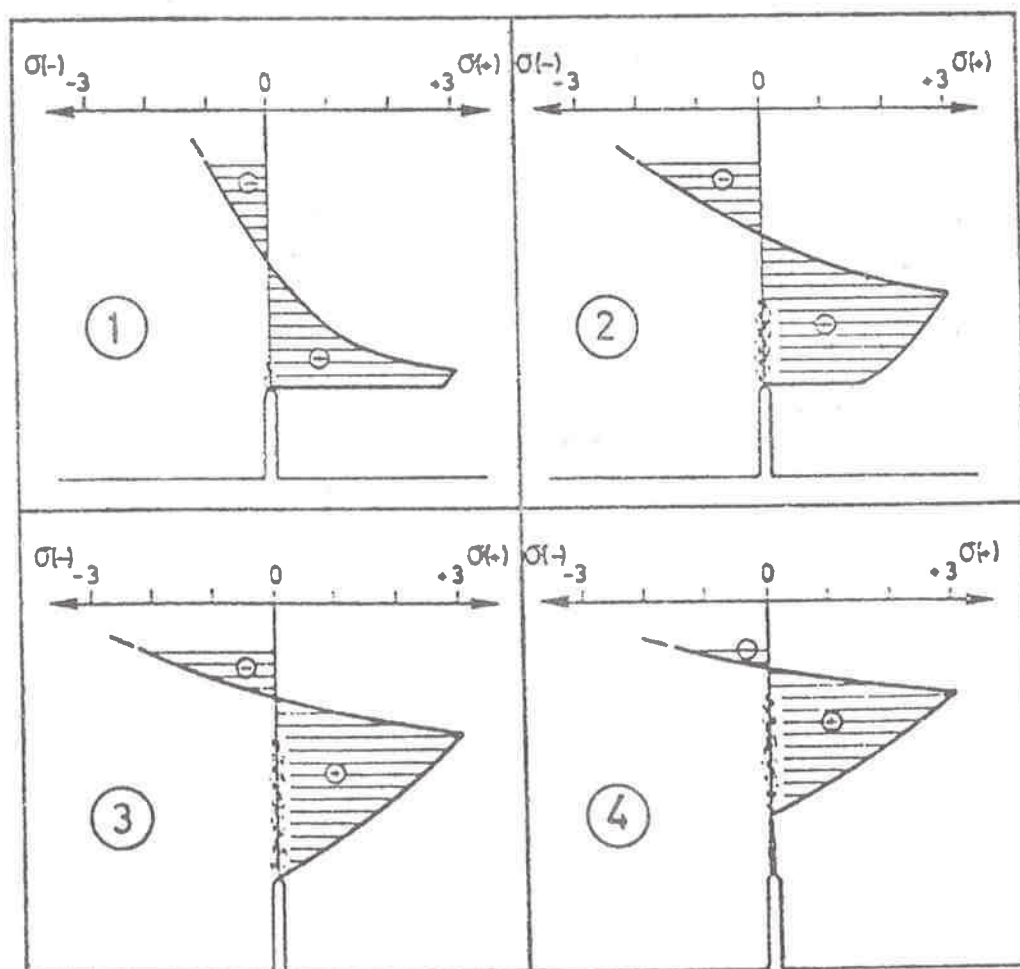
Questa proprietà è valida indipendentemente dalla scelta della posizione del punto D per la costruzione suddetta, purché, come si è detto, la fessurazione sia inoltrata al punto da configurare sensibilmente un diagramma di σ prossimo a quello di fig. 11b. E' inoltre essenziale che la legge $\sigma - w$ sia di tipo lineare come i diagrammi indicati in fig. 7, in particolare come indicato con riferimento al F.R.C.

Di fatto l'ultimo diagramma di fig. 9 ricavato con il procedimento F.C.M. tende verso questo tipo di andamento.

(6) Si può dimostrare che G_c e G_F tendono ad identificarsi allorché la grandezza d/l_{ch} assume valori elevati, per cui il fenomeno può inquadrarsi nell'ambito della M.d.F. elastica: d è l'altezza della trave inflessa e per definizione è $l_{ch} = G_F \cdot E_c / f_t^2$.



9 a



9 b

Fig. 9- Diagrammi delle tensioni al procedere della
 fessurazione in provino intagliato [Da Petersson (V)]
 per $a/d = 0,25$

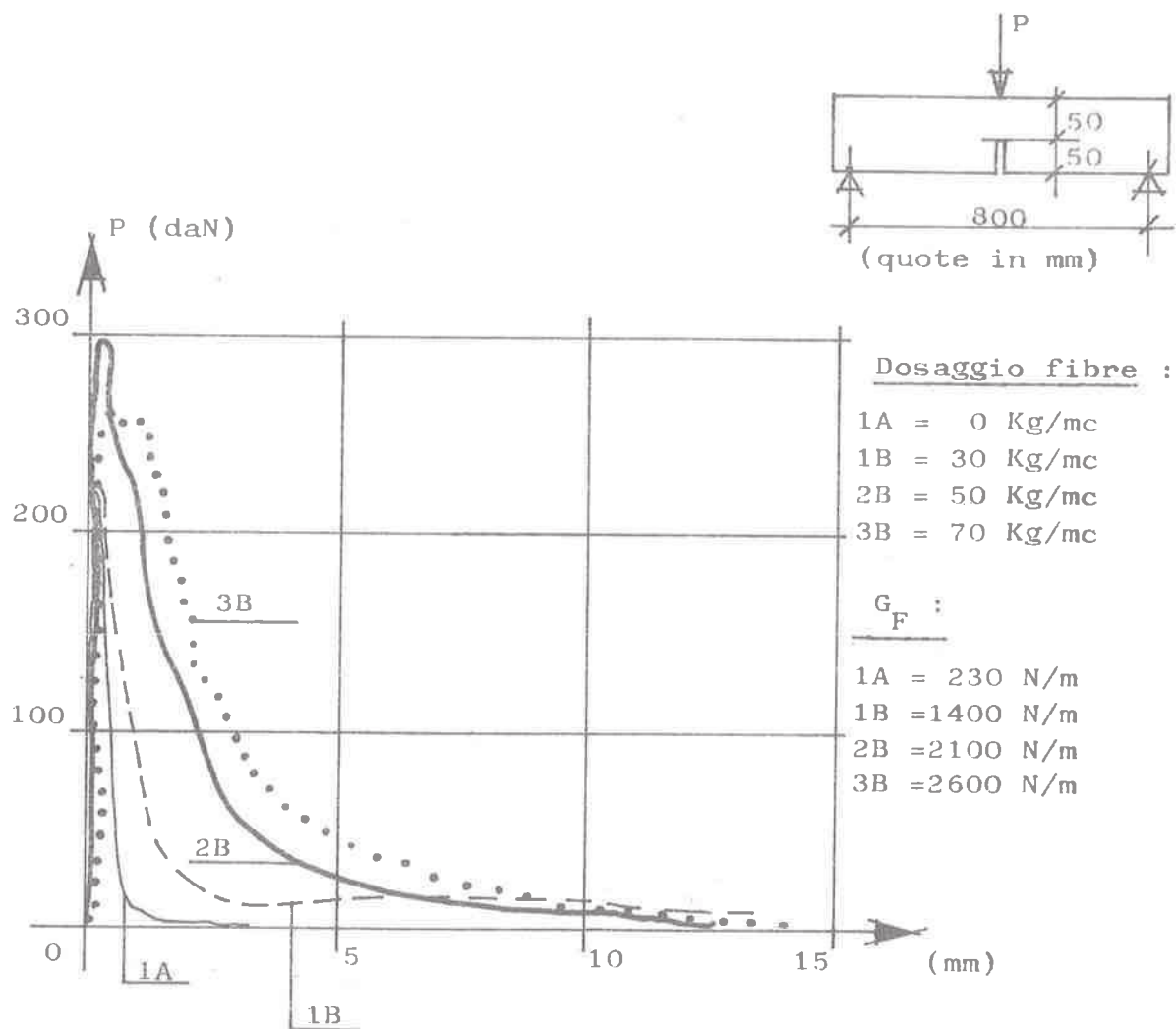


Fig. 10 - Diagramma carichi frecce in mezzzeria per provini intagliati ($a/d = 0,5$) per diversi dosaggi di fibre.

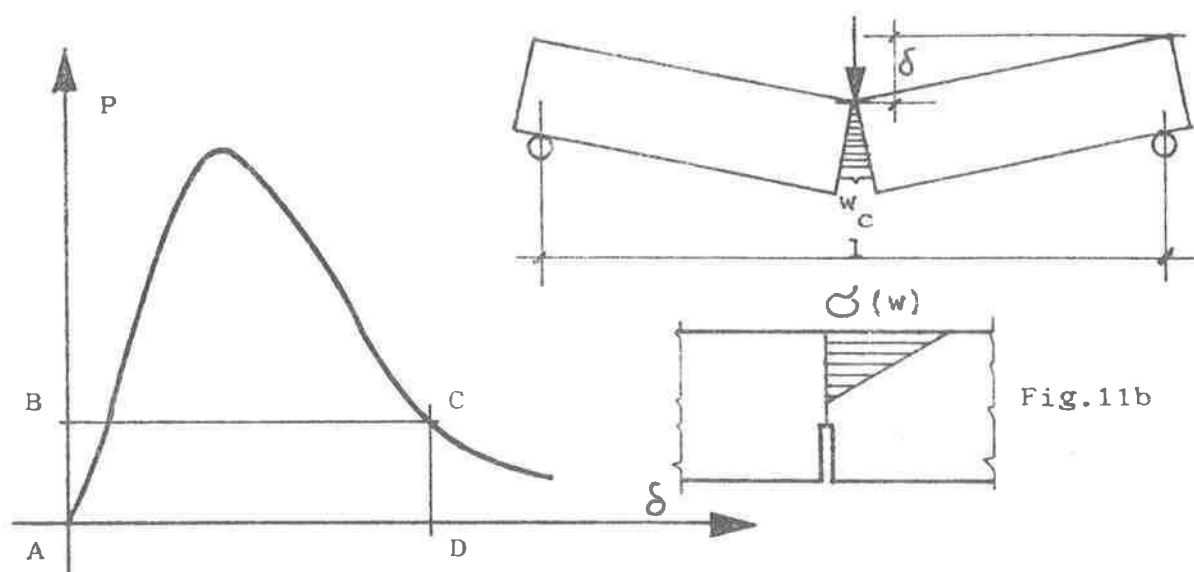


Fig. 11 - Interpretazione di prova per la determinazione di G_F
 (11b :distribuzione ipotizzata di $\sigma(w)$ nella sezione
 del legamento in fase di avanzata fessurazione)

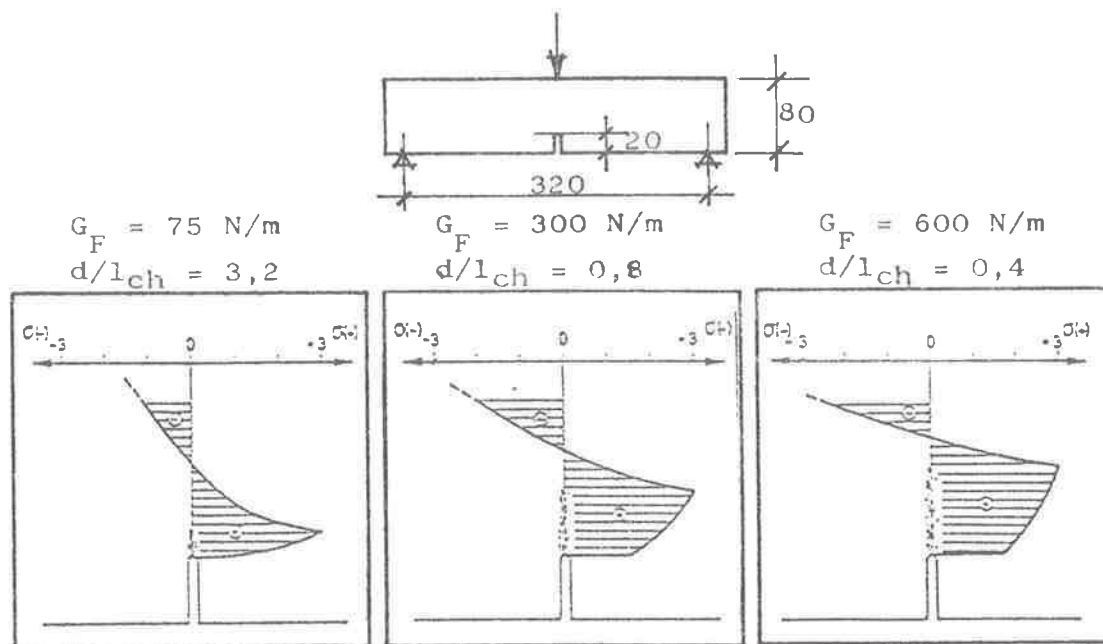


Fig. 12 - Distribuzione delle σ nella sezione d'intaglio di una
 trave inflessa al carico massimo, in relazione a diversi
 valori di G_F .
 (quote in cm)

Pertanto in tal senso l'area da assumersi come corrispondente al lavoro di frattura per il calcolo di G_F sarà l'area del diagramma carico-freccia in mezzzeria sino all'ascissa D sommata all'area della superficie delimitata dai punti A B C D.

La distribuzione delle tensioni nella sezione di intaglio al massimo livello di carico in funzione del valore di G_F (per tre diversi valori di G_F) appare dal diagramma di fig. 12, per una stessa geometria e a parità di resistenza a trazione (7).

Si rileva la distribuzione sensibilmente elastica nel caso di $G_F = 75 \text{ N/m}$ ove si riscontrano i valori più elevati del rapporto d/l_{ch} .

Al crescere di G_F , a parità del resto, è evidente l'estendersi della plasticizzazione della zona tesa.

Appare evidente quindi il ruolo delle fibre alla cui presenza sono associati elevati valori di G_F , anche sensibilmente superiori ai 600 N/m assunti nell'esempio in oggetto.

BIBLIOGRAFIA

- (I) HANNANT, "Fibre Cements and Fibre Concretes", J.Wiley & Sons
- (II) CALCERANO, "Nota teorico-sperimentale sulla verifica a pressoflessione dei calcestruzzi fibrosi", Rapporto per la Commissione Calcestruzzi speciali AICAP, Dicembre 1986.
- (III) BABUT & BRANDT, "The method of testing and analysing of steel reinforced concrete elements in flexure", Testing and tests methods of fibre reinforced composites, RILEM Symposium 1978.
- (IV) DESAY & GANESAN, "State of the art on fracture of cement with and without fibre reinforcement", International Symposium on F.R.C. - Madras, December 1987.
- (V) PETERSSON, "Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials", Report TVBM, Lund 1981.
- (VI) GOFFI, "Prove su calcestruzzi ad alta resistenza: influenza delle fibre sulle caratteristiche di fragilità", Giornata seminariale del Gruppo Italiano RILEM su "Le malte nell'evoluzione del processo produttivo", Torino Giugno 1987.

(7) I diagrammi di fig. 12 sono stati ottenuti elaborando opportunamente (con la teoria della similitudine) taluni risultati proposti dal Petersson (V).

MEMORIE

CALCESTRUZZI RINFORZATI CON FIBRE DI POLIPROPILENE

CANGIANO Stefano
COPPETTI Guido

Laboratorio Chimico Centrale
Italcementi S.p.A., Bergamo

CALCESTRUZZI RINFORZATI CON FIBRE DI POLIPROPILENE

Stefano CANGIANO - Guido COPPETTI

Ingegneri Chimici
Laboratorio Chimico Centrale
Italcementi S.p.A. - BERGAMO

SOMMARIO

Il presente lavoro studia l'influenza dell'aggiunta di fibre di polipropilene sulla lavorabilità del calcestruzzo fresco, sulle proprietà meccaniche e sul comportamento a frattura del calcestruzzo indurito. Sono stati adottati dosaggi di fibre abbastanza contenuti, ritenendo questi valori più interessanti nella pratica di impiego, anche sotto il profilo economico.

SUMMARY

The present work studies the influence of the addition of polypropylene fibres on the workability of fresh concrete, the mechanical properties and the fracture behaviour of hardened concrete. Rather low fibre contents were adopted, as these values were judged more interesting in the use practice, even under the economic profile.

1. INTRODUZIONE

1.1 Premessa

La resistenza a trazione del calcestruzzo è abbastanza modesta se rapportata alla resistenza a compressione. La soluzione tradizionale di rinforzare il calcestruzzo con armatura composta da barre d'acciaio risolve il problema nella maggioranza dei casi; peraltro laddove sono richiesti piccoli spessori e maggiore resistenza agli urti si può ricorrere a calcestruzzi fibrorinforzati, contenenti cioè fibre discontinue, casualmente ma uniformemente disperse nella matrice cementizia.

A questo scopo possono essere impiegate fibre d'acciaio, di vetro o polimeriche organiche; tra queste ultime le fibre di polipropilene rivestono particolare interesse a causa della loro inerzia agli attacchi chimici, della buona aderenza e dell'ottima resistenza a trazione, anche se il loro costo è tuttora abbastanza elevato.

1.2 Lavori precedenti

Esiste una cospicua letteratura sull'impiego delle fibre d'acciaio e di vetro nei calcestruzzi, mentre non molto numerosi sono i lavori relativi alle fibre di polipropilene; tra questi interessanti quelli di Dardare (V), (VI) e quello recentissimo di Spadea, Reda e Frigione (XIII).

Dei lavori citati in bibliografia si possono ricordare i punti seguenti:

- l'aggiunta di fibre di polipropilene riduce la lavorabilità dell'impasto fresco
- per contenuti di fibre polipropileniche inferiori allo 0.8-1% in peso circa le resistenze meccaniche del calcestruzzo rinforzato con fibre sono generalmente superiori a quelle del calcestruzzo tal quale (a parità di rapporto acqua/cemento)
- l'aggiunta di fibre, anche modesta, determina un aumento della resistenza agli urti del calcestruzzo ed ostacola l'eventuale fessurazione provocata da tensioni di ritiro
- l'aggiunta di fibre riduce l'entità del ritiro igrometrico del calcestruzzo.

1.3 Scopo del lavoro

Scopo del presente lavoro è stato quello di studiare l'influenza della aggiunta di fibre di polipropilene sulla lavorabilità del calcestruzzo fresco (a parità di rapporto acqua/cemento), sulle resistenze meccaniche (compressione, flessione, trazione indiretta) e sul modulo elastico, nonché sull'energia di frattura, quest'ultima misurata con prova a flessione (Three-Point-Bend Test).

I dosaggi di fibre sono stati previsti molto bassi rispetto a quelli adottati in altri lavori riportati in letteratura, inferiori allo 0.2% in peso sul calcestruzzo. Considerato peraltro il costo elevato delle fibre di polipropilene ed il dosaggio indicato come ottimale dai produttori, si è ritenuto opportuno non superare un dosaggio quattro volte maggiore di quest'ultimo valore.

2. PARTE SPERIMENTALE

2.1 Materiali studiati

Il calcestruzzo è stato realizzato con cemento Portland classe 425 dosato a 400 kg/m³ e con aggregati silico-calcarei tondeggianti di fiume con granulometria continua da 0 a 20 mm dosati a 1850 kg/m³.

Al calcestruzzo sono stati aggiunti due tipi di fibre di polipropilene, appositamente studiate per rinforzare il calcestruzzo, l'una a struttura reticolare a treccia di produzione estera (A) che si apre durante la mescolazione con il calcestruzzo (XI) (XIII), l'altra, già in fibrille, di produzione nazionale (B).

Della prima è stato impiegato il tipo adatto per calcestruzzi con aggregato di $\varnothing$ max $\leq$ 20 mm; la lunghezza della fibra era di 64 mm. La seconda aveva una lunghezza di 40 mm. Entrambi i produttori delle fibre consigliano un dosaggio di 1 kg per m³ di calcestruzzo;

nella sperimentazione si sono adottati dosaggi di 1 kg/m^3 , 2 kg/m^3 e 4 kg/m^3 per una percentuale in peso sul calcestruzzo rispettivamente dello 0.04, 0.08 e 0.16. La massa volumica del polipropilene è di 0.91 g/cm^3 .

Il rapporto acqua/cemento è stato fissato eguale a 0.50 per tutti gli impasti; questa scelta è stata adottata da quasi tutti i ricercatori, tranne (XIII). Con una piccola aggiunta di additivo superfluidificante il calcestruzzo di partenza diveniva molto fluido (autolivellante); in tal modo anche con il dosaggio più elevato in fibre la lavorabilità si riduceva ma si manteneva a valori ancora utilizzabili in pratica.

Come superfluidificante è stato usato naftalensolfonato condensato con formaldeide; l'additivo puro è stato sciolto in acqua per avere una soluzione acquosa al 25%; la soluzione è stata dosata in ragione dell'1% in peso sul cemento.

2.2 Preparazione dei provini

I calcestruzzi sono stati mescolati per 2 minuti in una betoniera a movimento rotatorio-planetario; dopo l'addizione delle fibre sono stati mescolati ancora per 2 minuti.

Sono stati confezionati: provini cubici di lato 100 mm per le prove di resistenza a compressione, provini prismatici $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ per le prove di resistenza a flessione ed a trazione indiretta (sui due monconi ottenuti dopo la prova di flessione), provini cilindrici $\varnothing 100 \times 250 \text{ mm}$ per la determinazione del modulo elastico e provini prismatici di $100 \times 100 \times 840 \text{ mm}$ per le prove di comportamento a frattura. I calcestruzzi sono stati assestati nelle forme su tavolo vibrante ad alta frequenza, usando stampi metallici, salvo che per i provini cilindrici.

2.3 Risultati delle prove eseguite

2.3.1 Prove reologiche sul calcestruzzo fresco

Per valutare la lavorabilità degli impasti, sono stati utilizzati il cono di Abrams ed il consistometro Vebe. Quest'ultimo è considerato da alcuni (XVI) più adatto in presenza di forti contenuti di fibre.

I risultati ottenuti sono illustrati nelle figure 1 e 2. Con le quantità di fibre impiegate per questo lavoro, i due metodi forniscono praticamente le stesse indicazioni, anche se il cono di Abrams segnala una leggera migliore lavorabilità per i calcestruzzi rinforzati con fibra tipo A.

A parità di rapporto acqua/cemento, la lavorabilità decresce dunque all'aumentare della percentuale di fibra presente.

2.3.2 Prove fisico-meccaniche sul calcestruzzo indurito

I risultati delle prove di compressione, flessione e trazione indiretta sul calcestruzzo tal quale e sui calcestruzzi con le varie aggiunte di fibra sono riportati in tabella 1.

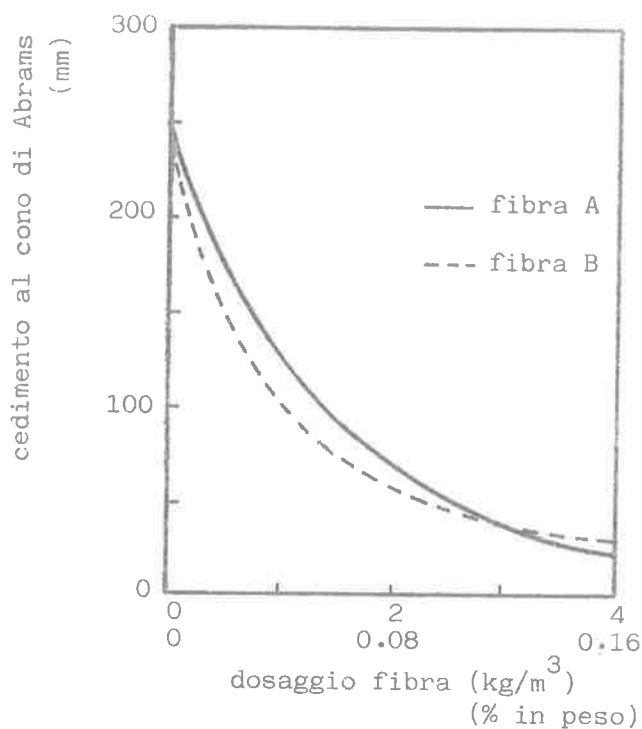


Fig. 1 - Lavorabilità di un calcestruzzo con fibre di polipropilene in funzione del dosaggio delle fibre (rapporto A/C = costante)

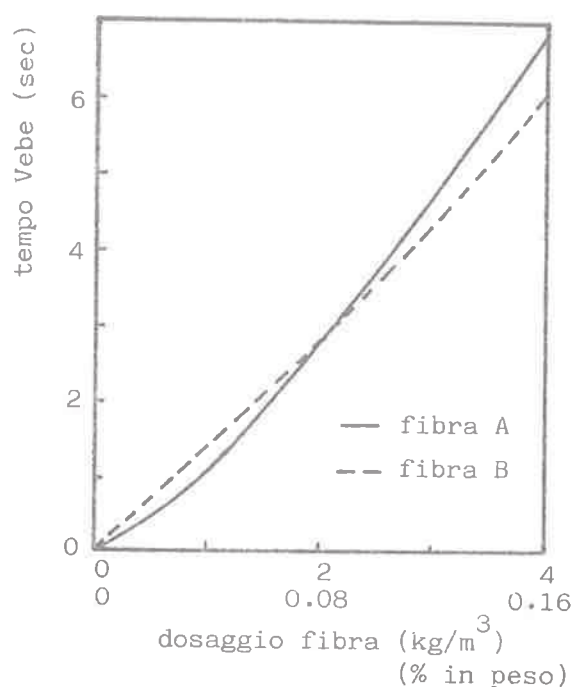


Fig. 2 - Consistenza di un calcestruzzo con fibre di polipropilene in funzione del dosaggio delle fibre (rapporto A/C = costante)

TABELLA 1 - Caratteristiche fisico-meccaniche di calcestruzzi rinforzati con fibre di polipropilene e del calcestruzzo di riferimento (A/C = costante)

Tipo di calcestruzzo	Resistenze meccaniche a 28 giorni						Modulo elastico statico a 1 anno	
	compres- sione N/mm ²	Δ%	flessione N/mm ²	Δ%	trazione indiretta N/mm ²	Δ%	compressione N/mm ²	Δ%
calcestruzzo t.q.	47.0	-	5.00	-	3.65	-	33.825	-
=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====
come sopra								
+1 kg/m ³ fibre A	48.0	+2	5.20	+4	3.80	+4	32.965	-2.5
+2 kg/m ³ fibre A	49.5	+5.5	5.75	+15	3.85	+5.5	32.755	-3
+4 kg/m ³ fibre A	48.5	+3	6.15	+23	4.10	+12	31.810	-6
=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====
come sopra								
+1 kg/m ³ fibre B	49.5	+5.5	5.30	+6	3.60	-1.5	32.545	-4
+2 kg/m ³ fibre B	51.5	+9.5	5.85	+17	3.70	+1.5	33.055	-2.5
+4 kg/m ³ fibre B	51.0	+8.5	6.35	+27	3.30	-9.5	32.355	-4.5

Si può notare come le resistenze migliorino discretamente con le percentuali più elevate di fibre; dette percentuali, nettamente superiori al dosaggio consigliato dai produttori, riducono tuttavia la lavorabilità del calcestruzzo fresco.

Lo sviluppo nel tempo delle resistenze a compressione per i calcestruzzi rinforzati è regolare e segue l'andamento di quello del calcestruzzo tal quale.

Per quanto riguarda la resistenza a flessione, che è tra i parametri più significativi di questi calcestruzzi, in figura 3 sono riportati, conformemente a quanto indicato in (V) (VI), i valori dei rapporti tra le varie resistenze del calcestruzzo fibrorinforzato e quella del calcestruzzo tal quale per le diverse percentuali di fibre aggiunte. Come si può notare, si arriva ad un rapporto di circa 1.25 per un'aggiunta di 4 kg/m^3 , con una lieve migliore prestazione per le fibre tipo B.

Il modulo elastico (fig. 4) decresce all'aumentare della quantità di fibra presente, passando da circa 34000 N/mm^2 a circa 32000 N/mm^2 ; si tratta di una leggerissima diminuzione, legata peraltro alla bassa percentuale di fibra aggiunta (in letteratura vi sono dati per aggiunte di fibre fino al 2%, contro il valore massimo dello 0.16% adottato in questo lavoro).

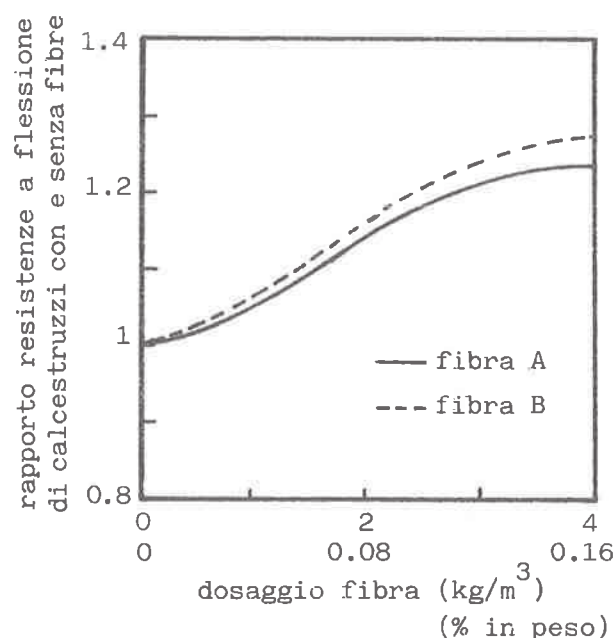


Fig. 3 - Andamento del rapporto tra la resistenza a flessione di un calcestruzzo con fibre di polipropilene e quella del calcestruzzo di riferimento in funzione del dosaggio delle fibre

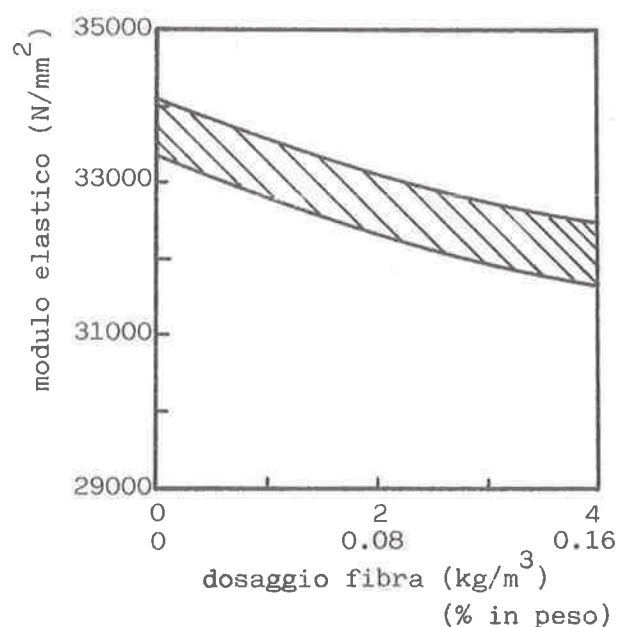


Fig. 4 - Andamento del modulo elastico statico di calcestruzzi con fibre di polipropilene in funzione del dosaggio delle fibre (rapporto A/C = costante)

2.3.3 Prove di flessione (Three-Point-Bend Test)

I calcestruzzi sperimentati sono stati pure oggetto di studio sotto l'aspetto della meccanica della frattura.

Sono state effettuate prove di flessione su travi intagliate in mezzzeria per una profondità di 30 mm e con una distanza fra gli appoggi di 800 mm. E' stata impiegata una macchina di prova dotata di un sistema di servocontrollo in cui la variabile di retroazione, essendo costituita dalla cosiddetta "apertura della bocca della cricca" (crack mouth opening displacement - CMOD), poteva controllare eventuali situazioni di instabilità interna.

Nelle figure 5 e 6 sono riportate le curve Carico (P) - Deflessione (δ) e Carico - CMOD per le travi in calcestruzzo tal quale e con diversi dosaggi dei due tipi di fibra. In dette figure è pure riportata, in funzione della deflessione, la distribuzione cumulativa dell'energia trasferita dalla macchina di prova alle travi.

Detta distribuzione è stata calcolata numericamente mediante la funzione integrale

$$E_t(\delta) = \int_0^{\delta} P(\delta) d\delta$$

Dall'esame delle figure 5 e 6 si può notare che il valore del carico massimo risulta positivamente influenzato solo dalla aggiunta delle fibre tipo B nei dosaggi più elevati (2 e 4 kg/m³); i corrispondenti valori della deflessione si riducono mediamente del 25% per entrambi i tipi di fibre. Questo comportamento appare giustificato dalla riduzione dei valori di CMOD al carico massimo probabilmente per l'effetto di contenimento operato dalle fibre sull'apertura della fessura principale.

I valori della deflessione e del CMOD aumentano sensibilmente solo quando le travi fibrorinforzate presentano una riduzione del 60-70% della loro capacità portante nella fase di post-rottura ovvero quando le fibre tendono a sfilarsi pur trasmettendo ancora gli sforzi di trazione tra i due lembi della fessura.

Detti comportamenti possono essere analizzati per mezzo di parametri numerici quali ad esempio i cosiddetti "indici di tenacità", che forniscono la misura in cui la curva P- δ si avvicina all'andamento teorico perfettamente elastico/plastico. Questi indici, proposti da Barr e Hasso (II) e da Johnston (X), prevedono la suddivisione dell'area sottesa alla curva P- δ in tre zone corrispondenti ai campi di deflessione: 0- δ , δ -2 δ , 2 δ -3 δ , ove δ è il valore di deflessione raggiunto al carico massimo cioè quando si ipotizza l'inesco della fessura principale (fig. 7).

I due indici di tenacità sono definiti

$$\text{secondo Barr e Hasso} \quad IT_B = \frac{\text{Area B}}{3 \times \text{Area A}} \times 100$$

$$\text{secondo Johnston} \quad IT_J = \frac{\text{Area (A+B+C)}}{\text{Area A}}$$

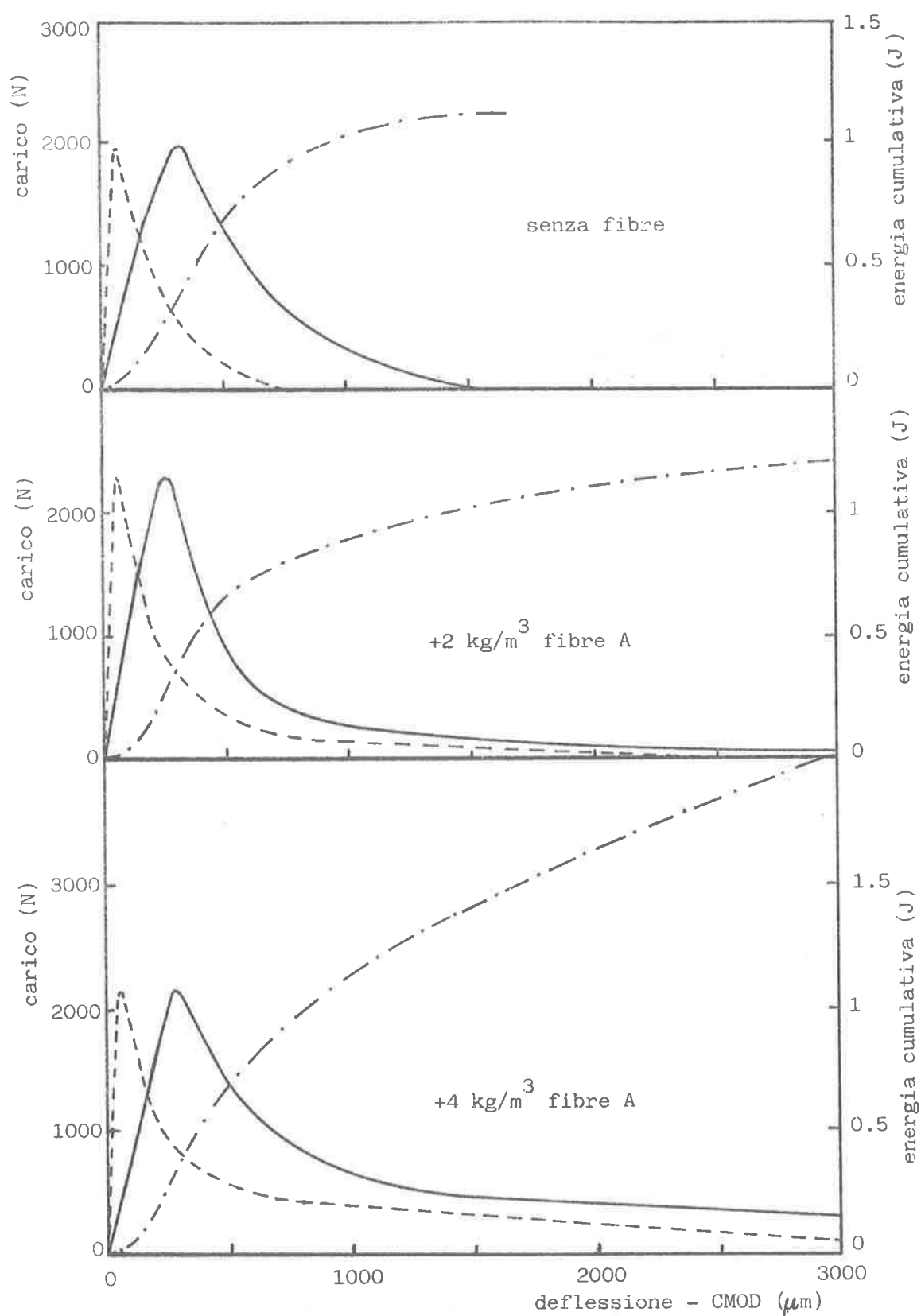


Fig. 5 - Curve carico-deflessione (—), carico - CMOD (---), energia cumulativa-deflessione (-.-.-) di calcestruzzi rinforzati con fibre di tipo A e del calcestruzzo di riferimento

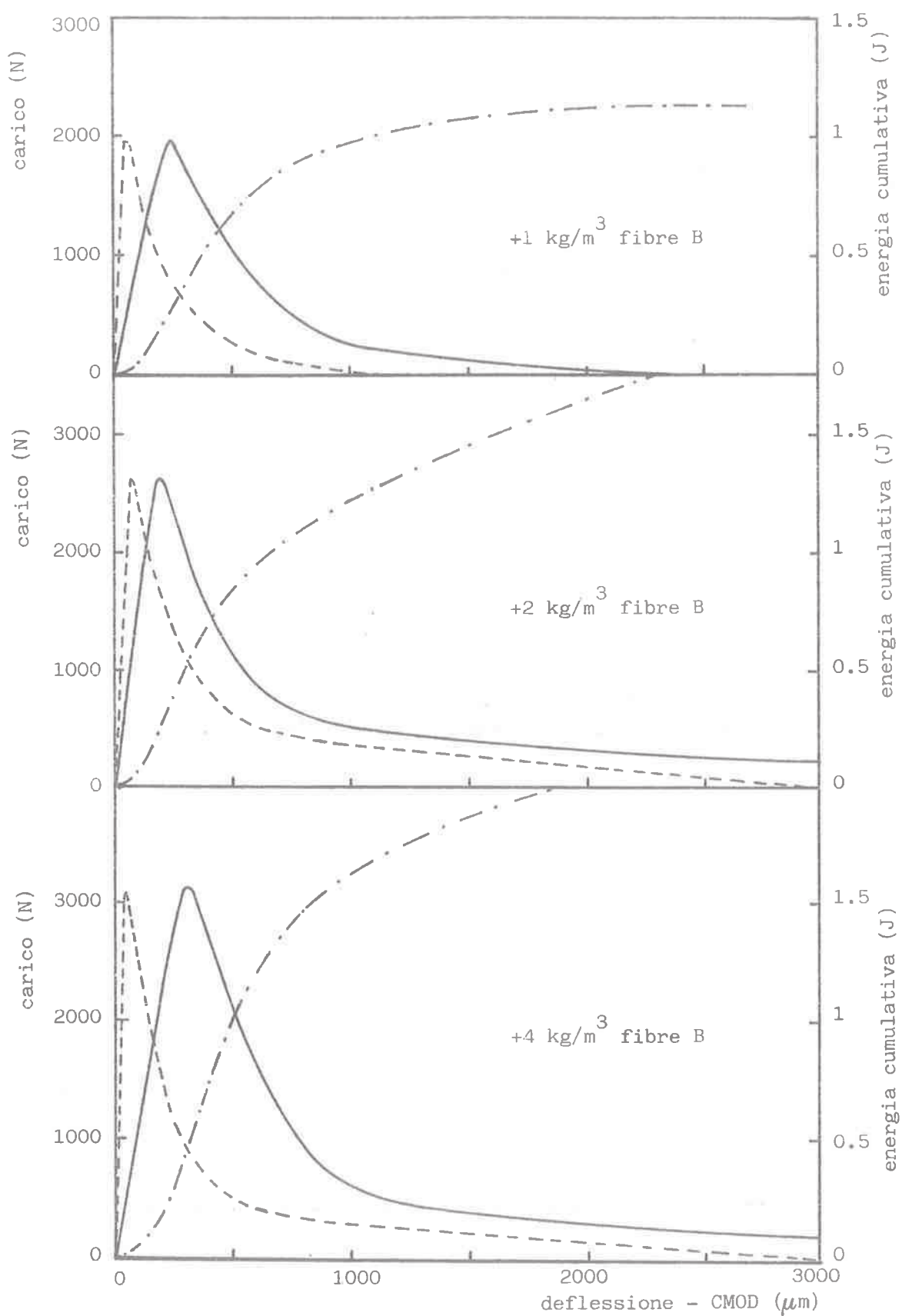


Fig. 6 - Curve carico-deflessione (—), carico - CMOD (---), energia cumulativa-deflessione (-.-.-) di calcestruzzi rinforzati con fibre di tipo B

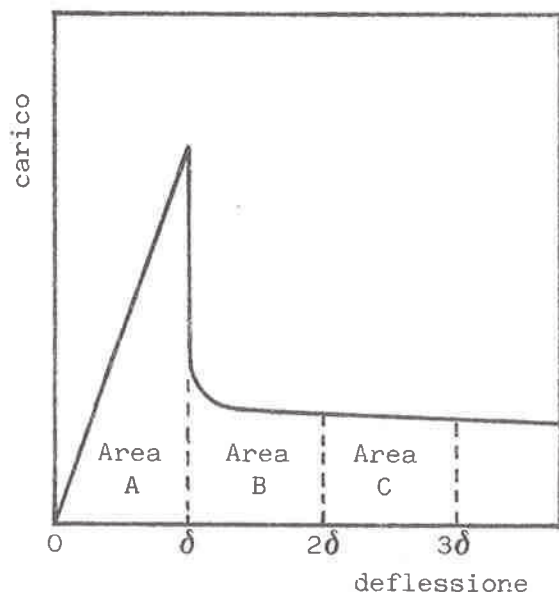


Fig. 7 - Schema della suddivisione dell'area sottesa alla curva carico-deflessione per il calcolo degli "indici di tenacità"

determinano un incremento di IT_B del 50% e di IT_J del 30%, valori che rimangono pressoché costanti anche per i dosaggi più elevati. Per le fibre di tipo A gli incrementi di IT_B e di IT_J appaiono legati al loro dosaggio; più precisamente si ottengono incrementi di IT_B del 35% e del 70% passando da 2 kg/m³ a 4 kg/m³ e di IT_J del 30% e del 50% per gli stessi dosaggi.

