

SESSIONE E MATERIALI COMPOSITI

ISPEZIONE NON-DISTRUTTIVA PER LA RILEVAZIONE E LA
CARATTERIZZAZIONE DI DIFETTI IN MATERIALI COMPOSITI:
METODOLOGIA “IBRIDA”.

U. Galietti^a, L. Spagnolo^b

^a *Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Gestionale, Politecnico di Bari,
Viale Japigia 182 - 70126 Bari, e-mail: galietti@poliba.it*

^b *Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Gestionale, Politecnico di Bari,
Viale Japigia 182 - 70126 Bari, e-mail: spagnolo@dimereg.poliba.it*

La termografia a raggi infrarossi, che permette di analizzare gli effetti indotti dalle anomalie sul comportamento termico del materiale, è uno dei metodi non distruttivi più accreditati per il controllo dei materiali compositi.

Alla procedura, presentata in questo lavoro, viene dato il nome di ibrida, in quanto si intende integrare le informazioni fornite da una indagine termografica, con riscaldamento continuo, con i risultati ottenibili da un'analisi numerica eseguita con un codice ad elementi finiti. Questa particolare tecnica termografica, utilizzata da sola per mezzo di una termocamera microbolometrica, permetterebbe di valutare semplicemente le dimensioni del difetto.

Lo scopo della procedura è di definire in maniera quantitativa, mediante un processo iterativo, la dimensione e la profondità dei difetti. L'analisi numerica permette, inoltre, di valutare l'influenza dei parametri del test, tanto da poter ottenere delle chiare indicazioni sulle caratteristiche minime della strumentazione termografica da utilizzare, prima ancora di effettuare le indagini sperimentali.

Si riportano i risultati delle analisi effettuate su di un laminato, in fibra di carbonio con inserti in teflon. Due possibili serie di parametri che caratterizzano le anomalie termiche sono messe a confronto.

1. INTRODUZIONE

L'utilizzo di materiali compositi é in continuo aumento in tutti quei settori, dove le elevate prestazioni strutturali combinate ad una notevole leggerezza sono le caratteristiche fondamentali. L'utilizzo di tali materiali ha richiesto la messa a punto di controlli che individuino la presenza di eventuali difetti, che possono degradare le caratteristiche dei componenti.

La termografia infrarossa é comunemente utilizzata in diverse applicazioni come controllo qualitativo non distruttivo. L'applicazione di tale tecnica per il controllo di strutture richiede non solo l'individuazione della presenza di difetti ma una determinazione precisa della loro posizione e dimensione, [1,2,3]. Di seguito si riporta un doveroso richiamo delle più efficaci tecniche utilizzate a tale scopo, in cui il tempo é il parametro più comune per la caratterizzazione dei difetti.

Nel caso della Pulsed Stimulated Infrared Thermography, (PT), l'analisi temporale del campo termico superficiale, del materiale riscaldato per mezzo di un impulso termico di Dirac, permette l'identificazione delle caratteristiche dei difetti. La soluzione analitica del modello unidimensionale porta alla valutazione della profondità del difetto per mezzo dell'Eq. 1, dove p è la profondità, a_z è la diffusività assiale, C_r il contrasto relativo percentuale e t_{Cr} il tempo per raggiungere tale contrasto.

$$p=(a_z * t_{Cr} * \ln(200/C_r))^{1/2} \quad (1)$$

Il vantaggio di tale relazione é l'assenza della resistenza termica del difetto, dato che spesso non é di grande importanza per gli utilizzatori di materiali compositi. Al fine di eliminare effetti parassiti dovuti a possibili non uniformità del flusso o alle proprietà delle ottiche impiegate, si procede ad una normalizzazione delle immagini, mediante una divisione di ognuna di esse con un'immagine di riferimento. La scelta di tale immagine é funzione della profondità del difetto; infatti, per difetti superficiale, la cui individuazione é fortemente influenzata dalla convezione libera, la scelta ottimale risulta quella dell'immagine a fine test, in cui il contrasto termico indotto dai difetti é ormai svanito. Nel caso si vogliano individuare difetti più profondi, un'immagine presa subito dopo l'impulso é consigliata, [4,5].

