

# Ispezione di componenti aerospaziali

**Analisi ispettiva attraverso il metodo ultrasonoro, utilizzando sonde multi-elemento**

Valter Capitani,  
Umberto Piazza,

Il metodo ad ultrasuoni con la tecnica multi-elemento phased array si basa su una tecnologia avanzata che permette l'ispezione di particolari con delle geometrie complesse. Inoltre aumentando il numero degli elementi attivi costituente la sonda ultrasonora, si ottiene un ricoprimento notevole della superficie da ispezionare diminuendo, di conseguenza, i tempi di controllo.

Le applicazioni di questa tecnica ultrasonora sono state sviluppate nelle ispezioni di particolari in materiale composito a matrice polimerica e materiali metallici impiegati per la costruzione di strutture primarie e secondarie in ambito aerospaziale. Nel presente articolo vengono presentati i risultati di ispezioni ultrasonore eseguite su pannelli sandwich, laminati in CFRP e materiali metallici saldati, con configurazioni tipiche di strutture aeronautiche e spaziali con le relative considerazioni a riguardo.

## Descrizione della tecnologia

La tecnologia Phased Array, offre la possibilità di generare e di gestire un fascio ultrasonoro in termini di angoli, distanze focali e sezioni del fascio stesso. Lo strumento genera un fascio ultrasonoro tramite l'eccitazione di una serie di elementi piezoelettrici (64 elementi attivi), i quali possono essere gestiti indipendentemente inserendo una serie di parametri concernenti il numero degli elementi utilizzati (grandezza del fascio UT), gli angoli di ispezione e la profondità di focalizzazione (rapportata alla profondità dell'oggetto da ispezionare).

Al fine di ottenere un fronte d'onda unico vengono inseriti anche i parametri per la gestione dei ritardi di ogni singolo elemento come, ad esempio, la distanza degli ele-

menti dalla superficie, la velocità del mezzo accoppiante e un'eventuale angolazione, impostata per mezzo di uno zoccolo, sul quale viene posizionata la sonda stessa. Tramite l'unità Phased Array il sistema calcola automaticamente i ritardi necessari nella distribuzione degli impulsi ai singoli elementi. Al termine dell'acquisizione dei dati da parte dei singoli elementi (onda completa), questi ultimi vengono registrati in un personal computer ed in seguito tramite un apposito software vengono unificati al fine di ottenere delle rappresentazioni standard (A-scan, B-scan e C-scan), che tengono conto del ricoprimento effettuato dagli elementi attivi della sonda. Il sistema è composto dai seguenti elementi:

- strumento ultrasuoni Focus Phased Array 32/64 (8 pulsatori).
- sonda multi-elemento composta da 64 elementi lineari con frequenza pari a 10 MHz e sonda multi-elemento da 48 elementi lineari con frequenza paria 13 MHz focalizzata.
- personal computer per la gestione, l'analisi e l'archiviazione dei dati di acquisizione.
- meccanica utilizzata per l'ispezione bi-assiale di componenti metallici e non metallici.

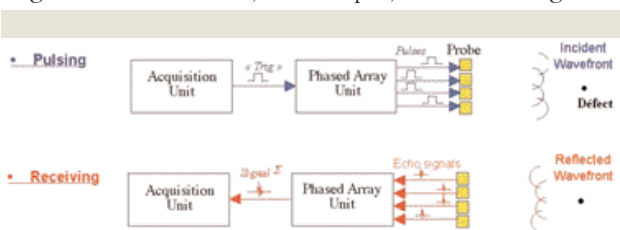
## Descrizione della tecnica d'ispezione

La tecnica di ispezione utilizzata nel controllo di particolari in materiale composito e di materiali metallici è la riflessione (pulse-echo). In base alla geometria del particolare e alla tipologia delle discontinuità da rilevare, sono stati adottati dei fasci longitudinali e/o dei fasci trasversali. Nelle diverse applicazioni sono stati utilizzati dei reference standard rappresentativi della geometria e soprattutto del dell'ispezione.

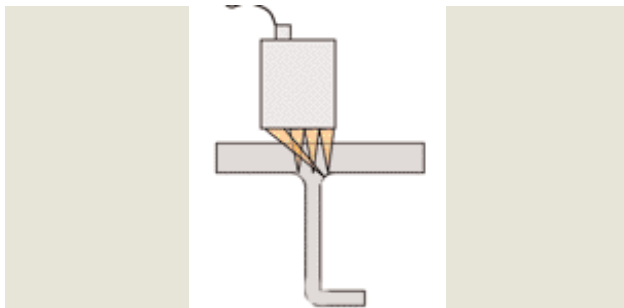
Ispezione su particolari in materiale composito a matrice polimerica aventi una serie di correntini di irrigidimento a J (anch'essi in composito).

