

## IMPLEMENTAZIONE DI TECNICHE NDT DI TERMOGRAFIA AD INFRAROSSI SU PANNELLI IN COMPOSITO GRP PER APPLICAZIONI NAUTICHE

G. Pitarresi<sup>a</sup>, F. Riforgiato<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Università di Palermo, Dipartimento di Meccanica, Viale delle Scienze 90128, Palermo, Italy, e-mail: pitarresi@dima.unipa.it*

### Sommario

Il presente lavoro descrive l'implementazione di due tecniche di termografia attiva ad infrarossi per il controllo non distruttivo (IRNDT) di delaminazioni sub-superficiali su pannelli in composito (GRP) di grosso spessore, tipicamente impiegati per uso navale. Si è in particolare fatto uso di attrezzature a basso costo consistenti in comuni lampade alogene a bassa potenza come sorgenti di calore esterne, ed una termocamera ad infrarossi a singolo sensore a bassa risoluzione termica e basso *frame rate*. Le due tecniche implementate sono la Pulsed Thermography (PT) ed una nuova variante di Lock-In Thermography denominata Pulse-Modulated Lock-In Thermography (PMLT), basata sull'analisi in frequenza del segnale termografico del provino riscaldato da una serie di impulsi modulati. Il lavoro descrive in particolare il trattamento del segnale termografico messo a punto al fine di ottimizzare la tracciabilità dei difetti e ricavare informazioni utili sulla loro natura.

### Abstract

This work describes the development and implementation of infrared thermal NDE procedures for the evaluation of subsurface defects on a thick GRP panel, typical of naval monolithic hull structures. A low cost Thermal NDT set-up is in particular adopted consisting of common low power halogen lamps as external heat source devices, and a single detector IR scanner with a low thermal resolution and a low frame rate. Two active thermographic techniques have been implemented: a Pulsed Thermography (PT) and a modified Lock-In Thermography technique referred to as Pulse-Modulated Lock-In Thermography (PMLT), based on the lock-in processing in the frequency domain of the thermographic signal measured on a defected panel heated by a train of heat pulses. The work describes the signal processing performed on the measured thermographic signal in order to enhance defects signatures and provide further information on defects features.

**Parole chiave:** Infrared Thermography, Pulsed Thermography, Lock-In Thermography, Thick GRP Laminates.

### 1. INTRODUZIONE

Il presente lavoro descrive i risultati dell'implementazione di due tecniche di termografia attiva ad infrarossi per il controllo non distruttivo (IR-NDT) di zone delaminate presenti in un pannello in fibra di vetro e resina poliestere di grosso spessore, con caratteristiche tipiche per l'impiego strutturale in campo nautico. L'impiego di laminati compositi fibrorinforzati (in particolare con fibre di vetro) e a matrice polimerica è ormai da diversi decenni consolidato nella realizzazione di scafi ed altri componenti strutturali per una ampia fascia di natanti. In tale contesto è sempre più avvertita l'esigenza di impiego di tecniche di controllo non distruttivo preferibilmente a campo intero, a basso costo ed in grado di operare in condizioni ambientali non rigidamente controllate. In particolare è sentita l'esigenza sia di verificare gli standard di qualità richiesti dai clienti che di eseguire le operazioni di controllo dell'integrità strutturale soprattutto da parte di operatori di flotte [1].

Sebbene negli ultimi anni sono state proposte diverse tecniche NDT a campo intero per il controllo di laminati FRP, molte di queste (es. metodi radiografici, ultrasuoni, C-scan) si sono sviluppate soprattutto in ambito aeronautico, e non risultano efficacemente trasferibili al settore nautico sia per esigenze legate ai costi che di operatività nelle condizioni tipiche di un cantiere navale.

Le due principali tecniche NDT ad oggi con maggiori potenzialità di sviluppo nel settore nautico sono le tecniche scereografiche [1] ed i metodi di termografia ad infrarossi IR-NDT [2-4].

Per quanto concerne le tecniche IRNDT queste si basano soprattutto sull'impiego di tecniche di Termografia Attiva, in cui uno stimolo esterno (termico o meccanico) genera nella struttura una risposta, in termini di evoluzione della temperatura superficiale, influenzata dalla presenza o meno di difetti sub-superficiali. Questi quindi si palesano in genere sotto forma di contrasto termico, analizzando le mappe dei termogrammi acquisiti nel tempo. Sulla base di tale principio si sono sviluppate diverse tecniche IRNDT molto efficaci per quanto riguarda la possibilità di analizzare rapidamente ampie superfici di strutture con difetti poco profondi [2-13]. Tali tecniche si possono raggruppare in due principali categorie: *Transient Thermography* e *Modulated Thermography*.

Le tecniche di Transient Thermography analizzano il transitorio di raffreddamento sulla superficie di un componente dopo che questo è stato esposto ad un breve ed intenso impulso termico [4]. La presenza e le caratteristiche dei difetti vengono analizzate attraverso la valutazione del contrasto termico tra zone integre e zone difettate. La Pulsed Thermography [2,4] è la più diffusa tecnica di transient thermography basata sulla valutazione del contrasto termico, mentre una sua variante, la Pulsed Phase Thermography [5,6], si basa sulla valutazione del contrasto di fase tra zona integra e difettata dove la fase si riferisce alle armoniche del contenuto in frequenza del segnale termografico nel transitorio di raffreddamento.

Per quanto riguarda l'approccio mediante Modulated Thermography, la principale differenza consiste nel monitorare la risposta termica del componente a regime durante la deposizione sul componente di onde termiche di ampiezza modulata ciclicamente. La tecnica principale di riferimento è la Lock-In Thermography (LT) [7-9], tradizionalmente implementata attraverso la deposizione di onde di calore con ampiezza sinusoidale a bassa frequenza. Nella LT il segnale termografico misurato è correlato in frequenza con il segnale che modula la deposizione di calore e lo sfasamento tra le principali armoniche dei due segnali utilizzato come indice della presenza di difetti.

Il presente lavoro descrive l'implementazione di due tecniche IRNDT: PT e una variante della LT, denominata Pulse-Modulated Lock-In Thermography (PMLT) [10], dove il calore depositato non è modulato sinusoidalmente ma consiste nell'invio di una serie di impulsi schematicamente rappresentati come un treno di onde quadre. Il materiale analizzato è un pannello di GRP di grosso spessore con difetti artificiali creati per simulare delle delaminazioni a diversa profondità dalla superficie.

