

MATERIALI CEMENTIZI ESTRUSI FIBRORINFORZATI
Proprietà fisiche e meccaniche prima e dopo trattamento termico

GIAN LUCA GUERRINI, MARCO PLEBANI
CTG - Italcementi Group, Bergamo

GIOVANI MUCIACCIA, MARCO SCHIATTI
Dipartimento di Ingegneria Strutturale - Politecnico di Milano

SUMMARY

Extreme environmental conditions, such as exposure to high temperatures, are serious potential risks for buildings and structures. The behavior of concrete, after exposure to a high temperature, depends upon the specific concrete mix proportions, the constituents used and the physicochemical transformations that the heating generates. The purpose of this paper is to evaluate the mechanical properties after exposure to a single cycle at high temperatures ($T= 500\text{ }^{\circ}\text{C}$) of a cement-based composite with glass or cellulose fibers. The overall behavior in bending is considered. Four types of cement based composites were prepared using fiber cellulose, polypropylene and glass fibers. Specimens were treated in an electric furnace at 500°C . The corresponding bending strengths were determined, and fracture behavior was studied using interferometric measurements. A physical analysis was also performed by the use of microscopy observation (SEM).

1. INTRODUZIONE

Il comportamento meccanico dei materiali cementizi fibrorinforzati dipende dalle proprietà delle fibre, della matrice e dell'interfaccia fibra-matrice. Anche il processo di produzione degli elementi cementizi può influenzare le caratteristiche del composito. In alternativa al processo di getto, per la produzione degli elementi cementizi, recentemente è stato introdotto il processo di formatura per estrusione [1-3].

Gli elementi cementizi estrusi offrono una serie significativa di vantaggi rispetto ai materiali correntemente usati per i sistemi di tamponamento degli edifici.

Per gli elementi in calcestruzzo strutturali e di facciata oltre all'esposizione ai fattori di degrado ambientale classici, si deve considerare l'esposizione alle alte temperature, che provoca il degrado delle proprietà meccaniche.

L'esposizione di un elemento in materiale cementizio alle alte temperature può causare significative variazioni delle proprietà meccaniche che si manifestano con variazioni di colore, fessurazioni diffuse, disidratazione e spalling. E' noto che la gravità del danno dipende da diverse variabili del trattamento termico (velocità di riscaldamento, durata dell'esposizione alla massima temperatura, ...) e dalla geometria delle elementi di calcestruzzo [4-6]. Perciò generalmente gli studi sulle proprietà residue dei calcestruzzi danneggiati termicamente considerano cicli termici standardizzati, che solo in via approssimata rappresentano la situazione reale.

Il calcestruzzo è caratterizzato da bassa resistenza a trazione e modesta energia di frattura, che può essere in parte aumentata introducendo una fase dispersa di fibre corte.

Tra i numerosi tipi di fibre che vengono aggiunte nei compositi cementizi, le fibre di vetro e cellulosa possono aumentare le proprietà meccaniche significative [7-9]. In particolare, i residui fibrosi della polpa e della lavorazione della carta diventano una fonte economica di microfibre per il rinforzo del calcestruzzo.

Per contro le fibre disperse nella matrice presentano controindicazioni legate alle maggiori difficoltà di miscelazione ed estrusione.

Date queste premesse, lo scopo di questo lavoro è di valutare le proprietà meccaniche residue di compositi cementizi rinforzati con fibre di vetro e di cellulosa dopo l'esposizione ad un ciclo termico fino a 500° .

Viene considerato il comportamento meccanico a flessione.

Le proprietà meccaniche residue vengono valutate su provini riscaldati a temperature prestabilite in assenza di sollecitazioni esterne.

Dopo il raffreddamento, vengono apprezzate le variazioni di carico fino a completa rottura; controllando le prove con un parametro stabile di spostamento. Particolare attenzione viene posta nel valutare la formazione e lo sviluppo della fessura durante il processo di carico. Allo scopo le prove sono monitorate con il metodo interferometrico ESPI, per valutare la forma e le dimensioni della zona di danno. Dal punto di vista delle proprietà

fisiche vengono svolte l'analisi porosimetrica ad intrusione di mercurio (MIP), le indagini con il microscopio elettronico (SEM) e stereoscopico.