Per materiali con rottura fragile l'indice IT_B è eguale a 0 mentre l'indice IT_J è pari a 1; per materiali a comportamento perfettamente elastico/plastico i due indici raggiungono rispettivamente i valori di 67 e di 5.

In tabella 2 sono riportati i valori dei predetti indici di tenacità calcolati sulla base dei grafici delle figure 5 e 6. Si può osservare che in generale l'aggiunta di fibre comporta un incremento degli indici di tenacità rispetto al calcestruzzo di riferimento, confermando risultati già noti (II) (X); tuttavia si deve rilevare che le fibre di tipo B già con un dosaggio di 1 kg/m³

TABELLA 2 - "Indici di tenacità" di calcestruzzi rinforzati con fibre di polipropilene e del calcestruzzo di riferimento (A/C = costante)

Tipo di calcestruzzo	Deflessione al carico massimo (μm)	Area A (J)	Area B (J)	Area C (J)	"Indice di tenacità"	
					di Barr e Hasso IT_B	di Johnston IT_J
Calcestruzzo t.q.	330	0.40	0.42	0.22	35	2.60
come sopra						
+2 kg/m ³ fibre A	250	0.29	0.41	0.14	47	2.90
+4 kg/m ³ fibre A	250	0.25	0.45	0.26	60	3.84
come sopra						
+1 kg/m ³ fibre B	250	0.26	0.41	0.21	52	3.38
+2 kg/m ³ fibre B	220	0.32	0.45	0.25	47	3.19
+4 kg/m ³ fibre B	280	0.45	0.70	0.37	52	3.38

Un ulteriore strumento di analisi del comportamento a frattura è fornito dalle curve di distribuzione cumulativa dell'energia trasferita alle travi. In queste curve è possibile infatti individuare alcune zone che caratterizzano il comportamento sotto carico delle travi stesse. In effetti si può osservare che tutte le curve riportate presentano un andamento parabolico iniziale che corrisponde alla risposta lineare elastica della trave. A detta zona segue un campo più o meno esteso di flessione ove la trave, per effetto dei noti fenomeni dissipativi, legati alla formazione della zona di processo ed alla incipiente fessura principale (IV), presenta la massima capacità di assorbimento dell'energia a parità di incremento imposto di deflessione.

Successivamente sono sufficienti quantità relativamente modeste di energia per lo sviluppo del processo di frattura, (sempre a parità di incremento imposto di deflessione), conservando la trave una sia pur modesta capacità portante fintantoché le fibre sono in grado di trasmettere sforzi di trazione (fig. 8).

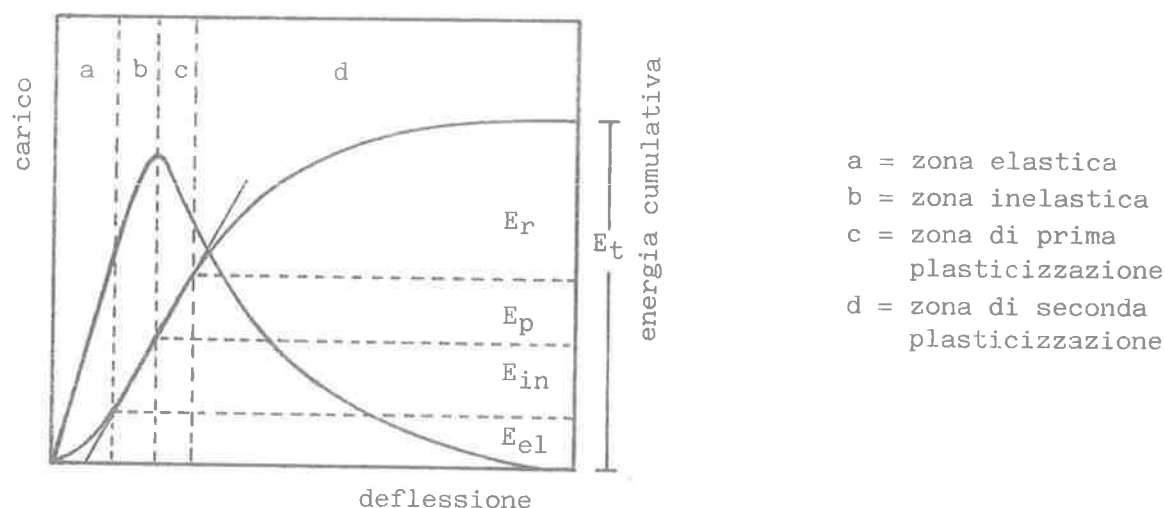


Fig. 8 - Ripartizione dell'energia cumulativa fornita in energie parziali corrispondenti ai diversi stadi del processo di frattura

In tabella 3 sono riportati i valori dell'energia totale E_t fornita alla trave e quelli delle energie parziali, assoluti e percentuali, relativi alle zone sopra descritte, avendo inoltre suddiviso l'energia associabile alla zona di flessione in quella che precede il carico massimo e quella successiva.

Nella stessa tabella compaiono infine i valori dell'energia specifica di frattura G_f calcolati secondo la norma Rilem (XII).

Dall'esame dei valori riportati risulterebbe che l'aggiunta di fibre, quanto meno nel campo dei dosaggi sperimentati, determina un progressivo aumento dell'energia totale assorbita dalla trave, denunciato anche dall'andamento del G_f , in accordo con risultati già noti (VII).

Si deve rilevare tuttavia che tale aumento si concentra prevalentemente nella cosiddetta energia residua, mentre rimangono sostanzialmente invariati gli altri contributi di energia.

TABELLA 3 - Energia cumulativa o totale, sua ripartizione ed energia specifica di frattura di calcestruzzi rinforzati con fibre di polipropilene e del calcestruzzo di riferimento (A/C = costante)

Tipo di calcestruzzo	Energia elastica E_{el}		Energia inelastica E_{in}		Energia di plasticizzazione E_p		Energia residua E_r		Energia totale E_t	Energia specifica di frattura G_f (N/m)
	(J)	(%)	(J)	(%)	(J)	(%)	(J)	(%)	(J)	
Calcestruzzo t.q.	0.17	15	0.23	20.5	0.23	20.5	0.495	44	1.125	208.5
=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====
come sopra										
+2 kg/m ³ fibre A	0.15	12.5	0.135	11.5	0.235	20	0.66	56	1.18	306.1
+4 kg/m ³ fibre A	0.15	7.5	0.10	5	0.255	12.5	1.54	75	2.045	593.1
=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====
come sopra										
+1 kg/m ³ fibre B	0.09	8	0.17	15	0.20	18	0.67	59	1.13	246.9
+2 kg/m ³ fibre B	0.13	7	0.19	10	0.20	10	1.42	73	1.94	474.1
+4 kg/m ³ fibre B	0.185	8	0.265	11.5	0.45	19.5	1.41	61	2.31	566.6

3. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

- L'aggiunta di fibre di polipropilene riduce notevolmente la lavorabilità del calcestruzzo; pur adottando dosaggi minimi di fibre, il cedimento al cono di Abrams è passato dal valore massimo (autolivellante) a 20-30 mm per il dosaggio più elevato.

- Per quanto riguarda le resistenze meccaniche, l'aggiunta di fibre comporta un significativo miglioramento solo per quelle a flessione ed a trazione indiretta (15-20%); il modulo elastico decresce invece leggermente.

- L'aggiunta di fibre di polipropilene comporta un rilevante incremento dell'energia specifica di frattura e di quella complessivamente fornita alla trave.

- L'analisi della ripartizione di questa energia in funzione del carico o della deflessione può condurre a valutazioni differenti a seconda del criterio adottato per la ripartizione della stessa.

- Secondo gli "indici di tenacità", riferiti a campi di deflessione multipli di quella di prima fessurazione, i calcestruzzi fibrorinforzati manifesterebbero una risposta apprezzabilmente prossima a quella elastico/plastica.

- Adottando il criterio basato sulla capacità di assorbimento dell'energia a parità di deflessione, l'aggiunta di fibre non apporterebbe invece alcun reale beneficio in quanto la maggiore energia assorbibile appare concentrata in quella fase dello stadio di post-rottura ove la capacità portante della trave può essere ritenuta insufficiente.

- Quando il metro di giudizio è un criterio energetico, è necessario tener conto in ogni caso dei valori della capacità portante ai quali è ancora trasferibile l'energia di frattura (XIV).

BIBLIOGRAFIA

- (I) Measurement of properties of fiber reinforced concrete (ACI Committee 544), J. Am. Concr. Inst. 75 (7), 1978, 283-9
- (II) BARR B., HASSO E.B.D., A study of toughness indices, Mag. Concr. Res. 37 (132), 1985, 162-74
- (III) BARR B., NEWMAN P.D., Toughness of polypropylene fibre-reinforced concrete, Composites 16 (1), 1985, 48-53
- (IV) BIOLZI L., CANGIANO S., TOGNON G., Proprietà meccaniche e instabilità interna nella frattura (Modo I) di travi in calcestruzzo; (in corso di pubblicazione su "Il Cemento")
- (V) DARDARE J., Contribution à l'étude du comportement mécanique des bétons renforcés avec des fibres de polypropylène, Fibre Reinforced Cement and Concrete - RILEM Symposium (London 1975), 1975, 227-35
- (VI) DARDARE J., Attitudine del calcestruzzo di fibre polipropilene ad impieghi nell'industria dei manufatti di cemento, BIBM'75 - 8° Congr. Int. del Manufatto di Cemento (Stresa, 1975), 1975, pp. 15
- (VII) DI TOMMASO A., Apporti all'energia di frattura dei calcestruzzi mediante inclusione di fibre, Il Cemento ed il Calcestruzzo negli anni '80 (Parma, 1985), 1985, 135-48
- (VIII) FROSIO P., MANTEGAZZA G., GIUNTOLI E., Le fibre migliorano le proprietà del calcestruzzo, Pavimenti e Rivestimenti (6), 1985, 347-52
- (IX) HUGHES B.P., FATTUHI N.Y., Stress-strain curves for fibre reinforced concrete in compression, Cem. Concr. Res. 7 (2), 1977, 173-84
- (X) JOHNSTON C.D., Definition and measurement of flexural toughness parameters for fiber reinforced concrete, Cem., Concr. Aggregates 4 (2), 1982, 53-60
- (XI) KOLDEWITZ W., Anwendung von Kunststoff-Faserbeton, Beton (6), 1979, 203-6
- (XII) RILEM Draft Recommendation - Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point-bend test on notched beams, Matériaux et Constructions 18 (106), 1985, 285-90
- (XIII) SPADEA G., REDA A., FRIGIONE G., Comportamento reologico e meccanico di calcestruzzi rinforzati con fibre di polipropilene, Il Cemento (2), 1987, 173-86
- (XIV) TOGNON G., CANGIANO S., Comportamento a frattura (Modo I) del calcestruzzo soggetto a cicli di gelo/disgelo, La Durabilità delle Opere in Calcestruzzo (Padova, 1987), 1987, 283-91
- (XV) ZOLLO R.F., ILTER J.A., BOUCHACOURT G.B., Plastic and drying shrinkage in concrete containing collated fibrillated polypropylene fibre, Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete - vol. 1 (Sheffield, 1986), 1986, pp. 6
- (XVI) ZONSVELD J.J., Properties and testing of concrete containing fibres other than steel, Fibre Reinforced cement and Concrete - RILEM Symposium (London, 1975), 1975, 217-26

**PRIMI RISULTATI DI UNA INDAGINE SULLA FATICA DEI CONGLOMERATI
CEMENTIZI FIBRO-RINFORZATI CON PARTICOLARE RIGUARDO
AL LORO IMPIEGO NELLE OPERE MARITTIME**

**CARTAPATI Enzo
RADOONA E. Filiberto**

**Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica
Università di Roma "La Sapienza"**

**DI GIROLAMO Paolo
NOLI Alberto**

**Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Strade
Università di Roma "La Sapienza"**

PRIMI RISULTATI DI UNA INDAGINE SULLA FATICA DEI
CONGLOMERATI CEMENTIZI FIBRO - RINFORZATI CON
PARTICOLARE RIGUARDO AL LORO IMPIEGO NELLE OPERE
MARITTIME

E.CARTAPATI (*) - P.DI GIROLAMO (**) - A.NOLI (**)
E.F.RADOGNA (*)

- (*) Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica dell'Università di Roma "La Sapienza"
(**) Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Strade dell'Università di Roma "La Sapienza"

SOMMARIO

Nel presente lavoro si riferisce sui primi risultati di prove di fatica, in attuazione del programma generale di ricerca sui calcestruzzi fibro-rinforzati. Le prove sono inquadrate in uno specifico "sottoprogramma fatica" che ha lo scopo di confrontare il comportamento di provini senza e con fibre di acciaio, sottoposti a prove di flessione con cicli pulsanti di carico ad ampiezza costante.

SUMMARY

In the present paper first results of fatigue testing are given, in the frame of a general program on behaviour of f.r.c., according to "sub-program fatigue". Aim of fatigue testing is the comparison of behaviour of concrete specimens without and with steel fibers, submitted to flexural pulsating loads with constant amplitude.

1. PREMESSE E SCOPI

In un precedente lavoro (1) è stato messo in evidenza che, fino a quel momento (1987), risultavano piuttosto scarsi i contributi alle indagini, sia teoriche che sperimentali, intesi a verificare la possibilità di impiego dei conglomerati cementizi fibro-rinforzati nel campo delle costruzioni marittime ed, in particolare, per la realizzazione degli elementi artificiali delle mantellate delle dighe a

gettata. Si è ritenuto quindi opportuno impostare una ricerca sperimentale atta a fornire informazioni integrative, particolarmente orientate ai problemi di urto, di fatica e di assorbimento di energia, che acquistano una rilevanza particolare nel caso degli elementi delle mantellate, esposti alle azioni dinamiche del moto on-doso.

Nell'ambito del programma generale della ricerca è già stata eseguita una indagine sperimentale preliminare con carichi statici, finalizzata alla selezione dei più idonei valori caratterizzanti il materiale composito. Con la presente comunicazione si dà notizia di un ulteriore sviluppo della ricerca, relativo al comportamento del conglomerato fibro-rinforzato sotto cicli di tensione ripetuti un gran numero di volte, in modo da produrre la rottura come conseguenza del danneggiamento cumulativo (fatica).

All'ora attuale, i risultati sperimentali disponibili sono molto limitati, ma si ritiene comunque utile esporre alcuni aspetti del problema della fatica, connessi con il tema della sicurezza, che chiariscono tanto le premesse quanto gli obiettivi della ricerca in corso, e descrivere inoltre la metodologia adottata per la sperimentazione, tenuto conto della particolare, non frequente opportunità, offerta dal presente Seminario, di discutere tali problematiche con ricercatori operanti sia nel campo della Scienza dei materiali che in quello della Ingegneria strutturale.

2. INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA DELLA FATICA NELL'AMBITO DELLA SICUREZZA STRUTTURALE

Nell'ambito delle analisi della sicurezza strutturale, la verifica allo stato limite ultimo di rottura per fatica differisce dalle verifiche rispetto agli altri stati limite ultimi perchè è effettuata utilizzando i carichi di servizio non maggiorati per il tramite di opportuni coefficienti moltiplicativi, come avviene in tutti gli altri casi.

Il fatto di avere rottura in servizio sottolinea la pericolosità del fenomeno e chiarisce che una verifica, impostata in modo razionale, non può basarsi su un margine fra "tensioni", come avviene per le rotture dovute ad un aumento dei carichi, ma, invece, su un margine fra "durate": da una parte la "durata della vita effettiva" del componente strutturale, sottoposto al danneggiamento cumulativo indotto dai cicli di tensione ripetuti, e dall'altra la "durata della vita di servizio", prevista in fase di progetto per il componente medesimo.

Da queste semplici considerazioni preliminari scaturiscono due conseguenze rilevanti:

- una procedura razionale di analisi della sicurezza a fatica richiede la valutazione, almeno stimata, del numero di cicli di tensione applicati e della loro ampiezza con riferimento alla intera durata della vita di servizio assegnata alla struttura in esame. A ciò provvedono i diagrammi noti come "collettivi" o "cumulativi" delle ampiezze dei cicli di tensione, ottenuti per il

tramite di misure estensimetriche effettuate su strutture esistenti in intervalli di tempo campionati;

- l'esame dei collettivi delle tensioni mostra che i cicli effettivamente applicati alle strutture reali sono di ampiezza variabile, mentre i diagrammi S - N (curve di Wöhler), che forniscono per ogni livello di tensione S la corrispondente durata totale N della vita del materiale, sono determinati in laboratorio con cicli di ampiezza costante S ripetuti N volte.

Per utilizzare le curve S - N, costruite con cicli di ampiezza costante, nel caso di cicli ripetuti di ampiezza variabile, è necessario introdurre nella procedura di verifica un criterio di danneggiamento cumulativo, che permetta:

- a) di stimare il contributo al danneggiamento di un singolo ciclo di ampiezza generica S_i a cui è associata la durata a rottura $N_i(S_i)$;
- b) di valutare il contributo al danneggiamento di n cicli aventi la medesima ampiezza S;
- c) di cumulare fra loro, con una prefissata regola, i contributi al danneggiamento del materiale, provenienti da cicli aventi ampiezze diverse.

Sono stati proposti diversi criteri di danneggiamento cumulativo, il più noto dei quali è quello più semplice, di Palmgren e Miner. Esso prevede che:

- a) il danneggiamento di un singolo ciclo di ampiezza S_i , a cui corrisponde sulla curva di Wöhler la durata a rottura $N_i(S_i)$ vale:

$$D = \frac{1}{N_i(S_i)} ;$$

- b) il danneggiamento di n_i cicli aventi la stessa ampiezza S_i vale:

$$D = \frac{n_i}{N_i(S_i)} ;$$

- c) il danneggiamento totale dovuto a n_1 cicli di ampiezza S_1 a cui corrisponde la durata a rottura N_1 ed a n_2 cicli di ampiezza S_2 a cui corrisponde la durata a rottura N_2 è dato da:

$$D = \frac{n_1}{N_1(S_1)} + \frac{n_2}{N_2(S_2)} .$$

In generale, per n_i cicli di ampiezza S_i , a cui corrispondono le durate a rottura N_i , il danneggiamento, secondo il criterio di Palmgren e Miner, vale:

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i(S_i)} .$$

La rottura per fatica si verifica quando $D = 1$.

Alla luce delle suddette considerazioni, l'analisi razionale della sicurezza a fatica si articola in quattro fasi:

- I) definizione del collettivo delle ampiezze delle tensioni;
- II) disponibilità delle curve S - N (curve di Wöhler) relative ai materiali costitutivi;
- III) disponibilità di un criterio di danneggiamento cumulativo (ad es. il criterio di Palmgren e Miner);
- IV) valutazione del danneggiamento totale D; non si ha rottura per fatica durante la prefissata durata della vita di servizio se risulta $D < 1$.

3. COLLOCAZIONE DELLA PRESENTE RICERCA NEL PROBLEMA DELLA SICUREZZA A FATICA

Le prove a fatica, previste secondo il programma che sarà illustrato nel seguito, tendono ad individuare alcuni punti della curva S - N, sia nel caso di conglomerato normale, che di conglomerato rinforzato con fibre. La conoscenza di leggi S - N per i calcestruzzi normali, che, in generale, hanno espressioni del tipo:

$$\log N = A (1 - \sigma_{c,max}/f_{ck}) / \sqrt{1-R}$$

con: A compreso fra 9 e 10

$R = \sigma_{c,min}/\sigma_{c,max}$ (coefficiente di asimmetria)

permettono di individuare, anche operando con un numero limitato di livelli di tensione S_i e facendo la media dei risultati disponibili per ciascun livello, la curva di Wöhler che meglio corrisponda alle caratteristiche del calcestruzzo impiegato.

A questo punto è possibile mettere in evidenza le eventuali differenze di comportamento a fatica del conglomerato con fibre, in relazione alle diverse percentuali di fibre. E' chiaro che per una autonoma determinazione di una curva S - N il numero di prove da effettuare è molto elevato, perchè occorre operare su più livelli S e, per ciascun livello, con almeno cinque provini. Senza escludere la possibilità di operare secondo queste modalità in una fase successiva della ricerca, l'obiettivo attuale è quello di trarre partito dalle leggi esistenti per il calcestruzzo normale, per individuare, come si è detto, la legge più adatta a valutare, di conseguenza, per confronto con il calcestruzzo senza fibre, l'influenza delle fibre.

4. NOTIZIE SUL PROGRAMMA GENERALE DELLE INDAGINI SPERIMENTALI E SUL SOTTOPROGRAMMA "COMPORTAMENTO A FATICA"

Si riporta da (I) lo schema del programma generale delle prove:

1. Trazione pura : 3 provini prismatici o cilindrici
2. Flessione : 3 p. prismatici (+3 per carichi di lunga durata)
3. Compressione : 3 p. cubici o cilindrici
4. Taglio : 3 p. prismatici
5. Torsione : 3 p. cilindrici cavi
6. Presso-flessione : 3 p. a C con due diverse eccentricità
7. Presso-torsione : 3 + 3 p. cilindrici cavi con due coppie di N , M_t
8. Urto : 3 p. prismatici
9. Fatica : 5 p. prismatici per 4 livelli di carico ripetuto
10. Assorbimento energia : 3 p. prismatici (come punto 2. per carichi di breve durata)
11. Durabilità : 3 + 3 p. fessurati e non, soggetti a flessione dopo 1 anno di vita.

Le prove verranno eseguite sia su calcestruzzo senza fibre che su calcestruzzo con fibre.

E' previsto di far variare alcuni parametri di base, secondo il seguente schema:

1. Tipo di cemento : 1 tipo
2. Dosaggio cemento : 1 valore (400 kg/m^3)
3. Rapporto acqua/cemento : 2 valori (il minore con fluidificanti)
4. Massima dimensione inerti : 2 valori (10 mm, 20 mm)
5. Curva granulometrica : 2 valori (variando % fino)
6. Forma delle fibre : 2 tipi (da scegliere)
7. Rapporto d'aspetto : 2 valori (60, 100 in via orientativa)
8. Dosaggio fibre : 2 valori (75 , 150 kg/m^3)
9. Modalità miscelatura : 2 modalità (uso colle, alla rinfusa)
10. Modalità vibrazione : 2 modalità.

Dalla combinazione degli otto casi per i quali sono previsti due valori del parametro correlativo, risulta che il numero dei casi da considerare è pari a $2^8 = 256$. I primi cinque parametri sono variabili anche per i provini di calcestruzzo senza fibre, da utilizzare per confronto, quindi il numero sale a $256 + 8 = 264$. E' immediato rendersi conto che il numero complessivo dei provini, ove si volesse realizzare in modo completo il programma così delineato, supererebbe il valore di diecimila. Nella realtà il programma ha anche lo scopo di costituire un quadro organico di riferimento, che permetta di sviluppare, di volta in volta, sottoprogrammi parziali, secondo una logica sequenziale, atta a mettere a profitto i risultati precedentemente acquisiti.

In attuazione di questi concetti il sottoprogramma "fatica" è stato elaborato nel modo seguente.

Lo scopo delle prove è quello di confrontare fra loro il comportamento di provini prismatici $16 \times 16 \times 64$ cm, realizzati senza e con fibre di acciaio, sottoponendoli a prova di flessione con carichi pulsanti concentrati ai terzi della luce. La resistenza del calcestruzzo è pari o superiore a 35 N/mm^2 .

Sono stati previsti tre tipi di composizione dei provini:

- A) senza aggiunta di fibre,
- B) con aggiunta di 75 kg/m^3 di fibre,
- C) con aggiunta di 150 kg/m^3 di fibre.

Le prove sono di due tipi:

- prova statica per la determinazione diretta del carico di rottura P_{ult} ;
- prove di rottura per fatica, spinte fino al numero di cicli massimo di 2 milioni di cicli. I provini che non si sono rotti dopo due milioni di cicli vengono sottoposti a prova di rottura statica per flessione, allo scopo di mettere in evidenza gli effetti del danneggiamento cumulativo subito.

Il numero di provini previsto per ciascuna prova è il seguente:

- prova statica : minimo tre provini;
- prova di fatica : minimo cinque provini.

Totale dei provini confezionati: $3 \times 27 = 81$.

Il carico di prova è impresso mediante macchina per prove statiche/dinamiche AMSLER 131-130 con pulsatore che opera nel campo $0 \div 10 \text{ t}$, con sensibilità di $0,1 \text{ t}$ e frequenza variabile nel campo $0 \div 10 \text{ Hz}$. Il carico oscilla fra i valori P_{max} e $P_{min} = 0,2 P_{max}$.

5. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI IMPIEGATI

5.1 Calcestruzzo

La composizione del calcestruzzo è stata oggetto di uno studio preliminare, che ha portato a definire i seguenti dosaggi:

- Pietrischetto (D_{max} 20 mm) : 23%
- Ghiaietto (D_{max} 15 mm) : 35%
- Sabbia (D_{max} 5 mm) : 42%
- Cemento Portland 425 : 400 kg/m^3
- Rapporto acqua/cemento : 0,38
- Superfluidificante : Sicament R

All'atto del getto si è controllato per tutti gli impasti il valore dello Slump, ottenendo misure comprese tra 6,5 e 8,0.

A 28 giorni di stagionatura si sono ottenuti i seguenti risultati:

- Massa volumica : 2410 kg/m^3

- Resistenza media su 14 provini : $R_m = 38,4 \text{ N/mm}^2$
- Scarto quadratico medio : $s = 1,86 \text{ N/mm}^2$
- Coefficiente di variazione : $\frac{s}{R_m} = \frac{1,86}{38,4} = 4,84 \%$
- Resistenza caratteristica : $R_{ck} = 38,4 - 2,02 \times 1,86 = 34,6 \text{ N/mm}^2$

5.2 Fibre metalliche

Le caratteristiche delle fibre metalliche sono le seguenti:

- Acciaio tipo : INOX AISI 304
- Dimensioni : $L = 25 \text{ mm}$, $\varnothing = 0,4 \text{ mm}$
- Rapporto d'aspetto : 62,5

Per quanto riguarda il tipo di fibre, si rileva che è stato adottato per uniformità quello impiegato nelle prove preliminari, di cui si è riferito in (I). In dette prove la composizione percentuale in peso totale è stata la seguente (curva granulometrica cubica):

- Ghiaia : 26%
- Ghiaietto : 20%
- Sabbia : 39%
- Cemento pozzolanico 325 : 15%
- Rapporto acqua/cemento : 0,5

6. PRIMI RISULTATI SPERIMENTALI

Sono state effettuate tre prove di rottura per flessione con carico statico secondo lo schema descritto al paragrafo 4, rispettivamente per i calcestruzzi senza fibre, con 75 kg/m^3 di fibre e con 150 kg/m^3 di fibre. Si sono ottenuti i seguenti risultati:

Dosaggio fibre kg/m^3	Contrassegno provini	f_{cf} N/mm^2
0	A9	4,76
75	B2	6,08
150	C7	5,16

Sono state altresì effettuate tre prove di rottura a fatica per flessione con carico pulsante compreso tra $P_{\max} = 0,85 P_{ult,st}$ e $P_{\min} = 0,2 P_{\max}$, una per ciascun tipo di calcestruzzo, ottenendo i seguenti risultati:

Dosaggio fibre kg/m^3	Contrassegno provini	$\sigma_{\max}$ N/mm^2	$\sigma_{\min}$ N/mm^2	N numero di cicli a rottura
0	A7	4,05	0,81	1400
75	B6	5,17	1,03	22600
150	C4	4,39	0,88	(*)

(*) provino non pervenuto a rottura dopo 56000 cicli.

Allo scopo di chiarire la metodologia indicata nel paragrafo 3. si riportano da (III) e da (V) due diagrammi, che rappresentano sul piano semilogaritmico alcune curve di Wöhler, nella fig. 1 per il caso di calcestruzzo senza fibre, con carico pulsante ($\sigma_{\min}=0,08 \times f_{ctm}$), e nella fig. 2 per il caso di calcestruzzo con fibre (2,98% in volume, pari a 234 kg/m^3), con carico alterno simmetrico.

Per un dato livello della tensione massima, si ottengono sperimentalmente i risultati di cinque provini e se ne determina la media. Si cerca quindi la linea di Wöhler che risulta più vicina al punto medio.

Si ripete il procedimento per altri due livelli di tensione e, per interpolazione, si perviene a determinare la linea più probabile per il calcestruzzo impiegato. Questa linea viene quindi utilizzata per la procedura di verifica, di cui al paragrafo seguente.

7. PROCEDURE DI VERIFICA A FATICA SECONDO IL CEB/FIP MODEL CODE 90 FIRST PRE-DRAFT 1988

Per completezza si riportano tutte e tre le procedure indicate:

a) Procedura semplificata.

Non è richiesta la verifica a fatica con metodi più accurati se si accerta che:

$$\max \sigma_d = \sigma_{\max} \cdot \gamma_{sd} \leq \sigma_{Rd}$$

in cui:

$$\sigma_{Rd} = 0,25 f_{ck} \quad \text{per la compressione}$$

$$\sigma_{Rd} = 0,18 f_{ck} \quad \text{per compressione-trazione con tensione massima di trazione} < 0,02 \sigma_{c,\max}$$

$$\sigma_{Rd} = 0,25 f_{ctk} \quad \text{per la trazione}$$

b) Verifica a fatica basata su un unico livello di tensione.

Si deve controllare se:

$$\log n \leq \log N$$

in cui n è il numero totale dei cicli corrispondente al livello di tensione previsto ed N è il numero di cicli a rottura, fornito dalla curva di Wöhler per il livello di tensione suddetto. Per le curve di Wöhler vengono fornite espressioni del tipo di quella riportata nel paragrafo 3..

c) Verifica a fatica basata sull'uso delle curve cumulative delle frequenze delle tensioni applicate (collettivo delle tensioni).

Mentre nel caso precedente è richiesta solo la conoscenza della curva di Wöhler del calcestruzzo, in questo caso occorre anche disporre del collettivo delle tensioni. La procedura della verifica è stata descritta nel paragrafo 2.. Si calcola il danneggiamento cumulativo

$$D = \sum_i \frac{n_{Sdi}}{n_{Rdi}} \quad \text{e si accerta che} \quad D < D_{\lim}$$

8. OSSERVAZIONI CONCLUSIVE

Nella presente nota è stata descritta la metodologia con la quale si intende pervenire alla determinazione della legge S - N che risulta più idonea ad interpretare il comportamento del calcestruzzo senza fibre e di quelli con fibre, utilizzati nel sottoprogramma "fatica".

In questo modo si cerca di approfondire il confronto fra i diversi materiali, non limitandolo ai valori relativi ai vari livelli di tensione, ma tentando di estenderlo alle leggi S - N corrispondenti. Ciò al fine di pervenire a risultati che abbiano un concreto riscontro con i problemi della progettazione degli elementi artificiali delle mantellate delle dighe a gettata.

Dalla precedente disamina è emerso, peraltro, che, oltre alle curve di Wöhler, è necessario disporre di collettivi delle tensioni, per poter effettuare le verifiche secondo la procedura più accurata. La determinazione dei collettivi delle tensioni validi per gli elementi artificiali suddetti esula dal programma di ricerca, a cui afferisce il sottoprogramma "fatica", di cui si sono date notizie preliminari, ma costituisce un problema di rilevante interesse su cui è auspicabile che converga l'attenzione dei ricercatori.

RINGRAZIAMENTI

Gli Autori ringraziano vivamente la Società Girola nella persona dell'ing. M. Oddo, che ha sostenuto l'onere della realizzazione dei calcestruzzi senza fibre e con fibre e della confezione di tutti i provini, seguendone le fasi con partecipazione ed interesse. Gli i nerti provengono da cave di proprietà della Società Central Beton s.r.l., che ha curato lo studio granulometrico ed ha assistito alla confezione dei provini nella persona del geom. R. Messina.

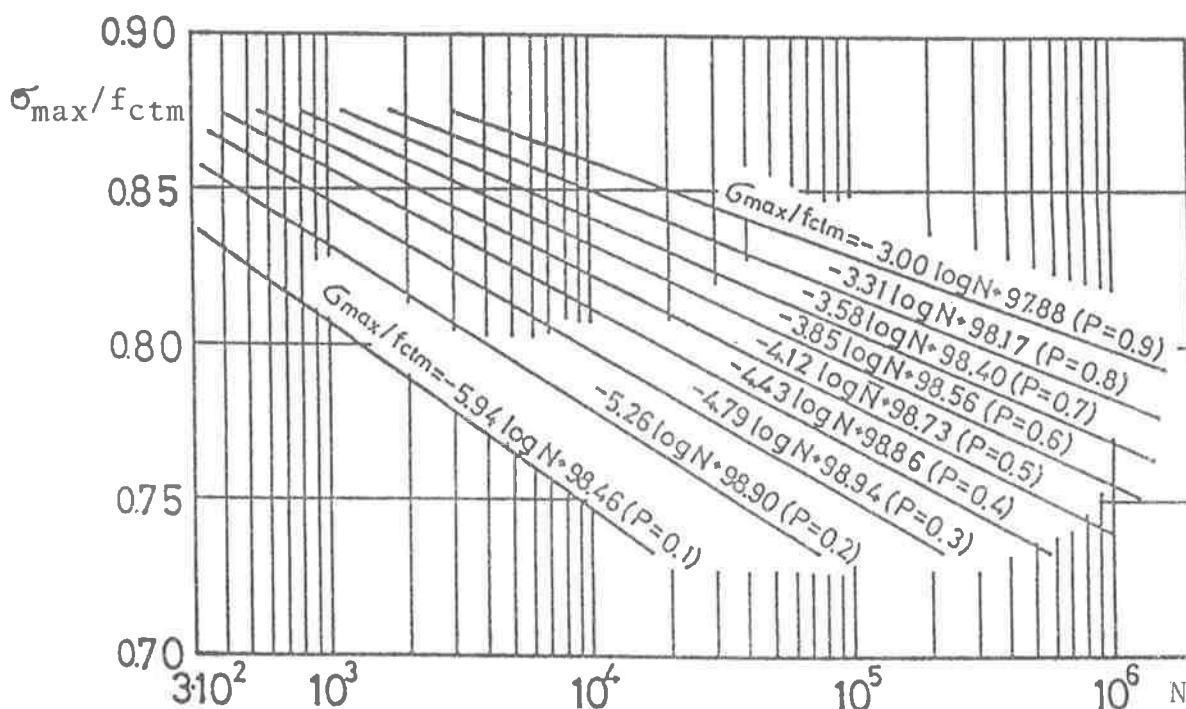


Fig. 1. Durata della vita a fatica. (da (III))

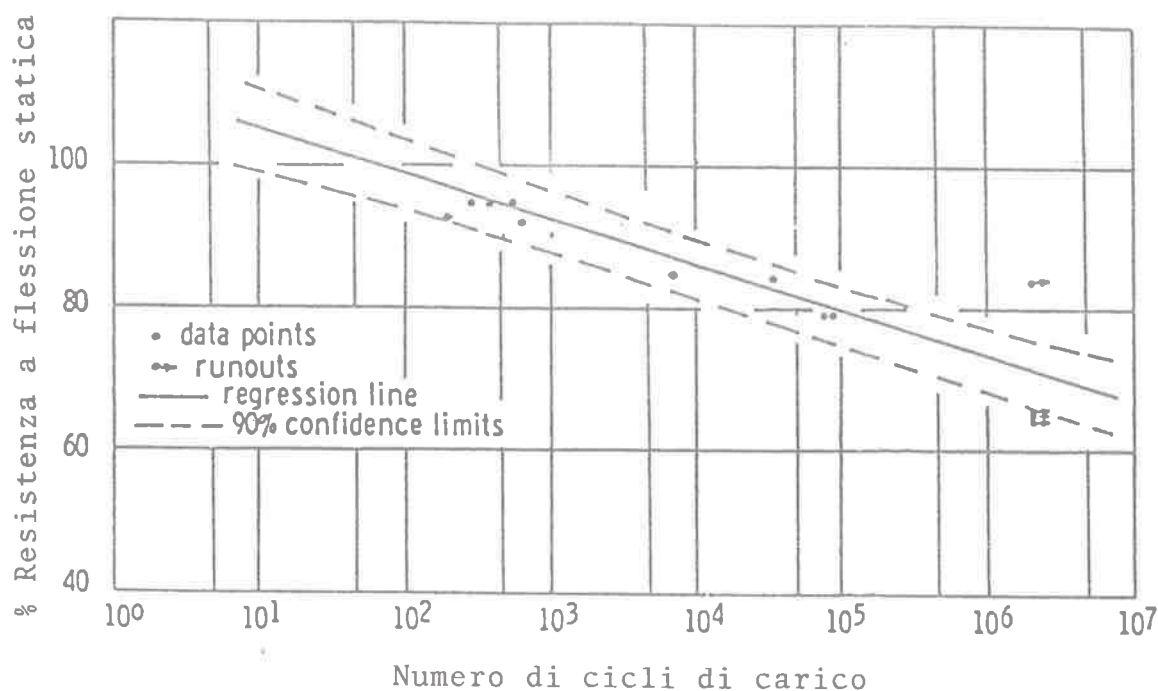


Fig. 2. Resistenza a fatica per carico alterno simmetrico per calcestruzzo fibro-rinforzato con 2,98% in volume di fibre $L=12,5$ mm, $\varnothing=0,2$ mm. (da (V))

9. BIBLIOGRAFIA

- (I) S.Calamani - L.Franco - A.Noli - E.F.Radogna
Conglomerati cementizi fibro-rinforzati: stato dell'arte ed indagini preliminari per una ricerca sulla possibilità di impiego per opere marittime.
Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza".
Collana Studi e Ricerche - 1/87 marzo 1987
- (II) CEB Bulletin d'information N° 185
Plain and slightly reinforced concrete structures - Fatigue.
Marzo 1988
- (III) CEB Bulletin d'information N° 188
Fatigue of concrete structures. State of the Art Report.
Giugno 1988
- (IV) CEB Bulletin d'information N° 190a, 190b
CEB-FIP Model Code 1990 - First Predraft 1988
- (V) G.Batson - C.Ball - L.Bailey - E.Landers - J.Hooks
Flexural fatigue strength of steel fiber reinforced concrete beams.
ACI Journal, November 1972, pp.673-677.

PROVE DI PERFORAZIONE PER LA VALUTAZIONE SPERIMENTALE
DELLA RESISTENZA ALL'IMPATTO DI ELEMENTI IN CALCESTRUZZO
ARMATO

CASIRATI M.
CASTOLDI Aldo
LODIGIANI Paolo
PANZERI Paolo
PEZZOLI Paolo

Ismes S.p.A., Bergamo

CAPOGNA Germano
DE ANGELIS R.

Enea/Disp., Roma

PROVE DI PERFORAZIONE PER LA VALUTAZIONE SPERIMENTALE DELLA
RESISTENZA ALL'IMPATTO DI ELEMENTI IN CALCESTRUZZO ARMATO
FIBRO-RINFORZATO

M. Casirati, A. Castoldi, P. Lodigiani, P. Panzeri, P. Pezzoli
Ismes S.p.A., Bergamo
G. Capogna, R. De Angelis
Enea/Disp, Roma

SOMMARIO

Il lavoro presenta l'attività sperimentale inerente a prove d'impatto per la perforazione di manufatti in c.a. fibro-rinforzato mediante caduta guidata di proietti di notevole massa. Le fasi di progettazione dell'indagine sperimentale, della tecnologia esecutiva adottata per il confezionamento dei calcestruzzi compositi, della messa a punto delle attrezzature per l'esecuzione delle prove d'impatto e delle successive analisi dei dati raccolti, vengono dettagliatamente descritte.