Per quanto riguarda la tecnica PT in particolare una novità nell'approccio seguito consiste nell'impiego di tempi di riscaldamento di lunga durata rispetto agli impulsi di durata istantanea ed elevata intensità generalmente applicati in letteratura.

Riguardo la PMLT lo studio descrive l'innovativa applicazione via software di un algoritmo di filtraggio lock-in dei segnali, in grado di derivare il contrasto di fase senza la necessità di impiegare sofisticati sistemi hardware di controllo del calore depositato sul componente da analizzare.

## 2. DESCRIZIONE DELL'ATTREZZATURA SPERIMENTALE E DEL PROVINO ANALIZZATO

Il provino analizzato è un pannello in vetroresina (GRP) con lay-up di tipo *cross-ply* simmetrico:  $[(0,90)_7]_s$  composto da 28 lamine, e di spessore complessivo 12 mm. Il pannello è stato realizzato mediante laminazione a mano (*hand lay-up*) utilizzando una resina poliestere curate a temperatura ambiente. Si è impiegato un tessuto unidirezionale intrecciato da sottili fili di nylon nella direzione dell'ordito, avente una grammatura complessiva di 400 g/m<sup>2</sup>, mentre la percentuale in volume di fibra misurata sul manufatto finale è di circa il 35 %. Una finitura superficiale opaca è stata ottenuta laminando il pannello sopra un foglio di *peel-ply* rimosso dopo la cura. I difetti consistono in delaminazioni interlaminari artificiali simulate mediante due modalità. Nel primo caso si sono inseriti in fase di laminazione, a diverse profondità, inserti di forma rettangolare, ripiegati in due, di fogli sottili di Teflon (difetti D1-4 in fig. 1a). Il foglio di teflon utilizzato ha spessore 0.04 mm e l'inserto è

ripiegato in due per creare una intercapedine di vuoto, e sigillato ai lati con del nastro adesivo per evitare l'afflusso di resina ancora fluida in fase di laminazione. Gli inserti hanno forma rettangolare di dimensioni  $50 \times 50 \text{ mm}^2$ . Il secondo tipo di delaminazione simulato consiste in fori ciechi con fondo piano di diametro 30 mm (difetti D5-7 in fig. 1a). I difetti si trovano a tre diverse profondità dalla superficie analizzata, pari ad  $\frac{1}{4}$  (D1, D2 e D5),  $\frac{1}{2}$  (D3, D4 e D6) e  $\frac{3}{4}$  (D7) dello spessore del laminato. La termocamera ad infrarossi impiegata per acquisire il segnale termografico a campo intero è la Varioscan 3022 della Jenoptik GmbH, equipaggiata con singolo sensore MCT, raffreddato termoelettricamente, avente una risoluzione NETD pari a 0.12 K. Il sensore scansiona la superficie acquisendo  $360 \times 240$  pixels, in modalità raster e con *frame rate* di circa 1 Hz [14]. Il software di controllo è l'IRBIS® V2.0, mediante il quale la termocamera è controllata in remoto. I termogrammi acquisiti in formato proprietario possono a sua volta essere esportati come immagini bitmap ad 8 bit. Tali immagini nel presente lavoro sono post-processate in ambiente Matlab, importando ogni singolo termogramma come bitmap e riscaldando l'immagine per recuperare l'informazione di temperatura. Il setup termografico realizzato è del tipo a riflessione (sorgente termica e termocamera poste sullo stesso lato rispetto al provino, fig. 1b), e risulta di veloce messa in opera e facilmente adattabile anche a rilevazioni sul campo. Le sorgenti di calore consistono in due lampade alogene a basso costo, ognuna di potenza pari a 1500 Watt. L'accensione e spegnimento è comandato manualmente. Dei pannelli schermanti sono stati posizionati di fronte alle lampade nelle fasi immediatamente successive allo spegnimento sia nella PT che nella PMLT per evitare che il calore residuo della lampada continuasse a depositarsi sul pannello nei transitori di raffreddamento.

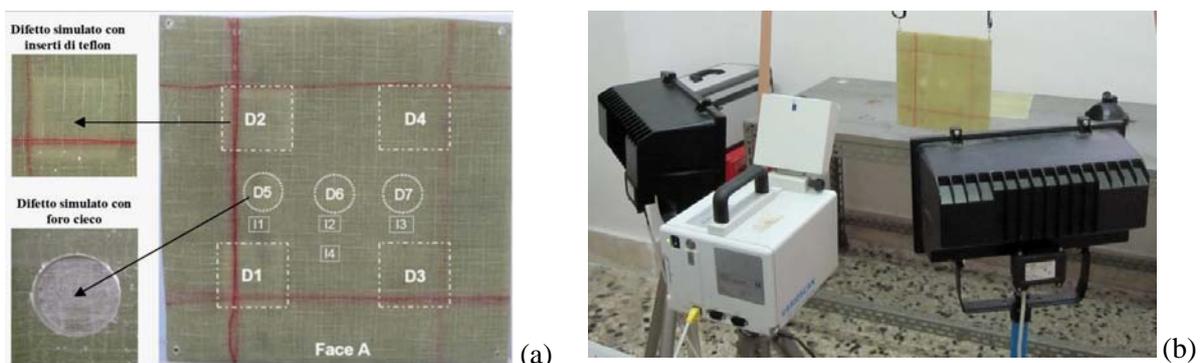


Figura 1: (a) immagine del pannello GRP con posizione dei difetti; (b) set up termografico.

### 3. ANALISI MEDIANTE PULSED THERMOGRAPHY (PT)

Nella PT si utilizzano sorgenti di calore esterne in genere costituite da lampade a flash in grado di depositare sulla superficie del componente in esame un impulso termico di elevate intensità e breve durata [4]. Diverse applicazioni sono descritte in letteratura, basate sulla valutazione dell'evoluzione del contrasto termico nel tempo tra una zona integra ed una difettata [2,4,12-13].

