

C-SCAN E TERMOGRAFIA : DUE TECNICHE A CONFRONTO PER LA VALUTAZIONE DEL DANNO NEI COMPOSITI FRPC

Antonio Aiello, Claudio Caneva, Aldo Soloni.
Univ. di Roma *La Sapienza*, Dip. Ing. Chimica e dei Materiali

RIASSUNTO

L'utilizzo di tecniche di controllo non distruttivo basate su principi fisici diversi, consente di evidenziare con maggiore affidabilità lo stato di danneggiamento presente in un materiale.

L'impiego della tecnica ultrasonora con metodo *C-Scan* fornisce un'immagine correlata alle variazioni di impedenza ultrasonora all'interno del materiale, attraverso la quale vengono evidenziate sia la presenza sia la morfologia di eventuali alterazioni strutturali. Con tale metodo non si ottengono però informazioni sulla profondità del difetto. L'analisi termografica attiva permette, mediante lo studio dei transienti di riscaldamento o di raffreddamento, di rilevare le disuniformità nella propagazione delle onde termiche, legate alle variazioni di conducibilità che intervengono nel materiale a seguito dell'insorgenza di fenomeni di danneggiamento.

Le due tecniche sono state impiegate per la valutazione del danneggiamento in compositi a matrice termoindurente rinforzata con fibre. L'analisi termografica ha consentito di evidenziare con maggior accuratezza lo stato di danneggiamento in prossimità della superficie mentre il metodo *C-SCAN* si è rivelato più sensibile nella rilevazione delle alterazioni strutturali. Il confronto tra le due tecniche ha consentito quindi di precisarne i limiti di applicabilità ed ottimizzare la metodologia di indagine.

INTRODUZIONE

La Termografia ha di recente conquistato grande attenzione nel settore nelle

tecniche di indagine non distruttiva. Rispetto ad altre tecniche presenta diversi vantaggi:

- non richiede contatto tra il rivelatore ed il componente in esame;
- l'acquisizione è rapida e le informazioni sono disponibili in tempo reale;
- è sufficiente l'accesso ad una sola superficie del componente;
- la scelta di un'ottica con angolo di campo adeguato consente il rapido esame anche di superfici molto grandi.

Inoltre la tecnica termografica può essere utilizzata tanto in maniera passiva che in maniera attiva^[1]. Nel primo caso viene analizzato il calore emesso naturalmente dal materiale, ad esempio per l'applicazione dei carichi di esercizio, mentre nel secondo si riscalda il componente mediante una sorgente di calore esterna e se ne valuta la risposta termica. Il primo sistema è particolarmente adatto per l'analisi della distribuzione degli sforzi ed eventualmente dei danneggiamenti durante il normale esercizio, poiché le parti più sollecitate raggiungono temperature superiori. Il secondo è più indicato per l'esecuzione di prove non distruttive sul componente in sede di verifica della qualità o di caratterizzazione^[2].

La tecnica ultrasonora è per contro consolidata, di grande accuratezza e semplice applicazione. Anche in questo caso l'informazione è immediatamente disponibile e, nel caso delle prove di tipo *C-Scan*, la presentazione grafica facilita l'interpretazione dei risultati. E' però richiesta la presenza di un agente di accoppiamento tra sonda e superficie da esaminare ed è difficile analizzare superfici di grandi dimensioni. Per le prove in vasca è necessario poter suddividere le grandi strutture in più componenti di dimensioni minori.

PROVE SPERIMENTALI

In fig. 1 è rappresentata la catena strumentale del sistema termografico AVIO TVS 2000. La presenza di un monitor interno consente di trasportare facilmente il sistema, mentre la termocamera può essere utilizzata come una normale videocamera. Le immagini vengono salvate su un floppy disk IBM compatibile. L'immagine viene rappresentata in falsi colori, secondo una scala variabile da 8 a 256 livelli. E' possibile videoregistrare l'intera prova grazie ad una interfaccia videocomposito-PAL, per successive analisi dell'immagine.

La vasca motorizzata a due assi ed il software di elaborazione dei segnali per l'indagine ad ultrasuoni secondo il sistema *C-Scan* sono stati realizzati dalla ISOTEST, mentre la strumentazione per la generazione e l'acquisizione dei segnali era costituita da un 'SONIC 136 Ultra'. Tutto il sistema è comandato, mediante opportune schede di interfaccia, da un personal computer, sul quale viene anche visualizzata la mappa di livello degli echi ultrasonori in falsi colori del componente esaminato.

In figura 2 è rappresentato lo schema a blocchi del sistema.

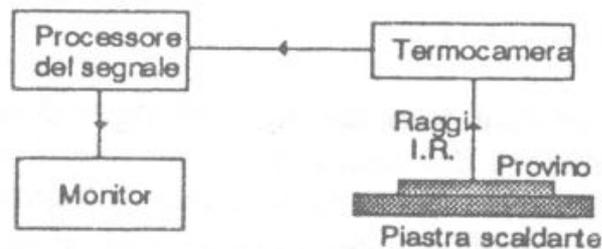


Fig. 1 - Catena strumentale del sistema termografico

Le prove sono state eseguite su laminati in materiale composito rinforzato con fibre, diversi per geometria e composizione. In particolare sono stati analizzati dei laminati precriccati in resina epossidica rinforzata con tessuto in fibra di vetro e delle provette forate in CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastic)^[3]. In entrambi i casi il materiale era stato sottoposto a trazione con diversi carichi, fino ad una σ massima pari al 70% di quella di rottura. In tal modo venivano provocati dei danneggiamenti interni di varia entità.

