

# **ANALISI DI IMMAGINI TERMOELASTICHE DA IMPATTI SU COMPOSITI IN FIBRA DI VETRO TRAMITE ANALISI DI PROFILO FRATTALE**

Carlo Santulli

Dipartimento di Ingegneria Elettrica  
Università di Roma “La Sapienza”, Via Eudossiana 18, 00184 Roma  
Tel.: 06-44585539 E-mail: [carlo.santulli@uniroma1.it](mailto:carlo.santulli@uniroma1.it)

## **SOMMARIO**

La visualizzazione del danneggiamento dopo impatto in compositi tessuti rinforzati con fibre di vetro può rappresentare un compito difficile, in particolare nel caso che le immagini del danneggiamento acquisite sulle due superfici, quella impattata e quella opposta, si sovrappongono alla presenza di irregolarità nella struttura del laminato.

In questo lavoro, laminati tessuti piani in fibra di vetro e poliestere (60% in peso di contenuto di fibre) sono stati impattati con energie da 5 a 15 Joule, e poi sottoposti a prove di fatica post-impatto per  $10^5$  cicli ad un livello di carico di  $105 \pm 35$  MPa (50% circa del carico a rottura del materiale). Per caratterizzare localmente il danneggiamento è stato utilizzato il C-Scan ultrasonoro. Il confronto con l'analisi termografica in tempo reale durante le prove di fatica col Deltatherm 1000 con l'ausilio del profilo frattale delle immagini ha consentito di chiarire meglio l'estensione del danneggiamento e di metterla in relazione con la struttura del composito tessuto.

## **PAROLE CHIAVE:**

termografia, C-Scan ultrasonoro, danneggiamento dopo impatto, vetroresina, profilo frattale

## **KEYWORDS:**

thermography, ultrasonic C-Scan, post-impact damage, fibreglass, fractal profile

## **INTRODUZIONE**

La visualizzazione del danneggiamento dopo impatto in compositi tessuti rinforzati con fibre di vetro può rappresentare un compito difficile, in particolare nel caso che le immagini del danneggiamento acquisite sulle due superfici, quella impattata e quella opposta, si sovrappongono alla presenza di irregolarità nella struttura del laminato. L'analisi termografica di stress (TSA) è un metodo per la caratterizzazione del danneggiamento durante prove di fatica, basato sulla presenza dell'effetto termoelastico

nel materiale [1]. Un particolare interesse può rivestire la sollecitazione dinamica di laminati pre-impattati a bassa velocità, quindi con danneggiamento non visibile ad occhio nudo. In questo caso specifico, le immagini termografiche non forniscono sempre informazioni sufficienti sulla presenza e la gravità del danneggiamento da impatto, tanto da richiedere in certi casi l'utilizzo di tecniche di analisi dell'immagine: al proposito, va in particolare osservato come le indicazioni fornite dalla termografia siano sempre più limitate ed incerte in dipendenza dalla profondità crescente dalla superficie [2]. Nel caso di compositi tessuti, l'architettura superficiale delle fibre può addirittura portare a false indicazioni od in ogni modo nascondere l'impatto, specie a bassa velocità, problema che può richiedere l'effettuazione di prove meccaniche post-impatto monitorate con tecniche non distruttive come l'analisi dell'emissione acustica [3].

Negli ultimi decenni, l'analisi del profilo frattale ha trovato una serie di applicazioni nel trattamento delle immagini, dalla topografia terrestre, in particolare legata alla configurazione delle coste, che risponde alla statistica frattale [4], alle descrizioni numeriche delle superfici di prodotti agroalimentari, come per esempio la microstruttura cellulare delle patate [5]. Più in generale, le distorsioni nelle strutture cellulari possono essere interpretate quantitativamente tramite l'analisi frattale, il che ha trovato applicazioni biomediche, per esempio in oncologia [6]. Sulla base delle precedenti considerazioni, e del fatto che la superficie di un composito tessuto può essere intesa, al fine dell'analisi termografica di stress, come costituita da maglie cellulari, è possibile ipotizzare che le modificazioni di tale struttura, dovute al danneggiamento, siano maggiormente visibili se al trattamento delle immagini termografiche è applicata l'analisi del profilo frattale, come nello scopo del presente lavoro.

