

EFFICACIA DELLA TERMOGRAFIA A INFRAROSSI NELLA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA DI STRUTTURE ESISTENTI

Giovanna Concu e Nicoletta Trulli
DICAAR – Università di Cagliari

La Termografia ad Infrarossi (IRT) è una tecnica di indagine non distruttiva priva di contatto fisico con l'elemento ispezionato legata alla misura dell'energia elettromagnetica da esso irradiata nella zona infrarossa. In particolare, per Termografia si intende l'utilizzo di una termocamera con lo scopo di visualizzare e misurare, ad una certa distanza, l'energia termica irradiata da un oggetto partendo dal rilevamento dell'intensità della radiazione infrarossa emessa, al fine di conoscere la temperatura superficiale e la sua distribuzione sull'oggetto, tramite la formazione di un'immagine termica.

In Fisica le modalità di trasmissione del calore sono tre:

1. Conduzione: avviene nei solidi, liquidi o gas a causa di una differenza di temperatura tra i corpi a contatto.
2. Convezione: avviene nei fluidi o nei gas in movimento.
3. Irraggiamento: avviene indipendentemente dalla presenza di un mezzo ed indica la radiazione elettromagnetica emessa dalla superficie di un corpo che si trova ad una certa temperatura.

In natura non esiste trasmissione di calore secondo una sola delle tre modalità ma il calore è trasmesso contemporaneamente nei tre modi indipendentemente l'uno dall'altro.

La teoria termografica e quindi il funzionamento della termocamera si basa sui principi fisici della radiazione del corpo nero e delle leggi di Planck, Wien e Stefan-Boltzmann.

Radiazione del corpo nero

Il corpo nero è un oggetto che possiede la capacità di assorbire tutte le radiazioni che lo investono ad una lunghezza d'onda qualsiasi, ma che contemporaneamente, secondo la legge di Kirchhoff, è ugualmente in grado di emettere radiazioni [Barducci, 1981].

Per calibrare e tarare le termocamere in laboratorio si procede alla costruzione di corpi neri reali, rappresentati da un'apertura di una cavità isotermica realizzata con un materiale opaco assorbente, che viene impiegata come sorgente di radiazione di riferimento alle diverse temperature.

La legge di Planck sull'irraggiamento

La legge di Planck definisce l'emittanza energetica spettrale (W) della radiazione emessa dal corpo nero ad ogni lunghezza d'onda (λ) e per una data temperatura (T), fornendo una descrizione della distribuzione spettrale dell'energia termica irradiata.

La legge di Wien

La legge di Wien esprime il valore della lunghezza d'onda λ_{\max} della radiazione infrarossa in corrispondenza della quale si ha il picco di emittanza spettrale per una certa temperatura del corpo nero (T) [Barducci, 1981].

La legge di Stefan-Boltzmann

La legge di Stefan-Boltzmann è espressa dalla relazione:

$$W = \sigma \cdot T^4 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

dove:

σ è la costante di Stefan – Boltzmann ed è pari a $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$;

W rappresenta il potere emissivo [Wm^{-2}];

T rappresenta la temperatura del corpo [K].

La relazione precedente fornisce una correlazione tra la quantità totale di energia emessa da un corpo nero (W) e la sua temperatura (T). Tuttavia i corpi reali non si comportano come un corpo nero ideale ma sulla loro superficie si possono verificare fenomeni di parziale assorbimento, riflessione e trasmissione della radiazione incidente.

Per ottenere una relazione che rappresenti correttamente la radiazione di un corpo reale è necessario modificare le formule relative ad un corpo ideale inserendo un coefficiente che tenga conto dei fattori considerati, per poter dimostrare che il potere emissivo del corpo reale è identico a quello di

un corpo nero alla stessa temperatura, ridotto in proporzione con il valore del fattore di emissività secondo la formula di Stefan-Boltzmann adattata:

$$W = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

In questo modo, poiché l'emissività consente di descrivere la frazione dell'emittanza radiante del corpo nero prodotta da un oggetto con la stessa temperatura, la conoscenza del valore di ε del corpo grigio in esame consente di determinarne la temperatura a partire dalla radiazione termica emessa.

Tecnica di analisi termografica

La termografia è divenuta un tipo di ispezione fondamentale in tutti i campi dove non sia possibile effettuare misure di temperatura per contatto. Viene classificata in due tipologie di indagine a seconda degli obiettivi che si intende perseguire:

- termografia passiva
- termografia attiva.

La termografia passiva consiste nell'analizzare l'elemento nella sua condizione stazionaria di esercizio, senza influenzarne il regime termico. È necessario che per l'esecuzione dell'indagine non vi siano porzioni dell'elemento irraggiate dal sole o da sistemi di illuminazione artificiale, perché tali zone fornirebbero risultati poco significativi. Le principali applicazioni nel campo edile sono collegabili all'individuazione della presenza di ponti termici ed infiltrazioni d'acqua all'interno delle murature.

La termografia attiva consiste nel sollecitare termicamente l'elemento modificandone le condizioni stazionarie. La differenza tra i valori della conducibilità termica e del calore specifico delle diverse parti dell'elemento portano le stesse ad assumere differenti temperature sotto sollecitazione termica [Siviero et al., 1995]. Questa tecnica consente di individuare elementi situati sotto il rivestimento esterno, nonché la verifica dello strato di aderenza e la conservazione del rivestimento stesso. La termografia di tipo attivo è applicabile secondo diverse tecniche in funzione delle differenti modalità di riscaldamento della superficie:

- ✓ termografia Pulsata (PT)
- ✓ termografia Lock-in (LT)
- ✓ termografia Ultrasound Lock-in (ULT).