Le analisi termografiche sono state di tipo attivo. Il provino è stato collocato su una lastra di materiale refrattario preriscaldata, dotata di notevole inerzia termica, e si è esaminata l'immagine termica transitoria e di equilibrio affiorante sulla superficie opposta. Per migliorare la risoluzione e ridurre i fenomeni di riflessioni parassite alcuni provini particolarmente lucidi sono stati rivestiti di vernice opaca nera^[4].

Le prove C-Scan sono state eseguite in vasca, secondo la tecnica per riflessione, con sonde da 5 MHz ad alta risoluzione, guadagno variabile, e passo di scansione di 0,5 mm.

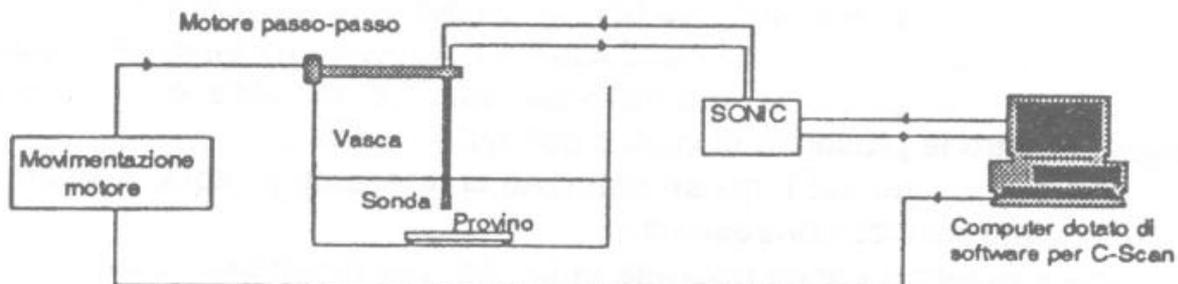


Fig. 2 - Catena strumentale del sistema C-Scan

DISCUSSIONE DEI RISULTATI

L'analisi ad ultrasuoni fornisce risultati dipendenti dalla sola impedenza ultrasonora e dallo spessore del componente. E' perciò indipendente dalla natura del componente una volta eseguita la taratura opportuna. I risultati forniti sono perciò simili, sia nel caso di fibre di vetro che di fibre di carbonio.

Nei laminati rinforzati con fibre di carbonio (figg. 3a, 4a, 5a), affiorano con evidenza i fenomeni di pull-out e danneggiamento di fibre. In particolare nel caso di laminati unidirezionali, figg. 3a e 4a, risulta evidente il marcato pull-out delle fibre nella direzione di applicazione del carico, mentre i fenomeni di rottura si sviluppano prevalentemente in direzione ortogonale al carico in prossimità del foro centrale. In fig. 5a è invece rappresentato un provino realizzato con laminato multistrato con fibre in direzione $\pm 45^\circ$. In questo caso il pull-out delle fibre si verifica preferenzialmente in prossimità del foro, mentre estese zone danneggiate si notano nelle direzioni del rinforzo in conseguenza dei fenomeni di debonding e rottura di fibre, che provocano microfratture nella matrice. I fenomeni si attenuano allontanandosi dalla zona centrale del provino.

Le lastre rinforzate con tessuto di fibra di vetro sono illustrate nelle figg. 6a, 7a e 8a. Nei casi riportati nelle figg. 6a e 7a affiora con evidenza la differenza tra l'intaglio iniziale e l'area interessata dalla propagazione della cricca. All'apice della cricca si presenta un'ampia zona danneggiata, dovuta alla concentrazione degli sforzi, mentre la cricca si propaga in maniera irregolare. Il caso di fig. 8a, si riferisce ad un laminato che è stato sottoposto a carico inferiore rispetto ai precedenti, per cui non si rileva una significativa propagazione della cricca, ma solamente una zona danneggiata irregolarmente all'apice dell'intaglio.

L'analisi termografica eseguita sugli stessi provini offre risultati confrontabili nel caso di rinforzo in fibra di carbonio. Nelle figg. 3b e 4b vengono mostrate le immagini termografiche dei provini unidirezionali, mentre in figura 5b è illustrato il provino con fibre a $\pm 45^\circ$.

L'analisi dell'immagine mostra con evidenza la presenza dei fenomeni di danneggiamento. Il pull-out delle fibre provoca la comparsa di zone fredde circondate da aree a temperatura maggiore, mentre le regioni interessate da rottura di fibre e fratture nella matrice hanno temperature superiori alla media. Ciò è dovuto al fatto che la matrice ha conducibilità notevolmente inferiore rispetto alle fibre di carbonio, e quindi le rotture della matrice migliorano i fenomeni di conduzione, mentre la presenza di vuoti o pull-out li ostacola.

Le prove condotte sui laminati rinforzati con tessuto in fibra di vetro hanno invece evidenziato risultati contrastanti.

L'immagine termografica riportata in fig. 6b, pur mostrando con chiarezza la presenza dell'intaglio e lo sviluppo della cricca, non fornisce ulteriori informazioni sull'estensione e la morfologia del danneggiamento.

Per tentare di migliorare la risoluzione dell'immagine, attraverso una riduzione dei fenomeni di riflessioni parassite ed un miglioramento dell'emissività del materiale^[5], le prove termografiche successive sono state condotte su lastre con superficie opacizzata.

In fig. 7b l'immagine termografica evidenzia in maniera netta i fenomeni già riscontrati nella prova ultrasonora, con una chiara discontinuità della propagazione

termica nella lastra in corrispondenza della cricca. Affiora con maggiore definizione l'esistenza di una zona danneggiata, che si estende oltre l'apice della cricca e sembra estenderne la lunghezza. Il danneggiamento risulta essere più esteso rispetto a quello rilevato dall'indagine ultrasonora mediante C-Scan, anche ai margini della cricca.