SUMMARY

The work deals with the experimental activity relevant to impact tests for the perforation of fibre reinforced concrete specimens through a driven drop of huge mass missiles. The phases of the design of the experimental activity, of the executive technology adopted for the realization of the composite concretes, of the set-up of the rigs for the performance of the impact tests and of the successive analysis of the data gathered, are described in detail.

1. PREMESSA

Numerosi studi sono stati condotti da vari ricercatori per la determinazione delle proprietà meccaniche del calcestruzzo armato fibro-rinforzato per carichi convenzionali di trazione e/o di flessione.

Aspetti a tutt'oggi non ancora studiati a fondo sono invece quelli relativi alla valutazione della capacità del materiale di assorbire energia, essenzialmente legati ad una tendenza alla frattura di tipo duttile come risultato dell'azione delle fibre addizionali tese da entrambe i lati delle lesioni nel calcestruzzo, a fronte di fenomeni di tipo impulsivo tendenti a perforare il calcestruzzo composito.

L'obiettivo immediato della presente attività sperimentale è pertanto consistito nella valutazione della resistenza alla penetrazione di manufatti in calcestruzzo armato fibro-rinforzato, attraverso l'esecuzione di prove d'impatto mediante caduta libera guidata di proietti di notevole massa.

Sono stati sottoposti ad indagine sperimentale cinque "targets" circolari del diametro di 5 m, il cui spessore è stato definito sulla base di una approfondi-

ta analisi dei piu' significativi risultati riportati nella letteratura specifica internazionale, con particolare riferimento alla formula della CEA-EDF-AEEW la quale a tutt'oggi, pur considerando la presenza dell'armatura lenta tradizionale, non e' tuttavia in grado di mettere in conto un eventuale contenuto di fibre di rinforzo (vedi pto 4.).

La risposta dei "targets" all'eccitazione impressa e' stata rilevata mediante accelerometri e trasduttori di spostamento relativo. Inoltre, sono state misurate le velocita' d'impatto e quella residua d'uscita del proietto mediante sistemi a fotocellula installati in prossimita' dell'estradosso e dell'intradosso delle piastre. La forza d'impatto e' stata valutata attraverso un dinamometro estensimetrico realizzato sul missile stesso (vedi pto 4.).

Al fine di esaltare l'influenza dell'armatura fibrosa miscelata in diverse percentuali, la matrice cementizia del calcestruzzo fibro-rinforzato e' stata confezionata seguendo il criterio di assicurare l'omogeneita' degli impasti ed, in particolare, mantenendo costanti quei parametri che possono alterare le caratteristiche di un calcestruzzo (rapporto acqua/cemento, dimensione massima degli inerti, quantita' di cemento in funzione del tipo di fibre impiegato), secondo quanto peraltro indicato dalle "Raccomandazione Tecniche A.I.C.A.P. per l'impiego del conglomerato cementizio fibroso" (I) ed in generale dalla letteratura tecnica inerente la definizione delle miscele di calcestruzzo.

Inoltre, al fine di meglio apprezzare l'eventuale apporto positivo connesso con la presenza del fibro-rinforzo, e' stato realizzato anche un elemento in calcestruzzo non fibroso sul quale sono state condotte tutte le esperienze previste per i manufatti dotati di fibre. Il confronto diretto tra i valori relativi al c.a. ordinario e quelli inerenti agli elementi fibro-rinforzati con differenti percentuali di fibre, puo' consentire infatti, al di la' di possibili analisi dei valori individuati anche in termini assoluti, di giungere ad un'immediata comprensione delle reali capacita' di resistenza dei calcestruzzi fibrosi.

In parallelo alla campagna di perforazione dei manufatti, per piu' dettagliatamente valutare le caratteristiche fisiche e meccaniche dei singoli impasti impiegati per confezionare i "targets" - dotati con differenti percentuali e caratteristiche dimensionali delle fibre (vedi pto 2.) -, si e' proceduto all'effettuazione di indagini sperimentali di tipo distruttivo (e non) su provini di materiale con armatura fibrosa e sulla loro comune matrice cementizia (vedi pto 3.).

In particolare si sono eseguite prove in situ, tendenti a caratterizzare i singoli impasti al momento del getto in relazione alla loro consistenza, massa volumica, acqua essudata, ed in laboratorio per evidenziarne le caratteristiche intrinseche in funzione dell'armatura fibrosa in essi contenuta: prove di compressione monoassiale su provini prismatici e cilindrici da carotaggio, prove di vibrazione forzata per la determinazione del modulo di elasticita' longitudinale, prove di trazione indiretta ("brasiliiana") e prove di resistenza a flessione.

Gli aspetti relativi alla determinazione della capacita' del calcestruzzo fibro-rinforzato di assorbire energia in virtu' dell'azione delle fibre addizionali in acciaio, sono stati studiati sia mediante la valutazione delle riduzioni di velocita' del proietto e la quantificazione dell'energia dissipata con il fenomeno d'impatto, sia attraverso la rappresentazione di curve carichi-deformazioni di tipo dinamico (vedi pto 4.).

2. IL "MIX DESIGN" DEI CALCESTRUZZI

2.1 Matrice ed armatura fibrosa

La matrice cementizia utilizzata per il confezionamento dei cinque manufatti e dei relativi provini (vedi pto 3.) da sottoporre ad indagine sperimentale, e' stata progettata secondo le modalita' indicate nelle "Raccomandazioni tecniche

A.I.C.A.P. per l'impiego del conglomerato cementizio fibroso" (vedi fig.1).

Sono stati in particolare assunti i rapporti dimensionali consigliati tra i diametri degli aggregati e delle armature fibrose impiegate. I dosaggi di cemento sono stati fissati sulla base della espressione empirica riportata alle suddette Raccomandazioni.

Le distribuzioni granulometriche degli inerti sono state definite in modo da garantire la massima compattezza possibile al conglomerato cementizio.

Come indicato nella fig.1, il "target" identificato con la sigla T1 e' stato realizzato in semplice calcestruzzo ordinario. I "targets" T2+T5 sono stati arricchiti con fibre "Duoform" della WIRAND ottenute mediante trafilatura e taglio di filo d'acciaio - le cui caratteristiche sono riportate nella già citata fig.1 - con forma martellata-tonda atta a migliorare l'aderenza alla matrice cementizia. In particolare per i "targets" T2+T4 sono state impiegate fibre 25 x 0.40, mentre nella piastra T5 sono state introdotte fibre 45 x 0.80. Tutti i "targets" sono stati dotati di armatura lenta costituita da una doppia maglia $\phi 6/10$ x 10 cm disposta su entrambe le facce delle piastre (vedi foto 1).

2.2 Modalita' di confezione

La miscelazione delle fibre con gli impasti impiegati per la realizzazione dei primi due "targets" identificati dalle sigle T1 e T2, - rispettivamente in c.a. ordinario e con percentuale volumetrica di armatura fibrosa pari all'1% -, e' avvenuta in una centrale di dosaggio a torre dove le fibre, confezionate in sacchi, sono state immesse, senza particolari accorgimenti, direttamente in autobetoniera biconica.

Questa procedura, pur presentando innegabili vantaggi temporali, si e' rilevata pero' inadatta a garantire un'omogenea distribuzione delle fibre all'interno della matrice, per la tendenza delle fibre stesse ad intrecciarsi formando elementi a forma di "riccio" (vedi foto 2).

Tale modalita' di confezione e' stata pertanto sostituita con una metodologia atta a garantire una uniforme distribuzione delle fibre all'interno del conglomerato cementizio.

Gli impasti dei rimanenti "targets" (T3, T4, T5) sono stati quindi ottenuti attraverso l'utilizzo di una tecnica di miscelazione che ha comportato l'impiego in cantiere di un turbo-miscelatore ad asse verticale e che ha richiesto la setacciatura manuale delle fibre, introdotte direttamente nella matrice cementizia già predisposta in tutti i suoi elementi (vedi foto 3).

La foto 4 mostra l'aspetto dell'impasto cementizio fibroso, evidenziando l'uniformita' della distribuzione delle fibre stesse.

I risultati forniti dalle prove condotte in situ sui singoli cinque impasti cementizi realizzati al fine di caratterizzarne la consistenza: slump, massa volumica ed acqua essudata, sono raccolti nella fig.2.

3. PROVE PER LA CARATTERIZZAZIONE ED IL CONTROLLO DEL CONGLOMERATO CEMENTIZIO FIBROSO

3.1 Generalita'

Come già introdotto al pto 1. al fine di caratterizzare nel modo più completo possibile le proprietà fisico-meccaniche dei singoli impasti di conglomerato cementizio fibroso impiegato per il confezionamento dei cinque "targets" sottoposti ad indagine sperimentale, sono state confezionate diverse serie di provini di differenti dimensioni sottoposti ai seguenti tipi di prova:

- n.4 provini di dimensioni: 100x100x350 mm per le prove di resistenza a flessione;
- n.4 provini cubici di lato pari a 100 mm e a 150 mm per le prove di rottura a compressione e per trazione indiretta;

- n.4 provini di dimensioni: 80x60x640 mm per le prove di vibrazione longitudinale;
- n.5 blocchi di dimensioni: 300x300x400 mm, da ciascuno dei quali sono stati ricavati mediante carotaggio n.3 provini cilindrici di diametro 100 mm ed altezza 200 mm da sottoporre a prova di rottura per compressione.

3.1.1 Prove di resistenza a flessione

Le prove di resistenza a flessione sono state eseguite in accordo con quanto specificato al pto 7.1 delle "Raccomandazioni tecniche A.I.C.A.P. per l'impiego del conglomerato cementizio fibroso".

I campioni prismatici, provati a flessione in controllo di deformazione, con una velocità di progressione in mezz'ora pari a 2 mm/minuto, sono stati sottoposti al sistema di carico indicato nello schema di prova riportato in fig.3.

Le curve carichi-deformazioni ottenute, alcune delle quali sono riportate a titolo esemplificativo in fig.4, evidenziano l'elevata capacità del conglomerato cementizio fibroso, in funzione della percentuale di fibre addizionate, ad assorbire energia di deformazione rispetto al conglomerato non fibroso.

Infatti, da un'analisi dettagliata di tali diagrammi risulta evidente come nel caso del calcestruzzo ordinario le curve presentino un andamento elastico-lineare fino al carico di prima fessurazione, carico a cui corrisponde anche il collasso del provino, mentre per i calcestruzzi fibro-rinforzati accanto al ramo elastico-lineare sia presente un ramo di "softening", - aumento delle deformazioni con diminuzione del carico sopportato -, più o meno accentuato a seconda del tipo e della percentuale di fibre addizionate.

In particolare per le curve relative ai provini delle miscele T4 e T5, rispettivamente con percentuali in volume dell'1,5% e dell'1%, ma con fibre aventi un diverso rapporto d'aspetto, si nota un'andamento marcatamente elasto-plastico con un evidente picco, cui corrisponde il carico massimo, delimitato da un ramo "hardening" - o di incrudimento - e dal ramo "softening".

I valori numerici dei carichi di prima fessurazione desunti da tali curve e raccolti nelle tabelle riportate in fig.5, evidenziano come tali carichi presentino degli aumenti piuttosto limitati rispetto a quelli dei carichi ultimi, passando da un calcestruzzo ordinario a uno fibro-rinforzato, con distribuzione random di fibre, in accordo con la teoria del "materiale composito" (II).

Nella medesima figura vengono inoltre riportati sia i valori dei carichi massimi sia l'indice di tenacità calcolato come rapporto tra l'area al di sotto della curva carichi-deformazioni fino all'inflessione centrale di 1,9 mm, e l'area sottostante la curva in corrispondenza della prima fessurazione.

Infine nella fig.3 sono indicati, sia in una tabella che in un diagramma, che ne evidenzia l'incremento rispetto alla matrice in funzione dell'armatura fibrosa addizionata, i valori della resistenza ultima a flessione determinati secondo l'espressione:

$$\sigma_t = Pl/bh^2$$

avendo indicato con:

l : interasse tra gli appoggi

b, h : dimensioni trasversali del provino

3.1.2 Prove di rottura a compressione su provini cubici

Le prove di resistenza a compressione effettuate su provini di forma cubica aventi il lato proporzionato alla dimensione massima dell'inerte, - come previsto dalle norme UNI 6130 e 6131 prescritte per i calcestruzzi ordinari -, sono state eseguite secondo quanto indicato dalla vigente norma UNI 6132.

Più precisamente si sono impiegati cubi di spigolo pari a 100 mm per le miscele identificate dalle sigle T1, T2, T3, T4 (d_{max} aggregato = 12.5 mm), mentre cubi di lato 150 mm per la miscela T5 (d_{max} aggregato = 25 mm).

La fig.6 riporta in dettaglio per ogni serie di campioni analizzata i valori sia della resistenza di prelievo R_{CM} - media aritmetica delle resistenze ottenute a

compressione -, che della resistenza caratteristica R'_{ck} (1), valutate per ogni singolo impasto, prima e dopo l'introduzione delle fibre.

Si puo' notare come l'incremento della resistenza a compressione, sebbene di entita' modesta per tutti i campioni sottoposti ad indagine sperimentale, risulti apprezzabile solo per contenuti di fibre superiori allo 0,5%.

Nella medesima figura viene inoltre visualizzato, tramite una spezzata, l'andamento del rapporto della resistenza meccanica a compressione, in funzione della percentuale di armatura fibrosa, del composito rispetto alla sua matrice cementizia.

3.1.3 Prove di rottura a compressione su provini cilindrici

Da prismi aventi le dimensioni di 300x300x400 mm, mediante carotaggio, si sono ricavati i campioni cilindrici, con diametro ed altezza proporzionati alla dimensione massima dell'aggregato seguendo un criterio analogo a quello adottato per il confezionamento dei provini cubici, sui quali si sono effettuate le prove di rottura per compressione. In particolare si sono ricavati tre cilindri con diametro di 100 mm ed altezza di 200 mm per ciascuno degli impasti T1, T2, T3, T4 e tre cilindri con diametro di 150 mm ed altezza di 300 mm per l'impasto T5.

Da un esame dei valori ottenuti riportati in fig.7 si nota come l'incremento della resistenza rispetto al calcestruzzo ordinario abbia una distribuzione del tutto casuale in funzione del tipo e della percentuale di armatura fibrosa.

Nella medesima fig.7 e' inoltre riportato un grafico in cui viene evidenziato l'andamento del rapporto tra la resistenza di prelievo valutata sui provini cubici, e quella rilevata, per il medesimo impasto, sui provini cilindrici.

3.1.4 Prove di rottura a trazione indiretta

Le prove di resistenza a trazione (prova "brasiliiana") sono state eseguite su cubi di lato pari a 150 mm secondo le modalita' indicate al pto 3 della norma UNI 6135.

La fig.8 riporta una tabella che indica per le diverse serie di provini cubici sottoposti a prova i valori sperimentali della resistenza a rottura determinati secondo l'espressione: $\sigma_t = 2P/\pi A$.

In accordo con quanto previsto dal punto 8.1 delle Raccomandazioni A.I.C.A.P. nella fig.9 sono riportati una tabella ed un grafico inerenti ai valori di resistenza relativi alla prima fessurazione.

Infine la fig.10 raccoglie due grafici che forniscono per ciascuna prova di trazione analizzata (flessione e trazione indiretta) l'incremento della resistenza ultima in funzione della percentuale di fibre addizionate.

3.1.5 Prove dinamiche per la determinazione del modulo elastico longitudinale

L'indagine sperimentale e' consistita nella determinazione del modulo di elasticita' dinamico mediante la ricerca della prima frequenza di risonanza longitudinale su campioni di calcestruzzo soggetti ad una forzante di tipo sinusoidale.

La risposta di ogni singolo provino alla forza armonica applicata, fornita da un eccitatore elettrodinamico in grado di erogare una forza sinusoidale di frequenza e di entita' regolabile, e' stata misurata mediante un accelerometro posto in direzione parallela a quella di eccitazione sulla faccia trasversale di estremita' dal lato opposto rispetto alla forzante.

Esplorando un campo di frequenza sufficientemente ampio e' stata determinato il valore della frequenza naturale associata al primo modo di deformazione assiale. Tale valore e' legato alle altre grandezze fisiche in gioco dalla seguente

(1) Tale resistenza e' stata ricavata, trattandosi di una popolazione poco numerosa, come il minore tra i valori delle medie aritmetiche mobili delle resistenze di prelievo prese a gruppi di tre, diminuito di 49,05 MPa (III).

relazione: $E = (2lf_1)^2 \cdot \rho$

avendo indicato con:

E = modulo di elasticita' longitudinale

l = lunghezza del provino

f_1 = valore della prima frequenza naturale assiale

ρ = densita' del materiale.

L'espressione di cui sopra ha pertanto consentito di valutare, attraverso la determinazione del valore della prima frequenza di risonanza longitudinale di ciascun provino, il modulo di elasticita' dinamico del composito cementizio utilizzato per il confezionamento di ogni piastra.

I risultati sperimentali ottenuti sono stati riportati nel grafico e nella tabella di fig.11.

Poiche' il modulo di elasticita' di un calcestruzzo ordinario risulta essere legato alla sua resistenza meccanica si e' ritenuto opportuno evidenziare tramite due spezzate le variazioni dei valori del modulo sia in funzione della % di fibre, sia in funzione delle modalita' di esecuzione dell'impasto (i "targets" T1 e T2 sono stati confezionati in autobetoniera mentre i "targets" T3, T4 e T5 sono stati prodotti mediante impastatrice ad asse verticale), che ha determinato (vedi pto.3.1.2) valori di resistenza di prelievo sensibilmente differenti.

4. PROVE DI PERFORAZIONE

Nel corso dell'indagine sperimentale sono state eseguite complessivamente cinque prove di caduta guidata da un'altezza di circa 35 m mediante l'impiego di un unico tipo di proietto e di piastre circolari identiche dimensionalmente e differenti nel materiale.

Vengono di seguito sinteticamente descritte le procedure e le apparecchiature di prova, le modalita' di conduzione dei rilevamenti ed i risultati ottenuti.

4.1 Procedure ed apparecchiature di prova

4.1.1 Sistema di sgancio e di guida del missile

Il sistema di sgancio prevedeva l'utilizzo di una gru semovente a braccio telescopico, al cui gancio veniva appeso un dispositivo di sollevamento del missile, di rilascio dello stesso, e di guida mediante funi durante la caduta (vedi foto 5). Il missile veniva portato nella posizione di sgancio mediante un verricello e veniva guidato da due funi che scorrevano in quattro guide applicate sul missile stesso. Le funi di guida erano ancorate ad una estremita' ad un tamburo di avvolgimento, e all'altra ad una cella di forza. Tamburo e cella erano a loro volta fissati su una trave di ancoraggio vincolata alla struttura di sostegno; la trave alloggiava inoltre i rinvii della fune ed un sostegno delle fotocellule per la misura della velocita' del proiettile. Il missile, giunto all'altezza desiderata, veniva sganciato automaticamente per mezzo di un apposito meccanismo di rilascio.

4.1.2 Proietto

Nel corso dell'intera campagna di prove e' stato sempre utilizzato il medesimo proietto (vedi fig.12 e foto 6), costituito da una barra in acciaio fortemente legato di diametro pari a 0,15 m e di lunghezza complessiva di 3,60 m (massa di circa 1215 Kg). La superficie d'urto era piana e ortogonale all'asse longitudinale del proietto.

4.1.3 Misura del moto vibratorio dei "targets"

Il rilievo delle vibrazioni generate dalla caduta del proietto e' stato condotto

attraverso una rete di sensori di misura composta da quattro accelerometri (A1+A4) e da altrettanti trasduttori di spostamento relativo (W1+W4).

La disposizione strumentale illustrata in dettaglio nelle figg.13 e 14 e' caratterizzata dalla presenza di coppie di sensori, accelerometro e trasduttore di spostamento, che consentono la lettura diretta di entrambe le grandezze nel punto di installazione. Inoltre, l'evidente simmetria geometrica e di carico, ha suggerito di concentrare tutte le posizioni di misura lungo un unico asse.

4.1.4 Misura della velocita' del proietto

La misura della velocita' del proietto e' stata effettuata registrando i segnali elettrici trasmessi da una serie di fotocellule: F1, F3, F4 ed F5, installate, come indicato in fig.15, al di sopra ed al di sotto delle piastre in modo da cogliere la velocita' di ingresso e di uscita del proietto.

In realta' l'indicazione fornita dalla fotocellula F4, installata a breve distanza dall'introdosso del "target" e quindi esposta all'emissione di frammenti di materiale, non e' risultata sempre corretta; pertanto, in alternativa alla misura della velocita' di uscita del proietto, e comunque per un confronto tra le prestazioni del calcestruzzo ordinario e fibro-rinforzato, e' stata rilevata la velocita' corrispondente alle indicazioni fornite dalle fotocellule F3 e F5. Tale grandezza, di seguito sempre indicata come velocita' di uscita, risulta in realta' in pratica comprensiva del fenomeno di attraversamento della piastra.

4.1.5 Misura della forza e della durata dell'impatto

Nel corso delle prove di caduta e' stata eseguita una valutazione diretta della forza e della durata dell'impatto.

Per la misura di tali grandezze e' stata installata sul proietto una cella di carico estensimetrica, posta in corrispondenza dell'estremita' del proietto soggetto all'urto e comunque ad una distanza dalle superficie d'impatto dell'ordine di grandezza del diametro della barra (tale accorgimento, unitamente all'impiego per la realizzazione del proietto di un acciaio fortemente legato ad alto limite di snervamento, ha consentito di calcolare la forza d'impatto attraverso le relazioni proprie dei prismi di De Saint-Venant).

L'affidabilita' di misura della forza d'impatto e' stata verificata nell'ambito di un precedente studio - condotto dall'ISMES di Bergamo in collaborazione con l'ENEA - sui fenomeni d'impatto di cui al (V).

4.2 Modalita' di conduzione dei rilevamenti

I segnali elettrici provenienti dai vari trasduttori di misura sono stati inviati ad un sistema di registrazione di tipo analogico, composto da un registratore a nastro a 14 tracce (TEAC-modello SR50).

Nel corso delle prove di caduta il registratore e' stato impiegato alla velocita' massima (pari a 76,2 cm/s) in modalita' Wide-band, in modo da risultare pronto ad acquisire segnali aventi contenuto in frequenza fino a 20 kHz.

In un secondo tempo, i dati raccolti sono stati trasferiti, previa ulteriore amplificazione e filtraggio, ad un sistema di acquisizione composto da un convertitore analogico/digitale e da un minicalcolatore HP1000 collegato con le necessarie unita' periferiche. Durante la fase di riproduzione il registratore e' stato utilizzato alla velocita' minima (1,19 cm/s), in maniera da superare le limitazioni in frequenza dei sistemi digitali disponibili.

In particolare i dati sono stati digitalizzati con intervallo di campionamento di 2 ms, realizzando in tal modo mediante il rapporto imposto tra la velocita' di registrazione e quella di riproduzione, una frequenza effettiva di campionamento di 32000 Hz. I segnali sono stati inoltre filtrati in riproduzione con filtro-basso a 240 Hz.

Il campo di frequenza oggetto dello studio, che e' risultato pertanto compreso

fra 0 e 16000 Hz circa, e' apparso in generale sufficiente per cogliere con buona approssimazione i vari aspetti del fenomeno.

4.3 Risultati ottenuti

4.3.1 Velocita' di ingresso e di uscita

La fig.16 riporta una tabella che fornisce per ciascuna piastra analizzata, in funzione della percentuale di fibre di rinforzo impiegate, le velocita' di ingresso e di uscita rilevate, nonche' la riduzione di velocita' connessa con il fenomeno di perforazione. Nella medesima figura e' inoltre riportato un grafico che evidenzia l'andamento della riduzione di velocita' in funzione della percentuale di fibre.

La velocita' d'impatto, pari a circa 25 m/s per un'altezza di caduta prossima ai 35 m, e' stata scelta in modo da ottenere una sicura perforazione delle piastre. In particolare, e' stato assunto un rapporto pari a circa cinque tra la velocita' d'impatto e quella critica del calcestruzzo ordinario. Quest'ultima, corrispondente alla velocita' d'impatto di un proietto che perfora il bersaglio fuoriuscendone con velocita' residua nulla, e' stata valutata attraverso la formula di penetrazione CEA-EDF-AEEW (2) di natura sperimentale e con struttura omogenea (VI):

$$V_{c.a.o.} = 1,3 \rho^{1/6} f_{cy}^{1/2} [pt^2/\pi m]^{2/3} (r+0,3)^{1/2} \quad (1)$$

avendo indicato con:

- ρ : densita' del calcestruzzo
- f_{cy} : resistenza a compressione valutata su provini cilindrici di diametro 150 mm ed altezza 300 mm
- p : perimetro della sezione d'impatto del proietto
- d : diametro del proietto
- t : spessore del "target"
- m : massa del missile
- r : quantita' di armatura lenta (presente su ciascuna faccia ed in ciascuna direzione)

In generale vengono indicati come limiti di validita' per l'impiego della (1):

$$\begin{aligned} 45 < V_{c.a.o.} < 300 \quad \text{m/s} & \quad 0,2 < p/\pi t < 3 \\ 15 \cdot 10^6 < f_{cy} < 37 \cdot 10^6 \quad \text{Pa} & \quad 150 < m/p^2 t < 10^4 \quad \text{Kg/m}^3 \end{aligned}$$

Tramite l'equazione (1) ed assumendo:

$$\begin{aligned} d &= 0,15 \text{ m} & \rho &= 2500 \text{ Kg/m}^3 \\ f_{cy} &= 40 \text{ MPa} & m &= 1215 \text{ Kg} \\ t &= 0,15 \text{ m} & r &= 0,19 (\% \text{ EWEF}) \end{aligned}$$

e' possibile calcolare: $V_{c.a.o.} = 4,2 \text{ m/s}$.

E' stata pertanto adottata una altezza di caduta (circa 35 m) tale da garantire una velocita' d'impatto intorno ai 25 m/s.

Le riduzioni di velocita' riscontrate nel corso delle prove sperimentali, pur indubbiamente limitate in valore assoluto, manifestano una precisa tendenza all'incremento con il crescere della percentuale di fibre impiegate.

Tale risultato, peraltro atteso sulla base dei dati forniti dalle prove statiche, costituisce la conferma sperimentale di una piu' elevata resistenza all'impatto dei calcestruzzi fibrosi rispetto a quelli ordinari. Per comprendere

(2) CEA: Commissariat a l'Energie Atomique
EDF: Electricite' de France
AEEW: Atomic Energy Establishment Winfrith.

appieno l'importanza dell'apporto positivo delle fibre, e' tuttavia evidente come i risultati ottenuti, che costituiscono nel contesto dell'ampio spettro del reale solamente alcuni punti discreti significativi, debbano venire inquadrati e considerati nell'ambito del legame tra velocita' d'ingresso (V_i) e velocita' d'uscita (V_u), qualitativamente esprimibile attraverso le curve riportate in fig.18.

Tali curve, che illustrano l'ipotetico andamento della velocita' d'uscita del proietto dall'elemento perforato in funzione del rapporto tra la velocita' d'ingresso e quella critica del calcestruzzo ordinario ($V_{c.a.o.}$), evidenziano la tendenza asintotica, ed indipendente dal contenuto di fibre, della velocita' d'uscita ad eguagliare quella d'impatto per velocita' di ingresso molto elevate. In tale contesto, la diminuzione - riscontrata sperimentalmente - del rapporto (V_u/V_i) al crescere della percentuale di fibro-rinforzo, conferma l'esistenza di curve differenti per i diversi contenuti percentuali di fibre.

Le curve, che potrebbero essere definite dall'iperbole di equazione:

$$\frac{V_u}{V_i} = -\beta / (V_i/V_{c.a.o.}) + 1 \quad (2)$$

risultano in pratica caratterizzate da differenti intercette " β " con l'asse delle ascisse.

I valori di " β ", sempre maggiori di uno e crescenti con la percentuale di fibre, indicano chiaramente un incremento della velocita' critica di perforazione con il contenuto di fibro-rinforzo.

L'entita' dell'incremento della velocita' critica non e' purtroppo stimabile a partire dai risultati forniti dalle presenti indagini, vincolati ad un unico valore del rapporto tra velocita' d'ingresso e velocita' critica del calcestruzzo ordinario.

Sulla base di tali considerazioni, risulta tuttavia possibile stabilire gli obiettivi e quindi definire l'architettura dei futuri sviluppi della ricerca, volti ad un'accurata caratterizzazione delle funzioni di cui alla relazione (2) ed alla valutazione del legame tra i valori di " β " e la percentuale di fibre.

Il fine ultimo potra' essere quello della scrittura di una nuova equazione o di un termine integrativo da introdurre alla formula (1) capace di mettere in conto nelle espressioni che governano il fenomeno della perforazione per impatto di elementi in calcestruzzo, la presenza del fibro-rinforzo.

4.3.2 Energia dissipata

La valutazione esatta dell'energia dissipata non e' di facile esecuzione in quanto, sebbene sia ben nota l'energia di "input" immessa nel sistema, le restanti energie in gioco non sono in generale quantizzabili con l'accuratezza desiderata.

E' tuttavia possibile valutare, seppure in prima approssimazione, l'energia meccanica (non dissipata) associata alla barra costituente il proietto e al "target", ipotizzando prevalente il contributo del primo modo di vibrare (3). Questa ipotesi semplificativa consente infatti di descrivere il fenomeno in analisi dal punto di vista energetico mediante il seguente equilibrio, relativo all'intervallo di tempo compreso fra l'inizio del fenomeno e l'istante di massima deflessione del "target" in cui proietto e "target" risultano caratterizzati da energia potenziale massima:

$$\Delta(E.C.) = E.C._i - E.C._u = E.E._t + E.E._p + E.D. \quad (3)$$

dove si e' indicato con:

$$E.C._i = (1/2)m V_i^2 = \text{energia cinetica in ingresso posseduta dal proietto di massa "m", dotato di velocita' d'impatto "V_i"};$$

(3) Questa assunzione viene anche giustificata dall'esame dell'andamento delle "time histories" relative agli spostamenti nei vari punti del "target" che indicano, almeno per le posizioni piu' prossime al centro, una risposta prevalentemente dovuta al primo modo di vibrare.

$$E.C._u = (1/2)m V_u^2$$

$$E.E._t = (1/2)K_t \eta_t^2$$

= energia cinetica di uscita del proietto di velocità V_u ;
 = energia di deformazione elastica del "target", il quale, nel punto di contatto con il proietto ha rigidezza " k_t " e subisce, in seguito all'urto, una freccia elastica pari a " η_t " (rilevata mediante il trasduttore di spostamento in pos.WI prossimo al centro del "target");
 In particolare la rigidezza " k_t " del "target" è fornita dalla seguente relazione:

$$K_t = E_c S^3 / (0,55 R^2)$$

essendo:

E_c = modulo di elasticità longitudinale del calcestruzzo costituente il "target". Tale valore, in realtà differente per i diversi "target" (vedi punto 3.1.5) per le presenti calcolazioni viene assunto pari a 310.00 MPa per il calcestruzzo ordinario e a 350.00 MPa per quello fibro-rinforzato)

S = spessore del "target" (0,15 m)

R = raggio d'appoggio del "target" (2 m)

$$E.E._p = (1/2)K_p \eta_p^2$$

= energia di deformazione elastica della barra costituente il proietto. Tale barra ha rigidezza assiale " K_p " e subisce, a causa dell'urto, una freccia elastica (rilevata mediante la cella estensimetrica installata sul proietto con opportuna integrazione) pari a " η_p ".

In particolare si ha:

$$K_p = E_p A / L$$

essendo:

E_p = modulo di elasticità longitudinale dell'acciaio = $2,1 \times 10^5$ MPa

A = sezione trasversale proietto ($176,71 \text{ cm}^2$)

L = lunghezza proietto (360 cm)

E.D.

= energia dissipata attraverso il fenomeno di penetrazione nel calcestruzzo e per isteresi elastica del materiale costituente il proietto (l'energia dissipata dal sistema per irradiazione nell'intervallo di tempo considerato, si ritiene trascurabile).

L'equilibrio energetico di cui alla relazione (3), attraverso la valutazione delle energie cinetiche e di deformazione elastica in gioco, consente di stimare l'energia dissipata.

La fig.17 riporta una tabella che indica per i diversi elementi analizzati le velocità di ingresso e di uscita, le energie cinetiche e di deformazione elastica del proietto e del "target", l'energia dissipata ed il suo rapporto con quella cinetica di "input" globalmente immessa nel sistema, (l'energia di deformazione elastica relativa al "target n.3", non essendo stata rilevata correttamente in tale occasione l'indicazione fornita dalla cella estensimetrica posta sul proietto, è stata assunta pari ai valori minimo e massimo registrati nel corso delle restanti prove di caduta).

Nella medesima tavola è inoltre riportato un grafico che evidenzia l'andamento dell'energia dissipata (rapportata a quella d'ingresso) in funzione della percentuale di fibre.

I risultati ottenuti, pur essendo contenuti in termini assoluti in ragione della ancora elevata velocità d'uscita del proietto, manifestano una precisa tendenza all'incremento dell'energia dissipata dal sistema con l'aumentare della percentuale di fibro-rinforzo.

Anche questo risultato, viene pertanto a costituire un'ulteriore conferma sperimentale della maggiore capacità del calcestruzzo fibro-rinforzato ad assorbire energia (vedi anche pto 3.1.1), e quindi in definitiva a far fronte all'impatto di proietti dotati di elevata velocità.

È infine appena il caso di osservare che l'energia di deformazione elastica del

"target" assume sempre valori molto simili, come diretta conseguenza sia delle ridotte variazioni del valore del modulo di elasticita' longitudinale del calcestruzzo con l'impiego delle fibre (vedi pto 3.1.5), sia della pratica coincidenza delle frecce misurate sui diversi "targets" in seguito ad impatto nelle posizioni analoghe strumentate W1+W4.

Le fotografie nn.7 e 8 illustrano infine l'aspetto - dopo l'impatto - della superficie di intra-dosso rispettivamente dei "targets" n.1, in calcestruzzo ordinario, e n.4, fibro-rinforzato con percentuale di fibre pari all'1,5%.

Esse evidenziano la notevole differenza di comportamento dei due materiali in termini di "scabbing", inteso come il fenomeno per il quale si verifica la produzione di scaglie fuoriuscenti dal "target" dalla parte opposta alla faccia colpita. I risultati ottenuti mostrano in generale infatti una decisa riduzione della quantita' di materiale proiettato verso l'esterno dall'urto, al crescere della percentuale di fibre presenti.

4.3.3 Forza e durata dell'impatto

La fig.19 riporta uno "zoom" dei diagrammi delle forze d'impatto relative alle diverse prove di caduta effettuata (quella relativa al "target" n.3 non e' stata rilevata), sovrapposte e sincronizzate nell'istante dell'urto.

Il ristretto intervallo di tempo considerato e' quello entro il quale l'azione esercitata raggiunge il suo valore massimo.

Per una migliore comprensione del fenomeno in studio, nella fig.19 e' stata introdotta sull'asse delle ascisse la variabile "penetrazione" che e' stata sostituita al parametro "tempo" assumendo una velocita' d'ingresso del proietto convenzionalmente uguale per tutte le prove e pari a 25 m/s. La rappresentazione in tal modo ottenuta viene cosi' in pratica ad evidenziare una curva carichi - penetrazione, in cui i carichi sono in effetti le reazioni esercitate dal materiale alla deformazione impressa. Ovviamente l'istante in cui si verifica il carico piu' elevato viene ad assumere il significato di valore di penetrazione corrispondente al massimo della reazione opposta dall'elemento in prova all'azione esercitata dell'esterno.

Le citate curve carichi-penetrazione si possono pertanto ritenere costituire il corrispondente dinamico dei legami carichi-frecce ricavati dalle prove di trazione per flessione di cui al pto 3.1.1.

L'analisi dei risultati ottenuti, riportati nella stessa fig.19, evidenzia valori di deformazione crescenti con la percentuale di fibre, confermando pertanto anche in campo dinamico una piu' elevata capacita' di deformazione, e quindi di assorbimento di energia, da parte dei calcestruzzi fibro-rinforzati.

Per quanto concerne i valori massimi assunti dalle forze d'impatto relative alle diverse prove di caduta, occorre osservare che la variabilita' dei risultati ottenuti insieme alla mancanza di una precisa tendenza di andamento, oltre a risultare in realta' coerente con i risultati forniti dalle prove statiche relative alla resistenza dei materiali in studio (vedi pto.3.1.2) (le quali avevano evidenziato capacita' di resistenza sostanzialmente analoghe per calcestruzzo ordinario e per quelli fibro-rinforzati), potrebbe presumibilmente venire anche in parte associata alle imprecisioni insite nella misura di tali valori massimi che, a causa di contatti tra proietto e "targets" non perfettamente "piani", possono in effetti risultare distorti da distribuzioni di tensione non uniformi nella sezione strumentata.

5. CONCLUSIONI

Una dettagliata ed accurata analisi dei dati sperimentali ottenuti, ha consentito di effettuare alcune interessanti considerazioni volte ad individuare in termini prestazionali le potenziali capacità di resistenza dei calcestruzzi fibrosi a fronte di fenomeni d'impatto in grado di perforare i manufatti di calcestruzzo sottoposti a prova.

Particolare cura è stata dedicata a tutte le fasi attraverso le quali lo studio si è sviluppato: dalla scelta dei materiali alla definizione della composizione degli impasti, dalle modalità di confezionamento delle matrici cementizie all'esecuzione della posa in opera, dalle caratteristiche delle apparecchiature di misura utilizzate alle metodologie di analisi dei dati sperimentali raccolti. La validità di tale impostazione delle indagini ha consentito, pur nell'ambito di una assai ristretta variabilità dei parametri significativi per lo studio e di un approccio di tipo deterministico al problema, di produrre dati certi ed attendibili che, in prospettiva, potranno a ragione costituire un utile orientamento per tutte le successive evoluzioni della ricerca.

I risultati ottenuti mostrano nel complesso, soprattutto attraverso il confronto dei dati sperimentali relativi ai manufatti fibro-rinforzati con quelli inerenti al calcestruzzo ordinario, una precisa tendenza all'incremento della capacità del materiale di assorbire energia con l'aumentare della quantità di fibro-rinforzo. Tale tendenza costituisce indubbiamente lo stimolo per la prosecuzione della ricerca al fine di caratterizzare e quantizzare in dettaglio l'apporto positivo dell'armatura fibrosa, a fronte di fenomeni d'impatto in grado di produrre la perforazione degli elementi colpiti. In tal senso acquista particolare rilievo la prevista realizzazione presso l'ISMES di Bergamo di un acceleratore di massa ad aria compressa in grado di lanciare proiettili di dimensione più limitate ma dotati di notevoli velocità.

6. BIBLIOGRAFIA

- I) A.I.C.A.P. Comitato Calcestruzzi Speciali: "Raccomandazioni tecniche per l'impiego del conglomerato cementizio fibroso", 1982.
- II) ACI Committee 544: "State of Art Report on Fiber Reinforced Concrete", 1R-82.
- III) F.Scirocco: "Tecnologie degli elementi costruttivi", CLUP, 1979 pag. 137+138.
- IV) W. Radomski: "Some properties of steel fibre reinforced concrete subjected to impact loads", 9th SMiRT, Lausanne 17-21 Augusto 1987 pages 285+291.
- V) Rapporto ISMES REL-DPD-0358, 1987: "Impatto di proiettili su pareti di calcestruzzo armato mediante caduta libera guidata".
- VI) K. Fullard, P. Barr: "Development of design guidance for low velocity impacts on concrete", 9th SMiRT, Lausanne 17-21 August 1987 pages 57+65.

