

Laterizio e FRP: il “laterizio lamellare”

Nel seguito⁽¹⁾ viene illustrata una particolare tecnologia costruttiva che utilizza assemblaggi composti da strati alternati e sfalsati di elementi (tavelle e tavelloni) di laterizio e nastri in composito al fine di superare i limiti costruttivi delle correnti tecnologie di produzione. I risultati ottenuti da una apposita campagna sperimentale consentono di prospettare alcune applicazioni possibili

Laterizio armato con FRP “multistrato” e “lamellare” Con il termine “laterizio multistrato” si intende qui un assemblaggio strutturale realizzato mediante strati sovrapposti di elementi in laterizio (come tavelle forate o lamelle piene) e nastri in composito incollati agli elementi stessi mediante resine epossidiche. La fig. 1 mostra lo schema-esempio di un laterizio multistrato, costituito da tre tavelle sovrapposte e nastri in FRP⁽²⁾. Con tale sistema costruttivo si possono ottenere, da un lato, sezioni con momenti ultimi di valore elevato, dall’altro è possibile proteggere le fibre in FRP posizionate a vari livelli della sezione (ad eccezione dell’intradosso) da aggressioni sia meccaniche (ad esempio, tranciamenti/rottture involontarie), sia fisico-chimiche (ad esempio, fuoco). Questa prima soluzione - multistrato - consente di superare il limite legato alla resistenza degli elementi in laterizio, in relazione al loro utilizzo con funzioni strutturali. L’altro limite insito nella specifica tecnologia di produzione, ovvero l’impossibilità tecnica di ottenere elementi della lunghezza desiderata,⁽³⁾ può essere superato mutuando quanto fatto per il legno lamellare: la semplice sovrapposizione di prodotti in laterizio, sfalsati tra loro, e di strati di FRP consente di realizzare manufatti di lunghezza qualsiasi (fig. 2).

Una prima serie di prove⁽⁴⁾ effettuate su questi elementi, descritte nelle pagine che seguono, mostrano come le soluzioni proposte forniscano risultati già molto interessanti anche con prodotti presi dalla produzione attuale (semplici tavelloni forati con spessori esigui dei setti), certo non ancora ottimizzati per le applicazioni qui ipotizzate: con una semplice modifica delle filiere di produzione è tuttavia possibile realizzare forme della sezione più idonee al nuovo ruolo strutturale, nelle quali il dimensionamento dei setti risulti adeguato al trasferimento delle forze di scorrimento derivanti dal carico flessionale.

Indagini sperimentali Al fine di ottenere conferma della efficacia della soluzione proposta, si è proceduto all’assemblaggio di alcune travi in laterizio “multistrato” e “lamellare”, presso il Laboratorio Strutture della Facoltà di Ingegneria di Perugia, sulle quali sono state effettuate prove finalizzate a verificarne comportamento e resistenze sotto carico.

Elementi multistrato (L=150 cm, H=18 cm)

Sono realizzati tramite sovrapposizione di tre strati alternati di tavelloni in laterizio, con lunghezza di 150 cm, e di composito in fibra di vetro.

Una preventiva analisi agli elementi finiti ha evidenziato che la modalità di collasso avrebbe riguardato principalmente i setti di laterizio ancor prima di poter raggiungere lo schiacciamento in compressione o la rottura delle fibre in trazione: nella fig. 3b si possono notare, infatti, le zone in grigio che rappresentano le aree di maggior sollecitazione. In effetti, nelle prove sperimentali di resistenza a flessione si è avuto un processo di sequenziale frantumazione proprio dei setti verticali degli elementi di laterizio (fig. 4).