Risultato fondamentale é che l'andamento temporale dei termogrammi é fortemente influenzato dalle dimensioni del difetto; sebbene le immagini dei difetti persistono per un certo tempo dopo l'impulso di calore, quelle relative ai difetti più piccoli scompaiono prima. Inoltre, il contrasto massimo avviene in tempi sempre più lunghi all'aumentare della dimensione del difetto, a parità di profondità [6,7]. Da un punto di vista teorico, tempi di misura lunghi permetterebbero alta sensibilità per l'individuazione di variazioni di diffusività, in realtà il corrispondente segnale potrebbe non emergere dal rumore di fondo, causato da una non uniforme convezione o da irraggiamento esterno, richiedendo per tale ragione l'utilizzo di Focal Plane Array (FPA) ad altissima sensibilità, [8].

La Pulsed Phase Thermography (PPT) rappresenta una tecnica di post-processing delle termoeffetti acquisite con il metodo di riscaldamento per impulso di Dirac. Per ogni pixel si analizza il decadimento temporale del segnale, effettuando una trasformata di Fourier, al variare delle frequenze. La profondità delle strutture che hanno un'influenza sulle oscillazioni termiche é data dall' Eq. 2, dove f è la frequenza e a_z la diffusività assiale.

$$\mu=(\pi * f / a_z)^{-1/2} \quad (2)$$

Dalle componenti reale ed immaginaria della trasformata di Fourier é possibile ottenere la fase e la stima della profondit  del difetto, [9].

Il riscaldamento per mezzo di un impulso pu  provocare un elevato innalzamento della temperatura superficiale, l'idea di base della Lock-in Thermography é quella di distribuire tale energia mediante una modulazione. La modulazione di temperatura imposta si propaga all'interno dei materiali come onde termiche e, come il resto delle onde, si riflette sui contorni. La modulazione di temperatura imposta alla superficie viene, quindi, influenzata dalle onde termiche che sono riflesse all'interno della struttura. Monitorando il campo termico superficiale mentre si impone una modulazione termica sinusoidale, si pu  effettuare un'analisi di Fourier, per ogni singolo pixel. Un'immagine di fase ed una di ampiezza sono facilmente ottenibili per mezzo dell'Eq. 3, utilizzando quattro immagini sfasate di novanta gradi.

$$\varphi = \arctg \{(S_3 - S_1) / (S_4 - S_2)\} \quad A = \{(S_3 - S_1)^2 + (S_4 - S_2)^2\}^{1/2} \quad (3)$$

Risultato fondamentale é che l'immagine di fase risulta indipendente dalle variazioni locali di eccitazione termica, quali un non omogeneo riscaldamento della superficie, e dall'emissivit ; é quindi possibile analizzare la struttura senza aggiungere strati di vernice ad alta emissivit . Inoltre é in grado di fornire informazioni circa la struttura termica del campione fino ad una profondit  pari circa ad 1.8 volte la lunghezza della diffusione termica, data dall'Eq. 2, [10,11].

Le tecniche a cui si é fatto cenno presentano delle grosse potenzialit , ma anche un inconveniente che le accomuna. Per poter registrare le rapide variazioni termiche occorre far uso di termocamere caratterizzate da FPA ad altissima velocit  di acquisizione. L'obiettivo fondamentale del presente lavoro   quello di definire una procedura che permetta di effettuare una caratterizzazione dei difetti situati all'interno di materiali compositi attraverso indagini termografiche che non impongono l'impiego di procedure sofisticate ne di attrezzature particolarmente costose, [12].

La procedura ibrida, che intende integrare le prove sperimentali con l'analisi agli elementi finiti di un modello numerico, si basa sulla simulazione del comportamento del materiale durante un'indagine termografica. Il modello, validato sulla base di risultati sperimentali, ha permesso di ricavare le relazioni matematiche che permettono di correlare i dati provenienti dalle analisi termografiche per trasmissione con riscaldamento continuo alle caratteristiche dei difetti. Le indagini sperimentali di calibrazione del modello sono state eseguite su di un laminato a matrice epossidica rinforzato da strati di tessuto in fibra di carbonio, con inserti in teflon.