2. MATERIALI

Sono stati considerati quattro tipi di materiali cementizi estrusi. In tutti i casi la loro matrice è composta da cemento Portland grigio, sabbia calcarea e miscele di polimeri (derivati dalla cellulosa per ottenere coesione durante il processo di produzione). Sono state considerate combinazioni di fibre singole ed ibride. La tabella 1 mostra alcune proprietà e contenuti in peso delle composizioni dei materiali cementizi.

| | Fibre | Lunghezza fibre (mm) | (% in volume) |
|-------|---|---|------------------------|
| Mix 1 | Fibre di cellulosa da carta | $L_{\max} = 4$ | 5.5 |
| Mix 2 | Fibre di cellulosa macinata da carta e fibre in Polypropylene | $L_{\max} = 3$ -carta e $L = 6$ -Polyp. | 6 -carta e 0.1 -Polyp. |
| Mix 3 | AR fibre di vetro | $L = 18$ | 0.7 |
| Mix 4 | Fibre di cellulosa macinata da polpa | $L_{\max} = 3$ | 4 |

Tabella 1. Proprietà e contenuto di fibre

I provini sono stati ottenuti per taglio con lama diamantata da pannelli alveolari estrusi. Il processo di estrusione sembra generare un allineamento preferenziale delle fibre e delle proprietà meccaniche [10], pertanto i provini sono stati ottenuti sia parallelamente che perpendicolarmente alla direzione di estrusione.

Sono stati provati almeno tre provini per ciascuna direzione. Le dimensioni dei provini variano a seconda dei mix considerato, in funzione della geometria dell'elemento estruso da cui sono stati estratti. Il range di variabilità è $30 \div 70$ mm di altezza e $6 \div 24$ mm di spessore. Le prove a flessione su tre punti sono state condotte su luci di $100 \div 240$ mm. Le prove sono state realizzate in controllo di apertura di fessura ad una velocità di 0,04 mm/s (Fig.1).



Figura 1. Setup per prove di flessione

Per valutare il degrado termico i provini sono stati riscaldati in forno elettrico alla temperatura massima di 500°C con una velocità di $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

La temperatura di picco è stata mantenuta per 2 ore. Dopo il raffreddamento naturale alla temperatura ambiente è stata determinata la resistenza residua a trazione per flessione. I dati di carico e spostamento sono stati acquisiti con un sistema digitale.

2.1 MICROSCOPIA

I provini sono stati analizzati con un microscopio elettronico a scansione (SEM) e con un microscopio stereoscopico per osservare l'oggetto da due angoli lievemente diversi che

forniscono due immagini necessarie per la visione stereoscopica. Le micrografie ottenute per mezzo di un microscopio elettronico a scansione (Fig. 2) mostrano che la maggior parte delle fibre è allineata nella direzione di estrusione. Un fenomeno simile è stato osservato per altri campioni di differente composizione. Perciò l'assunzione che il processo di estrusione causi un allineamento delle fibre nella direzione di estrusione è qualitativamente corretta come indicano le osservazioni sperimentali [1]. La distribuzione delle fibre nella direzione di estrusione è alquanto uniforme come confermano le prove meccaniche.

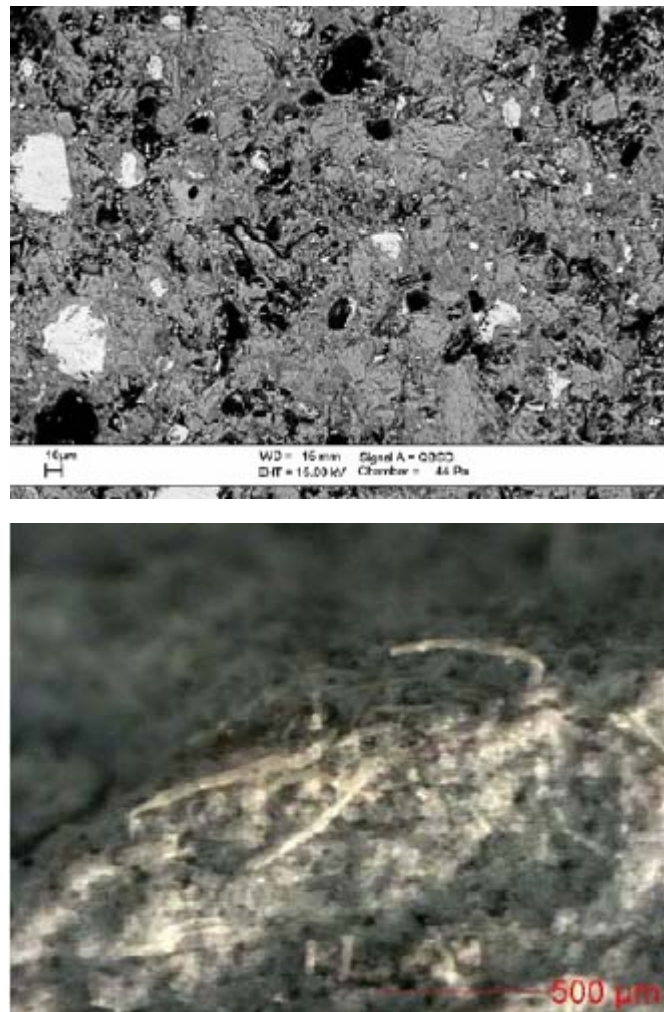


Figura 2. Immagini SEM per Mix 1.