Il fascio ultrasonoro viene sdoppiato per ispezionare contemporaneamente l'incollaggio del J-spar e le eventuali delaminazioni nella curvatura. L'ispezione viene eseguita su entrambi i lati, al fine di ricoprire interamente la struttura da ispezionare.

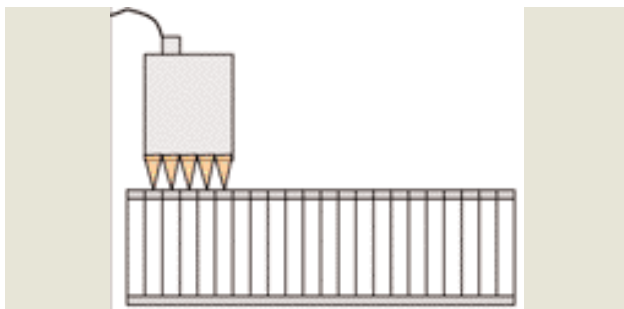
Ispezione su particolari in materiale composito a ma-



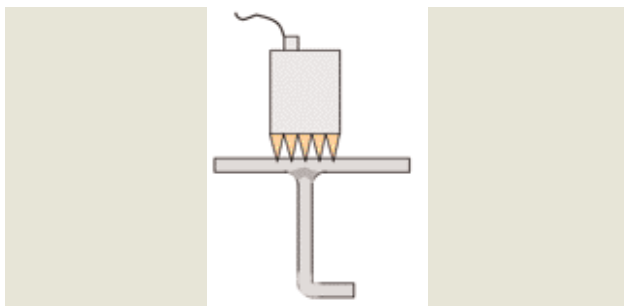
**Fig. 1** Esempio di circuito con elettronica Phased Array



**Fig. 3** Applicazione su pannelli sandwich



**Fig. 4** Applicazione su strutture saldate LBW



**Fig. 5** Applicazione su strutture saldate FSW

trice polimerica con struttura sandwich. Il fascio ultrasonoro viene utilizzato per ispezionare eventuali delaminazioni nello skin e l'adesione tra l'honeycomb e lo skin.

Ispezione su particolari in lega leggera aventi una serie di correntini di irrigidimento a J (anch'essi in lega leggera) saldata con tecnologia Laser Beam Welding. Il fascio ultrasonoro viene utilizzato per ispezionare contemporaneamente i cordoni di saldatura presenti su entrambi i lati del correntino.

Ispezione su particolari in lega leggera saldati con tecnologia Friction Stir Welding. Il fascio ultrasonoro viene inclinato con uno zoccolo al fine di ispezionare in una singola scansione l'intero cordone di saldatura.

Figura 5 -Applicazioni su strutture saldate FSW

## PARTICOLARI ESAMINATI E RISULTATI

- Struttura in CFRP laminato su cui sono state eseguite delle riparazioni inserendo contemporaneamente dei difetti artificiali posti a differenti profondità, come dettagliato nella seguente figura: lo scopo di questa sperimentazione

consiste nella definizione di un controllo non distruttivo da utilizzare in occasione di riparazioni su particolari in CFRP, sui quali possono enuclearsi delle difettologie dovute al delicato processo di fabbricazione.

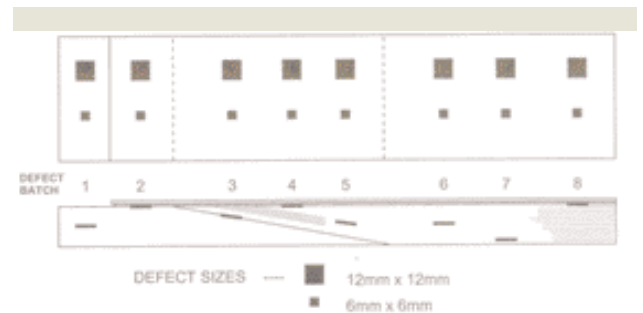
La taratura del sistema è stata eseguita con l'ausilio di reference standard in CFRP laminato a gradini con spessori variabili in modo discreto da 1 mm a 14.2 mm. All'interno di questi ultimi sono stati inseriti dei difetti artificiali (rettangoli in teflon con spessore di 0.1 mm) posti a differenti profondità con dimensioni di 6 x 6 mm e 3 x 3 mm.