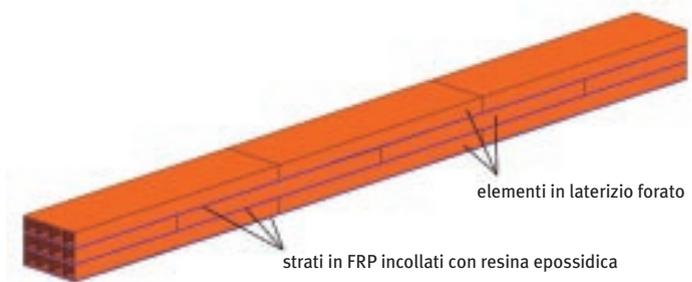
È apparso evidente, nel corso della sperimentazione, il comportamento di tipo duttile offerto dai provini testati. Dal grafico carico-abbassamento in mezzeria (fig. 5) è possibile osservare

1 Elemento “multistrato”: confronto fra valori di riferimento dei carichi di rottura teorici e sperimentali

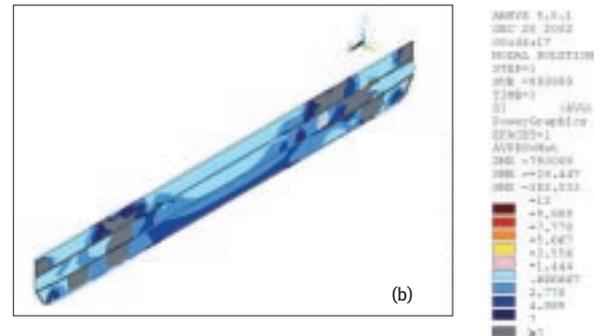
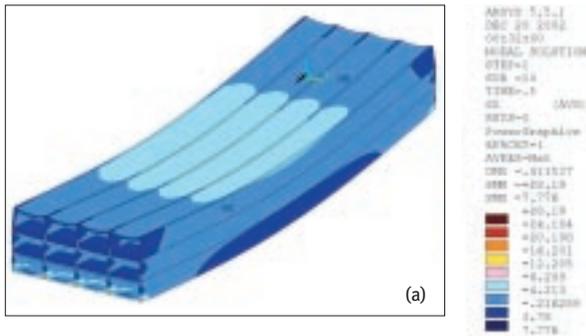
elementi testati	n° elementi	carico di rottura previsto	carico di rottura misurato
Elemento “multistrato” 150x25x18 cm	1	21,20 kN	18,40 kN



1. Schema di una sezione in laterizio "multistrato".



2. Trave in "laterizio lamellare".



3 a, b. Distribuzione delle tensioni principali sull'elemento in laterizio "multistrato" (L=150 cm).

come, a seguito di un ramo sostanzialmente elastico, si prosegue con un ramo non lineare leggermente incrudente, correlato al meccanismo di danneggiamento delle anime interne e di contorno della sezione. È interessante anche il ramo post critico, in cui l'elemento continua a mostrare una sensibile capacità portante, pari a circa il 40 % di quella di rottura. Le discontinuità che possono essere rilevate nel grafico di fig. 5 corrispondono alle rotture progressive in vari punti dei setti degli elementi in laterizio.

Elementi in laterizio "lamellare" (L=300 cm, H=3x6 cm)

Si è proceduto infine alla prova a rottura di due elementi in laterizio "lamellare" di tre metri di luce, assemblati secondo lo schema di fig. 2. La realizzazione di questi elementi, effettuata per sovrapposizione ed incollaggio (con resina epossidica additivata con addensante bentonitico) di tre strati di laterizio forato e tessuti di fibra di vetro⁽⁵⁾, ha permesso di ottenere un elemento perfettamente monolitico, che ha dimostrato tutta la sua efficacia nelle prove di rottura (fig. 6) eseguite dopo sette giorni di maturazione delle resine. Anche su tale tipo di elemento si è assistito ad una rottura per progressiva frantumazione delle anime, terminata però con una rottura a taglio sotto le zone di carico sono leggibili sia la rottura per taglio che la frantumazione interna delle anime degli elementi in la-

terizio; è possibile vedere inoltre un fenomeno di espulsione manifestato al di sotto della zona di carico.

In fig. 7 è riportato il diagramma forza-spostamento registrato per una delle due travi in laterizio "lamellare" provate. Anche da tale diagramma è possibile notare la notevole duttilità del sistema resistente. Il grafico, a causa del distacco della piattina metallica incollata sull'elemento per acquisire gli abbassamenti, si interrompe proprio prima del tratto discendente rilevato nelle sperimentazioni precedenti. In fase di prova, comunque, si è riscontrato un andamento simile, per quanto riguarda il tipo di danneggiamento, a quello dei casi precedentemente esaminati.

