

PROPRIETÀ MECCANICHE E PROCESSO DI FESSURAZIONE DI CONGLOMERATI CEMENTIZI IN CASO DI IMPATTO

E. Cadoni, C. Albertini, K. Labibes

*Commissione Europea, Centro Comune di Ricerca,
Institute for Systems, Informatics and Safety
T.P. 480 - 21020 Ispra (Va), Italy*

SOMMARIO: La conoscenza del comportamento del calcestruzzo ad alte velocità di deformazione è di fondamentale importanza per il calcolo di strutture sollecitate da carichi accidentali quali quelli provocati da forti terremoti, impatti o esplosioni. Il presente studio è stato eseguito con un nuovo tipo di apparecchiatura, Hopkinson Bar Bundle (HBB), che permette l'effettuazione di prove ad alta velocità di deformazione. La nuova tecnica di prova permette di ottenere misurazioni più accurate delle proprietà meccaniche del materiale nel caso di impatto, ed in particolare, di misurare la posizione e l'inizio del processo di fessurazione, la sezione residua resistente durante la propagazione del processo fessurativo nonché di seguire la propagazione sulla sezione del provino.

PAROLE CHIAVE: trazione; prove ad alta velocità; impatto; calcestruzzo; Hopkinson bar; danneggiamento; frattura.

INTRODUZIONE

Nel corso della vita di una struttura in calcestruzzo (armato e non) essa può essere soggetta ad impatti o ad esplosioni, eventi che sono abbastanza rari ma in qualche caso devono essere accuratamente messi in conto. Se si considera infatti particolari strutture quali quelle di contenimento di un reattore nucleare, strutture di difesa sia civile (depositi di preziosi in banche ecc.) che militare (bunker), occorre tenere conto ad esempio di impatti di velivoli o missili così come esplosioni nelle vicinanze o dentro le strutture. Ma vi sono anche altre strutture per le quali gli impatti sono dei carichi funzionali che si verificano nel periodo di servizio della struttura; esempio di questo sono le strutture off-shore le quali sono spesso impattate da navi o da forti onde, i ponti che possono ricevere carichi dinamici di impatto da natanti nelle sue pile o nell'impalcato, strutture in cui ci siano macchine vibranti o che possano esplodere (stazioni di trasformazione in una centrale elettrica), e tc.

Il comportamento del materiale ad alta velocità di deformazione differisce in modo sostanziale da quello in regime quasi-statico.

Presso il Centro Comune di Ricerca di Ispra è in corso una vasta campagna di prove volte alla caratterizzazione dei conglomerati cementizi in un ampio intervallo di velocità di deformazione che va dal caso di carichi quasi statici (10^{-6} s^{-1}) al caso di impatto o esplosione (10 s^{-1}), in trazione, compressione e con storie differenti di carico. La ricerca è condotta in

collaborazione con l'ENEL-CRIS, l'ANPA, il Politecnico di Milano e l'Università di Karlsruhe nell'ambito del programma della Commissione Europea "Human Capital and Mobility". La ricerca ha come scopo quello di colmare una lacuna sul comportamento del calcestruzzo al variare della velocità di deformazione e di calibrare i vari modelli e codici numerici che consentano poi di avere risultati di simulazione più accurati.

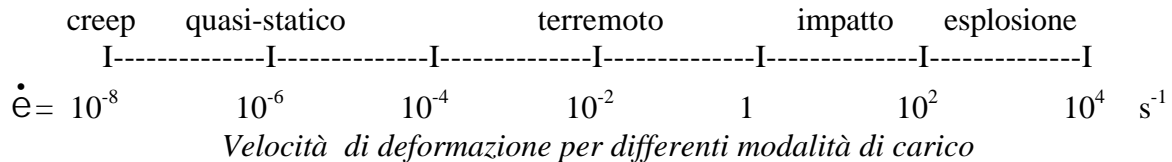
Nel presente lavoro si presenta la tecnica di sperimentazione per le prove a trazione ad alta velocità ed i risultati ottenibili con essa.

STATO DELL'ARTE

La descrizione approfondita dello stato dell'arte esula dallo scopo del presente lavoro si rimanda quindi alla bibliografia, ma non si può comunque fare a meno di inquadrare il problema.