2. ANOMALIE TERMICHE

In questo lavoro si   voluto analizzare un difetto abbastanza comune, quale quello dell'inclusione eterogenea, che potendo causare il distacco fra le lamine rappresenta una delle principali cause del degrado delle propriet  meccaniche dei compositi. Questo tipo di difetto pu  essere individuato per mezzo dell'analisi termografica, in quanto presentando una resistenza termica al flusso di calore imposto dall'esterno, determina un innalzamento della temperatura superficiale dal lato investito dal flusso (visibile per mezzo della tecnica per

riflessione) e viceversa un abbassamento della temperatura rilevata sulla superficie opposta (rilevabile per mezzo della tecnica per trasmissione), [13].

L'equazione dello scambio di calore comunemente utilizzata per descrivere tale condizione è indicata nell'Eq. 4, dove k è la conducibilità termica, r la densità e C la capacità termica.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = rC \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

Nel modello utilizzato si è fatta l'ipotesi di piano infinito di spessore L e di materiale isotropo, per cui l'Eq. 4 si semplifica nell'Eq. 5, in cui a rappresenta la diffusività del materiale.

$$a \nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

Le condizioni al contorno (Eq. 6 e Eq. 7) non necessitano chiarimenti.

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} + h_0 T = 0 \quad \text{per } z = 0 \quad (6)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} + h_l T = j = \text{cost} \quad \text{per } z = L \quad (7)$$

Per quanto riguarda il bordo tra materiale sano e difetto si è imposto semplicemente la continuità del flusso termico e della temperatura, come espresso dall'Eq. 8, in cui i pedici s e d si riferiscono rispettivamente al materiale sano e al difetto, [14].

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial n} = k_d \frac{\partial T_d}{\partial n} \quad ; \quad T_s = T_d \quad (8)$$

Si fa notare che nel caso in cui la diffusività abbia componenti nel piano differenti, l'immagine termica risulterebbe distorta. Questo è uno dei motivi che ha portato alla scelta della forma quadrangolare del difetto, tanto più che questa forma permette di valutare l'effetto di arrotondamento della propagazione del calore, [15].

Un modo semplice di analizzare tale fenomeno è quello di tracciare sperimentalmente dei diagrammi della temperatura superficiale (*profili termici*) lungo una linea che intersechi il difetto. Un esempio dei profili termici teorici che potrebbero essere ottenuti con le due tecniche termografiche, per riflessione e per trasmissione, è riportato in Fig. 1.a e Fig. 1.b.

L'andamento di tali profili dipende, quindi, dalle caratteristiche termo-fisiche del materiale, dai parametri del difetto (quali resistenza termica, dimensioni e profondità) e dalla procedura seguita, nello specifico dal flusso termico imposto e dalle condizioni al contorno.

