

**CONCRETE 2014**  
**PROGETTO E TECNOLOGIA PER IL COSTRUITO**  
*Tra XX e XXI secolo*

**Termoli**  
**25 e 26 settembre 2014**

**RESISTENZA AL FUOCO, PRESTAZIONI MECCANICHE ED EVIDENZE APPLICATIVE DEI MICROCALCESTRUZZI AD ELEVATISSIME PRESTAZIONI REFOR-TEC<sup>®</sup>, UTILIZZATI NEL CAMPO DEL RINFORZO DI STRUTTURE IN C.A. E IN MURATURA.**

**Roberto Rosignoli, Stefano Maringoni**

*Tecnochem Italiana S.p.A., Italia*

*e-mail: roberto.rosignoli@tecnochem.it, stefano.maringoni@tecnochem.it*

---

**Parole chiave:** HPFRC, microcalcestruzzi, duttilità, resistenza a trazione, resistenza al fuoco

**Abstract**

REFOR-tec<sup>®</sup> family UHPFRCC (Ultra High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites) represents an exceptional evolution in capacity and application fields of High Performance Fibre Reinforced Concretes.

The micro-concrete system REFOR-tec<sup>®</sup> overcomes many limitations of the basic behaviour of concrete: for standard concrete the increased strength is always accompanied by a loss of ductility causing brittle fracture. REFOR-tec<sup>®</sup> technology represents a revolution in the formulation of UHPC - Ultra High Performing Concretes: the products belonging to this product family have in common high mechanical and compression resistances (from 100 to 280 Mpa) and flexural resistance (>25 to 80 MPa) with optimum values of ductility (Fracture Energy from 15.000 to 35.000 N/m) and other exceptional performances. In this article we focalized REFOR-tec<sup>®</sup> fire resistance, tested according to the official norms (EN 1363-1 and 1363-3).

## Introduzione

Con gli acronimi HPFRC (High Performance Fiber Reinforced Concrete) ed UHPFRCC (Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites) si definiscono i formulati cementizi in grado di sviluppare, a maturazione avvenuta, prestazioni meccaniche ed energia di frattura straordinariamente elevate rispetto alle tradizionali malte strutturali. In questa nota viene approfondito l'aspetto della resistenza al fuoco del formulato REFOR-tec® GF5 ST HS, testato tramite prove in scala reale su travi in calcestruzzo rinforzate mediante incamiciatura su tre lati dallo spessore di quattro cm.

## La tecnologia e le caratteristiche del materiale

L'incremento delle resistenze meccaniche nel calcestruzzo tradizionale si traduce sempre in una perdita di duttilità ed in un comportamento fragile del materiale. La tecnologia **REFOR-tec®** UHPFRCC (Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites) consente il superamento di questi limiti basilari del comportamento dei calcestruzzi e rappresenta un'evoluzione formulativa degli HPFRC (High Performance Fiber Reinforced Concretes). Questa tecnologia infatti unisce elevati valori delle resistenze meccaniche (100- 280 MPa di Compressione e > 30 MPa di Flessione) con incrementi di duttilità (Energia di Frattura 15.000-35.000 N/m) e di resistenza a trazione ( $\geq 7$  MPa).

Nel campo del rinforzo strutturale questa tecnologia sta trovando larghi campi d'utilizzo grazie ad una serie di vantaggi che si possono riassumere nelle seguenti specificità:

- **duttilità** sfruttabile nei calcoli strutturali (deformazioni ultime del materiale).
- **resistenza a trazione** sfruttabile nei calcoli strutturali;
- **aderenza al taglio** delle camicie di rinforzo;
- **minimizzazione degli spessori applicativi** ed impatto architettonico basso o in taluni casi nullo;
- **minimizzazione dei carichi aggiuntivi** gravanti sulla struttura;
- **durabilità** degli interventi grazie all'effetto barriera anticarbonatazione ed antiossidazione;
- **vantaggi economici**: in molti casi, nelle strutture in c.a., è possibile realizzare l'intervento di ripristino del copriferro e quello di rinforzo strutturale in un'unica fase applicativa con grandi vantaggi nelle tempistiche realizzative;
- **vantaggi ambientali** e di **ecosostenibilità** grazie all'utilizzo nella formula di materiali di postproduzione industriale, alle emissioni VOC praticamente nulle, alla riciclabilità 100% a fine vita.
- Poter progettare **rinforzi strutturali altamente prestazionali anche nei confronti della resistenza al fuoco**. Tale aspetto verrà approfondito nello sviluppo di questa nota.

## Caratteristiche fisico-meccaniche

La resistenza al fuoco rappresenta in taluni casi l'anello debole di alcune tecniche di rinforzo (es. rinforzi con materiali compositi in matrice resinosa, beton plaqu  ecc.) tanto da dover progettare, in questi casi, opportuni rivestimenti ignifughi, il pi  delle volte complessi e dispendiosi. La resistenza al fuoco dei microcalcestruzzi ad elevatissime prestazioni REFOR-tec<sup>®</sup> era quindi un importante parametro tecnologico, la cui valutazione avrebbe permesso ai progettisti di confrontare i pro ed i contro delle diverse tecniche di rinforzo, commisurando anche il dato della resistenza strutturale all'incendio.