Resistenza al fuoco Un problema che può essere molto importante per questa tipologia di assemblaggio, data la presenza delle resine nel composito in FRP, è quello che riguarda il suo comportamento al fuoco. Si è proceduto, quindi, ad una prima verifica della capacità di resistenza al fuoco attraverso una modellazione numerica di alcune tipologie di sezione in latero-composito, caratterizzate ognuna da un diverso tipo di isolamento termico. La modellazione è stata effettuata con un programma agli elementi finiti, mediante il quale sono state determinate le temperature, all'interno delle sezioni ai vari passi di carico, al fine di verificare l'eventuale superamento della temperatura di ram-mollimento della resina utilizzata. Nel seguito vengono riportati, per brevità, i risultati relativi a due soli tipi di isolamento termico.

Modellazione - Gli elementi analizzati, come detto, differiscono esclusivamente per il tipo di isolamento termico applicato.

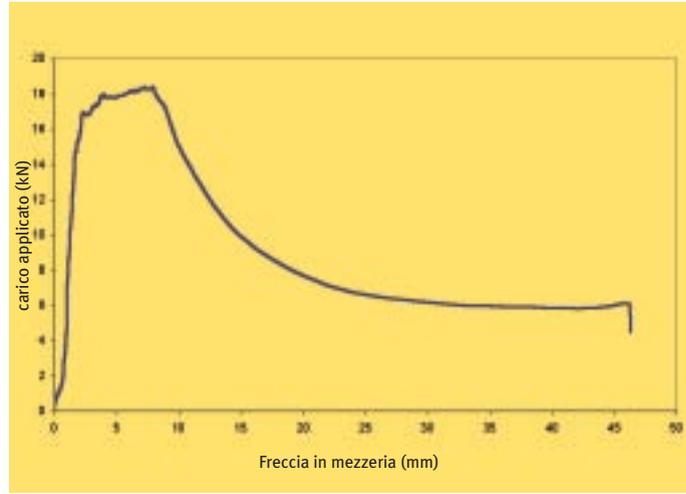
La sezione considerata è ottenuta con tre tavelloni di laterizio di altezza 6 cm (per uno spessore totale di 18 cm) e di larghezza pari a 25 cm. In fig. 8 vengono riportate le due sezioni

2 Elemento lamellare: confronto fra valori di riferimento dei carichi di rottura teorici e sperimentali

elementi testati	n° elementi	carico di rottura previsto	carico di rottura medio misurato
Elemento "lamellare" 300x25x18 cm	2	11,12 kN	12,97 kN



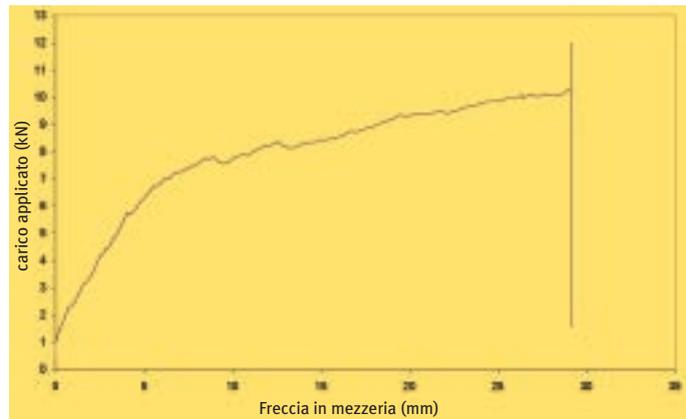
4. Comportamento a rottura degli elementi "multistrato" (tre tavelloni) L=150 cm.



5. Curva carico-abbassamento per l'elemento "multistrato" (L=150 cm).



6. Prove di carico degli elementi in laterizio "lamellare" (L=300 cm, H=3x6 cm): è da osservare come la rottura per taglio ed il successivo distacco del composito siano avvenuti dopo le rotture delle anime del laterizio dello strato intermedio.



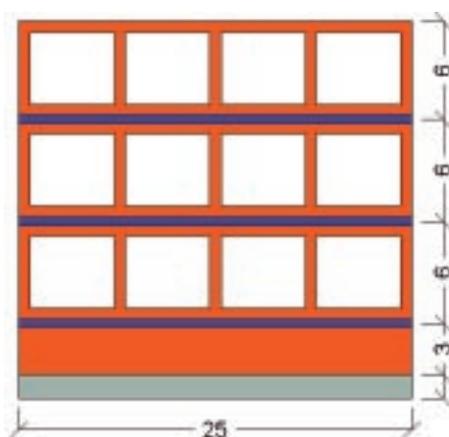
7. Curva carico-abbassamento per l'elemento in laterizio "lamellare" (L=300 cm).

ipotizzate, comprensive del relativo isolamento termico.