" MIX DESIGN "

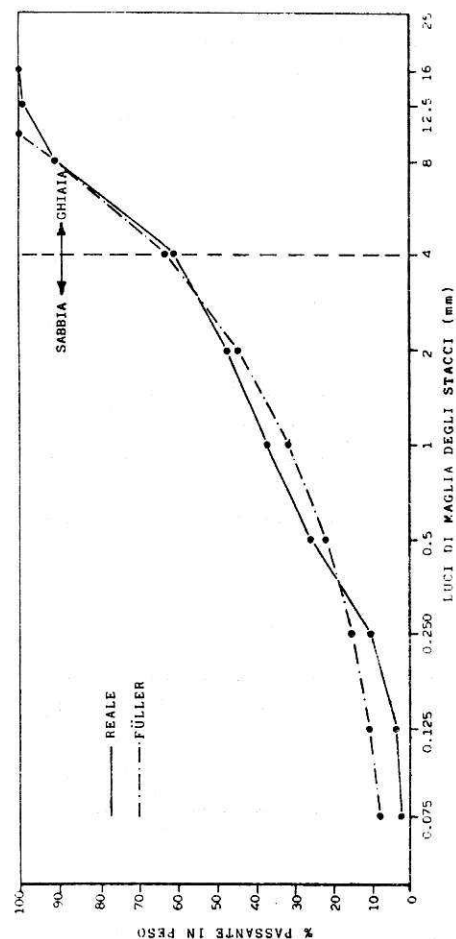
TARGET (sigla di identificazione)	FIBRE IMPIEGATE		MATRICE CEMENTIZIA					
	LUNGHEZZA (mm)	DIAMETRO (mm)	% (in volume)	ACQUA CEMENTO	Dosaggio cemento R425 (kg/m ³)	Diametro max aggregato (mm)	Fluidificante (Rheobuild) (% peso C)	Consistenza (valori di slump ottenuti)
T1	-	-	-	0.4	450	12.5	0.4	16.0
T2	25	0.40	1	0.4	450	12.5	1	11.0
T3	25	0.40	0.5	0.4	450	12.5	1	18.0
T4	25	0.40	1.5	0.4	450	12.5	1	17.5
T5	45	0.80	1	0.4	400	25.0	1.5	20.0

FIBRE IMPIEGATE PER IL CONFEZIONAMENTO DEI SINGOLI "TARGETS"

TIPO DI FIBRE	MATERIALE	RAPPORTO D'ASPETTO L/d	TENORE DI CARBONIO %	RESISTENZA A ROTTURA (MPa)
25 x 0.40	ACCIAIO	62.5	0.10	736 ± 834
45 x 0.80	ACCIAIO ARMATO RAMATO	56.25	0.15	1275 ± 1472

CONFRONTO TRA CURVA GRANULOMETRICA REALE E CURVA DI FÜLLER

PER L'IMPASTO CON D_{max} AGGREGATO = 12.5 MM



CONFRONTO TRA CURVA GRANULOMETRICA REALE E CURVA DI FÜLLER

PER L'IMPASTO CON D_{max} AGGREGATO = 25 MM

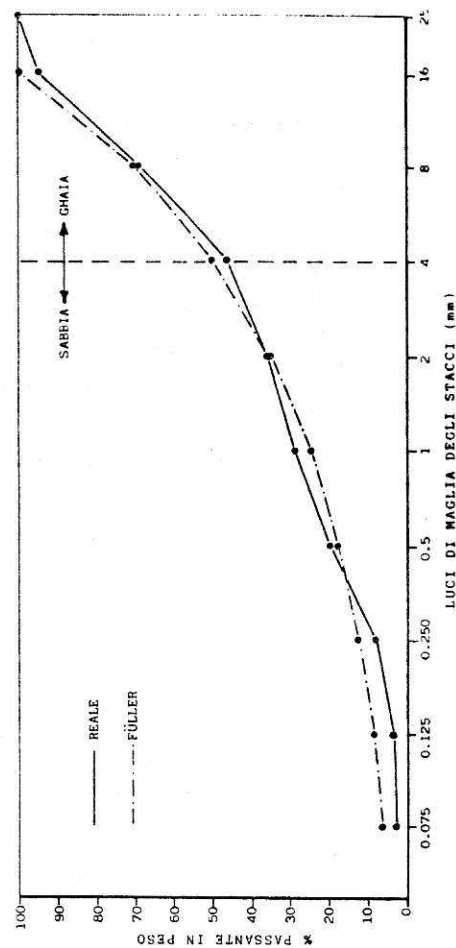


fig.1

PROVE SU CALCESTRUZZO FRESCO

Sigla prelievo	Data getto	Slump (cm)	Massa volumica (kg/m ³)	Acqua essudata (%)	Temperatura calcestruzzo (°C)	Temperatura esterna (°C)
TARGET 1	21.03.1988	16.0	2336	6.0	14	9
TARGET 2	22.03.1988	11.0	2389	1.1	15	11
TARGET 3	29.03.1988	18.0	2398	2.9	16	17
TARGET 4	30.03.1988	17.5	2414	2.5	12	9
TARGET 5	31.03.1988	20.0	2437	2.7	13	9

fig.2

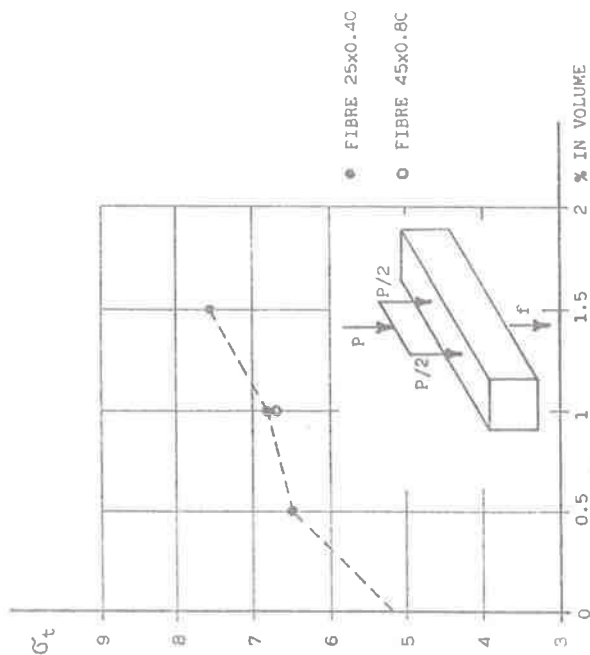
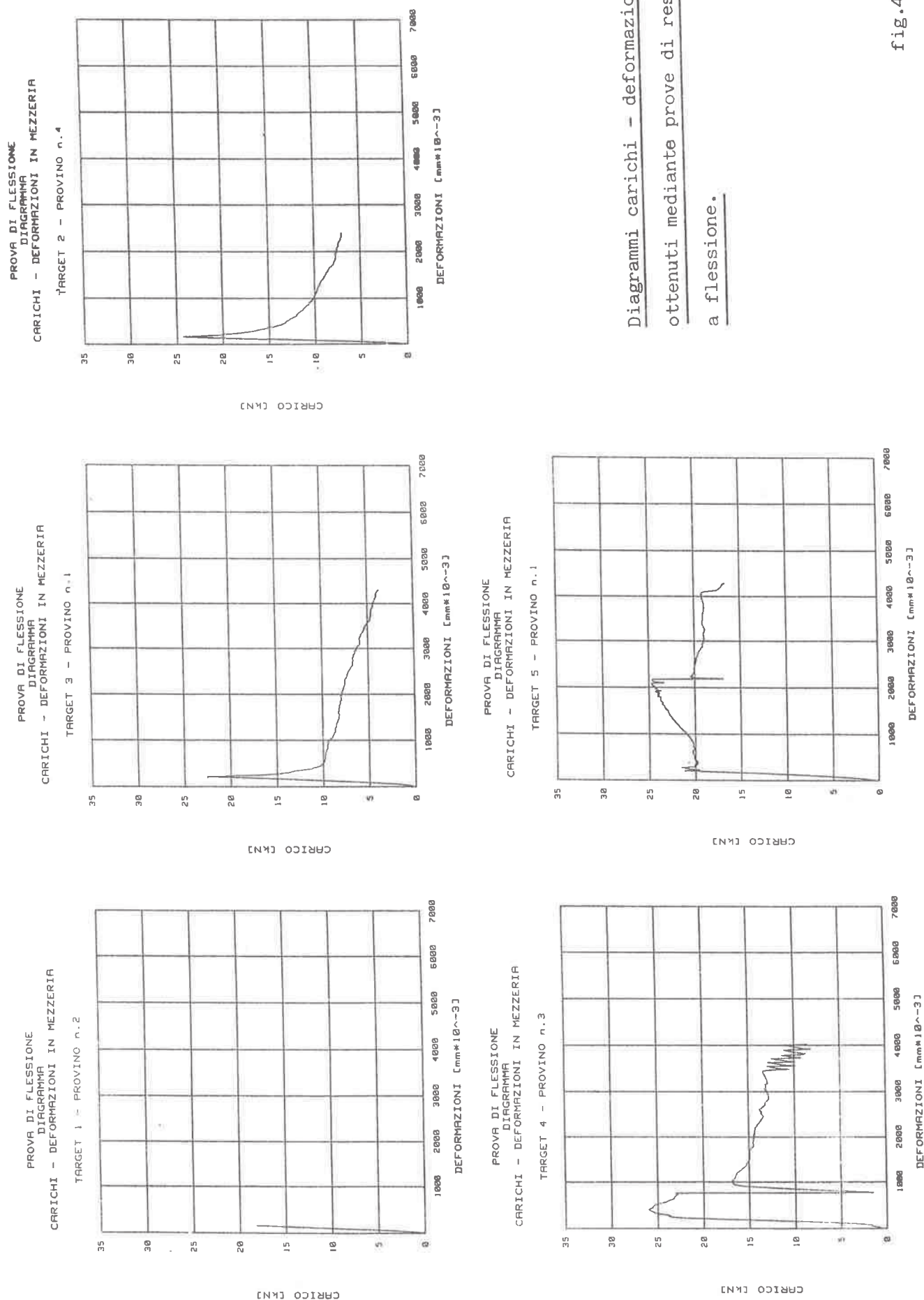


fig.3

INFLUENZA DELLE FIBRE SULLA RESISTENZA MECCANICA A TRAZIONE
OTTENUTA MEDIANTE PROVE A FLESSIONE SECONDO QUANTO INDICATO

AL PUNTO 7.1 DELLE "RACCOMANDAZIONI" AICAP

	RESISTENZA A FLESSIONE (MPa)				VALORE MEDIO (MPa)
	1	2	3	4	
PIASTRA n. 1 C.A. Ordinario	5.35	5.37	4.98	5.20	5.23
PIASTRA n. 3 0.5% fibre 25 x 0.40	6.90	5.73	6.80	6.69	6.53
PIASTRA n. 2 1% fibre 25 x 0.40	6.58	6.55	6.60	7.45	6.80
PIASTRA n. 4 1.5% fibre 25 x 0.40	8.61	6.70	7.97	6.80	7.52
PIASTRA n. 5 1% fibre 45 x 0.80	7.57	6.88	6.11	6.38	6.74



RISULTATI OTTENUTI NEL CORSO DELLE PROVE DI RESISTENZA
A FLESSIONE PER LA DETERMINAZIONE ED IL CONTROLLO
DEL CONGLOMERATO CEMENTIZIO FIBROSO

	CARICHI DI PRIMA FESSURAZIONE (KN)				INDICE DI TENACITA'			
	1	2	3	4	1	2	3	4
PIASTRA n. 1 C.A. Ordinario	17.84	17.86	16.60	17.34	-	-	-	-
PIASTRA n. 3 0.5% fibre 25 x 0.40	20.78	19.12	20.91	21.38	11.14	12.28	2.38	2.44
PIASTRA n. 2 1% fibre 25 x 0.40	19.92	20.14	19.22	22.80	16.57	11.16	10.92	14.11
PIASTRA n. 4 1.5% fibre 25 x 0.40	21.26	20.87	24.23	21.33	20.30	25.83	12.71	11.97
PIASTRA n. 5 1% fibre 45 x 0.80	21.70	20.05	18.37	21.28	17.64	20.93	21.12	21.81

VALORI DEI CARICHI MASSIMI PER FLESSIONE IN FUNZIONE
DELLA PERCENTUALE DI ARMATURA FIBROSA

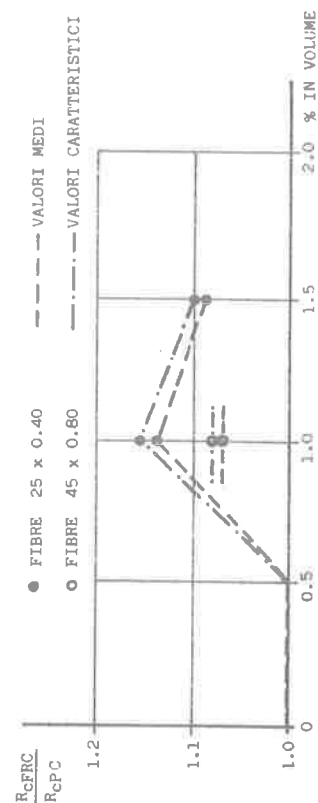
	CARICHI MASSIMI (KN)				VALORE MEDIO (MPa)
	1	2	3	4	
PIASTRA n. 1 C.A. Ordinario	17.84	17.86	16.60	17.31	17.41
PIASTRA n. 3 0.5% fibre 25 x 0.40	22.99	19.12	22.68	22.29	21.77
PIASTRA n. 2 1% fibre 25 x 0.40	21.95	21.82	22.02	24.83	22.65
PIASTRA n. 4 1.5% fibre 25 x 0.40	28.69	22.35	26.56	22.62	25.10
PIASTRA n. 5 1% fibre 45 x 0.80	25.24	22.93	20.37	21.26	22.45

fig.5

VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA A ROTTURA PER
COMPRESSIONE DI PROVINI CUBICI IN FUNZIONE
DELLA PERCENTUALE DI ARMATURA FIBROSA

Miscela target	% Fibre in volume	Resistenza a rottura (MPa)				Valore medio (MPa)	Valore caratt. (MPa)
		1	2	3	4		
T1	0	47.2	46.5	48.6	45.1	46.9	41.4
T3	0	52.2	53.3	52.5	50.4	52.1	46.8
	0.5	51.8	50.6	53.2	52.5	52.0	46.7
T2	0	45.1	47.9	47.3	48.1	47.1	41.9
	1.0	55.1	54.9	51.4	54.1	53.9	48.6
T4	0	51.4	51.1	51.5	53.3	51.8	46.4
	1.5	54.0	56.9	56.8	58.1	56.5	51.4
T5	0	48.4	47.2	48.4	49.7	48.4	43.1
	1	50.9	51.1	52.8	52.6	51.9	46.6

INCREMENTO DELLA RESISTENZA MECCANICA A ROTTURA PER COMPRESSIONE
DEL CALCESTRUZZO FIBROSO RISPETTO A QUELLO ORDINARIO



FRC : Calcestruzzo fibro-rinforzato

PC : Calcestruzzo ordinario

fig.6

VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA MECCANICA A ROTTURA PER COMPRESSIONE.

DI PROVINI CILINDRICI IN FUNZIONE DELLA PERCENTUALE DI ARMATURA FIBROSA

	RESISTENZA A ROTTURA (MPa)			VALORE MEDIO (MPa)
	1	2	3	
PIASTRA n. 1 C.A. Ordinario	42.1	37.6	39.1	39.6
PIASTRA n. 3 0.5% fibre 25 x 0.40	49.5	47.0	54.7	50.4
PIASTRA n. 2 1% fibre 25 x 0.40	41.5	40.4	40.1	40.7
PIASTRA n. 4 1.5% fibre 25 x 0.40	55.5	52.8	51.1	53.1
PIASTRA n. 5 1% fibre 45 x 0.80	44.6	43.4	45.9	44.2

ANDAMENTO DEL RAPPORTO TRA RESISTENZE MEDIE VALUTATE

PER PROVINI CUBICI E CILINDRICI IN CALCESTRUZZO FIBRO-RINFORZATO

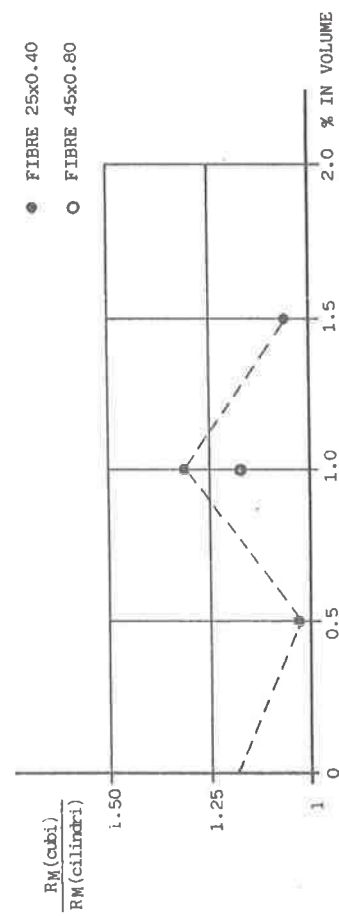


fig.7

INFLUENZA DELLE FIBRE SULLA RESISTENZA MECCANICA A TRAZIONE

OTTENUTA MEDIANTE PROVE DI ROTTURA A TRAZIONE INDIRETTA ("BRASILIANA")

	RESISTENZA A ROTTURA (MPa)				VALORE MEDIO (MPa)
	1	2	3	4	
PIASTRA n. 1 C.A. Ordinario	1.54	1.44	1.64	1.59	1.55
PIASTRA n. 3 0.5% fibre 25 x 0.40	1.77	1.81	1.89	1.74	1.80
PIASTRA n. 2 1% fibre 25 x 0.40	1.99	1.92	2.03	1.76	1.93
PIASTRA n. 4 1.5% fibre 25 x 0.40	2.11	1.60	1.83	2.15	1.92
PIASTRA n. 5 1% fibre 45 x 0.80	4.69	4.24	4.28	4.79	4.50

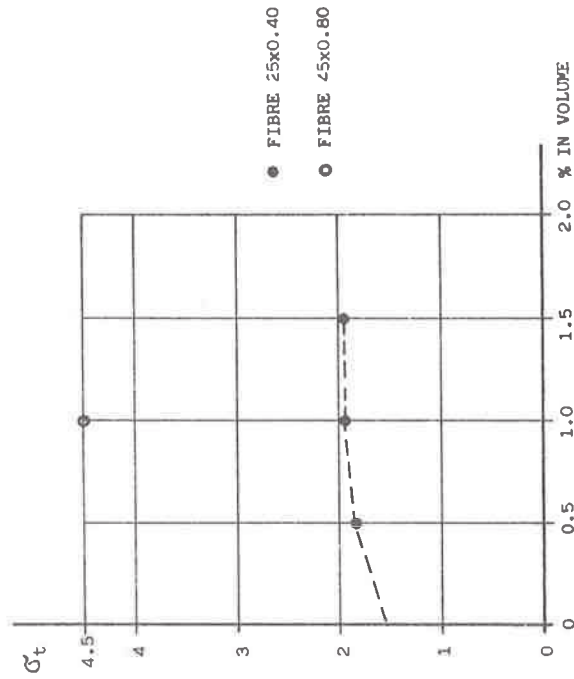


fig.8

INFLUENZA DELLE FIBRE SULLA RESISTENZA ALLA PRIMA FESSURAZIONE
OTTENUTA MEDIANTE PROVE DI ROTTURA A TRAZIONE INDIRETTA ("BRASILIANA")

	RESISTENZA ALLA PRIMA FESSURAZIONE (MPa)				VALORE MEDIO (MPa)
	1	2	3	4	
PIASTRA n. 1 C.A. Ordinario	1.03	1.13	1.04	1.30	1.125
PIASTRA n. 3 0.5% fibre 25 x 0.40	1.58	1.49	1.38	1.44	1.473
PIASTRA n. 2 1% fibre 25 x 0.40	1.21	1.38	1.38	1.13	1.275
PIASTRA n. 4 1.5% fibre 25 x 0.40	1.52	1.13	1.30	1.27	1.305
PIASTRA n. 5 1% fibre 45 x 0.80	1.95	2.74	2.15	1.98	2.205

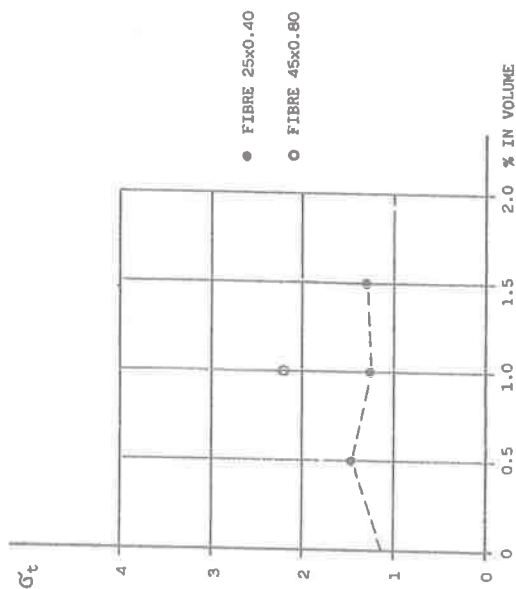
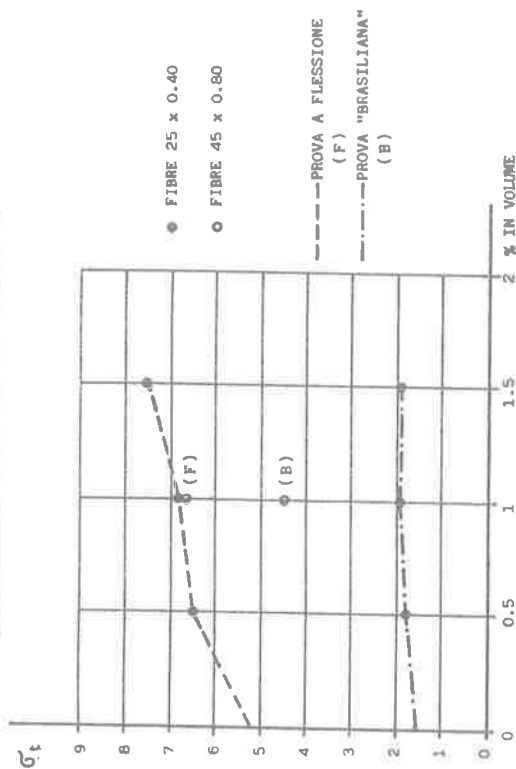


fig.9



INCREMENTO DELLA RESISTENZA MECCANICA A TRAZIONE
DEL CALCESTRUZZO FIBROSO RISPETTO A QUELLO ORDINARIO



FRC : Calcestruzzo fibro-rinforzato
PC : Calcestruzzo ordinario

fig.10

POSIZIONE E NUMERAZIONE TRASDUTTORI DI MISURA
- IMPATTO SU PIASTRA -

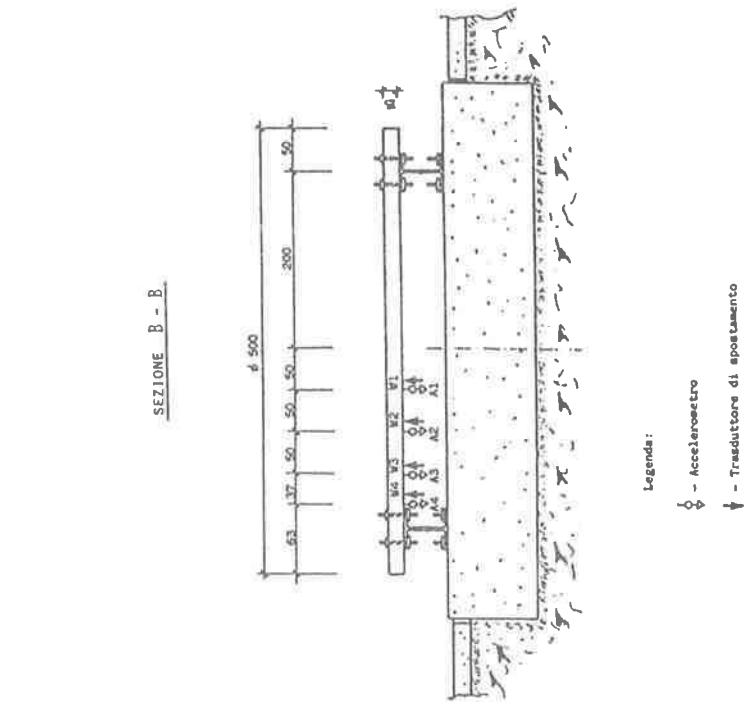


fig.13

POSIZIONE DEL TRASDUTTORE DI MISURA
POSTO SUL PROIETTO

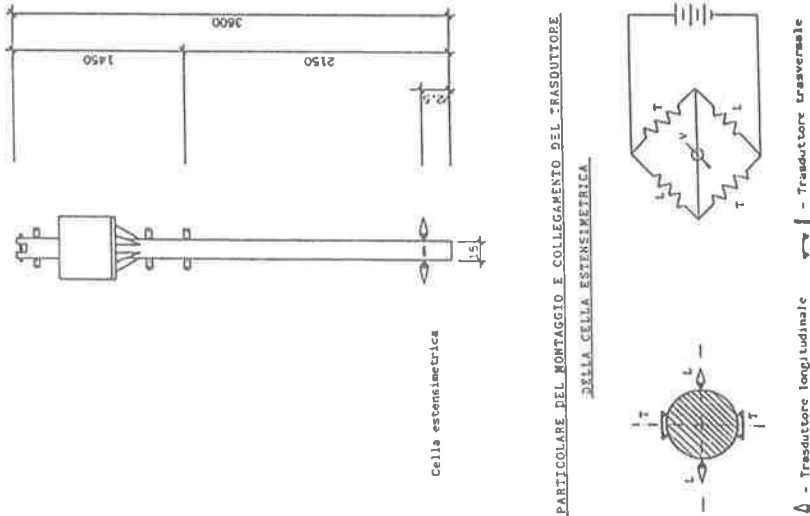


fig.12

VALUTAZIONE DEL MODULO ELASTICO DINAMICO IN FUNZIONE
DELLA PERCENTUALE DI ARMATURA FIBROSA

	MODULO ELASTICO DINAMICO (MPa)				VALORE MEDIO (MPa)
	1	2	3	4	
PIASTRA n. 1 C.A. Ordinario	31506	30766	31589	31647	31377
PIASTRA n. 3 0.5% fibre 25 x 0.40	34959	35455	35425	35380	35355
PIASTRA n. 2 1% fibre 25 x 0.40	31190	32539	32694	32316	32185
PIASTRA n. 4 1.5% fibre 25 x 0.40	35451	35570	36056	36102	35795
PIASTRA n. 5 1% fibre 45 x 0.80	36984	36929	35762	36197	36218

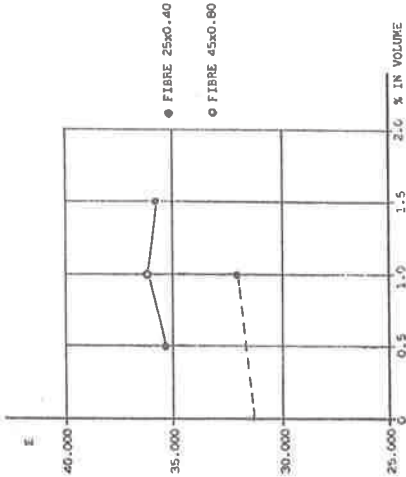


fig.11

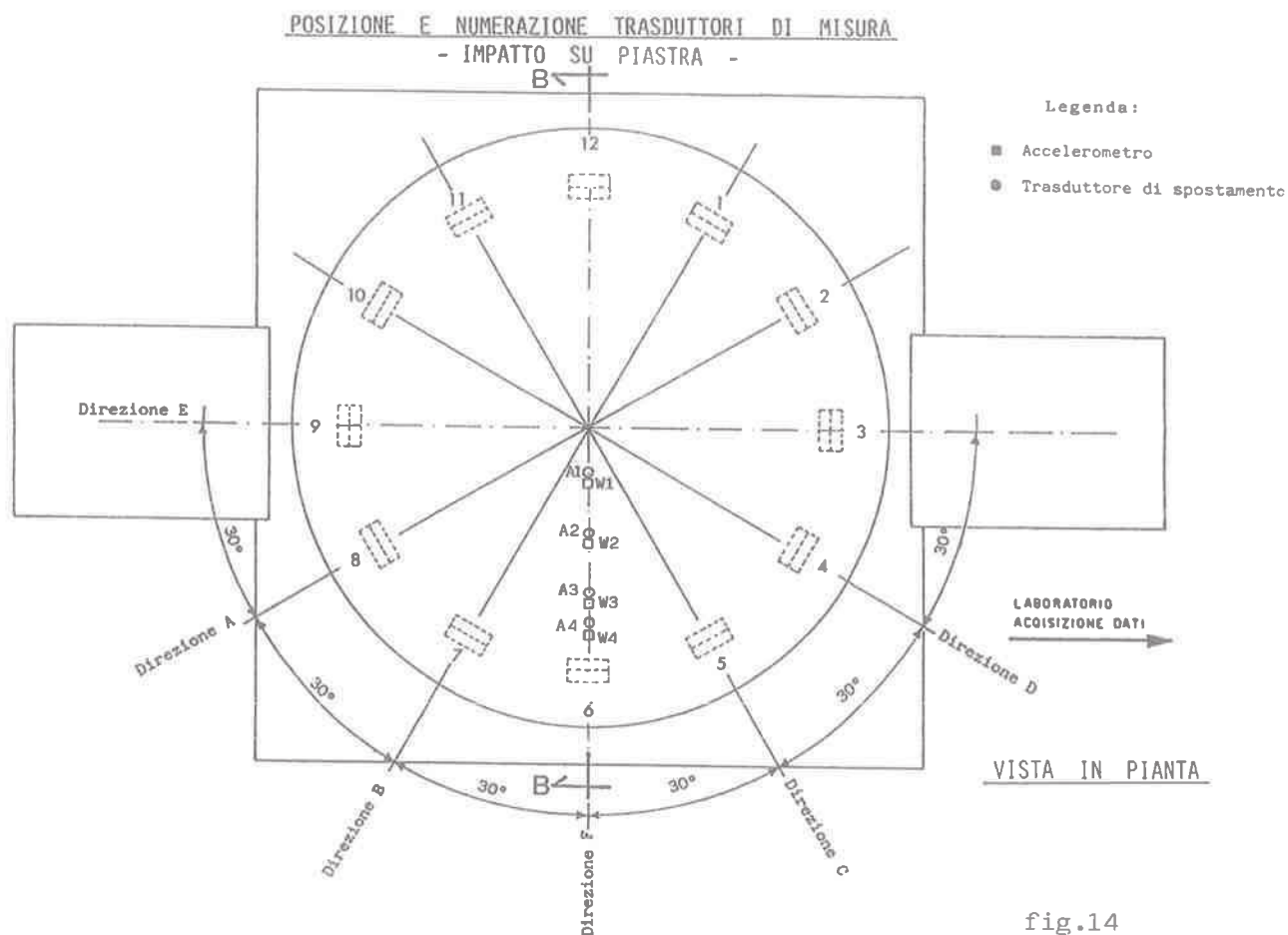


fig.14

POSIZIONE E NUMERAZIONE DELLE FOTOCELLULE E DELLA CELLA DI CARICO DELLA FUNE DI GUIDA

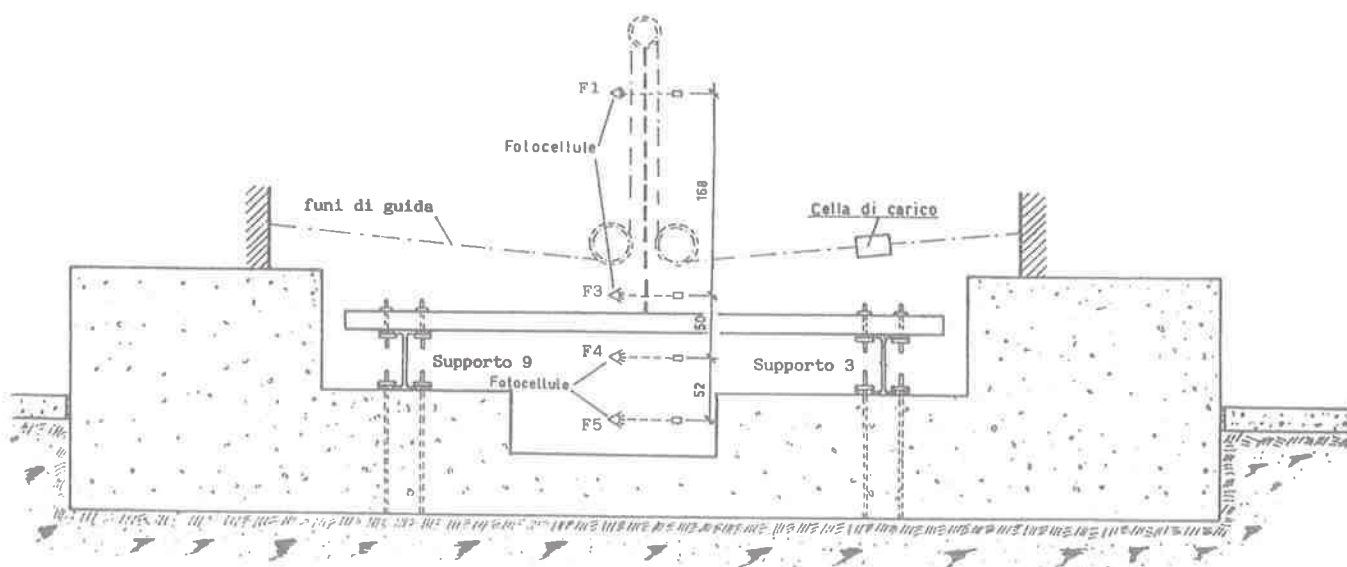


fig.15

VELOCITA' DI IMPATTO E DI USCITA
IN FUNZIONE DELLA QUANTITA' DI FIBRE

	VELOCITA' DI IMPATTO Vi (m/s)	VELOCITA' DI USCITA Vu (m/s)	RIDUZIONE DI VELOCITA' (Vi-Vu) (m/s)
PIASTRA n. 1 C.A. Ordinario	24.74	21.55	3.19
PIASTRA n. 3 0.5% fibre 25 x 0.40	24.91	21.38	3.53
PIASTRA n. 2 1% fibre 25 x 0.40	24.78	20.50	4.28
PIASTRA n. 4 1.5% fibre 25 x 0.40	24.83	20.44	4.39
PIASTRA n. 5 1% fibre 45 x 0.80	25.00	20.80	4.20

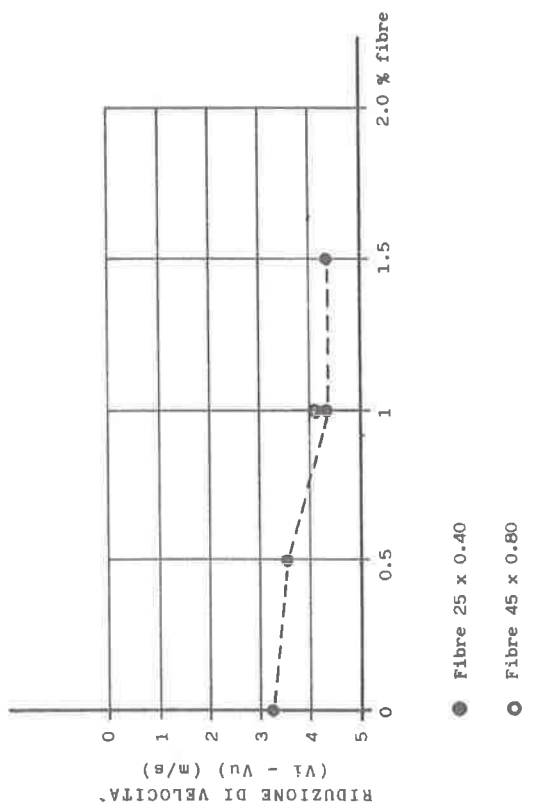


fig.16

ENERGIA DISSIPATA IN FUNZIONE DELLA QUANTITA' DI FIBRE

TARGET n°	FIBRE % TIPO	VELOCITA' DI INGRESSO Vi (m/s)	VELOCITA' DI USCITA Vu (m/s)	E.E.t. (N.m)	E.E.p. (N.m)	E.C.i. (N.m)	E.D. (N.m)	E.D. $\frac{E.D.}{E.C.i.} \cdot 100$
1	0%	24.74	21.55	485	4116	371831	85075	22.9
3	0.5% 25 x 0.40	24.91	21.38	463	2248 5014	376959	96501 93863	25.6 24.9
2	1% 25 x 0.40	24.78	20.50	566	3191	373034	113775	30.5
4	1.5% 25 x 0.40	24.83	20.44	585	5014	374541	115359	30.8
5	1% 45 x 0.80	25.00	20.80	580	2248	379688	113906	30.0

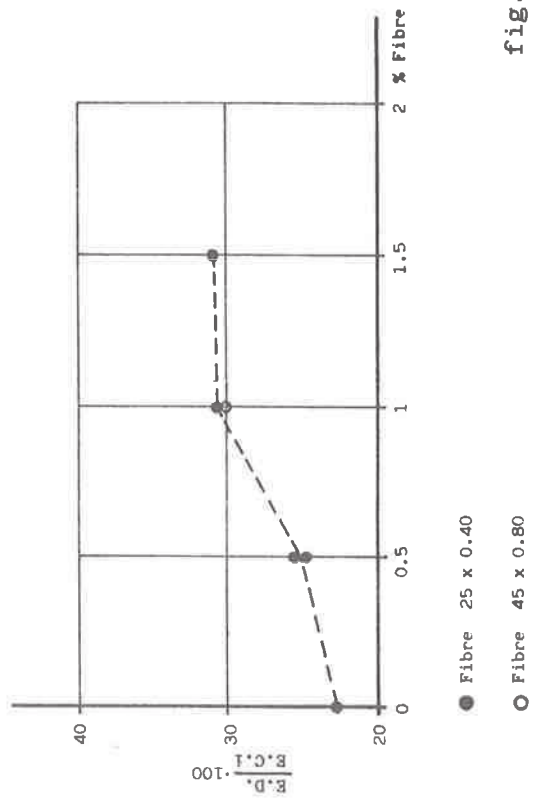


fig.17

CURVA IPOTETICA D'ANDAMENTO DELLA VELOCITA' CRITICA DEL CALCESTRUZZO FIBRO-RINFORZATO

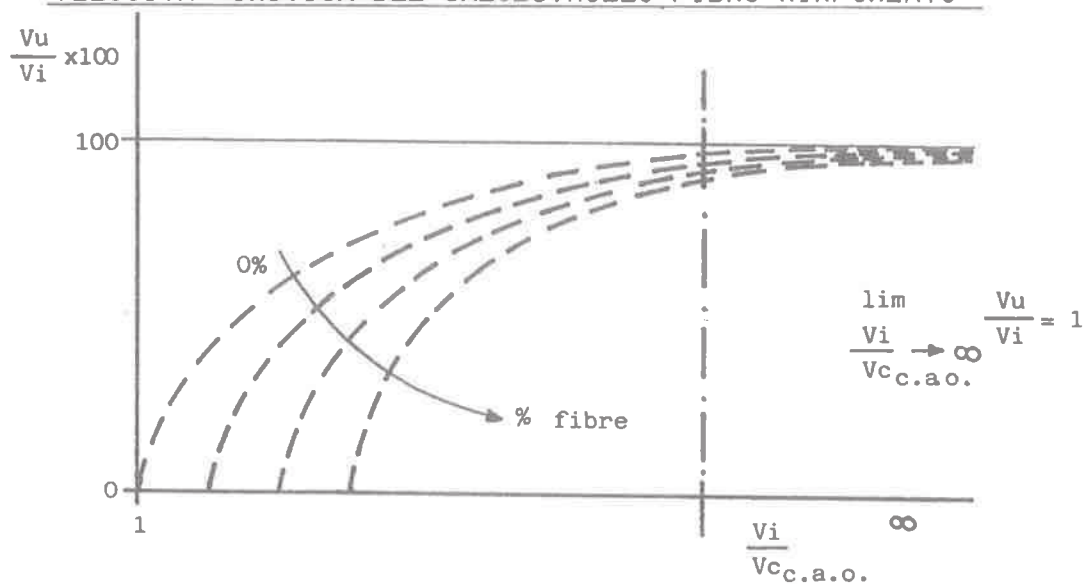


fig.18

CURVA CARICO-PENETRAZIONE

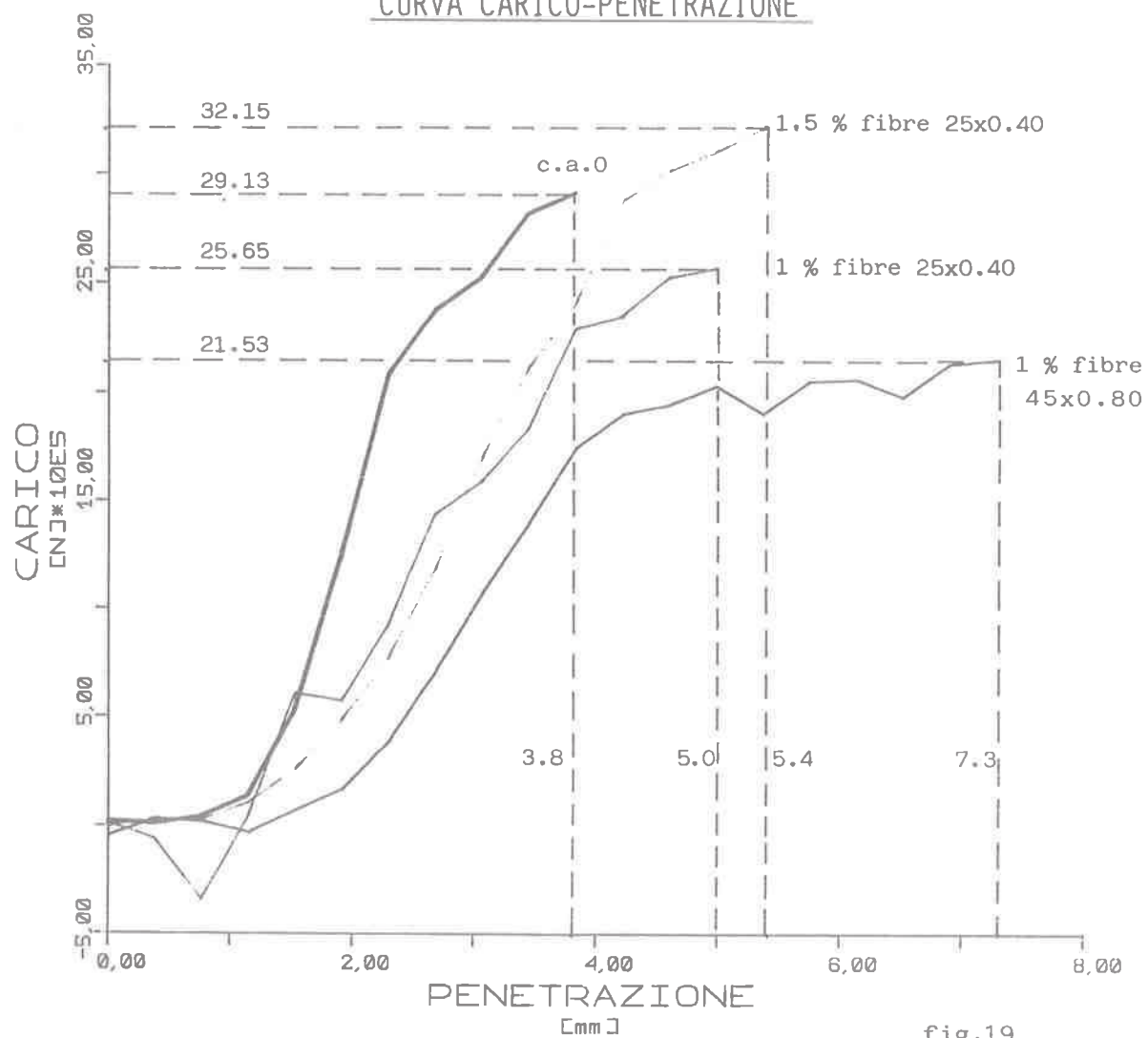


fig.19

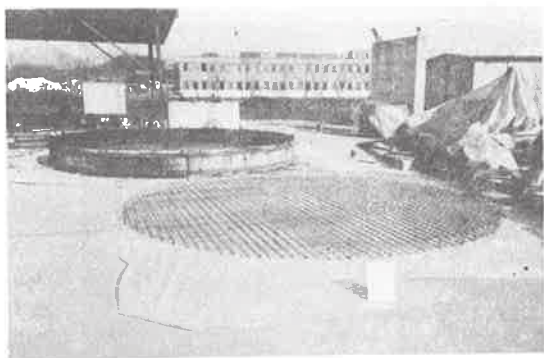


foto 1 - "Armatura lenta"



foto 2 - "Elementi a forma di riccio"



foto 3 - "Modalità di confezione"



foto 4 - "Impasto cementizio fibroso"



foto 5 - "Sistema di sgancio e di guida del missile"