Le caratteristiche meccaniche del microcalcestruzzo fibrorinforzato **REFOR-tec<sup>®</sup> GF5 ST-HS**, testato nelle prove di resistenza al fuoco, sono le seguenti:

• Tempo di lavorabilit�	≥ 1 h
• Pedonabilit�	12 h a 20 �C
• Agibilit� a traffico leggero	24 h a 20 �C
• Agibilit� con massime sollecitazioni	3 gg. a 20 �C
• Densit�	2.450 Kg/m <sup>3</sup>
• Resistenza alla compressione 1 gg	48 MPa
• Resistenza alla compressione 28 gg	130 MPa
• Resistenza alla trazione diretta 28 gg	8,5 MPa
• Resistenza alla flessotrazione 28 gg	32 MPa
• Resistenza al taglio	16 MPa
• Modulo Elastico	38 GPa
• Energia di frattura	32.500 N/m
• Ritiro endogeno	< 0,05 %
• Profondit� di carbonatazione	0
Impermeabilit� all'acqua EN 12390-8 5 bar x 3 gg.	< 2 mm
Resistenza ai cicli di gelo/disgelo in presenza di Sali cloruri secondo SIA 162 normativa svizzera: (dopo 28 cicli ≤ 600 gr/m <sup>2</sup> corrisponde a ottima resistenza per applicazioni autostradali)	≤100 gr/m <sup>2</sup>
Ritiro / espansione in fase libera (T = 20� U.R. = 50%) (UNI EN 1217-4 / UNI 6687-73)	± 10 µ/m a 90 giorni
Adesione al supporto ( EN 1504 - 3 )	>3 MPa a 28 giorni (rottura supporto)
Resistenza all'impatto (CSTB 3232)	Nessuna fessurazione dopo 25 impatti
Durezza superficiale (EN 13892-6)	≥ 150 N/mm <sup>2</sup>
Durezza Shore (ISO 868)	D ≥ 75
Prova di penetrazione della piastra (EN 12697-21)	I < 0,1 mm
Resistenza all'usura per rullatura (XP P 11-101)	Δv <sub>r</sub> ≤ 2 cm <sup>3</sup>
Resistenza all'abrasione profonda (EN 102)	15 mm <sup>3</sup>
Resistenza ai solfati UNI EN 196/1 ed ASTM C 88 (successione di 15 immersioni ed essiccazioni in soluzione di solfato di magnesio)	Nessun degrado Perdita di massa < 0,10%
Resistenza agli agenti chimici (tempo di contatto di 24 ore)	Nessuna alterazione della superficie con soda caustica, ammine, metanolo, tricloroetilene, benzina, olio motore, liquido freni.

## Resistenza al fuoco e prestazioni meccaniche dei microcalcestruzzi ad elevate prestazioni su strutture in c. a.

Le prove di resistenza al fuoco del microcalcestruzzo REFOR-tec® GF5/ST-HS sono state eseguite presso l'Università di Liège (Belgio) secondo gli standard EN 1363-1 ed EN 1363-3 ed hanno dimostrato una resistenza al fuoco ed al carico d'incendio REI 120 (ed anche superiore come si spiegherà analizzando i dati emersi dalle prove). Il test è stato condotto con una progressione del carico d'incendio secondo standard ISO 834. Gli step e le osservazioni registrate durante l'esecuzione della prova sono state le seguenti.

Time in minute	Observations
0'	Inizio del carico
10'	Carichi 2 x 150 kN
27'	Starting ovenburners
28'	Time zero following EN 1363-1
131'	Fine del test
<b>131'</b>	Le deformazioni della trave hanno generato ha un'inclinazione del rullo di appoggio fino alla sua espulsione. <b>Pertanto la prova è terminata prima che la trave giungesse al collasso.</b>

### RISULTATI

<u>critério</u>	<u>Durata in minuti</u>
<b>CAPACITA' PORTANTE</b>	<b>&gt;131'</b>

- Le attrezzature per la misurazione erano progettate con una massima escursione di freccia della trave oltre la quale una trave in calcestruzzo normalmente collassa perdendo totalmente la sua capacità portante.
- Nella progressione della sperimentazione, al **131° minuto** (sottocarico di 300 KN e con una temperatura ambiente su 3 facce oltre i 1.000 °C), la trave incamiciata con **REFOR-tec®** raggiunge una freccia di ben **70 mm** deformandosi in maniera continua senza danni né fessurazioni evidenti.
- A tal punto, data l'escursione raggiunta, si è avuto un distacco dell'attrezzatura di misura e l'esperimento si è concluso senza collasso della trave.
- A seguito dello scarico dell'elemento strutturale, si è recuperata circa la metà della freccia con un valore finale residuo di poco superiore ai **40 mm**.
- La trave, dopo tale sperimentazione, è risultata integra, leggermente piegata, senza distacchi né fessure, perfettamente compatta.
- La compattezza è stata confermata dopo il taglio di sezioni di trave con sega diamantata.
- Il comportamento della trave è stato perciò eccellente (si conferma anche in tali condizioni la notevolissima energia di frattura e duttilità del

microcalcestruzzo **REFOR-tec®**) sia dal punto di vista termico che fisico-meccanico, garantendo fino al 131° minuto l'intera capacità portante prevista. Non avendo potuto completare l'esperienza non è noto di quanto si sarebbe dovuto procedere con il test (con ulteriore incremento di freccia) per raggiungere il collasso dell'elemento strutturale.