Le proprietà dei conglomerati cementizi sono dipendenti dalla velocità di deformazione e ad esempio la resistenza a trazione risulta essere maggiore ad alte velocità. La spiegazione di questo può essere ritrovata nel fatto che il processo fessurativo in caso di bassa velocità di deformazione è differente. Infatti in questo caso la fessura segue un percorso che è dominato dalla presenza di punti deboli in particolare nell'interfaccia tra aggregato e matrice cementizia o all'interno della matrice stessa. Nel caso di prova dinamica questo non si verifica più, infatti si nota un quadro fessurativo multiplo trovando spesso fessure attraversanti gli inerti.

Risulta quindi necessario stabilire la sensibilità delle caratteristiche dei conglomerati al variare della velocità di deformazione, come risulta dal grafico seguente nelle diverse tipologie di carico:



Le prove di caratterizzazione dei materiali ad alta velocità sono eseguite con diverse tecniche ma è ormai accettato che la tecnica che permette di ottenere i migliori risultati è la barra di Hopkinson. Anche per quanto riguarda il calcestruzzo è stata utilizzata la barra di Hopkinson, ma con qualche limite. Normalmente le barre di Hopkinson utilizzate fino ad ora hanno un diametro pari a 10-20mm che è sufficiente per provare materiali a "grana fine" quali gli acciai per esempio. Negli anni 80 due gruppi di ricerca (Kormeling *et al.* 1980), (Malvern *et al.*, 1986) hanno incrementato il diametro delle barre portandolo a 60 e 75 mm per avere la possibilità di provare calcestruzzo avente aggregati di dimensione massima dell'ordine di 8-10 mm.

Le prove sul calcestruzzo richiedono una dimensione della barra pari almeno a 4-5 volte quella dell'aggregato massimo in modo da ottenere una rappresentazione adeguata del comportamento dell'intero materiale.

LA TECNICA HOPKINSON BAR BUNDLE

La barra di Hopkinson sviluppata nel nostro laboratorio è diversa da quelle utilizzate normalmente (Albertini e Montagnani, 1979-1992). L'impulso meccanico è generato dal rilascio dell'energia elastica immagazzinata in una barra di acciaio in tensione e non dall'impatto di un proiettile. La forma delle barre utilizzate è quadrata. Nel 1950 Morse ha dimostrato come la propagazione dell'onda longitudinale lungo le barre di sezione quadrata sia la stessa che in quelle di forma cilindrica.

Lo schema di funzionamento del sistema è riassunto in Figura 1 (Cadoni *et al.*, 1995)