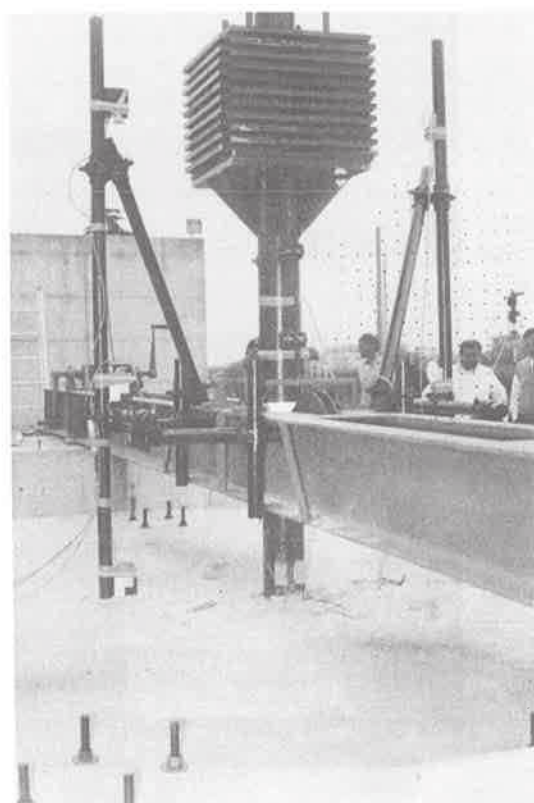


foto 6 - "Proietto"

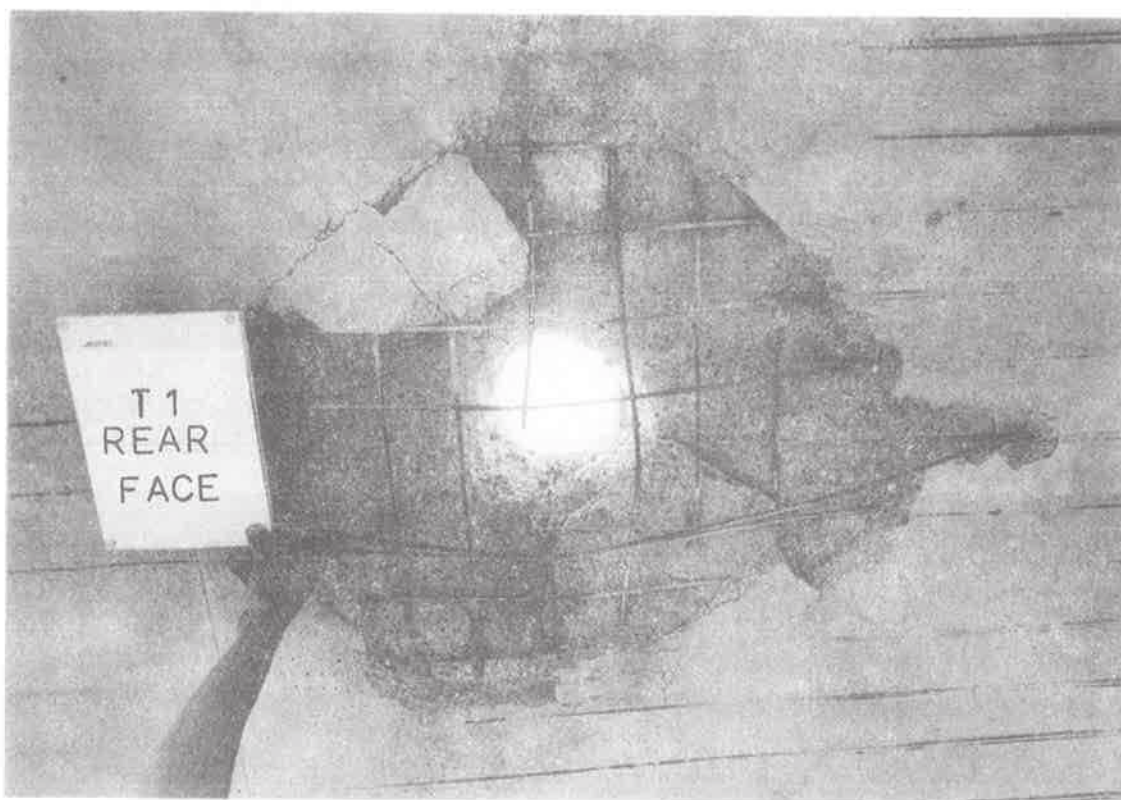


foto 7 - "Parte opposta alla faccia colpita - TARGET n.1"

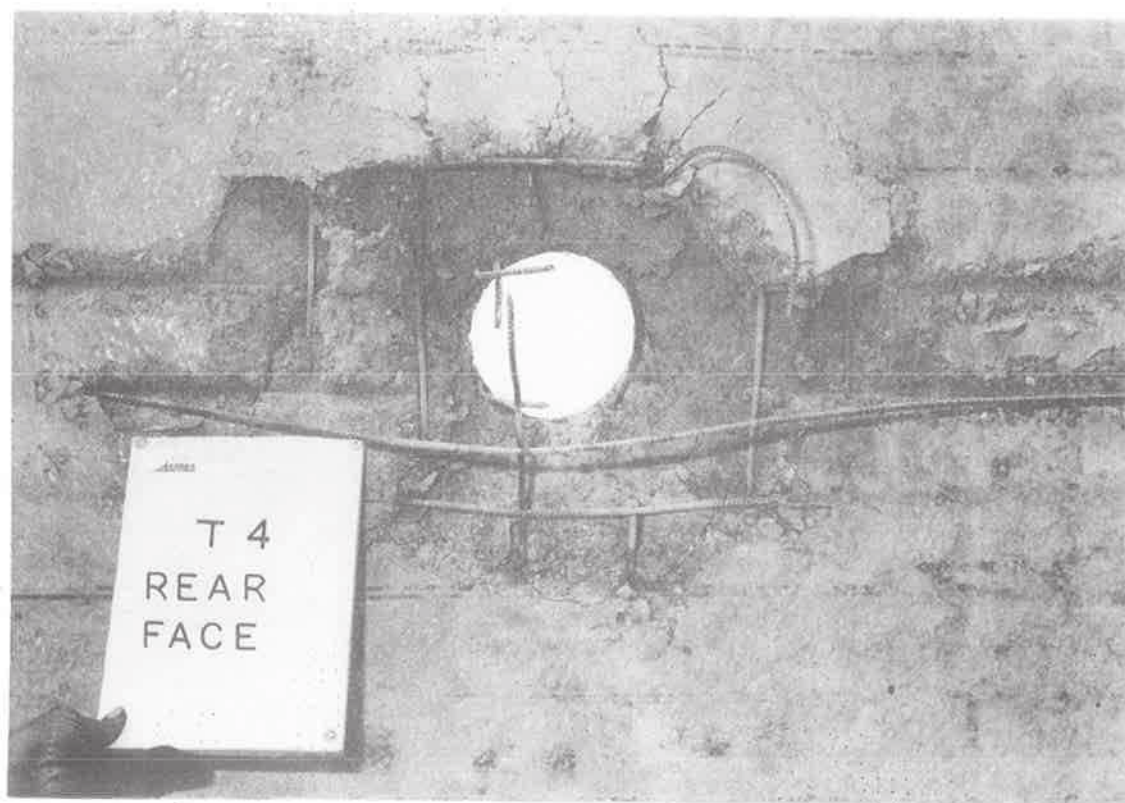


foto 8 - "Parte opposta alla faccia colpita - TARGET n.4 "

**VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA ALLO SFILAMENTO DI FIBRE IN
ACCIAIO DA ELEMENTI PRISMATICI IN FRC SOTTOPOSTI A FLESSIONE**

**CORRADINI Giorgio
PAJEWSKI Leonardo
SCOCCIA Giancarlo
VOLPE Roberto**

**Dipartimento di Chimica, Ingegneria Chimica e Materiali
Facoltà di Ingegneria dell'Università dell'Aquila**

VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA ALLO SFILAMENTO DI FIBRE IN ACCIAIO DA ELEMENTI PRISMATICI IN FRC SOTTOPOSTI A FLESSIONE

G.Corradini, L.A.Pajewski, G.Scoccia, R.Volpe

Dipartimento di Chimica, Ingegneria Chimica e Materiali
Facolta' di Ingegneria dell'Universita' dell'Aquila

SOMMARIO

Viene presentato un modello che descrive la variazione della resistenza allo sfilamento opposta dalle fibre nella zona fessurata della sezione inflessa di un elemento prismatico in FRC. Il modello e' stato costruito sulla base di una serie di prove sperimentali nelle quali sono state variate le caratteristiche della matrice cementizia e il dosaggio in fibre. Le elaborazioni statistiche dei risultati delle prove effettuate hanno permesso di correlare la resistenza delle fibre allo sfilamento con le variabili sulle quali e' stato costruito il programma di sperimentazione fattoriale.

SUMMARY

A model of the behaviour of a steel reinforced concrete in flexure is reported. The model was performed on the basis of the results of a series of experimental tests. In order to observe bending failure moment variation the tests was carried out by varying concrete matrix characteristics and fibre content. The results are correlated with input factors of the experimental program.

1. INTRODUZIONE

Il Dipartimento di Chimica, Ingegneria Chimica e Materiali dell'Universita' dell'Aquila e' impegnato in un programma di ricerca sull'interpretazione statistica del comportamento fisico-meccanico di calcestruzzi rinforzati con fibre di acciaio. L'obiettivo della ricerca e' quello di individuare l'influenza del dosaggio in fibre e delle caratteristiche della matrice cementizia sulle proprieta' fisico-meccaniche dei calcestruzzi fibrorinforzati. Inoltre, utilizzando i risultati delle prove sperimentali, vengono verificati modelli del comportamento sotto carico di tali calcestruzzi allo scopo di controllare la loro applicabilita' al dimensionamento di elementi strutturali.

Per quanto riguarda la campagna di prove sperimentali, e' stato predisposto un piano di sperimentazione fattoriale [IX] nel quale sono state variate le seguenti caratteristiche del materiale:

rapporto acqua/cemento (A/C), dosaggio in cemento (C) e dosaggio in fibre (F). I valori misurati durante le prove sperimentali sono il peso specifico, la resistenza a compressione a 28 giorni, il modulo elastico secante, il carico di prima fessurazione ed il carico di rottura a flessione.

I risultati delle prove hanno permesso di valutare su basi statistiche l'influenza dei fattori citati sulle principali proprietà fisico-meccaniche di calcestruzzi rinforzati con fibre di acciaio. Inoltre essi hanno costituito un'ampia ed omogenea base di dati per la formulazione di modelli per la determinazione del carico di prima fessurazione e di rottura di elementi prismatici in FRC sottoposti a flessione.

2. PARTE SPERIMENTALE

Le prove sperimentali sono state eseguite per i seguenti valori dei fattori che caratterizzano l'impasto:

- * rapporto acqua/cemento: $A/C = 0.4, 0.5 \text{ e } 0.6$
- * dosaggio in cemento: $C = 400 \text{ e } 475 \text{ kg/mc di inerte}$
- * dosaggio in fibre: $F = 0, 0.5, 1.0 \text{ e } 1.5 \% \text{ in volume}$

Ogni impasto e' stato ripetuto due volte ottenendo complessivamente n. 48 impasti con i relativi provini.

2.1 Materiali impiegati

Sono stati utilizzati i seguenti materiali:

- * cemento: cemento Portland "425"
- * inerti: inerti alluvionali, diametro massimo 15 mm forniti dalla TEGES Spa (L'Aquila)
- * acqua: acqua potabile. I dosaggi in acqua sono stati riferiti a inerti saturi a superficie asciutta.
- * fibre: fibre di acciaio della lunghezza di 50 mm e del diametro 0.50 mm, tipo Dramix ZC 50/50, fornite dalla Bekaert Spa (Milano)
- * superfluidificante: superfluidificante commerciale, costituito da una soluzione al 37 % in peso di sostanza attiva, risultante da una miscela di un condensato solfonato melamina-formaldeide e di un naftalensolofonato di formaldeide (Fluiment)

Per l'esecuzione degli impasti e' stata impiegata una turbobetoniera da laboratorio ad asse verticale.

2.2 Modalita' di esecuzione delle prove

Per ogni impasto sono stati confezionati n. 4 provini cubici (lato 15 cm) per la prova di compressione, n. 2 provini prismatici (15x15x30 cm) per la misura del modulo elastico secante (UNI 6132) e n. 2 provini prismatici (15x15x50 cm) per la prova di flessione (Raccomandazioni Tecniche AICAP).

I provini sono stati stagionati in ambiente condizionato a 22 °C e 98 % di UR.

Allo scopo di determinare la distribuzione delle deformazioni lungo la sezione del provino durante la prova di flessione, sono stati posizionati n. 6 estensimetri (50/120 LY41) secondo lo schema riportato nella fig. 1

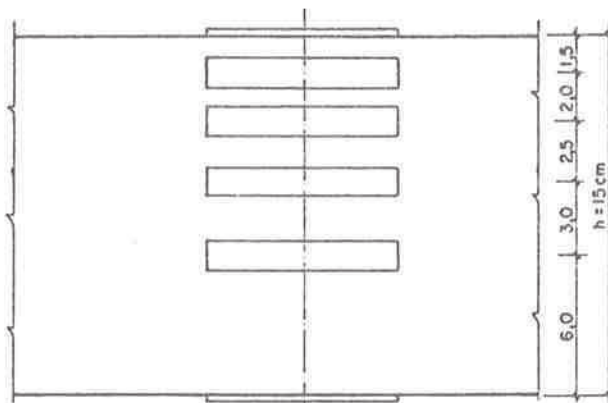


Fig. 1 Schema di disposizione degli estensimetri

La prova di flessione e' stata eseguita seguendo le Raccomandazioni Tecniche AICAP [VII] ed il relativo sistema di carichi e' indicato nella fig. 2. Nei punti contrassegnati f1, f2 ed f3 sono stati posizionati n. 3 flessimetri per la misura degli abbassamenti.

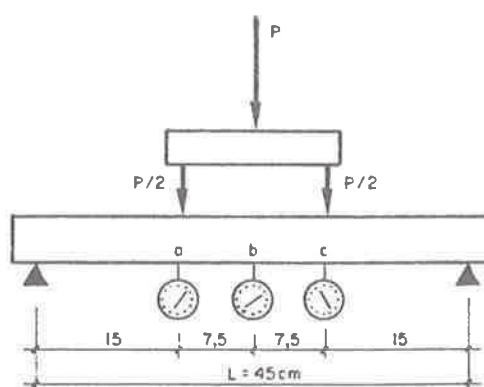


Fig. 2 Schema di applicazione del carico

Nella prova a flessione il carico e' stato applicato mediante macchina universale, collegata con centralina per la rilevazione automatica dei dati.

3. ALGORITMO PER LA DETERMINAZIONE DEL CARICO DI ROTTURA

I risultati delle prove effettuate hanno permesso la stesura di un algoritmo di tipo iterativo [V] il quale partendo dalle caratteristiche geometriche della sezione inflessa e dalle caratteristiche del materiale composito, quale appunto il FRC, permette di calcolare i valori del momento di rottura. Il modello e' basato sull'ipotesi di una distribuzione uniforme delle tensioni nella zona fessurata le quali vengono prodotte dall'insieme di fibre che si oppongono allo sfilamento come schematizzato nella fig.3.

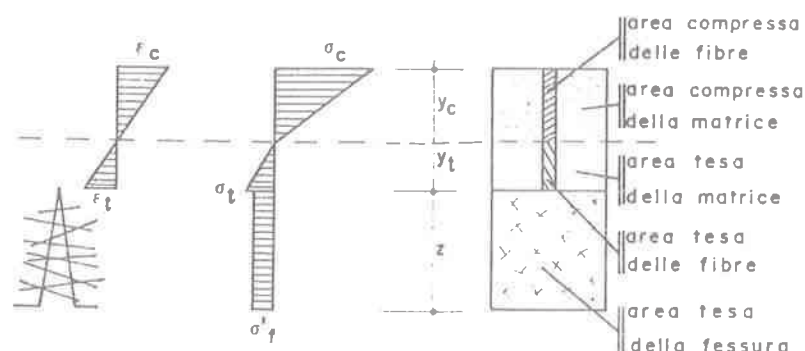


Fig. 3. Schema di contributo delle fibre nella zona fessurata al momento flettente cui resiste la sezione in FRC

L'algoritmo proposto calcola step-by-step i vari stati limite intermedi che possono determinarsi nella sezione sottoposta ad un determinato momento flettente, per giungere poi allo stato limite ultimo in cui si verifica il collasso della sezione inflessa. I risultati delle simulazioni effettuate sulla base dei valori sperimentali (caratteristiche del materiale) collimano molto bene con i valori misurati (carico di rottura).

Come risulta da numerose simulazioni effettuate sul modello proposto, la resistenza delle fibre allo sfilamento costituisce uno dei fattori piu' influenzanti la risposta dell'algoritmo [VI]. Pertanto, nell'ambito del programma di prove effettuate, si e' reso necessario definire la variabilita' di questa caratteristica del conglomerato cementizio rinforzato con fibre di acciaio, in funzione dei parametri presi in considerazione durante la stesura del programma di sperimentazione fattoriale e cioe' del rapporto acqua/cemento, del dosaggio in cemento e della percentuale delle fibre.

Partendo da valori misurati durante le prove, caso per caso sono stati determinati i valori della tensione apparente a trazione nella zona fessurata, dovuta al pull-out delle fibre presenti nella sezione inflessa.

L'insieme dei dati ricavati dalle prove sperimentali, e' stato elaborato mediante tecniche matematico-statistiche [IX], in modo da

evidenziare le variabili che influenzano maggiormente la resistenza delle fibre allo sfilamento e cio' sulla base del valore del coefficiente di correlazione parziale che esse producono.

4. RISULTATI

Nella tabella n. 1 sono riportati i valori della resistenza delle fibre allo sfilamento nella zona fessurata della sezione inflessa (kg/cm²) ed il corrispondente momento di rottura (kgm), ottenuti dalle prove sperimentali.

Tab.1 Resistenza delle fibre allo sfilamento (kg/cm²) ed il corrispondente momento di rottura (kgm) al variare del dosaggio in fibre, del dosaggio in cemento e del rapporto acqua/cemento.

		F1		F2		F3		F4	
		C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2
I1	A/C1	0 -	0 -	21.0 338	19.5 315	28.5 450	30.0 473	42.5 653	42.0 645
	A/C2	0 -	0 -	17.5 278	18.5 300	30.5 473	31.5 488	39.0 593	39.0 548
	A/C3	0 -	0 -	20.5 323	17.5 278	23.0 360	30.5 465	35.0 525	34.5 525
I2	A/C1	0 -	0 -	22.5 360	23.0 368	29.0 458	38.0 600	40.0 615	42.5 653
	A/C2	0 -	0 -	20.0 319	21.5 345	29.0 450	32.0 495	38.5 581	42.0 638
	A/C3	0 -	0 -	20.5 323	22.5 356	28.0 431	31.0 473	35.0 525	36.0 540

Dall'esame dei risultati riportati nella tabella 1 viene confermata la sensibile influenza del dosaggio in fibre sul momento di rottura [III] e quindi sulla resistenza allo sfilamento delle fibre presenti nella zona fessurata della sezione inflessa [VI].

5. CORRELAZIONE DEI RISULTATI

I risultati riportati nella tabella 1 sono stati elaborati mediante tecniche matematico-statistiche con lo scopo di individuare, sulla base del coefficiente di correlazione parziale, le variabili che maggiormente influenzano la resistenza delle fibre allo sfilamento dalla matrice cementizia.

Queste tecniche (regressione multipla step-wise) consentono di individuare la variabile che entra per prima nella espressione della funzione producendo il maggior valore del coefficiente di correlazione parziale. Le altre variabili prese in considerazione vengono aggiunte mano a mano in ordine decrescente del loro coefficiente di correlazione parziale.

Le variabili indipendenti poste nel modello sono:

- * dosaggio in fibre F (% in volume)
- * rapporto cemento/acqua C/A (adimensionale)

Per quanto riguarda il dosaggio in cemento, questa variabile è stata scartata in quanto scarsamente correlata con il carico di rottura, come già evidenziato precedentemente [III].

I migliori modelli risultanti dalle elaborazioni statistiche sono di tipo:

$$\sigma_f = A * F^\alpha + B * C/A$$

I valori di α utilizzati nelle elaborazioni sono i seguenti:

α	coeff. di correlazione
0.4	0.981
0.5	0.988
0.6	0.990

I coefficienti di correlazione riportati sopra sono quelli globali.

È sembrato interessante il valore di $\alpha = 0.5$ in quanto esso dà luogo alle formulazioni molto semplici per quanto riguarda la stima e, contemporaneamente, il suo coefficiente di correlazione è praticamente identico a quello ottenuto con $\alpha = 0.6$.

L'espressione completa che esprime la resistenza delle fibre allo sfilamento diventa quindi:

$$\sigma_f = 31.26 * \sqrt{F} + 3.27 * C/A = 7.30$$

È interessante notare che eliminando i termini lineari dall'espressione precedente si arriva ad una formulazione molto semplice:

$$\sigma_f = 31.26 * \sqrt{F}$$

con un coefficiente di correlazione pari a 0.985.

Nella fig. 4 e' rappresentato l'andamento della funzione cosi' semplificata, unitamente ai valori della resistenza allo sfilamento riportati nella tabella 1.

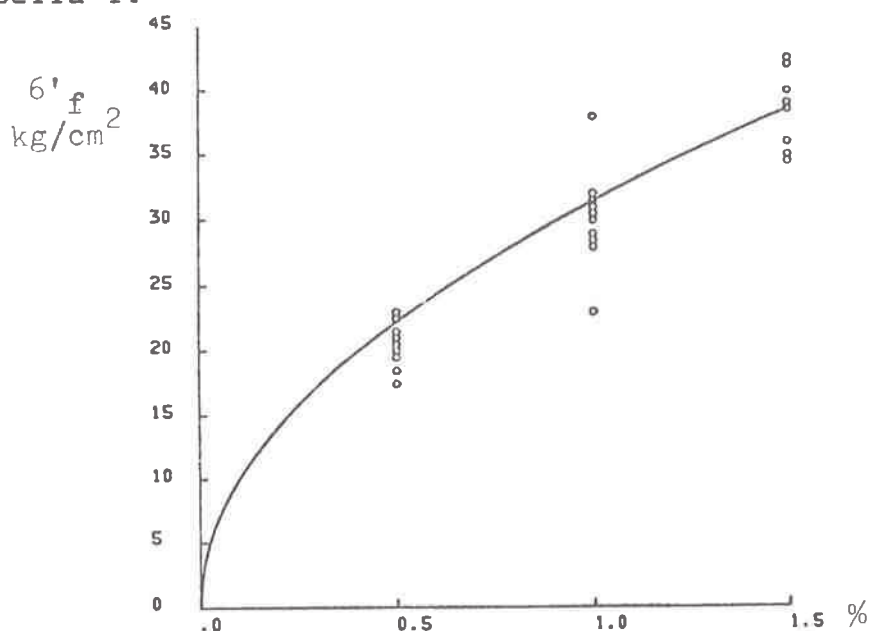


Fig. 4. Variazione della resistenza delle fibre allo sfilamento: punti sperimentali ed interpolazione con l'espressione risultante dalle analisi.

6. CONCLUSIONI

I risultati ottenuti, per quanto semplici, si riferiscono ad un solo conglomerato cementizio, quello indicato precedentemente ed ad un solo tipo di fibre.

Si puo' supporre una variazione del coefficiente A nella relazione presa in considerazione che nel caso studiato risulta essere $A=31.26$. Sarebbe opportuno effettuare una sperimentazione su inerti e su fibre differenti allo scopo di testare la variabilita' dei risultati in funzione di parametri non presi in considerazione nella campagna di prove svolta fino ad oggi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Corradini G., Pajewski L.A., Scoccia G., Volpe R.: "Influence of mix proportioning in the design and application of a fibre reinforced concrete", Proceedings 21st Annual Meeting of Society of Engineering Science, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksbourg, USA, ott. 84.

- [II] Corradini G., Pajewski L.A., Scoccia G., Volpe R.: "Model of behaviour of a steel fibre reinforced concrete in flexure", Proceedings 22th Annual Meeting of Society of Engineering Science, The Pennsylvania State University (USA), sett.85
- [III] Corradini G., Pajewski L.A., Scoccia G., Volpe R.: "Valutazione sperimentale del comportamento a flessione di un calcestruzzo fibrorinforzato", "Il Cemento", AITEC, Roma, ott. 86
- [IV] Corradini G., Pajewski L.A., Scoccia G., Volpe R.: "Determination of steel fibre reinforced concrete properties for the design of bended elements", Proceedings 23rd Annual Meeting of the Society of Engineering Science, State University of New York, Buffalo (USA), ott. 86
- [V] Pajewski L.A., Corradini G., Scoccia G., Volpe R.: "Su un metodo per il dimensionamento di elementi inflessi in calcestruzzo fibrorinforzato", "L'Industria Italiana del Cemento", AITEC, Roma apr. 87
- [VI] Pajewski L.A.: "Simulation of behaviour of fibre reinforced concrete in flexure", Proceedings EM'88 2nd International Conference on Engineering Materials, Università di Bologna, Università di Modena, ASMI, CNR, RILEM. Bologna giugno 1988.
- [VII] AICAP, Raccomandazioni Tecniche per l'Impiego del Conglomerato Cementizio Fibroso
- [VIII] Babut R., Brandt A.M. "The model of testing and analysis of steel fibre reinforced concrete in flexure", RILEM symp. 7.11.79
- [IX] Davies O.L., Goldsmith P.: "Statistical methods in research and production" 247, ICI, 1972

COMPOSITI CEMENTIZI CONTENENTI FIBRE DI POLIPROPILENE;
REOLOGIA, PROPRIETA' MECCANICHE, DURABILITA'

MANTEGAZZA Giovanni

Direzione Centro Ricerche RUREDIL
San Donato Milanese

COMPOSITI CEMENTIZI CONTENENTI FIBRE DI POLIPROPILENE; REOLOGIA, PROPRIETA' MECCANICHE, DURABILITA'

Dr. Giovanni MANTEGAZZA
Direzione Centro Ricerche Ruredil
SAN DONATO MILANESE MI

SOMMARIO

In questo lavoro sperimentale vengono riportati i risultati delle prove eseguite su calcestruzzi fibrorinforzati con fibre di polipropilene. Viene in particolare studiata l'influenza dell'aggiunta di additivi fluidificanti o superfluidificanti nella modificazione delle proprietà reologiche. Sono inoltre riportati i risultati meccanici (flessione, compressione, curva carico-deformazione) delle prove effettuate sui conglomerati allo stato indurito. Da ultimo viene evidenziato il ruolo delle fibre di polipropilene nell'aumento della durabilità nei manufatti cementizi, soprattutto in relazione al controllo delle microfessurazioni da ritiro.

SUMMARY

This experimental work reports the results of the trials carried out on concretes reinforced with polypropylene fibres. Particular evidence is given to the influence of plasticizing or superplasticizing admixtures in modifying the rheological properties. Mention is also made of the mechanical results (flexural and compression strenght, load-deformation curve) of the trials effected on hardened manufactures. Finally, evidence is given to the role of the polypropylene fibres in increasing the durability of the cementitious manufactures especially in respect to the control of shrinkage microcrackings.

1. INTRODUZIONE

1.1 Le fibre di polipropilene

Fin dall'antichità, le fibre furono usate per rafforzare i materiali fragili; gli antichi Egizi impiegavano la paglia per contrastare il ritiro idraulico dei blocchi di argilla messi ad essicare al sole. Gli antichi Romani usavano invece il crine di cavallo per rafforzare gli intonaci ed il gesso. Nel secolo scorso si pensò di armare il calcestruzzo con barre di ferro per vincere la fragilità intrinseca dello stesso. Furono però i lavori pionieristici di Romualdi, Batsen e Mandel degli anni '50 e '60 che posero le basi dell'impiego di fibre di acciaio disperse nel calcestruzzo.

Agli inizi del 1960 furono fatti alcuni esperimenti usando fibre sintetiche. Nello stesso periodo in Russia ed in Gran Bretagna furono eseguite prove con fibre di vetro. Fin dagli anni '60 le principali applicazioni dei calcestruzzi fibrorinforzati riguardavano i pavimenti, i materiali refrattari ed i manufatti in calcestruzzo. ¹⁻²⁻³

In tabella 1 sono riportate alcune proprietà delle fibre.

Tabella 1 - Proprietà tipiche delle fibre

Tipo di fibra	Resistenze a trazione ksi	Modulo di Young 10 ³ ksi	P.S. (g/cc)
acrilica	30- 60	0.3	1.1
amianto	80- 140	12-20	3.2
cotone	60- 100	0.7	1.5
vetro	150- 550	10	2.5
nylon (alta tenacità)	110- 120	0.6	1.1
poliestere (alta tenacità)	105- 125	1.2	1.4
polietilene	ca. 100	0.02-0.06	0.95
polipropilene	80-110	0.5	0.90
rayon (alta tenacità)	60- 90	1.0	1.5
lana di roccia	70-110	10-17	2.7
acciaio	40-400	29	7.8
carbonio	200-700	30	1.77

1 ksi = 6,9 Mpa

Il polipropilene é uno dei polimeri più economici esistenti sul mercato. E' resistente alla maggior parte degli agenti chimici ed é idrofobo. A differenza delle fibre di vetro non é attaccato dagli alcali e dall'ambiente basico delle paste cementizie. Rispetto alle fibre di ferro non subisce alterazioni da parte di acidi, cloruri, ecc.

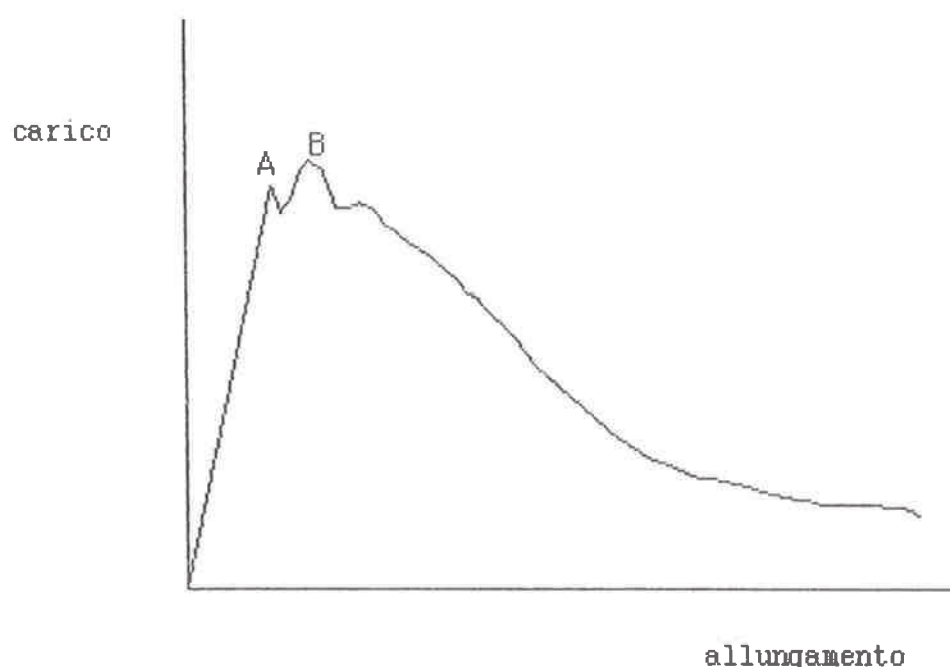
Le fibre di polipropilene hanno un modulo elastico circa 30 volte minore ed un peso 8 volte inferiore rispetto alle fibre di acciaio. A causa della differenza nel modulo elastico, le fibre di polipropilene non aumentano la resistenza a flessione ed a compressione del calcestruzzo. Aumentano invece le resistenze agli urti. Inoltre, il loro peso ridotto, rispetto alle fibre di acciaio, permette una più facile dispersione nel calcestruzzo. 4-5-6-7

In seguito analizzeremo l'influenza delle fibre di polipropilene sul controllo del bleeding, la diminuzione della permeabilità e la riduzione delle microfessurazioni da ritiro nel cls.

2. CENNI DI TEORIA DEI MATERIALI COMPOSITI CEMENTIZI

Quando un calcestruzzo fibrorinforzato é sottoposto a flessione, si possono osservare due livelli di comportamento nella curva carico-allungamento (figura 1). Questa curva può considerarsi lineare fino al punto "A". Dopo il punto "A", la curva acquista un comportamento non lineare e raggiunge un massimo al punto "B". Il carico o lo sforzo corrispondente al punto "A" viene chiamato primo punto di fessurazione o limite elastico, mentre il punto "B", ultima fessurazione o sforzo massimo.

CURVA CARICO-ALLUNGAMENTO (FIG.1)



A seconda del tipo di fibre, del dosaggio e della lunghezza, le curva carico-allungamento (o sforzo-deformazione) variano da quelle dove il punto "A" coincide con il punto "B" a quelle dove lo sforzo massimo è molto più grande dello sforzo di prima fessurazione.⁸⁻⁹⁻¹⁰

Quando una trave in calcestruzzo è sottoposta ad un carico crescente, la fessurazione nella zona di trazione conduce immediatamente alla rottura della trave. E' stato tuttavia notato che nel calcestruzzo la fessurazione è un fenomeno continuo. Attente valutazioni hanno evidenziato che le fessurazioni macroscopiche che portano alla rottura della trave vengono generate dalla interconnessione di microfessurazioni.

Per un calcestruzzo fibrorinforzato, il limite elastico è definito come il carico al di sotto del quale il materiale ha un comportamento essenzialmente elastico.

Le curve carico-allungamento sono più o meno lineari sino al limite elastico, sia per il calcestruzzo fibrorinforzato, sia per il calcestruzzo in bianco.

Nel caso delle fibre di acciaio, l'aggiunta del 4-6% in volume in un calcestruzzo aumenta il limite elastico solo di poco (da 900 psi, valore del calcestruzzo in bianco a 1060 psi); aumenterà invece in modo significativo (circa il doppio: da 920 psi a 1939 psi) il carico massimo (vedi tabella 2).

Tabella 2

Volume % di fibre	Limite elastico psi	Carico max psi
0	920	920
4,6	1060	1930
5,32	1200	2290
7,8	1600	3140
8,8	1860	3960

Un'idea apprezzabile sull'influenza delle fibre sulle proprietà elastiche dei manufatti può essere data dalla seguente relazione:

$$E_c = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (\text{equazione n. 1})$$

Dove E_c , E_f , E_m sono rispettivamente il modulo elastico del manufatto (E_c), delle fibre (E_f) e della matrice (E_m).

V_m e V_f sono invece le frazioni di volume della matrice e delle fibre.

L'equazione sopra vista è a rigore valida esclusivamente per un manufatto in calcestruzzo contenente fibre continue, comportamento elastico dei componenti e con assenza di sfilamento tra fibre e matrice. Dato che le fibre non sono continue, l'equazione n. 1 è un caso limite per il modulo di elasticità per calcestruzzi fibrorinforzati.

2.1 Il carico massimo

In figura 1 la curva carico-allungamento è non lineare tra il punto "A" ed il punto "B" (carico massimo). Dopo che il carico massimo è stato superato, il calcestruzzo fibrorinforzato è in grado di sopportare carichi decrescenti a differenza del calcestruzzo di riferimento che invece si frantuma. L'area sottesa della curva carico-allungamento rappresenta l'energia assorbita dalle fibre sotto forma di stiramento e snervamento. Inoltre, si può affermare che il carico massimo (punto "B") dipende dal dosaggio e dal rapporto lunghezza/diametro delle fibre.

2.2 Tenacità

La tenacità è definita come l'energia totale assorbita prima della rottura del manufatto. Questa energia può essere misurata dall'area sottesa della curva carico-allungamento. In generale, la tenacità di un calcestruzzo senza fibre è correlata allo sviluppo della fessura.

In un calcestruzzo fibrorinforzato le fessurazioni non possono propagarsi senza stiramento e snervamento delle fibre; occorre dell'energia in più per arrivare alla frattura completa del materiale fibrorinforzato.

Gli studi sperimentali hanno dimostrato che la tenacità di un calcestruzzo fibrorinforzato è almeno di un ordine di grandezza più grande di un calcestruzzo di riferimento.

Inoltre, è stato dimostrato che la tenacità dipende dagli stessi parametri da cui dipende il carico massimo (tipo, rapporto lunghezza/diametro, orientamento delle fibre e dal dosaggio).

3. CONFEZIONAMENTO DEL CALCESTRUZZO CON FIBRE DI POLIPROPILENE FIBERMESH

La fibra di polipropilene Fibermesh è stata brevettata per l'impiego nei materiali da costruzione a base di cemento o di calce (calcestruzzi, malte, ecc.). Nella tabella 3 sono riportate le principali caratteristiche tecniche delle fibre Fibermesh.

Tabella 3

LUNGHEZZA	5-10-19 - 51 mm
PESO SPECIFICO	0.91 gr/cc
ALLUNGAMENTO A ROTTURA	15%
TEMPERATURA DI ACCENSIONE	593 °C
ASSORBIMENTO	0
RESISTENZA ALLA TRAZIONE	80-110 kg/mm ²
MODULO DI YOUNG 10 ³ kpsi	0.5

Il confezionamento dei calcestruzzi con fibre di polipropilene (FP) non presenta particolari problemi.

Le fibre si usano nella misura di un kg per ogni mc di calcestruzzo. Le fibre non vanno introdotte per prime nella betoniera.

Una volta introdotti nell'impasto i fasci di fibre si aprono ed i singoli filamenti si disperdono omogeneamente nella miscela.

Una miscelazione prolungata non esercita comunque un'azione nociva sulla distribuzione delle fibre.

4. CONFEZIONAMENTO DEI CALCESTRUZZI

Le prove di laboratorio hanno lo scopo di dimostrare che le fibre Fibermesh non alterano le proprietà reologiche dei calcestruzzi ma, fatto salvo le caratteristiche del calcestruzzo preso in esame, ne aggiunge a queste delle altre, e cioè:

1. diminuzione del bleeding,
2. diminuzione della permeabilità del calcestruzzo,
3. controllo del ritiro,
4. aumento della tenacità,
5. rinforzo tridimensionale.

Il secondo obiettivo è quello di mostrare il benefico effetto degli additivi sui calcestruzzi FP sia in relazione alla lavorabilità che alla riduzione del rapporto A/C per confezionare calcestruzzi di qualità.