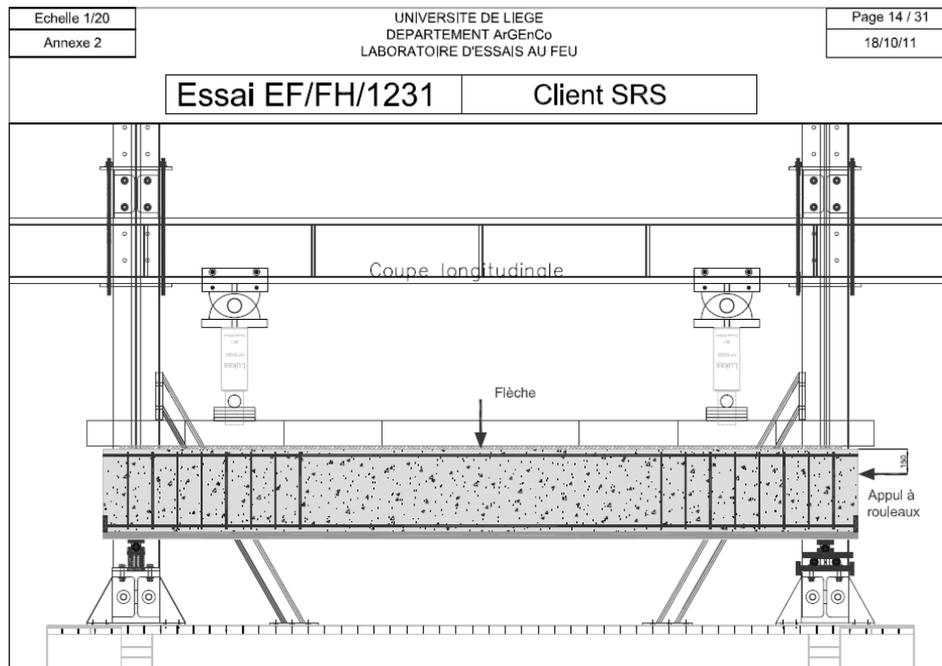


Figura n° 1: test condotto presso Università di Liegi. Schema di prova della trave, lunghezza 4,2 mt, caricata 300 KN, incamiciata con 4 cm di micro calcestruzzo REFOR-tec®.

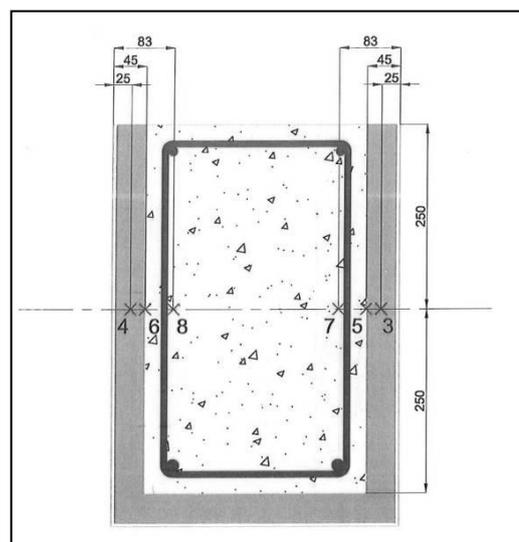


Figura n°2: test condotto presso Università di Liegi. Disposizione delle termocoppie nella trave rivestita su tre lati con camicia di micro calcestruzzo REFOR-tec®

