

# Valutazione delle aree delaminate in strutture edili fibrorinforzate, con il metodo termico

E. Grinzato, R. Trentin, P.G. Bison, S. Marinetti, M.R. Valluzzi\*

*Consiglio Nazionale delle Ricerche, ITC, Padova*  
*\* Dip. Costruzioni e Trasporti, Università di Padova*

## SOMMARIO

La recente normativa internazionale ed italiana relativa al consolidamento statico di opere civili con materiali compositi fibrorinforzati fornisce dati quantitativi precisi sul numero ed estensione massima ammissibile delle aree distaccate. Purtroppo, la tipologia delle prove previste contempla quelle non distruttive solo in modo complementare, finalizzate essenzialmente alla verifica dell'uniformità dell'applicazione. L'assenza di un'affidabile procedura di controllo in grado di quantificare la posizione e l'estensione di eventuali difetti di adesione tra il rinforzo ed il substrato riduce la diffusione di questo tipo di intervento, potenzialmente molto adatto ad esempio al ripristino di viadotti.

Si presentano gli ottimi risultati ottenuti con una specifica tecnica termografica di controllo non-distruttivo, che ben si adatta alle caratteristiche meccaniche e termiche altamente anisotrope dei materiali compositi comunemente impiegati.

Alcuni provini contenenti difettosità artificiali sono stati realizzati da una ditta specializzata. Su di essi si sono sperimentate innovative tecniche di elaborazione delle immagini termografiche, adatte ad essere applicate in situ. Le tecniche di misura si basano sull'analisi della temperatura superficiale, ottenuta a seguito di riscaldamento di tipo ciclico-transitorio, sviluppate nel dominio delle frequenze. In particolare, vengono valutati i risultati ottenuti, in funzione della semplicità di gestione del controllo in cantiere. Vengono inoltre illustrati i risultati ottenuti nel corso di esperimenti su travi di dimensione reale, sottoposte a prove di carico.

## Introduzione

L'utilizzo in edilizia di materiali compositi come rinforzo di elementi strutturali è sempre più diffuso, in particolar modo nel campo del ripristino e del consolidamento. L'efficienza del metodo dipende però da numerosi fattori e quindi è diventato fondamentale il controllo dell'aderenza sia per verificare la qualità della messa in opera, sia per monitorare nel tempo gli elementi soggetti a carichi e alle condizioni ambientali.

Le applicazioni a cui si presta questa tecnica sono molto varie e numerose, sia nel campo del restauro che delle nuove costruzioni. I vantaggi che offrono sono la possibilità di adattarsi a qualsiasi forma, l'elevato rapporto resistenza-peso, la durabilità nel tempo, la resistenza agli agenti chimici e naturali e alla corrosione. L'interesse che questo tipo di applicazioni ha riscontrato anche in Italia è sottolineato dal lavoro di numerosi ricercatori operanti nei settori della Meccanica delle Strutture, delle Costruzioni, della Riabilitazione strutturale e dell'Ingegneria sismica, che si trovano a che fare con un patrimonio edilizio particolarmente vario ed importante.

L'efficienza della tecnica di rinforzo è strettamente legata alla qualità del legame tra FRP e substrato. Si è riscontrato che anche nel caso di rinforzi accuratamente posti in opera, può avvenire che si generino delaminazioni a seguito del carico. Pertanto, è fondamentale eseguire il controllo dell'aderenza, non solo dopo l'applicazione dei compositi, per verificarne la corretta applicazione, ma anche nel corso del tempo, dato che gli elementi sono sottoposti a carichi e a condizioni climatiche sfavorevoli.

Partendo dal fatto che una procedura di controllo consolidata ed efficace non esiste ancora, le linee guida e i rapporti tecnici nazionali e internazionali per la progettazione, l'esecuzione e il controllo di interventi mediante FRP [1][2], fanno riferimento in modo particolare a prove di tipo semidistruttivo per ottenere valori che caratterizzano meccanicamente l'aderenza. Queste prove, per ovvie ragioni, possono indagare la qualità dell'adesione solo localmente e in regioni del rinforzo prive di tensione o in appositi testimoni, che però difficilmente possono essere confrontate con il reale comportamento dell'elemento strutturale in opera.

Per questo motivo acquista una particolare importanza integrare le misure standard con i controlli non distruttivi (CND), che grazie allo sviluppo delle apparecchiature e della teoria negli ultimi anni, permettono una buona capacità di indagine. La scelta della tecnica CND dipende dalla dimensione minima del difetto da individuare, dal tipo di materiali usati, dalla posizione dell'elemento nella struttura, dall'ambiente e dalle condizioni nel quale si opera.

