

## 14. Controlli non distruttivi

### 14.1. Generalità

La moderna progettazione meccanica, basata sempre più sull'uso di accurati codici di calcolo e su una accurata conoscenza delle caratteristiche del materiale e delle effettive condizioni di esercizio, permette lo sfruttamento sempre più spinto del materiale, finalizzato alla riduzione di costi di esercizio, di produzione, del peso ecc. Esigenze di questo tipo sono ricorrenti nella progettazione con materiali compositi, usati prevalentemente nella costruzione di strutture e componenti ai quali è richiesto un elevato rapporto rigidità/peso e/o resistenza/peso. Una accurata conoscenza delle caratteristiche del materiale si può ottenere solo con una affidabile procedura di controllo della qualità finalizzata in particolare alla rilevazione di difetti, inclusioni, ecc.

Ad un elevato sfruttamento del materiale (bassi coefficienti di sicurezza) è associata inoltre una più elevata probabilità di rottura in esercizio a seguito di formazione e propagazione dei difetti. Sorge pertanto anche la necessità di eseguire periodicamente un controllo della integrità strutturale, specie allorché dalla rottura del componente possano derivare notevoli danni economici e/o nocimento alla vita umana.

Ciò giustifica l'importanza che le tecniche di controllo non distruttivo hanno tanto nella progettazione quanto nella gestione in esercizio di elementi e strutture in composito.

Il controllo dei compositi mediante tecniche non distruttive risulta in linea di principio più complesso di quello dei materiali metallici convenzionali. In questi ultimi infatti il controllo si riduce in pratica alla ricerca e valutazione di difetti e cricche, a partire dai quali è possibile, mediante la meccanica della frattura, valutare il grado di danneggiamento e la eventuale resistenza (sollecitazioni statiche) e/o la vita residua (fatica) del componente.

Più complesso è il problema per i compositi in quanto, come visto nei precedenti capitoli, il processo di danneggiamento non coinvolge semplicemente la crescita di una cricca, bensì vari processi come creep, debonding, delaminazione, degrado della matrice ecc. Inoltre, i compositi hanno proprietà fisico-meccaniche ben diverse da quelle dei materiali convenzionali: essi sono in genere disomogenei e cattivi conduttori di calore e di elettricità. Conseguentemente le tecniche di controllo non distruttivo messe a punto per i materiali convenzionali non possono essere usate in genere tal quali per i compositi.

### 14.2. Ricerca dei difetti

Il controllo dei compositi mediante tecniche non distruttive viene eseguito in genere sia durante il processo di fabbricazione, sia dopo la fabbricazione (controllo del processo) che dopo la messa in servizio. Evidentemente i controlli eseguiti durante e dopo la produzione hanno lo scopo di evidenziare i difetti tipici del processo di manifattura quali:

- 1) non uniformità del rapporto fibra/matrice;
- 2) non uniformità delle caratteristiche della matrice;
- 3) difetti superficiali;
- 4) difetti di lay-up (errori di orientamento della lamina o delle fibre, vuoti fra piani ecc.);
- 5) inclusione di corpi estranei ecc.

I controlli eseguiti invece durante l'esercizio del componente hanno lo scopo di verificare l'integrità strutturale e quindi di evidenziare soprattutto i fattori di danneggiamento tipici di una struttura in esercizio, quali:

- a) degrado ambientale (igroscopico, termico ecc) della matrice;
- b) debonding;
- c) rottura o lesione della matrice;

- d) delaminazione;
- e) creep ecc.

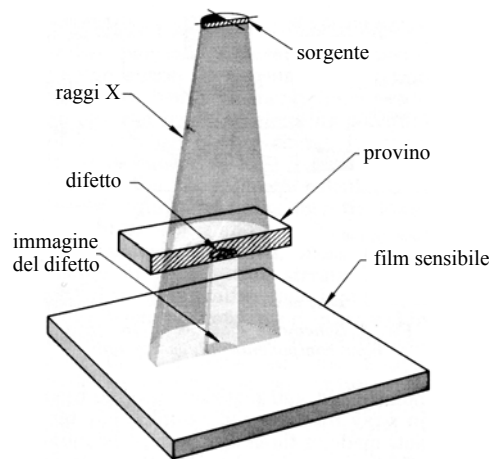
Le tecniche di controllo più utilizzate allo stato attuale sono raggi X ed ultrasuoni (C-scan).