L'analisi dei difetti attraverso la rilevazione del contrasto termico presenta due limitazioni: la necessità di conoscere a priori zone integre di materiale e la dipendenza del contrasto termico dalla scelta della zona integra. Il secondo punto è particolarmente influente quando si verificano le seguenti condizioni:

- la quantità di calore depositata dalla sorgente esterna sulla zona analizzata non è uniforme, per cui diverse zone hanno temperature e gradienti di raffreddamento diversi non solo per la presenza di difetti sub superficiali, ma anche perché hanno ricevuto una quantità di calore diversa;
- la durata del periodo di riscaldamento è tale per cui il calore ricevuto si è già propagato sino al difetto e comincia ad accumularsi in corrispondenza di esso quando le lampade sono ancora accese. In questo caso il difetto è già visibile, cioè è già presente un contrasto termico, nel momento in cui inizia il transitorio di raffreddamento. L'evoluzione ulteriore del contrasto in questo caso è di nuovo molto sensibile con la scelta della zona integra. In genere questa seconda condizione si presenta quando la deposizione di calore si protrae per un lungo tempo, al fine di indagare difetti più profondi. Tale situazione verrà in seguito indicata come pre-accumulo di calore.

La condizione ideale nel calcolo del contrasto termico si verifica quando la zona integra di riferimento ha ricevuto la stessa quantità di calore della zona difettata. Alcune soluzioni sono state proposte in letteratura al fine di garantire la corretta evoluzione del transitorio di raffreddamento della zona integra di riferimento. Tra queste le tecniche TSR [11] e DAC [12], entrambe basate su una ricostruzione dell'evoluzione del transitorio di raffreddamento in assenza di difetto. Un'altra più recente procedura denominata *Source Distribution Image* (SDI) [13], implementata anche in questo lavoro, propone la scelta della zona integra di riferimento sulla base dell'analisi delle isoterme dei termogrammi iniziali, il cui andamento descrive la disomogenea deposizione del calore sul componente. Va detto che tutti i metodi menzionati richiedono la necessità di controllare la quantità di calore depositato al fine di non determinare un pre-accumulo di calore prima dell'inizio del transitorio di raffreddamento, ovvero la diminuzione di temperatura osservata nelle prime fasi del transitorio di raffreddamento deve rimanere ancora non influenzata dalla presenza del difetto sub-superficiale.

In questo lavoro, al fine di ottenere un contrasto termico su difetti profondi, la deposizione di calore si è protratta per tempi molto lunghi compresi tra 10 e 80 sec. Due definizioni di contrasto termico sono state utilizzate: il contrasto standard ed il contrasto normalizzato [2], definiti rispettivamente da:

$$C_s(t) = \frac{T_d(t) - T_d(t_o)}{T_i(t) - T_i(t_o)} \quad (1)$$

$$C_n(t) = \frac{T_d(t)}{T_d(t_m)} - \frac{T_i(t)}{T_i(t_m)} \quad (2)$$

dove i pedici  $d$  ed  $i$  si riferiscono a zone difettate e zone integre, la temperatura al tempo  $t_o$  è quella misurata prima dell'accensione delle lampade per la deposizione di calore, mentre la temperatura al tempo  $t_m$  è quella misurata subito dopo lo spegnimento delle lampade e quindi all'inizio del transitorio di raffreddamento. In genere  $C_s$  e  $C_n$  sono calcolati e diagrammati in funzione del tempo durante il transitorio di raffreddamento (vedi ad esempio fig. 2c-e). Due parametri quantitativi si ottengono, legati alla natura del difetto (profondità ed estensione): il valore massimo del contrasto,  $C_{max}$ , ed il Tempo di Osservazione  $t_{max}$ , ovvero il tempo che intercorre dallo spegnimento delle lampade all'istante in cui si misura il contrasto massimo. È possibile trarre subito delle indicazioni sulla correttezza della scelta della zona integra in base ad anomalie presenti nelle curve di  $C_s$  e  $C_n$ :

#### Anomalie nell'andamento del Contrasto Standard $C_s$ :

In genere si può assumere  $T_d(t_o) = T_i(t_o)$  se ogni prova è effettuata con il pannello avente una temperatura iniziale uniforme. In questo caso quindi il  $C_s$  durante il transitorio di raffreddamento partirà sempre dal valore unitario, per crescere raggiungendo un massimo e quindi decrescere mantenendosi comunque sempre maggiore di uno. Una cattiva scelta della zona integra di riferimento in questo caso produce delle anomalie in genere sul valore iniziale di  $C_s$ . Si presentano tre scenari:

1.  $T_d(t_m) > T_i(t_m)$ . Se la zona integra ha ricevuto la stessa quantità di calore di quella difettata tale situazione indica un pre-accumulo di calore nella zona difettata. In questo caso si osserva sempre un valore iniziale di  $C_s$  maggiore di 1. In genere l'evoluzione successiva di temperatura è tale per cui è sempre  $T_d(t_x) > T_i(t_x)$  per cui la curva  $C_s$  si mantiene sempre sopra il valore iniziale.
2.  $T_d(t_m) = T_i(t_m)$ . Se la zona integra scelta ha ricevuto la stessa quantità di calore di quella difettata allora la curva di  $C_s$  sarà corretta. Se la zona integra ha ricevuto una quantità maggiore di calore allora significa che la zona difettata ha cominciato a riscaldarsi a causa del difetto (preaccumulo di calore). In questo caso la curva di contrasto termico non è affidabile, anche se  $C_s(t_m) = 1$ . Infatti la zona integra si troverà in una zona calda e per questo si raffredderà in modo più lento, determinando un  $C_{smax}$  minore. In alcuni casi tale comportamento può portare la curva di  $C_s$  a scendere sotto il valore 1.
3.  $T_d(t_m) < T_i(t_m)$ . Questa condizioni si può verificare solamente quando la zona integra scelta è errata in quanto ha ricevuto una quantità di calore maggiore della zona difettata. In questo caso la curva del  $C_s$  ha valore iniziale minore di 1.