La termografia Pulsata consiste nel riscaldare il provino per un intervallo di tempo molto breve e registrare la curva di decadimento della temperatura. Il riscaldamento avviene tramite un impulso che può essere implementato per mezzo di una o più lampade, flash, raggi laser, getti d'aria o d'acqua. La temperatura superficiale, in seguito all'impulso, cambia rapidamente, poiché il calore si propaga per irraggiamento, per convezione e, sotto la superficie, per diffusione. La presenza di un'anomalia altera la diffusione con conseguente variazione di temperatura nella zona del difetto rispetto a quelle circostanti. Questa tecnica è utilizzata per i materiali che hanno un'alta conducibilità termica, la cui superficie può essere riscaldata con un impulso molto breve. Il suo maggior vantaggio è dato dalla rapidità di esecuzione [Maldague, 2001/2002].

Nella termografia Lock-in il riscaldamento della superficie avviene modulando sinusoidalmente una fonte di calore, ad esempio una lampada, che produce un'onda termica che si propaga nel corpo oggetto di studio. L'onda viene riflessa quando incontra delle discontinuità, creando un'interferenza con l'onda termica esercitata sul corpo. In questo caso, agendo sulla modulazione della fonte di calore, è possibile determinare la profondità di eventuali difetti.

Nella termografia Ultrasound Lock-in viene sfruttato uno stimolo termico generato da una sorgente ad ultrasuoni che emette onde ad alta energia.

Esistono anche altri metodi termografici che si basano sulla combinazione di due tecniche o sull'osservazione della curva di riscaldamento o di raffreddamento dell'oggetto.

La scelta della tecnica impiegata nelle indagini di tipo termografico è essenzialmente funzione del problema che si deve affrontare. Per effettuare una corretta indagine è necessario conoscere:

- le caratteristiche dell'attrezzatura termografica;
- le caratteristiche dell'elemento oggetto di studio o degli strati che lo compongono;

- le proprietà radiative dei materiali coinvolti nell'indagine;
- i fattori climatici;
- l'accessibilità per le ispezioni;
- l'influenza dell'ambiente sull'elemento sotto indagine;
- la presenza di altri fattori che possono condizionare le prove.

Termocamera

Il funzionamento della termocamera si basa sulla rilevazione senza contatto dell'energia termica emessa dagli elementi ispezionati. Questa energia viene convertita in un segnale elettronico che viene in seguito elaborato da software specifici al fine di produrre immagini digitali e realizzare calcoli analitici della temperatura attraverso il computer. La visualizzazione delle immagini ad infrarosso, termogrammi, è effettuata utilizzando diverse colorazioni in scala in modo da mettere in evidenza i punti caldi, quelli freddi e le differenze di calore esistenti tra le varie parti della superficie esaminata. Si ottiene, in questo modo, una rappresentazione del gradiente termico tra zone diverse del corpo e un modello della distribuzione termica.

La termocamera non rileva solamente la radiazione causata dalla temperatura dell'oggetto, ma anche quella che si origina nelle zone circostanti e viene riflessa dall'oggetto stesso. Entrambe queste radiazioni variano in base all'assorbimento atmosferico, e il valore della misurazione può essere fortemente influenzato dalla temperatura ambientale.

Per una rilevazione precisa della temperatura superficiale dell'oggetto è quindi opportuno considerare tali fenomeni inserendo dei parametri opportuni che permettano di tenere conto delle caratteristiche dei vari elementi ispezionati e delle situazioni ambientali in cui si opera, in modo da correggere i fattori di disturbo della misurazione sopra menzionati. Tali parametri sono: l'emissività dell'oggetto, la temperatura riflessa, la temperatura atmosferica, la distanza tra oggetto e termocamera e l'umidità relativa.

Emissività

L'emissività si riferisce alla quantità di energia termica irradiata dall'oggetto, e poiché è espressa dal rapporto tra la radiazione emessa dal corpo in questione ad una data temperatura e quella emessa dal corpo nero alla stessa temperatura, risulta compresa nell'intervallo variabile tra lo zero e l'unità. Un corpo con emissività prossima al valore nullo riflette tutta l'energia proveniente dall'ambiente, mentre se tale valore è prossimo all'unità, come per i materiali compositi, l'oggetto ha un comportamento simile a quello del corpo nero tendendo ad assorbire tutta l'energia incidente su di esso senza alcuna riflessione. Per valori compresi nell'intervallo 0 – 1 ci si trova nella situazione del corpo grigio dove parte della radiazione incidente viene assorbita e parte riflessa.

Il coefficiente di emissività dipende dal materiale, dallo stato della superficie, dalla temperatura e dalla lunghezza d'onda ed è solitamente riportato in tabelle per i vari materiali in diverse condizioni. Questi valori sono indicati nei manuali a corredo della strumentazione, ma con lo scopo di ottenere migliori risultati spesso i rilevatori termografici prevedono un sistema di correzione che tenga conto del reale coefficiente di emissività che può essere misurato direttamente sul corpo in esame, ad esempio impiegando la termometria di contatto oppure utilizzando una termocoppia o dei materiali di riferimento con valori di emissività noti.

Temperatura ambientale riflessa

La temperatura ambientale riflessa consente di bilanciare la radiazione riflessa dall'elemento ispezionato e quella emessa dall'atmosfera tra la termocamera e l'elemento stesso. È di fondamentale importanza l'impostazione di tale valore quando l'emissività è bassa, la distanza molto elevata e la temperatura dell'elemento sottoposto ad indagine simile a quella dell'ambiente.

Distanza

Inserire il valore della distanza è utile per bilanciare l'assorbimento della radiazione tra l'oggetto sottoposto ad indagine e la termocamera dovuto alla "trasmittanza", che diminuisce all'aumentare della distanza. Operando una rilevazione non a contatto, si deve tener conto della presenza di un mezzo tra la sorgente e il rilevatore, rappresentato in generale dall'atmosfera terrestre, i cui gas hanno anch'essi proprietà termiche che vanno considerate in modo da evitare eccessive attenuazioni della radiazione emessa dall'elemento indagato.

