

Flexural tests on RC beams strengthened with Near Surface Mounted FRP bars with cementitious matrix

Prove a flessione su travi in c.a. rinforzate con barre in FRP applicate mediante la tecnica Near Surface Mounted con matrice cementizia

I. Del Prete¹, A. Bilotta², E. Nigro²

¹ *BuroHappold Engineering, London, UK*

² *Department of Structure for Engineering and Architecture, University of Naples Federico II, Naples, Italy*

ABSTRACT: The response at ambient and elevated temperature of cementitious-bonded Near Surface Mounted (NSM) Fibre Reinforced Polymer (FRP) strengthened reinforced concrete (RC) members has not yet been significantly studied through research, aside from a limited number of available studies. NSM FRP strengthening is potentially less prone to damage due to fire exposure than Externally Bonded FRP reinforcement (EBR), also possibly without needing costly insulation systems. This paper presents the results of 12 tests on small-scale reinforced concrete beams strengthened in flexure with a single near surface mounted (NSM) carbon FRP bar. Flexural tests have been performed at both ambient and elevated temperatures on both un-strengthened and strengthened beams. The results reported in the paper show that NSM FRP systems with cementitious adhesives may perform better at elevated temperatures because: (a) cementitious grout is not as severely affected as typical epoxies by elevated temperature; (b) the cementitious grout can provide additional thermal protection to the FRP bars; and (c) the resin of the FRP bar, when the bar is manufactured by pultrusion, typically has a Tg higher than common in-situ cured epoxy resins used in wet lay-up FRP strengthening applications.

La memoria mostra i risultati di 12 tests su travi di calcestruzzo armato (di dimensioni 1450 x 150 x 150 mm), rinforzate a flessione con una barra di CFRP applicata con la tecnica NSM (Near Surface Mounted) utilizzando una matrice cementizia invece delle tradizionali resine epossidiche. Le prove sono state effettuate a temperatura ambiente ed alle alte temperature sia su travi non rinforzate che su travi rinforzate. Le prove ad alta temperatura sono state condotte utilizzando pannelli radianti a propano. Sono state utilizzate due configurazioni di riscaldamento: (1) riscaldamento localizzato in mezzeria e (2) riscaldamento esteso a tutta la lunghezza del sistema di ancoraggio. La risposta termo-strutturale è stata investigata per condizioni di carico compatibili con la verifica delle condizioni di servizio per le barre di acciaio e per quelle di FRP. Le temperature, gli spostamenti e gli scorrimenti dell'FRP sono stati misurati mediante LVDT e strain gauges. Inoltre è stata utilizzata la tecnica denominata Digital Image Correlation (DIC) per monitorare la prova. Le prove hanno mostrato la buona performance del sistema di rinforzo NSM con matrice cementizia, sia in condizioni ambientali ordinarie che alle alte temperature, con riscaldamento localizzato ed esteso. In particolare il sistema strutturale è capace di mantenere efficacia fino a 600°C, se è garantito un appropriato ancoraggio all'estremità.

KEYWORDS: High temperature, Fire, FRP, NSM, Experimental / Alte temperature, incendio, FRP, NSM, Sperimentale.

1 INTRODUZIONE

Gli FRP (Fibre Reinforced Polymers) sono frequentemente utilizzati per il rinforzo delle strutture di cemento armato (CA), in genere applicati con adesivi epossidici. Tuttavia, il degrado delle proprietà meccaniche dell'adesivo polimerico e del composito stesso a causa di effetti ambientali, quali ad esempio le alte temperature, è un aspetto chiave nell'applicazione degli FRP in edifici civili ed industriali. Con la tecnica NSM (Near Surface Mounted)

la barra di FRP (tonda, quadrata o rettangolare) viene posizionata in una scanalatura ricavata nel copri-ferro dell'elemento strutturale ed incollata con resina epossidica o, meno frequentemente, cementizia. Diversi studi hanno dimostrato che gli FRP applicati con la tecnica NSM hanno un'aderenza migliore di quelli applicati con la tecnica EBR (Externally Bonded Reinforcement) (El-Hacha & Rizkalla, 2004; Foret & Limam, 2008; Bilotta et al, 2011). Il sistema NSM è anche meno soggetto a danneggiamenti, in quanto il rinforzo in FRP è inglobato nella scanalatura riempita dall'adesivo. Tuttavia, l'efficacia dell'adesivo epossidico è molto bassa a temperature

elevate, perché gli adesivi epossidici sono caratterizzati da temperature di transizione vetrosa (T_g) relativamente bassa, sebbene i prodotti pultrusi possano raggiungere valori di T_g superiori. Nelle applicazioni NSM, l'uso di un FRP con elevata T_g accoppiato ad una malta di tipo cementizio può migliorare le prestazioni meccaniche del sistema di rinforzo in condizioni di incendio. Infatti gli adesivi cementizi si comportano di per sé meglio degli epossidici alle alte temperature, e possono anche proteggere l'FRP da un punto di vista meccanico, ma soprattutto termico, evitando la necessità di applicare costosi materiali isolanti (Yu & Kodur, 2014). Anche se di solito si utilizzano resine epossidiche, di recente ci sono stati diversi studi sul comportamento delle matrici cementizie come adesivo (Yu & Kodur, 2014; Petri et al, 2013; Burke et al, 2014; Palmieri et al, 2013).