Il significato che si è soliti dare ai risultati ottenuti con la termografia è di tipo qualitativo. Le linee guida ad esempio ne prevedono l'uso solo per caratterizzare l'omogeneità dell'aderenza CFRP-substrato mediante una mappatura bidimensionale della superficie. L'approfondimento della conoscenza dei fenomeni di trasferimento del calore, delle proprietà termofisiche dei materiali ed il grande sviluppo dell'apparecchiatura impiegata nel metodo termografico hanno promosso invece lo sviluppo della tecnica ottenendo dall'ispezione analisi di tipo quantitativo. In particolare, si sono messe a punto tecniche specifiche per determinare in modo non distruttivo l'estensione e la profondità di eventuali difetti o discontinuità presenti.

I compositi più diffusi in edilizia sono i materiali in fibra di carbonio CFRP che possono presentarsi come tessuti, applicati mediante apposite resine direttamente in sito, e come laminati, caratterizzati dall'unidirezionalità e da una maggior rigidità delle fibre dovuta alla "pre-impregnazione" con la resina già nel sito di produzione. I primi, data la loro ottima adattabilità a qualsiasi forma e materiale, sono utilizzati principalmente nel campo del restauro, i secondi sono utilizzati soprattutto come rinforzo a taglio e a flessione di elementi strutturali in cemento armato, sia nuovi che da ripristinare. Il presente lavoro è focalizzato principalmente sull'impiego di questa seconda categoria di materiali.

## **Test termografici compiuti su campioni rinforzati con FRP**

I primi test termografici sono stati eseguiti utilizzando diverse tecniche, su provini appositamente costruiti, contenenti difetti artificiali all'interfaccia FRP-substrato. Questi test hanno come obiettivo principale la valutazione dell'affidabilità della corretta determinazione della posizione ed estensione delle aree distaccate. Si vuole anche valutare la produttività della tecnica, ossia il rapporto fra il tempo impiegato e l'ampiezza della superficie indagata. Inoltre, i test sono utili per sviluppare una procedura semplificata che permetta di operare direttamente in sito.

In questi test il materiale composito utilizzato è il tessuto misto in fibre di carbonio e vetro, applicato in strisce della larghezza di 100 mm e di diversa tipologia di tessitura. Mediante un'apposita resina epossidica, il tessuto è applicato su di una piastra in calcestruzzo (cls) 45x45x4 cm. Per ottenere le discontinuità all'interfaccia FRP-substrato sono state usate varie tecniche, anche se questo aspetto rappresenta ancora un punto controverso. La figura 1 mostra tre tipologie di difetti artificiali creati all'interfaccia: 1) cavità, 2) grasso siliconico, 3) inserto in teflon. Infine, dopo l'applicazione del composito si è atteso il tempo necessario per ottenere una corretta polimerizzazione della resina epossidica. Successivamente, per il provino in cls, i test sono stati ripetuti dopo l'applicazione di uno strato di intonaco cementizio sopra la superficie rinforzata (come da figura 3), ponendo ulteriori inclusioni all'interfaccia, come si può osservare nella figura 2.

Le tecniche termografiche utilizzate sono di tipo attivo e prevedono una sollecitazione termica del materiale concomitante con la registrazione termografica dell'evoluzione della temperatura superficiale. Si sono sperimentate sia la termografia impulsata (Pulse Thermography PT) [3], che la modulazione della forzatura termica (Lock-in Thermography LT [4]). La prima utilizza come sorgente termica una coppia di Flash Bowers da 2400 J ciascuno, mentre la seconda utilizza delle lampade ad incandescenza della potenza di 600 W. La termocamera è una FLIR SC3000® abbinata ad un sistema digitale di gestione e trattamento dei dati. Nella fase di analisi si sono impiegati appositi algoritmi in grado di amplificare il segnale termico e di diminuire l'effetto di rumori e disturbi inevitabilmente presenti durante la misura. Una precedente memoria fornisce le indicazioni specifiche del metodo termografico applicato [5].

L'analisi delle diverse tecniche di stimolazione termica del materiale hanno portato a scartare la tecnica impulsata a causa della ridotta quantità di energia, che sollecita il campione, infatti, la superficie stimolata dal flash corrisponde approssimativamente ad una sola striscia di FRP. I migliori risultati si ottengono con il riscaldamento di tipo modulato e l'analisi delle immagini dello sfasamento del segnale termico prodotte in regime transitorio [6].

