

A HPFRCC panel for existing industrial buildings retrofitting

Un elemento di copertura in HPFRCC per adeguare edifici industriali esistenti

M. di Prisco¹, C. Failla², G. Zani¹, M. Colombo¹, F. Sonzogni²

¹ *Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano, Milan, Italy*

² *Magnetti Building Spa, Carvico, Italy*

ABSTRACT: The recent earthquake occurred in Emilia Romagna has promoted a large national debate on the structural retrofitting strategies for the industrial building stock; as a matter of fact, many existing factories housing production lines characterized by high technological standards are surprisingly inadequate to meet the structural and energy requirements imposed by recent regulations. In this context, a cost-effective improvement strategy may be represented by the replacement of the existing roof elements with cement-based composite panels characterized by remarkable mechanical and thermal performances. The paper presents a secondary multilayered component developed in the framework of a research project funded by Regional and National authorities. The structural design of such innovative product is followed by a description of the prototyping stages and by the mechanical characterization at the material and at the full scale, with reference to standard and exceptional load combinations. / Il recente evento sismico occorso in Emilia Romagna ha promosso l'avviamento di un ampio dibattito nazionale sulle strategie di adeguamento degli edifici strumentali esistenti; molti capannoni industriali, spesso a servizio di linee produttive caratterizzate da alti standard tecnologici, risultano infatti sorprendentemente inadeguati a soddisfare le prescrizioni strutturali ed energetiche imposte dalle normative di ultima approvazione. In questo contesto, un'efficace strategia migliorativa può essere rappresentata dalla sostituzione degli elementi di copertura con pannelli a matrice cementizia caratterizzati da elevate prestazioni meccaniche e coibenti. La memoria presenta un componente secondario multistrato sviluppato nell'ambito di un progetto di ricerca finanziato da autorità regionali e nazionali. La concezione strutturale del prodotto innovativo è seguita da una descrizione delle modalità produttive e dalla caratterizzazione meccanica alla scala del materiale e alla scala al vero, con riferimento a combinazioni di carico ordinarie ed eccezionali.

KEYWORDS: fiber-reinforced concrete; roofing element; HPFRCC; structural and thermal retrofitting; sandwich element / calcestruzzo fibro-rinforzato; elemento di copertura; HPFRCC; adeguamento strutturale ed energetico; pannello multistrato

1 INTRODUZIONE

1.1 *Il problema ingegneristico*

Secondo le rilevazioni più aggiornate, il panorama edificato nazionale conta circa 650,000 edifici di natura industriale; il 20% di questi insiste sul territorio lombardo e risulta spesso inadeguato a soddisfare gli aggiornati requisiti normativi in tema di prestazioni strutturali ed energetiche.

La memoria presenta i risultati sperimentali ottenuti nell'ambito di un ampio progetto di ricerca (S.IN.E.RG.I.E ATTI.V.E. - Sistema integrato sostenibile energeticamente attivo per il rinnovo degli edifici industriali attraverso coperture composite) che ha indagato soluzioni innovative per elementi di copertura di edifici strumentali realizzati con materiali a matrice cementizia.

L'innovazione di prodotto interessa i sistemi di copertura non più a norma, in particolare con l'obiettivo di suggerire una soluzione integrata che desidera: 1) risolvere contemporaneamente i pro-

blemi statici connessi all'aumento dell'intensità delle forze orizzontali, senza dover profondamente modificare la struttura portante dell'edificio preesistente, 2) introdurre una superficie significativa di pannelli fotovoltaici, possibilmente senza doversi scontrare con problemi tecnologici non sempre di facile soluzione e 3) accrescere il livello di comfort dell'utente finale, tramite un'accresciuta coibentazione termica.

L'idea alla base del progetto prevede l'estensione alle coperture di edifici prefabbricati del concetto di composito, tramite l'accoppiamento di due sottili strati di materiale cementizio ad un pannello isolante. Allo scopo di minimizzare gli spessori garantendo un'elevata durabilità, si è studiato e sperimentato l'uso di compositi cementizi rinforzati con tessuti in fibra di vetro alcali-resistente (TRC - Textile Reinforced Concrete, Colombo et al. 2013) e con fibre disperse di natura metallica (HPFRCC - High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites, di Prisco et al. 2009, Reinhardt et al. 2015).