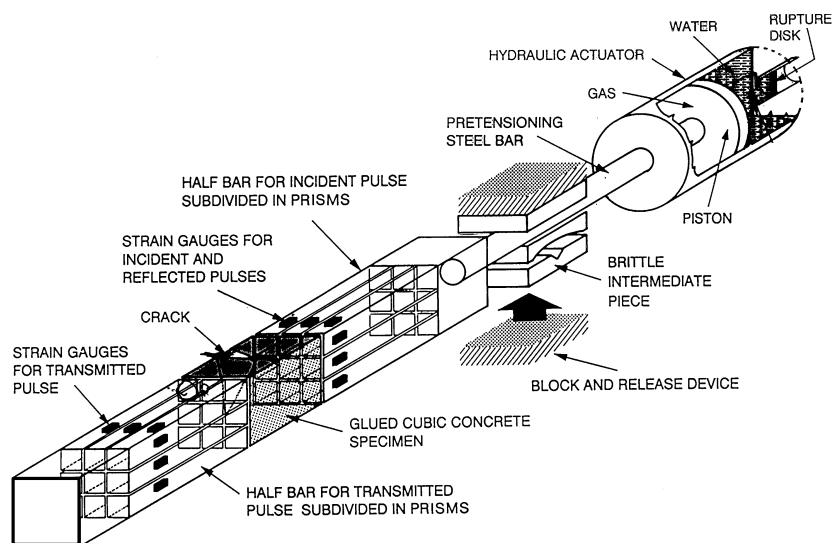


Figura 1 : Sistema di prova per piccoli provini

Come si può vedere in Figura 1 il sistema consiste di una barra di pretensione, di una barra denominata incidente, di una barra detta trasmessa e del provino inserito tra queste due ultime. Tramite un martinetto idraulico e attraverso un sistema di bloccaggio la barra di pretensione viene sollecitata a trazione, quindi, in essa viene immagazzinata l'energia elastica. Nel momento in cui cessa l'azione del sistema di bloccaggio, che può essere la rottura del bullone fragile nella piccola barra (60mm) o la rottura del bullone esplosivo nella grande macchina (200mm), viene generato un impulso rettangolare che si propaga lungo le barre incidenti, il provino e lungo la barra trasmessa. La lunghezza delle barre incidenti e trasmesse dipende dal tempo necessario alla rottura del provino, nel senso che la rottura deve avvenire prima che le onde riflesse lo raggiungano. Utilizzando barre di pretensione, incidenti e trasmesse di dimensione sufficiente a che ciò non si verifichi si ottengono segnali puliti che permettono lo studio del provino senza la sovrapposizione di effetti dovuti a riflessioni di onde dagli estremi delle barre. Le due barre incidenti e trasmesse sono strumentate con delle stazioni di misurazione della deformazione (estensimetri elettrici a resistenza), le quali ci forniscono i segnali delle onde incidenti, riflesse e trasmesse. In

Figura 2 è mostrato un esempio di registrazione di segnali provenienti dalla barra incidente e trasmessa.

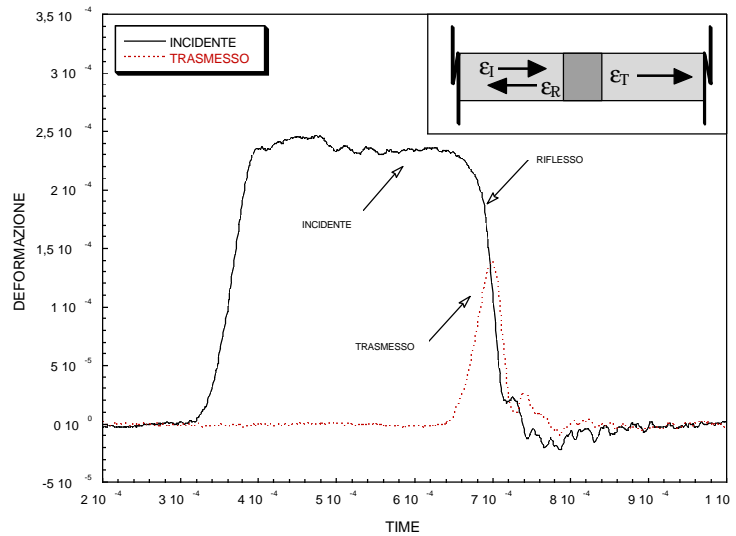


Figura 2: esempio di segnali ottenuti dalle stazioni di estensimetri incidente e trasmesso

La teoria di propagazione uniassiale dell'onda elastica è applicabile lungo una barra avente dimensioni trasversali piccole rispetto alla lunghezza d'onda dell'impulso applicato. Nel nostro caso la dimensione trasversale è di qualche decimetro mentre l'impulso risulta di alcuni metri. Inoltre il fatto che il provino sia sufficientemente corto, così che il tempo di attraversamento dell'onda elasto-plastica in esso risulti molto piccolo in paragone alla durata dell'impulso applicato, garantisce che le sue facce siano in equilibrio. Da qui scaturiscono le espressioni dello sforzo e della deformazione media del provino (Davis,1948) (Lindholm, 1971):

$$s(t) = E \frac{A}{A_s} e_T(t) \quad (1)$$

$$e(t) = -\frac{2C_0 \int_0^t e_R(t) dt}{L_s} \quad (2)$$

$$\dot{e}(t) = -\frac{2C_0}{L_s} e_R(t) \quad (3)$$

dove: E = modulo di elasticità della barra; A = area della barra; A_s = area del provino; C₀=velocità dell'onda elastica; L_s = lunghezza del provino; t = tempo; ε_T = misurazione deformazione nella barra trasmessa; ε_R=misurazione dell'onda riflessa come deformazione nella barra incidente.

Il provino ha sempre le stesse dimensioni delle barre alle quali è collegato a mezzo di una colla bi-componente con resistenza massima a trazione pari a 30 MPa. Le barre sono state costruite in alluminio perché il suo modulo trasversale non è lontano da quello del calcestruzzo.

