

# Un confronto tra la termografia attiva e la shearografia digitale per l'individuazione del danno nelle strutture aerospaziali in composito

G. De Angelis, E. Dati

Gruppo CND, Reparto Chimico, Centro Sperimentale di Volo,  
Aeronautica Militare Italiana, Aeroporto De Bernardi, Pomezia (Roma), Italia

*Termografia e Shearografia rappresentano in ambito aeronautico due metodi emergenti dalle elevate potenzialità soprattutto su strutture in materiale composito non facilmente ispezionabili con i metodi di controllo non distruttivo classici (RT, PT, MT, UT). In questo contesto, l'articolo di seguito pubblicato è un approfondimento di una interessante memoria presentata alla giornata aerospaziale del 10 luglio in AgustaWestland a Vergiate.*

*Per poter permettere di affrontare il testo nel dettaglio e apprezzarne le importanti conclusioni, abbiamo ritenuto utile fornire un piccolo glossario di supporto ai non addetti ai lavori:*

**Termografia:** è una tecnica di telerilevamento, effettuata tramite l'acquisizione di immagini (informazione) nel campo dell'infrarosso (tutti gli oggetti ad una temperatura superiore allo zero assoluto emettono radiazioni nel campo dell'infrarosso) attraverso l'utilizzo di una termocamera, strumento in grado di rilevare le temperature del corpo analizzato attraverso la misurazione dell'intensità di radiazione infrarossa emessa dallo stesso. La termografia permette di visualizzare valori assoluti e variazioni di temperatura degli oggetti, indipendentemente dalla loro illuminazione nel campo del visibile e lo studio della distribuzione delle temperature serve a stabilire stati non conformi del soggetto analizzato.

**Shearografia:** è un metodo ottico che rende possibile la rivelazione di eventuali deformazioni della superficie dell'oggetto in esame in relazione al carico della struttura che può essere indotto a mezzo di calore, pressione o vibrazione. Gli eventuali difetti vengono evidenziati per differente deformazione rispetto alle zone circostanti. Viene impiegata una sorgente di luce monocromatica o di onde sonore che producono un fronte sferico sulla superficie da ispezionare. Il risultato per una superficie piana, in assenza di deformazioni o difetti, è un interferogramma che mostra una serie di anelli concentrici bianchi e neri: gli anelli neri rappresentano la differenza in fase di  $\frac{1}{2}$  lunghezza d'onda tra i due fronti interferenti, e le zone chiare la differenza in fase di un numero integrale della lunghezza d'onda.

## Sommario

Questo lavoro è volto ad evidenziare le potenzialità della Termografia Infrarossa e della Shearografia digitale (DISH) per i test Non Distruttivi (NDT) sui materiali compositi. Un confronto dei vantaggi e delle limitazioni delle due tecniche per la Valutazione Non Distruttiva (NDE) delle strutture in composito aerospaziali verrà presentato.

**Parole chiave:** NDE, Shearografia, delaminazione, danno a bassa velocità.

## Introduzione

La durabilità dei laminati in composito può essere ridotta dall'insorgenza di danni dovuti a delaminazioni, che possono evolvere verso inconvenienti quando le strutture sono sottoposte a fatica. Tra le metodologie NDT emergenti, la Shearografia e la Termografia sono risultate valide per varie applicazioni, dal settore aeronautico a quello automobilistico e medicale. Questo studio è stato finalizzato a valutare la possibilità di combinare la Termografia Lock-in (OLT) e la termografia a stimolazione ultrasonora (Thermosonics), con la DISH per l'assessment di difetti artificiali in strutture in composito, con sequenza (0,  $\pm 45$ , 90)s e spessore finale pari a 4 mm, come mostrato in figura 1 [1, 2].

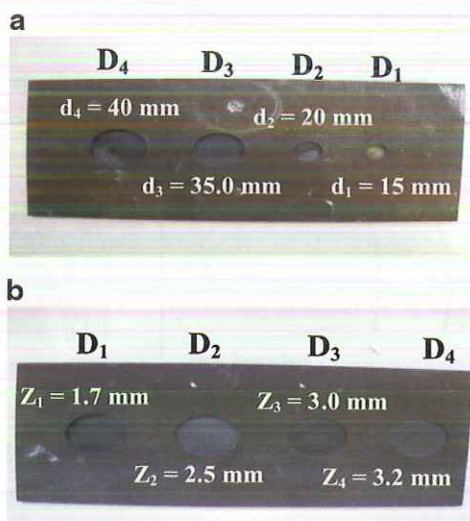


Figura 1

(a) laminato CFRP<sub>1</sub> con Difetti (Dn) con diametro variabile, posti alla stessa profondità (z);

(b) laminato CFRP<sub>2</sub> con Difetti aventi stesso diametro, ma, posti a profondità (z) variabili.