La presente memoria mostra una campagna di prove sperimentali finalizzata ad indagare la performance ad alta temperatura di un nuovo sistema di rinforzo NSM di elementi in CA, costituito da una barra in carbonio e un adesivo cementizio, sviluppati appositamente per le alte temperature.

2 MATERIALI

Il programma sperimentale complessivo consiste in prove per analisi meccanica dinamica (DMA) e analisi termo-gravimetrica (TGA) sulla barra di FRP, e dodici prove a flessione su quattro punti di travi in CA rinforzate con tecnica NSM-FRP. Le travi sono lunghe 1450mm e hanno sezione trasversale quadrata di dimensione 150 mm. La tabella 1 riassume il programma relativo alle prove a flessione, mostrando per ciascuna prova il codice identificativo.

Le prove di flessione sono state eseguite sia a temperatura ambiente e che ad alta temperatura. I test ad alta temperatura sono stati eseguiti utilizzando pannelli radianti a propano per riscaldare le travi, piuttosto che un forno di prova standard. La scelta ha il vantaggio di poter montare più facilmente la strumentazione per il monitoraggio della prova. In particolare sono state utilizzate due configurazioni di riscaldamento: (1) riscaldamento localizzato in mezzeria; e (2) riscaldamento globale su tutta la lunghezza della trave. La risposta termo-strutturale è stata studiata sotto carichi tipici delle condizioni di servizio. Il carico (SL) = 40 kN corrisponde a circa il 70% del massimo carico allo stato limite ultimo, mentre il carico (HL) = 50 kN è stato valutato con riferimento a deformazioni limite per l'FRP e per l'acciaio in condizioni di esercizio. In particolare, il carico corrisponde all'attingimento del 90% della deformazione di snervamento nell'acciaio.

2.1 Proprietà dei materiali

Le analisi DMA e TGA sono state eseguite sulla barra in CFRP per definire temperatura di transizione vetrosa, T_g , e temperatura di decomposizione, T_d .

I test DMA sono state effettuate mediante un analizzatore DMA secondo la norma ISO 6721-1: 2011, con 3 prove in configurazione a mensola e 3 prove in configurazione di flessione a tre punti.

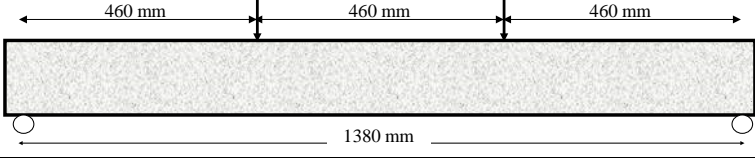
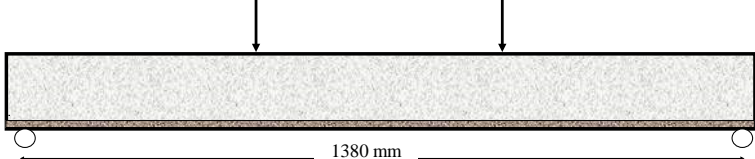



I test TGA, che forniscono la massa di un campione in funzione della temperatura, sono stati effettuati attraverso una termobilancia ad assetto orizzontale. 3 prove sono state effettuate in azoto (N_2), e 3 prove in atmosfera ordinaria.

I risultati dei test DMA e TGA sono stati rielaborati con diverse tecniche disponibili in letteratura (vedi Figura 1 e Figura 2). I risultati delle prove sono discussi in maggior dettaglio in (Del Prete et al. 2015a). I valori di T_g osservati sono compresi tra $160^\circ C$ ($T_{g, offset}$) e $220^\circ C$ ($T_{g, max, tan\delta}$), e i valori di T_d sono compresi tra $315^\circ C$ ($T_{d, offset}$) e $360^\circ C$ ($T_{g, punto\ medio}$). L'evidente variabilità dei valori indica la necessità di una chiara standardizzazione dell'interpretazione dei risultati dei test.

Le prove di conducibilità termica sono state eseguite sulla malta cementizia utilizzata per incollare il rinforzo. I valori di conducibilità termica ottenuti sono sostanzialmente costanti nell'intervallo di temperatura $50-175^\circ C$ e pari a $0,55 W / mK$; un valore leggermente superiore ($0,66 W / mK$) è stato ottenuto a circa $100^\circ C$, probabilmente a causa della evaporazione dell'acqua, che ha comportato un maggior assorbimento di energia rispetto a quello necessario per mantenere il gradiente termico nel campione ad altre temperature.

La resistenza a compressione e trazione del calcestruzzo a 28 giorni è $35,6 MPa$ e $3,83 MPa$, rispettivamente. La resistenza a compressione del calcestruzzo a 76 giorni è $47,7 MPa$. Le tensioni di snervamento e rottura dell'acciaio (da prova a trazione sulle barre di armatura) sono rispettivamente $525 MPa$ e $622 MPa$, mentre la tensione di snervamento delle barre superiori della trave è $700 MPa$. La resistenza a compressione della malta cementizia a 28 giorni è $90 MPa$, e la resistenza a trazione del CFRP è $1750 MPa$, con modulo elastico $136 GPa$. È opportuno evidenziare che tutti i valori di cui sopra sono valori medi di prove eseguite su almeno tre campioni.