Umidità relativa

L'umidità relativa viene impostata per ovviare al fatto che la trasmittanza dipende in certa misura anche da questo parametro. Tuttavia, per brevi distanze e valori di umidità normali si può utilizzare un valore standard pari al 50%.

CASI STUDIO

1) Applicazione della termografia ad infrarossi per il controllo di qualità dell'adesione tra compositi fibrorinforzati e travetti in calcestruzzo [rif. Infrared thermography as a tool for quality control of FRP and FRCM application, Concu, De Nicolo, Piga, Trulli, 6th Int. Conf. On FRP composites in civil engineering, 2012.]

I compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) e a matrice cementizia (FRCM) sono materiali comunemente impiegati per il consolidamento e il rinforzo di costruzioni nuove ed esistenti realizzate in muratura, legno, cemento armato, cemento armato precompresso e acciaio. Il loro impiego è giustificato dal fatto che questi materiali mostrano eccellenti proprietà di resistenza e rigidità [1, 2], elevati rapporti resistenza/peso e rigidità/peso [3], alta durabilità [4] ed elevata resistenza alla corrosione [5, 6]. La risposta strutturale dei materiali FRP e FRCM dipende fortemente dalla loro corretta applicazione, ed affinché il rinforzo con questi materiali sia assicurato in maniera ottimale è fondamentale realizzare una perfetta adesione tra FRP e FRCM e il substrato [7]. A causa di queste motivazioni, contemporaneamente alla diffusione dei compositi fibrorinforzati si è sviluppata una intensa attività di ricerca sui metodi di indagine non distruttivi (NDT) in grado di fornire indicazioni sulla qualità del sistema di rinforzo [8,9]. Il controllo della qualità è uno strumento di fondamentale importanza, non solo per la verifica della corretta messa in opera dei materiali fibrorinforzati, ma soprattutto per il monitoraggio degli stessi durante la loro vita d'esercizio. Il legame che si genera nell'interfaccia può essere seriamente compromesso dalla presenza di bolle d'aria, dovute ad una scorretta messa in opera del sistema di rinforzo e a distacchi fra FRP/FRCM e substrato, che possono generarsi in seguito all'applicazione dei carichi e all'esposizione agli agenti atmosferici. Alcune caratteristiche dei compositi in fibra di carbonio, tra le quali l'anisotropia, la radiotrasparenza e l'amagnetismo, escludono la possibilità di impiegare un gran numero dei classici metodi d'indagine non distruttivi, come ad esempio i metodi radiografici e magnetici che hanno invece fornito ottimi risultati nel controllo della qualità di altri materiali [10]. Si riportano di seguito i risultati di una campagna sperimentale mirata alla valutazione dell'efficacia della termografia ad infrarossi (IRT) ai fini del controllo di qualità sopra menzionato. A tal fine sono stati realizzati numerosi prismi in calcestruzzo rinforzati con reti e lamine in FRP, applicate mediante resina epossidica, e mediante reti in PBO (Poliparafenilenbenzobisaxazolo) applicate mediante una malta cementizia. I provini sono stati artificialmente alterati mediante l'introduzione di anomalie aventi differenti caratteristiche, profondità e dimensione, e sono quindi stati sottoposti ai test termografici. Si è quindi proceduto all'elaborazione dei dati allo scopo di verificare l'efficacia di tale tecnica nell'ambito della diagnosi delle strutture fibrorinforzate. Le prove sperimentali sono state condotte su 45 travetti in calcestruzzo aventi lunghezza pari a 0.60m e sezione quadrata 0.15x0.15m. 30 provini sono stati rinforzati mediante fibre di carbonio - 15 (serie A) rinforzati con la rete, altri 15 (serie B) rinforzati con le lamine; i restanti 15 (serie C) sono stati rinforzati con le reti in PBO. Nel primo provino delle serie (A1, B1 e C1) è stata realizzata la

perfetta aderenza fra il rinforzo e il calcestruzzo, mentre negli altri sono stati artificialmente indotti dei difetti - nastro in PTFE, un accumulo di colla e uno spessore in plastica - atti a simulare una scorretta applicazione del sistema di rinforzo (Fig. 1).

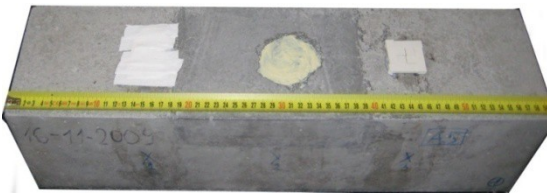


Figura 1 – Difetti nei provini: da sinistra a destra: nastro in PTFE, accumulo di colla, spessore in plastica

La tecnica termografica utilizzata nel corso della sperimentazione è di tipo attivo che prevede una sollecitazione termica dei provini sottoposti ad indagine ed una contemporanea registrazione termografica, ad intervalli di tempo prestabiliti, della evoluzione della loro temperatura superficiale. Le indagini sono state condotte impiegando come sorgente un faretto alogeno con una potenza pari a 400 W. Durante le prove termografiche sono stati analizzati due provini contemporaneamente: uno con perfetta aderenza rinforzo/calcestruzzo e uno con i difetti di adesione. In Figura 2 è mostrato il posizionamento dell'attrezzatura di prova.