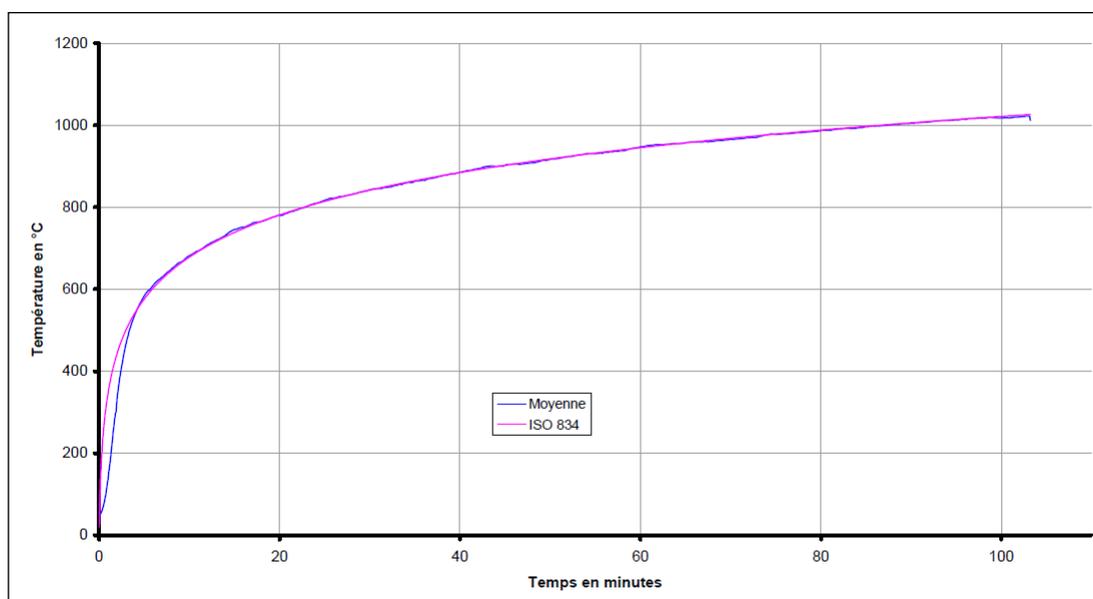


Figura n° 3: Test condotto presso Università di Liegi. Curva delle temperature sviluppata durante il test: 800° dopo 20 minuti; > 1000°C dopo 80 minuti fino al termine della prova (132 minuti)

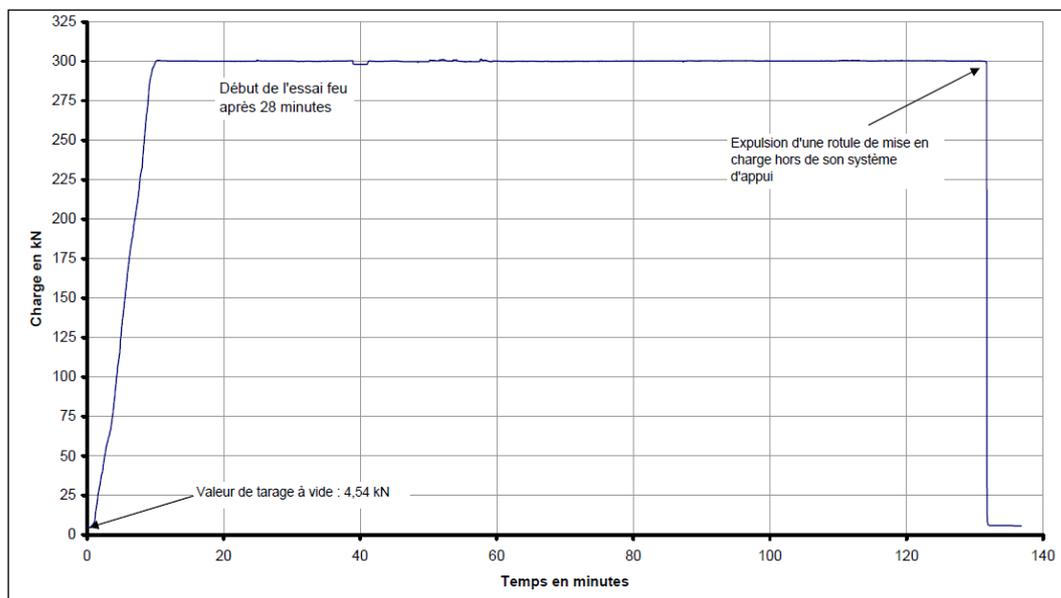


Figura n° 4: test condotto presso Università di Liegi. Carico applicato di 300 kN durante l'esecuzione del test.