Table 1. Experimental program /Programma sperimentale

Beam designation	Scheme	Load
UN-S _i i=1,2		2mm/min
Note:	2 tests at ambient temperature of UN-Strengthened beams	
S-i i=1,2,3_cut		2mm/min
Note:	3 tests at ambient temperature of NSM FRP Strengthened beams	
UN-S_GloH_SL_1		SL=40 kN
Note:	1 test of UN-Strengthened beam in Global Heating configuration, under Service Load	
S_GloH_SL_i i=1,2		SL=40 kN
Note:	2 tests of NSM FRP Strengthened beams in Global Heating configuration, under Service Load	
S_LocH_SL_i S_LocH_HL_i i=1,2		SL=40 kN HL=50 kN
Note:	- 2 tests of NSM FRP Strengthened beams in Localised Heating configuration, with Service Load - 2 tests of NSM FRP Strengthened beams in Localised Heating configuration, with High Load	

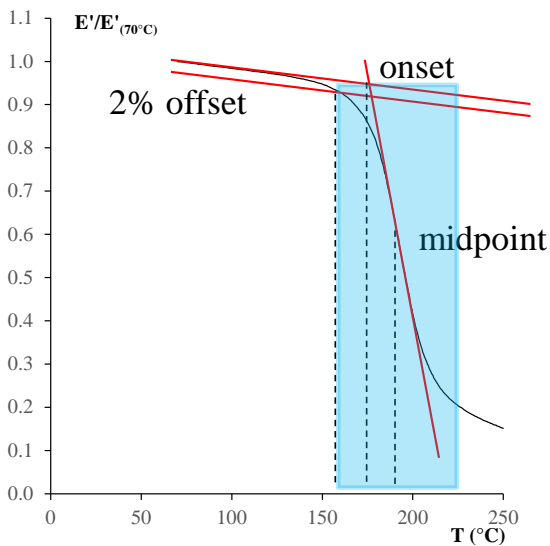


Figure 1. DMA processing methods / Metodi di rielaborazione DMA.

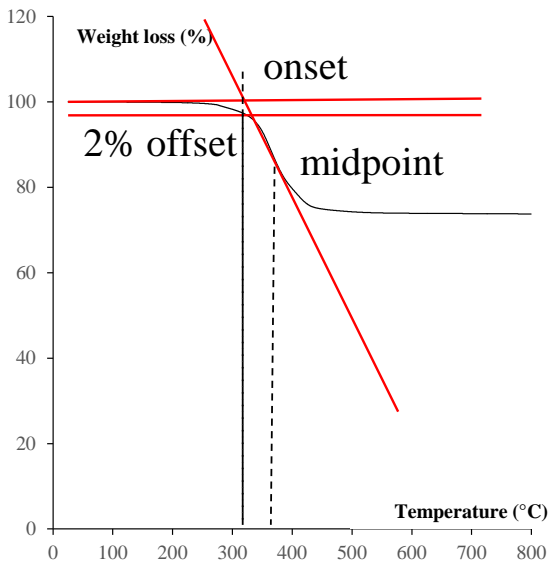


Figure 2. TGA processing methods / Metodi di rielaborazione TGA

2.2 Progetto e realizzazione dei provini

Le dodici travi hanno armatura interna longitudinale costituita da due barre in acciaio nervato (diametro nominale 10 mm) a trazione, e due barre in acciaio nervato (diametro nominale 6 mm) a compressione (vedi figura 3b).

Il sistema di rinforzo in FRP è costituito da una singola barra in carbonio (diametro nominale 8 mm), in una gola quadrata di lato 16 mm ricavata nel copriferro della trave. Il rinforzo trasversale nelle travi è stato progettato per evitare la rottura a taglio, pertanto sono state usate staffe in acciaio (con diametro nominale 6 mm) a passo 90 mm (vedi Figura 3a). Il progetto delle travi in CA è stato eseguito sia secondo EN 1992-1 che ACI 318-08; tuttavia il passo delle staffe è stato scelto sulla base delle indicazioni dell'EN 1992-1.

Il sistema di rinforzo NSM è stato applicato dopo il getto e l'indurimento delle travi in CA. Una smerigliatrice con dischi da taglio diamantati distanziati è stata usata per intagliare il copriferro inferiore delle travi. La scanalatura è stata poi resa liscia e pulita, e la barra è stata posizionata e stuccata, con le travi in configurazione up-side-down (ovvero sfruttando la gravità per assicurare il completo riempimento delle scanalature NSM). Soluzioni tecnologiche sono, in ogni caso, previste per l'applicazione reale, all'intradosso della trave dal basso verso l'alto.