Le osservazioni stereoscopiche confermano cambiamenti accentuati nella morfologia dei provini in conseguenza dell'esposizione alle alte temperature. Alcune immagini che mostrano interessanti e caratteristici aspetti del materiale danneggiato dopo ciclo termico sono riportate nelle Figure 3 e 4, dove sono confrontati un provino trattato ad alta temperatura e uno a temperatura ambiente.

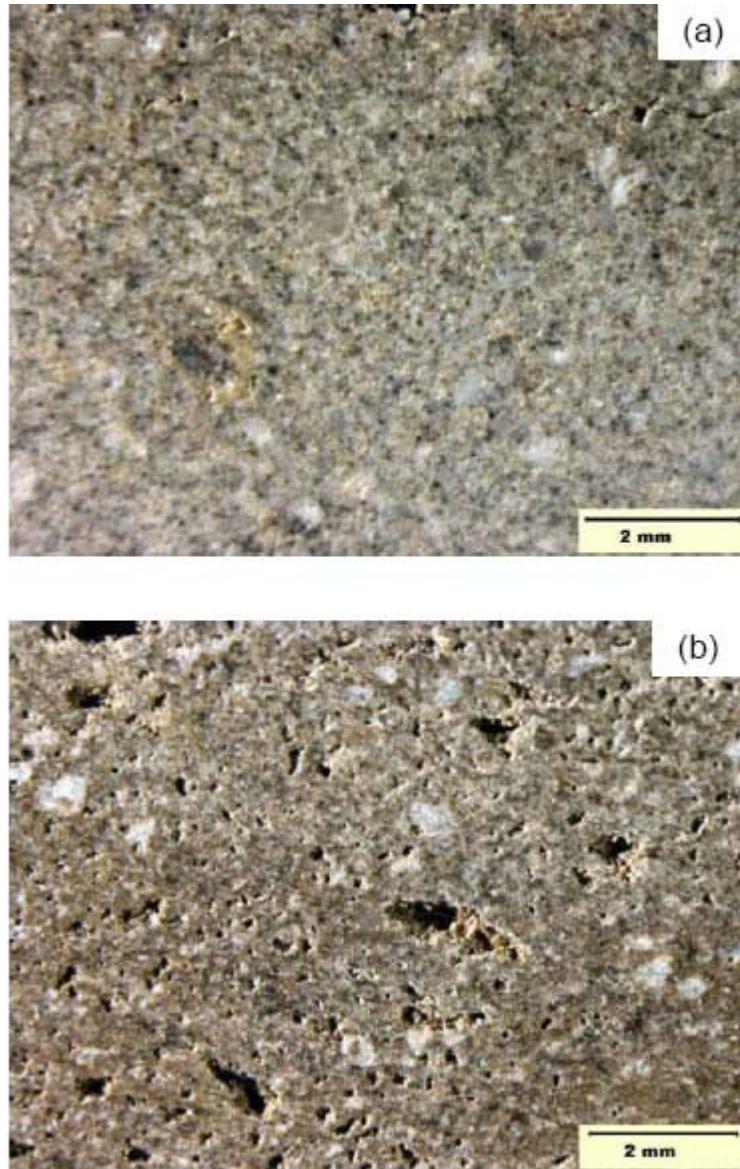


Figura 3. Immagini stereoscopiche prima (a) e dopo (b) esposizione termica per Mix 1.

La differenza più importante evidenziata dall'analisi con il microscopio stereoscopico, per effetto del trattamento termico è l'incremento della macroporosità. Per lo stesso caso nello strato corticale si sono sviluppate perpendicolarmente alla superficie piccole fessure. Però queste fessure non possono essere attribuite solo al trattamento termico, perché simili discontinuità sono presenti anche nei provini non trattati.