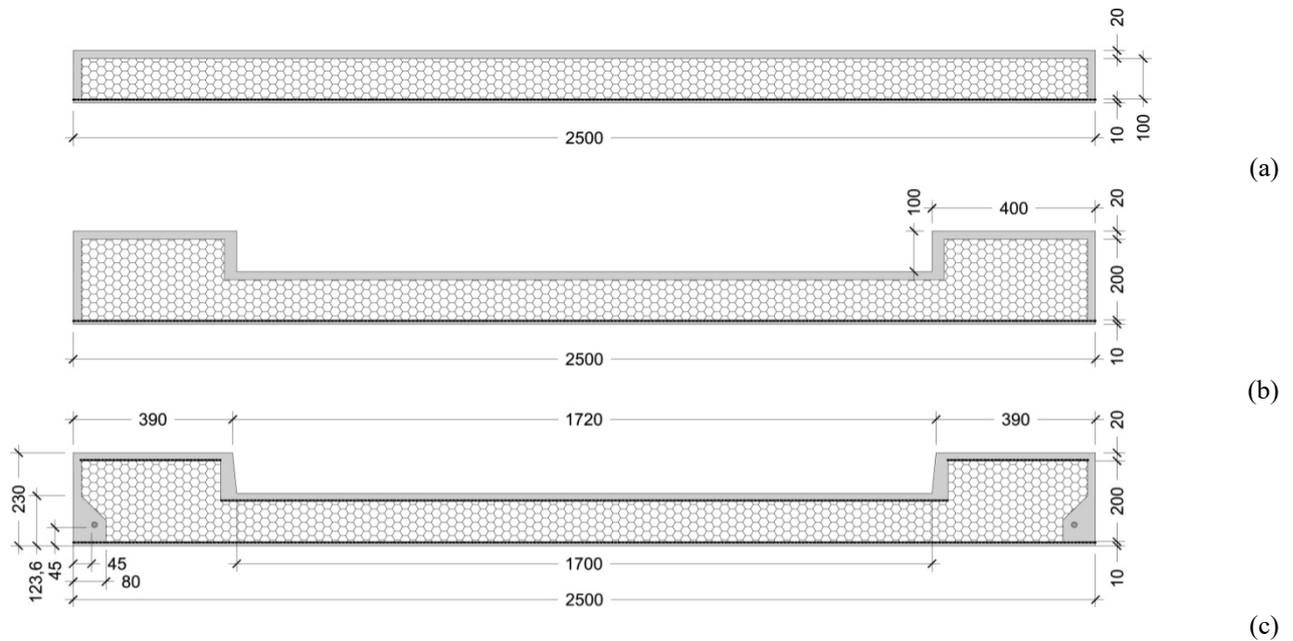


Figure 1. Cross-section optimization: uniform sandwich structure (a), second version (b) and final version (c) / Ottimizzazione della sezione trasversale: semplice estensione della stratificazione sandwich (a), seconda versione (b) e versione finale (c).

Il sistema proposto è costituito da elementi prefabbricati, intrinsecamente connessi a benefici di qualità in termini di prodotto e processo, tipici dell'edilizia industrializzata.

Una prima innovazione di tipo architettonico è riconoscibile nella concezione della sezione resistente composita dell'elemento secondario, realizzata con materiali compositi (calcestruzzi fibrorinforzati ad alte prestazioni HPFRCC e microcalcestruzzi rinforzati con tessuti in fibra di vetro TRC), che hanno il vantaggio di offrire rilevanti prestazioni strutturali, anche se utilizzati in piccolo spessore.

La seconda innovazione è di tipo incrementale e si concretizza ideando manufatti di copertura già progettati per accogliere l'impianto fotovoltaico e le connessioni impiantistiche a corredo. La logica della predisposizione preserva le funzionalità della copertura, soprattutto in termini di impermeabilità, e consente di minimizzare le fasi di installazione in opera.

Il sistema strutturale di ottimo è stato ricercato iterativamente, a partire dalla semplice estensione della stratificazione sandwich testata sperimentalmente alla meso-scala (di Prisco et al. 2011, di Prisco e Zani 2012). In particolare, si è considerato un pannello secondario di larghezza pari a 2.5 m e lunghezza pari a 5 m. Nella sezione trasversale di Figura 1(a) è possibile identificare uno strato di estradosso in HPFRCC di spessore pari a 20 mm, uno strato di intradosso in TRC di spessore pari a 10 mm con rinforzo in rete, due pareti verticali di spessore 20 mm in HPFRCC e un nucleo in EPS di spessore pari a 100 mm. La seconda versione del pannello di copertura (Figura 1(b)) presenta due inspessimenti laterali di larghezza pari a 400 mm. Questa scelta formale è stata operata al fine di incrementare la rigidità flessionale del pannello, ridurre gli effetti

di ponte termico lineare localizzato all'interfaccia tra due elementi consecutivi e favorire la completa integrazione architettonica dei moduli fotovoltaici. Sulla scorta di risultati sperimentali preliminari si è infine deciso di introdurre un rinforzo in fibre di vetro alcali-resistente anche in corrispondenza degli strati in HPFRCC. Allo scopo di semplificare le procedure di getto, si è deciso di posare il rinforzo a diretto contatto con la superficie in polistirene; esperienze sperimentali parallele hanno infatti dimostrato l'efficacia della componente tessile anche nel caso di applicazione eccentrica. Nella sezione trasversale di Figura 1(c) si possono inoltre notare l'introduzione di due barre $\phi 14$ di armatura longitudinale in acciaio B450C, l'ispessimento delle pareti laterali, legato alla necessità di garantire un sufficiente ricoprimento delle barre di armatura, e una sagomatura trapezoidale delle piastre verticali interne, finalizzata a favorire le procedure di scasso.