## MATERIALI E METODI

In questo lavoro, laminati tessuti piani in fibra di vetro e poliestere (60% in peso di contenuto di fibre) sono stati impattati con energie da 5 a 15 Joule, e poi sottoposti a prove di fatica post-impatto per  $10^5$  cicli ad un livello di carico di  $105 \pm 35$  MPa, che rappresentava il 50% circa del carico a rottura del materiale. Micrografie e C-Scan sono state utilizzate anche per caratterizzare localmente il danneggiamento. L'analisi termografica in tempo reale durante le prove di fatica col Deltatherm 1000 (Stress Photonics, Inc.) con frequenza di prova di 10 Hz con l'ausilio del profilo frattale delle immagini ha consentito di chiarire meglio l'estensione del danneggiamento e di metterla in relazione con la struttura del composito tessuto. L'analisi frattale delle immagini è stata effettuata col programma Fractalyse (Théma), basato su un sistema di funzioni iterative calcolate sulle immagini bianconero ad 1 bit, ed è basata sulla valutazione della distribuzione della massa (considerando come “piene” le zone nere e “vuote” le zone bianche) del provino ad una certa distanza dal baricentro, assunto come corrispondente col centro dell'area impattata. L'area esaminata con l'analisi frattale è di circa 50x25 mm.

## RISULTATI

I laminati tessuti esaminati in questo studio, la cui struttura teorica è data in Figura 1, sono stati impattati con energie abbastanza lontane da quella di penetrazione e quindi ai limiti della rilevabilità ovvero del BVID (Barely Visible Impact Damage), allo scopo di misurare il limite inferiore di sensibilità delle tecniche non distruttive utilizzate. Per maggiore precisione, occorre rilevare che la massima energia d'impatto applicata sui laminati, uguale a 15 Joule, corrisponde sulla sezione d'impatto ad un'energia areale di 120 kJ/m<sup>2</sup>. Tipicamente compositi in fibra di vetro con questo tenore di fibra hanno un'energia di penetrazione per impatto nell'ordine dei 200 kJ/m<sup>2</sup> [7-8].

Occorre precisare innanzitutto che, come evidenziato in precedenti studi sull'impatto dei compositi tessuti, gli incroci trama-ordito (cross-over), come anche le variazioni statistiche della struttura superficiale e sub-superficiale del laminato hanno influenza sulla propagazione dell'impatto e dal danneggiamento ottenuto [9]. In altre parole, questo significa che la posizione relativa della testa impattante nei confronti degli incroci trama-ordito, fattore che logicamente non è controllabile in un impatto, in particolare ove si vogliano riprodurre il più possibile condizioni reali e quindi statistiche di sollecitazione dinamica puntuale. Questo può essere osservato confrontando le immagini ottenute dal C-Scan ultrasonoro per laminati impattati con diverse energie (Figura 2): a 5 Joule il danneggiamento è scarsamente visibile, mentre c'è una chiara e crescente evidenza dell'area di impatto per le energie intermedie, 7.5 e 10 Joule, a 15 Joule essa appare piuttosto "nascosta" dalla trama, presumibilmente perché il centro della testa impattante e quindi l'inizio dell'evento d'impatto avviene in una zona di avvallamento del provino.