In fig. 8b è evidenziata la presenza della regione danneggiata all'apice della cricca, con una accuratezza simile a quella ottenuta nell'analisi ultrasonora.

CONCLUSIONI

Le analisi eseguite dimostrano con chiarezza come C-Scan e termografia, quando utilizzati separatamente, non consentono di stabilire la natura e la profondità dei fenomeni di danneggiamento.

I problemi fondamentali posti da un'indagine con ultrasuoni di tipo *C-Scan* sono:

- grande influenza delle variazioni di spessore del componente sul risultato finale;
- non fornisce informazioni sulla profondità del difetto, né sulla sua estensione nella direzione di propagazione del fascio ultrasonoro;
- per garantire risultati ripetibili necessita di una attenta calibrazione.

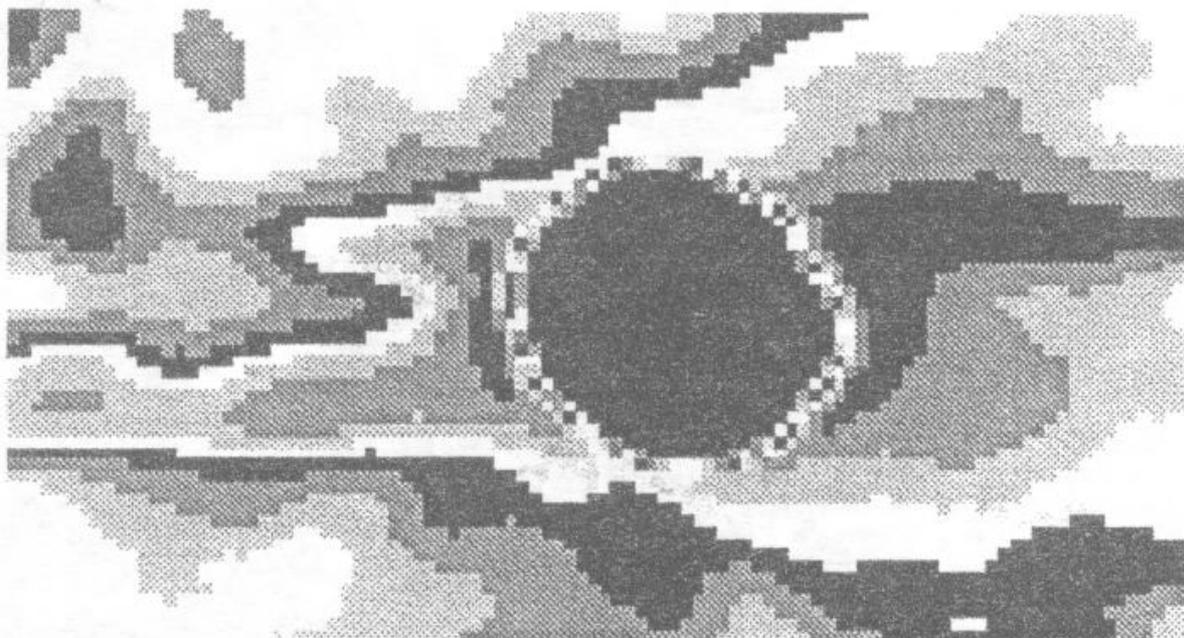
D'altro canto la termografia attiva non è esente da difficoltà:

- richiede la presenza di una sorgente di calore esterna, di potenza proporzionata allo spessore del componente;
- non consente di discriminare chiaramente i difetti presenti in un componente in materiale composito se fibre e matrice hanno una conducibilità termica confrontabile;
- la sensibilità ad un difetto decresce con la sua profondità, ed è massima in prossimità della superficie esaminata;
- richiede particolari artifici metodologici se applicata a materiali metallici;
- difetti di diversa estensione posti a profondità diverse possono fornire informazioni simili.

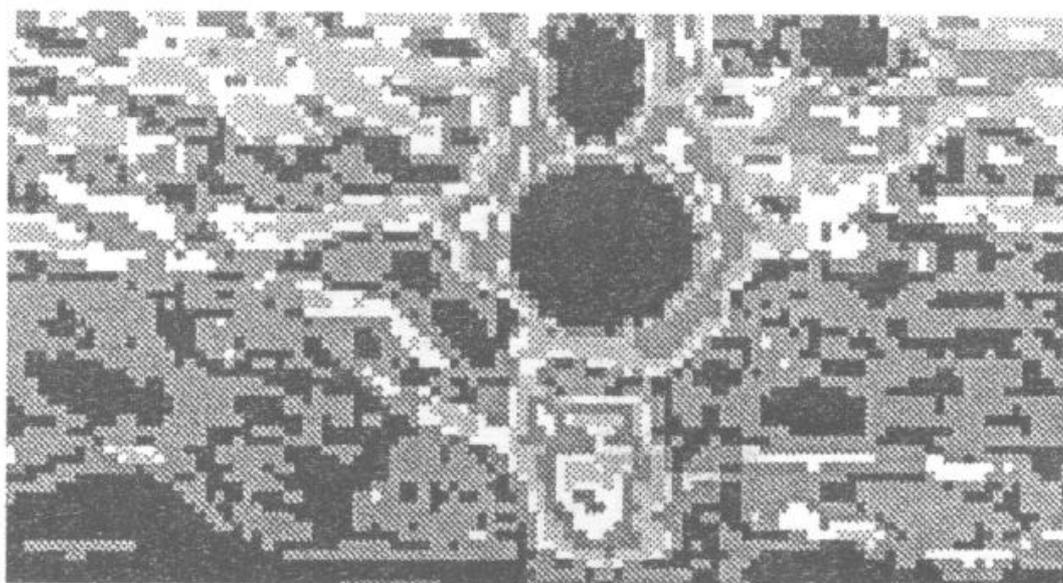
Le due tecniche possono però completarsi efficacemente, permettendo una completa caratterizzazione della difettosità presente nei componenti strutturali.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. Maillet D., Houlbert A.S., Didierjean S., Lamine A. e S., Degiovanni A.
Non-destructive thermal evaluation of delamination in a laminate: Part I -
Identification by measurement of thermal contrast.
Composite Sc. and Technology, 47 (1993).
- [2]. Ahmed T., Jin H.J., Wang X., Favro L. D., Kuo P.K., Thomas R.L.
Infrared thermal wave studies of composites.
Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 10 B,
Plenum Press, New York, 1991.
- [3]. Balageas D., Krapez J.C., Cielo P.
Thermal NDT of carbon-epoxy laminates.
Proc. EURO THERM 4, Nancy, June 1988.
- [4]. Lamine A.S.
Caracterisation de defauts dans les materiaux composites par
thermographie infrarouge.
Thesis, INPL Nancy, 1988.
- [5]. Cielo P., Maldague X., Deom A. A., Lewark R.
Thermographic non destructive evaluation of industrial materials and
structures.
Material Evaluation, 45 (1987).