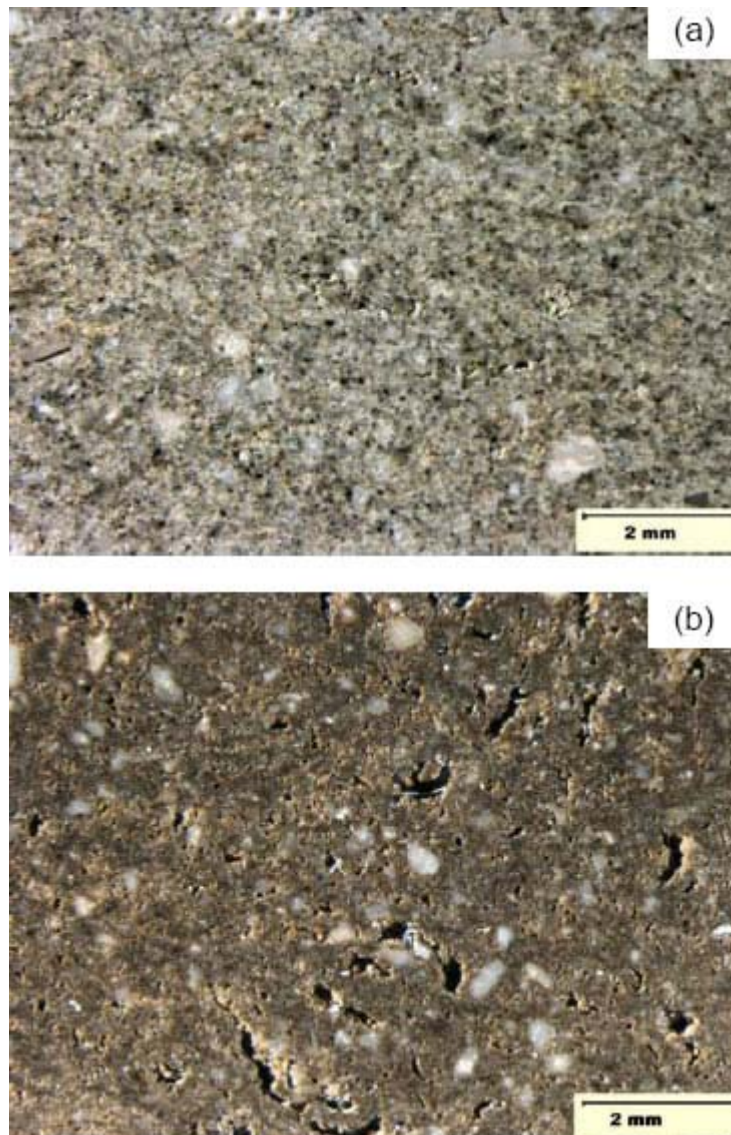


Figura 4. Immagini stereoscopiche prima (a) e dopo (b) esposizione termica per Mix 2.

3. RISULTATI SPERIMENTALI E DISCUSSIONE

Le Figure 5 mostrano le variazioni di porosità per i provini del Mix 2. Come osservato in [3], il processo di estrusione genera una maggiore densità e compattezza del materiale rispetto al processo di getto. Dopo l'esposizione a ciclo termico la porosità aumenta in modo significativo.

Una simile tendenza si evidenzia per tutte le miscele considerate. (Fig.6)

Dunque le analisi mostrano che il trattamento termico genera un aumento della porosità per tutte le dimensioni dei pori.

La risposta in termini di curve tensione spostamento per provini tagliati in direzione parallela e perpendicolare al senso di estrusione è mostrata in Fig.7.