Le corrispondenti immagini termoelastiche (Figura 3), mentre danno sostanzialmente la stessa evidenza del danneggiamento osservata col C-Scan sui laminati impattati con le tre energie minori (5, 7.5 e 10 Joule). Al contrario, mostrano una maggiore evidenza dei margini dell'area danneggiata per impatto, specie quello inferiore, dove una frattura è evidente dalla mappa termoelastica. Questo ha suggerito che fosse possibile con un trattamento dell'immagini secondo i coefficienti frattali ottenere una maggiore distinzione tra i livelli di danneggiamento delle varie immagini: all'uopo le mappe termoelastiche sono state trattate per trasformarle in immagini in bianco e nero ad 1 bit (Figura 4).

L'indagine frattale ha consentito di evidenziare attraverso la comparazione col riferimento preso in zona non impattata, l'effetto dell'impatto sulle immagini: in particolare in Figura 5a si vede come ci sia un'anomala distribuzione della massa a notevole distanza dal baricentro del laminato (tra 0.8 e 0.95, 1 rappresentando il limite normalizzato dell'area in osservazione), nel caso dell'impatto a 15 Joule, corrispondente all'effetto della zona interessata dalla fessura osservata in Figura 4, la cui dimensione è più quantificabile dal numero dei pixel e risulta uguale a circa 7 mm.

Passando poi alla distribuzione della massa nelle diverse regioni a crescente distanza dal baricentro (Figura 5b), si può notare come l'effetto dell'impatto sia mascherato

dalle irregolarità della struttura (es. picco a circa 0.17) sul laminato impattato a 5 Joule, mentre un'altra area che si distanzia molto da quanto osservato col riferimento si può osservare a 15 Joule (tra 0.32 e 0.5) suggerendo la presenza di un'area danneggiata molto più grande di quanto osservabile con le mappe termoelastiche.

## CONCLUSIONI

L'osservazione dell'area danneggiata per impatto a bassa velocità (BVID) su laminati compositi tessuti in fibra di vetro e poliestere con diverse tecniche (C-scan ultrasonoro, mappe termoelastiche, analisi di profilo frattale) ha permesso di osservare l'effetto sinergico delle diverse metodologie utilizzate. Si tratta di uno studio preliminare, che suggerisce tuttavia possibili procedure per minimizzare l'effetto della struttura del laminato tessuto nel mascherare il danneggiamento ottenuto per impatto.

## BIBLIOGRAFIA

1. Dulieu-Barton JM, Stanley P, Development and application of thermoelastic stress analysis, *Journal of Strain Analysis* **33** (2), 1998, 93-104.
2. Ball, RJ, Almond DP, The detection and measurement of impact damage in thick carbon fibre reinforced laminates by transient thermography, *NDT & E International* **31** (3), 1998, 165-173.
3. Santulli C, Cantwell WJ, Characterisation of the damage area in glass fibre reinforced composites using AE planar localisation, *World NDT Conference, Roma, October 2000*.
4. Huang J, Turcotte DL, Fractal image analysis: application to the topography of Oregon and synthetic images, *Journal of the Optical Society of America A* **7** (6), 1990, 1124-1130.
5. Quevedo R, Carlos LG, Aguilera JM, Cadoche L, Description of food surfaces and microstructural changes using fractal image texture analysis, *Journal of Food Engineering* **53** (4), 2002, 361-371.
6. Smith TG Jr, Marks WB, Lange GD, Sheriff WH Jr, Neale EA, A fractal analysis of cell images, *Journal of Neuroscience Methods* **27** (2), 1989, 173-180.
7. Thanomsilp C, Hogg PJ, Penetration impact resistance of hybrid composites based on commingled yarn fabrics, *Composites Science and Technology* **63** (3), 2003, 467-482.
8. Wakeman MD, Cain TA, Rudd CD, Brooks R, Long AC, Compression moulding of glass and polypropylene composites for optimised macro- and micro-mechanical properties - 1. Commingled glass and polypropylene, *Composites Science and Technology*, **58** (12), 1998. 1879-1898.
9. Santulli C, Impact damage characterisation of thermoplastic matrix composites using transmission transient thermography, *Nondestructive Testing and Evaluation* **19** (3), 2003, 79-90.