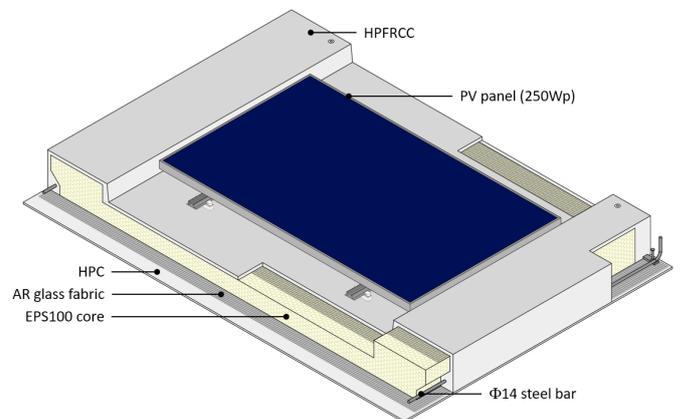


Figure 2. 3D view of the proposed panel / Rappresentazione tridimensionale del pannello proposto.

È importante sottolineare come le parti strutturali a matrice cementizia mostrate in Figura 2 risultino solidarizzate dallo strato funzionale coibente a cui è affidato il trasferimento di deboli azioni tangenziali. La soluzione consente di ottenere manufatti più leggeri (circa 1.2 kN/m^2), mediamente del 50%, di quelli attualmente disponibili sul mercato degli elementi prefabbricati in calcestruzzo. La leggerezza consente inoltre minori consumi di produzione, di logistica di trasporto e costruttiva in opera, oltre a preservare le strutture verticali di sostegno degli edifici esistenti, con riferimento alle forze orizzontali legate all'evento sismico.

2 MATERIALI

2.1 Calcestruzzo fibrorinforzato ad alte prestazioni (HPFRCC)

La miscela di calcestruzzo fibrorinforzato ad alte prestazioni (HPFRCC) riportata in Tabella 1 è stata sviluppata iterativamente, al fine di massimizzarne le prestazioni. Il materiale indurito è stato caratterizzato a trazione attraverso prove di flessione su provini intagliati (Figura 3) e prove di flessione su provini strutturali di spessore nominale pari a 20 mm (Zani 2013). La classe di resistenza a compressione (C120) è stata definita sottoponendo a compressione uniassiale provini cilindrici di diametro pari a 100 mm. Il composito cementizio, rinforzato con microfibre in acciaio ad alto tenore di carbonio (lunghezza 13 mm, diametro 0.20 mm, rapporto d'aspetto 65) in percentuale volumetrica dell'1.2%, è classificabile come prodotto fibrorinforzato di classe 14a, in accordo con le indicazioni fornite dal Codice Modello 2010 (fib Model Code 2010).

Table 1. HPFRCC mix design / Composizione della miscela di calcestruzzo fibrorinforzato ad alte prestazioni (HPFRCC).

Component	Dosage kg/m ³
Cement I 52.5	600
Sand 0 ÷ 2 mm	847
Water	225
Superplasticizer	28
Blast furnace slag	500
Steel fibers	100

2.2 Calcestruzzo tessile (TRC)

Il calcestruzzo tessile è un materiale composito ottenuto annegando tessuti in fibre di diversa natura all'interno di micro-calcestruzzi ad elevata lavorabilità. Nei casi pratici decade il requisito di ricoprimento anticorrosivo dei materiali di rinforzo, consentendo un contenimento significativo dello spessore globale. Nell'ambito del progetto di ricerca, si è provveduto ad indagare differenti tecnologie di

rinforzo, quali fibre di vetro alcali-resistenti, fibre di carbonio, fibre aramidiche e fibre di basalto. La selezione della tecnologia di rinforzo ottimale (Tabella 2) è stata effettuata imponendo il soddisfacimento di requisiti di contenimento dei costi, presenza di un adeguato appretto di stabilizzazione, utilizzo di geometrie tali da favorire una completa impregnazione con la matrice cementizia e minimizzazione del numero di strati introdotti. I tessuti sono stati valutati combinando esami qualitativi preliminari a prove sperimentali su campioni di dimensione $70 \times 400 \text{ mm}$ sottoposti a prove di trazione uniassiale. Il calcestruzzo tessile – prodotto con una miscela HPC analoga a quella indicata in Tabella 1 (al netto del rinforzo in fibre metalliche) e rinforzato con un solo strato di rete in vetro alcali-resistente posto in posizione baricentrica – è stato indagato nelle direzioni di trama e ordito tramite prove di trazione uniassiale. I risultati sono illustrati in Figura 4, in termini di curve medie, dispersione dei risultati (retino solido) e confronto con la risposta media del solo tessuto (linee tratteggiate).