Altre tecniche pure utilizzate, alcune ancora in fase di sviluppo, sono la radiografia neutronica, l'olografia, la termografia, i liquidi penetranti ecc.

### 14.3. Raggi X

Come è noto i raggi X, onde elettromagnetiche con lunghezza d'onda compresa nel range 0.001-1 nm emesse da un metallo pesante colpito da un fascio di elettroni ad alta energia, sono assorbiti da un materiale secondo un caratteristico coefficiente di assorbimento. Facendo attraversare un elemento da un fascio di raggi X e mettendo dalla parte opposta alla sorgente una lastra sensibile, è possibile misurare l'assorbimento e quindi avere informazioni sulla natura e forma degli componenti attraversati.

Per esempio facendo attraversare da un fascio di raggi X di potenza opportuna un provino posto tra la sorgente ed un rivelatore (film sensibile), è possibile rilevare la presenza di un eventuale difetto come una inclusione, una grossa crepa ecc., come mostra schematicamente la seguente figura.



**Fig.1** – Rappresentazione schematica di indagine radiografica di difetto in lastra di spessore uniforme.

Per i materiali compositi si usano generalmente raggi X a bassa energia che impressionano una lastra di berillio.

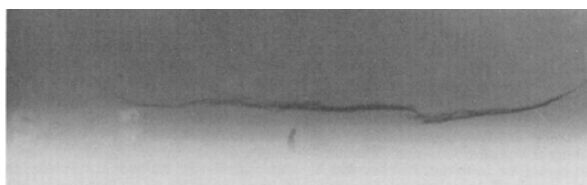
La natura dei materiali comunemente presenti in un composito rinforzato in fibre di vetro, solitamente non assicura un contrasto dei raggi X tale da visualizzare singole fibre. La misura dell'assorbimento permette in genere di ottenere il contenuto di resina del composito considerato. Più difficile risulta invece valutare la presenza di forme di danneggiamento di matrice e fibre. Vari studi sperimentali hanno mostrato come con i raggi X possono essere facilmente identificati vuoti, corpi estranei, inclusioni e, con opportuni accorgimenti, anche la rottura locale di fibre di boro sebbene sia poi difficile mettere in relazione questi con la resistenza residua del materiale.

Non è possibile invece rilevare coi raggi X, come si comprende facilmente, difetti come scollamento fibra-resina e rotture interlaminari (assorbimento invariato).

Evidentemente la massima sensibilità ai difetti si realizza allorché questi sono posti parallelamente alla direzione di propagazione dei raggi X.

A titolo di esempio la figura seguente riporta l'immagine radiografica di una cricca passante avente una lunghezza totale di circa 100 mm. Evidentemente tale immagine radiografica è stata rilevata utilizzando un fascio di raggi X progantesi in direzione normale al piano di figura. L'osservazione

della stessa cricca in una direzione normale a questa non ne avrebbe permesso la rilevazione visto che l'assorbimento dei raggi X sarebbe pressoché invariato rispetto alla condizione di assenza di cricca.



**Fig.2** – Immagine radiografica di cricca avente lunghezza di circa 100 mm.

#### 14.4. Ultrasuoni

Le tecniche di controllo non distruttivo basate sugli ultrasuoni riscuotono attualmente un grande interesse industriale e sono in forte fase di espansione. Per questo una massiccia attività di ricerca scientifica è ad essi dedicata. Il grande interesse per tali tecniche è giustificato dalle peculiari caratteristiche quali semplicità, versatilità (può essere praticamente applicata a qualunque materiale), assenza di contatto ecc.

Le tecniche ultrasonore di controllo non distruttivo si basano tutte sull'analisi dei fenomeni di diffusione e riflessione che gli ultrasuoni subiscono allorché attraversano un corpo di dimensioni finite. Le onde ultrasonore si diffondono in un materiale con una velocità caratteristica e vengono riflesse allorché incontrano una superficie di separazione tra due materiali aventi diversa impedenza acustica (superfici del pezzo esaminato, difetti interni, vuoti, inclusioni ecc).