#### Anomalie nell'andamento del Contrasto Normalizzato $C_n$ :

Nel caso ideale il  $C_n$  parte sempre da zero per definizione crescendo quindi gradualmente sino ad un valore di massimo ( $T_{cmax}$ ), e successivamente decrescendo asintoticamente a zero senza mai

raggiungere valori negativi. Le principali anomalie in questo caso riguardano la possibilità che la curva  $C_n$  sviluppi dei tratti a valore negativo, e che la pendenza della curva  $C_n$  all'inizio sia eccessiva. E' utile al riguardo considerare l'espressione della derivata prima di  $C_n$  data da:

$$\frac{dC_n}{dt} = \left[ \frac{1}{T_d(t_m)} \frac{dT_d}{dt} \right] - \left[ \frac{1}{T_i(t_m)} \frac{dT_i}{dt} \right] \text{ con in genere } \frac{dT_i}{dt} < \frac{dT_d}{dt} < 0 \quad (3)$$

Se non c'è preaccumulo di calore inizialmente  $T_d(t_m)=T_i(t_m)$  e la pendenza di  $T_d$  e  $T_i$  è la stessa per cui la derivata data da (3) è nulla, cioè la curva di  $C_n$  ha tangente iniziale orizzontale per poi crescere gradualmente. Si possono in generale presentare le seguenti anomalie:

1.  $T_d(t_m) > T_i(t_m)$  e zona integra scelta tra le zone che hanno ricevuto la stessa quantità di calore. In questo caso il valore dell'inclinazione iniziale della curva  $dC_n(t_m)/dt$  ha in genere valori diversi da zero e positivi (il secondo termine dell'eq. (3) è maggiore in modulo rispetto al primo, ed il segno meno davanti fa diventare positivo il segno complessivo della derivata). Si può quindi interpretare una iniziale anomala pendenza iniziale positiva della curva  $C_n$  come un indice di pre-accumulo di calore.
2. La zona integra è scelta in modo tale che sia  $T_d(t_m)=T_i(t_m)$  ma c'è stato un preaccumulo di calore nella zona difettata. In questo caso la zona integra sarà posizionata in una zona molto calda che ha ricevuto più calore. Questo fa sì che la  $T_i$  si mantiene a valori elevati e diminuisca lentamente perché presa in una zona in generale più calda. Ciò genera ad un certo punto valori negativi di  $C_n$ .

Si può dimostrare infine che se non vi è una condizione di pre-accumulo di calore, e si ha  $T_d(t_m)=T_i(t_m)$  il  $t_{max}$  è diverso per  $C_s$  e  $C_n$  ed in particolare si ha  $t_{csmax} > t_{cnmax}$ . Infatti eguagliando a zero le espressioni delle derivate prime di (1) e (2) si ottiene:

$$\frac{dT_d(t_{csmax})}{dt} = \frac{dT_i(t_{csmax})}{dt} C_s(t_{csmax}) < \frac{dT_i(t_{csmax})}{dt} \text{ essendo } C_s(t_{ca max}) > 1 \ \& \ \frac{dT_i}{dt} < 0 \quad (4)$$

$$\frac{dT_d(t_{cnmax})}{dt} = \frac{dT_i(t_{cnmax})}{dt} \cdot \frac{T_d(t_m)}{T_i(t_m)} = \frac{dT_i(t_{cnmax})}{dt} \quad (5)$$

quindi dalle (4) e (5) si evince che la condizione di massimo nel  $C_s$  si raggiunge dopo un tempo  $t$  maggiore rispetto al  $C_n$ , ovvero  $t_{csmax} > t_{cnmax}$ .

### 3.1. Implementazione della tecnica PT e risultati sperimentali

In figura 2 si riassumono i risultati dell'analisi termografica a riflessione di tipo PT in cui due lampade alogene da 1500 W, posizionate come mostrato in figura 2a, rimangono accese per 40 secondi e quindi spente e schermate durante la fase di acquisizione del transitorio di raffreddamento. La fig. 2b mostra il termogramma acquisito dopo 20 secondi dallo spegnimento delle lampade. Ad eccezione del difetto più profondo D7, gli altri difetti sono tutti individuabili visivamente, presentando un contrasto termico rispetto alle zone sane circostanti. L'andamento delle isoterme della mappa in fig. 2b evidenzia anche la disuniformità della deposizione di calore, a seguito della quale la scelta della zona integra di riferimento può influenzare notevolmente la determinazione analitica della curva di contrasto termico e la conseguente valutazione dei parametri di  $C_{max}$  e  $t_{max}$  utilizzati per caratterizzare il difetto.

In figura 2b e 2c si mostra l'andamento della curva del  $C_n$  e  $C_s$  per il difetto D3. Sono riportate in particolare 4 curve, tre delle quali ricavate utilizzando come segnale della zona integra quello misurato sulle zone I1, I2 ed I3 la cui posizione è mostrata in fig. 1a. La curva indicata con SDI, impiega il metodo della Source Digital Image [13] per l'individuazione di una zona integra di riferimento che abbia ricevuto la stessa quantità di calore depositata in D3. L'individuazione di una tale zona si è eseguita analizzando in Matlab il *contour plot* delle isoterme del primo termogramma acquisito subito dopo lo spegnimento delle lampade. Va a tal proposito riferito che con una esposizione alle lampade accese di 40 sec. i difetti D3, D4, D6 e D7 non hanno dato luogo ad un pre-accumulo di calore. I difetti D1, D2 e D5 invece presentavano già un visibile contrasto termico sul primo termogramma

acquisito dopo lo spegnimento delle lampade. Dagli andamenti di fig. 2c,d si vede chiaramente che la scelta della zona integra ha un'influenza notevole soprattutto sul valore di contrasto massimo, mentre il tempo di osservazione sembra essere influenzato in misura minore. Le anomalie tipiche riscontrabili nelle curve di contrasto termico, descritte nella sezione precedente, sono eliminate quando la zona integra è scelta con il criterio dell'SDI, confermando l'utilità di tale approccio. Si osserva inoltre che il  $t_{max}$  è leggermente maggiore nel caso di  $C_s$  rispetto a quello misurato sulle curve di  $C_n$ , a conferma di quanto dimostrato con le relazioni (4) e (5).

