

# L'energia di frattura del laterizio: due metodi per la sua determinazione

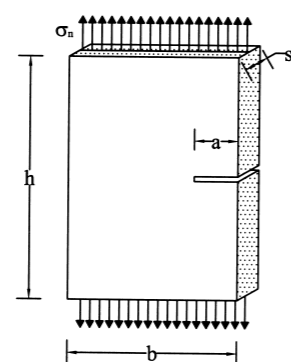
Si propongono e confrontano due metodi che, grazie alla loro semplicità operativa, consentono la misura dell'energia di frattura anche in laboratori non particolarmente attrezzati

A partire dagli anni Settanta, anche per il laterizio si registra una serie di studi avente come scopo precipuo una migliore caratterizzazione del materiale, soprattutto dal punto di vista meccanico.<sup>[1], [2], [3], [4]</sup> Questa necessità, ancora oggi alquanto sentita, trae origine soprattutto dal fatto che spesso il laterizio è utilizzato nel contesto strutturale insieme ad altri materiali, col che una sua esauriente caratterizzazione meccanica risulta indispensabile (al pari degli altri materiali) per descrivere in modo corretto la realtà fisica. Tra le diverse grandezze meccaniche studiate, l'energia di frattura (ovvero l'energia necessaria per produrre nel materiale lo sviluppo d'una superficie unitaria di frattura) ha recentemente acquistato una notevole importanza, anche in ragione del fatto che un suo elevato valore rende il laterizio molto più idoneo ad assolvere alcune funzioni strutturali.<sup>[5]</sup> Si pensi ad esempio ai solai in laterizio armato in cui, come noto, il laterizio può esercitare, insieme con il conglomerato armato, un'importante funzione meccanica collaborante. Tale funzione sembra essere più efficace proprio in ragione di un elevato valore dell'energia di frattura del laterizio. La valutazione dell'energia di frattura può essere affrontata secondo diversi metodi, l'applicazione dei quali richiede complessità di prove e fatica d'indagine alquanto variabili.<sup>[5], [6]</sup> Lo scopo principale di questo lavoro è l'applicazione di due metodi che permettono la valutazione dell'energia di frattura del laterizio attraverso l'uso di semplici attrezzature da laboratorio. Il confronto tra i due metodi, la cosiddetta "Size Effect Law" (S.E.L.)<sup>[7]</sup> e l'"Effective Crack Model" (E.C.M.),<sup>[8], [9], [10]</sup> ha permesso di evidenziare le loro rispettive peculiarità e le loro diverse caratteristiche di applicazione. Va inoltre osservato che, per una più accurata definizione delle caratteristiche meccaniche, la determinazione dell'energia di frattura del laterizio è già da oggi prevista da alcune normative operanti in sede internazionale. La ricerca di metodi che possano effica-

cemente consentire tale determinazione è non solo un auspicio per un progresso della nostra normativa tecnica, ma anche un necessario approfondimento di quelle conoscenze scientifiche sempre più utili per una corretta prassi progettuale.

**Determinazione dell'energia di frattura del laterizio con il metodo "Size Effect Law" (S.E.L.)** La prova consiste nel sottoporre a trazione monoassiale provini prismatici intagliati (fig. 1). Tali provini sono stati ricavati dai setti orizzontali di blocchi di dimensione 38x20x25 cm in laterizio, non collaboranti, utilizzati per l'alleggerimento dei solai.

Per indagare la presenza di effetti dimensionali e per applicare agevolmente il metodo in questione, sono stati scelti 5 gruppi di elementi (tab. 1), ciascuno costituito da 10 provini geometricamente identici. Ogni gruppo si differenzia per i diversi valori di altezza e base dei provini; il rapporto fra queste due grandezze è comunque costante ( $h/b=1,5$ ), al pari del rapporto fra lunghezza d'intaglio e base ( $\alpha=a/b=0,3$ ).



1. Prova di trazione monoassiale su provino intagliato.

| Tabella 1 Caratteristiche geometriche dei provini esaminati |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|
| Gruppo  | b (cm) | h (cm) | s (cm) |
| I   | 4      | 5      | 0,7    |
| II  | 6      | 9      | 0,7    |
| III   | 8      | 12     | 0,7    |
| IV  | 12     | 18     | 0,7    |
| V   | 16     | 24     | 0,7    |

L'intaglio è stato realizzato nel primo tratto della sua lunghezza con una fresa diamantata di 2 mm di spessore, mentre nel tratto terminale, per renderlo ben acuto, con un seghetto di spessore 0,5 mm. La macchina di prova consiste essenzialmente in una leva di primo genere (fig. 2) che permette di amplificare opportunamente il carico applicato, secondo il rapporto:

$$P_1 = P \cdot \frac{b_m}{b_r} = 24,8594 \cdot P \quad (1)$$

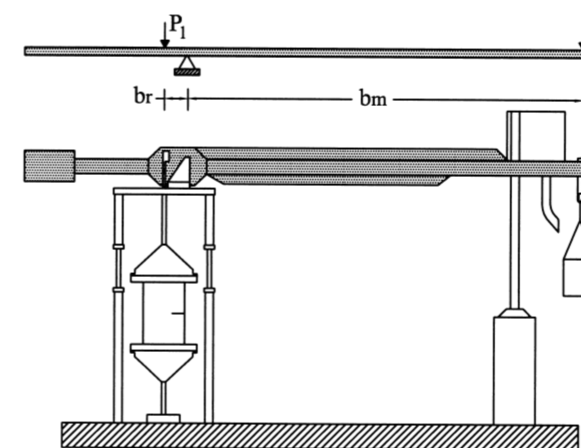
In fig. 3 si mostrano alcuni provini appartenenti ai gruppi esaminati.