Table 2. AR glass textile characteristics / Caratteristiche del tessuto in vetro AR.

Characteristic	
Material	AR-glass
Manufacturing technique	Leno weave
Warp spacing [mm]	4.9
Weft spacing [mm]	12.5
Warp [Tex]	2x1200
Weft [Tex]	2400

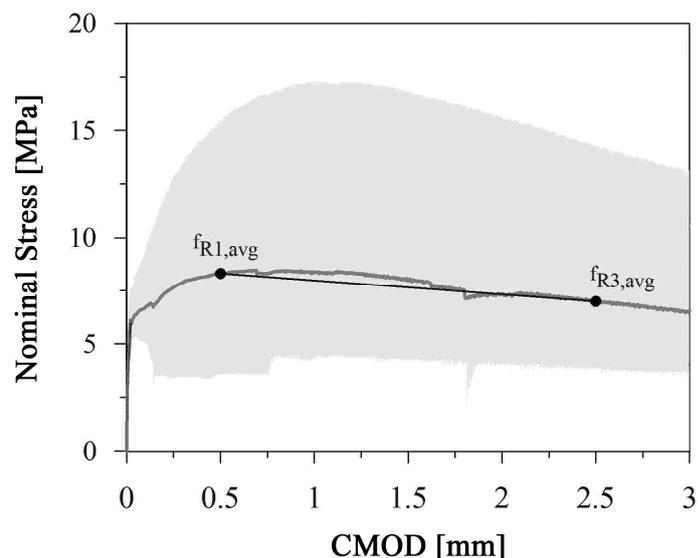


Figure 3. HPFRCC notched beam specimens results, in terms of Nominal Stresses vs. Crack Mouth Opening Displacements (CMOD) / Risultati sperimentali delle prove condotte su travetti intagliati in HPFRCC, in termini di sforzo nominale e apertura di fessura alla bocca dell'intaglio (CMOD).

È importante sottolineare che la progressiva perdita di aderenza (riduzione di rigidità identificabile sul terzo ramo del diagramma carico-spostamento)

riscontrata all'estremità dei provini è intrinsecamente legata alle modalità di prova alla meso-scala e non implica pertanto una potenziale inefficienza del rinforzo introdotto nei prototipi in scala al vero, poiché in questa scala la maggiore lunghezza di ancoraggio è tale da impedire ogni tipo di scorrimento.

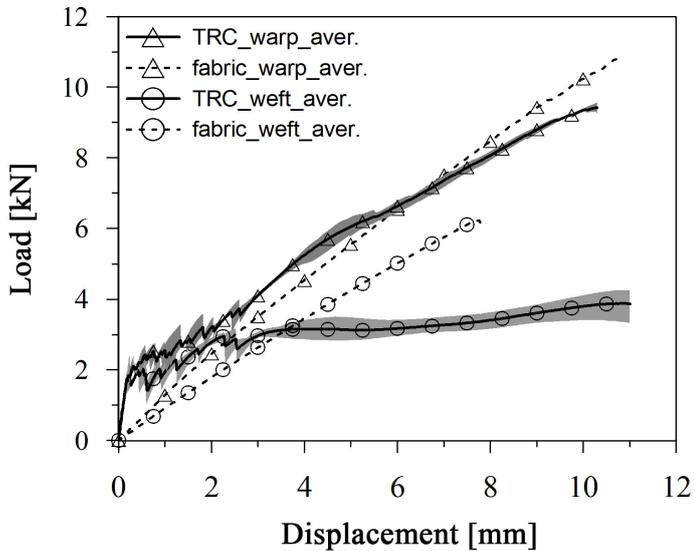


Figure 4. TRC and plain fabrics uniaxial tests results, along the warp and the weft reinforcement directions / Risultati sperimentali delle prove di trazione uniassiale condotte su provini in TRC e su campioni di rete, nelle direzioni di ordito e trama.

2.3 Nucleo in materiale isolante

Il materiale isolante è stato scelto in seguito ad un processo di caratterizzazione meccanica alla meso-scala, che ha previsto la valutazione sperimentale di compositi multistrato prodotti con differenti tecnologie isolanti (in particolare EPS100 e schiume di vetro provenienti da processi di riciclo).

Nonostante il polistirene presenti delle criticità associate al comportamento alle alte temperature, la scelta finale è ricaduta su questo prodotto, in ragione dell'elevata economicità.

3 SVILUPPO DEL PROTOTIPO

3.1 Ottimizzazione delle tecnologie produttive

In sede preliminare, sono state analizzate le principali procedure produttive adottabili, con riferimento ad elementi strutturali disponibili sul mercato. Alla scala del materiale questa fase ha previsto l'ottimizzazione delle procedure di miscelazione in grandi volumi dei compositi a base cementizia, la verifica sperimentale della stabilità e della ripetibilità del mix e la valutazione dei fenomeni di segregazione legati ad un debole controllo del contenuto d'acqua degli aggregati silicei.