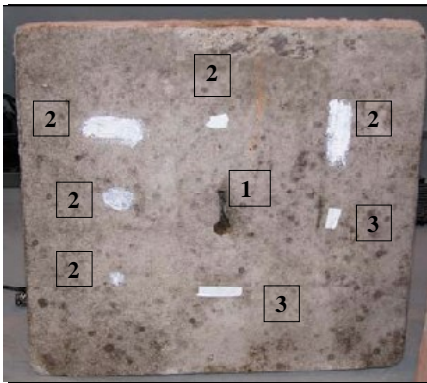


Figura 1 - Alcuni difetti artificiali applicati su un supporto in calcestruzzo



Figura 2 - Campione contenente difettosità artificiali rinforzato da 3 bande di FRP



Figura 3 - Aspetto del provino dopo l'applicazione dell'intonaco sui tessuti FRP

La figura 4 mostra i risultati ottenuti con la tecnica termografica utilizzando un riscaldamento di tipo modulato. Si osserva per confronto con le figure 1 e 2 come tutte le discontinuità inserite sono state rilevate. Si vedono inoltre alcuni difetti prodottisi naturalmente. Appare evidente la crescente difficoltà ad individuare le discontinuità di adesione a seconda che esse siano simulate con un sottilissimo strato di teflon o da una pellicola di grasso siliconico. Al contrario, la rilevazione è sempre più facile man mano che si differenziano le proprietà termofisiche del substrato e del composito.

Il test eseguito sul campione intonacato, che si vede nella figura 4 non è molto dissimile da quello ottenuto prima della deposizione dello strato di intonaco. La maggior uniformità e l'alta emissività della superficie intonacata ha compensato l'aumento dello spessore, permettendo facilmente l'individuazione dei difetti.

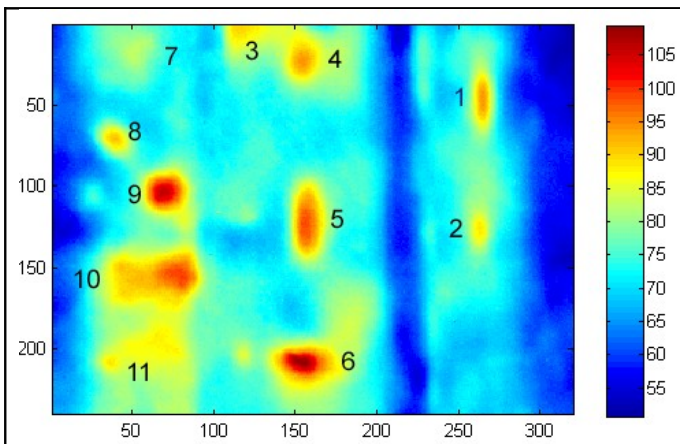


Figura 4 - immagine termografica provino in cls intonacato con riscaldamento modulato (periodo singolo, di 120s, I<sup>a</sup> frequenza)

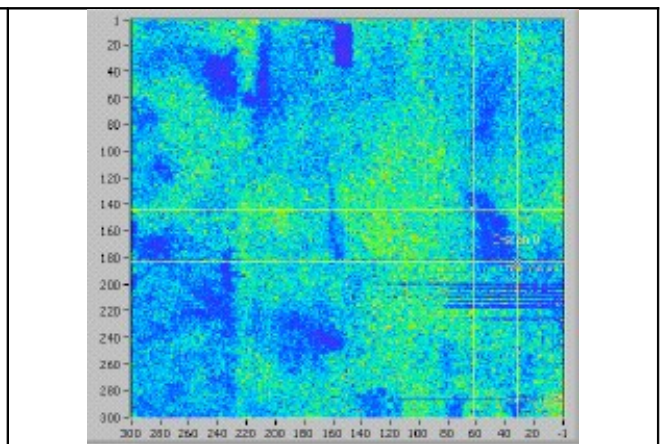


Figura 5 - Immagine del provino in calcestruzzo intonacato, ottenuta con il metodo degli ultrasuoni e la tecnica C-scan in PULse-Echo.

Nella figura si vedono chiaramente i difetti costituiti da una cavità (difetto 5), nastro in teflon dello spessore di 70  $\mu\text{m}$ , larghezza 1 cm e lunghezza variabile tra 1 (difetto 2) e 3 cm (difetto 6), fornendo una mappa molto precisa della localizzazione delle discontinuità, che costituiscono delle anomalie nell'adesione del rinforzo.