## Metodi

### Termografia Attiva

L'OLT è stata eseguita operando in riflessione registrando il pattern termico che, processato con opportuni algoritmi, ha consentito di derivare i dati di ampiezza e fase

per ottenere informazioni suppletive sui difetti identificati. Gli stessi campioni sono stati investigati con Thermo-sonics, il cui sistema, figura 3 (a), comprende una sorgente stimolatrice, welding horn, operativa a 35 KHz, un microfono utilizzato per monitorare la risposta strutturale dei campioni ed una camera microbolometrica per rilevare il locale incremento della temperatura dovuto alla frizione delle facce di un difetto, quando sottoposto ad uno stress ciclico indotto esternamente [2].

### Shearografia Digitale

Il sistema shearografico è comprensivo di una sorgente laser, utilizzata per illuminare l'oggetto, ed una camera shearografica per la registrazione ed il processamento delle immagini acquisite. La tecnica si basa sulla riflessione dei raggi laser incidenti, figura 2, da due punti adiacenti posti sul pezzo campione, che vengono alternativamente suddivisi in due ulteriori raggi in un dispositivo denominato "Shearing Device" dando luogo alla successiva formazione di frange interferometriche, shearogrammi, visualizzati sul CCD della camera shearografica. L'imposizione sul pezzo campione di forzanti esterne di varia natura (termica, meccanica, etc.) determina in corrispondenza dell'area sovrastante al difetto l'insorgenza di deformazioni che conseguentemente alterano il pattern interferometrico. Quindi, la Shearografia implica la mutua differenza tra pattern di onde luminose interferenti, campionate in successione prima e dopo aver sollecitato il campione, come si evince sia dalla figura 2 che dalla figura 3 (b).

esterna l'oggetto viene localmente deformato in corrispondenza del difetto determinando il cambiamento del valore dell'intensità ( $I^*$ ) data dalla seguente equazione:

$$I = I_0 * [1 + \mu \cos(\varphi + \Delta)] \quad (2)$$

La differenza tra le espressioni sopra riportate è così esprimibile:

$$I_d = 2 * I_0 \left[ \mu \sin\left(\varphi + \frac{\Delta}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta}{2}\right) \right] \quad (3)$$

Dove  $I_d$  rappresenta la differenza di intensità calcolata pixel per pixel,  $I_0$  è una costante,  $\mu$  è la modulazione del termine di interferenza,  $\varphi$  è la fase, mentre ( $\Delta$ ) rappresenta il cambio di fase determinato dalla variazione del cammino ottico tra due coppie di punti adiacenti  $P_1(P_2)$  e  $P_1^*(P_2^*)$ , dopo la deformazione, con i termini ( $\delta u$ ,  $\delta v$ ,  $\delta w$ ) relativi alle locali variazioni di posizione, come evidenziato in figura 2 [3].

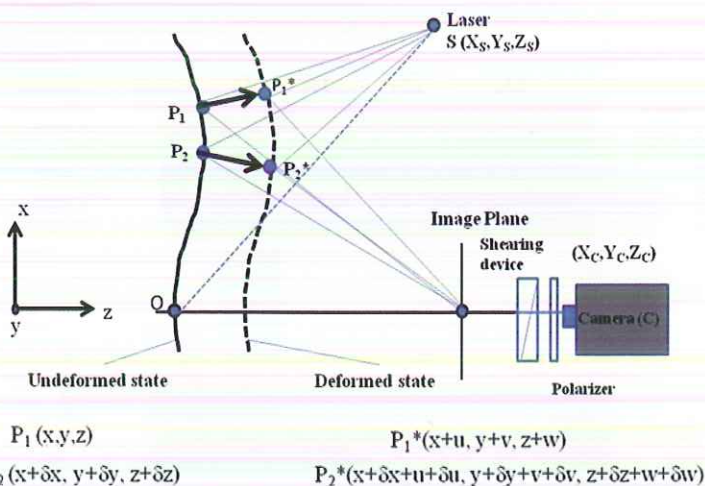


Figura 2 - Sistema sperimentale Shearografico e visualizzazione della differenza di cammino ottico dei raggi laser incidenti in due punti adiacenti della superficie del pezzo investigato.