Allo scopo sono stati presi in considerazione i seguenti additivi:

FLUIDAL 177	fluidificante	(conforme alle Norme UNI 8107-72)
FLUIMENT 40	superfluidificante	(conforme alle Norme UNI 8145-80)
FLUIMENT 100	iperfluidificante	(conforme alle Norme UNI 8145-80)

5. CARATTERISTICHE DEGLI IMPIANTI

5.1 Impiego del fluidificante Fluidal 177

Nella tabella 4 sono riportate le caratteristiche degli impasti eseguiti con il fluidificante FLUIDAL 177. Sono stati confezionati quattro tipi di calcestruzzo e precisamente:

un calcestruzzo di riferimento	(1)
un calcestruzzo FP	(2)
un calcestruzzo con fluidificante FLUIDAL 177	(3)
un calcestruzzo FP con fluidificante FLUIDAL 177	(4)

Per i quattro impasti si è mantenuto costante il rapporto A/C (0.52), dosaggio di cemento (350 kg/mc classe 425 PTL) in modo che il parametro variabile risultasse la lavorabilità.

Osservando i risultati si possono desumere le seguenti considerazioni.

Confrontando il calcestruzzo n. 1 con il calcestruzzo n. 2 si nota una diminuzione dello slump (cono di Abrams - UNI 7163) e della consistenza (tavola a scosse, Norma UNI 8020) a causa delle fibre che agiscono da rinforzo alla coesione della massa cementizia. Il medesimo comportamento è osservabile per il calcestruzzo n. 3 ed il calcestruzzo n. 4 però con una differenza: la diminuzione dello slump, e della consistenza tra i due calcestruzzi è minore di quella osservata tra il n. 1 ed il n. 2.

Questo comportamento è ascrivibile al benefico effetto del fluidificante FLUIDAL 177 negli impasti fibrorinforzati.

Se confrontiamo poi i valori di slump e consistenza tra i calcestruzzi n. 2 e 4 (FP e FP additivato) l'effetto positivo del FLUIDAL 177 è ancora più evidenziato in quanto l'impiego del fluidificante raddoppia la lavorabilità a parità di rapporto A/C.

Dalla tabella si desume inoltre che l'impiego delle fibre nei calcestruzzi non altera le resistenze meccaniche a compressione ed a flessione.

5.2 Calcestruzzi fibrorinforzati confezionati con superfluidificante Fluiment 40

La Tabella 5 riassume i risultati sperimentali dei quattro impasti confezionati nel modo seguente:

calcestruzzo di riferimento	(5)
calcestruzzo FP	(6)
calcestruzzo con superfluidificante Fluiment 40	(7)
calcestruzzo FP con superfluidificante Fluiment 40	(8)

Tabella 4

	N. 1	N. 2	N. 3	N. 4
Tipo di cemento Portland				
Dosaggio di cemento	425	425	425	425
	350 kg/mc	350 kg/mc	350 kg/mc	350 kg/mc
Inerti tipo	alluvionali	alluvionali	alluvionali	alluvionali
Dimensione max inerti	20 mm	20 mm	20 mm	20 mm
Additivo tipo	-----	-----	FLUIDAL 177	FLUIDAL 177
Additivo dosaggio	-----	-----	2,5°/oo	2,5°/oo
Fibre tipo	-----	FIBERMESH 51 mm	-----	FIBERMESH 51 mm
Fibre dosaggio	-----	900 gr/mc	-----	900 gr/mc
Rapporto A/C	0,526	0,526	0,526	0,526
Slump (cm)	7,5	3,5	13	8
Tavola a scosse	41,5	34	43	39,5
Peso specifico kg/mc	2338	2338	2303	2304
Resistenze a compressione kg/cm ²				
dopo:				
1 giorno	196	190	187	180
3 giorni	337	329	381	331
7 giorni	377	365	376	392
28 giorni	430	471	445	461
Resistenze a flessione kg/cm ²				
dopo:				
7 giorni	55	57	58	60
28 giorni	68	72	67	67

Tabella 5

	N. 5	N. 6	N. 7	N. 8
Tipo di cemento Portland				
Dosaggio cemento	525	525	525	525
Inerti tipo	400 kg/mc alluvionali	400 kg/mc alluvionali	400 kg/mc alluvionali	400 kg/mc alluvionali
Dimensione max inerte	20 mm	20 mm	20 mm	20 mm
Additivo tipo	-----	-----	FLUIMENT 40	FLUIMENT 40
Additivo dosaggio	-----	-----	1%	1%
Fibre tipo	-----	FIBERMESH 51 mm	-----	FIBERMESH 51 mm
Fibre dosaggio	-----	900 gr/mc	-----	900 gr/mc
Rapporto A/C	0,519	0,519	0,519	0,519
Slump (cm)	3,5	1,5	17	13
Tavola a scosse (cm)	36,5	29,2	50	47
Peso specifico	2326	2325	2317	2297
Resistenze a compressione kg/cm ² dopo				
1 giorno	258	248	260	263
3 giorni	327	322	330	331
7 giorni	370	367	377	382
28 giorni	530	529	548	549
Resistenze a flessione kg/cm ² dopo				
7 giorni	48	48	50	49
28 giorni	68	70	67	69
Perdita di lavorabilità (slump test)				
0'				
15'			15	13
30'			12,5	11
45'			8	8,5
60'			6,5	7
			4,5	5,5

Tabella 6

	N. 9	N. 10	N. 11	N. 12
Tipo di cemento Portland	425	425	425	425
Dosaggio cemento	400 kg/mc	400 kg/mc	400 kg/mc	400 kg/mc
Inerti tipo	alluvionali	alluvionali	alluvionali	alluvionali
Dimensione max inerte	20 mm	20 mm	20 mm	20 mm
Additivo tipo	-----	-----	FLUIMENT 40	FLUIMENT 100
Additivo dosaggio	-----	-----	1%	3% (volume)
Fibre tipo	-----	FIBERMESH 51 mm	FIBERMESH 51 mm	FIBERMESH 51 mm
Fibre dosaggio	-----	900 gr/mc	900 gr/mc	900 gr/mc
Rapporto A/C	0,557	0,581	0,48	0,39
Slump (cm)	17	16	15,5	16,5
Tavola a scosse (cm)	51	50	49	51
Peso specifico kg/cm ³	2326	2313	2325	2387
Resistenze a compressione kg/cm ² dopo				
1 giorno	132	128	199	301
3 giorni	247	238	306	441
7 giorni	346	347	411	538
28 giorni	444	450	505	596
Resistenze a flessione kg/cm ² dopo				
7 giorni	51	50	61	68
28 giorni	65	67	72	81

Anche per queste prove si è tenuto costante il dosaggio di cemento ed il rapporto A/C e si è valutata la variabilità dello slump e della consistenza come per le prove precedentemente descritte. Nei calcestruzzi 5 e 6 (con e senza fibre ed entrambi senza superfluidificante) per quanto riguarda lo slump e la consistenza, la presenza di fibre fa diminuire di circa il 50% lo slump e di circa il 20% la consistenza misurata con la tavola a scosse.

Confrontando invece gli impasti 7 ed 8, additivati con FLUIMENT 40, la differenza in slump ed in consistenza è molto contenuta. Questo risultato, se confrontato con quello ottenuto con il FLUIDAL 177, evidenzia la maggior capacità disperdente del superfluidificante Fluiment 40 e quindi il positivo ruolo giocato nel confezionamento di calcestruzzo FP.

Per gli impasti 7 ed 8 è stata valutata anche la perdita di lavorabilità dimostrando che nel tempo (60') vengono mantenuti per entrambi gli impasti, all'incirca gli stessi valori di slump e di consistenza.

Confrontando l'impasto n. 6 con l'impasto n. 8 si nota come l'impiego del superfluidificante Fluiment 40, a parità di rapporto A/C, eserciti un positivo effetto sulla lavorabilità degli impasti, passando da slump 1.5 del calcestruzzo FP senza additivo a slump 13 per il medesimo calcestruzzo però additivato con Fluiment 40.

5.3 Impiego dell'iperfluidificante Fluiment 100

In tabella 6 sono riportati i risultati sperimentali degli impasti confezionati come segue:

calcestruzzo di riferimento	(9)
calcestruzzo FP	(10)
calcestruzzo FP con superfluidificante FLUIMENT 40	(11)
calcestruzzo FP con iperfluidificante FLUIMENT 100	(12)

A differenza delle altre serie di prove, poiché abbiamo confezionato gli impasti a pari lavorabilità (slump tra 15.5 e 17 cm) mantenendo costante il dosaggio di cemento, l'unico parametro variabile è risultato il rapporto A/C.

Questo rapporto diminuisce, a parità di lavorabilità, passando dall'impasto 9 all'impasto 12 per effetto dell'impiego rispettivamente del superfluidificante (Fluiment 40) e dell'iperfluidificante (FLUIMENT 100) con notevole beneficio sulle resistenze a compressione ed a flessione. Queste prove dimostrano ancora una volta che l'uso delle fibre di polipropilene nel calcestruzzo non altera le caratteristiche reologiche, ma aggiunge nuove prestazioni al calcestruzzo stesso. L'esempio della tabella 6 dimostra che anche usando le fibre di polipropilene, l'iperfluidificante Fluiment 100 esplica egualmente la sua funzione di forte riduttore del rapporto A/C e di incrementatore delle resistenze iniziali.

6. PROPRIETA' ALLO STATO INDURITO

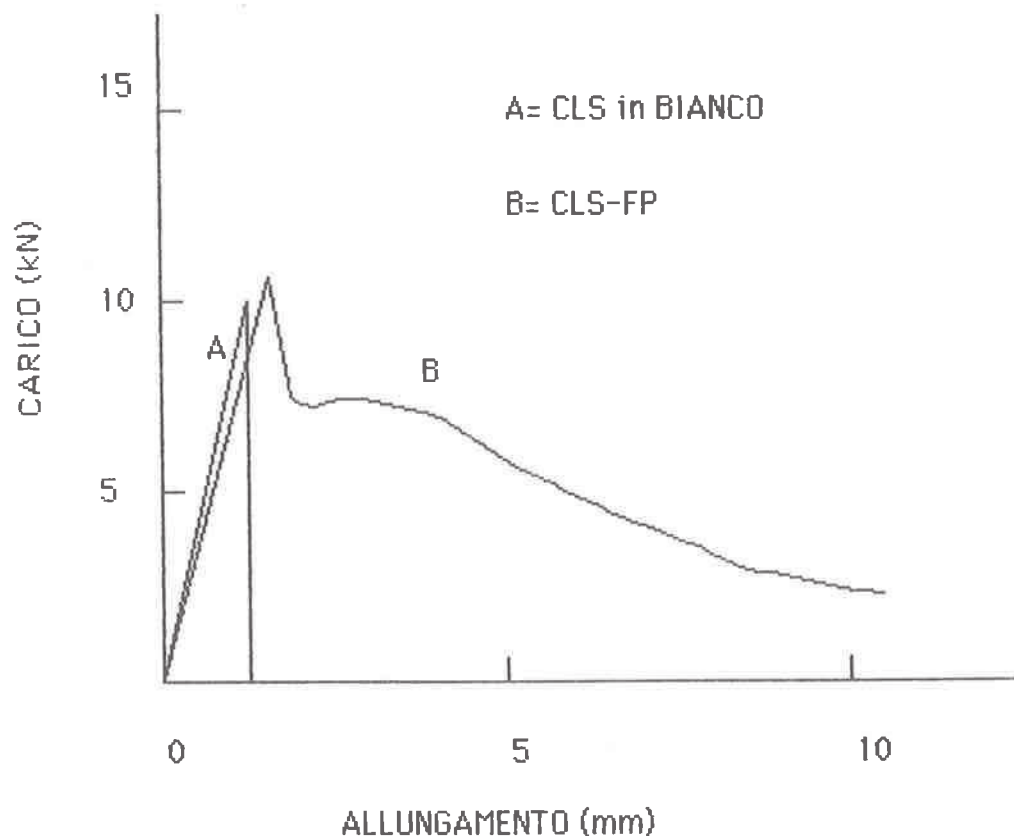
6.1 Resistenza a compressione

La resistenza a compressione del calcestruzzo FP rimane praticamente inalterata rispetto al bianco mantenendo però una consistente capacità di carico anche dopo la rottura della matrice fino alla rottura delle fibre.

6.2 Resistenza alla flessione

Anche nel caso della resistenza a flessione, l'introduzione delle fibre non apporta un significativo miglioramento a questa proprietà rispetto al bianco. Tuttavia la proprietà più importante ottenibile con un calcestruzzo FP è il comportamento dopo la rottura; la capacità di continuare ad assorbire energia fino a rottura delle fibre. La figura 2 mostra un tipico diagramma carico-allungamento che illustra il comportamento dei manufatti dopo rottura.

FIGURA 2



Il calcestruzzo senza fibre si comporta come un materiale elastico quando è sottoposto a flessione. Infatti il diagramma è lineare sino allo sforzo di rottura (massimo della curva).

La fessura che si produce in questo punto evolve lungo tutta la sezione del calcestruzzo provocandone la rottura. Nel caso invece di calcestruzzo FP le fibre gli permettono di resistere a deformazioni maggiori rispetto a quelle ottenute sul bianco.

Infatti, quando si raggiunge lo sforzo massimo, non si produce una repentina rottura in quanto le fibre assorbono la tensione, sopportando ulteriori carichi.

6.3 Aumento della duttilità del calcestruzzo

Le fibre di polipropilene presentano una spiccata capacità di assorbire energia rendendo il calcestruzzo meno fragile.¹¹⁻¹²

Se si pensa alle migliaia di fibre presenti in ogni centimetro cubo di calcestruzzo, si può facilmente immaginare la capacità di assorbire gli shock da urto.

Le fibre, oltre ad assorbire energia conferiscono maggior resistenza alle prestazioni del calcestruzzo dopo fessurazione.

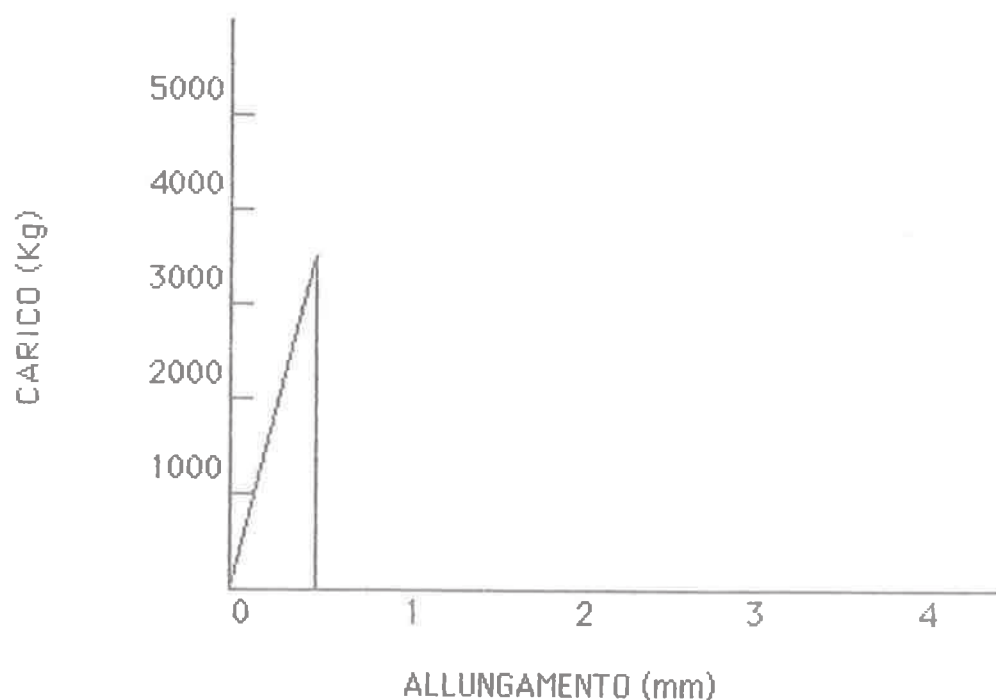
L'area sottesa dalle curve carico-allungamento (figura 2) è usata come misura della capacità di assorbire l'energia dovuta all'urto. A questo proposito sono state eseguite prove di duttilità registrando i valori delle deformazioni in funzione dello sforzo di flessione su tronchetti 10x10x40 cm confezionati usando gli impasti 1, 2 e 4 della tabella 4.

L'area sottesa della curva ottenuta è una misura della duttilità degli impasti.

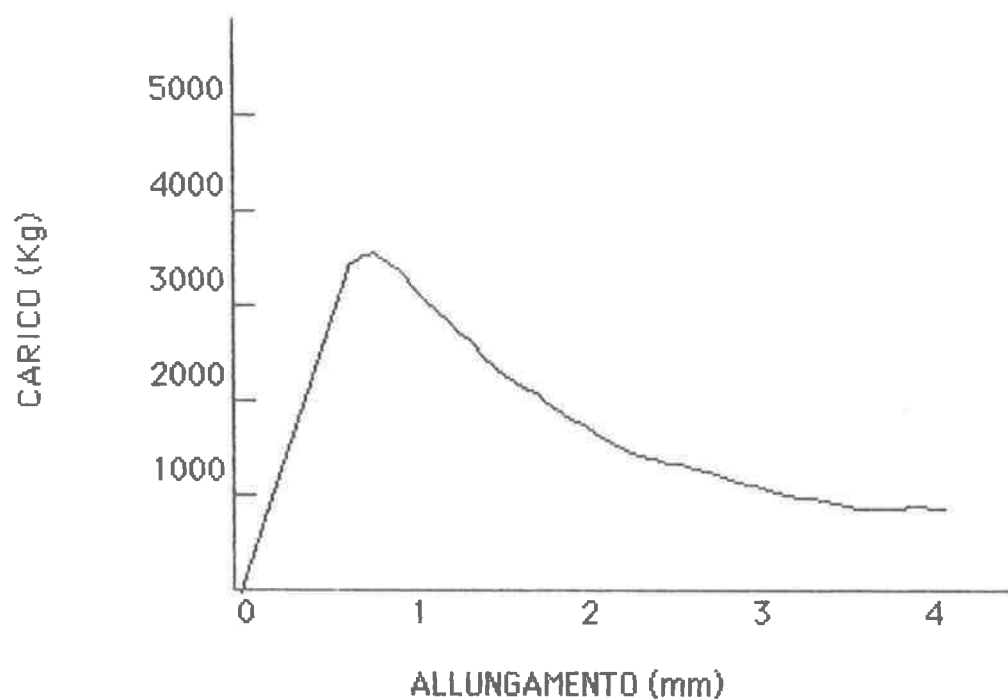
Le figure 3, 4 e 5 che riportano rispettivamente tali curve, evidenziano come l'impiego delle fibre aumenti la duttilità dell'impasto (aumento dell'area sottesa della curva del calcestruzzo FP), passando dal calcestruzzo di riferimento (figura 3) fino al calcestruzzo FP additivato con Fluidal 177 (figura 5), quest'ultimo con valori di duttilità superiori a tutti gli impasti.

FIGURA 3

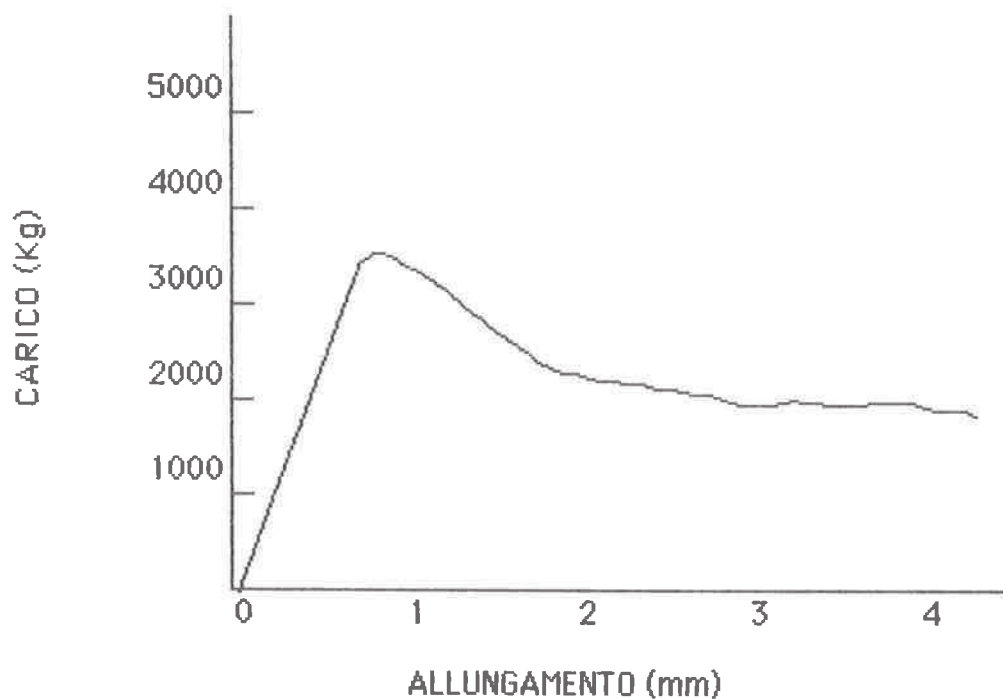
CLS DI RIFERIMENTO (IMPASTO N°1)



CLS-FP SENZA ADDITIVO (IMPASTO N°2) - FIG. 4



CLS-FP CON FLUIDAL 177 (IMPASTO N°3) - FIG. 5



7. DURABILITA' DEL CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO

7.1 Resistenze agli attacchi da parte di agenti aggressivi

Come é stato accennato, dal punto di vista chimico il polipropilene resiste molto bene agli attacchi degli acidi e delle basi forti.¹³

Sotto l'aspetto chimico, le fibre di polipropilene hanno maggiore durata di quelle di acciaio, essendo queste facilmente attaccate da acidi e soluzioni saline concentrate.

7.2 Diminuzione della permeabilità

L'introduzione delle fibre Fibermesh nel calcestruzzo ne riduce la permeabilità di circa l'80%. Infatti, le fibre tendono a tenere in sospensione gli inerti (grossi e fini) riducendo la segregazione, il bleeding ed il ritiro. La "ragnatela" di fibre inoltre arresta la formazione dei capillari con ulteriore riduzione del bleeding e favorisce la ritenzione dell'acqua. Il risultato finale é un calcestruzzo con meno fessure e spazi vuoti, molto meno permeabile e più durabile.

7.3 Riduzione dei ritiri

La riduzione dei ritiri si realizza attraverso la distribuzione uniforme di decine di migliaia di fibre individuali nella massa del calcestruzzo. Durante il processo di indurimento, la perdita di acqua da parte del calcestruzzo posto in ambiente non saturo di umidità, provoca una diminuzione del suo volume chiamato "ritiro idraulico". All'inizio il fenomeno del ritiro é rilevabile dalla presenza di piccolissime microfessure. Se si lascia che queste microfessure si uniscono, si genera abbastanza energia da produrre una profonda fessurazione.

Se alle microfessure iniziali non viene permesso di unirsi, lo sviluppo di energia sarà insignificante. Intersecando le microfessure al momento della loro formazione, con le fibre Fibermesh, si interromperà la loro crescita e quindi il fenomeno del ritiro.

La microfessura, non potendo proseguire nella direzione iniziale, cambierà direzione andando ad interessare un'altra zona.

Questo processo, di microfessurazione casuale e continuo arresto della stessa, favorisce una ridistribuzione della tensione su tutta l'area del calcestruzzo piuttosto che concentrarsi su un singolo piano provocando una grande fessurazione.

Per dimostrare da un punto di vista sperimentale quanto sopra esposto, abbiamo messo a punto un test atto ad evidenziare l'influenza delle fibre sui fenomeni di ritiro.

Allo scopo sono state predisposte due lastre (50x50x3 cm) di calcestruzzo confezionate rispettivamente con e senza fibre Fibermesh entrambe additivate con Fluidal 177 (per il confezionamento vedi tabella 4 impasti 3 e 4). Dopo il confezionamento non sono stati usati prodotti tipo curing compound, ma le due lastre sono state poste di fronte a due ventilatori industriali procuranti un flusso di aria alla velocità di circa 24 km/ora. La temperatura esterna si é mantenuta per le prime 4 ore intorno ai 28 °C.

La prova consiste nel pesare ad intervalli regolari le lastre per valutare la perdita eventuale di acqua. La tabella 7 evidenzia come il periodo critico sia nelle prime 4-6 ore, in cui, per il calcestruzzo di riferimento, si riscontra la maggior perdita di acqua.

Questa repentina perdita di acqua del calcestruzzo é responsabile dei ritiri riscontrabili sulla lastra di calcestruzzo nelle prime 3-4 ore. I calcestruzzi FP non presentano nessun tipo di microfessurazione.

Tabella 7

Tempo	Calcestruzzo di riferimento	Calcestruzzo FP
1 ora	10.0%	8.6%
2 ore	19.4%	16.5%
3 ore	23.1%	17.9%
4 ore	23.7%	20.4%
24 ore	38.6%	36.2%
7 giorni	41.2%	39.8%
28 giorni	43.4%	43.2%

8. CONCLUSIONI

L'impiego delle fibre di polipropilene nei compositi cementizi viene facilitato dall'uso di additivi fluidificanti e superfluidificanti che migliorano notevolmente la reologia degli impasti senza variare il rapporto A/C.

Le fibre di polipropilene sono inattaccabili da acidi e basi e consentono di aumentare la durabilità del composito cementizio attraverso la diminuzione della permeabilità e delle microfessure da ritiro.

BIBLIOGRAFIA

- 1) ROMUALDI, J.P., AND BATSON, G.B.: "Mechanics of crack arrest in concrete". Proc.Amer.Soc. of Civ. Engrs. (1963), 147-168
- 2) KRENCHER, H.: "Fiber reinforcement". Akademisk Forlag, Copenhagen, (1964)
- 3) BIRYUKOVICH, K.L., BIRYUKOVICH, Y.L., AND BIRYUKOVICH, D.L.: "Glass fiber reinforced cement". Published by Budivel, Cera translation (1964)
- 4) DAVE, N.J., AND ELLIS, D.G.: "Polypropylene fibre reinforced cement". Int.J. Cement Composites (1979), 19-28
- 5) KRENCHER, H. AND JENSEN, H.W.: "Organic reinforcing fibres for cement and concrete". Proc.Symp. on fibrous Concrete, Construction Press Ltd (1980), 87-98
- 6) NAAMAN, A.E., SHAH, S.P. AND THRONE, J.L.: "Some developments in polypropylene fibres for concrete". ACI Journal
- 7) HANNANT, D.J., ZONSVELD, J.J., AND HUGHES, D.C.: "Polypropylene film in cement-based materials". Composites 9 (1978), 83-88
- 8) EDINGTON, J. HANNANT, D.J., WILLIAMS, R.I.T.: "Steel fibre reinforced concrete". Concrete Building Research Est. Current Paper 69-74
- 9) KELLY, A.: "Some scientific point concerning the mechanics of fibrous composites". Composite-standards, testing and design, NPL Conf.Proc. (1974), 9-16
- 10) AVESTON, J., COOPER, G.A. AND KELLY, A.: "Single and multiple fracture". The properties of fibre composites, NPL Conf.Proc. IPC Science and technology Press, (1971), 15-24
- 11) HIBBERT, A.P., AND HANNANT, D.J.: "Toughness of cement composites containing polypropylene films compared with other fibre cements". Composite 13, (1982), 393-399
- 12) CARPINTERI, DI TOMMASO, GAMBAROVA, FLORIS, IORI E NOBILE: "La meccanica della frattura del calcestruzzo". Atti Convegno AITEC, Parma (1985)
- 13) HANNANT, D.J.: "Durability of cement sheets reinforced with fibrillated polypropylene networks". Mag.Concr.Res. 35 (125), 197-204

CEMENTO RINFORZATO CON FIBRE DI VETRO (G.F.R.C.)
ASPETTI TEORICI ED APPLICAZIONI

MARCACCIOLI Luciano
PENCHINI Mauro

Consulenti, Perugia

CEMENTO RINFORZATO CON FIBRE DI VETRO (G.F.R.C.) ASPETTI TEORICI ED APPLICAZIONI

Ingg. - Luciano Marcaccioli - Mauro PENCHINI - Consulenti
Perugia - Italy

SOMMARIO

La presente memoria riporta in breve le conoscenze acquisite dagli scriventi nell'utilizzo del composito cementizio G.F.R.C. (Glass Fiber Reinforced Concrete - cemento conglomerato rinforzato con fibre di vetro) e le esperienze condotte presso la Soc. **EDILBETON PERUGIA S.p.A.**

Sono indicate le caratteristiche dei componenti fondamentali, le caratteristiche fisico-meccaniche del composito, le modalità di produzione, i criteri di progettazione, le applicazioni più ricorrenti e la descrizione di alcuni lavori eseguiti.

SUMMARY

This report gives the knowledge of the undersigned about the utilization of cementitious composites reinforced with glass fibres G.F.R.C. and the experience carried out by **EDILBETON PERUGIA SPA.**

Here below are reported the properties of raw materials, mechanical characteristics of composites, production technologies, design concepts, and their actual applications.

1. PREMESSA

1.1. CHE COSA E' IL G.F.R.C. (Glass Fiber Reinforced Concrete)

Sinteticamente la sigla G.F.R.C. indica un prodotto ottenuto rinforzando con fibre di vetro alcali-resistenti una malta di cemento, aggregati ed additivi. Utilizzando differenti combinazioni dei materiali si possono ottenere proprietà diverse, infatti la composizione della miscela, il grado di compattazione, il tipo di cemento, la proporzione, la lunghezza e l'orientamento delle fibre di vetro possono essere variate per ottenere uno specifico prodotto. Normalmente un elemento in G.F.R.C. ha il 5% in peso (nella miscela totale) costituito da fibre di vetro Alcali-Resistenti (AR) combinate con una malta di sabbia silicea fine e cemento Portland.

Caratteristica del composito in G.F.R.C. è che l'armatura di rinforzo è distribuita in modo random nella matrice, al contrario del calcestruzzo armato, dove l'acciaio di armatura è concentrato nelle zone di massima trazione.

1.2. NOTE STORICHE

Nel 1941 il tentativo, effettuato in Russia, di utilizzare fibre di vetro per rinforzare malte di cemento portland fallì perché le fibre di vetro "E"

(quelle utilizzate attualmente nei compositi in vetroresina), furono presto corrosive dall'ambiente alcalino presente.

Nel 1967 il B.R.E. (Building Research Establishment) inglese sviluppò un processo per ottenere fibre di vetro alcali resistenti (AR) mediante aggiunta di zirconio nel processo di confezionamento delle fibre.

Attualmente sono disponibili sul mercato fibre di vetro prodotte da industrie inglesi e giapponesi.

Negli ultimi anni si è sempre più diffuso l'uso di polimeri sia con fibre di vetro AR, sia in elevati dosaggi ha protezione dall'ambiente alcalino, per le fibre di vetro E.

2. COMPOSIZIONE DEL GFRC

2.1. MATERIALI COMPONENTI IL GFRC

Il GFRC viene ottenuto combinando tra loro, in modo diverso in funzione dei risultati desiderati, tutti od alcuni dei seguenti materiali:

- Cemento Portland
- Fillers
 - Sabbia silicea
 - Inerti di frantumazione
 - Inerti volanti Silicafume
- Fibre AR
- Acqua
- Additivi
- Polimeri
- Pigmenti

2.2. CEMENTO

Il tipo di cemento universalmente adottato è il PORTLAND, sia di tipo ordinario che a rapido indurimento. Date le elevate quantità di cemento nella miscela, particolare cura va posta nell'uso del cemento bianco e comunque nel confezionamento di elementi colorati.

2.3. SABBIA SILICEA

Viene utilizzata generalmente sabbia silicea con un contenuto di silice superiore al 96%, di dimensioni non superiori a 1,2 mm. per il processo SPRAYMIX (v. punto 3.1) e 2,4 mm. per il processo PREMIX, con un massimo del 10% di frazione fine inferiore a 150 µm.

2.4. INERTI CENERI VOLANTI O SILICAFUME

Seguono le specifiche di utilizzo dei normali conglomerati.

2.5. FIBRE AR

Alcune delle loro proprietà sono:

-Resistenza a trazione del singolo filamento	3,5 GN/m ²
-Modulo di elasticità	72 GN/m ²
-Densità	26,8 KN/m ³
-Diametro del filamento	13 µm ÷ 20 µm

2.6. ADDITIVI

Superfluidificanti , ritardanti etc., comunemente usati nei conglomerati cementizi

2.7. POLIMERI

Particolarmente diffuso è l'utilizzo di resine acriliche che svolgono la duplice azione

a) Nella fase di presa e indurimento della malta, realizzano la ritenzione di acqua favorendo così la maturazione senza la necessità di trattamenti igrometrici (particolarmente difficoltosi)

b) Di filmazione della superficie filamentare del vetro, realizzando una ulteriore barriera protettiva nei confronti degli alcali.

3. TECNOLOGIA DI PRODUZIONE

Il G.F.R.C. viene prodotto secondo due diverse tecnologie, lo SPRAYMIX ed il PREMIX, che differiscono per le percentuali in peso e la lunghezza delle fibre e per il momento in cui la fibra di vetro viene inglobata nella matrice cementizia.

3.1. PROCESSO SPRAYMIX

La malta, preparata su mescolatori veloci, viene pompata fino all'ugello di spruzzatura che è collegato con una pistola ad aria compressa che contemporaneamente taglia e proietta la fibra di vetro nel cono di deposizione della malta sulla cassaforma.

La miscelazione della fibra con la malta inizia quindi durante la spruzzatura per concludersi sulla superficie dello stampo.

La fibra ha una lunghezza da 32 a 50 mm. e lo spessore medio del manufatto è di 10 - 12 mm. Detto spessore viene raggiunto generalmente in tre successive operazioni di spruzzatura, ognuna delle quali seguita da una rullatura che serve come compattazione ed eliminazione dell'eccesso d'aria.

Per particolari elementi piani si può realizzare il processo di compattazione con un metodo sottovuoto detto spray dewatered.

Per componenti di corrente produzione (es. pannelli di tamponamento) confezionati con il metodo SPRAYMIX, la composizione del GFRG è normalmente la

seguente:

- Sabbia/Cemento 1.1
- Acqua/Cemento 0.32
- Fibra AR (L.=35mm.) 5% sul peso totale della miscela
- Polimero (in soluzione acquosa al 50%) 5% sul peso totale della miscela

3.2. PROCESSO PREMIX

La fibra di lunghezza variabile da 12 a 25 mm. viene inglobata nella matrice cementizia già durante la preparazione della malta.

L'impasto così ottenuto viene depositato su tavole vibranti oppure pompato e spruzzato, con pistole più semplici fino ad ottenere gli elementi voluti che presentano spessore dell'ordine dei 3 - 5 cm.

4. CARATTERISTICHE FISICO MECCANICHE DEL GFRC.

4.1. FUNZIONE DELLE FIBRE DI VETRO

L'effetto delle fibre è di introdurre piccole regioni di materiale ad alta resistenza in una matrice fragile al fine di controllare la propagazione della frattura

La matrice cementizia del composito GFRC è fragile ed inaffidabile alle sollecitazioni di tensione.

La presenza di fibre di vetro alcali resistenti (AR) rende affidabili le caratteristiche di resistenza a trazione della matrice, e ne realizza il completo impiego nel tempo.

4.2. CARATTERISTICHE DI RESISTENZA MECCANICA DEL GFRC

Le caratteristiche di resistenza meccanica a trazione e flessione tipiche di un composito di GFRC a 28 gg. sono date nella fig.1

Le stesse caratteristiche dopo invecchiamento artificiale sono date in fig. 2. Nella letteratura americana (per quella inglese tra parentesi) le caratteristiche meccaniche al limite elastico e alla rottura del materiale GFRC sottoposto a carico flessionale sono denominate rispettivamente:

EFY - Early Flexural Yeld (LOP - Limit Of Proportionality)

EFU - Early Flexural Ultimate (MOR - Modulus Of Rupture)

quando il carico risulta di trazione, le stesse caratteristiche sono indicate come:

ETY - Early Tensile Yeld (BOP - Bend Over Point)

ETU - Early Tensile Ultimate (UTS - Ultimate Tensile Strenght)

Le stesse caratteristiche sono date per il materiale invecchiato, sostituendo il suffisso E con il suffisso A (Aged)

AFY - AFU - ATU - ATY (Vedi Fig. 2).

Queste caratteristiche sono fondamentali per il progetto di elementi in GFRC.

Il comportamento al limite elastico - LOP - è funzione delle caratteristiche della matrice, (tipo, densità e metodi di stagionamento).

Il comportamento a rottura del materiale - MOR - dipende dalla quantità di

vetro e dalla lunghezza e orientamento delle fibre.

Il rapporto tra il limite elastico e il limite di rottura LOP/MOR del GFRC con un 5% di fibra e' all'incirca, per i primi anni di vita del materiale, pari a 2,5 - 3.

I valori delle caratteristiche meccaniche tipiche ottenibili da un GFRC con il 5% di fibra sono riportate in Tab. 1

4.3. CARATTERISTICHE FISICHE DEL GFRC

I valori delle caratteristiche fisiche mediamente ottenuti con il GFRC sono:

4.3.1 DENSITA'

Variabile mediamente tra un valore di 17 - 21 KN/m³ in relazione al rapporto sabbia/cemento e alla percentuale di fibra.

4.3.2. VARIAZIONE DIMENSIONALE PER EFFETTO DELL'UMIDITA'

Le variazioni dimensionali del GFRC sottoposto a differenti condizioni igrometriche sono contenute entro valori del 0,15% - 0,05% in relazione al rapporto sabbia/cemento.

Comportamento qualitativo del GFRC a variazioni igrometriche e' dato in fig.4.

4.3.3. DILATAZIONE TERMICA

Il coefficiente di dilatazione termica e' influenzato dalle condizioni igrometriche nelle quali il materiale si trova, mediamente tale coefficiente ha valore di: $10 \cdot 10^{-6} \div 20 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

4.3.4. REAZIONE AL FUOCO

Il GFRC e' un materiale incombustibile ed e' classificato pertanto di classe 0

4.3.5. RISPOSTA ACUSTICA

Una lastra di GFRC dallo spessore di 9 mm. con una massa di 180 KN/m² produce un abbattimento sonoro di circa 30 dB su una banda di frequenza tra i 400 e 1500 Hz

5. CAMPI APPLICATIVI

Il GFRC ha trovato molteplici usi nella produzione di manufatti prefabbricati ad uso civile, industriale, agricolo; usi che vanno ampliandosi con l'introduzione e la conoscenza del materiale.

5.1. PANNELLI DI FACCIATA PER EDIFICI

Questa applicazione di gran lunga la piu' tipica, importante ed impegnativa consiste nella realizzazione di pannelli per la tamponatura di edifici per uso uffici, civile abitazione, industriale.

Realizzati nelle forme e colori piu' svariati permettono piena liberta' espressiva al progettista che puo' accedere a composizioni spaziali e di finitura pressoché impossibili con metodologie costruttive tradizionali associando a questo una caratteristica di estrema leggerezza dei pannelli così realizzati, $500 \div 700 \text{ N/m}^2$, che permette sensibili economie nei materiali strutturali e nei tempi di montaggio.

5.2. CASSEFORME A PERDERE

Questo settore di impiego caratteristico nella realizzazione di ponti, cavalcavia, e tutte quelle realizzazioni in C.A. dove sia richiesta ottima finitura e rapidita' esecutiva, consiste nel realizzare i casseri per il getto di elementi strutturali in C.A. con pannelli in GFRC, che una volta completato il getto rimangono a far parte integrante del manufatto realizzato, assicurando l'ottima finitura superficiale che e' propria del GFRC.

5.3. CANALETTE PER CAVI E CANALIZZAZIONI

In Inghilterra e' abbastanza diffuso l'impiego del GFRC come materiale per la realizzazione di canalette per il contenimento dei cavi elettrici a lato ferrovia, come l'impiego delle stesse canalette quali vie di adduzione per acque irrigue.

5.4. FINITURE ARCHITETTONICHE INTERNE ED ESTERNE

Il GFRC quale materiale di facile modellazione spaziale, trova notevole successo applicativo nella costruzione e ricostruzione di fregi architettonici sia all'interno che all'esterno degli edifici, quali controsoffitti, pareti architettoniche, colonne (non strutturali) capitelli, architravi ecc.

6. METODI COSTRUTTIVI

6.1 COSTRUZIONE DEI PANNELLI IN GFRC

I pannelli in GFRC sono realizzati essenzialmente con due tecnologie, di principio, e cioè: con telaio metallico, o in struttura sandwich.

Nel primo caso che e' quello che sta raccogliendo i maggiori successi, la pelle o skin in GFRC e' sostenuta da un telaio metallico.

Nel secondo caso due pelli contrapposte realizzano un sandwich nel cui core e' disposto polistirolo o stirodur (impasto cementizio con sfere di polistirolo).

6.1.1 PANNELLI CON TELAIO METALLICO

Il GFRC e' realizzato sulla superficie di stampi in acciaio o legno, nello spessore variabile di $10 \div 12 \text{ mm.}$, se richiesto per la finitura superficiale, sugli stessi stampi prima dell'applicazione del GFRC viene disposta una malta cementizia con graniglie colorate quali aggregati, al fine di ottenere la risoluzione cromatica voluta.