Come si è detto, il principale problema affrontato in questo lavoro consiste nella determinazione dell'estensione dell'area distaccata. Per questo scopo si deve innanzitutto conoscere questo valore per poterlo confrontare con i risultati delle elaborazioni. Si può notare dalla figura 4 come le dimensioni delle inclusioni non corrispondano esattamente alla forma dei materiali introdotti per generare i difetti. Pertanto, il provino è stato

sottoposto ad un ulteriore controllo non distruttivo con il metodo degli ultrasuoni. La Figura 5 mostra una immagine ottenuta tramite *C-scan* con la tecnica *Pulse-echo* ed accoppiamento della sonda alla superficie tramite getto d'acqua. Il segnale ultrasonoro è stato prodotto da una sonda trasmettitore-ricevitore operante a 10 MHz collegata allo strumento Panametrics 9100. Gli assi sono controllati da un programma scritto in ambiente *Lab View*<sup>®</sup>. L'attenuazione in ampiezza degli echi, dovuta ai difetti, è rappresentata come una immagine bidimensionale, riportata in figura 5. Va comunque rilevato, che il segnale viene influenzato da numerosi fattori, come: lo stato della resina e la frazione delle fibre. Inoltre, lo strato di intonaco, con la sua porosità accresce significativamente il rumore presente nell'immagine.

Purtroppo, la qualità di questa immagine non rappresenta un livello sufficiente per definire con precisione l'estensione delle aree difettose.

La tecnica termografica adottata per la valutazione dell'estensione dei distacchi si basa su di un algoritmo noto come Full-With-Half-Maximum (*FWHM*) [7,8,9,10]. Questa tecnica si basa sulla valutazione dell'estensione del difetto tracciando il contorno del valore pari al 50% dell'ampiezza del contrasto termico massimo. Lo studio dei limiti di applicabilità del metodo hanno mostrato come si debbano considerare le proprietà termofisiche dei materiali, in relazione alla profondità del distacco. In caso di difetti profondi, si ottiene una sovrastima sistematica dell'estensione. Un recente lavoro ha mostrato come questo algoritmo possa essere applicato anche alle mappe delle fasi o delle ampiezze ottenute a seguito dell'uso della tecnica PPT o lock-in [11]. Questo importante risultato consente di migliorare significativamente il rapporto segnale-rumore e la produttività dell'ispezione termografica. La figura 6 è stata prodotta utilizzando l'algoritmo suddetto, applicato all'immagine della prima componente in fase, ottenuta riscaldando il provino con un periodo modulato di durata 120 s. Sulla base dell'immagine si possono vedere le estensioni stimate delle varie difettosità presenti nel provino.

