



Centro di Progettazione, Design & Tecnologie dei Materiali

Materials and Structures Engineering DEPARTMENT

Technologies and Processes AREA

Orazio Manni, Rocco Rametta, Simona Corigliano, Silvio Pappadà, Alessandra Passaro

Compositi Ibridizzati con SMA (Shape Memory Alloys) per
applicazioni strutturali in Aeronautica

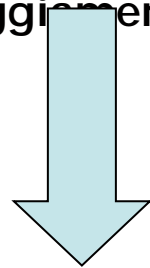
Expo-Compositi

Modena, 14 Ottobre 2009

Laminati compositi ibridi con elevata damage tolerance

Nel 1970 l'USAF, (United States Air Force) iniziò a sviluppare una filosofia di progettazione secondo il principio della "Damage tolerance" al fine di evitare un certo tipo di cedimenti strutturali e di innesco di cricche incontrati in aerei militari.

Damage tolerance
"capacità di sopportare un danneggiamento"

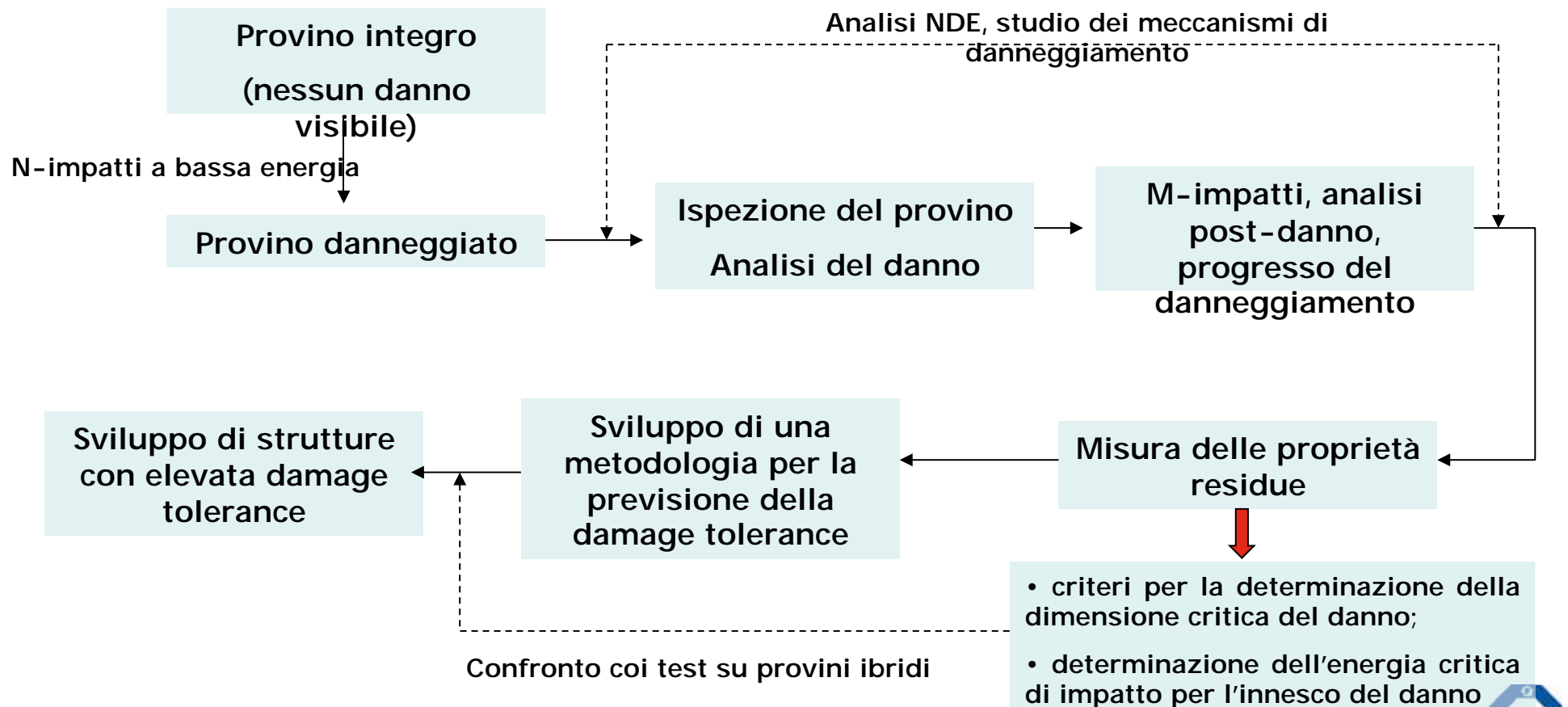


- effetto di un impatto: quali dimensione, forma e velocità di un oggetto impattante possono causare danni strutturali?
- resistenza residua dopo un impatto;
- resistenza a fatica.

- Corretta selezione dei materiali e possibilità di controllo;
- Controllo dei livelli di stress;
- Utilizzo di criteri di progettazione per la resistenza alla frattura;
- Controllo del processo produttivo;
- Controllo di qualità.

Laminati compositi ibridi con elevata damage tolerance

Nello studio svolto si è focalizzata l'attenzione sulle proprietà di resistenza dei compositi a impatti a bassa energia, e sulla possibilità di aumentare tale resistenza attraverso l'utilizzo delle leghe a memoria di forma. Inoltre attraverso metodologie di controllo non distruttive (NDE) si sono analizzati i fenomeni di avanzamento del danneggiamento.



Laminati compositi ibridi con elevata damage tolerance

Perchè le leghe a memoria di forma?

Diversi lavori presenti in letteratura dimostrano come l'introduzione di filamenti SMA superelastici aumentano la resistenza a impatto di compositi rinforzati con fibre di vetro, specialmente alle basse energie:

- 1.S. Pappadà et al. Embedding of superelastic shape memory alloy wires into composite structures: evaluation of impact properties. J of Mat Eng and Performances 2009 18 (5-6): 522-530.
- 2.S. Pappadà et al. Mechanical and vibration characteristics of laminated composite plates embedding shape memory alloy superelastic wires. J of Mat Eng and Performances 2009 18 (5-6): 531-537.
- 3.Ki-Weong Kang, Jung-Kyu Kim. Effect of shape memory alloy on impact damage behaviour and residual properties of glass/epoxy laminates under low temperature. Comp Struct 2009 88 (3): 455-460.
- 4.V. Birman et al. Global Strength of Hybrid Shape Memory Composites Plates Subjected to Low-Velocity Impact. J of Reinforced Plast and Comp 1997 16: 791-809.

Comunque i meccanismi legati all'incremento delle proprietà a impatto dei compositi mediante ibridizzazione con materiali SMA non sono stati completamente chiariti.

Tale incremento di resistenza a impatto deve essere sicuramente correlato alle proprietà uniche delle SMA

Laminati compositi ibridi con elevata damage tolerance

Le leghe a memoria di forma “Shape memory alloys (SMAs)” sono “materiali intelligenti” con proprietà di attuazione, monitoraggio e controllo.

Le SMAs offrono potenzialità molto attraenti in quanto :

- ü possono generare elevate deformazioni (sino al 10%) in modo reversibile;
- ü possono generare un elevato recovery stress;
- ü possiedono elevate proprietà di smorzamento;
- ü possibilità di immagazzinare elevate energie.

La realizzazione di strutture con integrati materiali a memoria di forma può aprire nuove prospettive per lo sviluppo di strutture ingegneristiche con possibilità di modifica della propria forma e rigidezza, con elevate proprietà di smorzamento delle vibrazioni o in generale con altre proprietà innovative.