Sullo strato di GFRC, dopo le varie operazioni di rullatura, viene posizionato il telaio metallico il quale riporta gli ancoraggi o chiodi metallici per il fissaggio della pelle, ed e' predisposto degli agganci di fissaggio come richiesto dalla struttura sul quale verra' allestito.

La connessione dei chiodi di ancoraggio con la pelle viene eseguito applicando pezze di GFRC subito dopo la realizzazione della pelle, in modo da realizzare una continuita' tra la pelle e le pezze che vanno a sovrastare il chiodo e realizzando la continuita' meccanica tra il composito cementizio del pannello ed il telaio.

Tale procedimento ha la funzione di ottenere una connessione molto elastica nel piano del pannello tra la pelle ed il telaio, realizzando nel contempo una connessione molto piu' rigida normalmente al piano dello stesso.

Questo permette di limitare le tensioni di origine termoigrometrica connesse alle variazioni dimensionali della pelle, mentre permette di trasferire al telaio metallico le forze esterne date dall'azione del vento.

L'espressione grafica di tale concetto costruttivo e' raccolta in fig.8.

6.1.2. PANNELLI SANDWICH

Questa metodologia costruttiva ripete quanto gia' in uso in altre costruzioni composite.

In questo caso i componenti del sandwich sono costituiti da due laminati o pelli di GFRC con interposto un materiale leggero e coibente a composizione del core, tipo poliuretano o stirodur.

I vantaggi offerti da tale soluzione sono, una superficie posteriore del pannello gia' finita.

Le condizioni sfavorevoli sono invece: le limitate dimensioni che puo' avere il pannello e le difficolta' che si incontrano nel realizzare il fissaggio.

7. CRITERI DI PROGETTAZIONE

7.1 DIMENSIONAMENTO DI ELEMENTI IN GFRC

Il GFRC e' utilizzato sempre per la realizzazione di elementi la cui funzionalita' sia strutturalmente secondaria.

I criteri con i quali si procede ad una progettazione dei componenti e' quella di limitare nella vita del prodotto le sollecitazioni a valori che siano inferiori al valore di -LOP- secondo i criteri suggeriti dalle raccomandazioni internazionali.

7.2. NORMATIVE E RACCOMANDAZIONI

Nella letteratura internazionale, relativamente all'impiego del GFRC nella realizzazione di pannelli di facciata, sono state proposte e sono riconosciute come guida fondamentale le raccomandazioni emesse dal Prestressed Concrete Institute (P.C.I.)- Chicago -USA-.

Le quali costituiscono il piu' importante documento internazionale per la progettazione con GFRC.

7.3. CRITERIO FONDAMENTALE DI DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE

Le ricerche condotte in diversi anni di studio sul GFRC hanno evidenziato che le caratteristiche di resistenza ultima a flessione MOR, sono tali da non decadere nel lungo periodo al disotto dei valori misurati di LOP a 28 gg.

Le curve caratteristiche di comportamento meccanico nel tempo del GFRC sono riportate in fig.5

Da questo fondamentale riscontro sperimentale e' stato stabilito in forma di raccomandazione nell'ambito del P.C.I., che la massima tensione dovuta a sollecitazione di flessione da assumere a base dei calcoli non deve comunque superare i 8,9 MPa (1300 - PSI) e deve essere calcolata con la seguente espressione:

$$f_u' = f_{yr} (1 - t \sqrt{V}) / 0.9 \leq 8.9 \text{ MPa}$$

dove :

f_u' = Valore della resistenza a rottura

f_{yr} = Valore medio al limite elastico, ottenuto dalla rottura di 20 provini a 28 gg., comunque non superiore al 50% del valore medio del MOR ottenuto negli stessi.

t = Costante di Students (per la prova su 20 provini = 2.539)

V = Coefficiente di variazione (Deviazione standard/ f_{yr})

7.4. SOLLECITAZIONI AMMISSIBILI

Le sollecitazioni definite ammissibili in ambito P.C.I. sono date dalla seguente relazione:

$$f_u = 0.3 f_u'$$

dove i simboli hanno i seguenti significati:

f_u = Sollecitazione ammissibile

0.3 = Fattore di riduzione, da stabilire al massimo in 0.67

(questo valore e' basato sull'esperienza e non intende essere un valore esatto, ma rappresenta un fattore di sicurezza che deve essere adattato alla realta' costruttiva dei componenti realizzati)

S = Fattore di forma, da assumere in relazione alla geometria del manufatto:

= 1 forme assimilabili a condizioni piane

= 0.5 sezioni ad I o scatolari

= 0.4 sezioni sandwich

7.5. DURABILITA' DEL GFRC

Un tema di attualita', e' quello della durabilita' del GFRC, in conseguenza alla diminuzione delle sue caratteristiche nel tempo.

Le due teorie che giustificano la perdita di resistenza e duttilita' nel tempo spiegano il fenomeno rispettivamente secondo le seguenti ipotesi:

a) La fibra di vetro viene attaccata superficialmente da parte degli ioni

idrossili che ne riducono la resistenza a trazione.

b) I prodotti di idratazione del cemento che si originano in ambiente naturalmente umido, penetrano nei fasci di fibre riempiendo gli spazi interstiziali tra i vari filamenti, incrementando l'aderenza tra gli stessi, e conseguentemente infragilendo il composito.

Il processo di infragilimento varia nel tempo nello stesso modo in cui varia nel tempo il processo di idratazione.

In ambiente secco, dove il fenomeno di idratazione cessa, il processo di infragilimento non si manifesta e la resistenza del composito si mantiene nel tempo sui valori ottenuti alle brevi stagionature.

Prove di laboratorio di invecchiamento artificiale hanno documentato per tempi correlabili ai 50 anni, che il valore ultimo di resistenza a flessione AFU non decade mai al disotto del valore EFY (o LOP) ottenuto nelle brevi stagionature.

Questo ha permesso di formulare un criterio di progettazione che limita il valore della tensione di progetto, al valore EFY moltiplicato per il coefficiente di sicurezza pari al massimo a 0,67.

Utilizzando questi criteri, sin dal 1979 sono stati prodotti negli U.S.A. elementi di rivestimento che non hanno mostrato nessuna fessurazione correlabile alla perdita di resistenza ultima del composito.

Le deficienze riscontrate invece in Europa in diversi componenti prodotti da poco tempo, sono da addebitare essenzialmente ai seguenti fenomeni:

a) Non corretta procedura di maturazione

b) Elevati valori di porosità e permeabilità (scarso controllo tecnologico di qualità)

c) Valori di tensione agenti superiori alla resistenza dei materiali, procurata principalmente dalle non corrette modalità di vincolo.

8. CONTROLLO DI QUALITÀ SULLA PRODUZIONE IN GFR

I risultati meccanici di cui il GFR è capace, come esposti in precedenza, per rappresentare dei risultati caratteristici devono derivare da una produzione assoggettata a rigoroso controllo di qualità, che deve verificare tutte le fasi del processo, e cioè:

a) Natura dei materiali

b) Rapporti di miscelazione, e valori di "SLUMP"

c) Tecnologia applicativa

d) Controllo degli spessori dei singoli strati e del manufatto completo.

e) Controllo delle condizioni climatiche di maturazione

f) Controllo della resistenza dei campioni prelevati dalla produzione giornaliera - LOP - MOR - Contenuto di fibra

g) Qualità di forma e superficie.

9. REALIZZAZIONI

Le prime realizzazioni di GFR in Italia risalgono al 1982, con i primi esempi di componenti, quali: fioriere, piccoli elementi con sezione ad "U", pontili galleggianti di grosse dimensioni per porti turistici, etc.

Al di là di queste ed altre soluzioni particolari, i primi elementi di un certo interesse sono rappresentati da pannelli piani del tipo sandwich con anima in PSE

a due pelli, l'esterna liscia da cassero e quella interna fratazzata, dello spessore cadauna di 12 mm su uno spessore totale di 120-150 mm, con dimensioni fino a 6,0 m di altezza, per 1,5 m di larghezza (Soc. SCLAVO-Siena).

Pannelli simili a questi ma con leggere varianti (es. profili di donna incastonati a rilievo nella faccia esterna) imposte da un progetto di architettura postmoderna si riscontrano nel rivestimento dell'edificio della Soc. Editoriale Domus di Milano.

Il primo esempio di produzione altamente industrializzata di GFRC e' rappresentato dai pannelli di tamponamento forniti per edifici di civile abitazione in Algeria e realizzati per conto della C.M.F. spa.

Si tratta di circa 60.000 m² di pannelli sandwich, dello spessore totale di 130 mm, con due pelli, di cui quella esterna in cemento bianco con tessitura a matrice fine e quella interna grigia fratazzata, dello spessore di 12 mm, ed un riempimento interno realizzato parte con uno strato di calcestruzzo alleggerito con PSE (Styropor con densita' di 6000 N/m³) e parte con lastre di PSE dello spessore di 50 mm.

I pannelli delle dimensioni medie di 3,0 * 1,8 venivano prodotti al ritmo di circa 250 m² al giorno.

Una svolta decisiva nella tecnica realizzativa dei componenti di facciata in GFRC e' rappresentata dall'uso nel 1984, per la prima volta in Europa, della tecnologia "Steel stud frame", cioe' dell'utilizzo di un telaio metallico di sostegno sul quale viene agganciata la pelle in GFRC.

Questa soluzione con la maggior liberta' offerta ai movimenti igrotermici e alle forme producibili, lancia il GFRC verso soluzioni architettoniche di notevole interesse ed oltretutto con le pelli di GFRC rivestite esternamente da strati di graniglia (face mix) colorata e sabbiata.

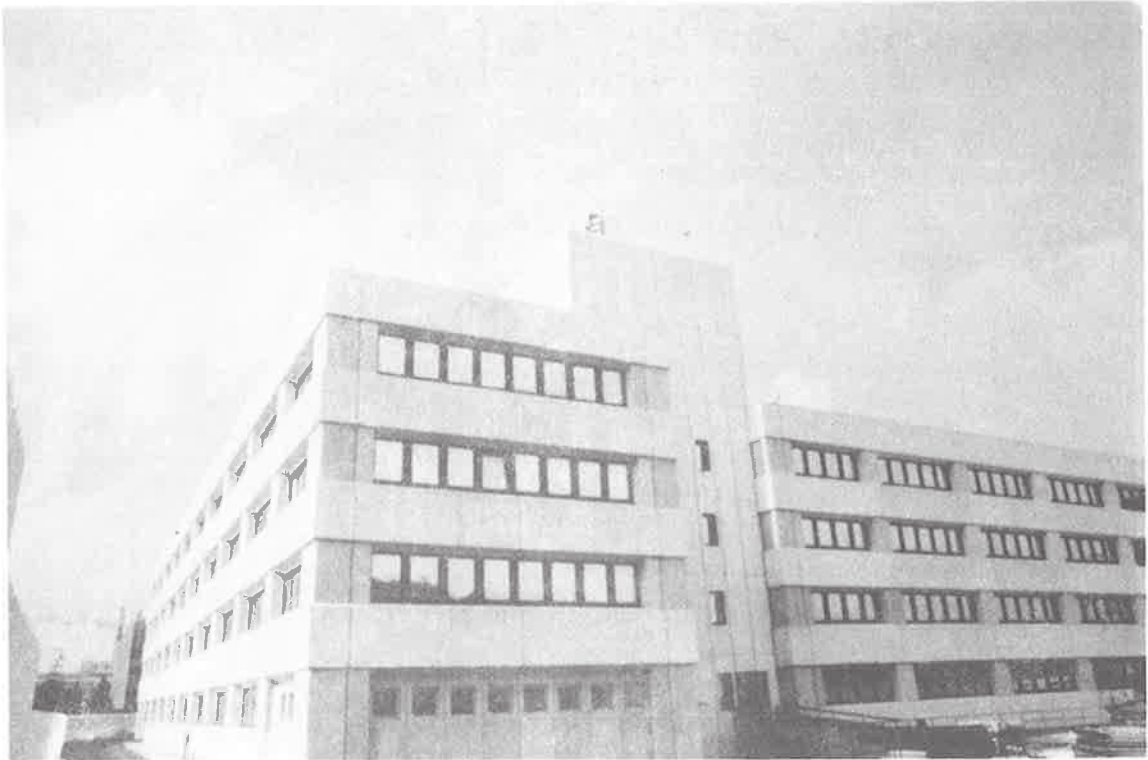
E' con questa tecnologia che vengono realizzati i pannelli in graniglia bianca degli uffici della SELENIA spa - Roma.

Detti pannelli, delle dimensioni di 7,2 * 2,0 m, hanno una forma a "C" ed uno spessore totale della pelle di 25 mm, con un peso medio di 700 N/m².

Con la stessa tecnica vengono realizzati circa 10.000 m² di pannelli per L'ANTIGUAN ROYAL HOTEL nei CARAIBI, per conto della SICEL spa, e i circa 14.000 m² di tamponamento di parte del Nuovo Polo Urbano di Via Giulia - Trieste - per conto della Soc. MORTEO SOPREFIN -

Numerose altre realizzazioni, sia per nuovi edifici che per ristrutturazione di complessi esistenti, dimostrano la versatilita' e la duttilita' del GFRC.

Nelle foto allegate sono riportate alcune significative realizzazioni di facciate per edifici in GFRC.



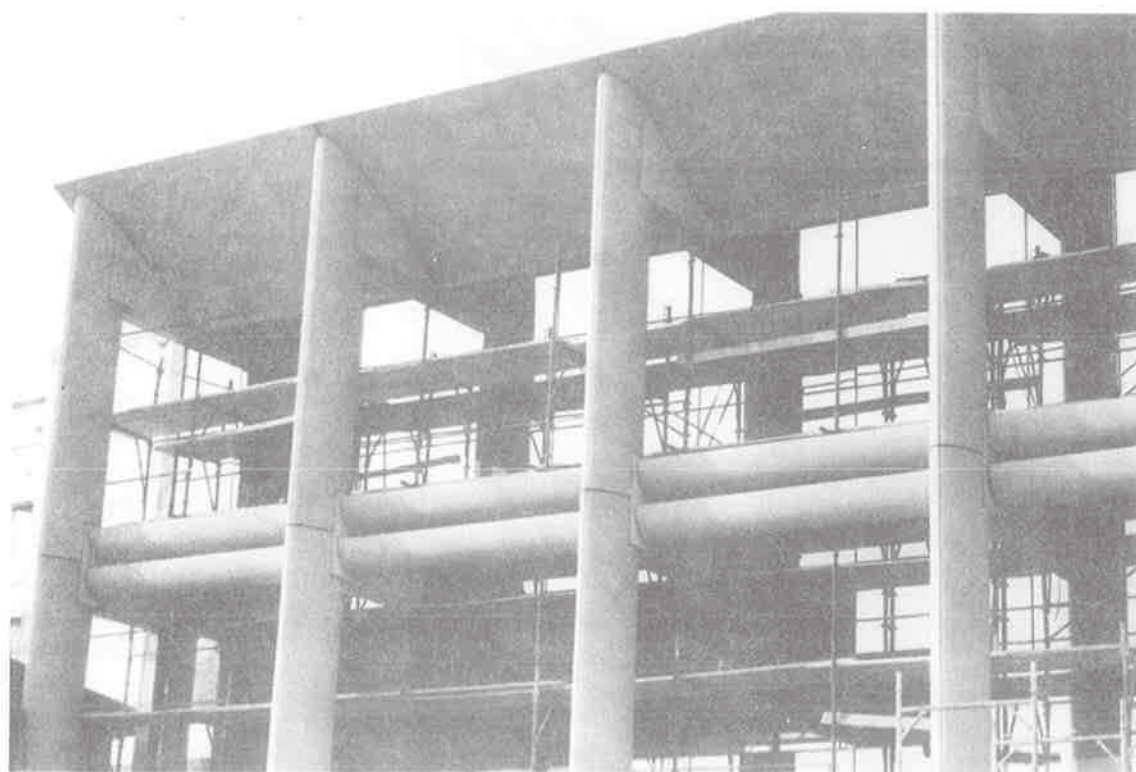
- Edificio Uffici SELENIA SPAZIO - Via Tiburtina ROMA



- Polo Urbano Via Giulia
TRIESTE
- Impr. Morteo Soprefin
- Prog. Arch. F. Luparelli
Ing. C. Capobianco



- Edificio in stile - Via Giannoni CASERTA
- Impr. Bussiness Fincentre - Prog. Studio Ing. Crispino



- Edificio nuova sede Impr. CSP International - MANTOVA
- Impr. CSP International - Prog. Architettura Studio

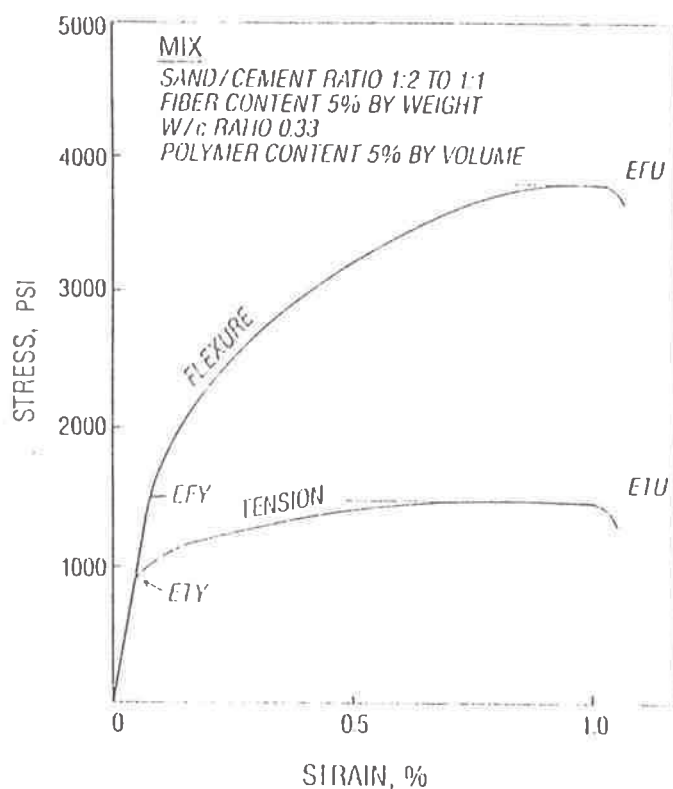


Fig. 1 Representative stress-strain behavior of GFRC subjected to flexure and tension tests at 28 days.

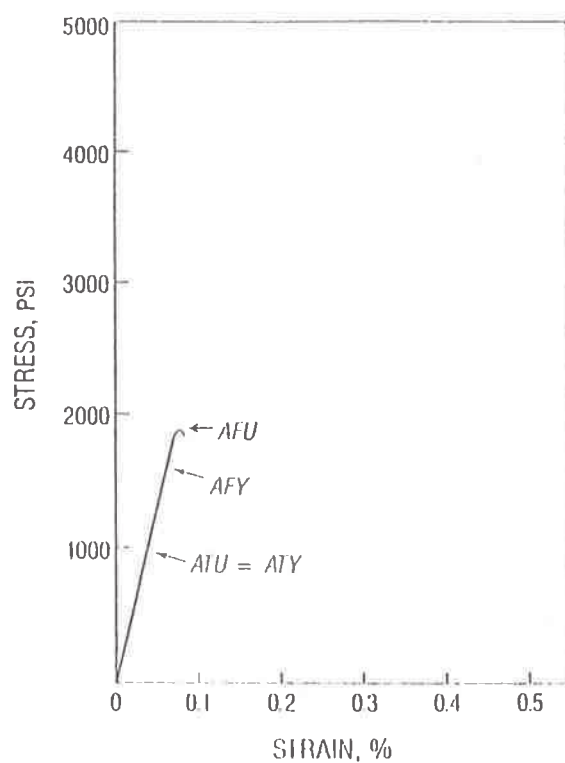
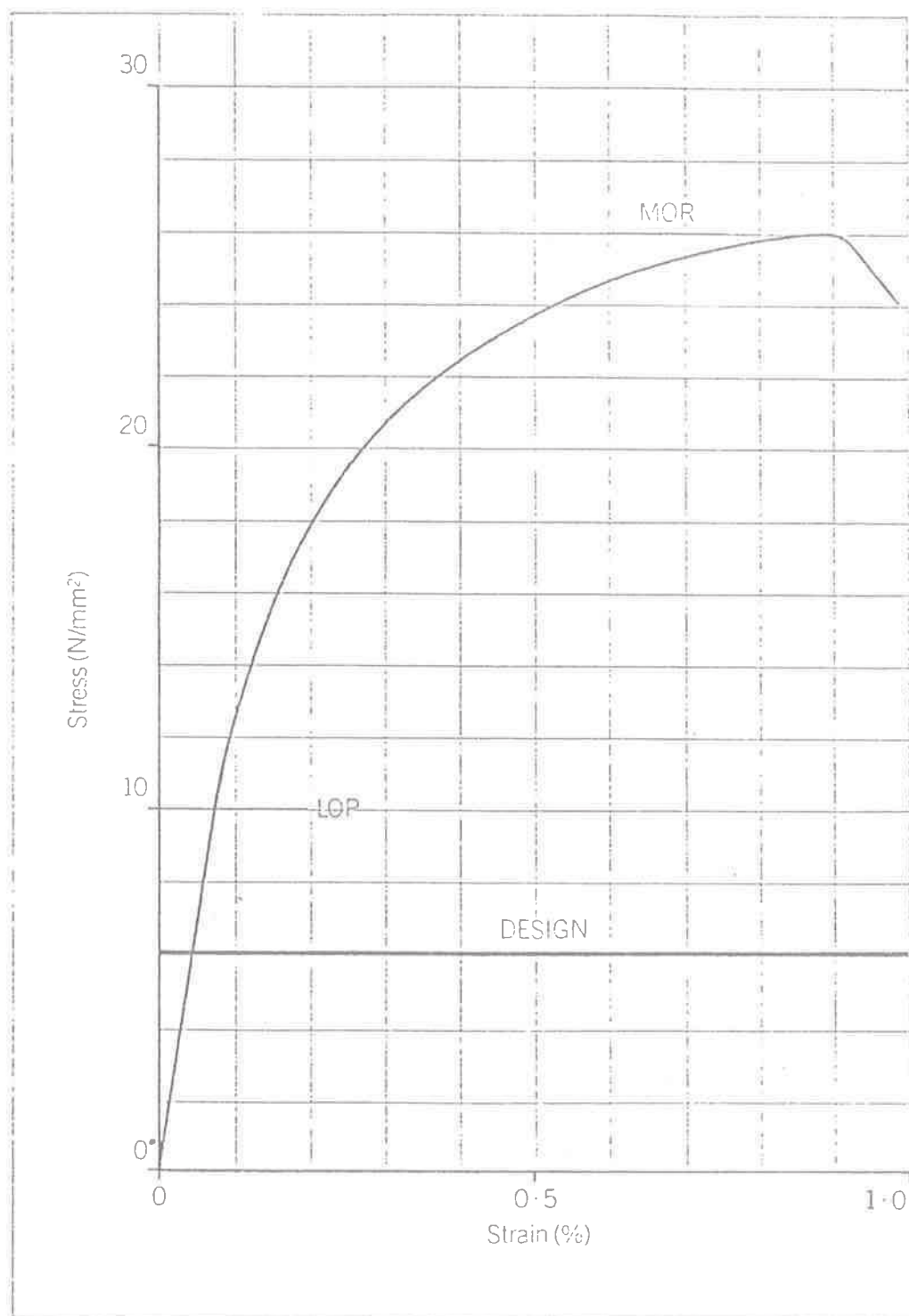


Fig. 2 Representative stress-strain behavior of GFRC subjected to flexure and tension tests after aging (equivalent to 50 years).

**Fig.3**

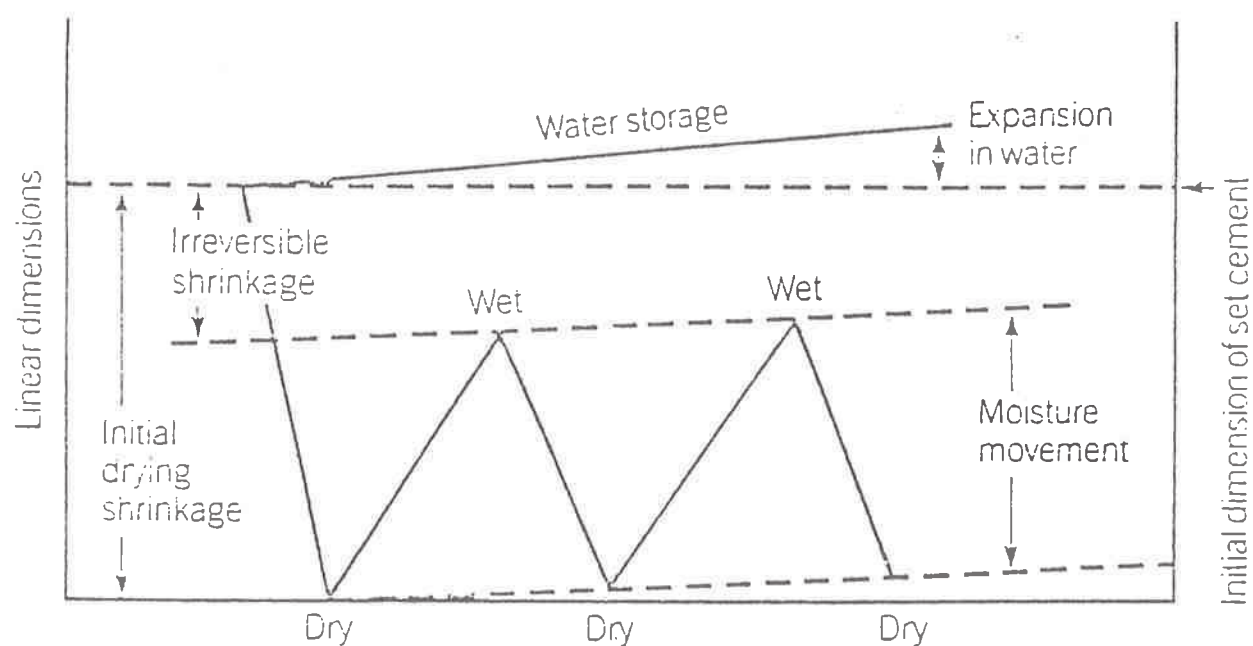


Fig. 4

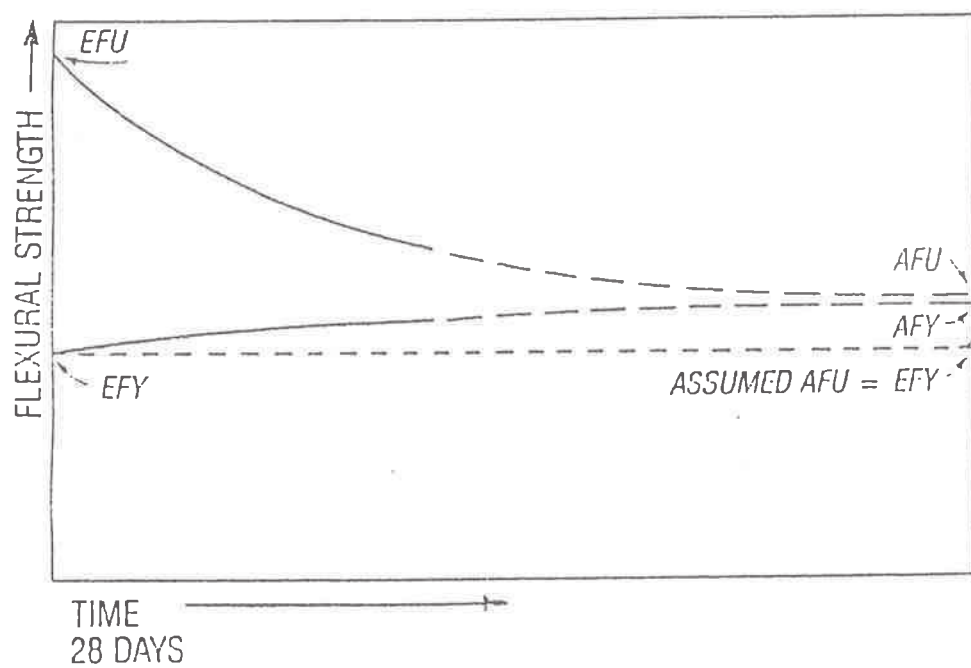


Fig. 5 Long-term GFRC composite strength behavior under typical weathering conditions.

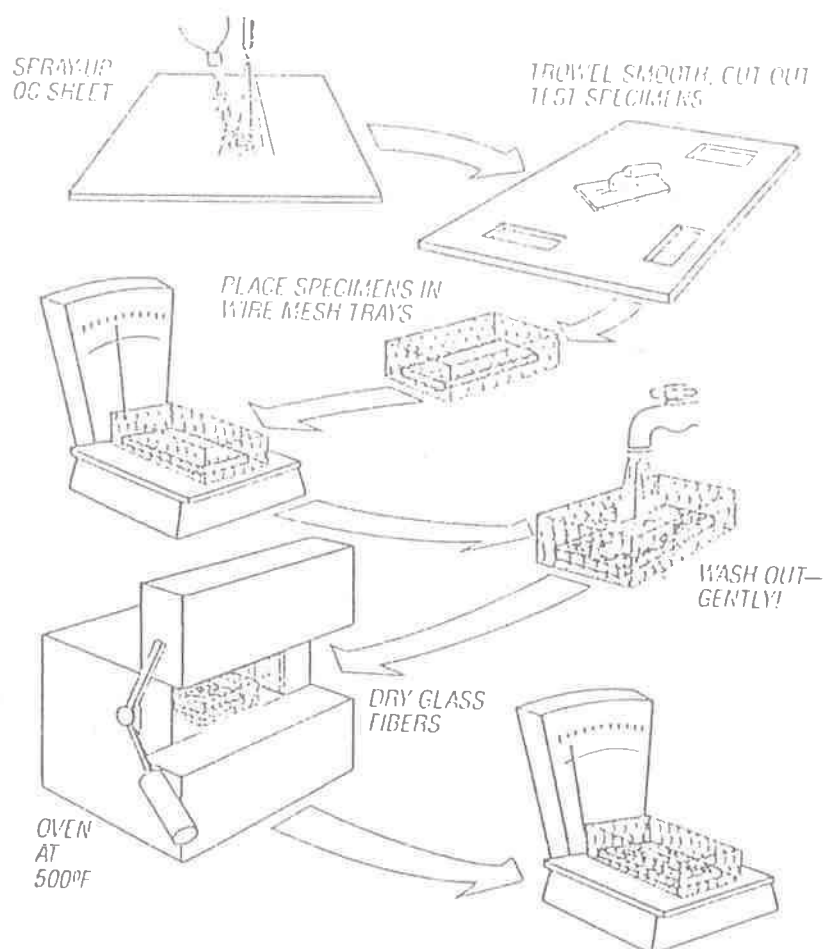


Fig. 6 Procedure for determination of glass fiber content.

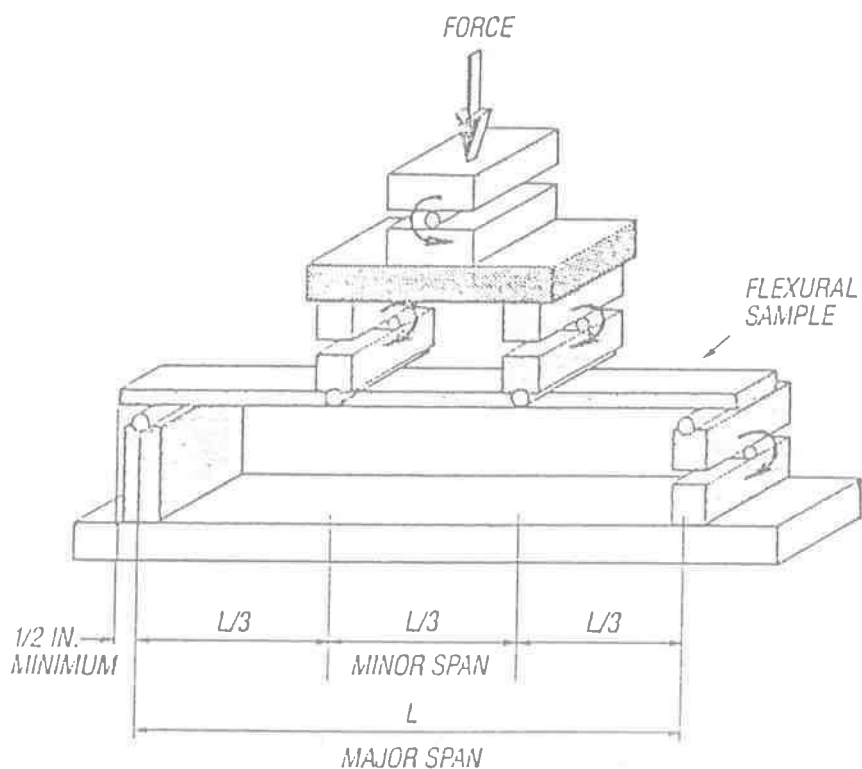


Fig. 7 Loading configuration for flexural testing.

Table 1 Typical Initial Mean Property Values of Cem-FIL GRC

Process		Spray dewatered ⁽¹⁾	Hand Spray ⁽²⁾	Vibration Cast Premix ⁽³⁾
Dry bulk density	(t/m ³)	2.0-2.05	1.9-2.1	1.9-2.0
Compressive strength	N/mm ²	60-100	50-80	40-60
Modulus	kN/mm ²	13-25	10-20	13-18
Impact strength	Nmm/mm ²	11-25	10-25	8-14
Poisson's Ratio		0.24	0.24	0.24
Bending:				
LOP	N/mm ²	9-13	7-11	5-8
MOR	N/mm ²	28-42	21-31	10-14
Direct Tension:				
BOP	N/mm ²	7-9	5-7	4-6
UTS	N/mm ²	10-17	8-11	4-7
Strain to failure %		0.7-1.3	0.6-1.2	0.1-0.2
Shear:				
In-plane	N/mm ²	10-17	8-11	4-7
Interlaminar	N/mm ²	3-5	3-5	N.A.

Notes:

1. Sand:cement ratios of 0:1 to 0.5:1 and water:cement ratio 0.28
2. Sand:cement ratios of 0.33:1 to 1:1 and water:cement ratio 0.33
3. Sand cement ratio of 0.5:1 and water:cement ratio of 0.33

**CONSIDERAZIONI CRITICHE SULL'IMPIEGO COMBINATO DI FIBRE DI
ACCIAIO E DI BARRE AD ADERENZA MIGLIORATA NELLA PROGETTAZIONE
ANTISISMICA DEI NODI DI STRUTTURE INTELAIATE DI CEMENTO ARMATO**

RADOGNA E. Filiberto
Facoltà di Ingegneria. Università di Roma "La Sapienza"

MATERAZZI A. Luigi
Dottore di Ricerca in Ingegneria delle Strutture

VALENTE Gianfranco
Facoltà di Ingegneria. Università dell'Aquila

CONSIDERAZIONI CRITICHE SULL'IMPIEGO COMBINATO DI FIBRE DI ACCIAIO E DI BARRE AD ADERENZA MIGLIORATA NELLA PROGETTAZIONE ANTISISMICA DEI NODI DI STRUTTURE INTELAIATE DI CEMENTO ARMATO

E.F. RADOGNA *
A.L. MATERAZZI **
G. VALENTE ***

- * Professore ordinario di Tecnica delle Costruzioni. Facoltà di Ingegneria. Università di Roma "La Sapienza".
- ** Dottore di Ricerca in Ingegneria delle Strutture.
- *** Professore associato di Tecnica delle Costruzioni. Facoltà di Ingegneria. Università dell'Aquila.

SOMMARIO

Nel presente lavoro vengono discussi criticamente i fondamenti teorici connessi con la simulazione del comportamento del conglomerato fibroso. Viene poi presentata un'applicazione numerica relativa al caso di un nodo trave-pilastro sottoposto a carichi ciclici che conferma la validità del modello utilizzato.

SUMMARY

In the present paper, theoretical aspects related to the simulation of the behaviour of FRC are discussed. A numerical application in the case of a beam-column joint under cyclic loads is presented. The results obtained confirm model's ability to predict experimental behaviour.

1. PREMESSE E SCOPI

Il conglomerato cementizio fibroso con fibre di acciaio ha trovato impiego strutturale autonomo nella realizzazione di elementi bidimensionali piani o curvi, vincolati su una delle superfici laterali in modo continuo (pavimentazione di strade ed aeroporti, scarichi di fondo delle dighe, rivestimenti di gallerie eseguiti con la tecnica dello spritz-beton). Il conglomerato cementizio fibroso armato, ovvero, con terminologia equivalente, il conglomerato cementizio armato additivato con fibre di acciaio, estende il campo di impiego strutturale ai componenti portanti monodimensionali - travi e pilastri. Infatti la ricerca sperimentale ha da tempo mostrato (I) (II) (III) che l'uso di fibre di acciaio nel cemento armato può produrre numerosi effetti benefici: a) ridurre la fragilità in trazione, e quindi migliorare il controllo della fessurazione, b) aumentare la duttilità del conglomerato compresso, c) migliorare la resistenza al taglio delle membrane, d) migliorare l'aderenza fra conglomerato e barre d'armatura, e) esercitare un'azione di contenimento sul copriferro, f) migliorare la resistenza agli urti del conglomerato. Queste qualità possono trovare una utile applicazione nei nodi dei sistemi strutturali di cemento armato formati da reticoli di aste mutuamente connesse, in particolare in quelli dei telai in zona sismica.

In due lavori precedenti (IV) (V) è stato affrontato lo studio dei nodi dei telai antisismici realizzati con l'impiego simultaneo di armature convenzionali da cemento armato e di fibre d'acciaio, con l'intento di ridurre la congestione delle armature tradizionali conseguente alla applicazione di recenti normative sismiche.

E' risultata così confermata la possibilità di adottare disposizioni costruttive più semplici, con minore densità di staffe, rendendo quindi meno difficoltosa la realizzazione dei getti di conglomerato, in virtù della presenza delle fibre d'acciaio.

I positivi risultati ottenuti inducono a ritenere che l'impiego selettivo preconizzato per le fibre sia accolto con favore e che dia luogo a frequenti applicazioni. Ciò induce a proseguire la ricerca in una doppia direzione: l'una, volta al perfezionamento dei modelli di calcolo, l'altra, intesa a sottoporre a verifica sperimentale le previsioni della teoria.

Nel presente lavoro vengono discussi criticamente i fondamenti teorici assunti alla base della simulazione adottata in (IV) e (V) del comportamento del conglomerato fibroso, in armonia con il primo dei due indirizzi citati.

Vengono in particolare passati in rassegna i modelli che considerano separatamente i legami costitutivi di ciascuno dei materiali presenti, con opportune formulazioni dell'aderenza mutua, e quelli che considerano un unico materiale "omogeneo equivalente" nel comportamento meccanico ai materiali effettivi.

Ne risulta la sostanziale conferma delle ipotesi assunte e dei modelli costitutivi utilizzati in (IV) e (V). E' emersa inoltre l'opportunità di svolgere un supplemento di indagine numerica sui nodi con travi alte, trattate in (IV), alla luce delle indicazioni della nota (V), per completare l'esplorazione parametrica in settori di interesse.

2. L'IMPIEGO DEL CONGLOMERATO FIBROSO NELLA REALIZZAZIONE DEI NODI DELLE STRUTTURE ANTISISMICHE DI CEMENTO ARMATO

Le proprietà favorevoli del conglomerato fibroso armato trovano utile applicazione nei nodi dei telai di cemento armato.

La migliorata duttilità del materiale, unita alla sua resistenza a trazione consente di ridurre il quantitativo di staffe trasversali, a parità di prestazioni. Si riduce così la congestione delle armature nella zona del nodo, con evidenti vantaggi in termini di qualità del getto e di semplicità di realizzazione delle armature. Per quanto riguarda le travi confluenti nei nodi il beneficio principale che può derivare dall'uso delle fibre è il miglioramento della resistenza al taglio che consente una riduzione della staffatura tradizionale.

Per quanto riguarda i pilastri, invece, il beneficio predominante consiste nella migliorata duttilità del conglomerato compresso che permette di ridurre le staffe di confinamento.

Nella zona del nodo vera e propria la migliorata resistenza al taglio e il miglior confinamento del conglomerato compresso possono contribuire entrambi a ridurre il quantitativo di armatura trasversale.

3. MODELLI DI SIMULAZIONE DEL COMPORTAMENTO DEL CONGLOMERATO FIBROSO: DUE APPROCCI ALTERNATIVI.

La simulazione del comportamento del conglomerato fibroso presenta gli stessi problemi comuni alla modellazione di qualsiasi materiale

composito, che, per definizione, essendo costituito da almeno due fasi, è "non omogeneo".

Il problema può essere affrontato secondo due approcci alternativi. Il primo conserva la identità delle fasi componenti: esso si avvale in modo intensivo della tecnica degli elementi finiti e si traduce nella discretizzazione puntuale del materiale composito. Ogni materiale costituente, fibre d'acciaio e conglomerato, viene discretizzato separatamente ed a ciascun materiale viene assegnata una legge $\sigma - \epsilon$ appropriata.