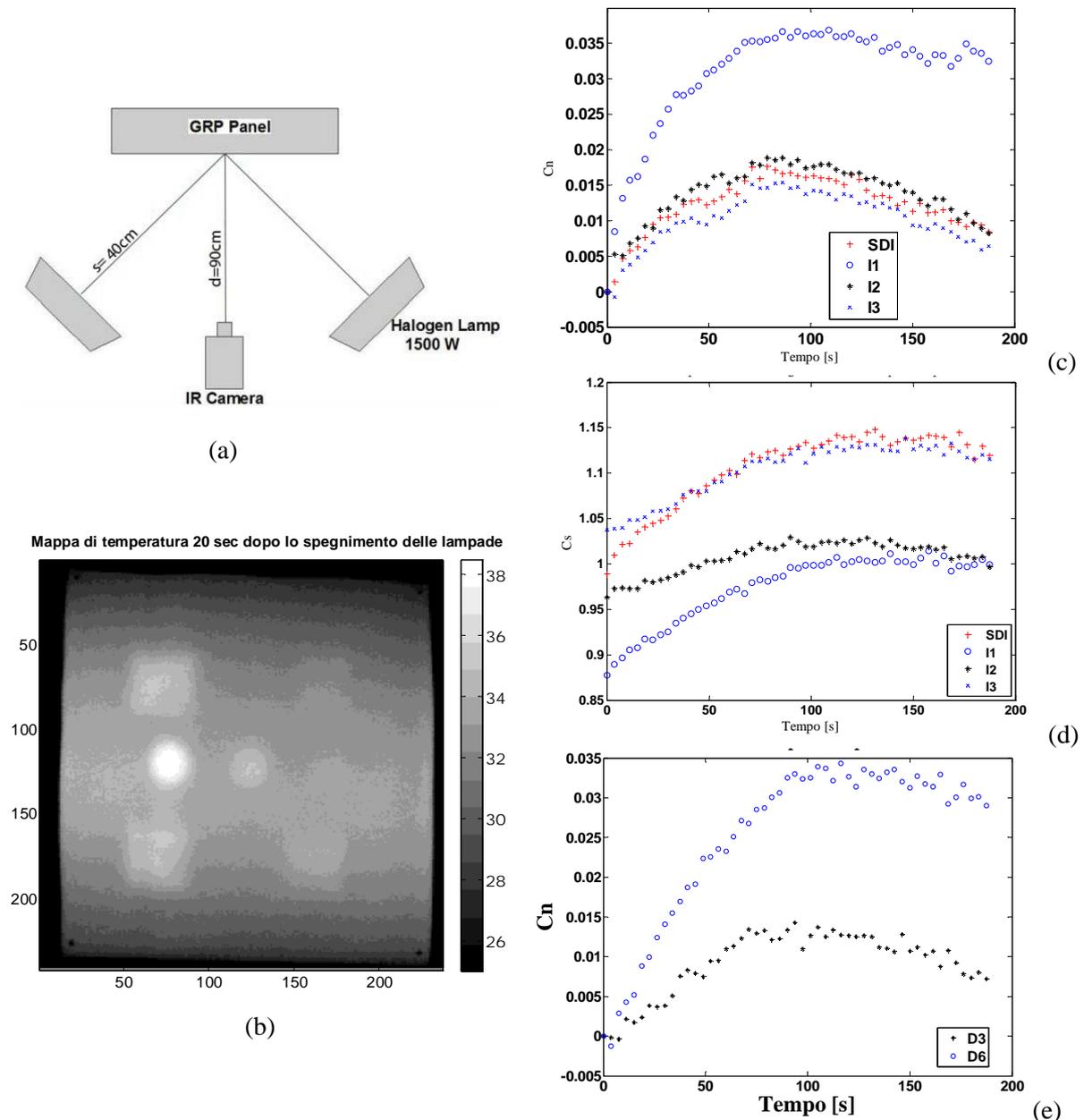


Figura 2: (a) set up termografico per prove di PT; (b) termogramma acquisito durante il transitorio di raffreddamento dopo 40 secondi di esposizione alle lampade accese; (c-e) curve di contrasto termico ricavate dopo 40 sec di esposizione alle lampade. (c,d) curve di  $C_n$  e  $C_s$  ricavate dal difetto D3 con diverse posizioni delle zone integre di riferimento; (e) confronto delle curve di  $C_n$  relative ai difetti D3 e D6 con zona integra scelta mediante applicazione del criterio SDI [13].

Infine in fig. 2e si riporta un confronto delle curve di  $C_n$  per i difetti D3 e D6, posizionati alla stessa profondità rispetto alla superficie. In questo caso entrambe le curve tracciate utilizzano il criterio della SDI per la scelta della zona integra. Si evince che il valore di  $C_{max}$  è fortemente influenzato dal tipo di simulazione del difetto, mentre  $t_{max}$  ancora una volta è simile. In particolare il difetto simulato dal foro

cieco determina un  $C_{max}$  sensibilmente più grande. Si ritiene che la simulazione di una delaminazione mediante foro cieco (molto utilizzata in letteratura) determina una resistenza termica alla conduzione di calore lungo lo spessore più elevata rispetto alla sacca di teflon. Si osserva a tal proposito che una delaminazione naturale, comunque difficile da riprodurre artificialmente, è tale per cui le due facce delaminate non sono completamente separate, ma rimangono a contatto, soprattutto nelle zone prossime all'apice della cricca. Probabilmente l'uso di fori ciechi determina una resistenza termica eccessiva rispetto al caso reale di delaminazione naturale e l'impiego della sacca di teflon è probabilmente più rappresentativo. Ulteriori prove sono state eseguite sia facendo variare l'intervallo di deposizione di calore (tra 10 e 80 sec), che modificando la potenza delle lampade. I principali risultati osservati sono riassunti di seguito:

- in generale per i difetti più superficiali D1, D2 e D5 si è sempre verificata la condizione di pre-accumulo di calore. I difetti sono troppo poco profondi per cui anche tempi brevi di esposizione (es. 10 sec) sono sufficienti per generare un contrasto termico rispetto alle zone limitrofe. Riducendo il tempo di esposizione a valori sotto i 10 sec ha determinato valori troppo bassi di contrasto termico (potenza delle lampade insufficiente) e valori di  $t_{max}$  molto bassi, per i quali una analisi quantitativa adeguata richiederebbe termocamere con maggiore risoluzione termica e più elevato frame rate;
- di contro al fine di ottenere valori di  $C_{max}$  sufficientemente elevati per l'individuazione univoca di un difetto oltre i 3 mm di profondità è necessario fornire calore per un intervallo di tempo consistente, in genere maggiore di 20 sec. Nel presente lavoro è stato possibile apprezzare con sufficiente risoluzione di contrasto termico difetti profondi sino a circa 6 mm dalla superficie;
- in generale, a pari profondità di difetto,  $C_{max}$  si è rivelato molto sensibile alla scelta della zona integra di riferimento, alla potenza termica della sorgente di calore, al tempo di esposizione alla sorgente di calore ed alla tipologia di difetto simulato, mentre  $t_{max}$  è risultato sensibile alla potenza della sorgente di calore e molto meno sensibile all'influenza degli altri parametri.