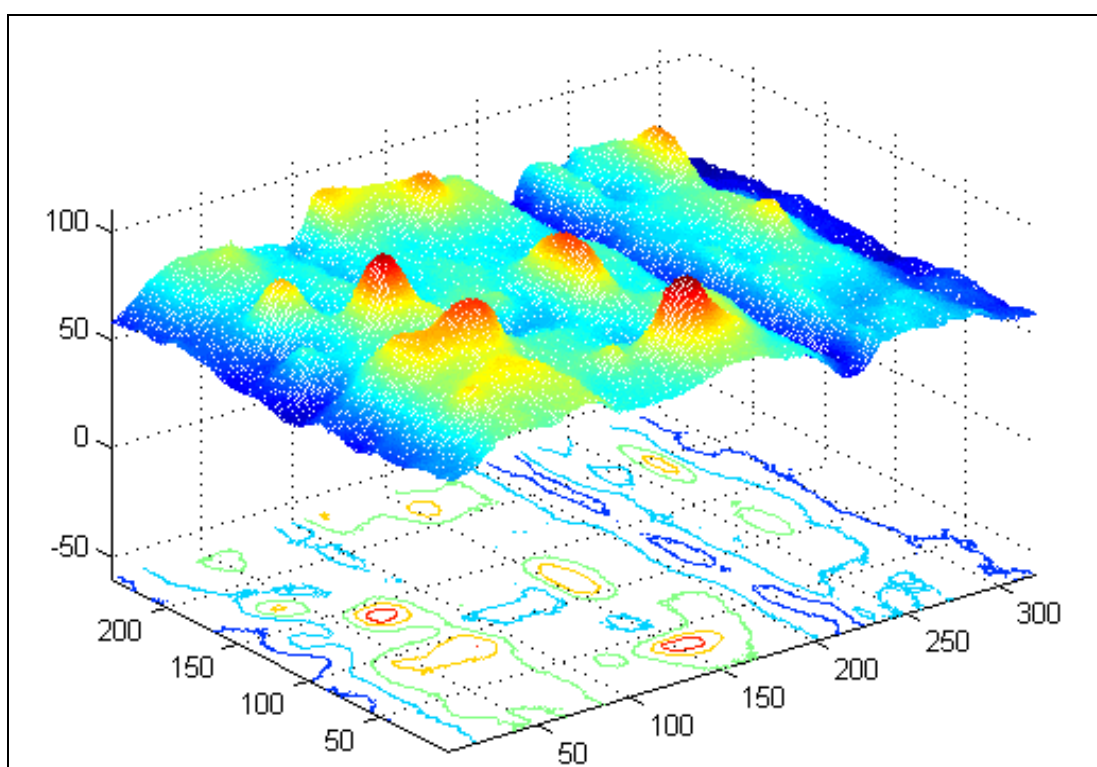




Figura 6 - Immagine termografica tridimensionale dei difetti individuati all'interfaccia composito-calcestruzzo e stima dell'estensione delle aree difettose

## Test termografici compiuti su elementi rinforzati con laminati CFRP

I laminati CFRP, utilizzati per lo più come rinforzo a taglio e/o flessione su elementi in c.a., incrementano in modo significativo la rigidità e la capacità di carico, ma di contro diminuiscono la duttilità degli elementi. Questo rappresenta un aspetto delicato perché le rotture di tipo fragile non sono mai desiderabili a causa dell'impossibilità di determinare con un certo anticipo il collasso della struttura. Anche in questo caso il controllo e il monitoraggio nel tempo acquistano un'importanza fondamentale. Il lavoro si divide in due fasi: un'analisi preliminare su due campioni creati con alcuni difetti artificiali per valutare l'affidabilità e la produttività della tecnica ispettiva e successivamente la messa a punto di una procedura termografica semplice, per essere utilizzabile anche in sito, di controllo dell'adesione dei laminati applicati ad alcune travi in scala reale sottoposte a carico centrale durante una prova meccanica di flessione.

I laminati CFRP utilizzati hanno spessore di 1.2 mm, sono larghi 10 cm e lunghi 33 cm, e sono depositati su due piastre in calcestruzzo RCK 50 della dimensione 40x40x5 cm; tali materiali sono gli stessi utilizzati per le travi. L'applicazione dei laminati sulle piastre è stata eseguita seguendo le apposite indicazioni fornite dalle linee guida: pulizia della superficie, stesura del primer, ossia un prodotto utile a incrementare l'aderenza fra i componenti, stesura dell'adesivo. Per ottenere i difetti artificiali sono stati utilizzati piccoli pezzettini di nylon da imballaggio, del grasso siliconico e alcuni pezzettini di Teflon® di varia lunghezza, sia in singolo che in doppio strato, posti come mostrato nella figura 7 e 8, all'interfaccia resina-laminato per un provino e all'interfaccia resina-cls per l'altro. I campioni alla fine si presentano come mostrato in figura 9.

L'apparecchiatura termografica (figura 10) e le tecniche utilizzate sono molto simili a quelle utilizzate nelle prove precedentemente descritte. Si è utilizzata la termografia impulsata e modulata ed i risultati sono stati ottenuti con l'algoritmo PPT, con parametri temporali ottimizzati per questi materiali.



Figura 7 - Sistemazione difetti artificiali, primo campione

Figura 8 - Sistemazione difetti artificiali, secondo campione

Figura 9 - Aspetto dei provini dopo l'applicazione dei laminati

La figura 11 mostra i risultati ottenuti per la fascia centrale del primo provino: tutti i difetti artificiali sono individuati facilmente e inoltre si possono notare numerosi difetti naturali prodottisi al momento della messa in opera. Il laminato è un materiale sottile e di spessore uniforme, caratteristiche ottimali per l'utilizzo della termografia. In conseguenza, i risultati si ottengono più facilmente e con miglior risoluzione rispetto alle prove sui

compositi in tessuto. La presenza dei difetti naturali ci fa inoltre capire l'importanza della corretta messa in opera del materiale, in quanto la presenza di sottili lamine o bolle d'aria diminuisce l'adesione all'interfaccia riducendo così la resistenza finale, rispetto a quella prevista in fase di progetto.

La rilevazione quantitativa dei distacchi è stata confrontata con le misure delle inclusioni introdotte all'interfaccia. I risultati riportati nella tabella 1 sono relativi all'analisi fatta delle ampiezze e delle fasi ottenute con l'algoritmo PPT. L'area riportata in tabella e lo scostamento (tra parentesi) con la dimensione delle inclusioni introdotte è stata calcolata ponendo la soglia pari al 40% del valore massimo di ampiezza e fase ottenuto.