Ai livelli della mesoscala e della macro-scala sono stati infine definite le soluzioni di continuità tra materiali contigui (TRC, EPS, reti di rinforzo localizza-

te, HPFRC, sistemi di ancoraggio e di movimentazione) e le modalità di produzione alternative (getto in verticale, getto in orizzontale, progettazione del sistema di cassetta).

3.2 Prototipazione

A valle del processo di ottimizzazione, sono stati prodotti dodici prototipi nominalmente identici. Il processo di produzione può essere così riassunto:

- 1) preparazione del pannello isolante in EPS 100, attraverso l'incollaggio di elementi preliminarmente sagomati;
- 2) applicazione della rete di rinforzo tramite incollaggio puntuale sulle superfici orizzontali di estradosso e di intradosso;
- 3) confezionamento della matrice HPC presso la centrale di betonaggio e getto dello strato d'intradosso da 10 mm tramite benna (Figura 5);
- 4) posizionamento delle barre longitudinali di armatura in acciaio B450C e del pannello isolante rinforzato con reti in fibra di vetro alcali resistente; l'aderenza del pannello isolante con la matrice HPC è stata assicurata dalla sovrapposizione a fresco e dalla successiva attivazione di legami di adesione chimica;



Figure 5. Casting of the HPC intrados layer / Getto dello strato di intradosso in HPC.



Figure 6. Positioning of the top steel mould / Posizionamento del controscasso superiore in acciaio.



Figure 7. Demolding of the panel prototype / Scassero e movimentazione del prototipo.

- 5) posizionamento del controcassero superiore in acciaio e getto della piastra di estradosso (livello superiore) (Figura 6);
- 6) scassero, movimentazione (Figura 7) e stoccaggio dei prototipi dopo 10/12 ore di maturazione forzata a vapore.

4 VERIFICA SPERIMENTALE

4.1 Prove di resistenza meccanica

Sono state condotte presso i laboratori sperimentali del Polo Territoriale di Lecco (Politecnico di Milano) sei prove di carico su prototipi al vero. I test sono stati eseguiti in controllo di spostamento, utilizzando un telaio di contrasto dotato di un attuatore elettromeccanico e di un trasduttore di forza con capacità pari a 1000 kN.

La campagna ha previsto due prove di flessione longitudinale su quattro punti (di Prisco et al. 2015), due prove di flessione trasversale su quattro punti (di Prisco et al. 2015) e due prove di taglio (flessione su quattro punti con luce di taglio ridotta, Zani et al. 2016). In ogni situazione i campioni hanno esibito un'ottima capacità portante, un'elevata duttilità e una notevole capacità redistributiva offerta dalla presenza delle reti di rinforzo in vetro alcali-resistente.

4.1.1 Flessione longitudinale

Due campioni nominalmente identici sono stati testati a flessione longitudinale, secondo lo schema di flessione su quattro punti illustrato in Figura 8. I campioni sono stati strumentati con cinque trasduttori potenziometrici per la misurazione degli spostamenti verticali, tre trasduttori potenziometrici per la misurazione degli spostamenti relativi lungo la direzione longitudinale della lastra di intradosso e tre trasduttori potenziometrici per la misurazione degli spostamenti relativi lungo la direzione longitudinale delle lastre di estradosso.

La risposta delle due strutture testate è stata caratterizzata da livelli di resistenza e di duttilità piena-

mente soddisfacenti; In Figura 9 è possibile notare come i carichi di rottura siano circa quattro volte più alti di quelli riconducibili a sollecitazioni tipiche dello Stato Limite Ultimo, a fronte di un fattore 2.3 generalmente accettato negli approcci progettuali basati sul *design by testing*. Le rotture sono state raggiunte per localizzazione di una fessura flessionale e per localizzazione di fessure di taglio in corrispondenza di una parete laterale. L'elevata capacità redistributiva ha consentito ai pannelli di raggiungere livelli di carico significativi, nonostante alcune parti presentassero criticità legate alla procedura di produzione (distribuzione disomogenea delle fibre sulle pareti laterali e scarso controllo degli spessori nominali dello strato in HPRCC).



Figure 8. Longitudinal bending test setup / Apparato di prova a flessione longitudinale.