Un fascio di onde ultrasonore viene in pratica completamente riflesso se incontra un interfaccia metallo-gas (es. vuoti), viene parzialmente riflessa se incontra una interfaccia liquido-metallo o metallo-solido (es. inclusioni). Dall'esame del fascio riflesso è quindi possibile in genere avere informazioni circa la presenza di difetti, come cricche, inclusioni ecc. A tal fine si investe l'elemento da analizzare con un fascio di onde con frequenza variabile in funzione del materiale da 1 a 25 MHz, e si procede in genere alla misura della intensità del fascio riflesso e del tempo che le onde impiegano per attraversare l'elemento analizzato (time-of-flight).

Esistono in pratica tre differenti tecniche di indagine basate sugli ultrasuoni quali:

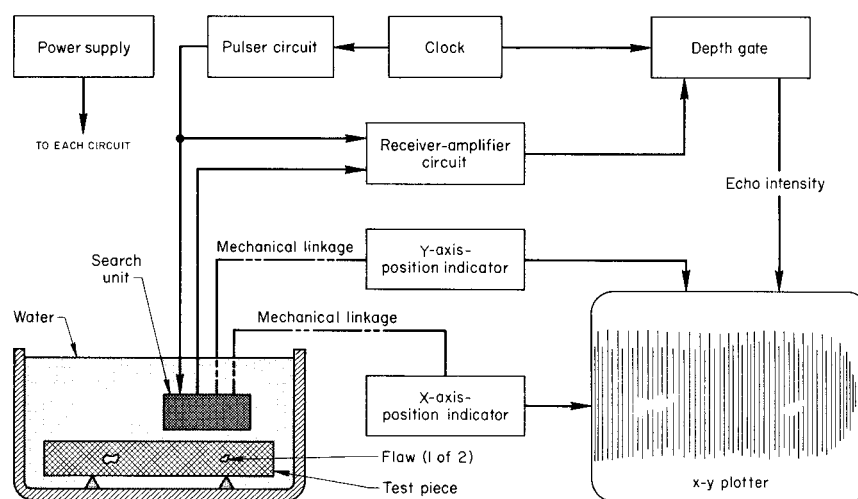
- a) tecnica A-scan;
- b) tecnica B-scan;
- c) tecnica C-scan.

In estrema sintesi la tecnica A-scan è una tecnica puntuale in quanto permette di rilevare intensità e tempi di attraversamento degli ultrasuoni con riferimento ad un singolo punto del provino; la tecnica B-scan è una tecnica per linee in quanto consente di rilevare intensità e tempi di attraversamento relativi ai punti posti in una linea del componente esaminato; la tecnica C-scan invece permette il rilievo di intensità e tempi di attraversamento relativi ai punti di un piano di scansione  $x-y$  che può essere variato opportunamente al fine di indagare l'intero volume del modello analizzato. Tra le tre tecniche, la tecnica C-scan è senza dubbio quella più utilizzata nel controllo non distruttivo dei compositi.

Nella tecnica C-scan il materiale da analizzare viene investito da un fascio di onde ultrasonore prodotte da un dispositivo trasmettente (vedi fig.3) e tramite un secondo dispositivo ricevitore (che può in taluni casi coincidere con lo stesso trasmettitore) viene misurato il tempo di attraversamento e l'intensità delle onde di ritorno (eco).

In particolare, utilizzando un ricevitore munito di un opportuno gate elettronico che consente di impostare una finestra temporale di ricezione, è possibile oltre che escludere l'eco proveniente dalla

superficie anteriore e posteriore del pezzo esaminando, analizzare l'elemento secondo piani paralleli di piccolo spessore.



**Fig.3** – Setup sperimentale tipico della tecnica di indagine denominata C-scan.

E' così possibile ricostruire lo stato del materiale alle varie profondità rilevando a ciascuna di queste la eventuale presenza di difetti quali soprattutto delaminazione (interfaccia solido-gas), scollamenti e cricche diffuse, che provocano un brusco innalzamento della intensità del segnale riflesso (eco).

Con questa tecnica comunque non è possibile rilevare difetti molto piccoli dovendo questi avere dimensioni almeno paragonabili con la lunghezza d'onda delle onde ultrasonore impiegate.

Nella pratica comune le onde sono trasmesse disponendo l'elemento da analizzare in bagno d'acqua (vedi fig.3), sebbene per grandi strutture sono pure disponibili tecniche che utilizzano un opportuno getto d'acqua.