#### 4. Analisi mediante PULSE-MODULATED LOCK-IN THERMOGRAPHY (PMLT)

La tecnica PMLT, proposta di recente da uno degli autori [10], consiste in una variante della LT. Nella LT la temperatura è acquisita in contemporanea al riscaldamento (in regime stazionario) e non più nel transitorio di raffreddamento. Tradizionalmente l'analisi mediante LT implementa dei dispositivi di controllo dell'intensità della sorgente luminosa in modo da inviare un fronte termico con ampiezza modulata sinusoidalmente, con una ben precisa frequenza portante [4,7-9]. La modulazione del calore inviato secondo una pura onda sinusoidale semplifica la procedura di correlazione lock-in per la determinazione del ritardo di fase tra segnale della sorgente di calore e segnale misurato [7]. Le zone difettate si differenziano dalle zone integre perché determinano un diverso ritardo di fase. I difetti sono quindi individuati dal contrasto di fase: differenza di sfasamento tra segnale inviato e segnale ricevuto rispettivamente nelle zone difettate e integre. La capacità del fronte di calore di penetrare in profondità, e quindi della tecnica di rilevare un contrasto di fase per difetti più profondi, migliora al diminuire della frequenza portante. Per cui è necessario eseguire diverse prove, con valori di frequenza portante diversi, per ottimizzare l'analisi dell'integrità del materiale alle diverse profondità.

La PMLT propone di modulare il segnale di riscaldamento attraverso l'invio di treni di onde quadre. Ciò è facilmente implementabile per esempio schermando periodicamente la lampada in modo da interrompere l'afflusso di calore ad intervalli regolari. Nel presente lavoro il materiale in GRP analizzato è tale da avere una diffusività termica molto bassa per cui il treno di onde quadre deve avere una frequenza portante molto bassa per potersi diffondere a sufficiente profondità nella struttura. Ciò genera periodi dell'onda quadra in genere molto lunghi (nel presente lavoro ad esempio un periodo di 160 secondi è impiegato). Periodi così lunghi consentono di regolare manualmente il posizionamento del pannello schermante di fronte alla lampada utilizzata come sorgente di calore. In questo modo si è semplificato notevolmente il set-up sperimentale non essendo necessari dispositivi elettrici di controllo dell'intensità della sorgente di calore che continua ad utilizzare una comune lampada alogena.

Un secondo vantaggio della PMLT è legato al fatto che il treno di onde quadre generato oltre ad avere una frequenza portante principale legata al periodo dell'onda quadra, ha anche una serie finita di frequenze via via crescenti in cui è concentrata la potenza termica depositata. Ciò è facilmente messo in evidenza analizzando il contenuto in frequenza di una successione di onde quadre ad esempio

mediante la trasformata di Fourier [10]. Quindi con un'unica esperienza si inviano alla struttura una successione di onde di calore modulate a diverse frequenze. Una opportuna correlazione lock-in ai diversi valori di frequenza è quindi in grado di analizzare il materiale a diverse profondità, recuperando un vantaggio tipico della Pulsed-Phase Thermography (PPT).

In figura 3 è riportato uno schema del processo di correlazione lock-in cui è sottoposto il segnale termografico campionato durante l'invio del treno di impulsi termici sul pannello [10,14].

Lo schema in figura è implementato in ambiente Matlab. Le operazioni di filtraggio sono eseguite analizzando il contenuto in frequenza dei segnali mixati  $S \cdot F$  e  $S \cdot G$  mediante la funzione DFT (Discrete Fourier Transform). I segnali di riferimento in fase  $F$  ed in quadratura  $G$  sono onde sinusoidali la cui frequenza varia in base alla scelta dell'operatore. Ad ogni valore di frequenza assegnato l'algoritmo determina lo sfasamento tra il segnale di riferimento e l'armonica corrispondente del segnale misurato. In tal modo l'algoritmo, in modo automatico, restituisce le mappe di fase associate ai termogrammi campionati, iterativamente per diversi valori di frequenza.

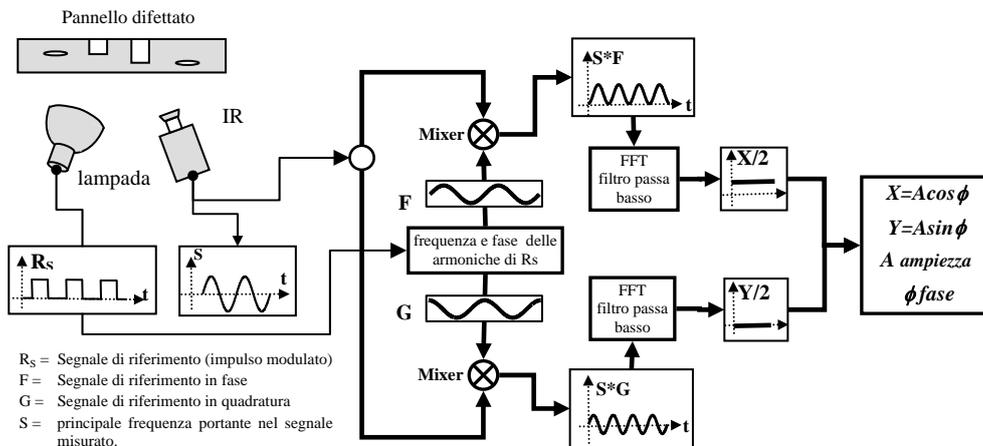


Figura 3: schema di processamento del segnale termografico mediante algoritmo di *lock-in*.