Tabella 1. Stima dell'estensione dei difetti in mm<sup>2</sup>, con gli errori relativi tra parentesi, usando il 40% del segnale massimo in ampiezza e fase per la valutazione dell'area distaccata

<b>Immagine/difetto</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
dimensioni inclusioni	50	25	10	---	---	---	---	---
ampiezza	46 (-8)	29 (16)	---	27	22	36	46	23
fase	52 (4)	25 (0)	10 (0)	26	16	70	56	24

L'estensione dell'analisi in ampiezza alle mappe delle fasi ottenute da una sequenza di termogrammi a seguito di un riscaldamento periodico in condizioni transitorie consente di ottenere accurate rilevazioni anche con una misura rapida. Questo approccio si può considerare un ibrido tra la tecnica lock-in e quella PPT, che è tipicamente eseguita in transitorio termico.



Figura 10 - Apparecchiature utilizzate per i test termografici sui campioni

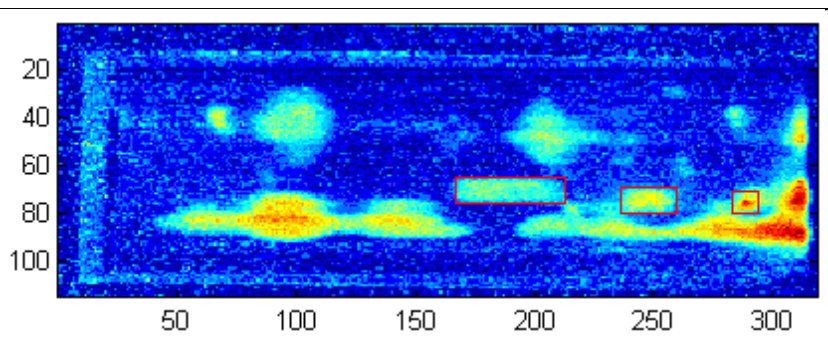


Figura 11 - Immagine dei difetti artificiali (evidenziati) e naturali presenti all'interfaccia laminato-cls, ottenuta mediante la PPT

Per concludere, si è svolta una sperimentazione su alcune travi sottoposte a test di carico e rinforzate con laminati in CFRP identici a quelli usati sui provini appena descritti. Le travi testate sono 5, tutte con la stessa sezione, 30x50 cm e lunghezza, 10 m; le prime 4 in cemento armato (c.a.), l'ultima in c.a. precompresso.. La prima trave non è rinforzata e serve da riferimento, due di esse sono state rinforzate con lamelle di carbonio senza pretensione, le altre due con una pretensione iniziale di circa lo 0.5%. Non sono posti difetti artificiali e quindi i test termografici mirano alla ricerca di difetti di adesione creati al momento della messa in opera dei laminati o al loro comportamento durante i cicli di carico a cui è stata sottoposta ogni trave. La tabella 2 fornisce le caratteristiche del test meccanico eseguito sulla trave precompressa. I test sono eseguiti presso il laboratorio del Dipartimento di Costruzioni e Trasporti dell'Università di Padova (vedi fig.12), quindi per

poter eseguire le prove termografiche in sito è stato necessario semplificare la procedura normalmente utilizzata. In particolare, la sollecitazione termica è fornita da un riscaldatore ad aria. La termocamera è posizionata su un apposito carrello in grado di scorrere con continuità e in modo uniforme sotto la trave rinforzata; uno specchio inclinato di 45° permette di osservare con più facilità la superficie inferiore della trave (fig. 13 e fig.14).

La prova termografica è condotta in due fasi: la prima nella quale si scandisce l'intera superficie rinforzata alla ricerca di difetti d'adesione generati durante l'applicazione del sistema, la seconda durante i cicli di carico della prova meccanica, per verificare un eventuale allargamento del distacco.

Ciclo di carico	Caratteristiche	P (kN)	Freccia (mm)	Prova termografica
Iniziale	Nessuna fessura del cls	27,3	- 9 (Controfreccia iniziale)	Si
I° ciclo	Nessuna fessura del cls	70,4	8,9	Si
II° ciclo	Inizio fessurazione del cls	93,1	15	Si
III° ciclo	Inizio delaminazione lamella	114,3	27	Si
IV° ciclo	Rottura lamella in senso longitudinale	138,2	47,3	Si
V° ciclo	Rottura del sistema di rinforzo per slittamento dall'ancoraggio di destra	192,24	250 (valore stimato)	No

**Tabella 2** : Valori del carico ad ogni ciclo per una trave precompressa rinforzata con CFRP

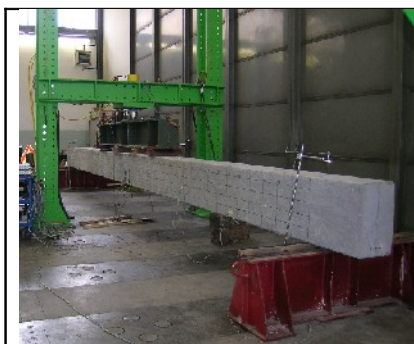


Figura 12 - Disposizione della trave durante la prova



Figura 13 – Sistema di scansione con la termocamera in posizione



Figura 14 - Fase di acquisizione dei termogrammi

Le figure 15a e 15b mostrano alcuni difetti ed è possibile un confronto fra la delaminazione individuata prima e durante l'applicazione del carico.