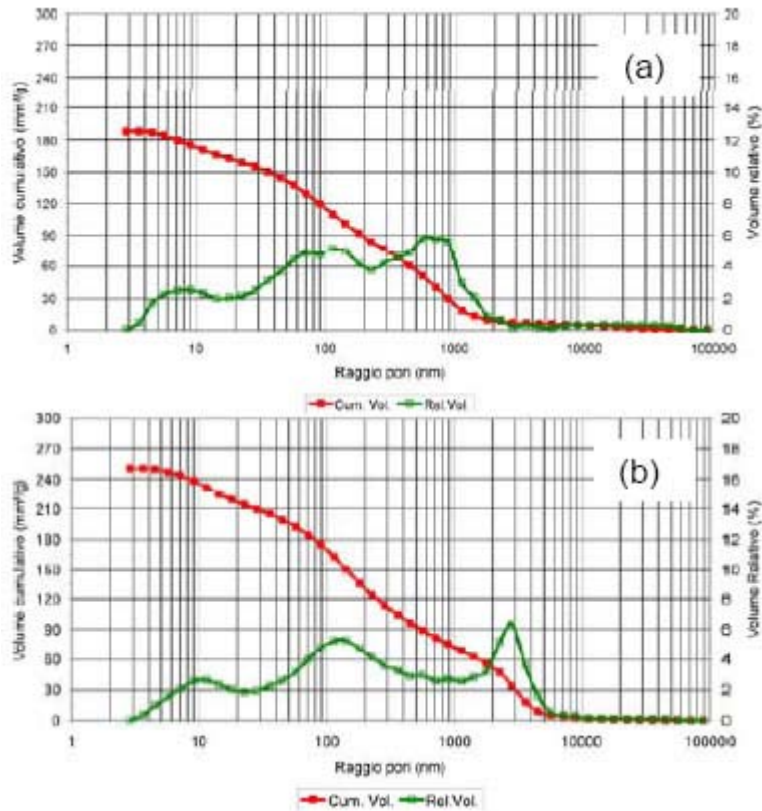


Figura 5. Distribuzione dei pori prima (a) e dopo (b) esposizione termica per Mix 2.

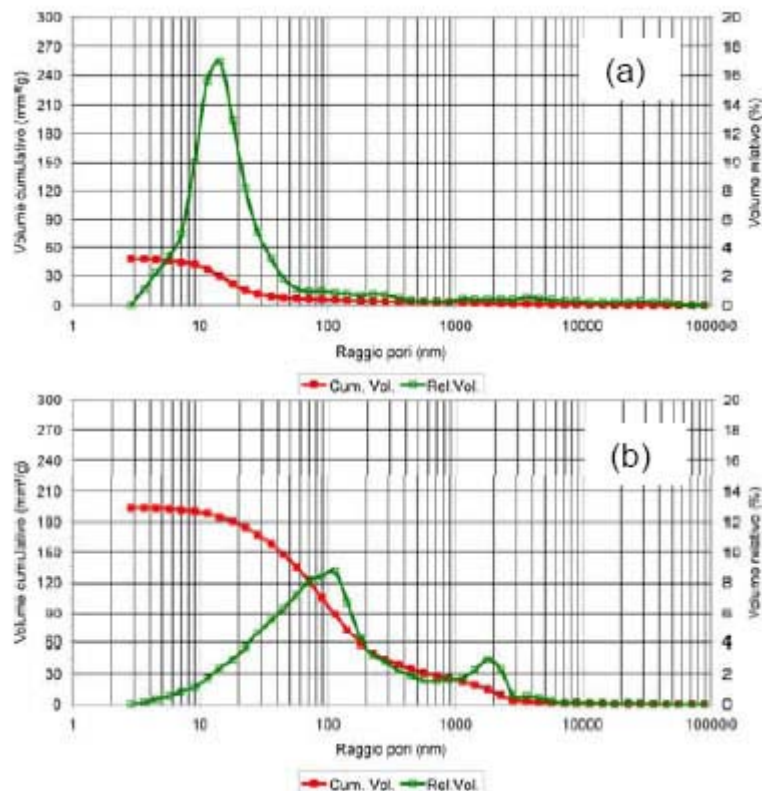


Figura 6. Distribuzione dei pori prima (a) e dopo (b) esposizione termica per Mix 3.

La risposta in termini di curve tensione spostamento per provini tagliati in direzione parallela e perpendicolare al senso di estrusione è mostrata in Fig.7. La resistenza media a trazione per flessione nella direzione parallela al senso di estrusione e perpendicolare per il Mix 1 è rispettivamente di 9.31 e 5.62 MPa. Il rapporto tra i due valori in questo caso è circa 1.66. La Fig. 8 mostra le tipiche curve tensione-freccia con il quadro fessurativo in superficie al carico di picco per travetti di Mix 1 a temperatura ambiente e sottoposti a ciclo termico a 500°C. Queste curve sono caratterizzate dal carico di picco flessionale e relativa resistenza nominale (MPa) e dall'area sottesa dalla curva carico-spostamento che

è correlata con l'energia di frattura (Nmm).