#### 4.1. Implementazione della tecnica PMLT e risultati sperimentali

Un set-up a riflessione con una sola lampada alogena da 1500 W posta quasi frontalmente al pannello è stato impiegato (vedi schema in fig. 4a). Come già detto la bassa diffusività termica del materiale in esame determina la necessità di modulare il treno di onde quadre dalla sorgente di calore con una frequenza portante molto bassa. Nello specifico in questo lavoro i risultati mostrati sono ottenuti modulando il treno di onde quadre con una frequenza di 0.00625 Hz (ovvero un periodo di circa 160 sec). La finestra temporale di campionamento contiene circa tre periodi mentre la frequenza di campionamento della termocamera è di circa 0.82 Hz, (ovvero l'intervallo temporale di campionamento di circa 1.22 sec). Ciò determina una frequenza fondamentale (intervallo di discretizzazione dell'asse delle frequenze ottenuto mediante la funzione DFT) di 0.0022 Hz ed una frequenza di Nyquist massima di 0.41 Hz. La modulazione del treno di onde quadre è stata controllata manualmente frapponendo tra la lampada ed il provino ogni 80 secondi un pannello schermante (costituito da due spessi pannelli di polistirolo distanziati da una intercapedine di aria).

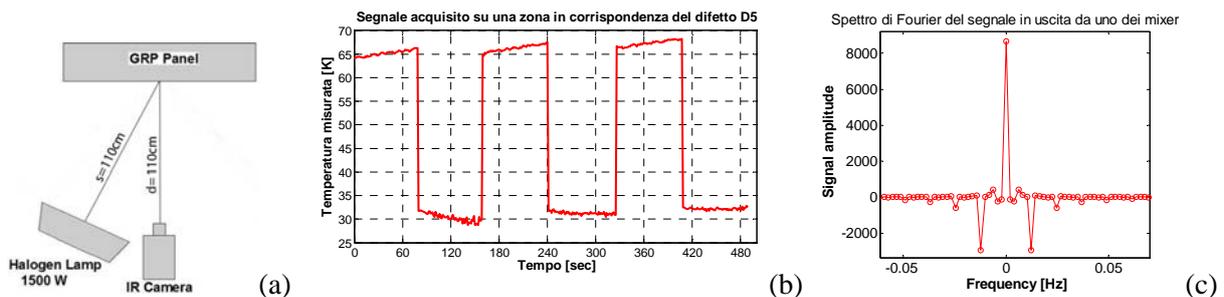


Figura 4: (a) setup per prove PMLT; (b) andamento della temperatura sul difetto D5 durante; (c) diagramma della parte reale dello spettro di potenza del segnale  $S \cdot F$  ottenuto con la funzione DFT.

In figura 4b è mostrato l'andamento della temperatura misurata durante l'intera finestra di acquisizione in un punto posto in corrispondenza del difetto D5. In figura 4c è mostrato l'andamento della parte reale della potenza spettrale del segnale  $S \cdot F$  calcolata mediante la funzione DFT. In particolare in questo caso il segnale  $F$  di riferimento ha la stessa frequenza della portante principale dell'onda quadra, vale a dire 0.00625 Hz.

I risultati dell'analisi PMLT ricavati in tale lavoro considerano solamente la zona del pannello attorno ai tre difetti D5, D6 e D7. In particolare la figura 5a mostra la zona del pannello analizzata con la posizione dei tre difetti indicata. In figura 5b è riportato il termogramma della zona analizzata dopo 87 secondi dall'inizio della prova, ovvero pochi secondi dopo il termine del primo semiperiodo di esposizione del pannello alla lampada accesa. Si nota in particolare che il difetto D5 ha già sviluppato un notevole contrasto termico rispetto alle zone circostanti integre mentre gli altri difetti non sono visibili. Inoltre si nota anche la disuniformità della distribuzione di temperatura dovuta alla non uniforme deposizione di calore sul pannello.

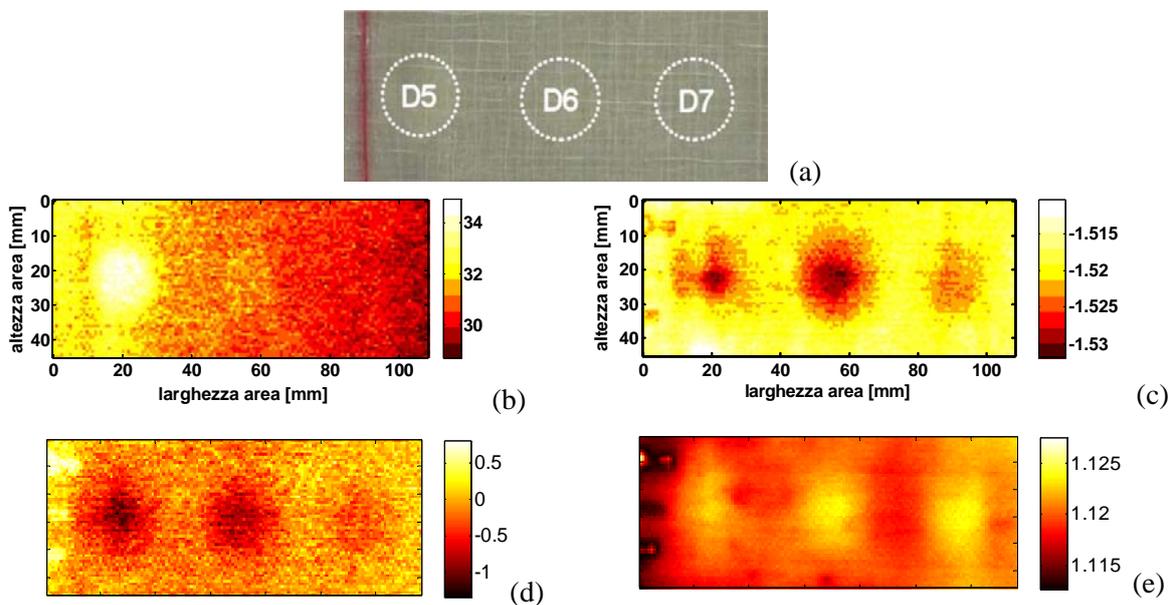


Figura 5: (a) area del pannello analizzata; (b) termogramma dopo 87 sec dall'inizio della prova; (c-e) mappe di fase con  $F$  avente frequenza: (c) 0.00625 Hz; (d) 0.0125 Hz; (e) 0.00039 Hz.