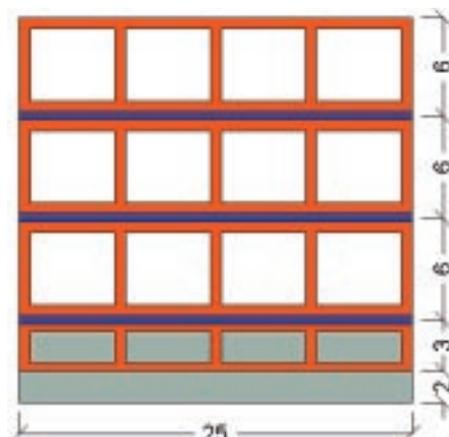
I passi di carico sono stati applicati secondo quanto prescritto dalla normativa UNI 9502, "Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso", la quale prevede uno scambio di calore tra le superfici dell'elemento e l'ambiente di tipo convettivo e radiante. La modellazione ha consentito di realizzare le mappe termiche delle sezioni analizzate ad intervalli regolari di tempo (15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 minuti), riassunte sinteticamente nelle figg. 9 e 10.

Analisi dei risultati - Come è noto, per i più comuni tipi di edifici (altezza antincendio fino a 32 metri) il valore REI minimo richiesto è di 60 minuti. Dall'analisi teorica al fuoco dei vari elementi presi in considerazione è possibile notare come la sezione 2 (fig. 8b) permetta di avere dei valori di temperatura sulla fibra inferiore di circa 80 °C dopo un'ora di carico d'incendio, garantendo quindi un corretto funzionamento del sistema latero-composito per tale intervallo di tempo: il requisito è sicuramente sufficiente a garantire la resistenza al fuoco della sezione. È da escludersi, infatti, il collasso per diminuzione della resi-

stenza e dell'area utile del laterizio in zona compressa a causa dell'azione del fuoco, non essendo la temperatura sulla sezione (inferiore ad 80 °C per la limitazione richiesta dalla presenza della resina) in grado di creare problemi in tal senso. Volendo ottenere REI superiori, pari ad esempio a 90 o 120 minuti, sono percorribili due diverse strade. È possibile fare ricorso a particolari dispositivi di protezione (ad esempio, vernici intumescenti), oppure progettare la sezione in maniera tale che, anche nell'ipotesi che il primo strato di fibre perda la sua efficacia per rammollimento della resina, la sezione rimanente sia comunque in grado di sopportare i carichi applicati grazie ai nastri disposti negli strati superiori, tenendo peraltro presente che la verifica al fuoco, secondo quanto stabilito dalla UNI 9502, va fatta per situazioni di carico accidentale ridotto. Ciò consentirebbe, tra l'altro, la verifica di resistenza al fuoco anche nel caso della sezione 1 (per la quale si otterrebbe altrimenti un valore di REI 30), raggiungendo così REI 60 senza ricorrere a particolari accorgimenti. È evidente che, anche se queste prime verifiche numeriche vanno nella direzione positiva, restano comunque necessari accertamenti sperimentali diretti, in grado di validare quanto ricavato numericamente.

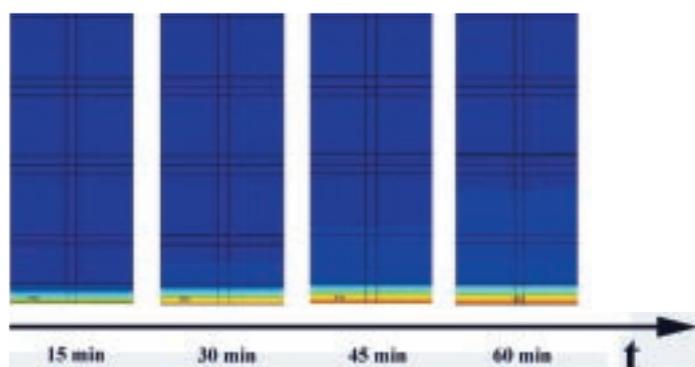


a) Sezione 1: isolamento costituito da 3 cm di laterizio pieno ed 1.5 cm di intonaco a gesso.