L'immagine shearografica può essere matematicamente descritta dalla seguente espressione:

$$I = I_0 * [1 + \mu \cos \varphi] \quad (1)$$

Dove ( $I$ ) rappresenta l'intensità dovuta all'interferenza dei fronti d'onda luminosi,  $I_0$  è una costante,  $\mu$  è il termine relativo alla modulazione dell'interferenza, mentre  $\varphi$  è la fase. A seguito dell'applicazione di una stimolazione

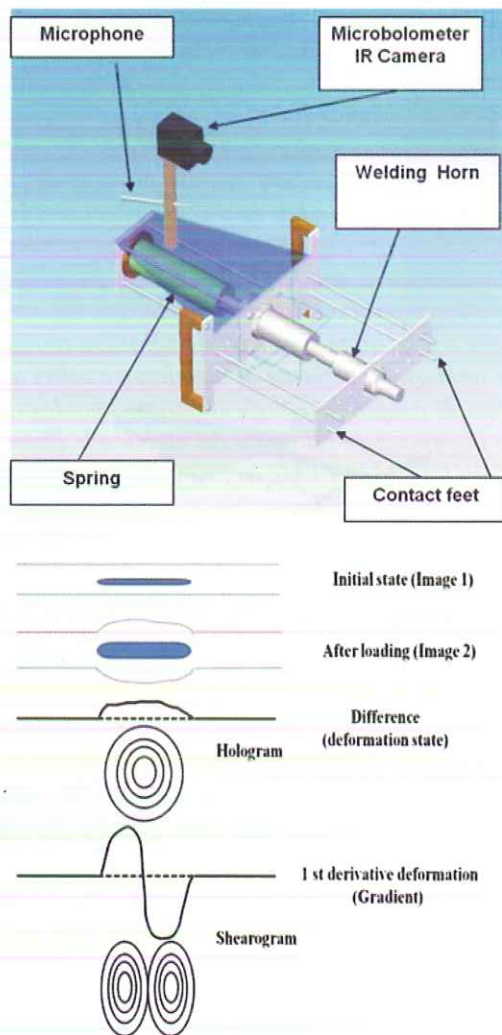


Figura 3 - a) Sistema termografico a stimolazione ultrasonora, b) Interpretazione dei risultati shearografici.

In questo studio, la valutazione quantitativa delle dimensioni dei difetti è stata effettuata direttamente dalle misurazioni sperimentali, mediante l'analisi della risposta dinamica della struttura in composito. Riconoscendo il

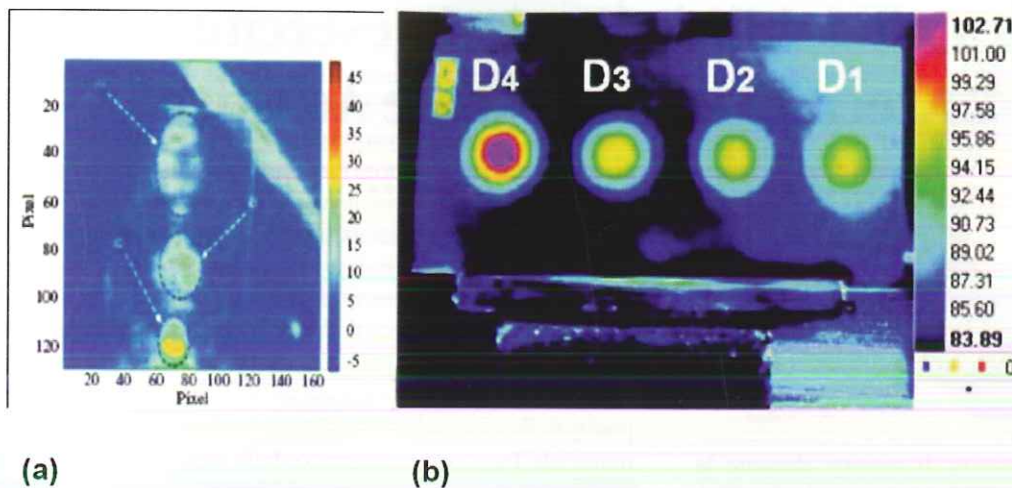


Figura 4 - a) Ispezione termografica effettuata con Thermosonics; b) immagine in fase relativa all'ispezione termografica effettuata con OLT.

primo modo di vibrazione (0 1) e la corrispondente frequenza di risonanza, con un processo iterativo di ottimizzazione numerica, è stato possibile provvedere anche all'assessment della profondità dei difetti [4, 5].