2.3 Strumentazione

Durante i test sono stati utilizzati potenziometri lineari per misurare lo spostamento verticale delle travi in mezzeria (LP100) e lo scorrimento della barra NSM CFRP sia a sinistra (LP25-LHS) che a destra (LP25-RHS) delle travi (vedi figura 4). Inoltre a metà della barra in FRP è stato applicato un estensimetro prima che la barra fosse installata nella scanalatura. In aggiunta, una fotocamera reflex digitale ad alta risoluzione è stata utilizzata per scattare foto ogni cinque secondi; ciò ha permesso un monitoraggio degli spostamenti e quindi delle deformazioni della trave, mediante la tecnica del Digital Image Correlation (DIC). Infine, nelle travi sono state posizionate molteplici termocoppie (TCS), come mostrato in figura 4 e figura 5.

Per i test in configurazione di riscaldamento locale (LocH) si utilizza un pannello di riscaldamento radiante a propano, con dimensioni in pianta di 485x330 mm, posizionato a metà campata 120 mm sotto le travi. Per i test in configurazione di riscaldamento globale (GloH) si utilizzano due pannelli radianti, che garantiscono un riscaldamento su 970mm che è tutta la parte di trave rinforzata.

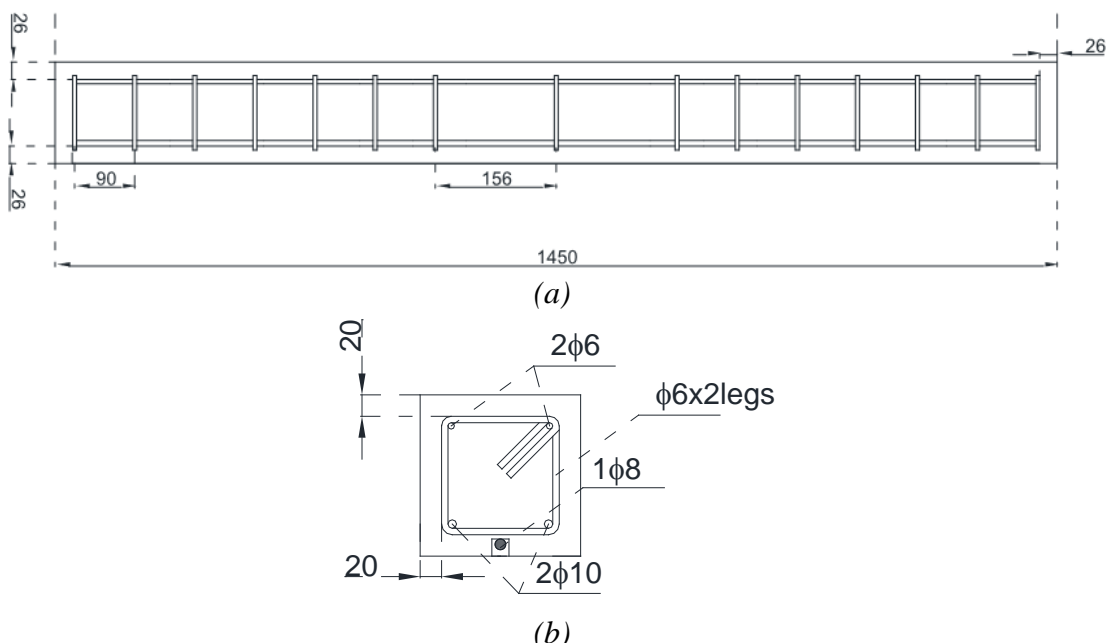


Figure 3. NSM FRP strengthened RC beam (a) Longitudinal section, (b) Cross section.
Trave in CA rinforzata con NSM FRP (a) sezione longitudinale, (b) sezione trasversale

3 RISULTATI

3.1 Prove a temperatura ambiente

Le prove di flessione delle travi rinforzate mostrano che la trave si fessura sotto un carico di circa 8 kN, che è lo stesso osservato per le travi non rinforzate. Quindi, come atteso, il rinforzo non ha influenzato in modo significativo il momento di fessurazione. Il carico, poi, aumenta linearmente fino al collasso del rinforzo, a circa 56 kN (36% maggiore del carico di snervamento delle travi non rinforzate), con un abbassamento in mezzeria di circa 9 mm. Quando l'acciaio snerva, la tensione nella barra in CFRP cresce fino allo scorrimento tra la barra in FRP e l'adesivo cementizio. Il carico poi gradual-

mente aumenta fino a circa 59 kN (19% in più rispetto al carico di rottura di UN-S-1), con significativi scorrimenti della barra di FRP e conseguente significativo abbassamento della trave in mezzeria, fino a circa 21 mm. Dopo il distacco del rinforzo, che è evidenziato anche dallo scorrimento del rinforzo alle estremità misurato in circa 6 mm, le travi rinforzate hanno mostrato un comportamento sostanzialmente identico a quello mostrato dalle travi non rinforzate. La rottura della trave si è avuta per schiacciamento del calcestruzzo nella zona compresa in mezzeria. La deformazione nella barra in CFRP, dopo la fessurazione è aumentata, linearmente fino a $5170\mu\epsilon$, fino a che non è iniziato lo scorrimento della barra. La massima deformazione registrata nell'FRP è stata $5850\mu\epsilon$. Una completa discussione delle prove a temperatura ambiente è presente in (Del Prete et al. 2015b).