Secondo la teoria classica della meccanica della frattura lineare<sup>[11]</sup> esiste la seguente relazione fra il coefficiente d'intensificazione degli sforzi e la tensione nominale agente:

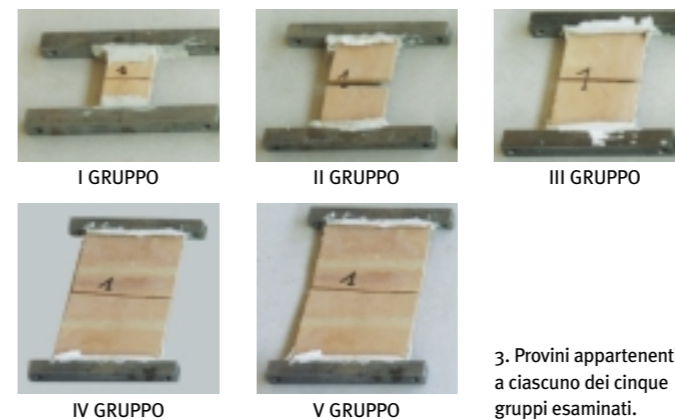
$$K_{Icr} = \sigma_n \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot F(\alpha) \quad (2)$$

dove  $F(\alpha)$  è una grandezza adimensionale (chiamata fattore geometrico o di forma) dipendente dalla geometria del provino e dal carico applicato.<sup>[12]</sup> Poiché il valore di  $\alpha$  è pressochè costante per tutti i provini esaminati ( $\alpha \approx 0,3$ ), tale funzione assumerà sempre lo stesso valore, pari a:

$$F(\alpha) = 1,12 - 0,213 \alpha + 10,55 \alpha^2 - 21,72 \alpha^3 + 30,39 \alpha^4 = 1,6653 \quad (3)$$



2. Attrezzatura (con il relativo schema statico) utilizzata per l'applicazione del metodo S.E.L.

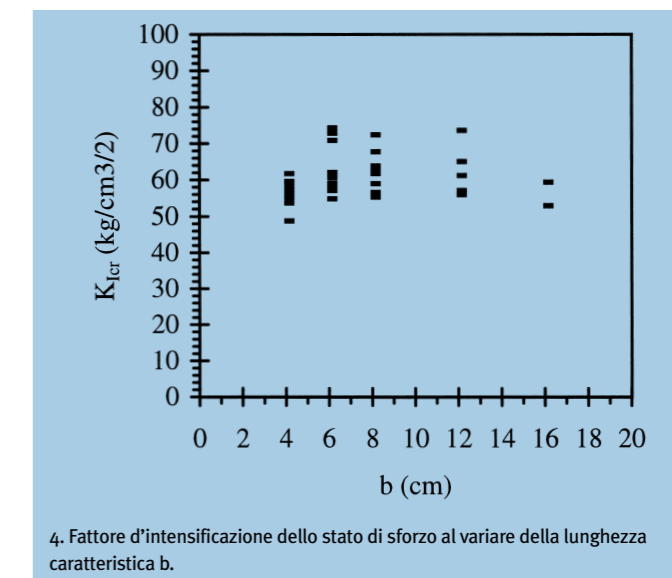


3. Provini appartenenti a ciascuno dei cinque gruppi esaminati.

L'equazione (2) può essere riscritta nel seguente modo:

$$\sigma_n = \frac{K_{Icr}}{\sqrt{\pi \cdot a} \cdot F(\alpha)} = \frac{K_{Icr}}{\sqrt{\pi \cdot \alpha \cdot b} \cdot F(\alpha)} = \frac{K_{Icr}}{\sqrt{b} \cdot g(\alpha)} \quad (4)$$

dove  $g(\alpha) = \sqrt{\pi} \cdot \alpha \cdot F(\alpha)$ . Dall'equazione (4) si desume che se il valore di  $K_{Icr}$  rimane costante al variare delle dimensioni del provino,  $K_{Icr}$  può esaurientemente caratterizzare il materiale ed il suo comportamento a frattura. La tensione nominale  $\sigma_n$  varia allora, in accordo con la meccanica della frattura lineare, in maniera inversa alla radice quadrata dell'altezza b. Per una prima verifica di ciò, si sono riportati in fig. 4, per i provini esaminati, i valori di  $K_{Icr}$  in funzione dell'altezza b.