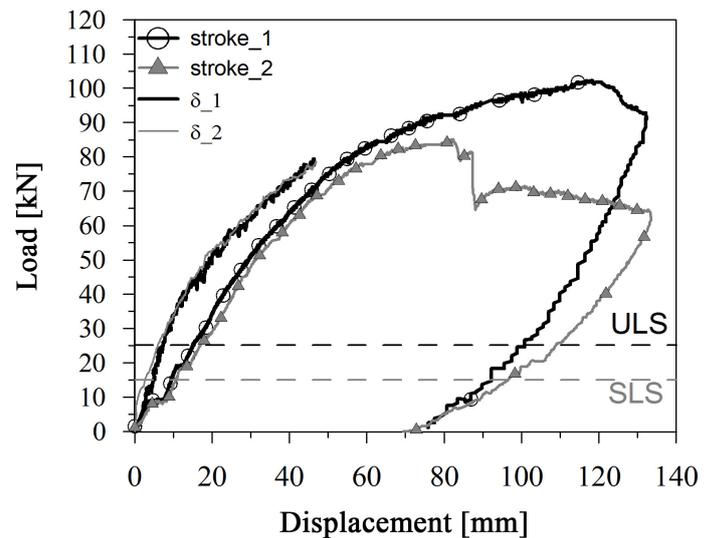


Figure 9. Longitudinal bending: experimental results and comparison with the SLS and ULS loads / Flessione longitudinale: risultati sperimentali e confronto con i livelli di carico associati allo SLE e allo SLU.

4.1.2 Flessione trasversale

Due campioni nominalmente identici sono stati testati a flessione trasversale, secondo lo schema di flessione su quattro punti illustrato in Figura 10. I

prototipi sono stati strumentati con cinque trasduttori potenziometrici per la misurazione degli spostamenti verticali, tre trasduttori potenziometrici per la misurazione degli spostamenti relativi lungo la direzione trasversale della lastra di intradosso e tre trasduttori potenziometrici per la misurazione degli spostamenti relativi lungo la direzione trasversale della lastra inferiore di estradosso. Anche in questo caso i campioni hanno esibito marcati livelli di resistenza e di duttilità; In Figura 11 possono infatti essere riconosciuti carichi di picco 4/5 volte più alti di quelli riconducibili alla sollecitazione SLU. Le rotture sono state raggiunte per localizzazione di una fessura di mezzera sulla testata del pannello e per delaminazione dello strato in TRC. Quest'ultima modalità è figlia di una tecnologia costruttiva alternativa, che ha previsto una ripresa di getto tra il calcestruzzo tessile di spessore 10 mm e la restante parte in calcestruzzo fibrorinforzato.



Figure 10. Transverse bending test setup / Apparato di prova a flessione trasversale.

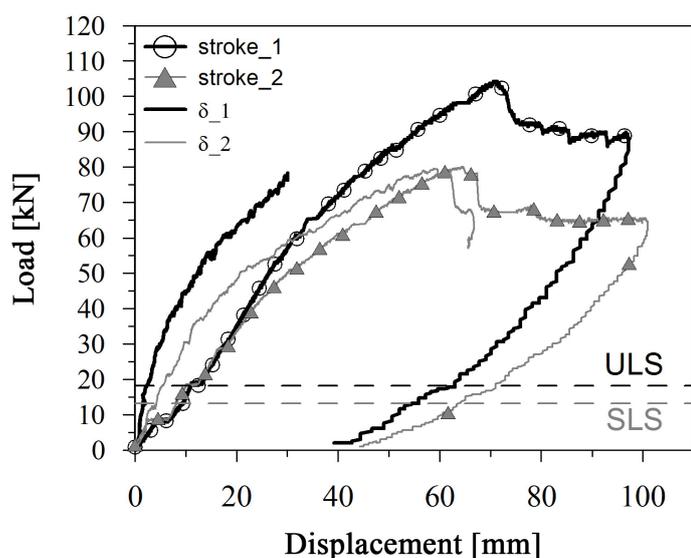


Figure 11. Transverse bending: experimental results and comparison with the SLS and ULS loads / Flessione trasversale: risultati sperimentali e confronto con i livelli di carico associati allo SLE e allo SLU.

4.1.3 Taglio

Due campioni nominalmente identici sono stati testati a taglio, secondo il setup di flessione su quattro punti con luce di taglio ridotta illustrato in Figura 12.



Figure 12. Shear test setup / Apparato di prova a taglio.

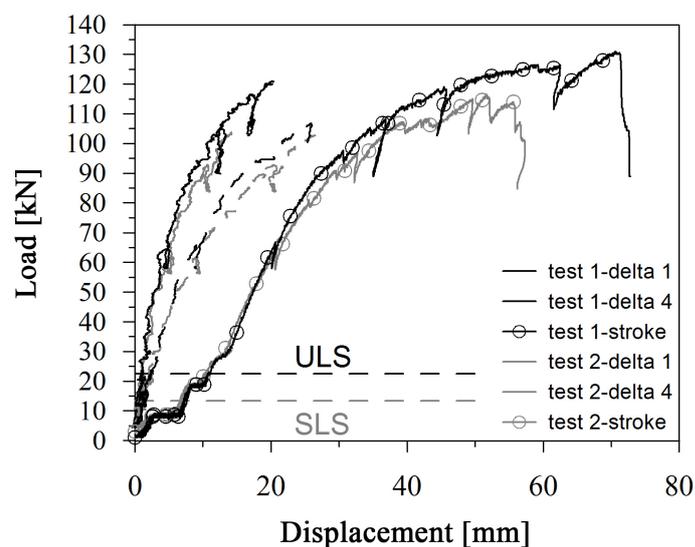


Figure 13. Shear: experimental results and comparison with the SLS and ULS loads / Taglio: risultati sperimentali e confronto con i livelli di carico associati allo SLE e allo SLU.