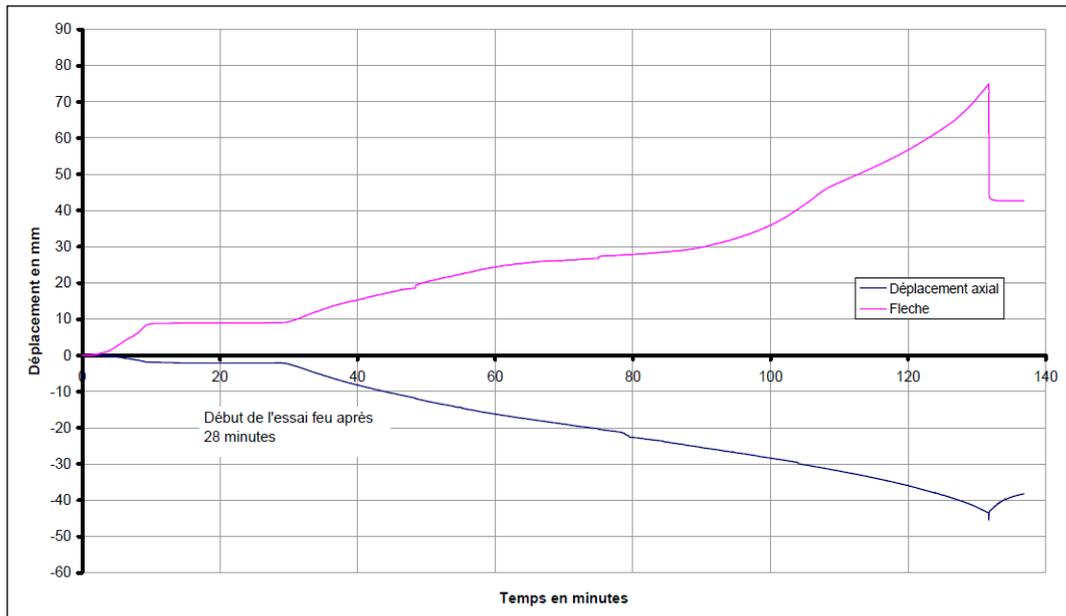


Figura n° 5: test condotto presso Università di Liegi. Freccia massima di 72 mm sviluppata nel corso del carico d'incendio. Alla termine della prova parziale ritorno elastico a 42 mm con evidenza di integrità strutturale della camicia di rinforzo.

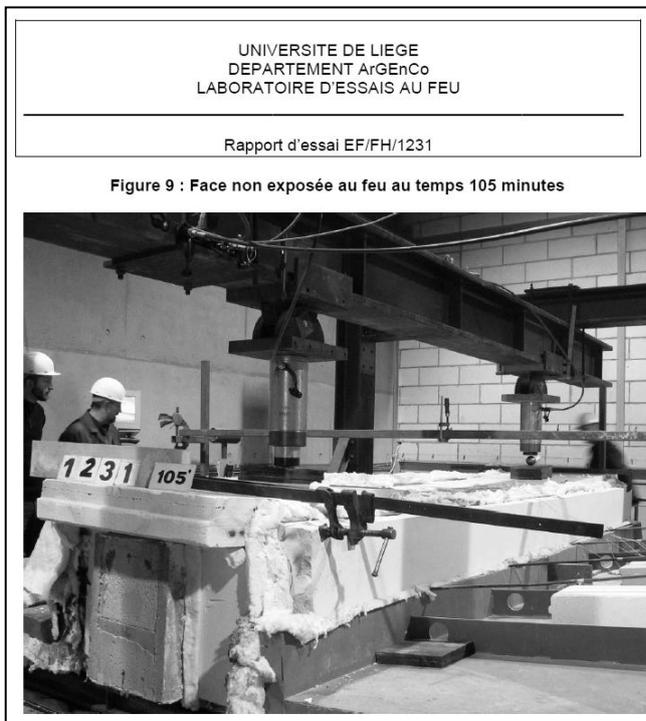
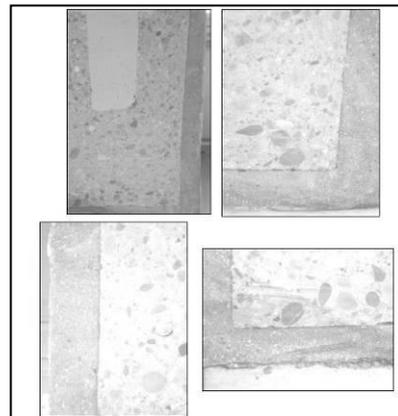


Foto n° 1 a lato: test condotto presso Università di Liegi. Panoramica del lato superiore della trave, non esposto alla fiamma, al tempo 105'

Foto n° 2 in basso: sezioni della trave a fine prova con incamiciatura in REFOR-tec® perfettamente aderente al supporto



## Evidenze applicative

La resistenza al fuoco rende la tecnologia del microcalcestruzzo REFOR-tec® particolarmente interessante ed apprezzata nell'ambito dei rinforzi strutturali di edifici pubblici strategici o di edifici ad elevata frequentazione (scuole, ospedali, sale congressuali, parcheggi multipiano ecc.).

Nell'ambito dei numerosi edifici ad elevata frequentazione che sono stati fino ad



oggi recuperati e rinforzati con tecnologia REFOR-tec, segnaliamo che i test di resistenza al fuoco appena descritti, sono stati propedeutici alla realizzazione di un'importante ristrutturazione / adeguamento strutturale di un edificio storico di Liegi (Mnèma Historic Building) trasformato da piscina pubblica a museo/sala congressi (foto n° 2, 3, 4, 5)

Foto n°3: visione interna del cantiere Mnèma



Foto n° 4 e n° 5: incamiciatura di travi e di pilastri a sezione snella con microcalcestruzzo REFOR-tec

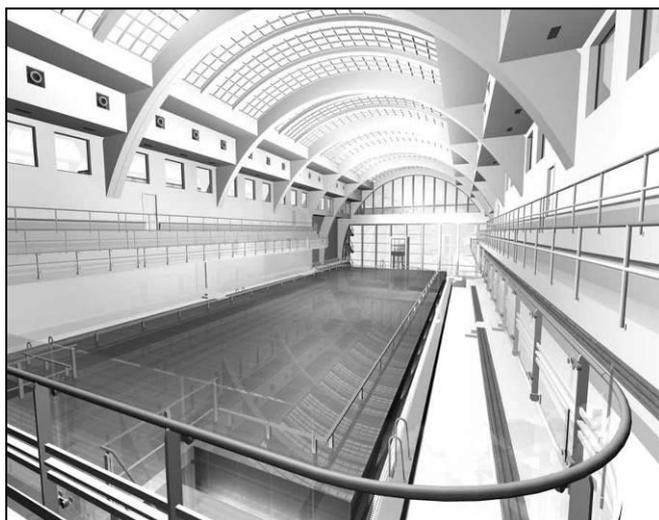


Foto n° 6: l'edificio Mnèma a Liegi trasformato in museo e sala congressi

Sono ormai numerose le realizzazioni progettuali con tecnologia UHPFRCC REFOR-tec® nell'ambito degli edifici pubblici scolastici, ospedalieri e residenziali