100K 200K 300K 400K 500K 600K 700K 800K 900K 1000K
 Base Controlle 21/02/24



100K 200K 300K 400K 500K 600K 700K 800K 900K 1000K
 Base Controlle 21/02/24

Fig. 3a, 4a - Analisi ultrasonora di un laminato unidirezionale forato CFRP.

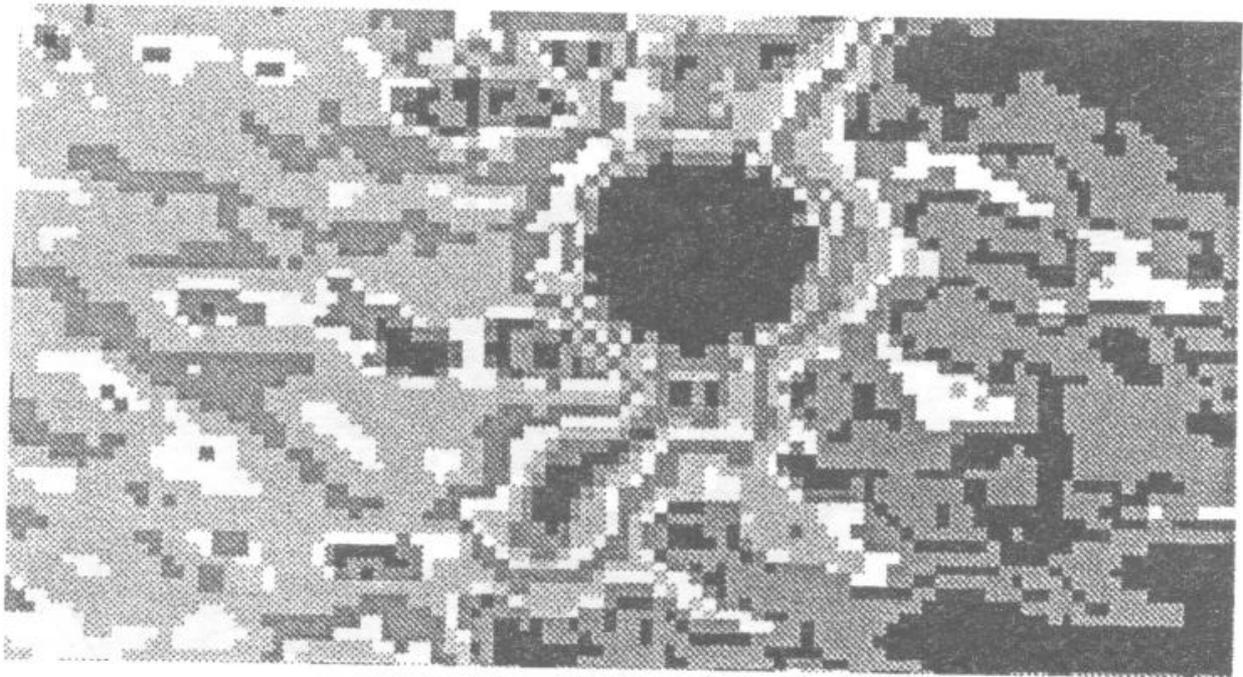


Fig. 5a - Mappa ultrasonora di un laminato multistrato con fibre a $\pm 45^\circ$.