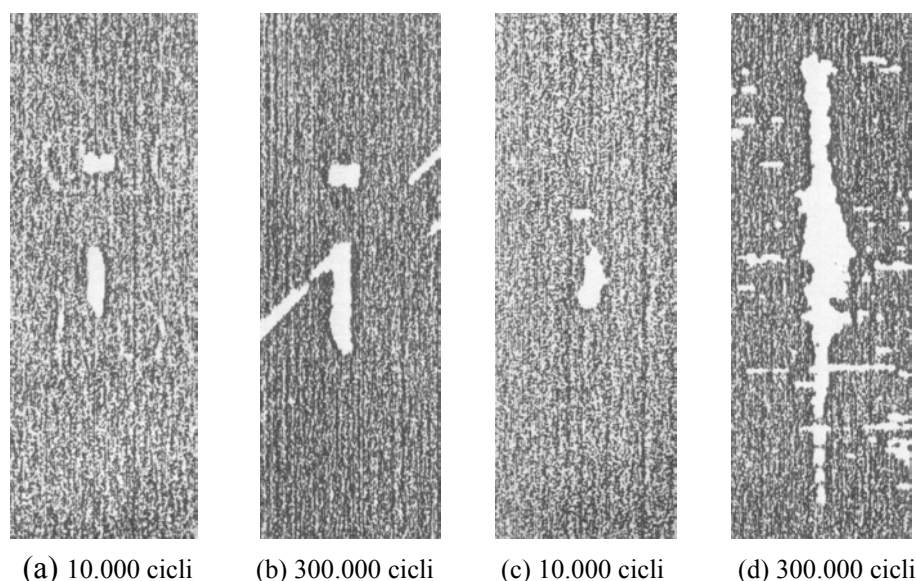
Per una analisi accurata la tecnica necessita di una opportuna taratura con provini dello stesso materiale con difetti introdotti ad hoc. In questo modo possono essere facilmente distinti i vari tipi di difetti che si presentano nel materiale e la loro dimensione.

L'uso della tecnica permette, come è facile comprendere, anche il rilievo dimensionale (spessori) del pezzo esaminato a partire dal tempo impiegato dalle onde per un attraversamento completo del pezzo. Su questo principio si basano gli spessorimetri da ultrasuoni. E' in modo simile possibile rilevare anche difetti superficiali come incisioni, graffi ecc.

La sensibilità del metodo è legata, come per i raggi X, all'orientamento del difetto essendo però in questo caso praticamente nulla per difetti paralleli alla direzione di propagazione delle onde ultrasonore e massima per difetti disposti in direzione ortogonale. Misure multiple sono comunque necessarie per discriminare accuratamente i vari tipi di difetti che possono presentarsi ed il relativo orientamento.

A titolo di esempio nella figura seguente sono riportate le immagini C-scan rilevate su un laminato fibra di carbonio-resina epossidica  $[\pm 45,0]_S$  e  $[90,0]_S$  per lo studio del danneggiamento a fatica di tali laminati.

Da queste figure si vede come, per entrambi i laminati esaminati le immagini C-scan consentono una chiara rilevazione della evoluzione del processo di danneggiamento che in questo caso porta alla formazione di cricche multiple con associati fenomeni diffusi di delaminazione propagatesi da difetti iniziali del laminato difficilmente rilevabili per dimensioni ed orientamento sui provini allo stato vergine.



**Fig.4** – Immagini C-scan di laminati in fibra di carbonio-resina epossidica soggetti a sollecitazione di fatica: (a,b) laminati  $[\pm 45, 0]_S$  e (c,d) laminati  $[90, 0]_S$ .

#### 14.5. Altre tecniche

C-scan e raggi X sono certamente le tecniche in assoluto più utilizzate per l'analisi di difetti presenti nei materiali compositi.

Altre tecniche, largamente utilizzate per indagini in materiali tradizionali, quali soprattutto radiografia neutronica, olografia, termografia e liquidi penetranti sono state pure utilizzate per questo scopo.