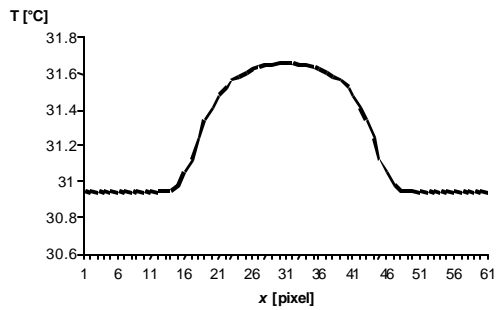


Fig. 1.a Analisi per riflessione

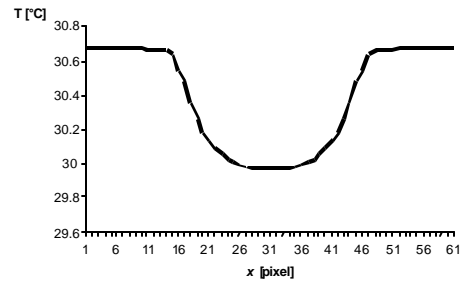


Fig. 1.b Analisi per trasmissione

3. LA PROCEDURA IBRIDA

La procedura proposta intende sfruttare in modo completo le informazioni contenute nei termogrammi, ottenuti per mezzo di una termocamera microbolometrica in seguito ad un riscaldamento continuo. Nell'ipotesi di non poter seguire il fenomeno nel tempo, tali termogrammi, presi con un certo ritardo rispetto all'inizio del riscaldamento, potrebbero portare ad una semplice individuazione della presenza di difetti, ma grazie all'interazione della simulazione numerica si intende poter determinare le caratteristiche dei difetti.

L'analisi dei profili termici teorici porta a ritenere che, fissate le caratteristiche del materiale e la procedura di analisi, la forma dei profili termici dipende esclusivamente dai *parametri del difetto* cioè dalla sua dimensione e profondità, [16].

La definizione dei parametri che descrivono la forma dei profili termici non è univoca. Nel seguente lavoro si sono utilizzati, come parametri del profilo, il *contrasto termico* (C) e la *dimensione apparente* definita in due modi diversi (D_1 e D_2).

Il contrasto termico è espresso mediante l'Eq. 9, dove: T_d è la temperatura nella zona del difetto e T_s è la temperatura nella zona sana (misurata ad una distanza tale da ritenere trascurabile l'influenza del difetto).

$$C(t) = |T_d(t) - T_s(t)| \quad (9)$$

Nell'Eq. 9 si è voluto evidenziare la dipendenza di questo parametro dal tempo, sebbene nel seguente lavoro il tempo è un parametro fissato, come già indicato. A parità di caratteristiche fisiche del difetto, il contrasto termico dipende soprattutto dalla profondità cui esso è situato nel materiale.

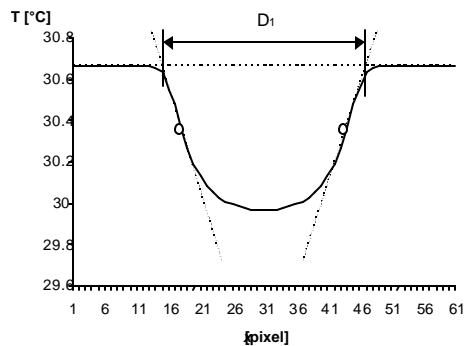


Fig. 2.a Dimensione apparente D_1

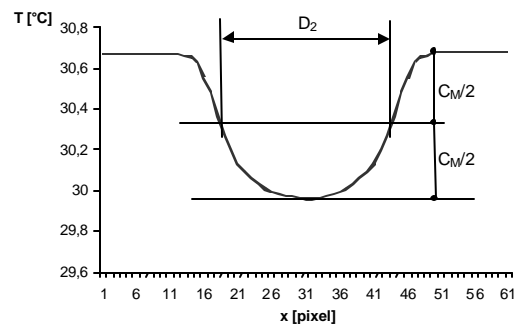


Fig. 2.b Dimensione apparente D_2

La *dimensione apparente* (D_1) è definita come la distanza fra i punti d'intersezione delle rette tangenti al profilo nei due punti di massimo gradiente termico (in valore assoluto) e le rette che mediano le temperature nella zona sana del materiale, come mostrato in Fig. 2.a. La *dimensione apparente* (D_2) è definita come la larghezza a metà del contrasto massimo (FWHM), come mostrato in Fig. 2.b. Tale parametro tiene conto delle reali dimensioni del difetto e non dipende dalla sua profondità, [17].

Fissati i parametri del profilo, l'analisi sperimentale su di un campione con difetti noti ha permesso la messa a punto del modello e quindi la determinazione, mediante un'operazione di regressione multipla, dei coefficienti delle equazioni che correlano i parametri del profilo con i parametri del difetto. Tali equazioni sono alla base della procedura in quanto è proprio tramite la loro applicazione ai profili sperimentali dei difetti incogniti che è possibile determinare i parametri dei difetti.