Per ottenere più dettagli sui valori locali di sforzo e di deformazione del provino ed evitare problemi di dispersione dell'onda nonché per minimizzare gli effetti di differenze di contrazione laterale tra alluminio e calcestruzzo la barra è stata suddivisa longitudinalmente mediante elettroerosione in 25 piccole barre. In questo modo abbiamo ottenuto 25 coppie di barre elementari di Hopkinson.

Le venticinque barre elementari della barra da 200mm sono state completamente strumentate con degli estensimetri elettrici a resistenza. Preso atto delle difficoltà di ordine pratico del posizionamento degli estensimetri delle barre più interne si è scelto, per la barra da 60 mm, di strumentare solo le barre superficiali superiori, rimandando quindi l'analisi locale alle prove sui cubi da 200mm.

Il sistema viene utilizzato in un grande intervallo di velocità di carico tipici di carichi statici, terremoti e impatti ottenuti con diversi modi di applicazione del carico. Le prove statiche e quelle a bassa velocità sono realizzate mediante un sistema idropneumatico escludendo, ovviamente, il sistema di bloccaggio. Le prove ad alta e media velocità invece vengono eseguite con la tecnica descritta precedentemente e che brevità chiameremo d'ora in poi Hopkinson.

Il sistema di barre di Hopkinson per la realizzazione delle prove di dimensione maggiore è descritto in Figura 3. Esso è installato presso la Large Dynamic Testing Facility (Albertini e Montagnani, 1979) del Centro Comune di Ricerca di Ispra.

L'energia elastica viene immagazzinata nei trentadue cavi d'acciaio ad alta resistenza aventi una lunghezza di 100m. I cavi sono bloccati ad una estremità, attraverso un sistema collegato sia a terra mediante un bullone esplosivo sia al sistema Hopkinson, e successivamente vengono messi in tensione a mezzo di una stazione di pompaggio posta all'altra estremità. Il carico massimo attualmente raggiungibile dal sistema è di 5 MN, al quale corrisponde una velocità di impatto di circa 40 m/s. La velocità di deformazione dipende dal valore del precarico nei cavi, dalla lunghezza del provino oltre che dal tempo di rottura del bullone esplosivo, limitato nel caso dei materiali fragili. Il bullone esplosivo viene costruito con foro trasversale all'interno del quale si posiziona una carica esplosiva di plastico di circa 7g, in modo da avere una salita del carico molto ripida (~100 μ s). Nella figura sono anche stati indicati dei respingenti che hanno il compito di bloccare il sistema dopo la prova in modo da evitare che esso vada ad urtare direttamente sulla struttura dell'installazione, che porterebbe inevitabilmente ad un suo danneggiamento.

Il sistema multibarra consente quindi di effettuare una analisi locale del materiale. Durante la fase di propagazione della fessura ciascuna coppia di barre elementari di Hopkinson, le quali sono strumentate individualmente con degli estensimetri, misurano gli impulsi incidenti, riflessi e trasmessi ϵ_I , ϵ_R , ϵ_T propri della porzione di sezione da loro interessata cioè di quella porzione di provino che si trova tra le due barre elementari

Più in dettaglio, durante il processo fessurativo ciascuna coppia di barre può trovarsi in una delle seguenti situazioni:

1. Le barre hanno tra loro una porzione di provino integro non interessato da processo fessurativo, si registra quindi un impulso riflesso ε_R di piccola entità e un grande impulso trasmesso ε_T .