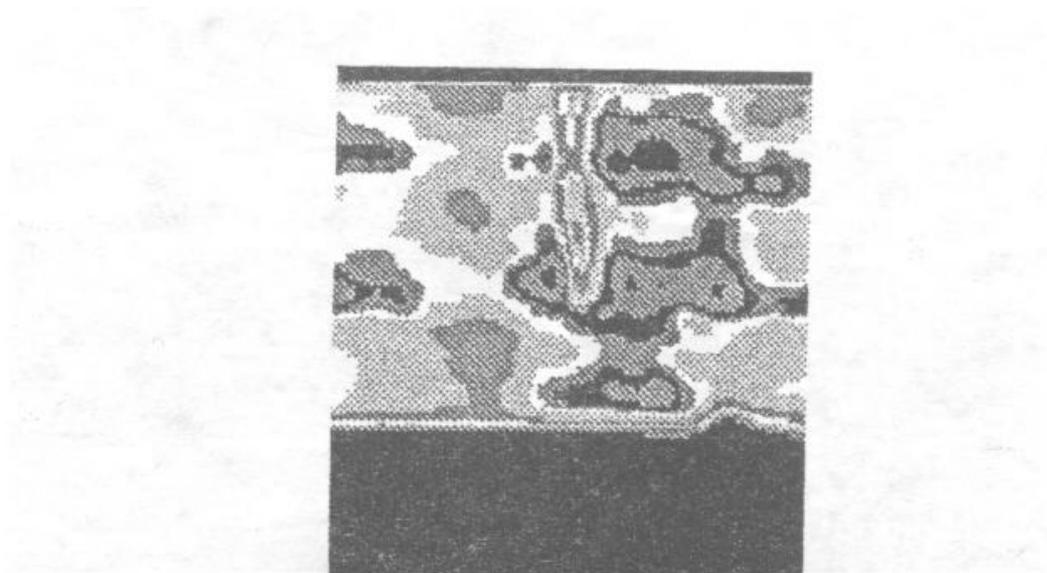


Fig. 6a - Mappa ultrasonora di un laminato rinforzato con tessuto in fibra di vetro, con propagazione della cricca.

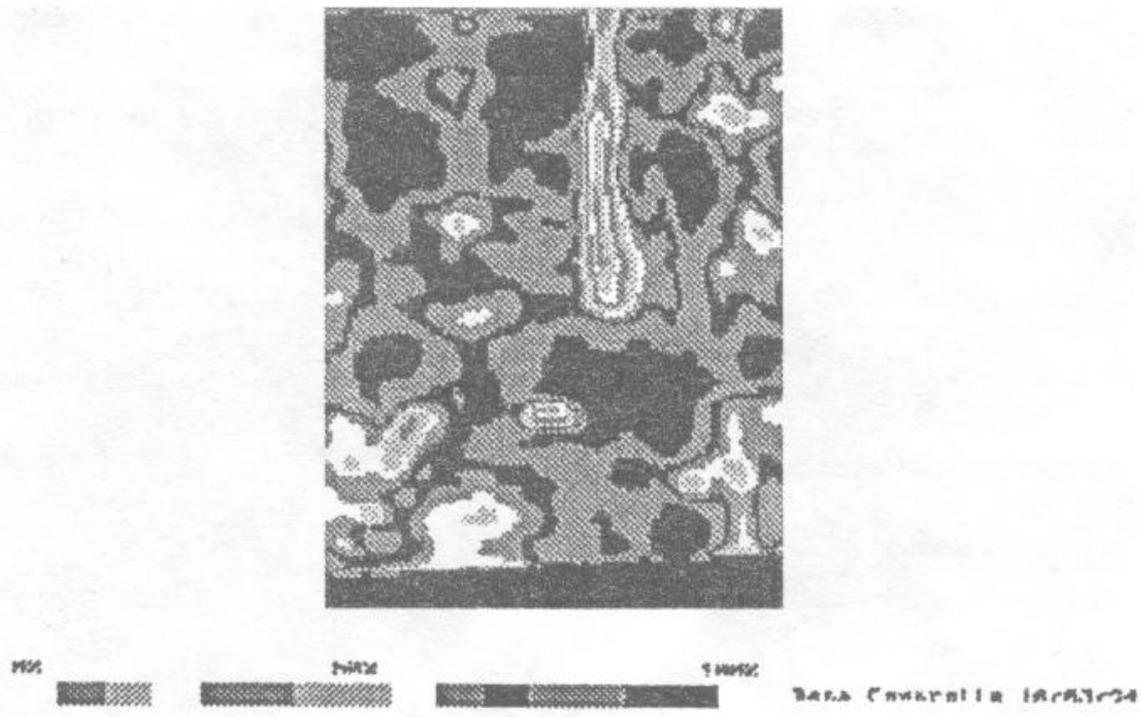


Fig. 7a - Mappa ultrasonora di un laminato rinforzato con tessuto in fibra di vetro, con propagazione della cricca.