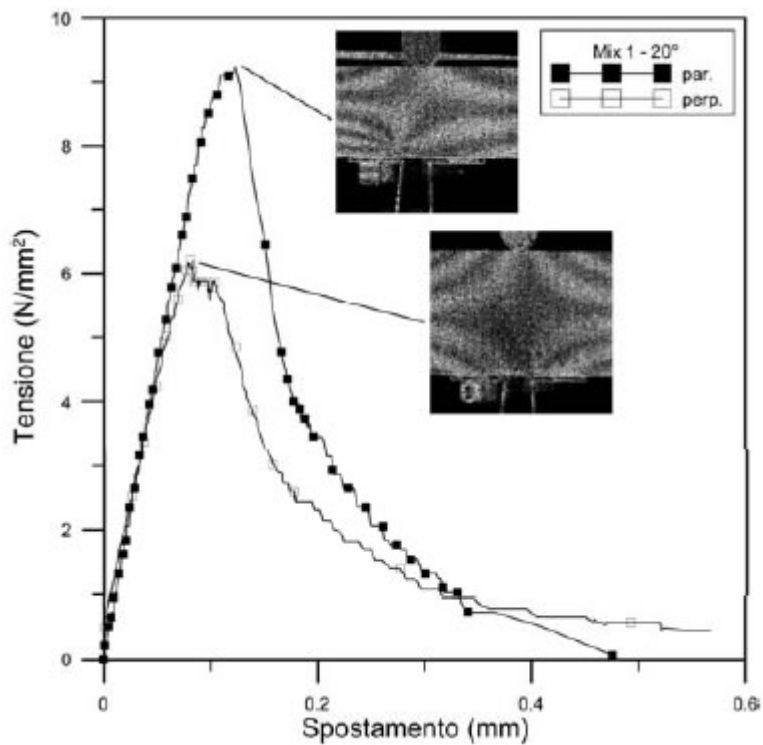


Figura 7. Tipica curva tensione-spostamento per provino tagliato in direzione parallela (par) e perpendicolare (perp) e quadri fessurativi al carico di picco (Mix1).

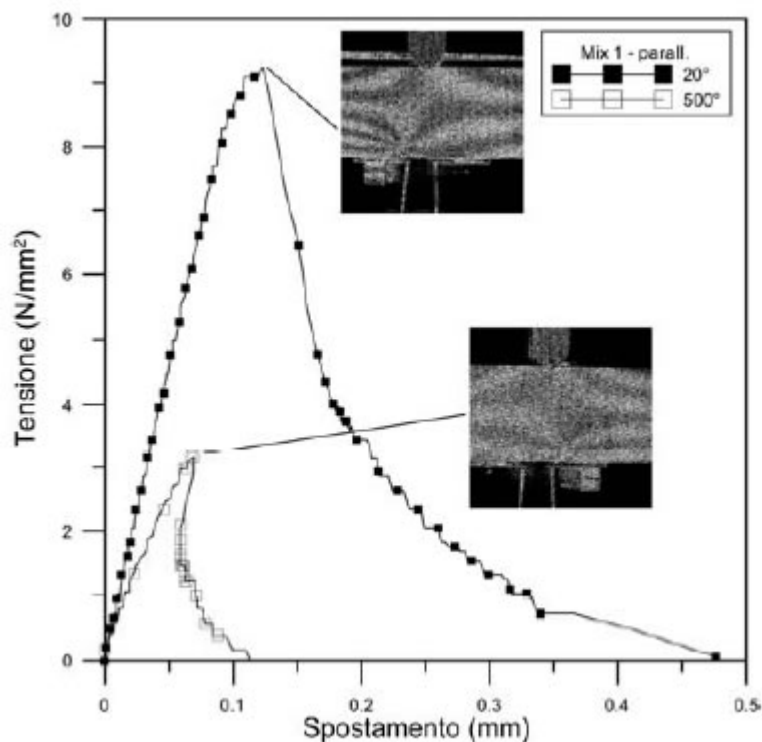


Figura 8. Curve tensione-spostamento e quadri fessurativi al carico di picco (Mix 1).

Nel caso di provini non esposti a trattamento termico il comportamento risulta molto fragile con un ramo discendente caratterizzato da elevata fragilità. Dopo trattamento termico ad alta temperatura la resistenza nominale e la fragilità diminuiscono. L'evoluzione della resistenza nominale e della fragilità è simile in tutti i materiali, il danno si manifesta con un incremento di non linearità. Con riferimento all'anisotropia, dopo ciclo termico il comportamento nelle due direzioni tende ad unificarsi (Fig.9). Il danno termico diventa predominante rispetto all'effetto del processo di estrusione.