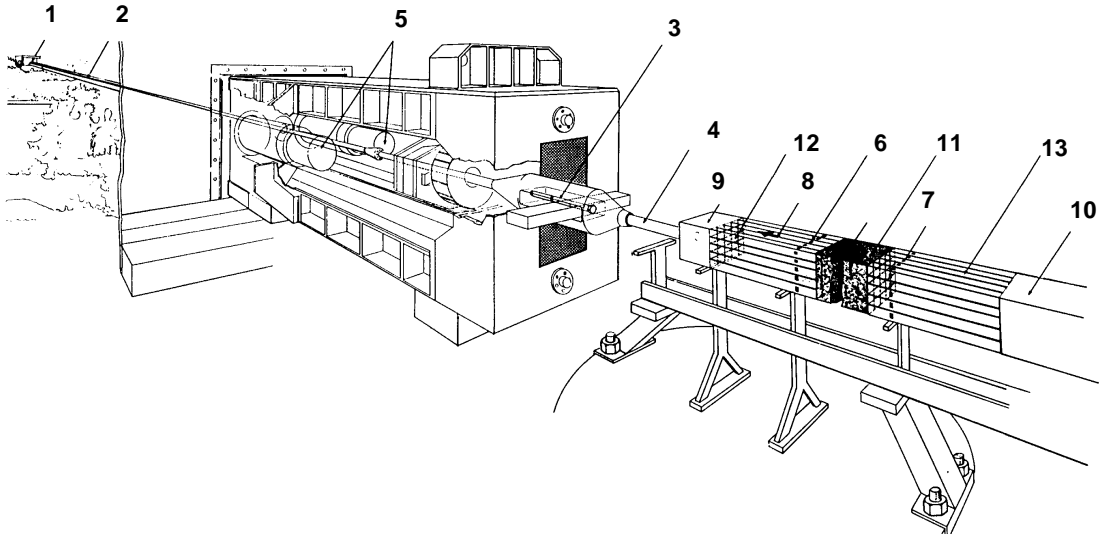


Figura 3: Descrizione dell'apparecchiatura di prova: 1. martinetti idraulici; 2. cavi di pretensione (100m); 3. bullone esplosivo; 4. barra di carico; 5. respingenti idraulici; 6. estensimetri per la misura di impulso incidente e riflesso; 7. estensimetri per la misura di impulso trasmesso; 8. direzione del carico; 9. barra di input; 10. barra di output; 11. provino; 12 barre elementari input; 13. barre elementari output.

2. Le barre hanno tra loro una porzione di provino completamente fessurato, si registra quindi un impulso riflesso ε_R di uguale ampiezza ma segno contrario all'impulso incidente ε_I , mentre quello trasmesso tende a decrescere fino a zero.
3. Le barre hanno tra loro una porzione di provino parzialmente fessurato quindi si registra una situazione intermedia tra le due precedenti.

PROPRIETÀ MECCANICHE AD ALTA VELOCITÀ

Nella corrente progettazione strutturale la resistenza a trazione del calcestruzzo viene trascurata. Ogni elemento strutturale interagisce con essa perchè la resistenza a trazione influenza il comportamento a fessurazione, le proprietà di legame con le barre di rinforzo e del comportamento a taglio. Ma in particolare essa è importante quando la struttura è soggetta ad impatto, infatti in questo caso si ha una propagazione di un'onda di compressione che può essere riflessa come onda di trazione portando al collasso del materiale.

Le prove eseguite hanno mostrato una notevole sensibilità della resistenza a trazione con l'aumentare della velocità di deformazione. In Figura 4 è mostrato un esempio della variazione delle caratteristiche meccaniche ad alta velocità. Durante le sperimentazioni si è

notato un aumento nelle capacità deformative del materiale nonché della maggior quantità assorbita di energia durante la rottura.

In termini di resistenza a trazione si è osservato un aumento medio della resistenza, rispetto alla resistenza misurata in regime quasi-statico, di circa 450% per micro-calcestruzzi e del 250% per normali conglomerati cementizi. I risultati integrali saranno presto pubblicati su rivista scientifica

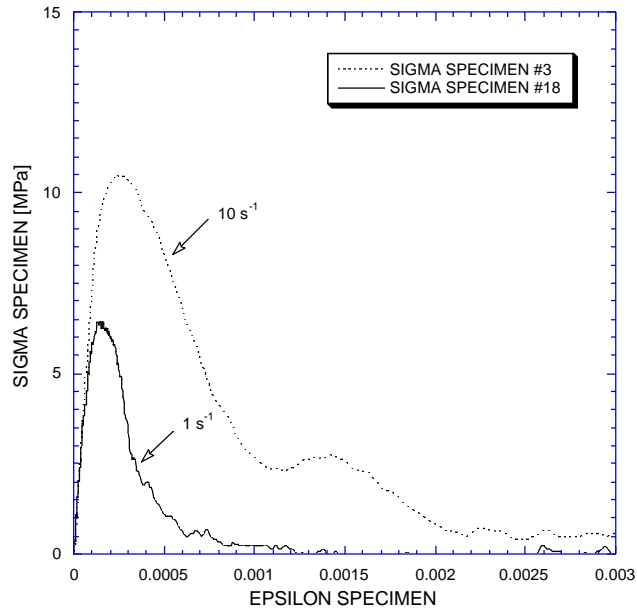


Figura4: Confronto dei diagrammi sforzo-deformazione con due velocità di deformazione.