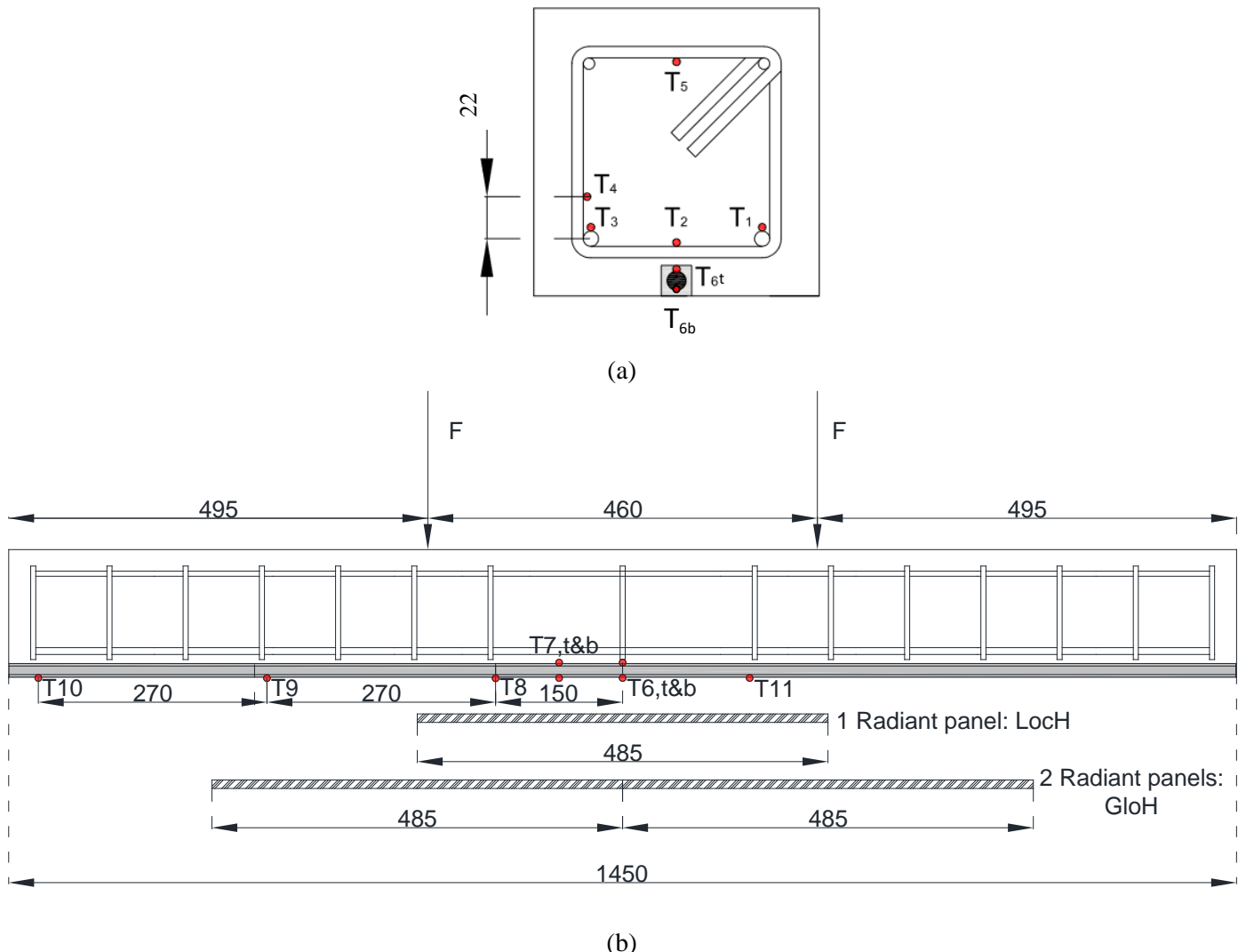


Figure 4. Thermocouple location (a) Midspan cross-section, (b) Longitudinal section.
Disposizione delle termocoppie (a) Sezione in mezzeria (b) Sezione longitudinale