Dall'esame della figura si può notare un appena accennato andamento a campana dei valori di  $K_{Icr}$ , a sottolineare così, per il laterizio esaminato, un sostanziale rispetto delle leggi di frattura elastica lineare prima ricordate. In altre parole, i diversi valori dell'altezza b non influenzano di fatto il comportamento a frattura del laterizio preso in esame, comportamento che risulta così, come detto, di tipo linearmente elastico e per il quale quindi può scriversi<sup>[11]</sup>:

$$G_f = \frac{K_{Icr}^2}{E} \quad (5)$$

avendo indicato con  $G_f$  ed E, rispettivamente l'energia di frattura ed il modulo di elasticità longitudinale. Viceversa, un andamento a campana molto più pronunciato (simile a quanto osservato, ad esempio, in<sup>[13]</sup>) avrebbe significato per i provini esaminati una crisi "mista", legata tanto alla resistenza ultima del materiale, quanto alla sua tenacità a frattura. Come ben illustrato in<sup>[13]</sup>, questa duplicità di comportamento è di fatto dovuta, oltre che alle caratteristiche meccaniche del materiale, alle diverse entità dell'altezza b dei provini.

Dalle equazioni (4) e (5) si ottiene:  $\sigma_n = \frac{\sqrt{E \cdot G_f}}{g(\alpha)\sqrt{b}}$  (6)

da cui:  $\frac{1}{\sigma_n^2} = A \cdot b$  ;  $A = \frac{g^2(\alpha)}{E \cdot G_f}$  (7)

Poiché i fenomeni che danno luogo alla formazione di una fessura interessano una porzione di materiale non solo circoscritta all'apice dell'intaglio, la grandezza  $g(\alpha)$ , funzione della sola lunghezza d'intaglio  $a$ , può non caratterizzare pienamente il rilascio d'energia elastica immagazzinata. Per questo motivo in<sup>[14], [15]</sup> si è suggerito di sostituire la funzione  $g(\alpha)$  con la funzione  $f(\alpha, \xi)$ , essendo  $\xi = d_0/d$  e  $d_0$  una dimensione caratteristica del materiale. Sviluppando tale funzione in serie di Mc Laurin attorno al valore  $\xi=0$  (fatto, questo, connesso a strutture molto grandi o a strutture in cui la "zona di frattura" sia trascurabile e pertanto risulti valida la meccanica della frattura lineare), fermandosi al primo ordine di tale sviluppo si ottiene:

$$f(\alpha, \xi) = f_0(\alpha) + f_1(\alpha)\xi \quad (8)$$

essendo  $f_0(\alpha) = g^2(\alpha)$ ,  $f_1(\alpha) = \partial f(\alpha, \xi) / \partial \xi|_{\xi=0}$

Considerando quindi questa nuova funzione, si riescono a mettere in conto possibili effetti dimensionali che allontanano il comportamento del materiale da quello classico della meccanica della frattura lineare.

Sostituendo l'equazione (8) nella equazione (6) si ricava:

$$\sigma_n = \frac{\sqrt{\frac{E \cdot G_f}{f_1 \cdot b_0}}}{\sqrt{1 + \frac{b}{\lambda \cdot b_0}}} = \frac{B f_{ct}}{\sqrt{1 + \frac{b}{\lambda \cdot b_0}}} \quad (9)$$

in cui  $\lambda = f_1(\alpha) / f_0(\alpha)$ . Dall'equazione (9) si evince che per strutture molto grandi in cui  $b / (\lambda \cdot b_0) \gg 1$ , il legame fra la tensione nominale e la lunghezza caratteristica diventa di tipo quadratico inverso, come previsto dalla classica meccanica della frattura lineare. Al contrario, per strutture molto piccole in cui  $b / (\lambda \cdot b_0) \ll 1$ , si entra nell'ambito della teoria dell'analisi limite. Nelle situazioni intermedie si ritrova dunque il comportamento di tipo "misto" prima ricordato. Elevando a quadrato l'equazione (9), si ricava:

$$\sigma_n^2 = \frac{B^2 \cdot f_{ct}^2}{1 + \frac{b}{\lambda \cdot b_0}} = \frac{B^2 \cdot f_{ct}^2}{\frac{\lambda \cdot b_0 + b}{\lambda \cdot b_0}} = \frac{B^2 \cdot f_{ct}^2 \cdot \lambda \cdot b_0}{\lambda \cdot b_0 + b} \quad (10)$$