I campioni sono stati strumentati con cinque trasduttori potenziometrici per la misurazione degli spostamenti verticali, due trasduttori potenziometrici per la misurazione degli spostamenti relativi lungo la diagonale compressa, due trasduttori potenziometrici per la misurazione degli spostamenti relativi lungo la diagonale tesa e due trasduttori potenziometrici per la misurazione degli spostamenti relativi lungo il tirante associato al meccanismo di resistenza ad arco. In Figura 13 possono essere identificati carichi di picco 6 volte più alti di quelli riconducibili alla sollecitazione di SLU, nonostante gli elementi non presentino alcuna armatura tradizionalmente progettata per resistere a queste azioni. Le rotture sono state raggiunte per localizzazione di

fessure per taglio, con una propagazione instabile rallentata dalla progressiva attivazione del contributo membranale offerto dal rinforzo tessile.

4.2 Prove di resistenza in condizioni d'incendio

Un ulteriore prototipo è stato sottoposto a prova d'incendio (Zani et al. 2016) presso i laboratori del centro di certificazione CSI di Bollate (MI). Il campione è stato posizionato su una camera di dimensioni 3 m × 4 m, strumentato, caricato in combinazione eccezionale e riscaldato secondo la curva di temperatura definita dalla norma UNI EN 1363-1:2012. Durante il test sono stati osservati fenomeni macroscopici quali lo scioglimento e la combustione del nucleo in materiale isolante (con la conseguente fuoriuscita di fumi indicata in Figura 14) e il parziale sfondamento degli strati di estradosso in HPFRCC, in corrispondenza dei punti di applicazione del carico statico. Il collasso globale è avvenuto a causa di un fenomeno di spalling distruttivo localizzato nella crosta superiore in HPFRCC (Figura 15).



Figure 14. Fire test: EPS burning phase / Prova al fuoco: fase di combustione del nucleo isolante in polistirene.



Figure 15. Fire test: collapse due to the HPFRCC spalling / Prova al fuoco: collasso causato dallo spalling distruttivo della piastra superiore in HPFRCC.

Nonostante la classificazione R30 abbia certificato la completa utilizzabilità del pannello nei contesti

industriali identificati come target progettuali, si è scelto di ottimizzare le prestazioni del pannello, avviando una campagna sperimentale che ha previsto l'aggiunta di fibre micropolipropileniche alla matrice a base cementizia, in misura di 2 kg/m³. Le fibre micropolipropileniche, sublimando, sviluppano un reticolo di sottili canali attraverso i quali è possibile dissipare le sovrappressioni generate dal vapore contenuto nella matrice, scongiurando il fenomeno di spacco e consentendo di sfruttare appieno le elevate prestazioni meccaniche del materiale ad alte prestazioni.

4.3 Realizzazione di una struttura dimostrativa

È stata infine realizzata all'interno del Campus del Polo Territoriale di Lecco del Politecnico di Milano, una tettoia dimostrativa di dimensioni in pianta 5 m × 7,5 m, costituita da una struttura metallica a portali ospitante tre prototipi (Figura 16). Negli elementi di copertura sono stati integrati 12 moduli fotovoltaici, per una potenza elettrica nominale complessiva di 2.76 kW. La realizzazione della tettoia ha avuto le seguenti finalità:

- 1) verificare sul campo le modalità di messa in opera e di assemblaggio dei pannelli fotovoltaici;
- 2) monitorare le prestazioni energetiche dei moduli fotovoltaici integrati, con riferimento alla ventilazione e alle temperature superficiali;
- 3) monitorare la durabilità, con particolare riferimento alle prestazioni di tenuta all'acqua.

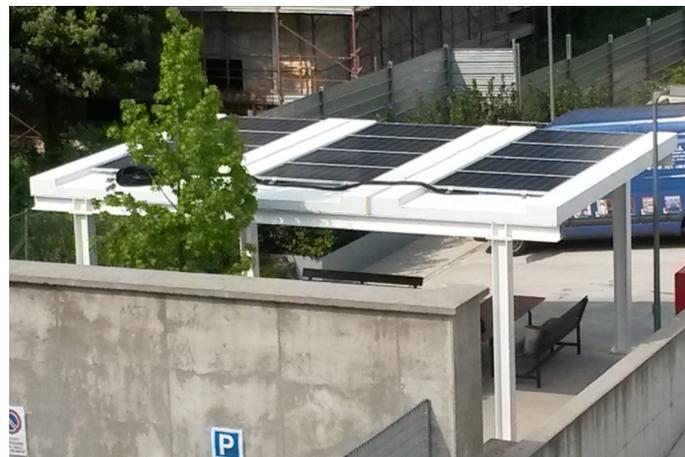


Figure 16. Demo structure built at the Lecco Campus of Politecnico di Milano / Struttura dimostrativa edificata presso il Polo Territoriale di Lecco del Politecnico di Milano.