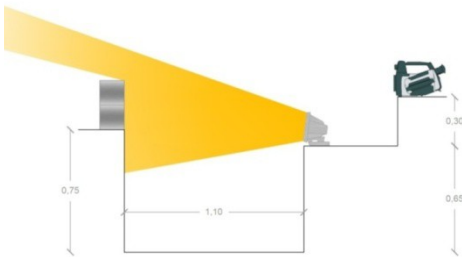


Figura 2 – Posizionamento attrezzatura di prova nella distanza S.

Durante le prove sono stati registrati numerosi termogrammi. L'intervallo di tempo di memorizzazione dei termogrammi è stato determinato in seguito a studi e tentativi effettuati per il materiale di rinforzo: in funzione della proprietà e degli spessori del rinforzo si è rilevata la necessità di attendere un determinato intervallo di tempo affinché l'energia assorbita dal provino per irraggiamento e convezione avesse modo di raggiungere per diffusione l'interfaccia di collegamento rinforzo-calcestruzzo e quindi si potessero rilevare le variazioni di temperatura in corrispondenza delle anomalie di adesione. Inoltre, nella scelta del tempo di sollecitazione termica dei provini si è prestata particolare attenzione a non raggiungere la Temperatura di Transizione della resina epossidica impiegata per la posa in opera del rinforzo in FRP. Nella Figura 3 è mostrata l'immagine fotografica dei provini A1 e A5, rinforzati con la rete in fibra di carbonio, e il termogramma relativo all'istante finale della prova termografica.

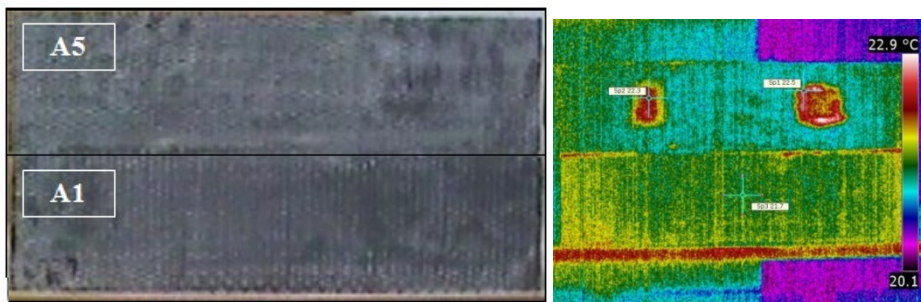


Figura 3 – Sinistra: fotografica dei provini testati. Destra: Termogramma finale relativo al confronto dei provini A1 e A5.

I difetti di adesione realizzati con il nastro in Teflon (T) e lo spessore in Plastica (P) hanno determinato una distribuzione anomala della temperatura superficiale del provino A5. La mancanza di aderenza determinata da T e la bolla di aria realizzata da P hanno determinato una temperatura pari rispettivamente a 22.3°C e 22.5°C, con un incremento pari a circa 1°C, rispetto alle zone di perfetta aderenza. Tali valori sono nettamente inferiori alla Temperatura di Transizione della resina epossidica. La Figura 4 mostra l'immagine fotografica dei provini B1 e B4, rinforzati con la lamina in fibra di carbonio, e il termogramma relativo all'istante finale della prova termografica.

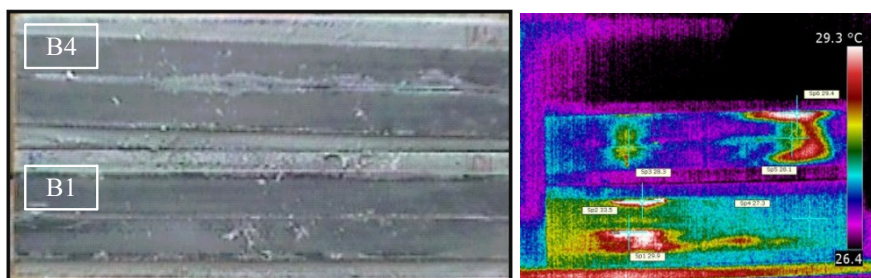


Figura 4 – Sinistra: fotografia dei provini testati. Destra: Termogramma finale relativo al confronto dei provini B1 e B4.

I difetti di adesione realizzati con il nastro in Teflon (T) e lo spessore in Plastica (P) hanno determinato una distribuzione anomala della Temperatura superficiale del provino B4. La mancanza di aderenza determinata da T e la bolla di aria realizzata da P hanno determinato una temperatura pari rispettivamente a 28.3°C e 29.4°C, con un incremento pari a circa 2°C rispetto alle zone caratterizzate dalla perfetta aderenza lamina/calcestruzzo. Nel termogramma precedente è inoltre possibile notare come nella lamina inferiore del provino B1 non sia stata realizzata la perfetta aderenza; risulta infatti ben visibile un'estesa zona con distribuzione anomala della temperatura causata dalla presenza di una bolla di aria in cui è stata raggiunta una temperatura massima pari a circa 30°C. La Figura 5 mostra l'immagine fotografica dei provini C1 e C2, rinforzati con il sistema PBO, e il termogramma relativo all'istante finale della prova termografica.

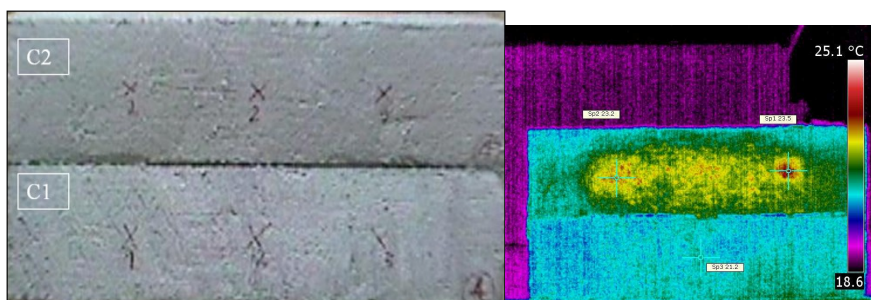


Figura 5 – Sinistra: fotografia dei provini testati. Destra: Termogramma finale relativo al confronto dei provini C1 e C2.