Laminati compositi ibridi con elevata damage tolerance

Infatti le leghe a memoria di forma, dopo un'apparente deformazione plastica, ritornano alla loro forma originale quando sono riscaldate. Questi stessi materiali, in un certo range di temperatura, possono essere deformati sino a circa il 10%, per poi ritornare nuovamente alla loro forma originale una volta rimosso il carico.

Questi due effetti prendono rispettivamente il nome di:

“memoria di forma” e “superelasticità”

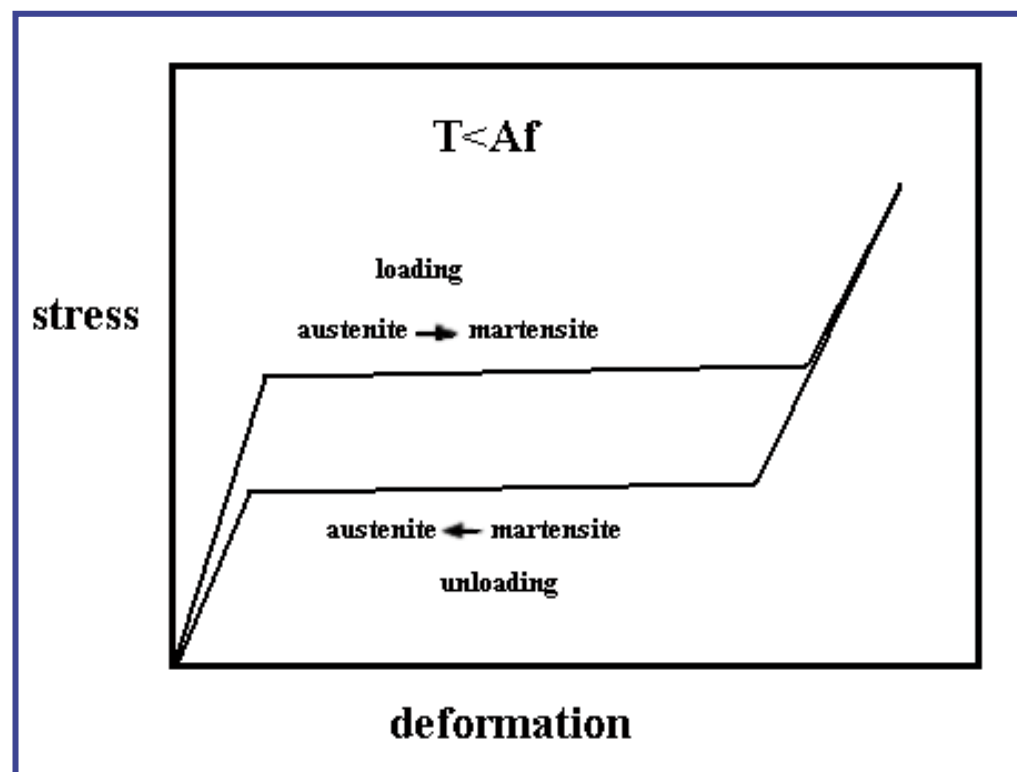
L'effetto memoria di forma può essere utilizzato per generare un'attuazione e/o una forza, mentre la superelasticità permette accumulo di energia.

In particolare le SMA conservano le loro caratteristiche particolare anche sotto forma di filamenti sottili: da qui la possibilità della loro

Laminati compositi ibridi con elevata damage tolerance

Effetto superelastico

Nel nostro studio si sono integrati dei filamenti superelastici all'interno di un composito rinforzato con fibre di vetro.