La radiografia neutronica opera in modo del tutto simile ai raggi X. Il vantaggio è che l'assorbimento neutronico dei materiali plastici costituenti la matrice dei compositi è molto più elevato di quello dei raggi X cosicché si ha la possibilità di un maggiore contrasto che permette una più elevata risoluzione e lo studio più accurato delle zone di giunzione metallo-composito per via della notevole differenza dei coefficienti di assorbimento di composito e metalli.

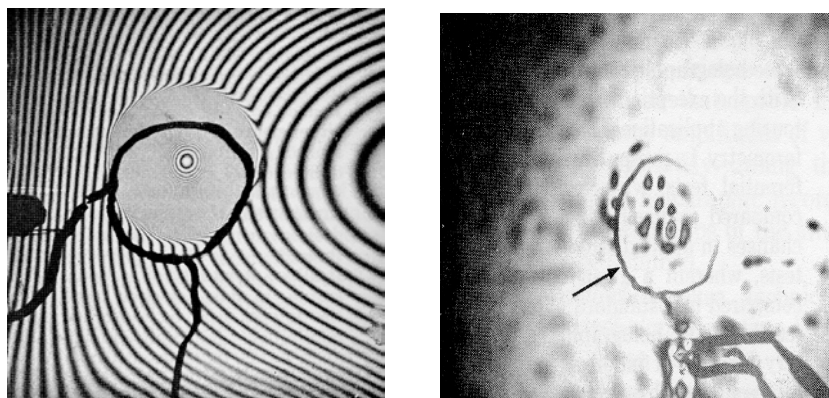
Rispetto ai raggi X ovviamente l'uso della radiografia neutronica risulta più complesso se non altro per via del fatto che bisogna disporre di un reattore nucleare di neutroni termici (a bassa energia).

Un'altra tecnica pure utilizzata per il controllo non distruttivo è l'olografia. La tecnica permette il rilievo delle deformazioni superficiali dell'elemento analizzato, a partire dall'esame delle frange di interferenza. La presenza di difetti superficiali o sub-superficiali produce una alterazione dello stato di deformazione e quindi delle frange di interferenza.

Per potere osservare le frange è necessario deformare il provino mediante applicazione di un carico, che può essere meccanico, termico, acustico ecc, in funzione del tipo di materiale, di elemento e di difetto che si vuole rilevare. La olografia è una tecnica piuttosto delicata che può essere utilizzata in genere solo su elementi di dimensioni limitate e con indagini eseguite in laboratorio.

A titolo di esempio la figura 5 mostra il campo di frange osservate in un pannello sandwich (fig.5a) ed in una struttura sandwich a nido d'ape (fig.5b).

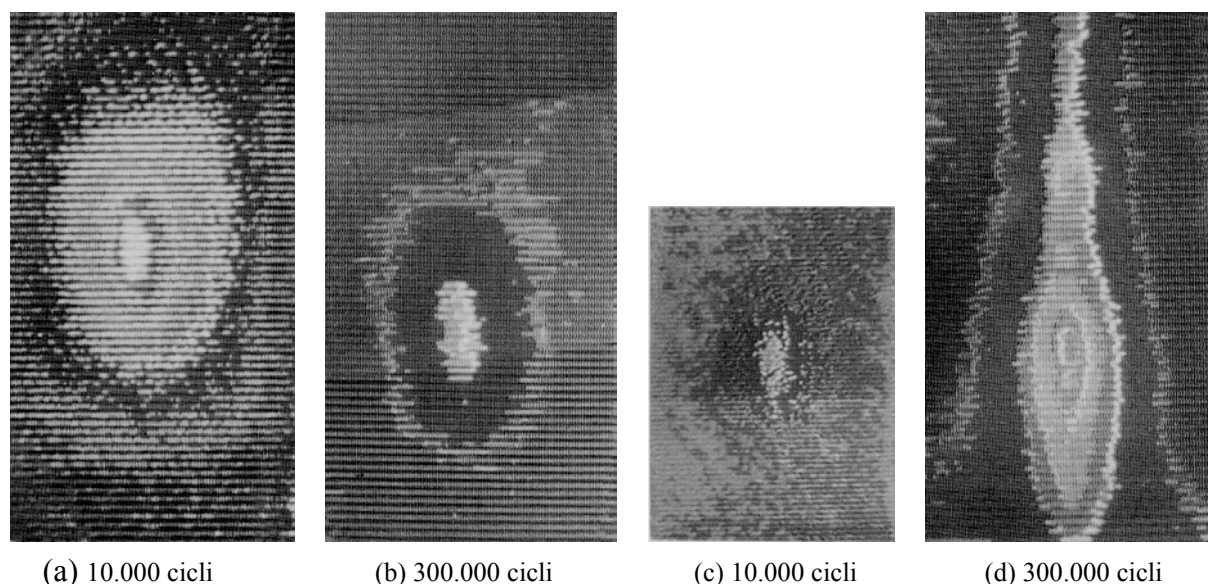
Nella prima immagine l'anomalia delle frange evidenzia la presenza di una area di debond (le frange di fondo sono dovute in questo caso a spostamenti rigidi del provino). Nella seconda immagine fenomeni di scollamento tra strato superficiale e core a nido d'ape sono pure evidenziati da anomale deformazioni cui corrispondono frange scure.