I difetti di adesione realizzati con il nastro in Teflon (T) e lo spessore in Plastica (P) hanno determinato una distribuzione anomala della Temperatura superficiale del provino C2. La mancanza di aderenza determinata da T e la bolla di aria realizzata da P hanno determinato una temperatura pari rispettivamente a 23.2°C e 23.5°C, con un incremento pari a circa 2°C rispetto alle zone caratterizzate dalla perfetta aderenza PBO/calcestruzzo.

Al fine di mettere meglio in evidenza la presenza di difetti e di punti caratterizzati da anomalie termiche non immediatamente visibili e per ridurre gli errori di interpretazione dei termogrammi, è stata eseguita una ulteriore elaborazione con Matlab® che ha consentito di effettuare una sottrazione delle immagini della temperatura fra i due istanti iniziale e finale della prova termografica.

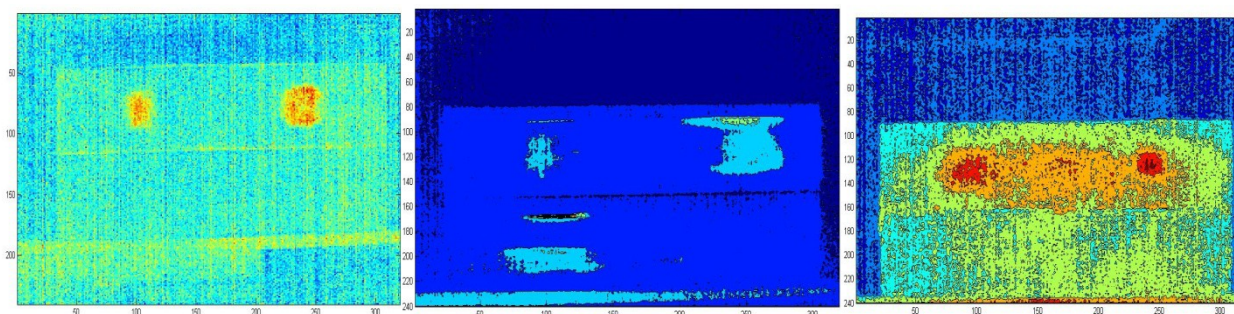


Figura 6 – Elaborazione Matlab[®] per provini rinforzati con la rete in FRP (a sinistra) e la lamina in FRP (al centro), e con la rete in PBO (a destra).

Come si può notare dalla Figura 6, solo due dei difetti di adesione sono facilmente identificabili. Nell'elaborazione relativa ai provini rinforzati con la lamina in FRP risultano inoltre evidenti due zone nel travetto inferiore in cui non è stata realizzata la perfetta aderenza lamina/calcestruzzo. Nel travetto superiore rinforzato con il PBO sono inoltre evidenti delle zone caratterizzate da una distribuzione anomala della temperatura. Queste sono in parte causate dalla riflessione del faretto sulla superficie del provino ed in parte alla rugosità della superficie stessa.

Bibliografia

1. D. Duthinh, M. Starnes. "Strengthening of reinforced concrete beams with Carbon FRP". Composites in Constructions. 2001.
2. CNR-DT 200/2004. "Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati", Roma. CNR 13 luglio 2004.
3. P. K. Mallick. "Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design". Marcel Dekker Inc. 1993.
4. S. M. Homan, S. A. Sheikh, P. Collins, G. Pernica, J. Daoud. "Durability of Fibre Reinforced Polymers used in concrete structures". 2000.
5. E. G. Sherwood, K. A. Soudki. "Repair of corroded RC beams with carbon FRP sheets". Proceedings of the 5th International Conference on Composites Engineering. 1998.
6. H. R. Hamilton, M. P. Kutaraba, J. R. Brown. "Repair of corrosion damaged concrete beams with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites". Journal of the American Composites Manufactures Association. 2007.
7. O. Büyüköztürk, T. Y. Yu. "Understanding and Assessment of debonding failures in FRP-Concrete systems". Seventh International Congress on Advanced in Civil Engineering. Turkey. 2006.
8. V. A. Luprano, P. Bison, E. Grinzato, S. Marinetti, A. Tati, A. Tundo. "Non destructive defect characterization in civil structures reinforced by means of FRP." ECNDT 2006 Proceedings. 2006.
9. V. A. M. Luprano, A. Tundo, E. Grinzato, S. Marinetti. "Non Destructive defect characterization in civil structures reinforced by means of FRP". ECNDT 2006.
10. G. Stabile. "Diagnosi strutturale non invasiva su strutture in materiale composito". Compositi n°7. Marzo 2008.

2) Applicazione della Termografia ad Infrarossi per la individuazione di anomalie e difetti in un elemento murario in calcestruzzo [rif. Modeling of active infrared thermography for defect detection in concrete structure, Cannas, Carcangiu, Concu, Trulli, COMSOL CONFERENCE 2012]

La campagna sperimentale è stata condotta su un elemento di calcestruzzo avente dimensione pari a 0.90x0.62x0.38m³. Durante il getto del calcestruzzo, al fine di simulare la presenza di difetti al suo interno, sono stati posizionati: i) una scatola vuota di polistirolo avente dimensione pari a 0.20x0.38x0.14 m³; ii) tre dischi in plastica aventi diametro di 0.075m e spessore pari a 030m, posizionati a differente profondità rispetto alla superficie del muro (Figure 7 e 8).