4. ANALISI SPERIMENTALE

Il provino utilizzato è un laminato in fibra di carbonio a matrice epossidica. Al fine di simulare il difetto dell'inclusione eterogenea, si è imposto uno spessore variabile a gradini ed ad ogni passo, di circa 6 [cm], sono stati collocati al suo interno tre sottili inserti in teflon di forma quadrata, aventi lato rispettivamente di 0.25, 0.5 e 0.75 [in], come riportato nella Fig. 3.

Le rilevazioni termografiche sono state effettuate per mezzo della termocamera 610-TVS prodotta dalla AVIO caratterizzata da un sensore microbolometrico non raffreddato che garantisce una risoluzione di 0.2[°C].

La procedura di caratterizzazione dei difetti proposta si basa sull'interpretazione dei parametri che descrivono i profili di temperature, nelle zone "anomale" dei termogrammi. Gli andamenti dei profili reali si discostano da quelli teorici; rispetto a questi ultimi, appaiono alquanto irregolari, essendo disturbati da un rumore più o meno accentuato e presentando asimmetrie e curvature spesso impreviste.

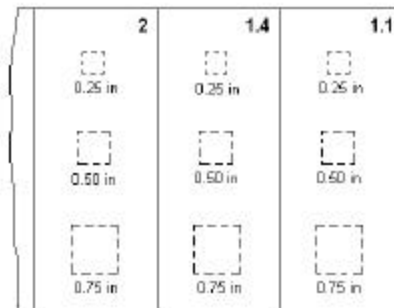


Fig. 3 Provino a tre spessori con tre inserti

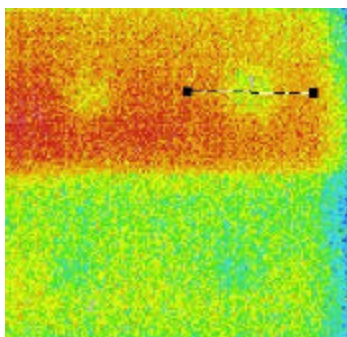


Fig. 4.a Termogramma

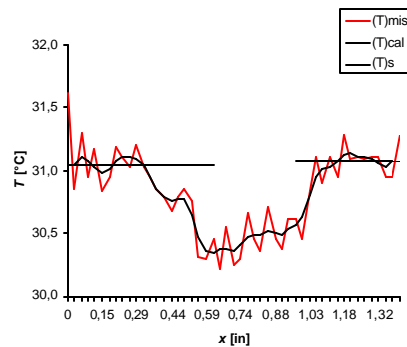


Fig. 4.b Profilo termico

La scelta di una termocamera non particolarmente sensibile comporta l'accentuazione di inevitabili fenomeni di rumore che deteriorano la qualità delle immagini.

Al fine di ridurre gli effetti del rumore, si è eseguita una prima operazione di media in una regione molto ristretta nell'intorno dei profili termici scelti nell'immagine ed un successivo smoothing dei dati relativi, come indicato dalle Fig.4.a e Fig.4.b.

5. ANALISI NUMERICA

La simulazione, effettuata con un programma di calcolo agli elementi finiti (ANSYS), ha avuto lo scopo di riprodurre le rilevazioni termografiche eseguite, aderendo il più possibile alla realtà, sia nella modellazione del provino sia nella visualizzazione dei risultati, [18].

Un particolare interessante della schematizzazione geometrica e funzionale del difetto è costituito dallo *strato equivalente*, interposto fra gli strati del materiale integro, come riportato in Fig. 5. In questo strato si distinguono la *zona del difetto*, i cui parametri termofisici equivalenti sono determinati in modo che essa rispetti i valori ipotizzati di resistenza e d'inerzia termica del difetto, e la *zona di aderenza* fra gli strati del materiale sano, i cui parametri termofisici sono determinati in modo che soddisfino le condizioni al contorno imposte.