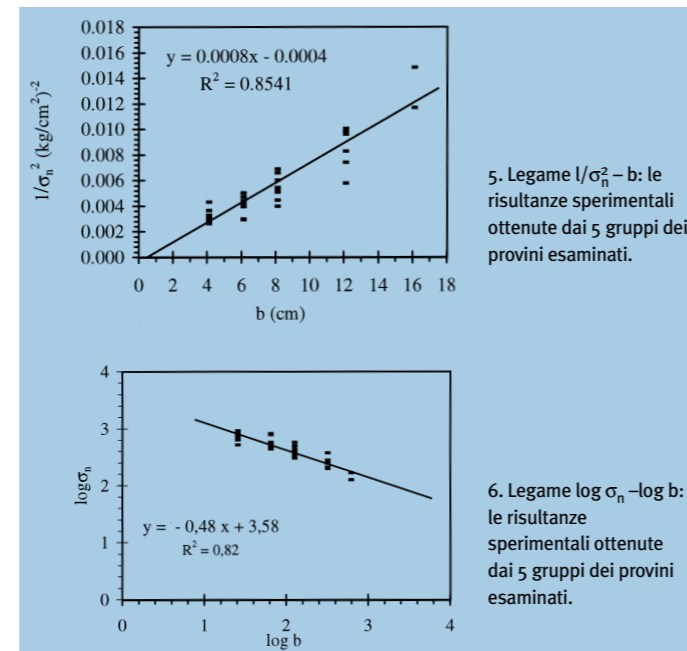
Infine, invertendo l'equazione (10), si ottiene:

$$\frac{1}{\sigma_n^2} = \frac{1}{B^2 \cdot f_{ct}^2 \cdot \lambda \cdot b_0} (\lambda \cdot b_0 + b) = \frac{\lambda \cdot b_0}{B^2 \cdot f_{ct}^2 \cdot \lambda \cdot b_0} + \frac{b}{B^2 \cdot f_{ct}^2 \cdot \lambda \cdot b_0} \quad (11)$$

$$\frac{1}{\sigma_n^2} = \frac{1}{B^2 \cdot f_{ct}^2} + \frac{1}{B^2 \cdot f_{ct}^2 \cdot \lambda \cdot b_0} b = C + A \cdot b$$

Effettuando una regressione lineare dei dati sperimentali, si possono ricavare facilmente le costanti C ed A che rappresentano rispettivamente l'intercetta all'origine e la pendenza della retta di equazione (11).

Nelle figg. 5 e 6 si riportano i diagrammi  $(1/\sigma_n^2 - b)$  e  $(\log \sigma_n - \log b)$  contenenti i dati sperimentali ottenuti dai cinque gruppi dei provini esaminati, con le rispettive rette di regressione.



Dalle figg. 5 e 6 si osserva, rispettivamente, che il valore di C è pressochè nullo e che la pendenza della retta di regressione dei dati in scala logaritmica ( $\log \sigma_n - \log b$ ) è prossima a  $-1/2$ . Pertanto basta il solo parametro  $G_f$  per caratterizzare il comportamento a frattura del materiale e non occorre un secondo parametro  $\lambda b_0$  legato alle dimensioni dei provini esaminati.<sup>[7]</sup>

Nota la pendenza A si può ora ricavare l'energia di frattura attraverso l'espressione:

$$G_f = \frac{g^2(\alpha)}{E \cdot A} \quad (12)$$

o anche, essendo  $g(\alpha) = \sqrt{\pi \cdot \alpha \cdot F(\alpha)}$ , con:

$$G_f = \frac{\pi \cdot \alpha \cdot F^2(\alpha)}{A \cdot E} \quad (13)$$

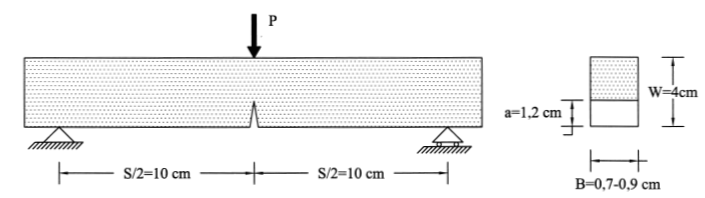
Noti i valori di A, E, a, b si calcola così il valore dell'energia di frattura. Per il laterizio esaminato la tab. 2 sintetizza i risultati ottenuti.

**Tabella 2** I risultati sperimentali ottenuti con il metodo S.E.L.

| A                     | C                     | E                 | $\lambda b_0$ | Gf            |
|-----------------------|-----------------------|-------------------|---------------|---------------|
| $\frac{cm^3}{kg^2}$   | $\frac{cm^4}{kg^2}$   | $\frac{kg}{cm^2}$ | cm            | $\frac{N}{m}$ |
| $7,76 \times 10^{-4}$ | $3,83 \times 10^{-4}$ | 237001            | $\approx 0$   | 14,0          |

**Determinazione dell'energia di frattura del laterizio con il metodo "Effective Crack Model" (E.C.M.)** La seconda serie di prove sperimentali è finalizzata all'analisi teorica della tenacità alla frattura del laterizio attraverso l'applicazione del metodo dell'"Effective Crack Model".<sup>[8], [9], [10]</sup>

Il metodo in questione determina il valore critico del fattore di intensificazione degli sforzi  $K_{ecr}$  mediante la formula proposta dall'ASTM.<sup>[16], [17]</sup> In tale formula la lunghezza della fessura non compare con le sue reali dimensioni, ma è maggiorata in modo tale da tenere conto di tutti i fenomeni fisici di dissipazione energetica che intervengono nella zona di processo. Per individuare il valore di questa "profondità efficace", occorre compiere una prova di flessione su tre punti (cosiddetta "three point bending"). Sono state quindi eseguite 24 prove, sottoponendo a carico concentrato in mezziera provini opportunamente intagliati, come mostrato in figura 7.