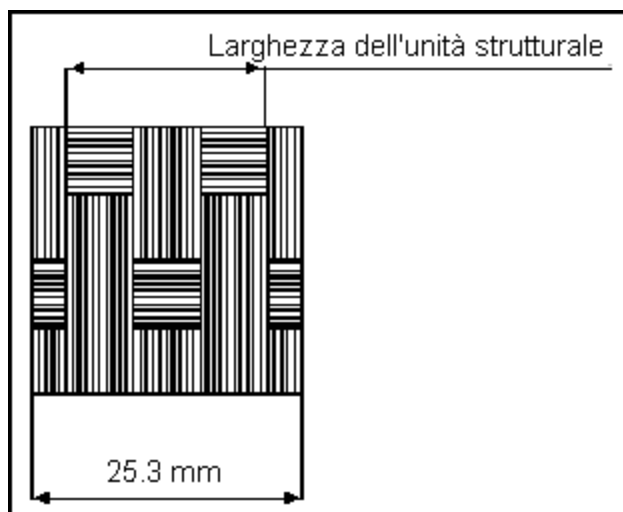


Figura 1 Struttura della superficie del laminato tessuto

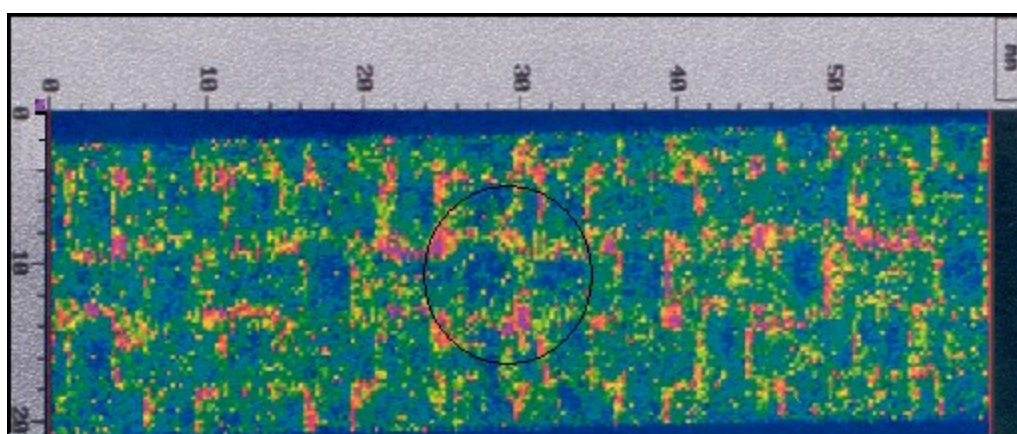


Figura 2a C-Scan ultrasonoro della superficie di laminato impattato a 5 Joule