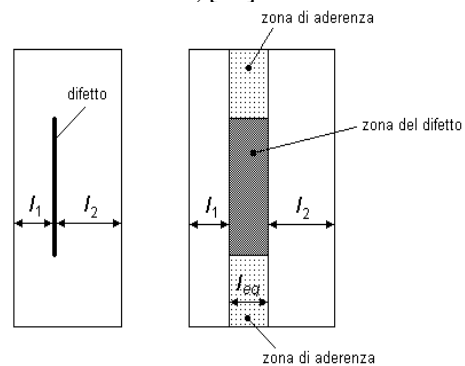


Fig. 5 Schematizzazione del difetto

Per la discretizzazione del modello sono stati utilizzati l'elemento solido termico ad otto nodi SOLID70, che realizza lo scambio conduttivo all'interno del sistema, e l'elemento di superficie SURF22, che genera gli scambi convettivi e radiativi del sistema con l'ambiente esterno. Il calcolo della resistenza specifica dei difetti è stato eseguito confrontando il valore sperimentale del contrasto termico con i valori dello stesso parametro, calcolati al variare della resistenza. La simulazione ha inoltre permesso di valutare l'effetto della resistenza termica dei difetti sulla loro *visibilità* nel termogramma, rappresentata dal contrasto termico adimensionalizzato.

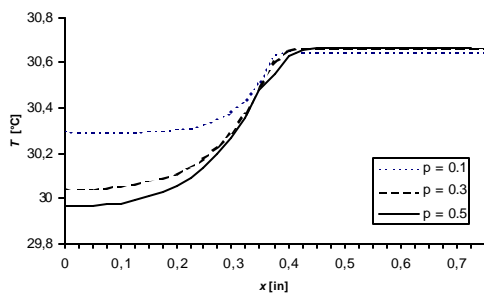


Fig.6.a Profili a fissata d del difetto.

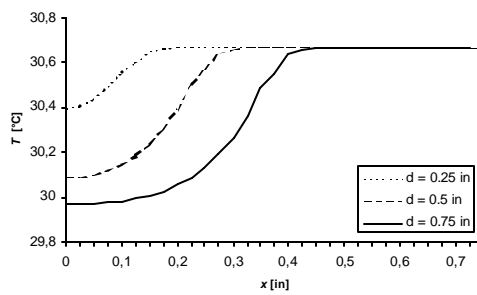


Fig.6.b Profili a fissata d del difetto

Le simulazioni (calibrate sul materiale, sul tipo di difetto e sulle condizioni operative) permettono di determinare rapidamente i profili di temperature nelle zone termicamente

alterate, al variare dei parametri geometrici del difetto, profondità relativa (p) e dimensione (d), come riportato rispettivamente in Fig.6.a e Fig.6.b, dove p in accordo alla Fig.5 è definita secondo l'Eq.10.

$$p = l_1 / (l_1 + l_2) \quad (10)$$

I valori del contrasto termico, ottenuti dalle simulazioni eseguite variando i parametri del difetto, costituiscono un'utile informazione al fine di valutare l'idoneità della strumentazione a disposizione nell'individuare i difetti simulati, prima ancora di effettuare alcuna rilevazione sperimentale.

Attraverso delle regressioni multiple, è stato possibile stabilire la correlazione esistente tra i parametri di profilo scelti ed i parametri che caratterizzano il difetto. Per entrambe le scelte effettuate, contrasto termico (C) e dimensione apparente (definita come D_1 oppure D_2), si sono ottenute delle relazioni del tipo riportate in Eq.11 ed Eq.12.

$$\begin{cases} C = (N_2 * d^2 + M_2 * d + L_2) * p^2 + (N_1 * d^2 + M_1 * d + L_1) * p + (N_0 * d^2 + M_0 * d + L_0) & (11) \\ D = (R_1 * p + Q_1) * d + (R_0 * p + Q_0) * d & (12) \end{cases}$$

Imponendo che i parametri di profilo calcolati siano coincidenti con quelli misurabili per mezzo delle rilevazioni termografiche è possibile quindi valutare la dimensione e la profondità dei difetti.