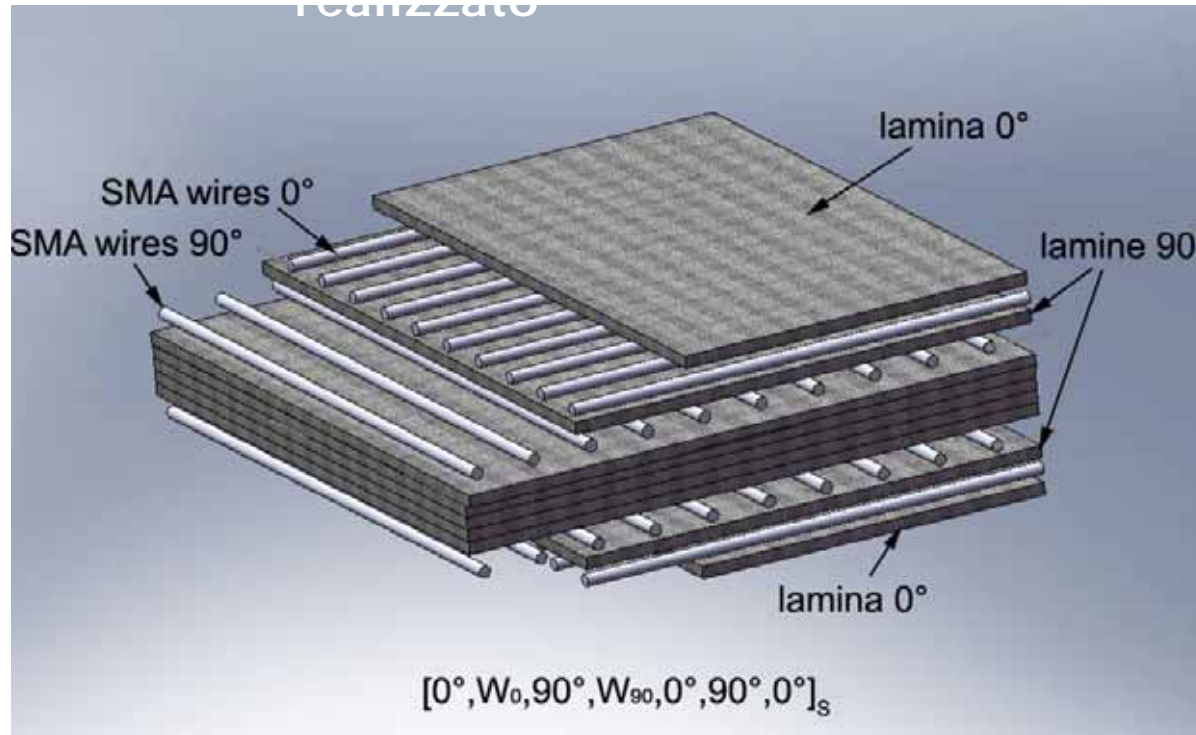
Con l'effetto superelastico è possibile immagazzinare e recuperare grandi deformazioni (anche del 10-15%) a sforzo costante.

Laminati compositi ibridi con elevata damage

tolerance

Caratteristiche principali del laminato

realizzato



Contenuto SMA: 1% by v.