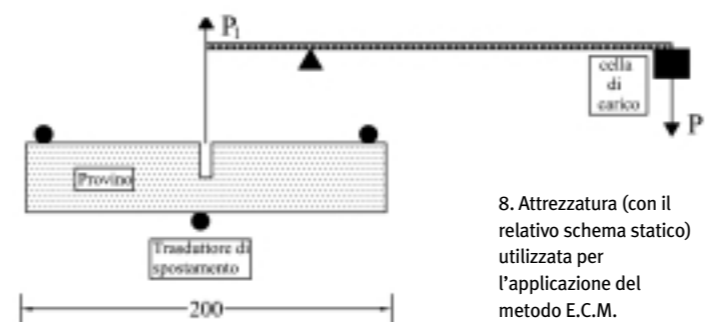


7. La cosiddetta prova "three point bending".

La macchina di prova (fig. 8) è simile a quella utilizzata per le prove di trazione, prima descritte, su provini intagliati e consiste ora in una leva con rapporto di amplificazione pari a:

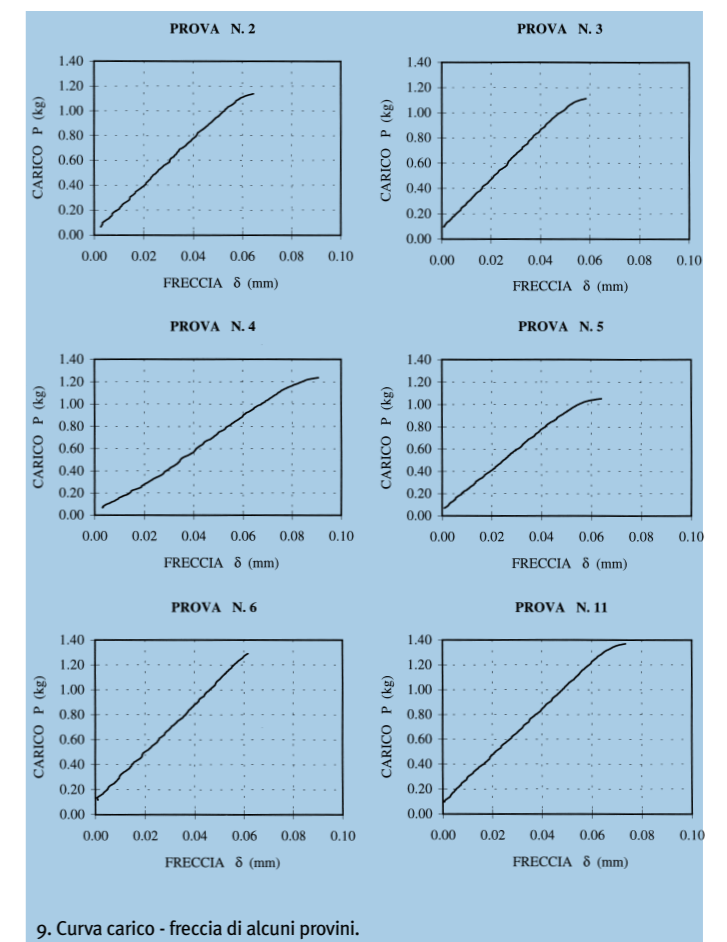
$$P_1 = 9,6654P \quad (14)$$

Un flusso di sferette di piombo defluisce ancora (a velocità costante) in un serbatoio che trasmette il carico al braccio motore.



8. Attrezzatura (con il relativo schema statico) utilizzata per l'applicazione del metodo E.C.M.

Attraverso un trasduttore induttivo di spostamento si è poi provveduto alla registrazione, per ogni provino, del diagramma carico - freccia, limitatamente al suo ramo ascendente (fig. 9).



9. Curva carico - freccia di alcuni provini.

Come detto, il metodo E.C.M. individua una zona di processo, in prossimità dell'apice della fessura, in cui avvengono i fenomeni fisici che contribuiscono a dissipare energia e che sono responsabili della non linearità del comportamento del materiale. Nel conglomerato tali contributi sono essenzialmente imputabili alla microfessurazione all'interfaccia tra l'inerte e la pasta cementizia ed all'ingranamento tra le particelle dell'inerte.