6. ANALISI DEI RISULTATI

E' evidente che il problema del dimensionamento dei difetti potrebbe essere risolto facilmente se la temperatura superficiale dipendesse in maniera semplice dalle caratteristiche del difetto. Mentre nel caso del problema diretto dello scambio di calore piccole variazioni delle variabili di ingresso, parametri del difetto, provocano deboli variazioni della temperatura superficiale, nel problema inverso piccole variazioni del livello del rumore provocano notevoli variazioni dei parametri del difetto. Inoltre, vale la pena di rimarcare che differenti combinazioni dei parametri del difetto (dimensione, profondità e conducibilità) possono provocare lo stesso segnale di temperatura, [14].

Per entrambe le scelte di coppie di parametri di profilo (PP) adottate, la procedura è stata verificata applicandola alla determinazione di difetti noti. In particolare si sono considerati quattro dei difetti riportati in Fig.3, il più grande (G) ed il medio (M), a due diverse profondità (profondo P e superficiale S). I risultati ottenuti sono riportati in Tab.1 ed in Tab.2.

Difetto	Valore reale	Calcolo con (C D ₁)	Calcolo con (C D ₂)
G.P.	0.50	0.48	0.47
G.S.	0.21	0.45	0.38
M.P.	0.50	0.50	0.42
M.S.	0.21	0.20	0.22

Tab.1 Valutazione della dimensione con le due possibili scelte dei PP.

Difetto	Valore reale	Calcolo con (C D ₁)	Calcolo con (C D ₂)
G.P.	0.50	0.48	0.47
G.S.	0.21	0.45	0.38
M.P.	0.50	0.50	0.42
M.S.	0.21	0.20	0.22

Tab.2 Valutazione della profondità con le due possibili scelte dei PP.

Le forti oscillazioni della dimensione apparente, in particolare nel caso D₁ dove il calcolo del massimo gradiente è più sensibile al rumore, hanno comportato grossi errori nella valutazione della dimensione del difetto. Il calcolo della profondità è più accurato, poiché su questo parametro influisce soprattutto il contrasto termico, il cui valore è generalmente più stabile. La scelta di definire la dimensione apparente per mezzo dei punti di massimo gradiente è risultata particolarmente sensibile al rumore insito nel sistema di acquisizione, mentre la tecnica del FWHM risulta più promettente.

I risultati non completamente soddisfacenti sono imputabili ad una strumentazione caratterizzata da una bassa risoluzione ed ad una insoddisfacente realizzazione di un potente flusso termico omogeneo. Infatti piccoli errori di posizionamento della lampada possono generare forti inomogeneità del flusso termico. Altra fonte di errore è costituita dall'ipotesi di base per cui i difetti sono caratterizzati dalla stessa conducibilità o equivalentemente dalla stessa resistenza termica.

7. CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha portato alla definizione di una procedura ibrida, numerico-sperimentale, diretta all'interpretazione dei risultati delle indagini termografiche, ed alla valutazione dell'efficacia di queste indagini nella rilevazione e nella caratterizzazione dei difetti situati all'interno dei materiali.

È importante osservare che la procedura proposta è stata messa a punto per la termografia per trasmissione in transitorio, senza valutare l'evoluzione temporale del campo delle temperature superficiali. L'aver determinato la profondità del difetto, con una tecnica che è comunemente utilizzata per la ricerca più che per la caratterizzazione dei difetti, ha dimostrato che l'integrazione nell'indagine termografica di una procedura numerico-sperimentale può notevolmente incrementarne le potenzialità.

I risultati ottenuti dimostrano che, la procedura ibrida proposta permette una valutazione quantitativa delle caratteristiche dei difetti, pur eseguendo l'indagine termografica con una strumentazione non particolarmente sensibile, consentendo un sensibile risparmio di tempo e di risorse materiali.

BIBLIOGRAFIA

- [1] D. Bates, G. Smith, D. Lu, J. Hewitt, "Rapid thermal non-destructive testing of aircraft components", *Composites Part B: eng.*, Elsevier Science, Vol 31, 2000 (rivista).