PROCESSO DI FESSURAZIONE DINAMICA

Le informazioni che si ottengono dalla multibarra (HBB), Figura 5, possono essere utilizzate per una analisi locale del materiale (Albertini *et al.*, 1996 a,b). In particolare si descrive il modo e la crescita del processo fessurativo nella sezione del provino.

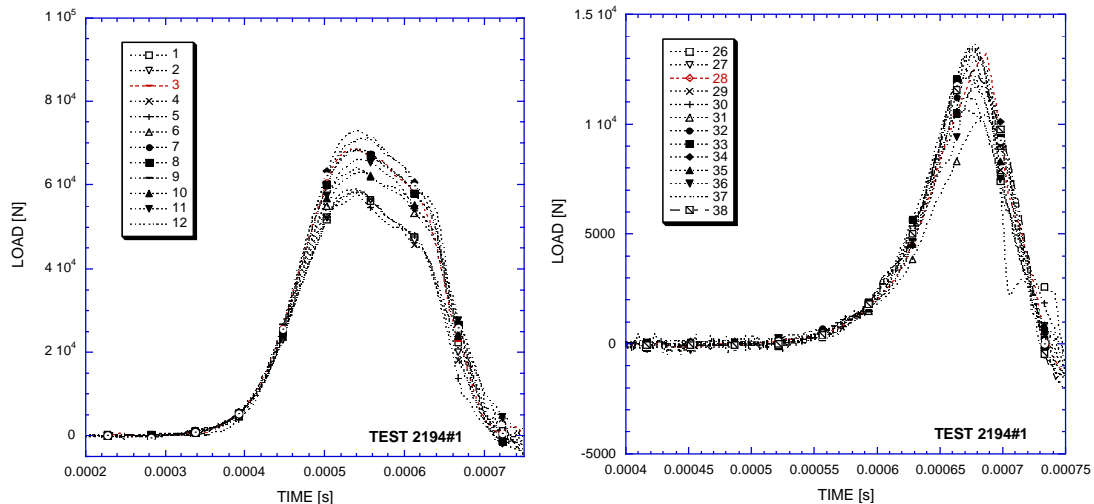


Figura 5: registrazione dei segnali ottenuti nella Hopkinson Bar Bundle in ingresso ed uscita