Le figure 5c-e riportano invece le mappe di fase ricavate mediante l'algoritmo di lock-in secondo lo schema di fig. 3. In particolare la mappa di fase in fig. 4c è ricavata con un segnale di riferimento avente frequenza pari alla portante principale, ovvero 0.00625 Hz. In fig. 5d la frequenza di correlazione è il doppio della frequenza portante, ovvero 0.0125 Hz, mentre in figura 5e la frequenza di correlazione dell'algoritmo di lock-in è 1/16 della frequenza portante, vale a dire 0.00039 Hz. Tutte e tre le mappe di fase evidenziano un contrasto di fase tra i difetti e le zone integre che rende ben visibili le zone difettate. Inoltre la mappa di fase nelle zone integre ha un valore più uniforme rispetto al termogramma di fig. 5b. Si nota soltanto il disturbo prodotto da alcuni spot riflettenti nella parte sinistra della zona analizzata. Tali spot si evidenziano in corrispondenza di piccole zone del pannello dove la finitura rugosa del peel-ply non si è prodotta. E' infine significativo sottolineare che il difetto D7 e il difetto D6 sono evidenziati da un miglior contrasto di fase quando la correlazione in frequenza avviene a frequenze basse (fig. 5c e 5e), a dimostrazione che il calore modulato a bassa frequenza penetra più a fondo nel materiale.

## 5. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro viene analizzata la possibilità di impiegare attrezzature a basso costo per l'implementazione di metodi termografici per il controllo non distruttivo di pannelli in GRP di grosso

spessore, realizzati con caratteristiche e tecniche di manifattura tipicamente impiegate nel settore nautico. In particolare le termocamere ad infrarossi utilizzate hanno una bassa risoluzione termica e bassa frequenza di acquisizione, e le lampade per la sollecitazione termica esterna sono comuni lampade alogene facilmente reperibili del costo complessivo di poche decine di euro.

Due tecniche sono state implementate in particolare: la prima di Pulsed Thermography (PT) e la seconda, denominata Pulse-Modulated Lock-In Thermography (PMLT). In entrambe i casi l'applicazione di intervalli di riscaldamento lunghi ha dimostrato la capacità dei metodi di rilevare in modo qualitativo la presenza delle delaminazioni artificiali presenti nel provino analizzato.

Per quanto riguarda la PT in particolare, l'impiego di tempi di esposizione alla sorgente di calore lunghi (oltre 10 sec) ha consentito di rilevare la presenza di delaminazioni sino a 6 mm di distanza dalla superficie. Le caratteristiche della curva di contrasto termico possono essere correlate alla profondità del difetto solo attraverso una opportuna scelta di una zona integra di riferimento.

Per quanto riguarda la tecnica PMLT si è dimostrata la possibilità di implementare tecniche di Lock-In Thermography per la determinazione di mappe di contrasto di fase attraverso semplici sistemi ottici controllati manualmente e con algoritmi di processamento dei dati di tipo non commerciale facilmente modificabili. L'applicazione della PMLT nel presente lavoro ha consentito di rilevare agevolmente difetti sino a 9 mm di profondità dalla superficie analizzata.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] P.J. Sheppard, H.J. Phillips and I. Cooper, "The practical use of NDE methods for the assessment of damaged marine composite structures", ICCM 17, Edinburgh (UK) 27-31, July 2009.
- [2] X. Maldague. *Theory and Practice of Infrared Technology for Non-Destructive Testing*. Wiley, New York, (2003).
- [3] C. Meola and G.M. Carlomagno, "Recent advances in the use of infrared thermography", Meas. Sci. Technol., **15**, 27 (2004)
- [4] Ibarra-Castanedo C., Genet M., Avdelidis N., Jen C.-H., Piau J.-M., Guilbert S., Maldague X. P. and Bendada A., "Comparative study of active thermography techniques for the nondestructive evaluation of honeycomb structures", Res Nondestr Eval, 20, 1–31, (2009).
- [5] X. Maldague and S. Marinetti, "Pulse Phase Infrared Thermography", J. Appl. Phys, **79** [5], 2694 (1996)-
- [6] C. Ibarra-Castanedo, *Quantitative subsurface defect evaluation by Pulsed Phase thermography: Depth Retrieval with the Phase*, PhD thesis. Faculté des sciences et de Génie Université Laval Québec, (2005)
- [7] G. Busse, D.Wu, and W. Karpen, "Thermal Wave imaging with phase sensitive modulated thermography", J. Appl. Phys. **71**, 3962 (1992)
- [8] D. Wu and G. Busse, "Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials", Rev. Gén. Therm., **37**, 693 (1998)
- [9] G. Giorleo, C. Meola, "Comparison between Pulsed and Modulated Thermography in Glass-Epoxy Laminates", *NDT&E International* **35**, 287 (2002)
- [10] G. Pitarresi, "Thermal NDE of thick GRP panels by means of a Pulse Modulated Lock-In Thermography technique", ICEM 14, Poitiers (France), July 4-9 2010, EPJ Web of Conferences 6, 38014 (2010), doi:10.1051/epjconf/20100638014.
- [11] S.M. Shepard, J. Hou, J.R. Lhota, J.M. Golden, "Automated processing of thermographic derivatives for quality assurance", *Optical Engineering* 46(5), 051008-1 (2007).
- [12] H.D. Benitez, H. Loaiza, E. Caicedo, C. Ibarra-Castanedo, A.H. Bendada, X. Maldague, "Defect characterization in infrared non-destructive testing with learning machines", *NDT&E International*, **42**, 630 (2009).
- [13] M. Susa, X. Maldague, I. Boras, "Improved method for absolute thermal contrast evaluation using Source Distribution Image (SDI)", *Infrared Physics & Technology* 53, 197–203 (2010).
- [14] G. Pitarresi, L. D'acquisto, A.M. Siddiolo, "Thermoelastic stress analysis by means of an infrared scanner and a two-dimensional fast Fourier transform-based lock-in technique" *J. Strain Analysis* **43**, 493 (2008).