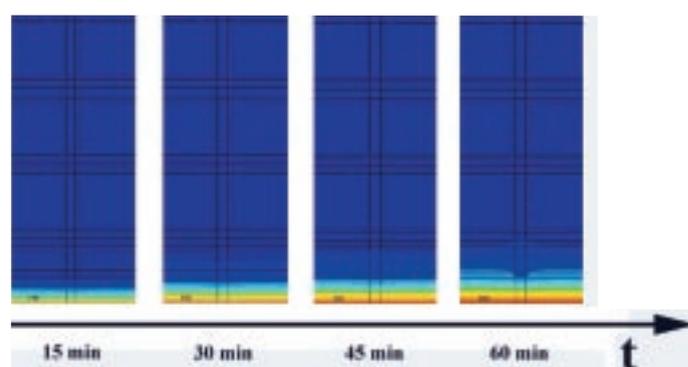


b) Sezione 2: isolamento costituito da 3 cm di laterizio forato riempito con gesso e 2 cm di intonaco a gesso.

8. Tipi di sezione e di isolamento considerati nelle analisi FEM.



9. Mappe termiche sezione 1.



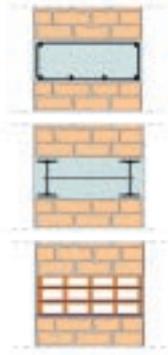
10. Mappe termiche sezione 2.

Esempi di applicazioni Architravi - Tra le prime ipotesi sulle possibili applicazioni pratiche del sistema latero-compositivo vi è quella di realizzare architravi in laterizio armato, che, rispetto alle soluzioni classiche in acciaio o calcestruzzo armato (fig. 11), possono presentare alcuni vantaggi.

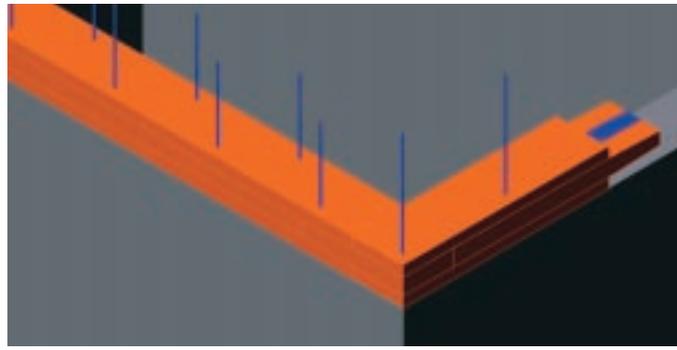
Cordoli di sommità - Al fine di migliorare il comportamento sismico delle costruzioni si è fatto largo uso di cordoli di sommità in calcestruzzo armato, che, se ben realizzati e collegati correttamente ad una muratura sottostante di buona qualità, consentono un sensibile miglioramento della risposta sismica dell'edificio. Come mostrato dagli eventi sismici degli anni più recenti però, quando manca anche solo una delle caratteristiche realizzative di cui sopra, tali elementi in c.a. possono porre importanti problemi relativamente alla loro effettiva efficacia sull'elemento murario. Un cordolo di sommità realizzato con laterizio armato con FRP (fig. 12) può essere visto come una evoluzione moderna del "cordolo in muratura armata" proposto⁽⁶⁾ negli anni '80, e può consentire di realizzare elementi strutturali particolarmente affini con la muratura sottostante e tali da assolvere, con pesi ridotti, alle stesse

funzioni dei classici cordoli in calcestruzzo armato, coniugando le eccellenti caratteristiche resistenti in compressione del laterizio con le ottime caratteristiche prestazionali dei materiali FRP. In particolare, le barre (in composito), inserite in forature verticali disposte a *quinconce*, vanno a collegare il cordolo alla muratura sottostante. Il nastro in FRP, qui indicato schematicamente in posizione centrale rispetto al laterizio, in pratica può interessare o tutta la larghezza del cordolo o, per larghezze rilevanti, le due zone più vicine ai bordi della sezione: le forature in tal caso possono essere disposte centralmente, inclinate rispetto alla verticale, in modo alternato, o a *quinconce*, come in fig. 12, senza che esse provochino significative alterazioni delle prestazioni dei nastri in FRP.