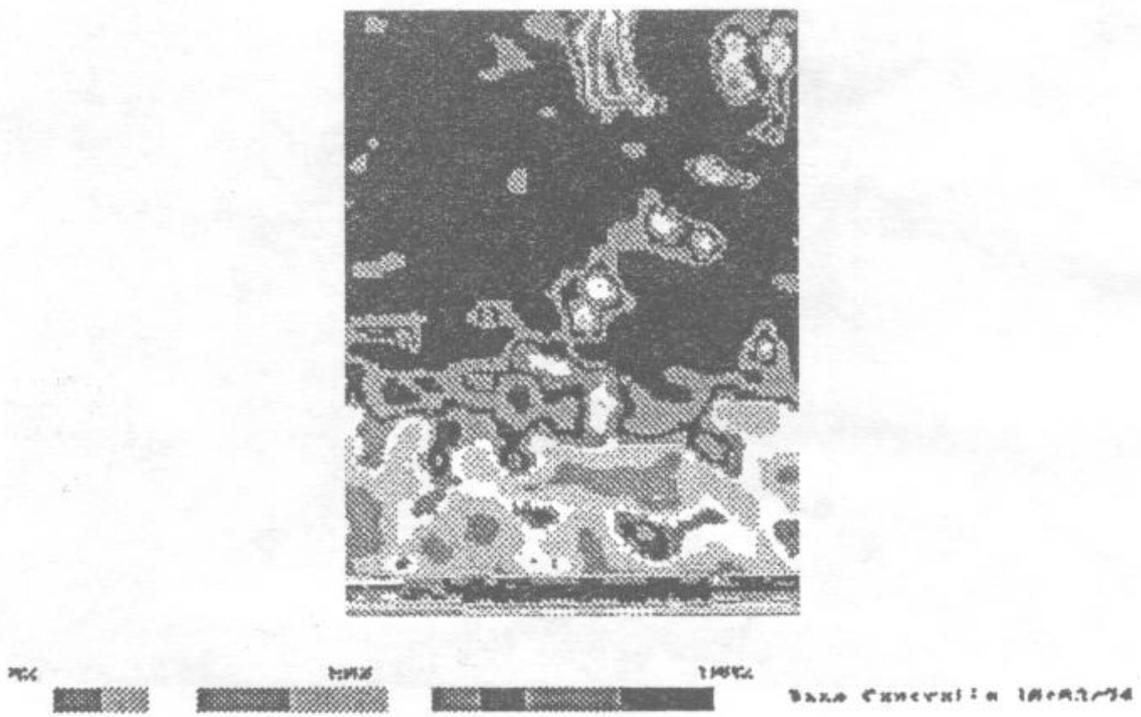
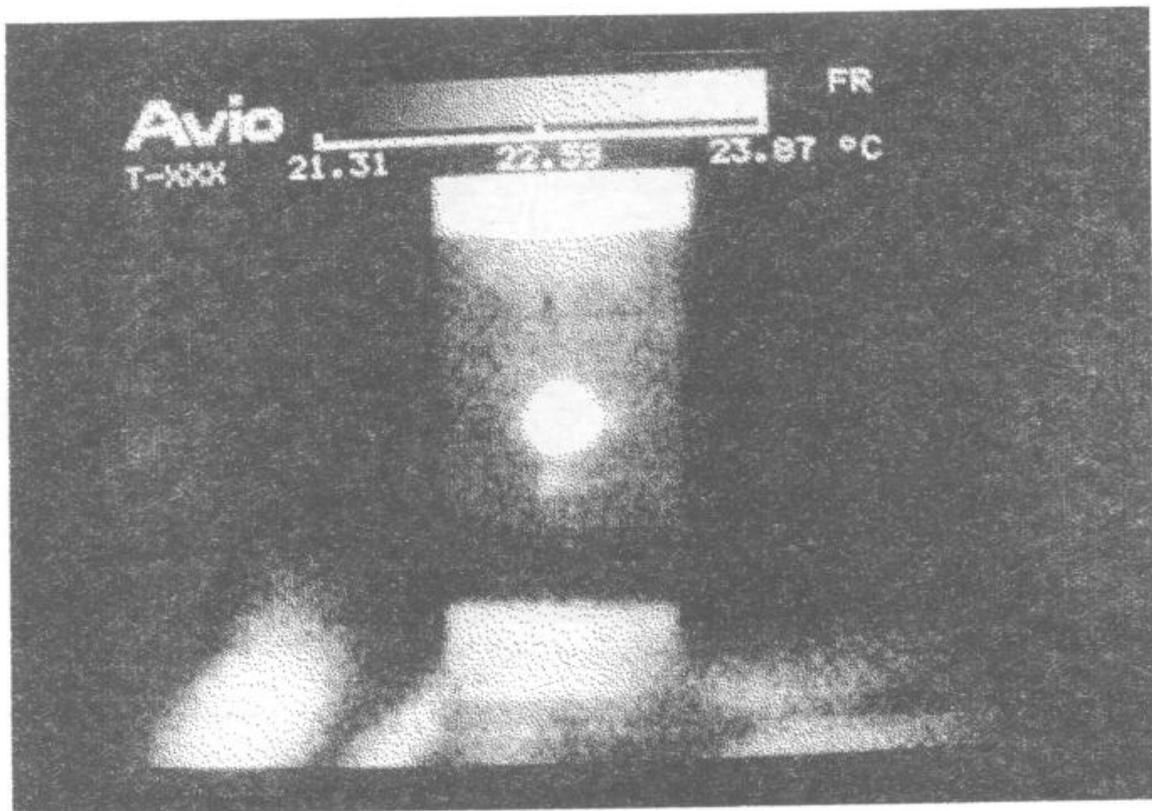


Fig. 8a - Mappa ultrasonora di un laminato senza propagazione dell'intaglio.



Figg. 3b, 4b - Immagine termografica di un laminato multistrato unidirezionale forato CFRP.