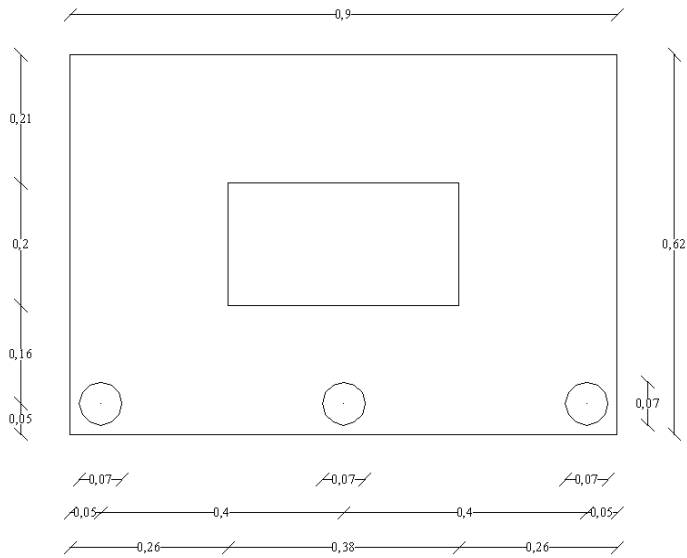


Figura 7 – Sezione verticale del muro (dimensioni in m).

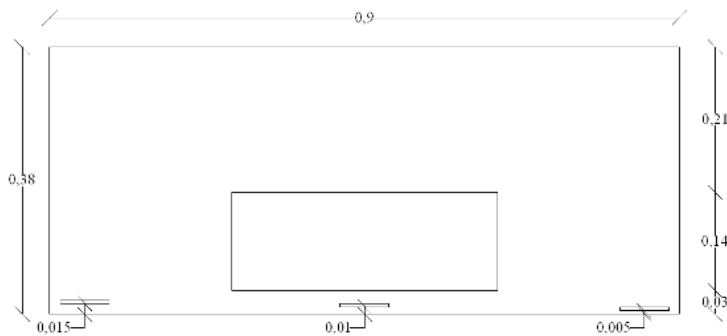


Figura 8 – Sezione orizzontale del muro (dimensioni in m).

L'indagine termografica è stata eseguita applicando un approccio di tipo attivo. Il blocco in calcestruzzo è stato sollecitato termicamente utilizzando due lampade alogene da 400 w ciascuna. La superficie sollecitata è stata monitorata durante il processo di riscaldamento e di raffreddamento con la termocamera della Flir SC660 avente una risoluzione da 640×480 pixel. La Figura 9 mostra il set up della strumentazione durante l'esecuzione della prova termografica.

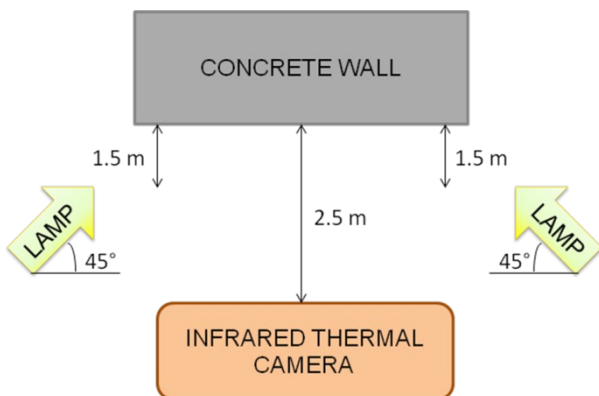


Figura 9 – Set up della strumentazione durante la prova termografica.

Durante le fasi di riscaldamento e raffreddamento sono stati acquisiti numerosi termogrammi. Il tempo di acquisizione della sequenza termografica, pari a 20 sec durante la fase di riscaldamento e

30 sec durante quella di raffreddamento, è stato determinato in seguito a studi e tentativi. La Figura 10 mostra alcuni termogrammi registrati durante le fasi di riscaldamento.

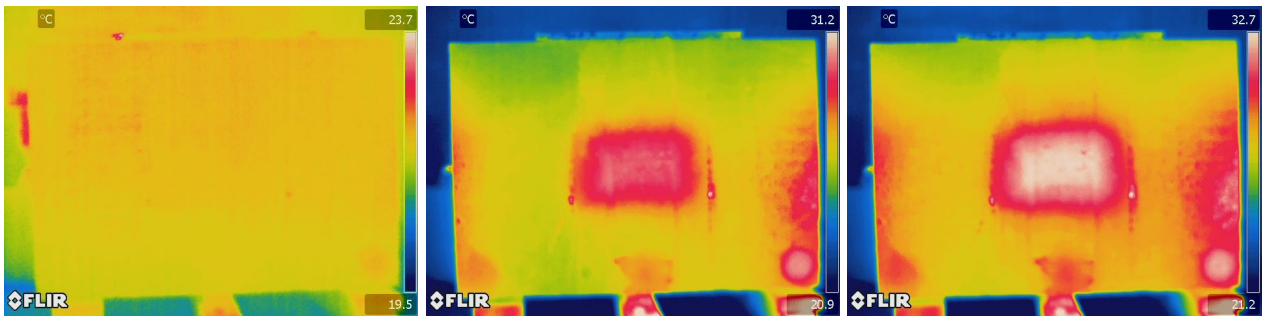


Figura 10 – Termogrammi acquisiti durante la fase di riscaldamento. Sinistra: istante iniziale. Centro: dopo 4570 sec. Destra: istante finale (9140 sec).

Dalla figura è possibile notare come la cavità e gli altri difetti diventino più evidenti man mano che la superficie è sottoposta ad un riscaldamento maggiore. Analogamente la Figura 11 mostra alcuni termogrammi acquisiti durante la fase di raffreddamento.