Quanto sopra descritto ha trovato una prima applicazione su di un edificio presso Collelungo (Foligno), interessato anche da un intervento di rifacimento della copertura⁽⁷⁾. In tale occasione, si è deciso di realizzare il cordolo di sommità tramite travi in laterizio pieno "lamellare". Un'analisi economica comparativa ha indicato dei costi a metro lineare del tutto simili a quelli delle altre tecnologie tradizionali di cordolature sommitali (calcestruzzo armato, acciaio). Un possibile mi-



11. Architravi: soluzioni classiche e in laterizio "multistrato" fibrorinforzato con FRP.



12. Cordolo di sommità in laterizio "lamellare".



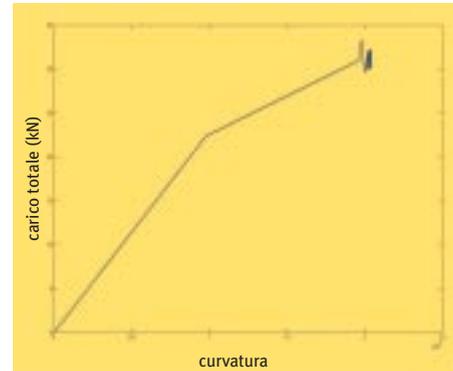
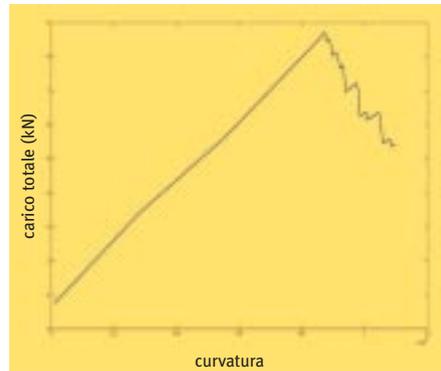
13. Particolari realizzativi del cordolo in laterizio "lamellare".



14. Particolari del collegamento del cordolo alla muratura sottostante.



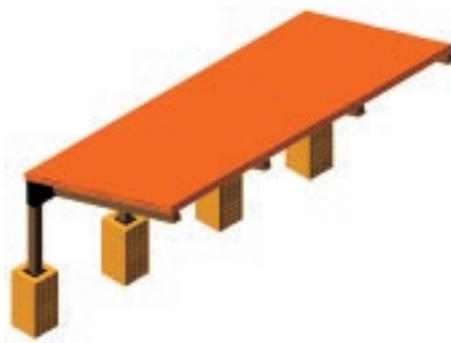
15. La trave in laterizio "lamellare" sottoposta a prova.



16. Grafici carico-curvatura per le due prove in esame.



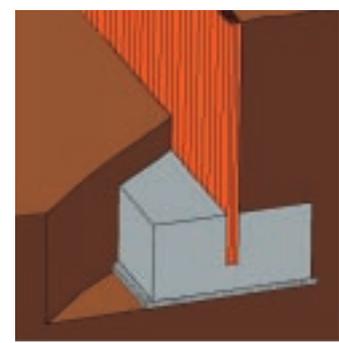
17. Scalini in laterizio fibrorinforzato.



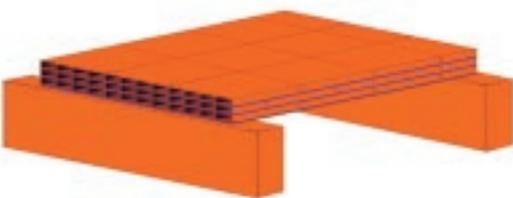
18. Tettoia in laterizio fibrorinforzato.



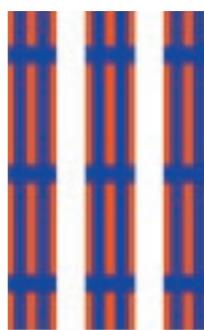
19. Muri di cinta con elementi in laterizio fibrorinforzato.