Nella seguente rappresentazione dell'acquisizione ultrasonora, sono evidenziate le aree in cui sono presenti i difetti artificiali nella metà dello spessore e in corrispondenza delle prime pelli di CFRP.

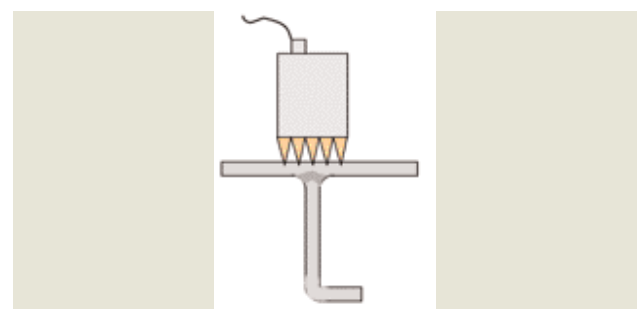
Nelle rappresentazioni si evidenziano la presenza dei difetti artificiali in diverse posizioni con inclinazioni che seguono l'andamento delle pelli utilizzate per la riparazione. Oltre a rappresentazioni tipo A-scan e C-scan si evidenziano una sezione trasversale ed una longitudinale del particolare esaminato.

- Struttura in CFRP laminato solido su cui sono stati cobondizzati dei correntini di irrigidimento a "J" denominati J-spar. Il Reference Standard utilizzato è un laminato solido in CFRP a gradini con difetti artificiali posti a differenti profondità.

- Struttura con configurazione sandwich avente lo skin in CFRP e il nido d'ape in Nomex. Il reference standard utilizzato per la taratura della strumentazione, prevede un pannello con difetti artificiali posti nella linea di adesivo tra il pannello e il nido d'ape con dimensioni 10 x 10 e 20 x 20 mm.



**Fig. 6** Disegno costruttivo di riparazione pannelli laminati



**Fig. 7** Reference Standard lamianto solido a gradini

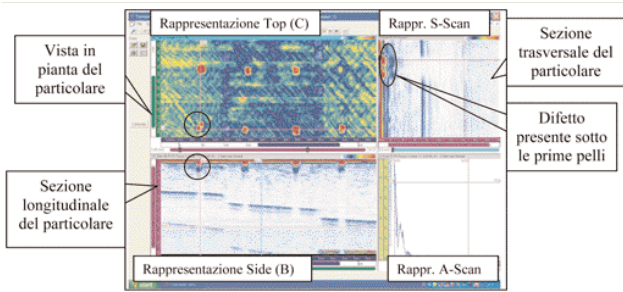


Fig. 8 Rappresentazione UT del laminato solido a gradini

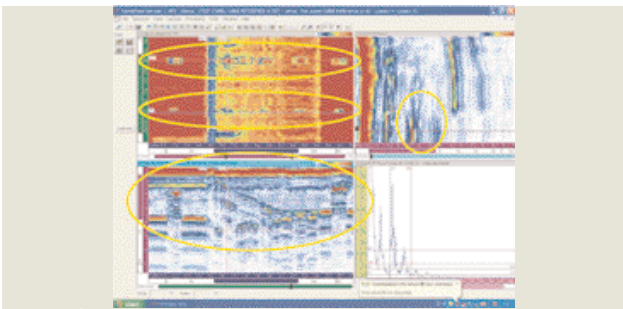


Fig. 9 Rappresentazioni grafico del pannello laminato riparato

Nella seguente rappresentazione si osservano una serie di discontinuità localizzate nella linea d'adesivo tra il pannello e il nido d'ape.

● Piano in lega leggera saldata con tecnologia LBW costituita da un pannello (spessori che variano da 2 a 5 mm circa) su cui vengono saldati dei correntini di irrigidimento. Tali particolari vengono ispezionati utilizzando una sonda con una frequenza di 13 MHz con focalizzazione meccanica ottenuta con una lente focalizzatrice.