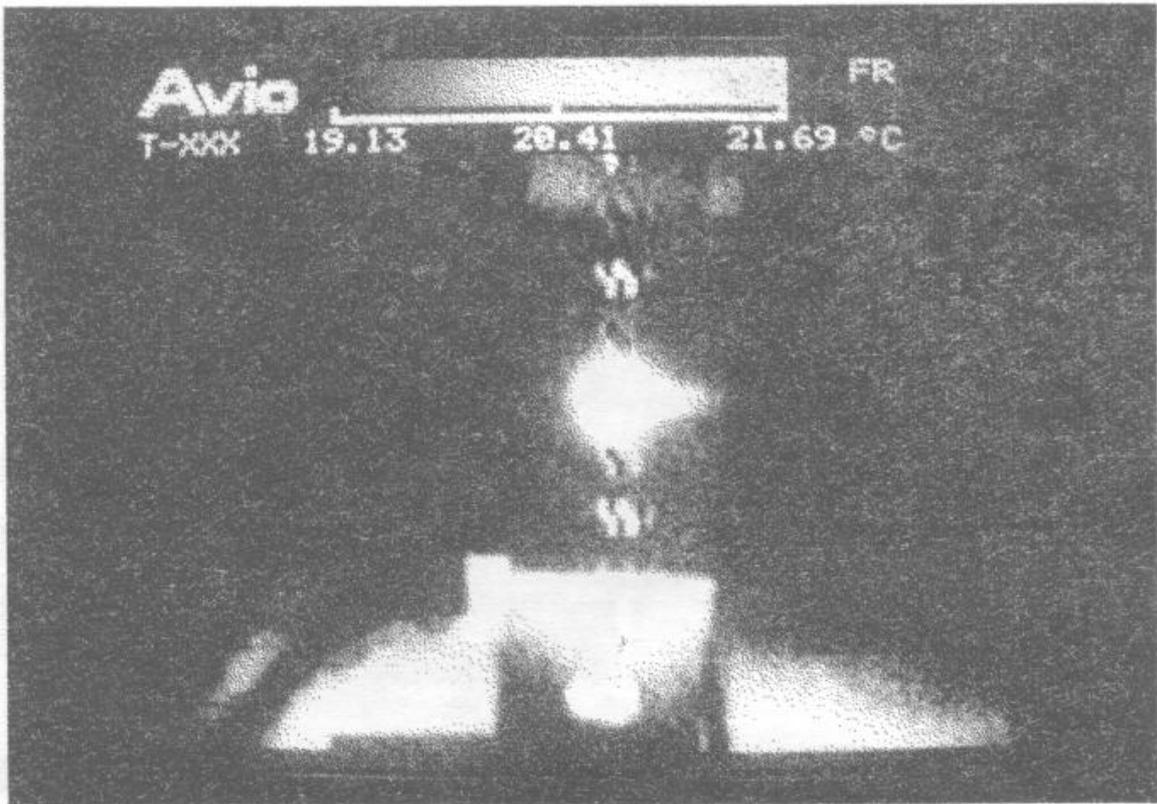


Fig. 5b - Mappa termica di un laminato multistrato CFRP con fibre orientate a $\pm 45^\circ$.

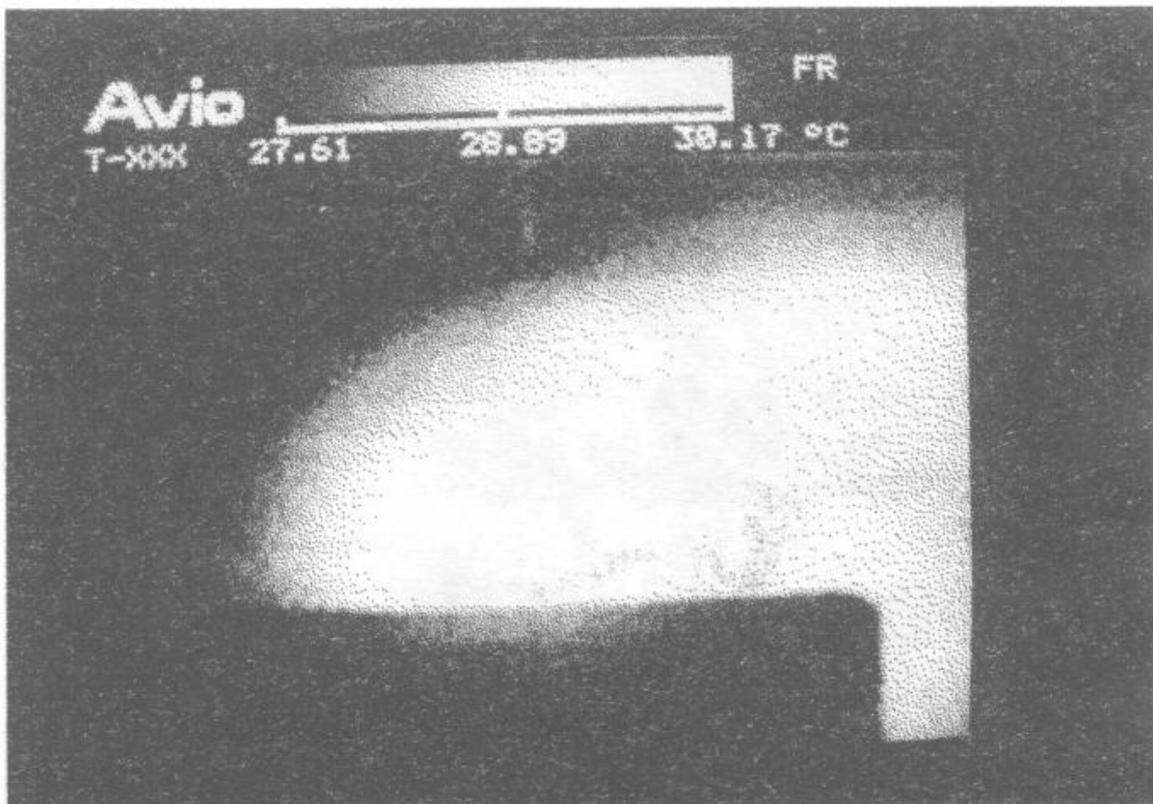


Fig. 6b - Mappa termica di un laminato rinforzato con tessuto in fibra di vetro, con propagazione dell'intaglio, non opacizzato.