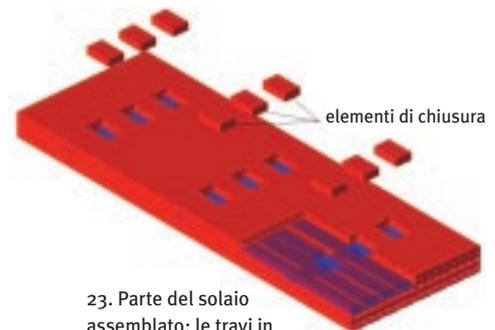
20. Muro di sostegno in laterizio fibrorinforzato.



21. Solaio realizzato con travi in laterizio "lamellare" accostate tra loro e collegate con una soletta in c.a. e/o con nastri in FRP disposti all'estradosso.



22. Solaio realizzato con travi in laterizio "lamellare" con nastri nelle due direzioni: gli elementi (pianta dei rinforzi in FRP) prima dell'assemblaggio in opera.



23. Parte del solaio assemblato: le travi in laterizio "lamellare" vengono collegate tra loro in opera con giunzioni in FRP tra i nastri predisposti trasversalmente all'asse e, successivamente, con elementi di chiusura in laterizio in grado di funzionare anche come "chiavi a taglio".

gioramento è da individuare nella sigillatura delle perforazioni armate con malte cementizie antiritiro in luogo delle resine epossidiche bicomponenti, consentendo così di ottenere anche un preconsolidamento delle parti sommitali delle murature mediante iniezione in bassa pressione a costi molto convenienti. D'altro canto, il funzionamento prevalente a taglio delle connessioni consente di fare a meno delle elevate resistenze a trazione conferite dall'utilizzo delle resine. Le figg. 13 e 14 mostrano i particolari della realizzazione del cordolo e delle operazioni per la solidarizzazione con la muratura sottostante. Per testare le caratteristiche meccaniche degli elementi così realizzati sono state costruite, dalle stesse maestranze del cantiere di Collelungo, due travi in laterizio "lamellare" di circa 4 m di luce (fig. 15), con le stesse sezioni e le stesse modalità operative dei cordoli realizzati in cantiere (sovrapposizione di tre strati di laterizio 25x50x3 cm, rinforzato con nastri in fibra di vetro di spessore 0.23 mm). Tali travi sono state poi sottoposte a prove di flessione: una per carichi orizzontali e l'altra per carichi verticali, al fine di valutare sperimentalmente sia la bontà del sistema resistente proposto, sia l'accordo con le valutazioni teoriche precedentemente espresse (fig. 16). Le prove di carico sono state eseguite su quattro punti con luce netta di 3.80 m.

I carichi di rottura (comprensivi anche del contributo del peso proprio dell'elemento) sono risultati essere pari a 7.6 kN e 31.3 kN, valori molto vicini ai carichi attesi (8.7 kN e 33 kN).

Elementi principali di solai - L'utilizzo del laterizio "lamellare" apre strade nuove per le quali è sicuramente necessaria ulteriore ricerca e sperimentazione, ma che possono essere mirate a soluzioni applicative di grande interesse, quali, ad esempio, i solai leggeri. Oltre alla semplice soluzione di affiancamento degli elementi in laterizio "lamellare" (fig. 21), che possono essere uniti con un successivo getto di una soletta in c.a. o con nastri ancora in FRP disposte trasversalmente, si possono ipotizzare soluzioni del tipo riportato nelle figg. 22 e 23, dove la solidarizzazione trasversale degli elementi in laterizio avviene tramite la realizzazione in opera delle giunzioni tra i nastri predisposti (in stabilimento) all'interno dei travetti (perpendicolarmente all'asse), ottenendo in definitiva una vera e propria piastra ortotropa in laterizio fibrorinforzato secondo le due direzioni orizzontali.

Tali proposte possono apparire, al momento, avveniristiche, ma rappresentano un argomento di ricerca di notevole interesse, viste le ottime qualità che il materiale ha mostrato in questa prima serie di prove sperimentali. Sono comunque in corso di realizzazione alcuni prototipi che verranno a breve sottoposti a verifica di laboratorio. Peraltro, come già osservato più volte, una soluzione in laterizio fibrorinforzato consentirebbe di ridurre drasticamente le masse strutturali di un impalcato: pensando infatti ad un solaio realizzato tramite questi elementi accostati tra loro, irrigidito con una soletta

di calcestruzzo, si raggiungerebbe un peso di circa 190-240 kg/m², sensibilmente inferiore quindi al peso di un comune solaio in laterocemento.