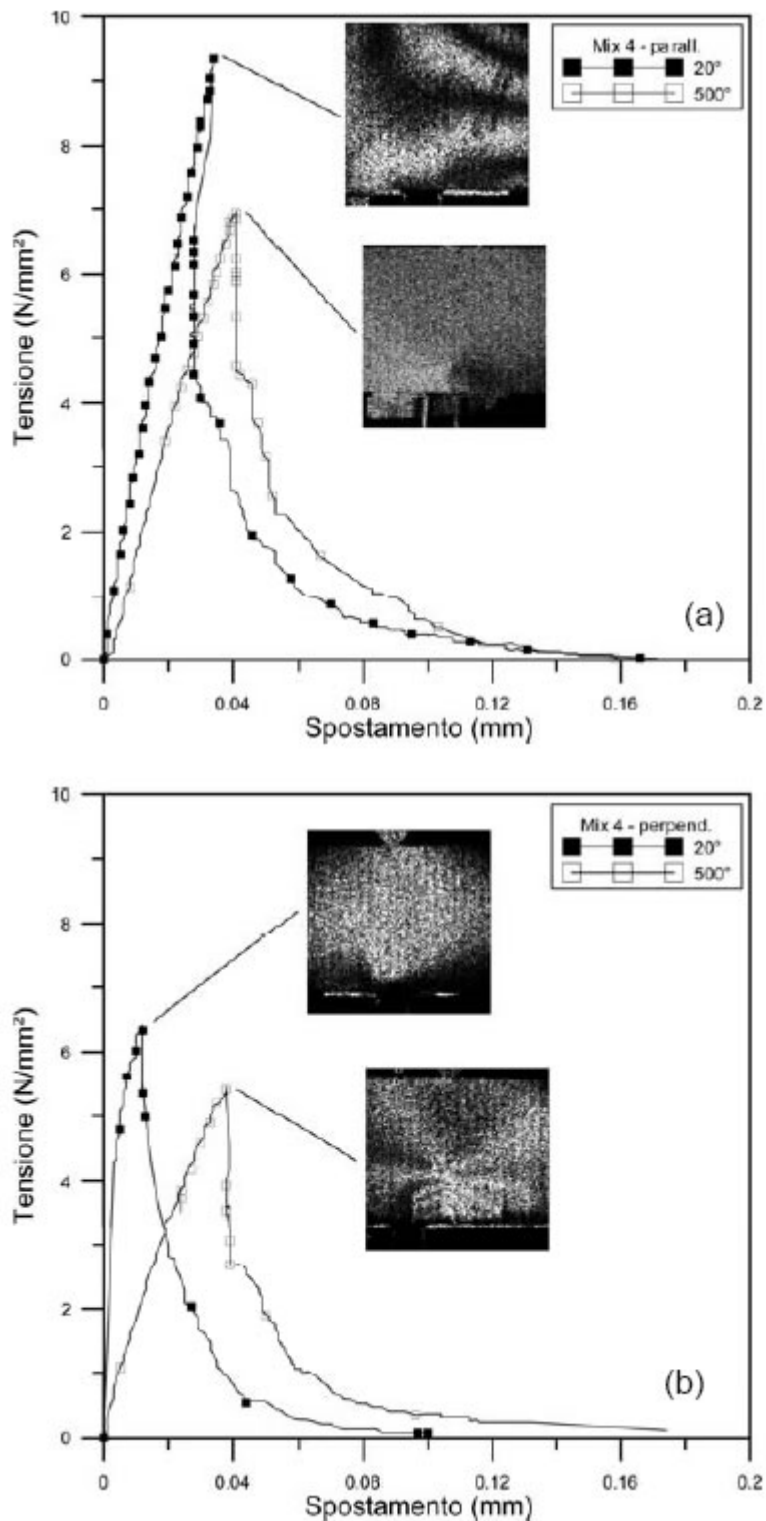


Figura 9. Curve tensione-spostamento di provini tagliati parallelamente (a) e perpendicolarmente (b) prima e dopo trattamento termico (Mix 4).

Le prove sono state condotte anche su provini caricati sulla dimensione più grande della sezione. In questo caso la resistenza nominale a trazione per flessione risulta più elevata (Fig. 10).

Ciò può essere spiegato con una maggiore influenza dell'interazione coesiva, che al carico di picco è diffusa su una parte più ampia di regione tesa della sezione rispetto ai provini caricati lungo il lato corto.