### Risultati

Dai risultati ottenuti, figura 4, si è constatato che Thermosonics può essere impiegato per un esame NDT iniziale della struttura in composito, mentre, L'OLT è utilizzabile per l'assessment semi-quantitativo, figura 4, delle dimensioni dei difetti, tuttavia, senza essere in grado di dare informazioni quantitative sulla localizzazione degli stessi all'interno della struttura. A complemento delle due tecniche termografiche, la NDE finale è stata conseguita tramite l'applicazione della DISH in combinazione con un algoritmo di ottimizzazione. Con la tecnica shearografica è stato possibile individuare e dimensionare i difetti direttamente dalle frange di interferenza rilevate in corrispondenza dell'area interessata dalla presenza dei difetti cilindrici, come mostrato in figura 5. Comparando i valori reali dei difetti con le medie relative alle dimensioni dei difetti calcolate su dieci osservazioni è risultato che la tecnica shearografica consente di stimare le dimensioni dei difetti con un'accuratezza generalmente superiore al 90%. La profondità dei difetti (z) è stata stimata successivamente mediante il processo di ottimizzazione numerica con un'inaccuratezza pari all'8 % [5, 6].

### Conclusioni

Thermosonics è un metodo di ispezione rapida per un esame del tipo pass/fail, l'OLT e la DISH sono appropriate per dare una valutazione semiquantitativa dei difetti. In conclusione, le tre metodologie NDT presentate sono risultate integrabili tra loro per applicazioni in laboratorio ed in campo, inoltre, risultano complementari alle tecnologie NDT tradizionali come ad esempio ultrasuoni, correnti indotte, etc.

### Riferimenti

1. Maldague, X.P.V.,(2001). "Theory and Practice of Infrared Technology for Non destructive Testing" Canada: John Wiley & Sons.
2. De Angelis, G., Dati, E. and Bernabei, M. compositi Magazine (Marzo 2012).
3. Steinchen, W and L. Yang. "Digital Shearography – Theory and Application of Digital speckle Pattern Shearing Interferometry" (2003) The Society of Photo – Optical Instrumentation Engineers.
4. De Angelis, G., Meo, M., et al. (2012)' NDT & E International Vol.45, pp (91-96).
5. De Angelis, G., Meo, M., et al NDTMS-2011 proceedings.
6. De Angelis, G., Meo, M., et al, (2011). Key Engineering Materials Vols. 471-472 pp 904-909.

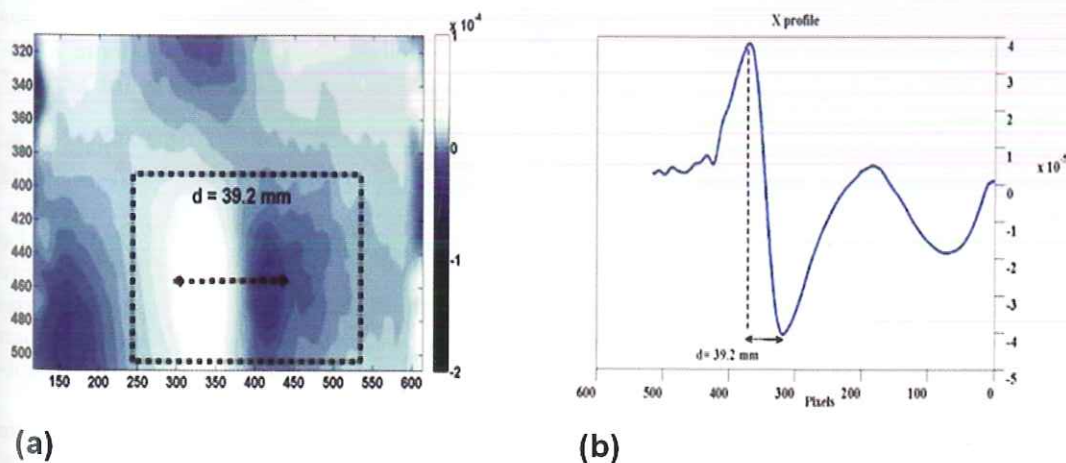


Figura 5 - Shearogramma e profilo della deformazione flessionale in corrispondenza della regione CFRP1 (d4), figura 1 (a), alla frequenza di 6.850 KHz.