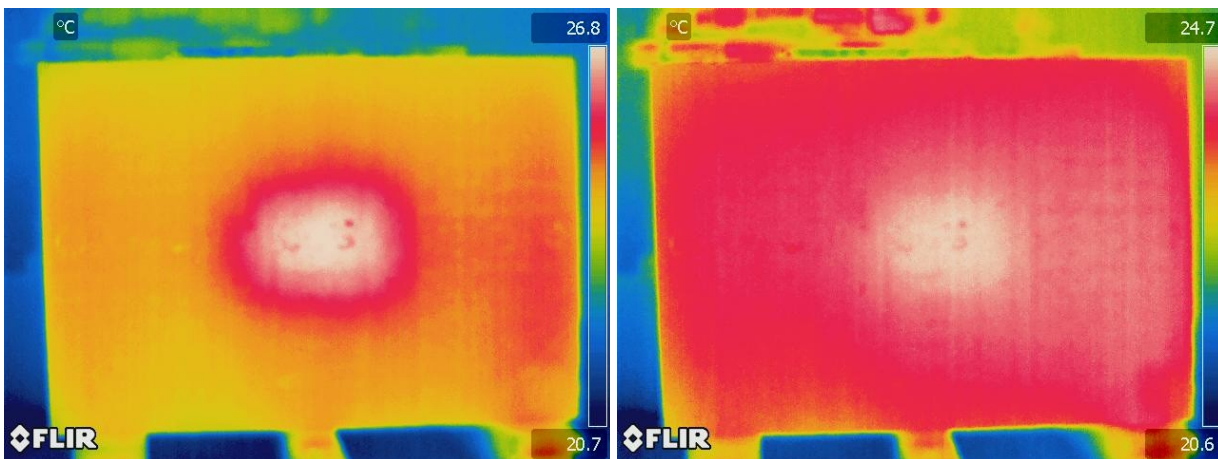


Figura 11 – Termogrammi acquisiti durante la fase di raffreddamento. Sinistra: dopo 22560 sec. Destra: istante finale.

I termogrammi relativi alla fase di raffreddamento mostrano come la distribuzione della temperatura superficiale decresca rapidamente tendendo a mostrare una distribuzione uniforme alla fine della sequenza termografica.

La modellazione agli elementi finiti (FEM) delle strutture e dei fenomeni termici che si verificano a causa di una sollecitazione termica, è utile per comprendere gli aspetti legati al loro comportamento termico migliorando così la comprensione dell'applicazione termografica nella identificazione e interpretazione delle anomalie interne riscontrate. La modellazione è stata condotta con lo scopo di identificare la posizione dei difetti nel muro in calcestruzzo. Il modello geometrico 3D è mostrato in Figura 12 ed è costituito dal muro in calcestruzzo avente le stesse dimensioni del muro testato in laboratorio e da due lampade alogene. Il muro e le lampade sono posizionate all'interno di una stanza avente temperatura costante pari a 213.15 K (0°C). In questa maniera è possibile trascurare la geometria delle pareti della stanza. Nel modello, inoltre, si assume che il sistema fisico sia dominato dalla radiazione e raffreddamento per convezione. Le due lampade alogene con potenza totale da 1000W vengono modellate come due oggetti solidi con tutte le superfici isolate eccetto la parte superiore che si affaccia sul muro aventi una potenza totale da 1000W. Il modello simula il campo di temperatura transitorio di 9140 s per la fase di riscaldamento e di 26820 s per la fase di raffreddamento. La temperatura iniziale per tutti gli oggetti è pari a 273.15 K.

La mesh è costituita da 12137 elementi tetraedrici. Nelle zone in cui ci si aspetta un maggiore gradiente della temperatura è stato previsto un infittimento della mesh.

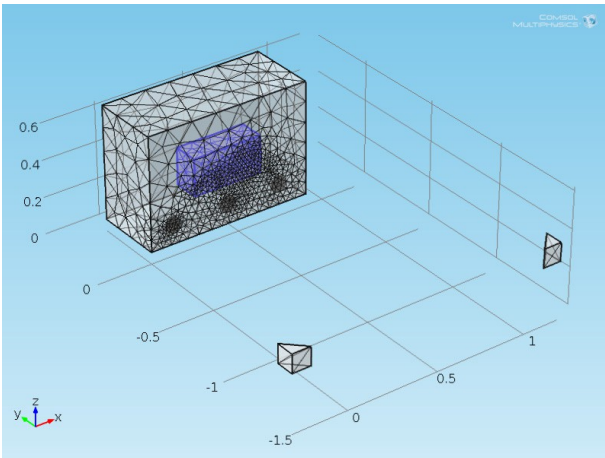


Figura – 12. Mesh del modello 3D: muro in calcestruzzo con la cavità di aria (blu), dischi in plastica e due lampade alogene.

Con lo scopo di riprodurre gli stessi termogrammi ottenuti sperimentalmente dall'indagine termografica sul modello FEM è stata condotta un'analisi parametrica facendo variare la distanza della cavità da 0.004m 0.05 m rispetto alla superficie del muro con variazione pari a 0.001 m. Per ogni valore di questa distanza è stato eseguito uno studio transitorio da 0s a 35960s con un $\Delta t = 20$ s. Nella Figura 13 è mostrato l'andamento del valore massimo della temperatura al variare della distanza della cavità dalla superficie del muro in calcestruzzo ottenuta dopo $t = 4570$ s (blu) e $t = 9140$ s (verde). Come si può notare, quando la distanza della cavità dalla superficie è pari a 0.009 m, il valore massimo della temperatura è pari a 32.7°C per $t = 9140$ s e $31,3^{\circ}\text{C}$ per $t = 4570$ s.