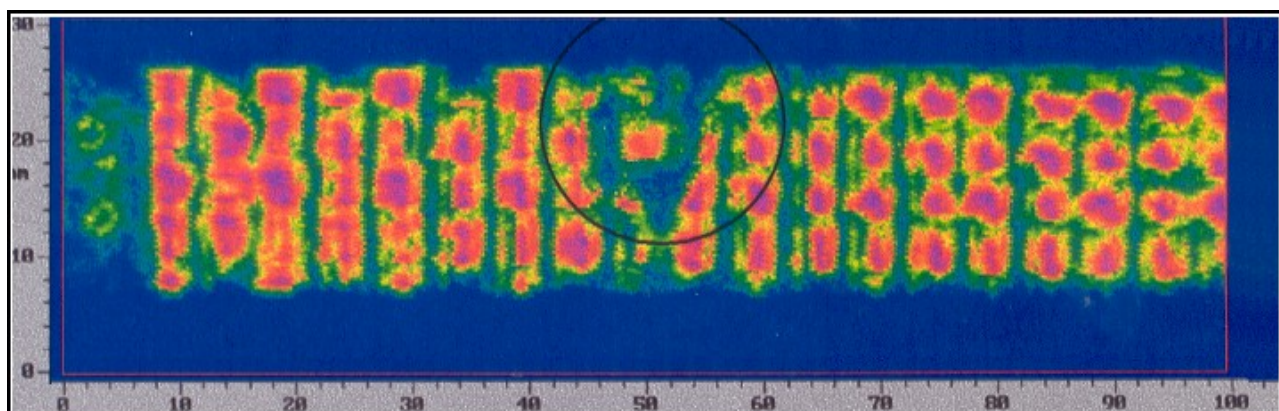


Figura 2b C-Scan ultrasonoro della superficie di laminato impattato a 7,5 Joule

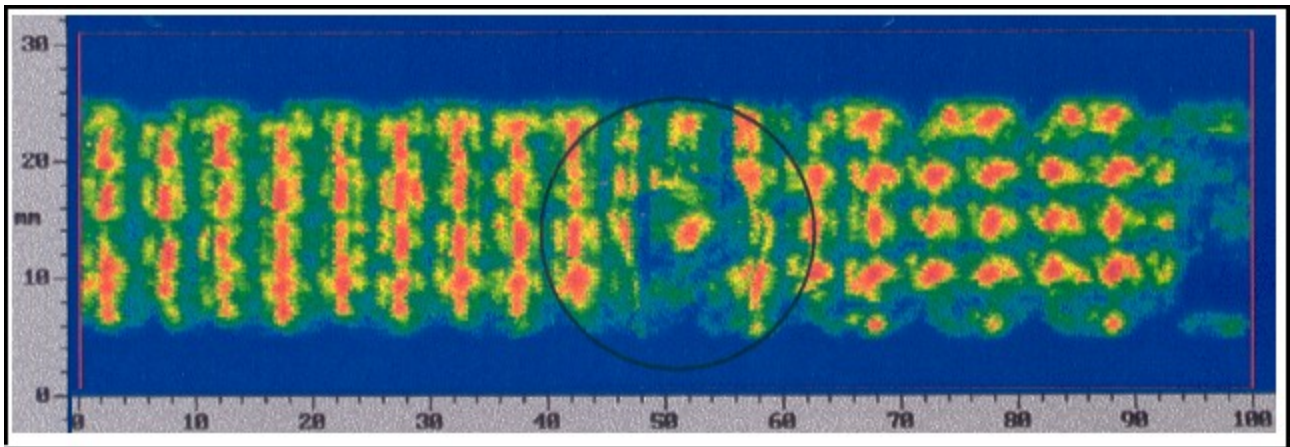


Figura 2c C-Scan ultrasonoro della