Particolare cura viene dedicata alla modellazione dell'aderenza mutua tra fibre d'acciaio e conglomerato mediante appropriati elementi finiti non-lineari.

Poichè la disposizione spaziale delle fibre nell'impasto e poi nel materiale consolidato gioca un ruolo importante, una attenzione particolare deve essere dedicata alla determinazione della posizione delle fibre, che viene generata mediante tecniche numeriche idonee alla simulazione casuale di grandezze stocastiche.

Si perviene così ad un modello numerico molto complesso, secondo un approccio sostanzialmente simile al cosiddetto "numerical concrete" (VI), relativo al conglomerato normale.

Nel secondo approccio il conglomerato cementizio fibroso è descritto come un materiale macroscopicamente omogeneo, isotropo prima della fessurazione e poi ortotropo, a legame costitutivo ciclico non-lineare.

L'andamento della legge $\sigma - \epsilon$ corrispondente è correlato, a parità di altre condizioni, al quantitativo di fibre incorporato nell'impasto.

L'idea di utilizzare un modello di materiale "omogeneo equivalente" in luogo del materiale reale non omogeneo può essere giustificata con la osservazione che le dimensioni delle fibre sono dello stesso ordine di grandezza degli inerti e molto inferiori alle dimensioni ricorrenti degli elementi strutturali. Pertanto appare ragionevole invocare una omogeneità, su grande scala, del materiale.

Rispetto al primo approccio, concettualmente più rigoroso, il secondo presenta numerosi vantaggi operativi.

Innanzitutto esso risulta più facile da calibrare mediante prove sperimentali, che forniscono generalmente valori mediati e globali delle grandezze d'interesse. Inoltre esso si presta a valutazioni numeriche a livello crescente di complessità; da valutazioni approssimate, manuali, a valutazioni più sofisticate che richiedono grande impegno di calcolo. Per questi motivi questo secondo approccio è stato prescelto ed utilizzato anche nelle precedenti comunicazioni e verrà descritto in dettaglio nel seguito.

4. IL CONGLOMERATO FIBROSO COME CONTINUO "OMOGENEO EQUIVALENTE": IL LEGAME $\sigma - \epsilon$ NEL CASO DI SOLLECITAZIONE MONOASSIALE

Sin dal lavoro (IV) è stato necessario precisare l'andamento del legame $\sigma - \epsilon$ del conglomerato fibroso per carichi monotoni nel caso della compressione e della trazione e poi nel caso dei carichi ciclici.

Per quanto riguarda il primo punto le esperienze mostrano che nel ramo ascendente il valore di picco vengono apprezzabilmente influenzati dalle fibre. Cambia invece la pendenza e la estensione del ramo cadente.

Il problema affrontato nella modellazione è stato quello di associare alla percentuale di fibre la corrispondente pendenza, ciò che è stato fatto seguendo la impostazione di Kent e Park (VII) con un'e-

spressione del tipo:

$$\epsilon_{cu} = 2 \cdot 10^{-3} + 0.8 f_{cu} / \text{tg} \theta (V_f) \quad (1)$$

La dipendenza $\theta(V_f)$ è da ricercarsi tramite sperimentazione e ci si è avvalsi del lavoro di Shah (II), che ha anche proposto una legge analitica del legame $\sigma - \epsilon$:

$$\sigma = E \epsilon \quad (2)$$

$$E = (E_{90} E_0)^{1/2} \quad E_{90} = 2(1 - v_f + (v_f - v_c) V_c) \times$$

$$E_0 = \frac{E_c E_f}{V_c E_f + V_f E_c} \quad \times \frac{M_f (2M_c + G_c) - G_c (M_f - M_c) V_c}{(2M_c + G_c) + 2(M_f - M_c) V_c}$$

$$M_c = E_c / 2(1 - v_c) \quad M_f = E_f / 2(1 - v_f)$$

Nel caso della trazione occorre distinguere tra il comportamento in fase non fessurata e quello in fase fessurata. Per quanto riguarda la fase non fessurata dall'esperienza risulta accettabile la legge di Hooke in cui il modulo elastico non è influenzato in modo apprezzabile dalla presenza delle fibre.

Nel caso della fase fessurata in fig. 1 è riportato l'andamento tipico del legame $\sigma - \epsilon$ del conglomerato fibroso ricavato da una prova di trazione monoassiale. A differenza del caso della compressione esso presenta una accentuata discontinuità in corrispondenza del picco, tanto minore quanto più il contenuto di fibre V_f si avvicina al valore critico V_{cr} , quello, appunto per cui la tensione σ_{cr} , raggiunta nel I stadio, si conserva nel II stadio (fase fessurata).

Normalmente però il contenuto di fibre è inferiore a V_{cr} . Occorre inoltre sottolineare che il comportamento in trazione del conglomerato fibroso, dopo la fessurazione, è governato sostanzialmente dall'apertura di una sola fessura principale.

Questa deformazione localizzata conduce ad una definizione non univoca delle deformazioni unitarie, che dipende dalla lunghezza della base di misura.

Per quanto riguarda l'andamento della parte di diagramma corrispondente alla fase fessurata, sono state messe a punto sofisticate trattazioni analitiche dell'andamento della legge $\sigma - \epsilon$ del composito (VIII). Tenuto conto delle considerazioni fatte in precedenza sulla delicatezza della valutazione delle deformazioni unitarie nel composito teso, appare opportuno utilizzare una curva semplificata, perfettamente plastica per il tratto fessurato (fig. 2).

Il valore ϵ_{tu} è dato da (VIII):

$$\epsilon_{tu} = l_f / 16l^* \quad (3)$$

in cui l^* è la lunghezza prescelta come base per la valutazione delle deformazioni unitarie.

Valori ricorrenti di ϵ_{tu} risultano compresi fra 15×10^{-3} e 20×10^{-3} .

Per quanto riguarda la tensione in fase fessurata si può assumere (VIII):

$$\sigma_{tu} = \eta_1 \eta' V_f l_f \tau_u / 2r \quad (4)$$

in cui r è il raggio della sezione trasversale della fibra.

Giova inoltre ricordare che nel tratto elastico non fessurato nella

ipotesi di assenza di scorrimenti tra fibre e matrice il comportamento del composito può essere descritto mediante la cosiddetta legge delle miscele, il cui carattere additivo deriva dalla tacita assunzione di un funzionamento in parallelo:

$$\sigma_c = \sigma_m A_m + \eta_1 \sigma_f A_f \quad (5)$$

in cui σ_c è la tensione di trazione nel composito, σ_m , σ_f , A_m , A_f sono le tensioni e l'aliquota dell'area trasversale della matrice e delle fibre, η_1 è un fattore minore di 1 che tiene conto del fatto che la tensione di trazione nelle fibre diminuisce all'estremità ed è definito come il rapporto fra tensione media e tensione massima nella fibra:

$$\eta_1 = \begin{cases} 0.5 & \text{per } l_f \leq l_c \\ 1 - l_c / 2l_f & \text{per } l_f > l_c \end{cases} \quad (6)$$

dove l_f è la lunghezza della fibra ed l_c è la lunghezza critica, necessaria per raggiungere sotto tensione di aderenza uniforme τ_u la tensione di rottura σ_{fu} della fibra. Allora si ha:

$$l_c = 0.5 \sigma_{fu} d / \tau_u \quad (7)$$

Applicando la legge di Hooke ed ipotizzando che le fibre siano disposte ed orientate in modo casuale, è possibile determinare il modulo elastico del composito in fase non fessurata:

$$E_{ct} = E_{mt} V_m + \eta_1 \eta_0 E_f V_f \quad (8)$$

in cui E_{mt} , E_f , V_m , V_f sono i moduli elastici e le frazioni volumetriche della matrice e delle fibre. Il coefficiente η_0 tiene conto della disposizione spaziale delle fibre e si dimostra essere pari a 0.14.

Per quanto riguarda la ϵ_{cr} che individua il termine del tratto elastico del diagramma σ - ϵ , i risultati sperimentali più recenti (IX) hanno mostrato che la prima fessura compare ad un valore di deformazione leggermente superiore a quello della matrice, e che aumenta all'aumentare del contenuto di fibre.

Per la sua valutazione può essere utilizzata l'espressione proposta da Nathan, Paramasivam e Lee (X):

$$\epsilon_{cr} = \eta_1 \eta_0 V_f (\epsilon_{fp} - \epsilon_{mp}) + \epsilon_{mp} \quad (9)$$

in cui ϵ_{fp} ed ϵ_{mp} sono le deformazioni unitarie al limite di proporzionalità delle fibre e della matrice, $\eta_0 = 0.405$ ed è uguale al fattore proposto da Romualdi e Mandel (XI).

Per quanto riguarda il comportamento sotto carichi ciclici, per il conglomerato fibroso non armato non sono state eseguite, a conoscenza degli scriventi, prove di laboratorio finalizzate alla sua determinazione.

In particolare non è nota l'entità del danneggiamento per scarichi e ricarichi oltre il picco, tanto in compressione quanto in trazione. Tale danneggiamento è comunque superiore a quello del conglomerato normale per il fatto che la chiusura delle lesioni comporta plasticizzazioni localizzate delle fibre che attraversano la lesione stessa con probabile riduzione della ϵ_{tu} che individua il termine del

tratto plastico in trazione della legge $\sigma-\epsilon$.

In mancanza di dati più precisi può essere adottata, almeno in prima approssimazione, la legge di scarico e ricarico di Thompson e Park (XII), opportunamente modificata ed integrata nel campo delle trazioni.

5. ANALISI DELLE TENSIONI NEGLI ELEMENTI STRUTTURALI MONODIMENSIONALI DI CONGLOMERATO FIBROSO ARMATO

Consideriamo ora degli elementi strutturali realizzati con l'impiego di conglomerato fibroso e di barre di armatura ad aderenza migliorata.

5.1. La capacità resistente della sezione pressoinflessa

Il valore delle sollecitazioni esterne (M ed N) associate ad un prefissato valore della curvatura e della deformazione unitaria baricentrica può essere determinato in modo molto semplice a partire dal legame $\sigma-\epsilon$ del conglomerato fibroso e da quello dell'acciaio, pervenendo alla costruzione di curve di interazione (vedi fig. 3).

Le analisi numeriche mostrano comunque che il contributo delle fibre d'acciaio alla capacità resistente per sollecitazioni normali è modesto, particolarmente nel caso di azioni cicliche.

5.2 La capacità resistente a flessione e taglio

Consideriamo la trave di fig. 4, attraversata da una lesione inclinata dell'angolo θ rispetto all'orizzontale.

Per l'equilibrio verticale attraverso la lesione si ha:

$$T = P = T_s + T_f + T_c \quad (10)$$

in cui T_s , T_f e T_c sono gli sforzi di taglio trasmessi dalle staffe, dalle fibre e dal conglomerato.

I contributi T_s e T_c sono quelli usuali nel caso del c.a. T_f è un contributo supplementare dovuto alle fibre che attraversano la lesione e vale:

$$T_f = \sigma_{tu} l_B = \sigma_{tu} B h \cot \theta \quad (11)$$

in cui σ_{tu} è la tensione di trazione massima trasmessa dalle fibre. Al fine di valutare l'importanza del contributo delle fibre consideriamo il seguente esempio numerico.

Sia data una trave di c.a. normale di sezione $B=30$ cm, $H=60$ cm, $h=50$ cm, con staffe $\varnothing 8$ a due bracci disposte ogni 10 cm. Il valore massimo del taglio che può essere trasmesso dalle staffe vale:

$$T_s = 1/10 \times f_y \times 50 \times \cot \theta \quad (12)$$

Nel caso in cui si ipotizzi di incrementare il passo delle staffe, portandolo a 20 cm, si ha una diminuzione di T_s pari a:

$$\Delta T_s = 1/20 \times f_y \times 50 \times \cot \theta \quad (13)$$

Il quantitativo di fibre necessario a compensare questa diminuzione si può ricavare dalla:

$$\eta_1 \eta_2 V_f l_f \tau_u / 2r \times 30 = 1/20 \times f_y \quad (14)$$

Ipotizziamo di utilizzare fibre d'acciaio lisce disposte casualmente

nello spazio lunghe 5 cm ed aventi diametro 0.5 mm, che sia $\tau_u = 30$. kg/cm² ed f_y sia 4400. kg/cm². Poiché $l_f < l_c$ = 33. cm, allora $\eta_1 = 0.5$. Dalla (14) si ricava:

$$V_f = \frac{4400 \times 0.05}{20 \times 30 \times 0.5 \times 0.405 \times 5 \times 30} = 0.012 = 1.2\% \quad (15)$$

La stessa capacità portante può essere ottenuta con staffe $\varnothing 8$ a 2 bracci ogni 20. cm, corrispondenti ad un rapporto volumetrico di:

$$V_s = \frac{2 \times (50 + 24) \times 0.5}{30 \times 60 \times 20} = \frac{74}{36000} = 0.00205 = 0.205\% \quad (16)$$

Come si può vedere l'azione delle staffe è molto più efficiente (circa 6 volte) di quella delle fibre, a parità di materiale. Comunque le fibre d'acciaio sono in grado di fornire un contributo significativo alla capacità portante al taglio, consentendo di ridurre il quantitativo delle staffe.

6. INFLUENZA SULLA ROTTURA A COMPRESSIONE DEL CONGLOMERATO CEMENTIZIO DI TENSIONI DI CONFINAMENTO $\sigma_2 = \sigma_3$

Tutti i criteri di rottura del conglomerato sotto stati di tensione triassiali mostrano l'influenza favorevole delle tensioni di compressione $\sigma_2 = \sigma_3$ sul valore della tensione ideale parallela a σ_1 , ciò che dipende in sostanza dal fatto che in tutti i criteri la superficie di rottura nello spazio $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ è aperta nella direzione dell'ottante negativo.

Si ricordano fra i criteri di rottura più recenti quelli dovuti a Ottosen (XIII) a quattro parametri ed a Buyukozturk (XIV), anch'esso a quattro parametri:

$$\alpha \frac{J_2}{f_{cm}} + \lambda \frac{\sqrt{J_2}}{f_{cm}} + \beta \frac{I_1}{f_{cm}} - 1 = 0 \quad (17)$$

$$F = 3(3I_2 + \sigma I_1 + I_1^2)^{1/2} - \sigma = 0 \quad (18)$$

che sono formulati in termini di invarianti del tensore delle tensioni e del deviatore delle tensioni.

Inoltre, oltre all'aumento di resistenza, si nota anche un aumento della duttilità, intesa nel caso monoassiale come rapporto tra deformazione unitaria ultima e deformazione unitaria di picco.

Nella simulazione numerica la superficie di rottura è stata assegnata per punti e non per via analitica, sulla base dei risultati sperimentali ricavati da Kupfer (XV) nel caso di stati tensionali piani. La realizzazione tecnica dello stato di tensione $\sigma_2 = \sigma_3$ viene fatta in modo classico avvolgendo il calcestruzzo con staffe.

Il modello di calcolo consente di valutare $\sigma_2 = \sigma_3$ in funzione delle caratteristiche della cerchiatura (diametro, passo, ecc..).

L'aggiunta di fibre rappresenta un secondo metodo per migliorare la duttilità del calcestruzzo compresso.

Le fibre, proprio per essere diffuse in modo omogeneo, conferiscono al materiale stesso una resistenza a trazione in grado di migliorarne il comportamento in campo plastico.

A conoscenza degli scriventi non esistono formulazioni analitiche in grado di stabilire in modo quantitativo la equivalenza tra fibre di acciaio e staffe perimetrali ai fini del confinamento del conglomerato.

Tuttavia il confronto è stato possibile utilizzando i risultati della sperimentazione numerica svolta in (IV) e (V).

Nonostante l'equivalenza del risultato - il confinamento del conglomerato - il meccanismo responsabile del fenomeno è sostanzialmente diverso nel caso del conglomerato normale staffato da quello del conglomerato fibroso.

Nel conglomerato normale staffato la propagazione della microfessurazione del materiale sotto carichi di compressione unidirezionali elevati produce un incremento di volume. Questo ultimo si traduce in un aumento di lunghezza delle staffe con corrispondenti sforzi di trazione nelle staffe stesse, che generano delle pressioni distribuite dirette verso il centro della sezione. Queste pressioni tendono ad ostacolare la propagazione ulteriore della microfessurazione ed a generare nel materiale un benefico stato tensionale triassiale.

Nel caso del conglomerato fibroso l'ostacolo alla propagazione della microfessurazione è costituito dalle fibre d'acciaio che attraversano le lesioni. Le forze di trazione delle fibre danno luogo negli elementi di conglomerato microfessurato ad esse aderenti a forze antagoniste, che si oppongono alla dilatazione laterale operando in modo diffuso sulla massa del calcestruzzo.

7. LA SPERIMENTAZIONE NUMERICA INTEGRATIVA : MODELLO, APPLICAZIONI, RISULTATI

In (IV) è stato considerato il caso dei nodi con travi alte, ed in (V) il caso delle travi basse. Nel presente lavoro è svolta una sperimentazione numerica integrativa sui nodi con le travi alte per completare l'analisi di alcuni parametri, fra cui la percentuale di fibre.

Per quanto riguarda il modello numerico si è operato applicando la tecnica degli elementi finiti ed adottando per il conglomerato fibroso il modello di materiale "omogeneo equivalente".

Per quanto riguarda il criterio di rottura, poiché l'analisi è stata condotta nel piano, è stato applicato il criterio illustrato nel §6.

E' stato inoltre consentito al modello di percorrere il ramo cadente della legge σ - ϵ oltre il picco, allo scopo di tener conto in modo realistico dell'effetto delle fibre d'acciaio, definendo convenzionalmente la rottura del conglomerato compresso in termini di deformazione unitaria ultima.

Sul modello strutturale così predisposto è stata condotta un'analisi statica incrementale assegnando una storia di carichi alternati di ampiezza costante sulla trave e sottoponendo il pilastro ad un carico verticale costante di entità pari al 50% del carico ultimo.

Il livello dei carichi alternati è stato scelto con il criterio di produrre lo snervamento delle barre d'armatura della trave.

Per quanto riguarda l'esempio numerico, esso ha considerato il caso di un nodo di telaio piano realizzato con lo stesso quantitativo di staffe usato in (IV) e con l'aggiunta di fibre d'acciaio all'impasto nella misura dell' 1% in volume, anziché dell' 1.67% adottato in (IV). Tale caso è stato considerato per avere un quadro più completo degli effetti delle fibre sul nodo.

I risultati ottenuti sono presentati nelle figg. 5,6,7. Le prime due sono relative allo stato tensionale e deformativo al termine del primo quarto di ciclo, la terza all'andamento del quadro fessurativo al termine del primo ciclo ed al massimo (1/4) del secondo ciclo.

Per quanto riguarda l'andamento delle deformazioni unitarie, si può notare che, nel caso della trave, queste non salgono oltre 2×10^{-3} ,

mentre, nel caso del pilastro, si raggiungono valori più elevati, addirittura del 25×10^{-3} .

Questi risultati confermano la constatazione sperimentale che la migliorata duttilità del conglomerato fibroso può essere in pratica sfruttata solo nei pilastri.

Nel caso delle travi ragioni di equilibrio impediscono al conglomerato compresso di raggiungere valori di deformazione unitaria molto superiori a quello di primo snervamento delle barre di armatura.

Per quanto riguarda lo stato tensionale, le compressioni massime nel conglomerato vengono raggiunte nel primo ciclo di carico. Questo comportamento è dovuto al fatto che si verifica, nei cicli successivi, un progressivo aumento dell'allungamento plastico delle armature, di modo che le fessure nel conglomerato aumentano progressivamente di ampiezza.

Pertanto le tensioni nel conglomerato tendono a diminuire nei cicli successivi (vedi fig. 7).

8. OSSERVAZIONI CONCLUSIVE

Per quanto riguarda il legame costitutivo di materiale "omogeneo equivalente" al calcestruzzo fibroso, il modello adottato nella sperimentazione numerica, malgrado la sua indubbia schematicità, è stato in grado di tener conto dell'effetto del quantitativo delle fibre in modo realistico, come è emerso dal confronto tra risultati teorici e quelli sperimentali.

Per quanto riguarda il procedimento numerico, nell'ambito della tecnica degli elementi finiti, è stato usato un elemento isoparametrico non-lineare.

Sulla base delle considerazioni precedenti è stata svolta una sperimentazione numerica integrativa nel caso dei nodi con travi alte, per estendere e completare il panorama dei risultati acquisiti, per confrontarli con quelli relativi alle travi basse (V).

La precedente disamina ha mostrato che il modello numerico fornisce risultati in accordo con i dati sperimentali disponibili e, per la sua semplicità operativa, si presta ad applicazioni di carattere progettuale.

BIBLIOGRAFIA

- I) HENAGER, C.H.: "Steel fibrous, ductile concrete joint for seismic-resistant structures", ACI, SP53-14, 1977, pp.371-86.
- II) SHAH, S.P.; RANGAN, B.V.: "Fiber reinforced concrete properties", ACI Journal, N° 2, Febr. 1971.
- III) CRAIG, R.J.; MAHADEV, S.; PATEL, C.C.; VITERI, M.; KERTESZ, C.: "Behaviour of joints using reinforced fibrous concrete", ACI, SP-81, 1984.
- IV) RADOGNA, E.F.; MATERAZZI, A.L.; VALENTE, G.: "Il ruolo delle fibre d'acciaio nella realizzazione dei nodi di telai antisismici di cemento armato", Atti delle Giornate AICAP'87, Stresa, 23-25 Aprile 1987.
- V) RADOGNA, E.F.; MATERAZZI, A.L.; VALENTE, G.: "L'accoppiamento delle fibre d'acciaio alle armature tradizionali nel confinamento del conglomerato: applicazioni nel campo delle costruzioni in zona sismica", Atti del 3° Convegno Nazionale "L'Ingegneria sismica in Italia", Roma, 30 Settembre-2 Ottobre 1987.

- VI) ROELFSTRA, P.E.; WITTMANN, F.H.: "Stress analysis of structural members taking complex materials behaviour into consideration", IABSE Colloquium, Delft, Final Report, 1981, pp. 185-95.
- VII) KENT, D.C.; PARK, R.: "Flexural members with confined concrete", ASCE, Journal of Structural Division, Vol. 97, No ST7, July 1971.
- VIII) LIM, T.Y.; PARAMASIVAM, P.; LEE, S.L.: "Analytical model for tensile behaviour of steel-fiber concrete", ACI Materials Journal, July-Aug. 1987, pp. 226-98.
- IX) NAAMAN, A.E.; MOAVENZADEH, F.; MCGARRY, F.J.: "Probabilistic analysis of fiber-reinforced concrete", ASCE, Vol.100, No.EM2, Apr. 1974, pp. 397-413.
- X) NATHAN, G.K.; PARAMASIVAM, P.; LEE, S.L.: "Tensile behaviour of fiber reinforced cement paste", Journal of ferrocement, Vol. 7, No. 2, Oct. 1977, pp. 59-79.
- XI) ROMUALDI, J.P.; MANDEL, J.A.: "Tensile strenght of concrete as affected by uniformly distributed and closely spaced short lenghts of wire reinforcement", ACI Journal, No. 6, June 1964, pp. 657-71.
- XII) THOMPSON, K.J.; PARK, R.: "Moment-curvature behaviour of cyclically loaded structural concrete members", Proc. Instn. Civ. Engrs., Part 2, June 1980, pp. 317-41.
- XIII) OTTOSEN, N.S.: "A failure criterion for concrete", ASCE, Journal of Engineering Mechanics Division, Vol. 103, No. EM4, Aug. 1977.
- XIV) BUYUKOZTURK, C.: "Nonlinear analysis of reinforced concrete structures", Computers & Structures, Vol. 7, No. 1, Febr. 1977, pp. 149-56.
- XV) KUPFER, H.B.; HILSDORF, H.K.; RUESCH, H.: "Behaviour of concrete under biaxial stresses", ACI Journal, Aug. 1969, pp. 656-66.
- XVI) CRAIG, R.J.; MCCONNEL, J.; GERMANN, H.; DIB, N.; KASHAM, F.: "Behaviour of reinforced fibrous concrete columns", ACI, SP81-4, 1984, pp. 69-105.
- XVII) VALENTE, G.: "Characteristics of concrete confined in steel binders", Second Int. Conf. on Computer Applications in concrete, Singapore, 28-29 March 1988.
- XVIII) GAMBAROVA, P.G.; VALENTE, G.: "Smeared crack analysis for fracture and aggregate interlock in concrete", Int. Conf. on Fracture and Damage of Concrete and Rock, Vienna, July 4-6 1988.

- Ricerca svolta col parziale contributo del Ministero della Pubblica Istruzione, Fondo 60%.

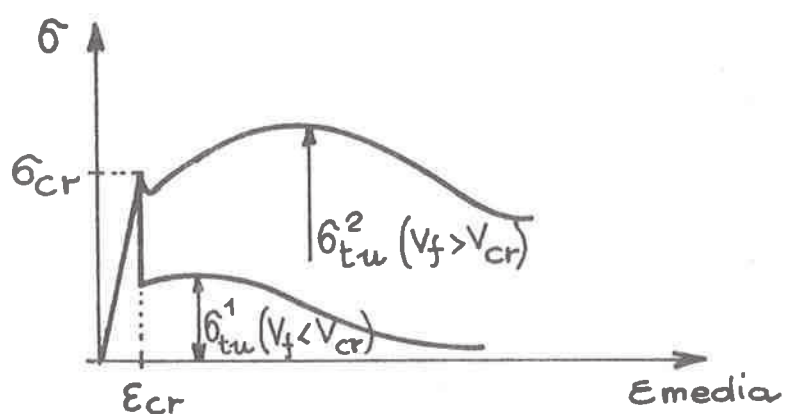


Fig. 1 - Andamento tipico del legame σ - ϵ del conglomerato fibroso ricavato da una prova di trazione monoassiale.

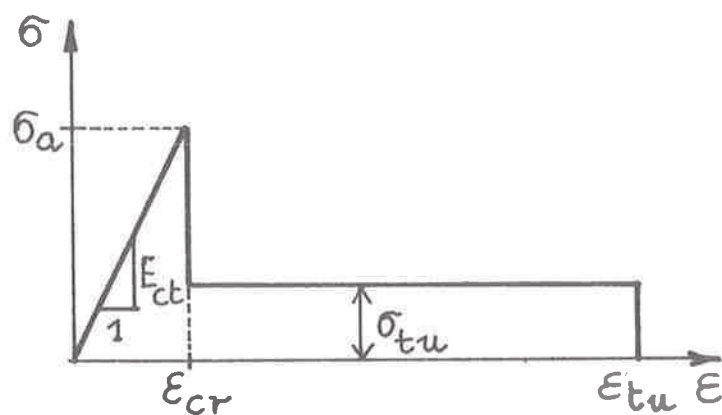


Fig. 2 - Andamento del legame σ - ϵ del conglomerato fibroso teso adottato nel modello numerico.

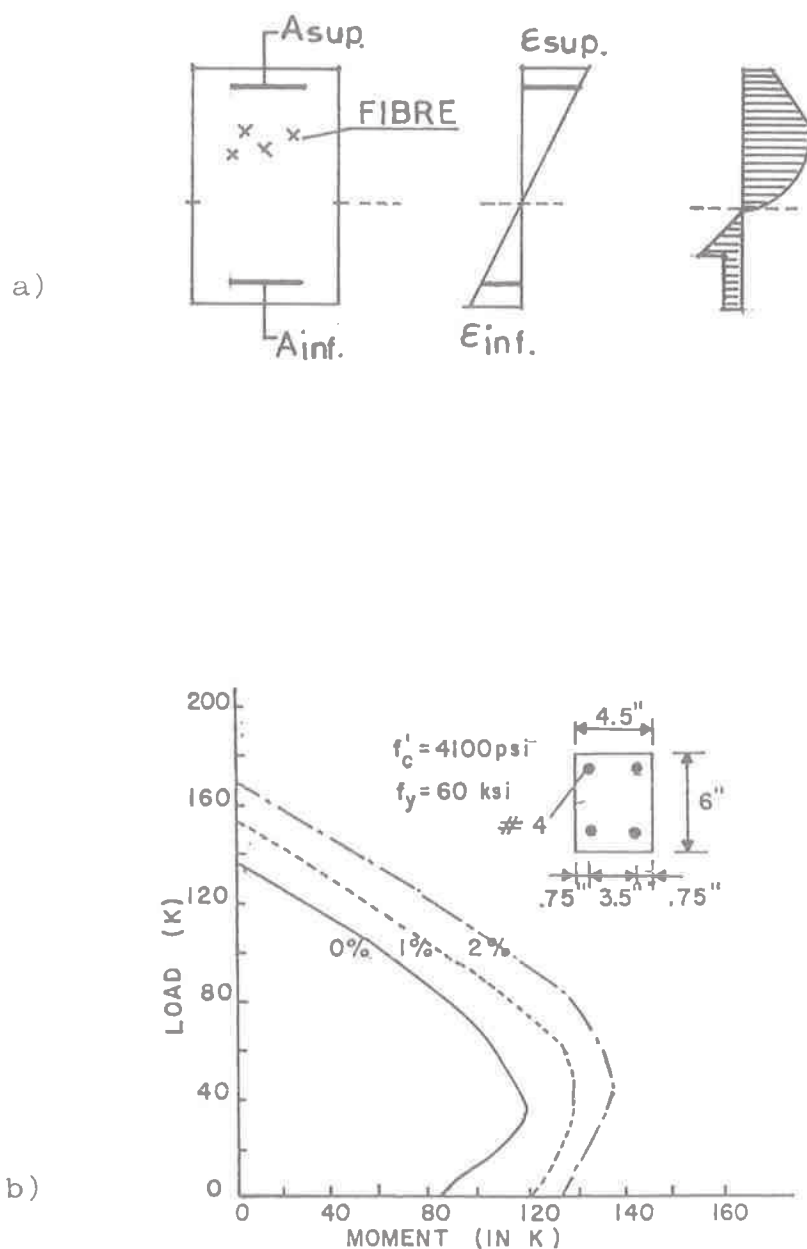


Fig. 3 - La capacità resistente della sezione pressoinflessa di conglomerato fibroso armato. In fig. 3a è riportato l'andamento delle deformazioni unitarie e delle tensioni nel conglomerato fibroso. In fig. 3b (da XVI) è riportata la curva di interazione M-N di una sezione pressoinflessa al variare del contenuto di fibre d'acciaio.

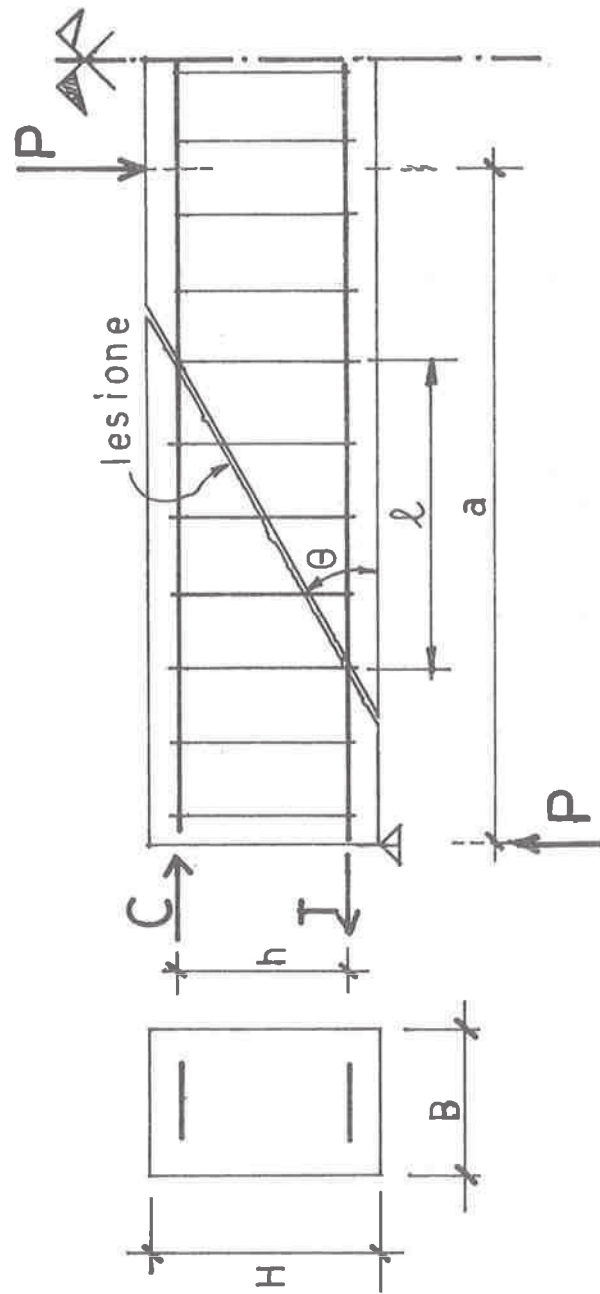


Fig. 4 - La capacità resistente a flessione e taglio.

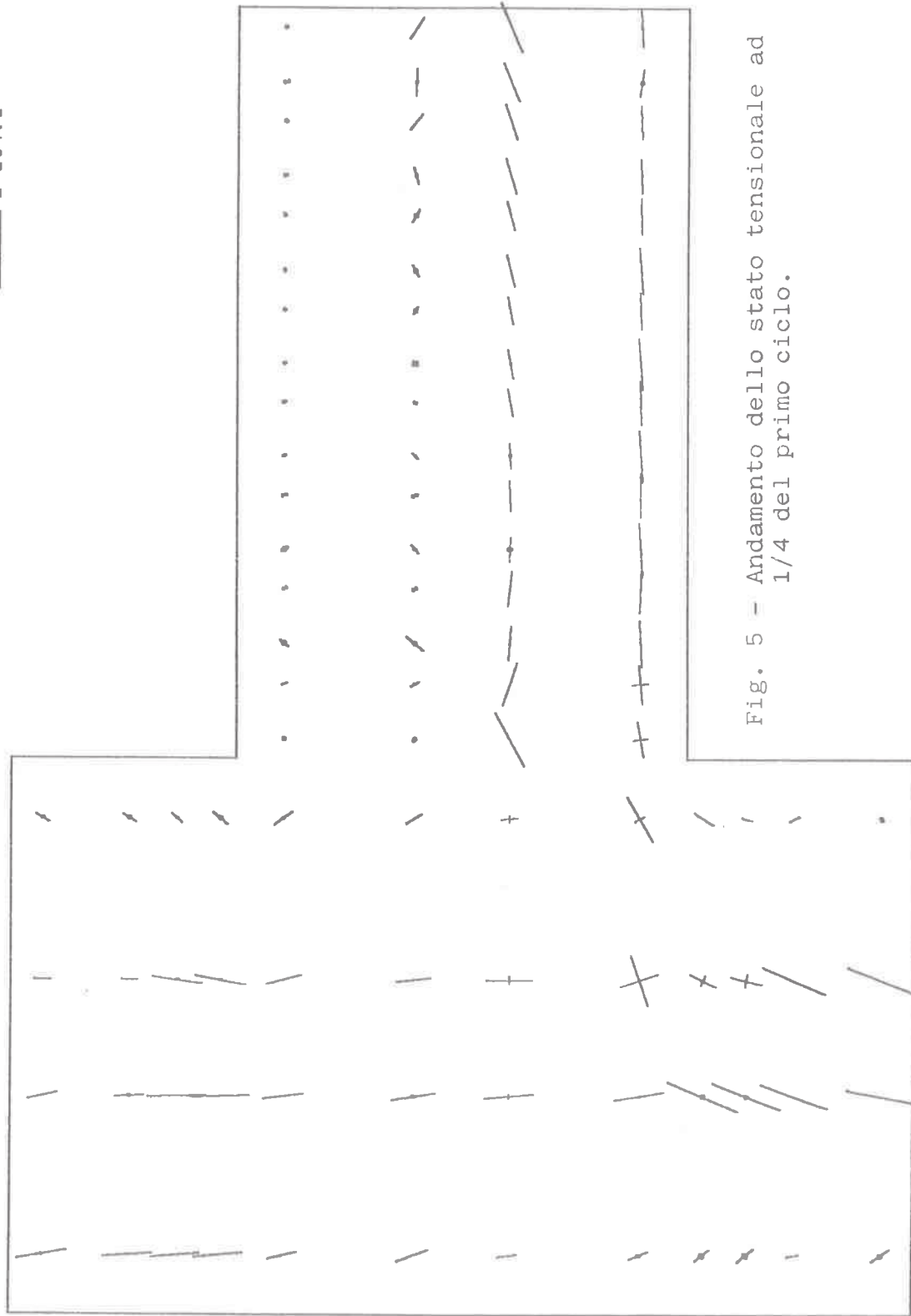
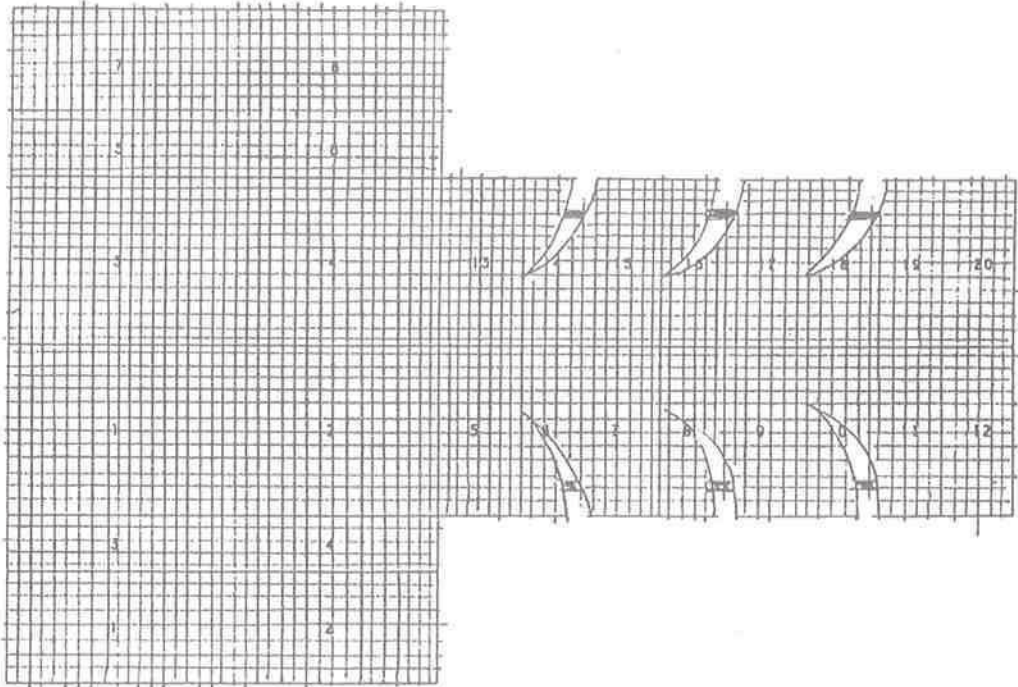


Fig. 5 - Andamento dello stato tensionale ad 1/4 del primo ciclo.



ORIGINAL — GSCALE 0.349



ORIGINAL — GSCALE 0.320
 DEFORMED — GSCALE 4.210
 TIME 30.00 — GMAX 24000

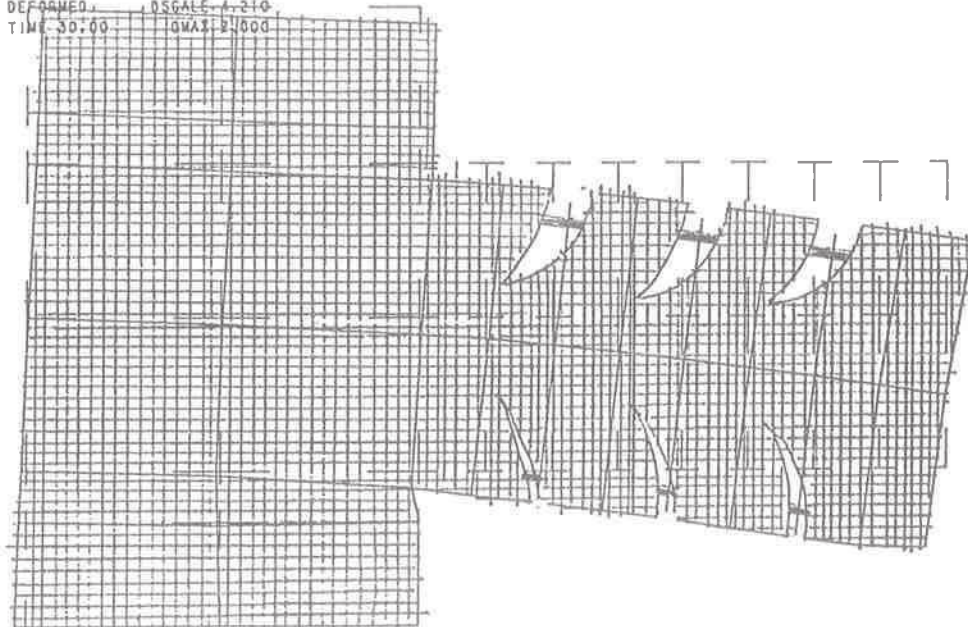


Fig. 7 - Andamento del quadro fessurativo al termine del primo ciclo (7a) ed al massimo del secondo ciclo (7b).