Conclusioni Il presente studio ha mostrato come sia possibile, attraverso l'accoppiamento tra laterizio e compositi, realizzare una nuova tipologia di elementi resistenti. I risultati della sperimentazione hanno fornito indicazioni molto positive e confermano quanto previsto in via teorica e numerica. I notevoli incrementi riscontrati in termini di carico ultimo rispetto al caso non rinforzato e le ottime caratteristiche di duttilità esibite nel corso delle prove dai diversi tipi di elementi testati hanno mostrato l'efficacia del sistema laterocomposito, che può essere proposto per una ampia serie di possibili applicazioni. ¶

Note

1. Prosecuzione di un precedente articolo pubblicato su "Costruire in Laterizio" n. 99/2004.
2. Nella pratica realizzativa sarà comunque opportuno che lo strato in FRP intradossale del laterizio multistrato di fig. 1 sia protetto da un ulteriore elemento in laterizio.
3. La fase di essiccazione del materiale, prima della cottura, comporta dilatazioni che non consentono di avere elementi lunghi più di 150-200 cm (a seconda del tipo di argilla e del tipo di foratura).
4. Sono in corso ulteriori sperimentazioni su manufatti realizzati con tavelloni di sezione più idonea alle finalità strutturali del laterizio "lamellare". I risultati verranno presentati in un articolo successivo.
5. Si deve osservare anche che, a rendere ulteriormente "non ottimali" le caratteristiche degli elementi provati (oltre alla esiguità degli spessori delle anime del laterizio), i tavelloni utilizzati presentavano la superficie esterna rigata, e quindi i vari strati sono stati incollati tra loro con una notevole quantità di resina ed uno spessore dello strato di incollaggio certo non esiguo.
6. G. Cangi, *Manuale del Recupero di Città di Castello*, Ed. DEI, Roma.
7. Intervento dell'Ing. Andrea Giannantoni (impresa A. Fagotti di Perugia, collaborazione tecnica Kimia S.p.A.).

Riferimenti bibliografici

1. UNI 9730, *Elementi di laterizio per solai. Terminologia e classificazione*.
2. UNI 9730, *Elementi di laterizio per solai. Limiti di accettazione*.
3. UNI 9730, *Elementi di laterizio per solai. Metodi di prova*.
4. Bacco V., Ciancabilla L., *Il manuale dei solai in laterizio*, (1994) edizioni Laterconsult.
5. Dondi M., Fabbri B., *Parametri che influenzano la resistenza meccanica dei laterizi*, ANDIL Assolaterizi.
6. Valluzzi M.R., Da Porto F., Modena C., *Comportamento meccanico di muratura realizzata con blocchi rettificati e giunti sottili*, ANDIL Assolaterizi.
7. D.M. 1996, *Criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi*.
8. Mastrodicca S., *Dissesti statici delle strutture edilizie*, (1981) Hoepli editore.
9. Borri A., Grazini A., *Il laterizio armato con FRP. Parte 1, L'edilizia*, n. 128, Milano 2003.
10. Borri A., Grazini A., *Il laterizio armato con FRP. Parte 2, L'edilizia*, n. 129, Milano 2003.

Si ringraziano per la collaborazione: la FBM-Fornaci Briziarelli Marsciano e la IAR (Ingegneria e Architettura del Restauro), la KIMIA S.p.A. e l'impresa A. Fagotti per la messa a disposizione dei materiali e per la preparazione degli elementi rinforzati con FRP; gli ingg. Giulio Castori, Andrea Ficara e Andrea Giannantoni, e i Dott.ri Marco Corradi, Katia Giannelli e Patrizia Scatigna ed il Geom. Andrea Alumni per l'organizzazione, la predisposizione e l'esecuzione delle prove sperimentali. L'idea di un manufatto in laterizio forato rinforzato con tessuti in FRP in "multistrato" e in "lamellare", come pure il marchio "laterizio lamellare", sono stati oggetto di deposito di brevetto da parte del Prof. Antonio Borri.