superficie di laminato impattato a 10 Joule

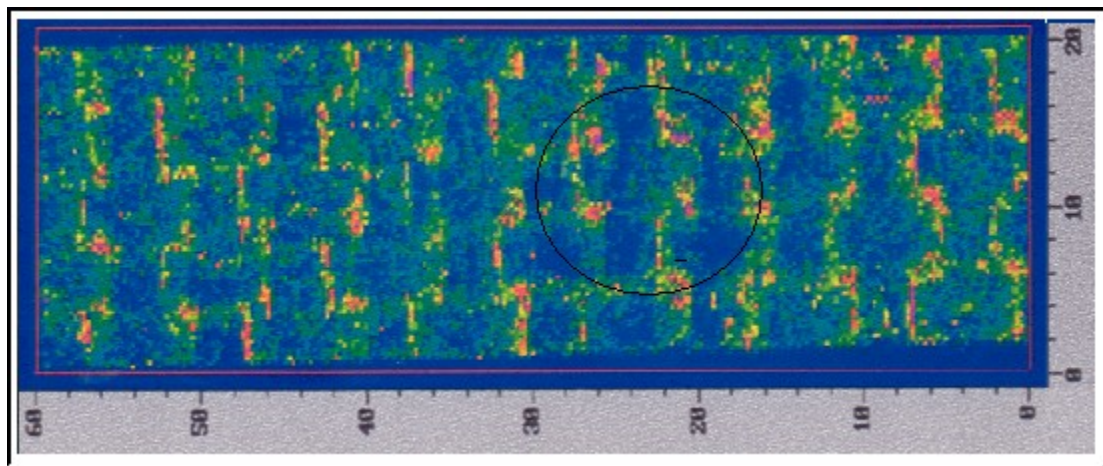


Figura 2d C-Scan ultrasonoro della superficie di laminato impattato a 15 Joule

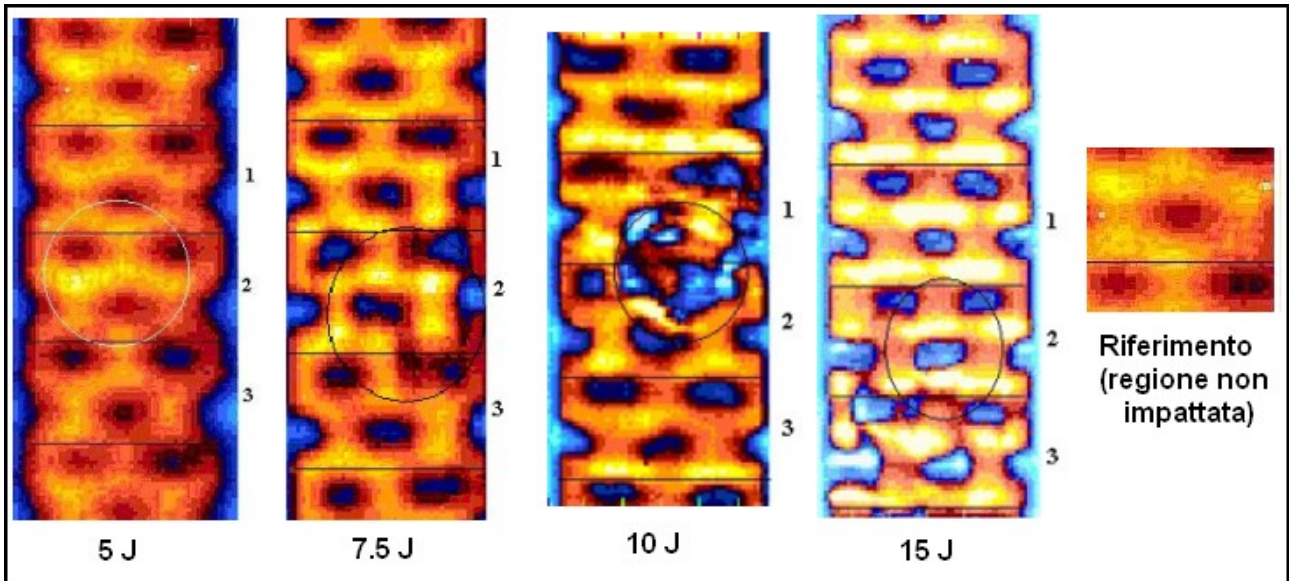