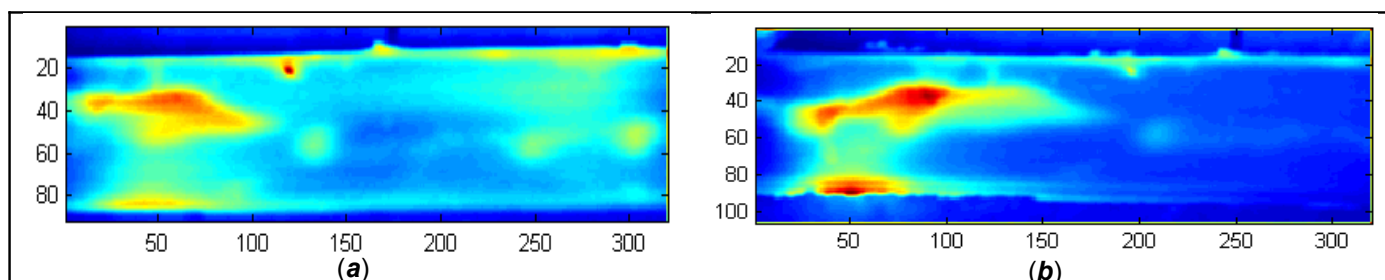




Figura 15 - Immagine di una delaminazione presente nella mezzeria della quinta trave, a trave scarica (**a**) e al 70% circa del carico massimo (**b**)

La figura 16 mostra un'altra area di distacco abbastanza vicina al punto dove si concentrano le tensioni durante le prove di carico, ossia la mezzeria. La delaminazione non sembra cambiare significativamente dimensione e forma durante la prova meccanica, almeno fino al valore considerato di 103,7 kN. Comunque, le tensioni maggiori che provocano distacchi certi alla lamina si hanno per valori di carico molto maggiori. Per motivi di sicurezza, anche dell'apparecchiatura termografica, ci si è dovuti fermare al terzo ciclo, non conoscendo le reazioni della fibra al momento della rottura.

La dimensione calcolata del distacco iniziale è di circa 16 cm<sup>2</sup>. Alcune importanti considerazioni si possono trarre dall'analisi visiva della superficie inferiore della trave dopo il distacco della fibra, che sono mostrate nella figura 16d. Infatti, la superficie inferiore della trave di questo punto appare in tre modalità: (**I**°) distacco della superficie di calcestruzzo, (**II**°) distacco della resina, il cls non rimane danneggiato e appare molto più scuro per la presenza dell'adesivo, (**III**°) il calcestruzzo mantiene il colore originale e non viene danneggiato per il mancato legame. In questo punto si nota chiaramente la somiglianza della forma con quella del difetto rappresentato nelle immagini termografiche.