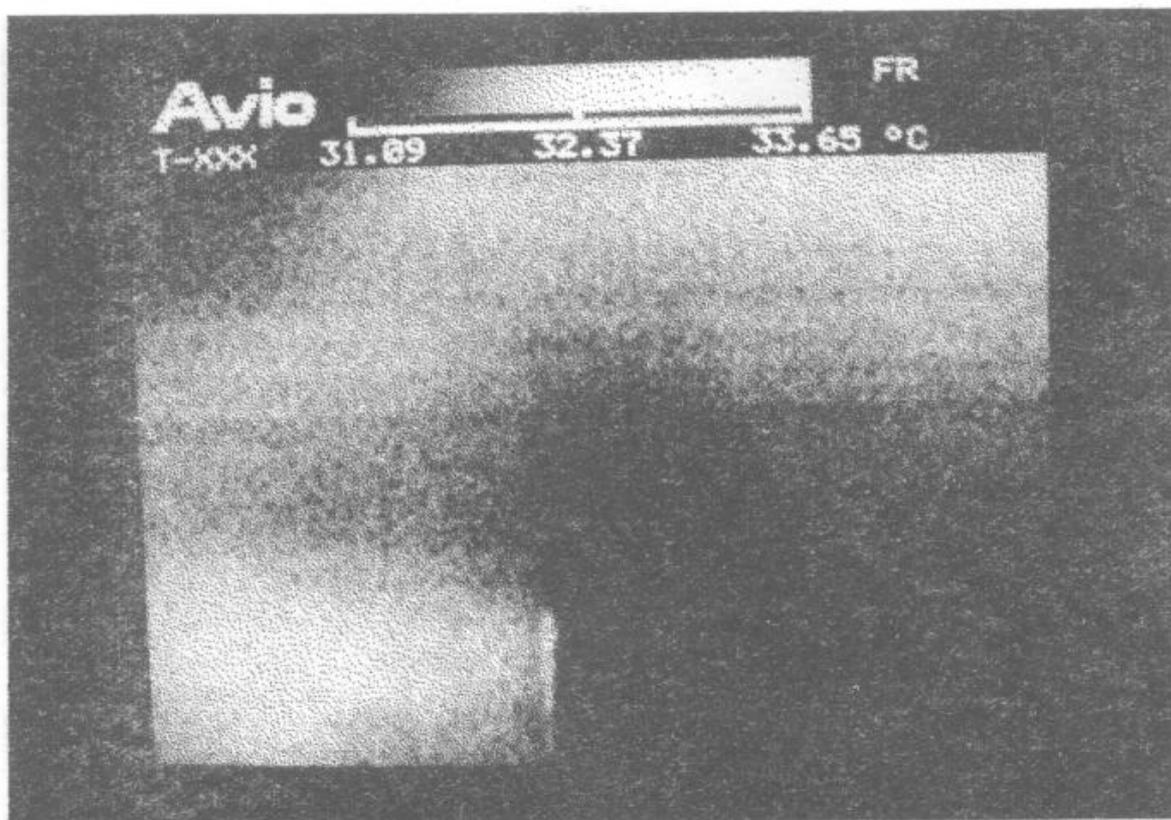


Fig. 7b - Mappa termica di un laminato rinforzato con tessuto in fibra di vetro opacizzato.

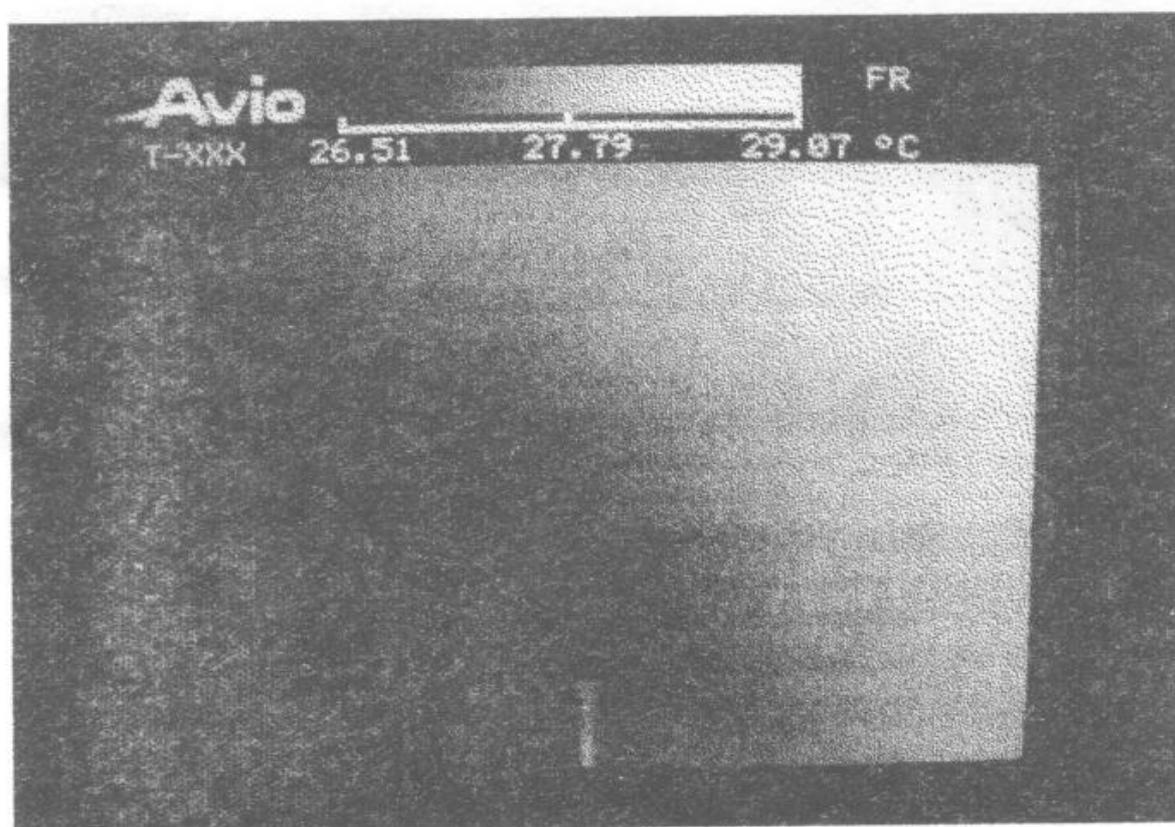


Fig. 8b - Immagine termografica di un laminato rinforzato in fibra di vetro, opacizzato, senza propagazione dell'intaglio.