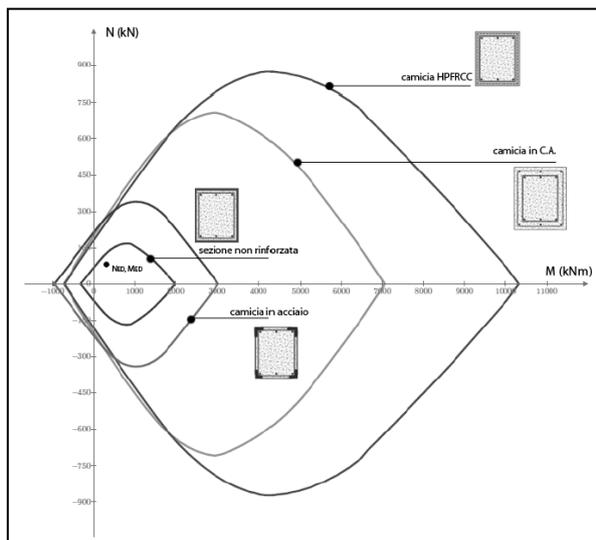
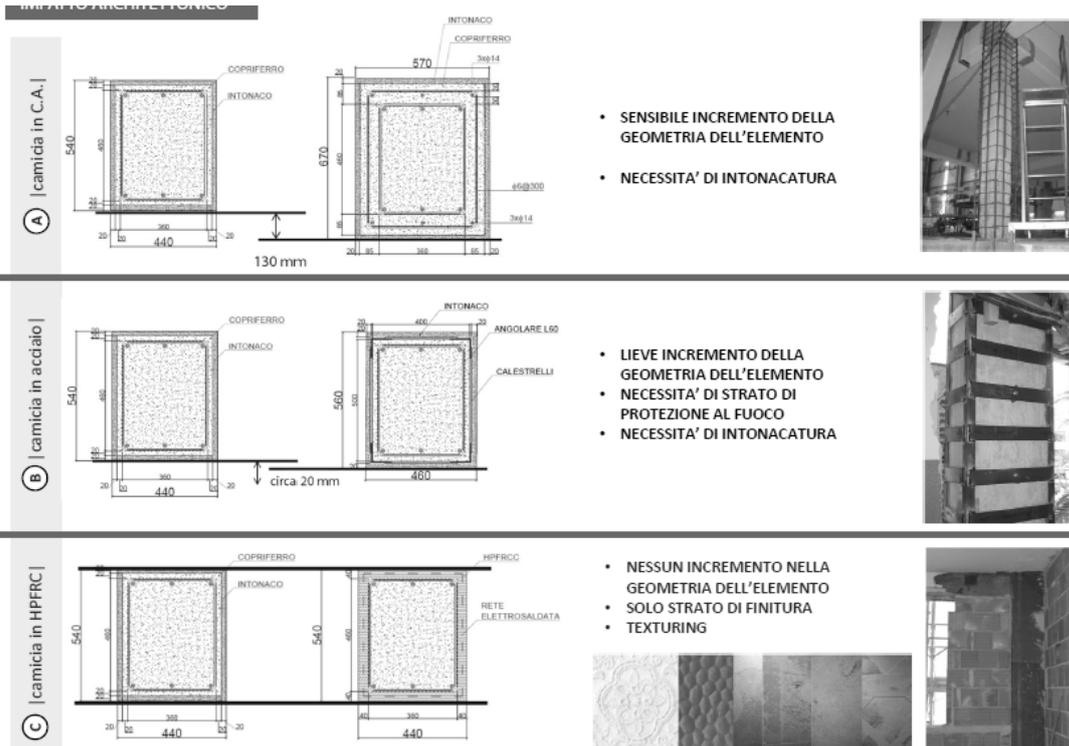


Foto n° 7, 8: Bari, immobile in edilizia residenziale pubblica rinforzato con tecnologia REFOR-tec®. Un'attenta analisi dei rinforzi strutturali eseguiti su questo edificio è sviluppata nell'articolo citato in bibliografia (cfr. bibliografia n° 7)



Foto n°9, 10: Castel di Sangro (AQ), ospedale civile rinforzato con tecnologia Refor-tec®

Un'attenta analisi dei rinforzi strutturali eseguiti nella ristrutturazione dell'ospedale civile di Castel di Sangro è sviluppata nell'articolo citato in bibliografia (cfr. bibliografia n°4). In particolare risulta interessante l'analisi dell'impatto architettonico e dei domini di interazione N-M rilevati su diverse tecniche di rinforzo messe a confronto. Il microcalcestruzzo ad elevate prestazioni spicca per un impatto architettonico basso o nullo unitamente a domini di interazione sensibilmente più prestazionali rispetto alle altre tecniche analizzate.