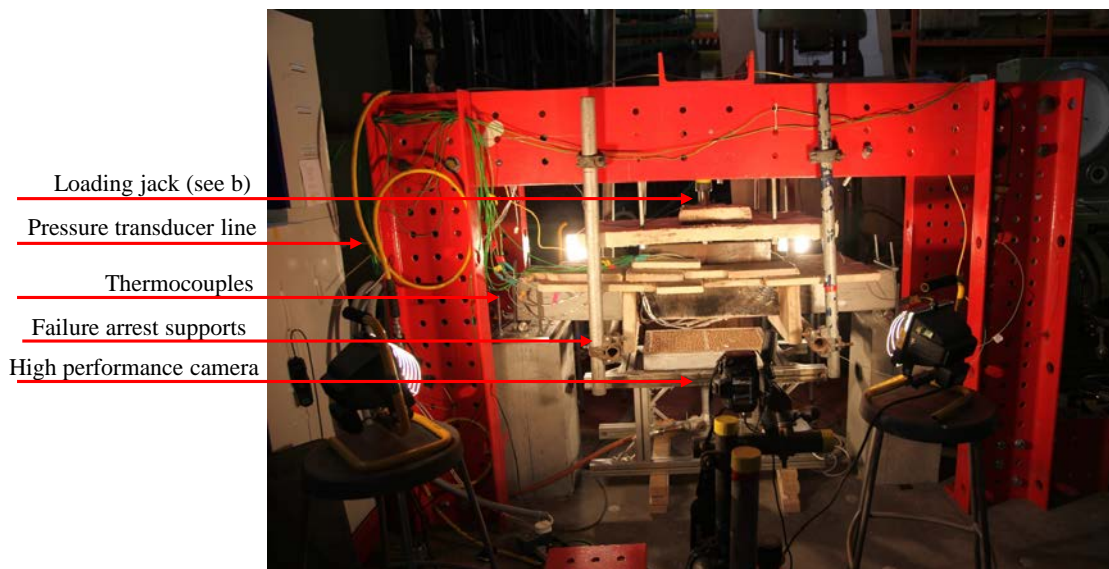


Figure 5. Flexural test setup / Setup prove a flessione

3.2 Prove ad alta temperatura

Le prove ad alta temperatura mostrano la capacità del sistema di rinforzo di rimanere efficace a temperature elevate, in entrambe le configurazioni di riscaldamento, globale e locale. L'efficacia del rinforzo durante un incendio e la sua resistenza residua dipende anche dal fattore di utilizzazione dell'elemento strutturale, η_{fi} , dato dal rapporto tra gli effetti delle azioni in condizioni di incendio al tempo t , $E_{d,fi,t}$, ed il valore di progetto della resistenza dell'elemento all'inizio del transitorio termico, $R_{d,fi,0}$ (EN1991-1-2).

I test sulle travi rinforzate con FRP e con riscaldamento globale sono state effettuate con un fattore di utilizzazione pari a circa 0,7 (carico permanente di 40 kN). La lettura delle 4 termocoppie applicate sulla barra hanno mostrato che la barra ha raggiunto la temperatura di decomposizione, $T_d = 360^\circ\text{C}$ (figura 6). Pertanto c'è stato il distacco e la conseguente perdita di efficacia del sistema di rinforzo. Tuttavia, le travi non sono collassate dopo 90 minuti di riscaldamento in quanto le travi non rinforzate sono state in grado di portare il carico applicato a prescindere dal rinforzo stesso, anche se si sono avute curvature termiche molto elevate (vedi Figura 8).

Le prove di resistenza residua, condotte dopo il raffreddamento della trave, hanno confermato che il carico di rottura residuo era uguale a quello ottenuto dalla prova su trave non-rinforzata in condizioni ambientali ordinarie (cioè le travi di in CA non sono state significativamente danneggiata dal riscaldamento, mentre c'è stata la perdita totale di efficacia del sistema di rinforzo in FRP).

Il sistema di rinforzo delle travi testate con η_{fi} pari a circa 0,7, in configurazione di riscaldamento locale (vale a dire con le zone di ancoraggio del sistema NSM FRP fredde durante il riscaldamento) non ha collassato, dopo 90 minuti di esposizione al fuoco, anche se la temperatura della barra in CFRP nella zona riscaldata era di circa 600°C (vedi Figura 7); è da notare che questa è una temperatura significati-

vamente superiore alla T_d della matrice polimerica della barra. Ciò indica che probabilmente la barra in CFRP, nella zona riscaldata, si è completamente distaccata dall'adesivo per il rammollimento e la successiva decomposizione della matrice epossidica all'interno della regione riscaldata. L'ancoraggio freddo del sistema NSM FRP all'estremità della trave è stato però in grado di sostenere le tensioni trasferite dalla mezzera e le fibre di carbonio sono state in grado di portare le tensioni di trazione in FRP, tipiche delle condizioni di servizio, anche una volta che la resina aveva perso efficacia nella zona riscaldata. La figura 8 mostra l'abbassamento delle travi in funzione del tempo di riscaldamento, evidenziando che in una configurazione riscaldamento locale l'abbassamento delle travi era significativamente inferiore a quello osservato nel riscaldamento globale, poiché il gradiente termico, e quindi la curvatura termica, erano inferiori a quello indotto dal riscaldamento globale.

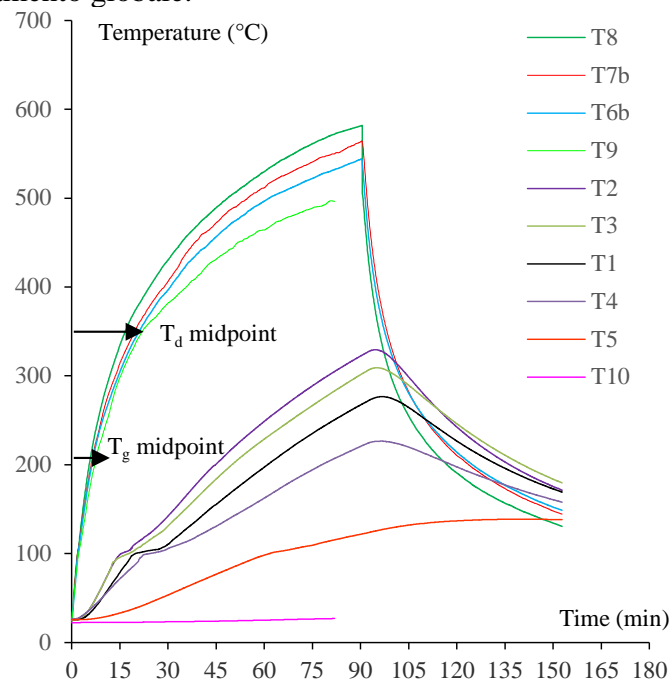


Figure 6. Temperature recorded (GloH) / Temperature sperimentali (GloH)