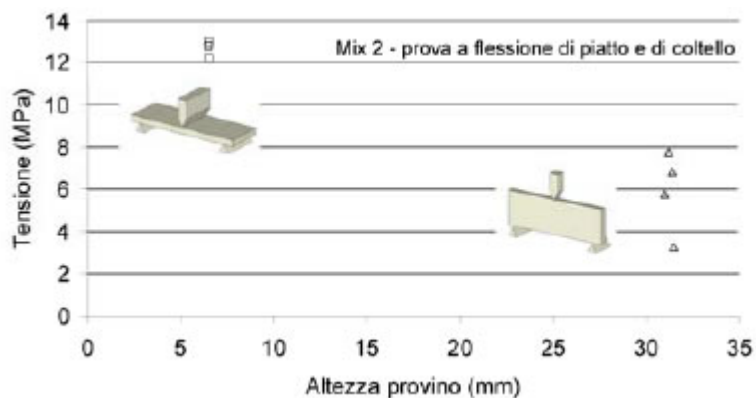


Figura 10. Resistenza a flessione in funzione dell'orientamento (Mix 2).

I risultati di valore più elevato così ottenuti non sono rappresentativi della resistenza del materiale.

Bisogna sottolineare che valutare le proprietà residue di compositi cementizi, testando provini geometricamente identici esposti ad alte temperature senza tener in conto tutti gli effetti del trattamento termico è un modo semplificato di affrontare il problema. Dunque, è stato dimostrato che in un provino di composito cementizio (materiale quasi-fragile), al picco di carico, valore che viene usato per definire la resistenza a trazione per flessione del materiale, è già presente un volume di materiale danneggiato e microfessurato con localizzazione.

Il trattamento termico ad alta temperatura, come testimoniato dall'ESPI e dalle emissioni acustiche cambia in modo sostanziale la geometria del volume danneggiato al picco di carico.

La resistenza nominale al picco dipende sia dalla resistenza costitutiva del materiale che dalle proprietà geometrico-meccaniche del volume danneggiato, che può essere sperimentalmente osservato.

CONCLUSIONI

Sono stati indagati gli effetti dell'esposizione a temperature elevate fino a 500°C su prodotti estrusi di cemento rinforzati con fibre di vetro e di cellulosa. Sono stati osservati significativi livelli di danneggiamento del materiale per tutti i compositi.

I punti successivi riassumono le osservazioni sperimentali ottenute dai test strutturali e dalle analisi fisiche. La dipendenza della resistenza e della fragilità dalla temperatura è stata trovata simile per tutti i campioni. Il processo di estrusione determina un allineamento delle fibre come mostrato dalle osservazioni al microscopio e confermato dai dati sperimentali. I risultati delle prove meccaniche sono stati confermati dalle analisi di porosimetria (MIP). Non è stato osservato nessun fenomeno di spalling durante il trattamento termico.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato sviluppato nell'ambito di un Programma di Ricerca Cofinanziato dal MIUR. Si ringrazia la società CTG Italcementi Group per la fornitura dei campioni.

BIBLIOGRAFIA

[01] SHAO Y., QIU, J. e SHAH, S.P., "Microstructure of extruded cement-bonded fibreboard", Cement and Concrete Research 31, pp.1153-1161, 2001.

[02] SOROUSHIAN, P., ELZAFRANEY, M., NOSSONI, A. e CHOWDHURY, H., "Evaluation of normal-weight and tight-weight fillers in extruded cellulose fiber cement products", Cement & Concrete Composites 28, pp.69-76, 2006.

[03] PELED, A. e SHAH, S. P., "Processing Effects in Cementitious Composites, Extrusion and Casting", Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 15 (2), pp.192-198, 2003.

[04] LEA, F.C. (1920) The effect of temperature on some of the properties of materials, Engineering 110, pp. 293-298.

[05] LEA, F.C. e STRADLING, R., "The resistance to fire of concrete and reinforced concrete", Engineering 114, pp.341-344, 1920.

[06] MALHOTRA, H.L., "Effect of temperature on the compressive strength of concrete Mag. Concr. Res. 8, pp. 85-94, 1956.

[07] NAIKA, T. R., FRIBERG, T. S. e CRUNA, Y., "Use of pulp and paper mill residual solids in production of cellucrete", Cement and Concrete Research 34, pp.1229-1234, 2004.

[08] SAVASTANO H., WARDEN, P.G.e COUTTS, R.S.P., "Microstructure and mechanical properties of waste fibre-cement composites", Cement & Concrete Composites 27, pp.583-592, 2005.

[09] CHENA,B. e LI, J., "Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures", Cement and Concrete Research 34, pp.1065-1069, 2004.

[10] QIAN, X., ZHOU, X., MU, B. AND LI Z., "Fiber alignment and property direction dependency of FRC extrudate", Cement and Concrete Research 33, pp.1575-1581,2003.