La valutazione della profondità efficace è condotta con un procedimento iterativo che parte dal valore iniziale  $a_0$  della lunghezza d'intaglio ed arriva a convergenza con il valore finale  $a_e$ ; in corrispondenza di ogni *step* iterativo si eseguono tutte le operazioni necessarie per la determinazione successiva della lunghezza di tale fessura "virtuale". Per una trave rettangolare non fessurata ed inflessa su tre punti in regime di elasticità lineare, la freccia in mezziera è data dalla seguente espressione:

$$\delta = \frac{P}{E} \left( \frac{S^3 \cdot \left( 1 + \left( \frac{5 \cdot q \cdot S}{8 \cdot P} \right) \right)}{4 \cdot B \cdot W^3} + \frac{(1 + \nu) \cdot S}{2 \cdot \kappa \cdot B \cdot W} \right) \quad (15)$$

in cui:

q è il peso proprio della trave per metro lineare;  
v è il modulo di Poisson;

$$\kappa = 10 \frac{(1+v)}{(12+11v)} \quad \text{è un coefficiente di taglio per sezioni rettangolari}$$

Per una trave fessurata con fessura passante avente profondità  $a_0$ , l'entità della freccia in mezzzeria può essere così ricavata:<sup>[8], [12]</sup>

$$\delta = \frac{\lambda \cdot P}{E} \left( \frac{S^3 \cdot \left( 1 + \left( \frac{5 \cdot q \cdot S}{8 \cdot P} \right) \right)}{4 \cdot B \cdot W^3 \cdot \left( 1 - \frac{a_0}{W} \right)^3} + \frac{(1+v) \cdot S}{2 \cdot \kappa \cdot B \cdot W \cdot \left( 1 - \frac{a_0}{W} \right)} \right) \quad (16)$$

in cui  $\lambda$  è un fattore di correzione che nasce appunto dal confronto fra la freccia di una trave fessurata, valutata mediante un'analisi ad elementi finiti, e la freccia di una trave integra avente altezza pari a  $(W - a_0)$ .

Nallathambi e Karihaloo<sup>[8], [18]</sup> hanno dapprima calcolato il valore del fattore di correzione  $\lambda$  per diverse geometrie della trave e ne hanno visualizzato i risultati sotto forma di grafico; in seguito<sup>[9], [10]</sup> hanno proposto la seguente equazione di regressione valida nel rispetto delle seguenti limitazioni  $2 \leq S/W \leq 9$  e  $0,1 \leq a_0/W \leq 0,6$ :

$$\lambda = \eta_1 \exp \left\{ \eta_2 (a_0/W)^2 + \eta_3 (a_0/W)^3 + \eta_4 (a_0/W)(S/W) + \eta_5 (a_0/W)(S/W)^2 + \eta_6 (S/W) + \eta_7 (S/W)^2 + \eta_8 (S/W)^3 \right\} \quad (17)$$

dove:  $\eta_1 = 1,067$        $\eta_2 = -0,6521$   
 $\eta_3 = -0,2117$        $\eta_4 = -0,3814$   
 $\eta_5 = 0,0164$        $\eta_6 = -0,0057$   
 $\eta_7 = -0,011$        $\eta_8 = 0,0011$

Va osservato che l'operazione di regressione è stata condotta con riferimento ad elementi in conglomerato. Nel presente lavoro si ritiene questa operazione valida anche per gli elementi in laterizio esaminati. Inserendo nella equazione(16) i valori di  $P_{max}$  e  $\delta_{max}$ , si può calcolare la profondità efficace  $a_e$ :

$$4 \cdot B \cdot W^3 \cdot E \cdot \kappa \cdot \delta_{max} (1 - a_e/W)^3 - 2 \cdot \lambda \cdot P_{max} \cdot W^2 (1+v) \cdot S \cdot (1 - a_e/W)^2 + \lambda \cdot P_{max} \cdot \kappa \cdot S^3 \cdot \left( 1 + \left( \frac{5 \cdot W \cdot S}{8 \cdot P_{max}} \right) \right) = 0 \quad (18)$$

Dopo aver determinato per via iterativa il valore della profondità efficace, si ricava con la formula dell'ASTM<sup>[16], [17]</sup> il valore critico del fattore d'intensificazione degli sforzi:

$$K_{Icr} = \sigma_n \cdot a_e^{1/2} \cdot Y(a_e/W) \quad (19)$$

in cui:

$$\sigma_n = 6 \cdot M/B \cdot W^2;$$

$$M = (P_{max} + W \cdot S/2)(S/4);$$

$$Y(a) = \frac{1,99 - \alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot (2,15 - 3,93\alpha + 2,7\alpha^2)}{(1 + 2\alpha) \cdot (1 - \alpha)^{3/2}};$$

dove  $\alpha = a_e/W$ .

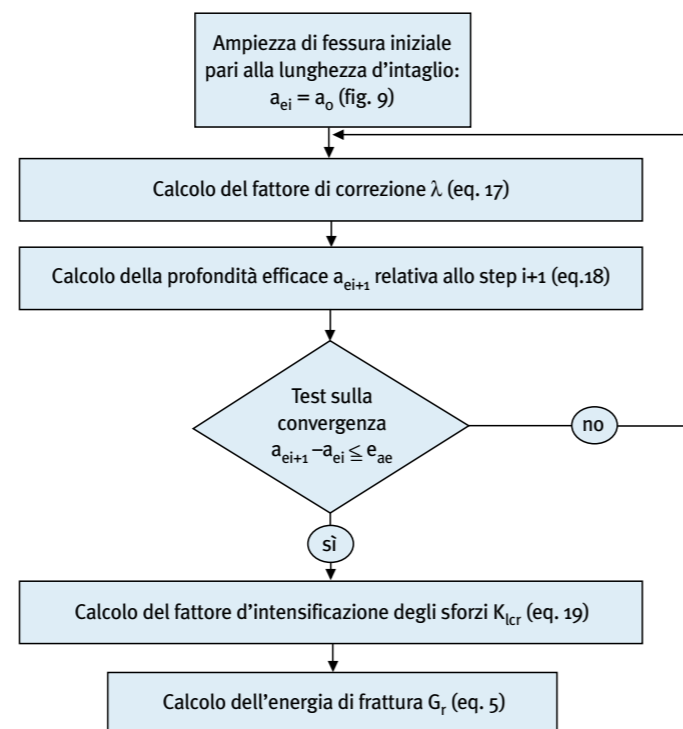
L'energia di frattura, noti i valori del fattore d'intensificazione degli sforzi e del modulo elastico, può essere pertanto calcolata utilizzando l'equazione (5) già prima vista.