**Fig.5** – Interferometria olografica: campi di frange di interferenza osservati in pannelli sandwich.

Altra tecnica pure utilizzata per il controllo non distruttivo dei compositi è la termografia, che consiste nel rilievo del campo termico presente sulla superficie dell'elemento analizzato quando questi risulta sottoposto ad una sollecitazione ciclica (calore prodotto da effetti dissipativi) o ad un flusso termico esterno. La presenza di difetti induce variazioni di temperatura, in genere dell'ordine di qualche grado.

La tecnica piuttosto che rilevare temperature assolute, consente di rilevare difetti del materiale a partire dalla osservazione delle mappe termiche: andamenti fortemente irregolari sono legati a difetti in prossimità della superficie. In genere le mappe termiche superficiali sono rilevate mediante tecniche senza contatto facenti uso di sensori sensibili alle emissioni nell'infrarosso. A tal fine la superficie del pezzo deve presentare emissività costante e pertanto è necessario un apposito trattamento ovvero la verniciatura della stessa con vernici opache caratterizzate da alta emissività. A titolo di esempio la figura seguente mostra le mappe termiche rilevate in corrispondenza degli stessi difetti cui si riferisce la fig.4.



**Fig.6** – Immagini termografiche all'infrarosso di laminati in fibra di carbonio-resina epossidica soggetti a sollecitazione di fatica: (a,b) laminati  $[\pm 45,0]_s$  e (c,d) laminati  $[90,0]_s$ .

Una tecnica pure utilizzata per il controllo superficiale di difetti è quella che fa uso dei liquidi penetranti. Si tratta di liquidi dotati di bassissima viscosità e pertanto capaci di infiltrarsi per capillarità all'interno di difetti superficiali. Per i compositi si usano generalmente solventi organici come carbonio tetracloridrico e simili.

L'applicazione della tecnica necessita una pulizia preliminare delle superfici, successivamente questa viene ricoperta con il liquido penetrante, quindi eliminato il liquido in eccesso si procede alla osservazione delle cricche. Esistono liquidi pigmentati facilmente visibili e liquidi non pigmentati che necessitano l'uso di un rilevatore (borotalco o simili) da applicare dopo l'eliminazione del liquido in eccesso.

#### **14.6. Tecniche di valutazione dell'integrità strutturale.**

Le tecniche sopra esposte permettono di rilevare la presenza di difetti con informazioni su posizione e dimensioni. Non sempre risulta facile risalire da queste informazioni al grado di danneggiamento del componente analizzato, cioè alla valutazione della sua resistenza residua o vita residua nel caso di sollecitazioni di fatica.

Per questo scopo sono state messe a punto varie tecniche tra le quali la più interessante è probabilmente quella che si basa sulla misura della frequenza di risonanza della struttura che risulta in genere influenzata dalla presenza di cedimenti locali, cricche diffuse ecc. Dalla misura della frequenza di risonanza, eseguita mettendo in vibrazione l'elemento, è possibile in genere risalire al tipo di difetto nonché a posizione e dimensione dello stesso. La tecnica è interessante perché non produce alcun danneggiamento e può essere applicata anche quando sia accessibile un solo punto della struttura.

Una tecnica infine del tutto generale è quella che si basa sulla misura della rigidità dell'elemento, parametro che per i compositi è sempre in stretta relazione con il danneggiamento e quindi con la resistenza residua e la vita residua.