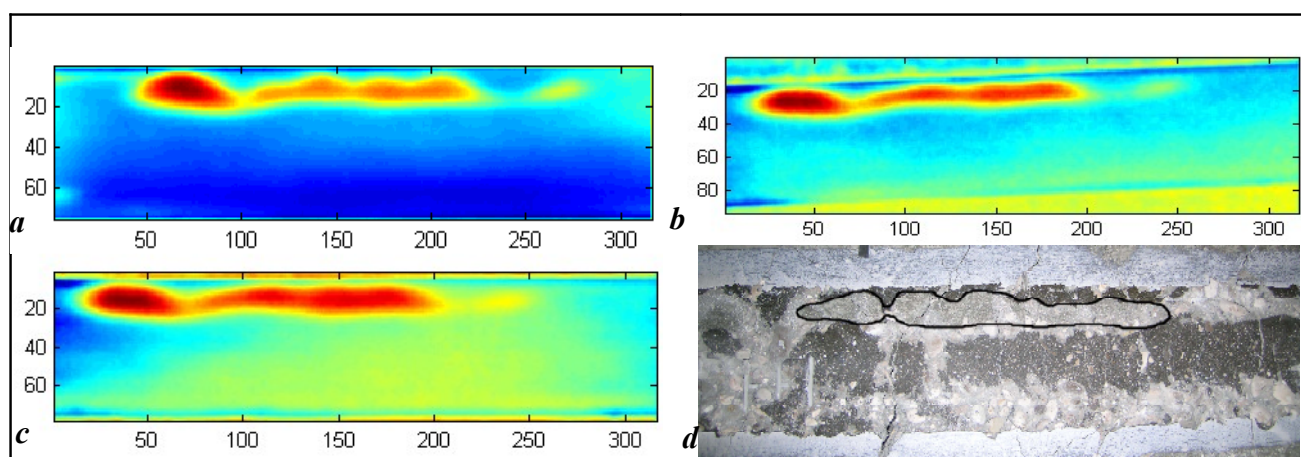


Figura 16 - Risultati ottenuti su trave precompressa e rinforzata con CFRP: **a**) prima del test di carico; **b**) dopo il secondo ciclo di carico, 41.8 kN; **c**) terzo ciclo di carico, 103.7 kN; **d**) fotografia del calcestruzzo dopo il distacco del CFRP

Da queste immagini è difficile confermare un aumento di dimensione dei distacchi, si nota invece una tendenza al distacco dei bordi della lamella in CFRP. L'estensione comunque stimata dei distacchi individuati risulta superiore ai limiti attualmente imposti dalle normative e questo conferma l'utilità del controllo, al quale dovrebbe seguire un intervento di riparazione o di adeguamento del rinforzo.

## Conclusioni

Alla luce di questi risultati, il metodo termografico si dimostra particolarmente adatto per un possibile studio sulla formazione e sul comportamento delle delaminazioni all'interfaccia composito-substrato in seguito ad aumento del carico, compiuto in maniera sistematica utilizzando appositi campioni o compiendo un monitoraggio periodico su elementi già rinforzati.

Un sistema dedicato di monitoraggio termografico ed un software specifico possono consentire l'ispezione di un'intera trave in modo rapido ed automatico.

La correlazione tra i risultati del controllo termografico con altri metodi, come è stato tentato con gli ultrasuoni non risulta di facile realizzazione. La presenza dei difetti è stata confermata, anche se la qualità dei risultati risulta più scadente e la prova molto più onerosa in termini di tempo.

## **Bibliografia**

1. ACI 440, 'Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures', 2002.
2. Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati, Norma CNR-DT 200/2005, Roma, 13 luglio 2004.
3. X. Maldague and S. Marinetti, *J. Appl. Phys.*, 79, 2694 (1996)
4. X.P.V. Maldague: "Theory and practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing" John Wiley & Sons, New York, 2001
5. E. Grinzato, S. Marinetti, P.G. Bison, "Controllo termografico di strutture edili fibrorinforzate" CNR ITC Padova, Conferenza Nazionale AIPnD, Milano, ottobre 2005
6. E. Grinzato, R. Trentin, P.G. Bison, S. Marinetti: "Control of CFRP strengthening applied to civil structures by IR thermography"; *Thermosense XXIX°*, SPIE, Orlando (USA), 2007
7. D.P. Almond, S.K. Lau, Defect sizing by transient thermography. I: an analytical treatment, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 27, 1994
8. Almond, M.B. Saintey, D.P. Almond, Defect sizing by transient thermography. II: a numerical treatment, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 28, 1995
9. D.P. Almond, R. Hamzah, P. Delpech, Peng Wen, M.H. Beheshty, M. B. Saintey; "Experimental investigations of defect sizing by transient thermography"; *QIRT 96-Eurotherm Series 50 ETS ed.*, Pisa 1997, pp.233-238
10. J.C. Krapez, cap.13 pp. 411-439, *ASNT Nondestructive Testing Handbook*, third edition: Volume 3, Infrared and Thermal Testing. Technical Editor: Xavier P.V. Maldague. Editor: Patrick O. Moore, 2001
11. E. Grinzato, V.A.M. Luprano, S. Marinetti, P.G. Bison, R. Trentin, A. Tundo, A. Tati. Thermal NdE of FRP applied to civil structures. 8<sup>th</sup> International Conference on Quantitative Infrared Thermography, QIRT 2006. Padova, 28-30 June 2006.
12. M.R. Valluzzi, E. Grinzato, C. Pellegrino, P.G. Bison and R. Trentin, "Thermographic analysis of bond of FRP laminates applied on R.C. Beams", 2nd International RILEM Symposium, Québec, September 2006

## **Ringraziamenti**

Si desidera ringraziare V.A.M. Luprano, A. Tundo, A. Tati (ENEA) per l'esecuzione delle prove ultrasonore ed il contributo allo studio presentato.