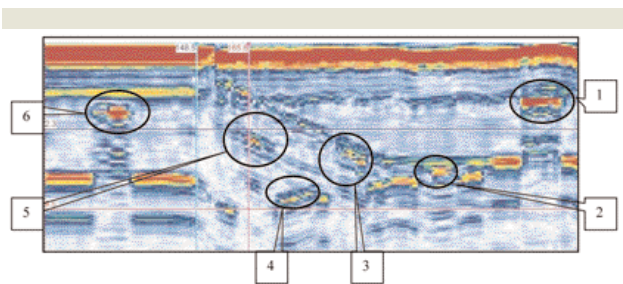


Fig. 10 Rappresentazione Side B del pannello laminato riparato

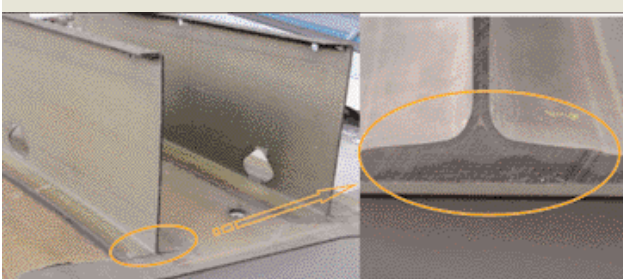


Fig. 11 J-Spar in CFRP

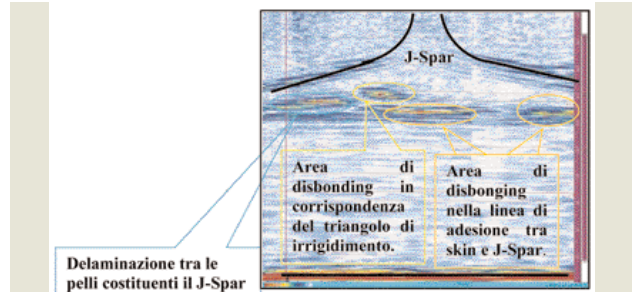


Fig. 12 Rappresentazione dell'analisi dei dati UT effettuata su uno J-Spar

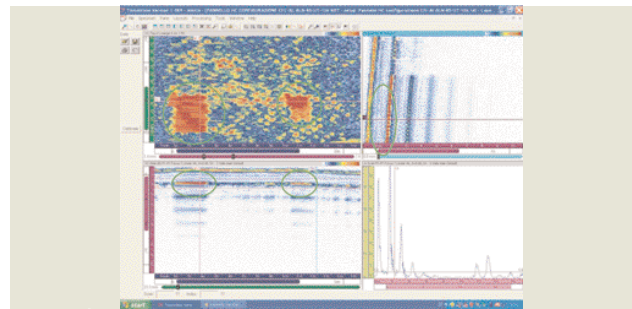


Fig. 13 Reference Standard con difetti artificiali

La taratura dello strumento avviene utilizzando un Reference Standard con difetti artificiali FBH (Flat Bottom Hole) e SDH (Side Drilled Hole), con diametri 0.4 mm – 0.6 mm – 0.8 mm, posti in corrispondenza del cordone di saldatura.

Nella seguente rappresentazione si osserva la presenza di discontinuità riconducibili a porosità presenti nel cordone di saldatura.

Struttura in lega leggera (spessori di circa 5 mm) saldata con tecnologia FSW, in configurazione di giunto te-

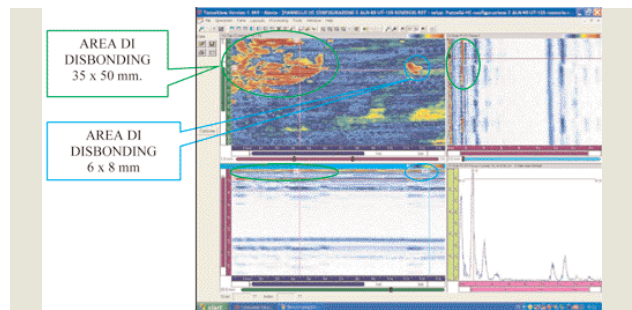


Fig. 14 Rappresentazione dei dati Phased Array di un pannello sandwich

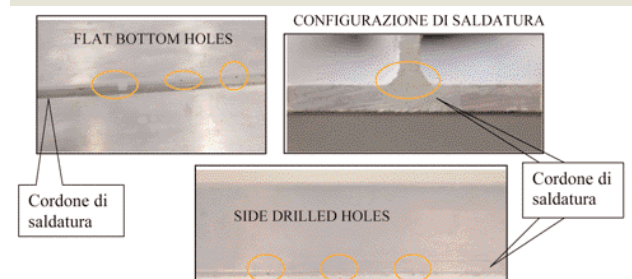


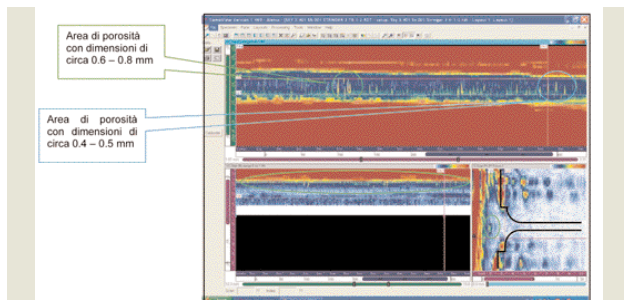
Fig. 15 Reference Standard pannello con correntini saldati in LBW