Figura 3 Mappe termoelastiche delle superfici dei laminati impattati

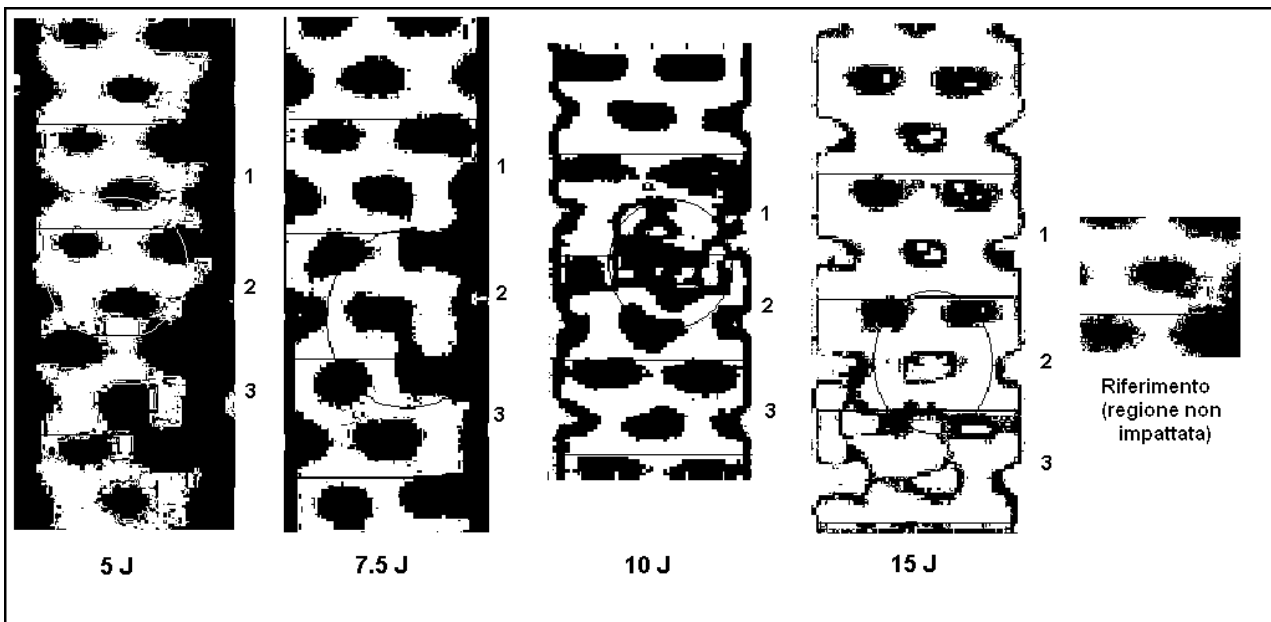


Figura 4 Mappe termoelastiche trasformate a 1 bit per l'analisi frattale

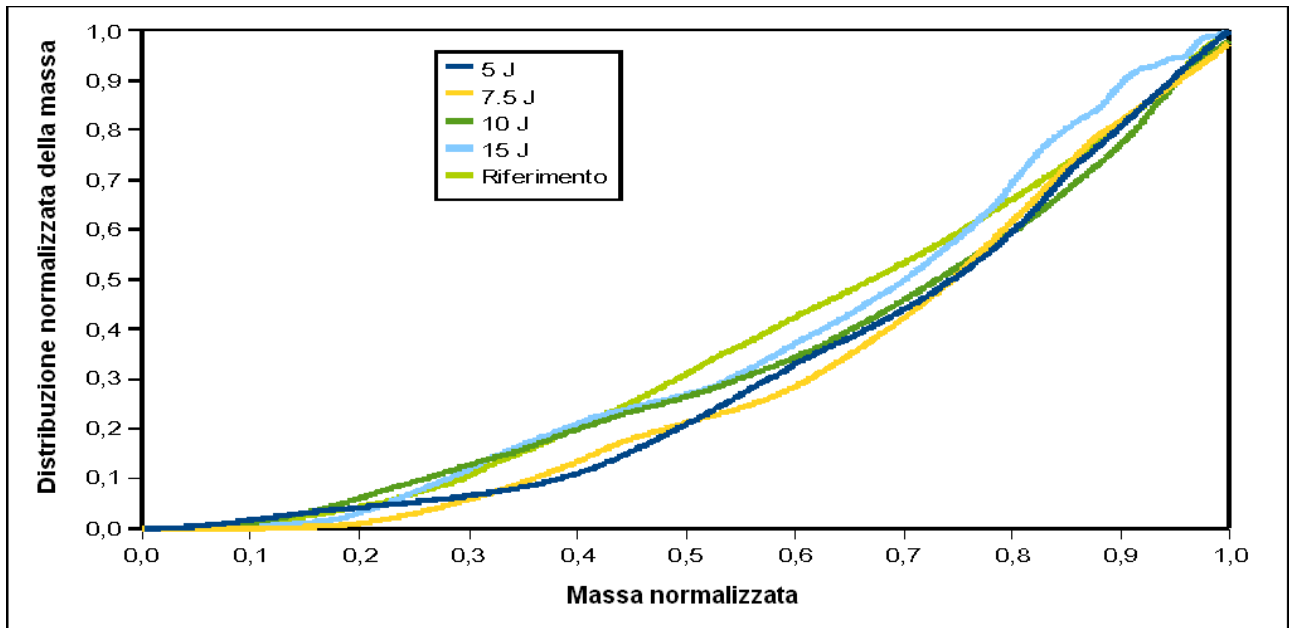