In tab. 3 sono riportate le principali risultanze sperimentali dei 24 provini esaminati, provini ricavati – va sottolineato – dallo stesso laterizio precedentemente indagato col metodo S.E.L. Si riporta inoltre, in fig. 10, lo schema a blocchi del procedimento utilizzato per la ricerca iterativa del valore della profondità efficace  $a_e$  e della conseguente determinazione dell'energia di frattura  $G_f$ .

**Tabella 3** Risultanze delle 24 prove di flessione su tre punti e relativa valutazione della tenacità alla frattura e dell'energia di frattura col metodo E.C.M.

| Tenacità a frattura                          | Energia di frattura |
|--|---------------------|
| $K_{Icr} \cdot 10^5$ (kg/cm <sup>3/2</sup> ) | Gr (N/m)            |
| 47,6958                                      | ≅ 10,00             |

In conclusione, la tab. 3 riporta i valori medi del fattore d'intensificazione degli sforzi e dell'energia di frattura  $G_f$  relativi alle 24 prove effettuate.



10. Diagramma di flusso per il calcolo della tenacità alla frattura e dell'energia di frattura col metodo E.C.M.

**Osservazioni conclusive** La determinazione dell'energia di frattura di un materiale può essere effettuata in diverso modo e con diverso grado di difficoltà operativa. Volendo tentare, per sommi capi, una classificazione di queste modalità, esse si possono suddividere in due categorie. In una possono collocarsi tutte quelle modalità che attuano una ricerca puntuale dell'energia di frattura, ovvero un'indagine

avente come scopo precipuo l'analisi del campo di spostamento (e di deformazione) su superfici molto limitate del materiale. Si pensi, ad esempio, a tutti quei metodi di tipo ottico interferometrico<sup>[19], [20], [21]</sup> in grado di descrivere il legame che nasce localmente, in corrispondenza di una frattura, tra una sollecitazione tensionale ivi agente ed una corrispondente grandezza deformativa. In una modalità di frattura di tipo I, la funzione *tensione*  $\sigma$  - *spostamento*  $w$  è, di ciò, una chiara esemplificazione. Come noto, la conoscenza di questa funzione permette, attraverso la valutazione della sua area, la determinazione dell'energia di frattura.<sup>[22]</sup>

In un'altra categoria possono invece collocarsi tutti quei metodi che prevedono valutazioni non puntuali dell'energia di frattura. Ovvero, in altre parole, si vanno a determinare grandezze legate ad una risposta globale dell'elemento in esame. Ad esempio, in una prova di flessione su tre punti si registra il legame *carico* - *freccia*, il quale successivamente, opportunamente "spalmato" sull'intera area di frattura interessata,<sup>[6], [23]</sup> condurrà all'energia di frattura che, come noto, è grandezza legata ad una caratterizzazione meccanica del materiale di tipo prettamente puntuale. In questa seconda categoria possono certamente collocarsi anche i due metodi (S.E.L. ed E.C.M.) discussi nel presente lavoro. Questi metodi, come visto, possono essere applicati attraverso l'uso di semplici attrezzature da laboratorio e quindi, a differenza dei metodi interferometrici della prima categoria, si prestano ad una più comoda prassi operativa. Va comunque sottolineato che la concordanza di risultati ottenuti attraverso i metodi delle due categorie ricordate non è sempre certa e scontata. Proprio per il laterizio, nel lavoro<sup>[24]</sup> si sono formulate, in merito alla questione, alcune osservazioni alquanto utili per un corretto confronto delle diverse risultanze. Nel lavoro qui presentato, si è giunti, secondo precise modalità, alla determinazione dell'energia di frattura di listelli di laterizio, ricavati da blocchi utilizzati per l'alleggerimento dei solai. I valori desunti attraverso i due metodi sono prossimi, a conferma della duplice possibilità operativa che può essere adottata. Inoltre, il metodo E.C.M. appare di sicuro interesse soprattutto per la semplice modalità operativa che lo contraddistingue, modalità che potrebbe consentire anche a laboratori non particolarmente attrezzati di determinare questo parametro così importante per una completa caratterizzazione meccanica del laterizio. ¶