## Vantaggi

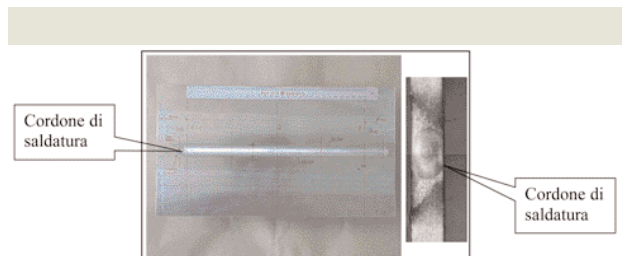
- Notevole sensibilità a parità di frequenza
- Incremento dell'area di ispezione e conseguente riduzione dei tempi di ispezione
- Possibile utilizzo su geometrie particolarmente complesse
- Possibile utilizzo su geometrie particolarmente complesse

## Svantaggi

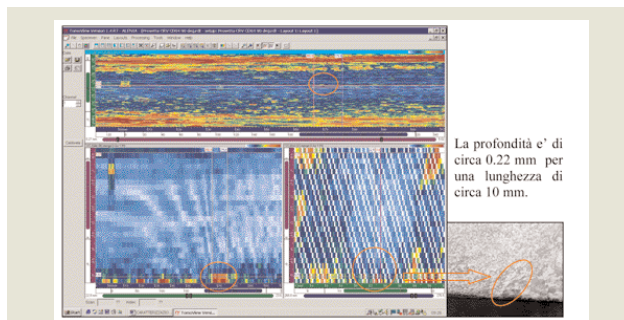
- Notevoli costi dell'hardware e del software
- Competenza specifica da parte dell'operatore
- Per applicazioni su geometrie particolarmente complesse, l'hardware ed il relativo set-up devono essere adeguati ed alle volte implementate



**Fig. 16** Rappresentazione di un pannello saldato LBW



**Fig. 17** Provetta in Lega Leggera saldata in Friction Stir Welding



**Fig. 18** Rappresentazione di una discontinuità sul rovescio della saldatura

sta a testa, che può essere effettuata su leghe di materiale metallico simile o dissimile. La taratura della strumentazione è stata effettuata con una provetta saldata, nel cui cordone sono stati introdotti degli intagli artificiali, realizzati con il processo EDM, che simulano le discontinuità tipiche di questo processo di saldatura.

Nella seguente rappresentazione è possibile osservare la presenza di una discontinuità posta sul fondo del cordone di saldatura tra il nocciolo e la zona termomeccanicamente alterata, denominata root flaw; essa è una tipica discontinuità del processo Friction Stir Welding.

## Conclusione e commenti

Il metodo ultrasonoro con la tecnica Phased Array è da considerarsi innovativa dal punto di vista delle applicazioni industriali, il suo impiego si presta alle seguenti considerazioni.

- Il metodo ad ultrasuoni con tecnica multi-elemento Phased Array copre una vasta gamma di applicazioni su differenti materiali e configurazioni ma un corretto utilizzo del sistema e la seguente analisi dei dati acquisiti, deve essere effettuata da personale esperto, in grado di gestire l'hardware ed il software, con competenza sviluppata attraverso un'estensiva esperienza operativa; indispensabile

le è il training specifico a completamento del quale è necessario comunque l'attività di ispezione pratica.

- La sensibilità che si riesce ad ottenere, relativamente alla frequenza utilizzata, è elevata, ottenuta per mezzo della focalizzazione elettronica dei fasci ultrasonori generati dagli elementi.

- Nel caso in cui sia necessario un incremento della sensibilità può essere utilizzata un'ulteriore focalizzazione, ottenuta meccanicamente, per mezzo di una lente, al fine di avere una doppia focalizzazione, meccanica ed elettronica.

La seguente tabella riassume in maniera schematica i vantaggi e gli svantaggi del metodo.

*Relazione presentata  
alla Conferenza Nazionale  
sulle Prove non Distruttive  
organizzata dall'Associazione  
Italiana Prove non Distruttive  
Monitoraggio Diagnostica*