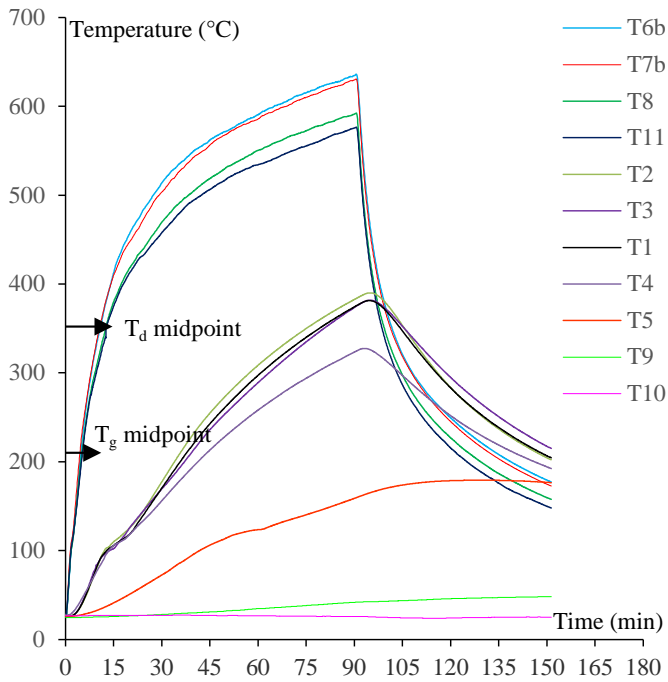


Figure 7. Temperature recorded (LocH) / Temperature sperimentali (LocH)

Le travi testate in configurazione di riscaldamento locale con η_{fi} pari a circa 0,8 (carico di 50 kN), non sono state in grado di sostenere le sollecitazioni trasferite dalla mezzeria quando la temperatura massima nella barra in CFRP ha raggiunto circa 600°C, nonostante la temperatura degli ancoraggi di estremità fosse prossima a quella ambiente. Tuttavia è possibile che la temperatura della barra in CFRP vicino alla zona termicamente esposta possa aver superato la T_g a causa della conduzione termica lungo la barra FRP, e che ciò abbia portato ad una riduzione della lunghezza efficace di ancoraggio all'estremità.

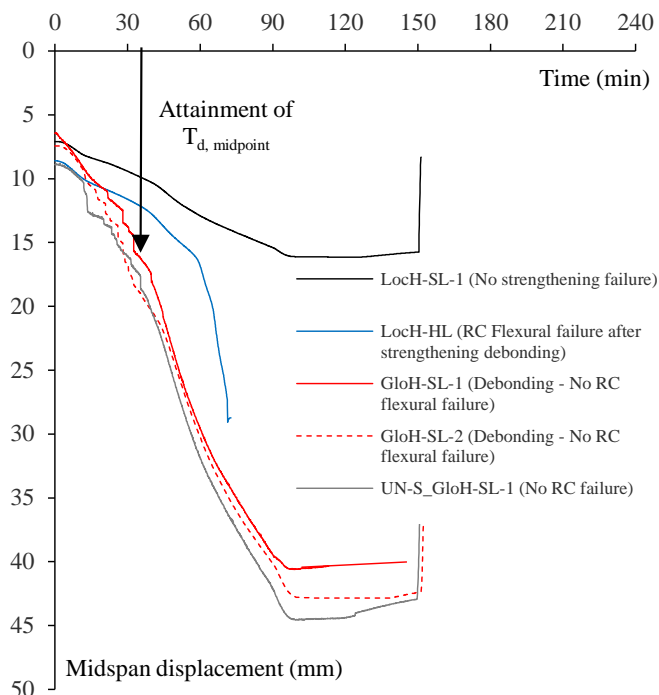


Figure 8. Midspan displacement versus time / Abbassamento in mezzeria nel tempo

I test mostrano quindi l'importanza delle zone fredde di ancoraggio di estremità per il sistema di rinforzo in caso di incendio, in presenza di carichi che corrispondono a condizioni di massima deformazione di servizio per l'FRP. È interessante notare che nelle barre in CFRP non si è avuta la rottura, nonostante il fatto che (i) si sia raggiunta una temperatura superiore a 600 ° C durante il riscaldamento, e (ii) le tensioni nelle barre fossero elevate.