Figura 5a Distribuzione cumulativa di massa a partire dal baricentro dei laminati

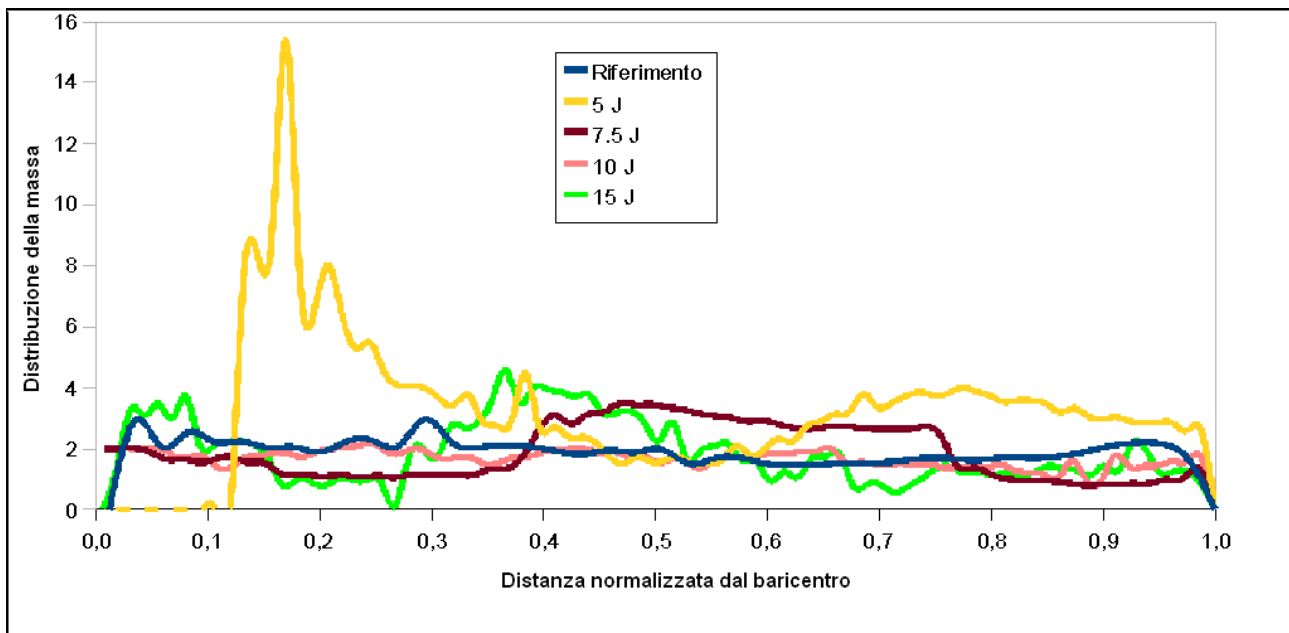


Figura 5b Distribuzione regionalizzata della massa dal baricentro dei laminati