\* Politecnico di Torino

\*\* Università di Parma

*Gli autori ringraziano la Società RDB (in particolare, l'Ing. G. Gazzola) che ha fornito i laterizi esaminati ed ha permesso, in Pontenure (PC), lo sviluppo della ricerca presso il suo Laboratorio Prove e Materiali. Si ringrazia inoltre l'Ing. Eleonora Maccaferri, dalla cui Tesi di Laurea sono state tratte le risultanze sperimentali qui presentate.*

## Bibliografia

- [1] Goffi L., "Sulle caratteristiche deformative del laterizio impiegate nelle strutture miste in associazione al calcestruzzo", Atti 12° Congresso Naz. Andil, Firenze, 1974.
- [2] Bernardini A., Modena C., Vescovi U., "Ricerca sperimentale sui parametri di resistenza e di deformabilità di murature in laterizio normale ed alveolato", Costruire n. 114, 1979.
- [3] Bosco C., "Considerazioni sul fenomeno di distacco di parti laterizie in solai misti. Prime risultanze sulla base di indagini e sperimentazioni", Atti 15° Congresso Naz. Andil, 1980.
- [4] Zago F., "Controllo su prototipo della produzione di blocchi interposti in laterizio: confronto del comportamento a flessione trasversale", L'Industria Italiana dei Laterizi n. 2, 1986.
- [5] Cedolin L., Dei Poli S., Iori I., "Meccanica della frattura di laterizi utilizzati in collaborazione con elementi strutturali in conglomerato armato", Studi e Ricerche Vol. 9, 1987.
- [6] Bosco C., Iori I., "Sulla meccanica della frattura dei laterizi: Indagine sperimentale di elementi inflessi ed analisi di parametri caratteristici", Studi e Ricerche Vol. 13, 1992.
- [7] Bazant Z.P., "Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal", Journal of the Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 110, 518-53, 1984.
- [8] Nallathambi P. e Karihaloo B. L., "Determination of specimen - size independent fracture toughness of plain concrete", Magazine Concrete Research, n. 38, 1986.
- [9] Karihaloo B. L. e Nallathambi P., "Fracture toughness of plain concrete from three - point bend specimens", Materials and Structures, n. 22, 1989.
- [10] Karihaloo B. L. e Nallathambi P., "Notched beam test: mode I fracture toughness", Fracture Mechanics Test Methods for Concrete, Ed. S.P. Shah e A. Carpinteri, Report of Technical Committee 89-FMT, RILEM, Chapman-Hall, 1991.
- [11] Broek D., *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, Martinus Nijhoff Publishers, the Hague, 1984.
- [12] Tada H., Paris P.C., Irwin G.R., *The Stress Analysis of Cracks Handbook*, DEL research Corp., Hellertown, Pa., 1973.
- [13] Carpinteri A., "Le prove di frattura sui materiali lapidei da costruzione", pubblicazione n. 17, INARCOS n. 408, maggio 1980.
- [14] Bazant Z.P., Kim J.K., Pfeiffer P., "Nonlinear Fracture Properties from Size Effect Tests", Journal of the Structural Division, Vol. 1 (1985).
- [15] Bazant Z.P., "Fracture Energy of Heterogeneous Materials and Similitude", SEM/RILEM International Conference on Fracture of Concrete and Rock, Houston, Texas, giugno 1987.
- [16] Brown W.F. e Srawley J.E., "Crack toughness testing of high strength metallic materials", ASTM STP 410, 1966.
- [17] Srawley J.E., "Wide-range stress-intensity factor expressions for ASTM E399 standard fracture toughness specimens", International Journal Fracture, Vol. 12, 1976.
- [18] Nallathambi P., Karihaloo B. L. e Heaton B.S., "Effect of specimen and crack sizes, water/cement ratio and coarse aggregate texture upon fracture toughness of concrete", Magazine Concrete Research, Vol. 36, 1984.
- [19] Iori I., Lu H., Marozzi C. A., Pizzinato E., "Metodo per la determinazione dei campi di spostamento nei materiali eterogenei (conglomerati naturali ed artificiali) a bassa resistenza specifica a trazione", L'Industria Italiana del Cemento, n. 4, 1982.
- [20] Cedolin L., Dei Poli S., Iori I., "Analisi sperimentale del processo di formazione della frattura nel calcestruzzo", Studi e Ricerche Vol. 3, 1981. Politecnico di Milano, pp. 47-74.
- [21] Cedolin L., Dei Poli S., Iori I., "Experimental determination of the fracture process zone in concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 13, 1983, pp. 557-567.
- [22] Cedolin L., Dei Poli S., Iori I., "Tensile behaviour of concrete", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 113, n. 3, marzo 1987.
- [23] Bosco C., Iori I., "On fracture of notched specimens of marble of Carrara", Europa - U.S. Workshop on fracture and damage in quasi - brittle structures: experiment modelling and computer analysis, Praga 1994.
- [24] Bosco C., Iori I., "L'energia di frattura cosiddetta "locale" in elementi di laterizio", Atti del X Congresso C.T.E., Milano 1994.