4 CONCLUSIONS

Tests have been presented on a novel cementitious-bonded CFRP NSM strengthening system specifically developed to address the problematic performance of conventional epoxy adhered FRP strengthening systems at elevated temperatures. Based on the tests presented it can be concluded that:

- T_g ranged between 160°C ($T_{g,offset}$) and 220°C ($T_{g,max, \tan\delta}$) for the CFRP bar used. T_d ranged between 320°C ($T_{d,offset}$) and 360°C ($T_{d,midpoint}$). This highlights the need to standardize T_g and T_d definitions and test configurations.
- When adequately anchored in cool regions with an anchorage length of at least 300 mm, the NSM FRP system studied herein was able to carry tensile stresses typical of in-service conditions at elevated temperatures up to 600°C.
- The capacity of the NSM FRP system depends on the presence of effective cold anchorage, because carbon fibres behave significant strength at elevated temperatures even when the performance of the polymer matrix is compromised; and,
- Local insulation systems placed at the end-anchorage only, instead of insulation along the overall bonded length for the FRP system, may be able to prolong overall system performance in fire; further testing is needed to confirm this.

I test hanno mosrato il comportamento di in un nuovo sistema di rinforzo CFRP NSM con matrice cementizia, sviluppato specificamente per affrontare la problematica delle basse prestazioni dei sistemi NSM convenzionali con adesivo epossidico, alle temperature elevate. Sulla base dei test presentati si può concludere che:

- la T_g della barra è compresa tra 160 ° C ($T_{g, offset}$) e 220 ° C ($T_{g, max, \tan\delta}$). La T_d varia tra i 320 ° C ($T_{d, offset}$) e 360 ° C ($T_{d, punto medio}$). Questo mette in evidenza la necessità di standardizzare le definizioni di T_g e T_d e le configurazioni di prova.
- Quando adeguatamente ancorato in regioni fredde con una lunghezza di ancoraggio di almeno 300 mm, il sistema NSM FRP studiato è stato in grado di portare tensioni di trazione tipiche di condizioni di servizio a temperature elevate, fino a 600 ° C.
- La capacità del sistema NSM FRP dipende dalla presenza di un efficace ancoraggio freddo, le fibre di carbonio possono avere una resistenza si-

gnificativa a temperature elevate anche quando le prestazioni della matrice polimerica sono compromesse.

- Sistemi di isolamento locali posti alle sole estremità di ancoraggio del sistema FRP, anziché lungo l'intera lunghezza aderente del sistema, possono essere in grado di prolungare prestazioni complessive del sistema in condizioni di incendio; ulteriori test sono necessari per confermare tale risultato.

REFERENCES

- ACI 318-08 (2009). *Building Code Requirements for Structural Concrete*. ACI Committee 318, American Concrete Institute
- ASTM D 4092 – 07 (2013). *Standard Terminology for Plastics: Dynamic Mechanical Properties*
- Burke P.J., Bisby L. A., Green M., (2013). *Effects of elevated temperature on near surface mounted and externally bonded FRP strengthening systems for concrete*. *Cement & Concrete Composites* 35 (2013) 190–199
- Bilotta A., Ceroni F., Di Ludovico M., Nigro E., Pecce M., (2011). *Bond Efficiency of EBR and NSM FRP Systems for Strengthening Concrete Members*, *J. Compos. Constr.* 2011.15:757-772
- Del Prete I., Bilotta A., Bisby L., Nigro E., (2015a). *NSM FRP strengthened reinforced concrete beams: Benefits in fire of high Tg FRP & cementitious adhesive*. *Applications of Structural Fire Engineering*, 15-16 October 2015, Dubrovnik, Croatia, 331-336
- Del Prete I., Bilotta A., Bisby L., Nigro E., (2015b). *Bond tests on NSM FRP strengthening using cementitious matrices for concrete structures*. *FRPRCS-12 & APFIS-2015 Joint Conference*, 14-16 December 2015, Nanjing, China
- El-Gamal S., Al-Salloum Y., Alsayed S., Aqel M., (2012). *Performance of near surface mounted glass fiber reinforced polymer bars in concrete*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31 (22) 1501–1515 DOI: 10.1177/073168441246408
- El-Hacha R., Rizkalla S: H., (2004). *Near-Surface-Mounted Fiber-Reinforced Polymer Reinforcements for Flexural Strengthening of Concrete Structures*, *ACI Structural Journal*, September-October 2004, 717-726
- EN1992-1-1 (2004). *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*
- EN1991-1-2 (2002). *Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire*
- Foret G., Limam O., (2008). *Experimental and Numerical analysis of RC two-way slabs strengthened with NSM CFRP rods*, *Construction and Building Materials* 22 (2008) 2025-2030
- ISO 6721-1:2011. *Plastics - Determination of dynamic mechanical properties - Part 1: General principles*
- Palmieri A., Matthys S., Taerwe L., (2013). *Fire Endurance and Residual Strength of Insulated Concrete Beams Strengthened with Near-Surface Mounted Reinforcement*. *J. Compos. Constr.* 2013.17:454-462
- Petri P., Blaszkak G., Rizkalla S., (2013). *Structural Fire Endurance of an RC Slab Strengthened with High Tg Near Surface Mounted CFRP Bars*. *ACIC 2013*, Edited by Miss Claire. J. Whysall and Prof. Su. E. Taylor, 140-151, Queen's University Belfast on 10 -12 September 2013
- Yu B., Kodur V., (2014). *Fire behavior of concrete T-beams strengthened with near-surface mounted FRP reinforcement*. *Engineering Structures*. 2014;80:350-361.