- [2] Y.W. Qin, N.K. Bao, "Infrared Thermography and its Application in the NDT of Sandwich Structures", *Optics and Lasers in Engineering*, Elsevier Science, Vol 25, 1996 (rivista).
- [3] G. Cesini, M. Paroncini, R. Ricci, "Thermal distribution in circular slabs: a thermographic method", *QIRT 92-Eurotherm Series 27* EETI ed., Paris 1992, pp.272-277.
- [4] J.-C. Krapez, D. Balageas, "Early detection of thermal contrast in pulsed stimulated thermography", *QIRT 94- Eurotherm Series 42* EETI ed., Paris 1995, pp. 260-266.
- [5] J.-C. Krapez, D. Boscher, P. Delpéch, A. Deom, G. Gardette, D. Balageas, "Time-resolved pulsed stimulated infrared thermography applied to carbon-epoxy non destructive evaluation", *QIRT 92-Eurotherm Series 27* EETI ed., 1992, pp.195-200.
- [6] D. P. Almond, S. K. Lau, "A quantitative analysis of pulsed video thermography", *QIRT 92-Eurotherm Series 27* EETI ed., Paris 1992, pp.207-211.
- [7] D. P. Almond, R. Hamzah, P. Delpéch, 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.
- [8] V. Vavilov, "Transient thermal NDT: conception in formulae", *QIRT 92-Eurotherm Series 27* EETI ed., Paris 1992, pp.229-234.
- [9] X. Maldague, J.-P. Couturier, S. Marinetti, A. Salerno, D. Wu, "Advances in pulsed phase thermography", *QIRT 96-Eurotherm Series 50* ETS ed., Pisa 1997, pp.377-382.
- [10] D. Wu, J. Rantala, W. Karpen, G. Zenzinger, B. Scönbach, W. Rippel, R. Steegmüller, L. Diener, G. Busse, "Application of Lock-in Thermography methods", *Rev. of Progress in Q.N.D.E.*, Vol. 15, D. O. Thompson & D. E. Chimenti ed., Plenum Press, New York, 1996, pp. 511-518 (rivista).
- [11] D. Wu, G. Busse, "Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials", *Rev. Gén. Therm.*, Elsevier, Paris, 1998, Vol 37, pp. 693-703 (rivista).
- [12] E. Grinzato, S. Marinetti, P. Amore, P.G. Bison, P. Angelcore, R. Capriotti, E. dati, G. trivisonno, "Thermal NDE of Impact Damage in CFRP, State of the Art", *Proc. of the 5th AITA, Int. Workshop on Advanced Infrared Tech. and Appl.*, Venice, 1999.
- [13] D.W. Wilson, J.A. Charles, "Thermographic detection of adhesive-bond and interlaminar flaws in composites", *Experimental Mechanics*, July 1981(rivista).
- [14] V. Vavilov, "Thermal nondestructive testing: short history and state-of-art", *QIRT 92-Eurotherm Series 27* EETI ed., Paris 1992, pp.179-194.
- [15] Y. A. Plotnikov, W. P. Winfree, "Thermographic imaging of defects in anisotropic composites", *Rev. of Progress in Q.N.D.E.*, vol. 17, D. O. Thompson & D. E. Chimenti ed., Plenum Press, New York, 1998, pp. 457-464 (rivista).
- [16] Muscio, S. Marinetti, P.G. Bison, A. Ciliberto, G. Cavaccini, E. Grinzato, "Modelling of Thermal Non-Destructive Evaluation Techniques for Composite Materials and the European Aerospace Industry", *Proc. of the 5th AITA, Int. Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications*, Venice, Italy, September 1999.
- [17] M. B. Saintey, D. P. Almond, "Mathematical modelling of transient thermography and defect sizing", *Rev. of Progress in Q.N.D.E.*, vol. 15, D. O. Thompson & D. E. Chimenti ed., Plenum Press, New York, 1996, pp. 503-510 (rivista).
- [18] J. Zhao, T. Chu, S.S. Russel, "Effect of thermal Diffusivity on the Detectability of TNDE", *Proc. SEM IX Int. Congr. on Experimental Mechanics*, Orlando, 2000.