5 CONCLUSIONI

Based on the experimental evidences, the following conclusions can be drawn: 1) multilayered cement-based systems can be effectively introduced in the precast concrete industry as retrofitting solutions; 2) the use of high-performance cement-based materials in innovative structural components can ensure significant structural capacities, in particular with ref-

erence to the longitudinal and transverse bending behaviors and to the shear behavior of elements devoid of ordinary transverse reinforcement; 3) the experimental campaign showed that the proposed secondary roof panel was able to meet all the research project goals, i.e. reduced self-weight (1.2 kN/m^2), remarkable thermal insulation ($U = 0.42 \text{ W/m}^2\text{K}$), waterproof performance of the extrados HPFRCC layer, fire safety (R30) and architectural integration of photovoltaic systems.

Con riferimento alle evidenze sperimentali, è possibile trarre le seguenti conclusioni: 1) i sistemi multistrato a base cementizia possono essere efficacemente introdotti nel mercato della prefabbricazione, in particolare come soluzioni per l'adeguamento degli edifici strumentali esistenti; 2) l'utilizzo di materiali cementizi ad alte prestazioni può assicurare significative prestazioni strutturali, soprattutto con riferimento ai comportamenti a flessione longitudinale e trasversale e al comportamento a taglio di strutture sprovviste di ordinarie armature trasversali; 3) la campagna sperimentale ha dimostrato che il pannello secondario di copertura proposto è in grado di soddisfare requisiti progettuali quali la riduzione dei pesi propri (carichi strutturali pari a circa 1.2 kN/m^2), l'incremento delle prestazioni energetiche (trasmissione termica U pari a $0.42 \text{ W/m}^2\text{K}$), la possibilità di attribuire alla piastra di estradosso in HPFRCC il ruolo di strato di tenuta all'acqua, la sicurezza in condizioni di incendio (R30) e la completa integrazione architettonica di pannelli fotovoltaici destinati alla produzione di energia elettrica.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare Regione Lombardia e il Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca per il finanziamento delle attività. Si ringraziano inoltre i Partner del Progetto di Ricerca S.IN.E.RG.I.E ATTI.V.E. (Gavazzi Tessuti Tecnici Spa, EAS Italia Srl, Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano - Dr.ssa Adriana Angelotti) e gli ingegneri Marco Carlo Rampini e Luca Gussoni per il prezioso contributo offerto nelle fasi sperimentali e di rielaborazione dati.

REFERENCES

Colombo, I. G., Magri, A., Zani, G., Colombo, M., di Prisco, M. 2013. Textile Reinforced Concrete: experimental investigation on design parameters. *Materials and Structures*, (46)11: 1953-1971.

di Prisco, M., Colombo, M., Zani, G., Rampini, M. C. 2015. Existing industrial buildings: a sustainable solution for roofing rehabilitation. *Proc. of the SSCS 2015 Numerical Modeling - Strategies for Sustainable Concrete Structures Conference*, Rio de Janeiro.

di Prisco, M., Ferrara, L., Lamperti, M., Lapolla, S., Magri, A., Zani, G. 2011. Sustainable Roof Elements: A Proposal Of-

fered by Cementitious Composites Technology. *Innovative Materials and Techniques in Concrete Construction*, 167-181.

di Prisco, M., Plizzari, G., Vanderwalle, L. 2009. Fiber reinforced concrete: new design perspectives. *Materials and Structures*, 42 (9): 1261-128.

di Prisco, M., Zani, G. 2012. Experimental and numerical analysis of advanced cementitious composites for sustainable roof elements. *Proc. of the SSCS 2012 Numerical Modeling - Strategies for Sustainable Concrete Structures Conference*, Aix-en-Provence.

fib Model Code 2010. 2012. Vol. 1 and 2 (bull. 65 and 66), *International Federation for Structural Concrete*.

Reinhardt, H. W., Parra-Montesinos, G. J., Garrecht H. 2015. HPFRCC-7. *Proc. of the 7th RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*. RILEM Publications S.A.R.L.

Zani, G. 2013. High Performance Cementitious Composites for Sustainable Roofing Panels. *PhD Thesis*, Politecnico di Milano.

Zani, G., Rampini, M. C., Colombo, M., di Prisco, M. 2016. Shear Behavior of Multilayered Panels for Roofing Rehabilitation. *Proc. of the 4th international conference on ultra-high performance concrete and high-performance materials (HiPerMat)*, Kassel.

Zani, G., Rampini, M. C., Colombo, M., di Prisco, M. 2016. Fire Behavior of Sandwich Panels for Roofing Applications, *Key Engineering Materials*, 711: 775-782.