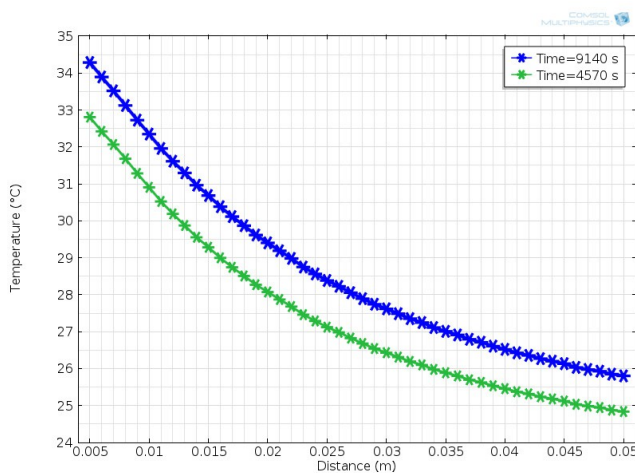


Figura –13. Variazione del valore massimo della temperatura in funzione della distanza della cavità dalla superficie.

I valori ottenuti risultano essere molto simili a quelli determinati sperimentalmente e mostrati nei termogrammi precedenti delle Figure 10 e 11 dimostrando così che la cavità è prossima alla superficie irradiata del muro di cemento. Le figure 14 e 15 mostrano le distribuzioni della temperatura superficiale del muro determinati considerando la distanza della cavità dalla superficie pari a 0.009 m. La scala della temperatura, variabile da 20°C a 33°C , è stato regolato in modo da combaciare con quella dei dati sperimentali. Come si può notare le distribuzioni della temperatura determinate con il programma FEM corrispondono ai termogrammi ottenuti sperimentalmente tramite la IRT.

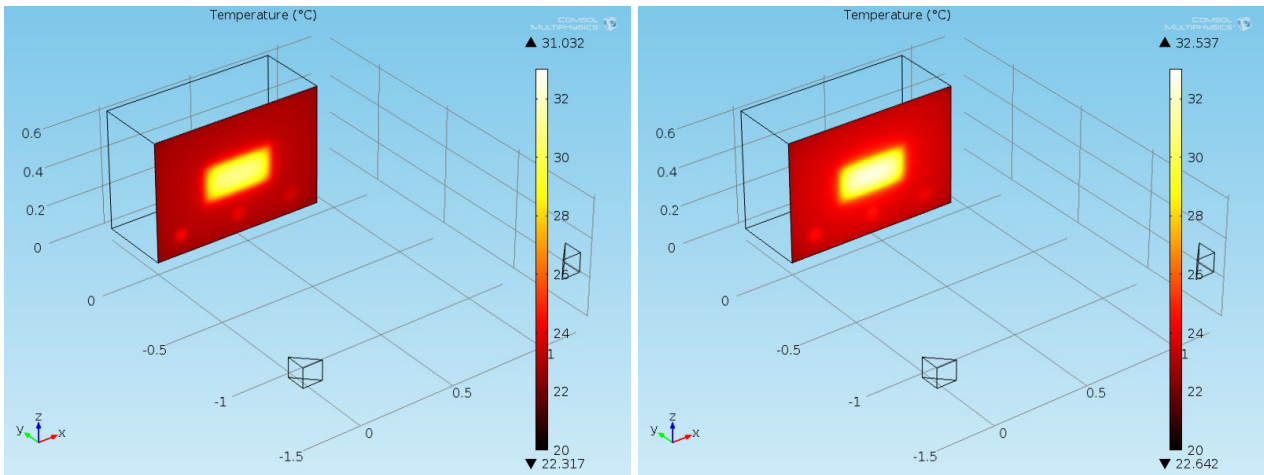


Figura –14. Termogrammi determinati tramite FEM ed ottenuti dopo 4570 s (a sinistra) e dopo 9140 s (a destra).

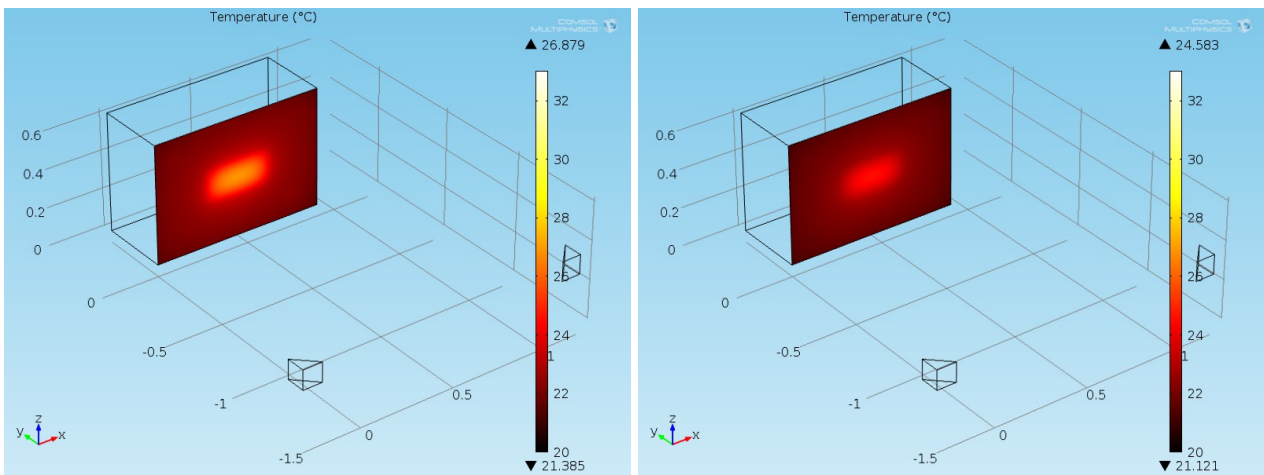


Figura – 15. Termogrammi determinati tramite FEM ed ottenuti dopo 22550 s (a sinistra) e dopo 36960 s (a destra).