Dominio di interazione M-N per le varie tipologie di rinforzo. Valori nominali		
	Carico assiale	Momento Resistente
Pilastro tal quale	<b>2.000 KN</b>	<b>150 KNm</b>
incamiciatura <u>sporgente 10 mm</u> acciaio	<b>3.000 KN</b>	<b>350 KNm</b>
incamiciatura <u>sporgente 65 mm</u> c.a.	<b>7.000 KN</b>	<b>700 KNm</b>
incamiciatura REFOR-tec® da 40mm, <u>non sporgente</u> (spessore = alla scarifica)	<b>10.300 KN</b>	<b>870 KNm</b>

## Prestazioni meccaniche dei microcalcestruzzi ad elevate prestazioni su strutture in muratura

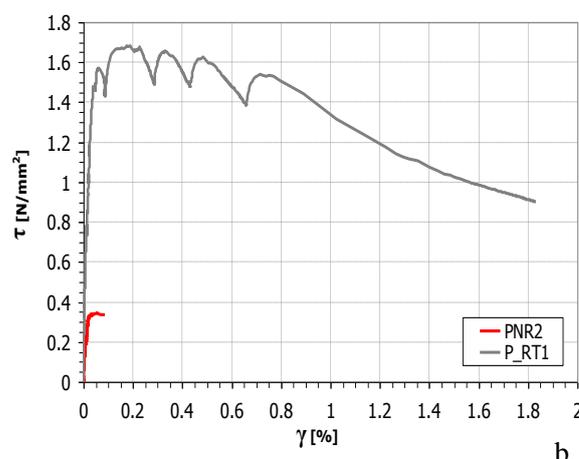
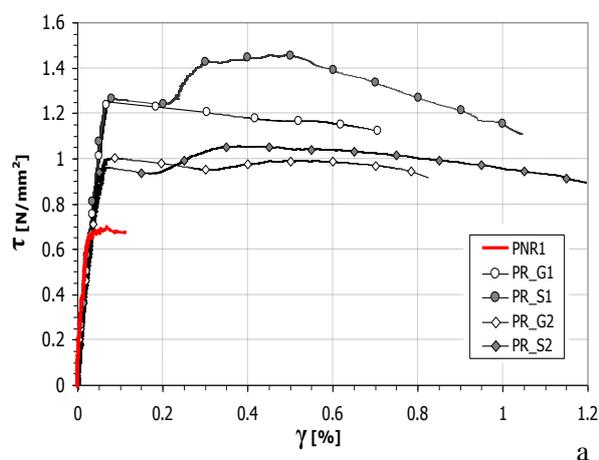
Anche campagne sperimentali su strutture in muratura hanno messo in luce le prestazioni dei microcalcestruzzi, soprattutto se messe a confronto con altre tecniche di rinforzo (ad esempio intonacature armate con malte a diversi livelli prestazionali). Una trattazione esauriente di questo genere di applicazioni su strutture murarie esula dagli scopi di questa nota e si rimanda agli approfondimenti descritti in bibliografia (cfr. bibliografia n° 10). In ogni caso risulta interessante dare alcuni cenni a questa tipologia di rinforzo ed ai risultati ottenuti.

La tecnica sperimentale è stata quella della compressione diagonale. I provini testati erano costituiti da muretti in mattoni pieni allettati sia con malta in categoria M10 sia con malta in categoria M2 secondo UNI EN 998/2. Alcuni muretti sono stati lasciati tal quali. Altri muretti sono stati rinforzati con la tecnica delle intonacature armate con connettori, utilizzando diverse tipologie di malta e diverse armature di rinforzo (base acciaio e base vetro\_zirconio alcali resistente).

Per ultima si è testata la tecnica del microcalcestruzzo ad elevate prestazioni, colato in cassero a bassi spessori, con connessioni costituite da acciaio inserito in carotaggi passanti riempiti a colare con lo stesso micro calcestruzzo. La tecnica NON HA PREVISTO ALCUNA RETE D'ARMATURA.

Le diverse metodologie di rinforzo valutate sono espresse nella tabella riportata sotto, cui seguono i digrammi relativi alle curve SFORZI/DEFORMAZIONI. Anche in questo campo spicca il valore raggiunto dal rinforzo con microcalcestruzzo ad elevate prestazioni.