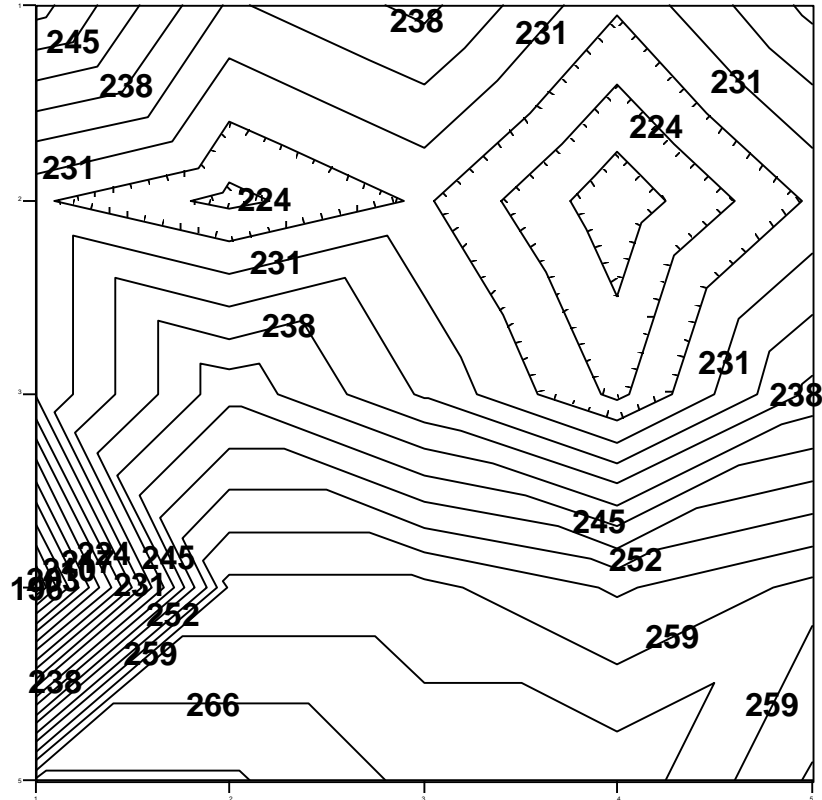


Figura 6: Quadro fessurativo con indicazione della posizione della fessura nel tempo (μs)

Nell'analisi dei segnali della HBB per lo studio del processo fessurativo dinamico si fa l'ipotesi (confermata dagli esperimenti) che la parte di provino tra due barre elementari è completamente fessurata quando il corrispondente valore del impulso trasmesso è zero o equivalentemente quando l'impulso riflesso è uguale ed opposto all'incidente. Da queste misure si ottiene il quadro fessurativo e la posizione della fessura a tempi diversi. In Figura 6 sono indicate le isocrone (in μs) di posizione cioè la localizzazione della fessura nel tempo. Si può notare che la fessura parte simultaneamente da più posizioni, si ha quindi una multiattivazione. Le fessure crescono così velocemente da non avere il tempo di scegliere la strada con minimo dispendio di energia e queste allora passano anche attraverso gli aggregati. Da qui la spiegazione delle resistenze più alte.

CONCLUSIONI

Attraverso le coppie elementari di barre di Hopkinson risulta possibile misurare momento per momento: la sezione effettivamente reagente; il volume di materiale sotto sforzo; il quadro fessurativo globale del provino; la velocità di propagazione della fessura. Questi parametri permettono di costruire il reale diagramma sforzo-deformazione del materiale fino alla completa separazione in due parti del provino.

L'incremento della velocità di deformazione causa un aumento della resistenza meccanica del calcestruzzo, esso risulta più pronunciato per piccole dimensioni dell'aggregato. La valutazione della sezione residua resistente durante la propagazione del processo fessurativo permette una più accurata misura del ramo di softening mostrando una maggior capacità di assorbire energia da parte del materiale. Si è osservata una multiattivazione delle fessure durante le prove ad alta velocità.

BIBLIOGRAFIA

Albertini, C., Montagnani, M., 1992, European Patent #92243378.1

Albertini, C., Cadoni, E., Labibes, K., 1996a, "Study of the mechanical properties of plain concrete under dynamic loading", Proc. VIII SEM, Nashville, 10-13 June.

Albertini, C., Cadoni, E., Labibes, K., 1996b, "Dynamic mechanical behaviour of large concrete specimen by means of a bundle Hopkinson bars", Proc. 2nd Intern. Symp. on Impact Engineering, 2-6 sept., Beijing, China, pp. 214-219.

Albertini, C., Montagnani, M., Testing Technique in Dynamic Biaxial Loading, (Institute of Physics, London, 1979) Conf. Ser. No. 47, 25-34.

Cadoni E., Labibes K., Economou S., Schnabel W., Albertini A., 1995, "Studio sperimentale della risposta meccanica di conglomerati cementizi in un grande intervallo di velocità di deformazione", Technical Note No. I.95.171, STI, JRC-ISPRA pp.53.

CEB, 1988, "Concrete structures under impact and impulsive loading", Bull. N.187.

Davies, R.M., 1948, "A Critical Study of the Hopkinson Pressure Bar", Phil. Trans. Roy. Soc., London, Ser. A, 240-375.

Kormeling, H.A., Zielinski, A.J., Reinhardt, H.W., 1980, "Experiments on concrete under single and repeated uniaxial impact tensile loading", Rep. N. 5-80-3, Delft University of Technology, Stevin Laboratory.

Lindholm, U.S., 1971, "High Strain Rate Test", Tech. of Met. Res. (J. Wiley), Vol.5.

Malvern, L.E. et al., 1986, "Dynamic Compressive Strength of Cementitious Materials", Mat. Res. Soc. Symposium, Vol.64, 119-138.

Morse, R. W. J. Acoust. Soc Amer., 20, 833, (1948). Ibid., 22, 219, (1950).