	Type mortar	Type mortar strengthened layer	Type connector	Type mesh
<b>PNR1</b>	M10/UNI-EN 998-2	No layer	No connector	No mesh
<b>PR_G 1</b>	M10/UNI-EN 998-2	BS 38/39 2.5	Fiber glass connectors - Ø 10 mm	Fiber glass mesh - 10x8cm
<b>PR_S 1</b>	M10/UNI-EN 998-2	BS 38/39 2.5	Steel connectors - Ø 6 mm	Steel mesh - 50x50 mm Wire diameter 4 mm
<b>PR_G 2</b>	M10/UNI-EN 998-2	BS 37 FPL-LIGHT	Steel connectors - Ø 6 mm	Fiber glass mesh - 10x8cm
<b>PR_S 2</b>	M10/UNI-EN 998-2	BS 37 FPL-LIGHT	Steel connectors - Ø 6 mm	Steel mesh - 50x50 mm Wire diameter Ø 4 mm
<b>PNR2</b>	M2/UNI-EN 998-2	No layer	No connector	No mesh
<b>P_RT1</b>	M2/UNI-EN 998-2	High Fracture Energy/ ECC Refor- tec	Steel connectors - Ø 8 mm	No mesh



## Conclusioni

Gli aspetti tecnologico/applicativi descritti in questa nota, del microcalcestruzzo ad elevate prestazioni REFOR-tec<sup>®</sup>, sono di particolare interesse nei progetti di rinforzo ed adeguamento strutturale, particolarmente in zona sismica, ove le caratteristiche di duttilità e di resistenza a trazione del formulato giocano ruoli determinanti al fine di migliorare il comportamento della struttura alle sollecitazioni dinamiche da sisma.

Il basso impatto volumetrico e i ridotti carichi aggiuntivi, consentono inoltre di non modificare sostanzialmente le geometrie e le rigidità della struttura.

La resistenza al fuoco del microcalcestruzzo REFOR-tec<sup>®</sup> è stata verificata con test in scala reale secondo gli standard EN 1363-1 ed EN 1363-3 e carico d'incendio secondo curva ISO 834.

Le caratteristiche innovative di questa tecnologia la rendono estremamente versatile e la pongono al centro dell'attenzione in diversi campi della tecnologia edile come ad esempio:

- Per la fabbricazione di elementi strutturali leggeri a sezione sottile.
- Per ripristini strutturali con colaggio in cassero od in ambienti confinati.
- Per il recupero strutturale a basso spessore su solai, travi, pilastri.
- Per l'adeguamento sismico con assorbimento e trasferimento di tensioni a taglio o trazione a fronte di eventi ad elevata sollecitazione dinamica. Elevatissimi valori di deformazione ultima a trazione.
- Per la riparazione di pavimenti con necessità di resistenza ad elevate sollecitazioni statiche e dinamiche unitamente a valori eccezionali di resilienza.
- Per il rinforzo strutturale resistente a fuoco di pilastri e travi.
- Per travi inflesse : possibile raddoppio del carico ultimo con rinforzo di spessore 40 mm – incremento della rigidità con riduzione di freccia in esercizio di c.ca 12 volte (comportamento paragonabile ad una precompressione).

- Nel campo delle nuove costruzioni per la creazione di forme particolarmente snelle sia per soluzioni strutturali che architettoniche d'avanguardia (ingegnerizzazione delle forme).

## Bibliografia

[1] CNR-DT 204/2006, "Istruzioni per la progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato". CNR 2006.

[2] UNI EN 1363-1 Prove di resistenza al fuoco - Requisiti generali

[3] UNI ENV 1363-3 Prove di resistenza al fuoco - Verifica della prestazione del forno

[4] Costanzo S., [2013] "L'uso di calcestruzzi fibrorinforzati per l'adeguamento sismico di edifici esistenti", Tesi di Laurea Università Federico II Napoli, relatore Prof. Landolfo, correlatori Iuorio O., Mammana O.

[5] Leonardi A., Meda A., Rinaldi Z., [2007] Riparazione di travi in c.a. danneggiate da incendio con incamiciature in calcestruzzi fibrorinforzati ad elevate prestazioni" In Atti 17° Congresso CTE (pp.439-444). ROMA -- ITA : C.T.E.

[6] Maisto L., Meda A., Plizzari G. A., Rinaldi Z. [2007] "R/C beams strengthening and repair with high performance fiber reinforced concrete jacket," *4th International Conference on the Conceptual Approach to Structural Design*, Venezia, Italy, June 27-29.

[7] Marsano L. A., Mastropasqua F., Maringoni S., Rosignoli R., [2014] "Miglioramento sismico di un edificio di Edilizia Residenziale Pubblica mediante tecnologie basate su microcalcestruzzo e materiali compositi", *Progettazione Sismica n°1/2014*, IUSS Press \_ Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia

[8] Martinola G., Meda A., Plizzari G. A., Rinaldi Z. [2007] "An application of high performance fiber reinforced cementitious composites for R/C beams strengthening," *FRAMCOS 6*, Catania, Italy, June 18-21.

[9] Meda A., Plizzari G.A., Rinaldi Z., Martinola G. [2008] "Strengthening of R/C existing columns with high performance fiber reinforced concrete jacket," *ICCRRR 08 International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation, and Retrofitting*, Cape Town, South Africa, November 21-23.

[10] Rosignoli D., Rosignoli F., Vaes R. [2014] "High Fracture Energy Technology and Engineered Cementitious Composites for the Ductile Reinforcement of Historical Structures" atti del congresso Proithec '14 "2nd International Conference on Protection of Historical Constructions" 7-9 Maggio 2014, Antalya - Turchia