Fili superelastici (D=0.1mm)
forniti da SAES Getters

Spessore finale: 3mm

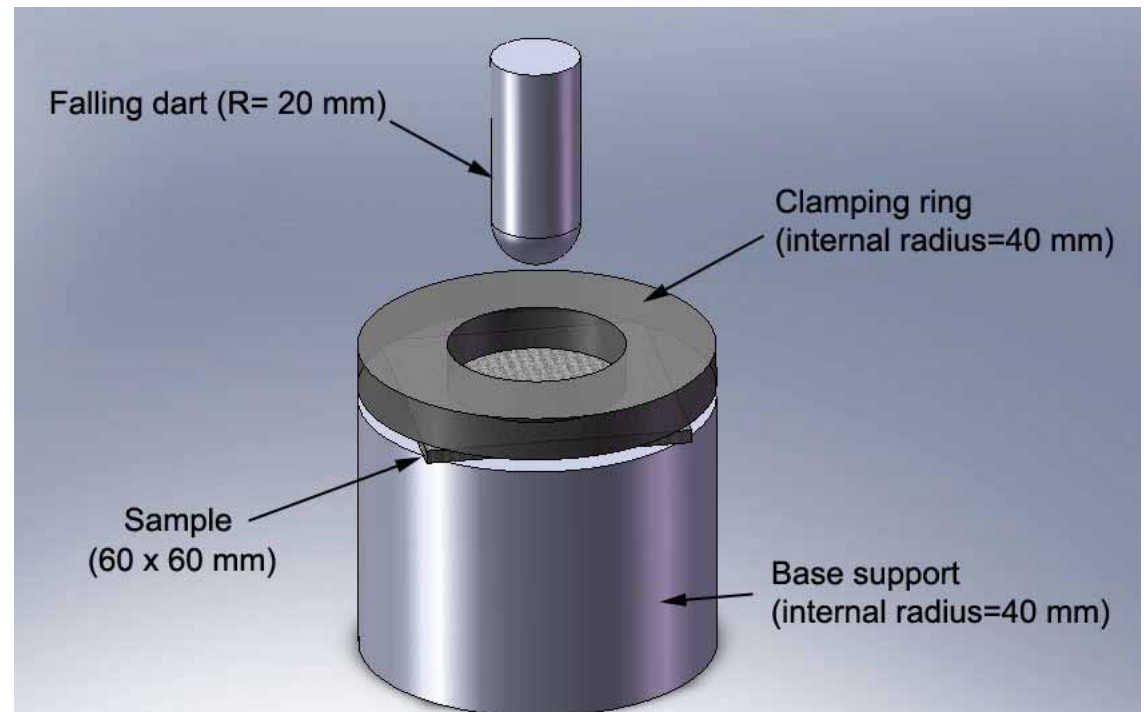
Processo: Vacuum Assisted Resin Infusion

Matrice: Resina vinilestere Distitron VE370SC

Rinforzo: 10 strati di tessuto di vetro (plain 5.5/6.3)

Laminati compositi ibridi con elevata damage tolerance

I campioni compositi tradizionali e quelli ibridizzati con le SMA sono stati testati con un impattatore a caduta di grave (Fractovis Plus).



Caratteristiche principali dei test:

- massa dell'impattatore: 2 kg;
- massima velocità di impatto: 25 m/s.

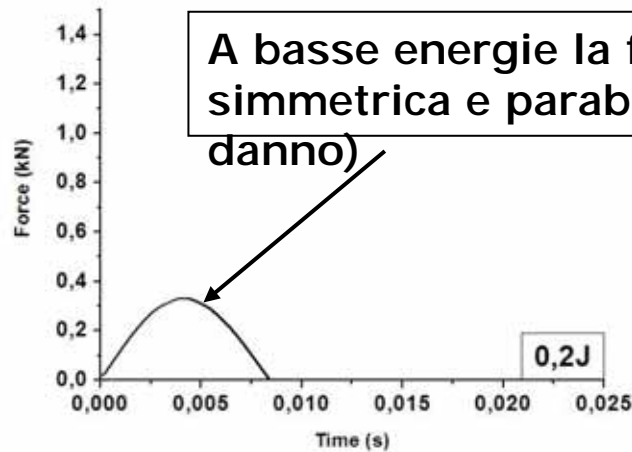
Laminati compositi ibridi con elevata damage

tolerance

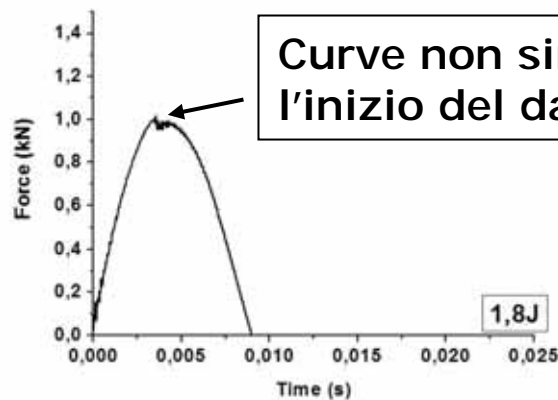
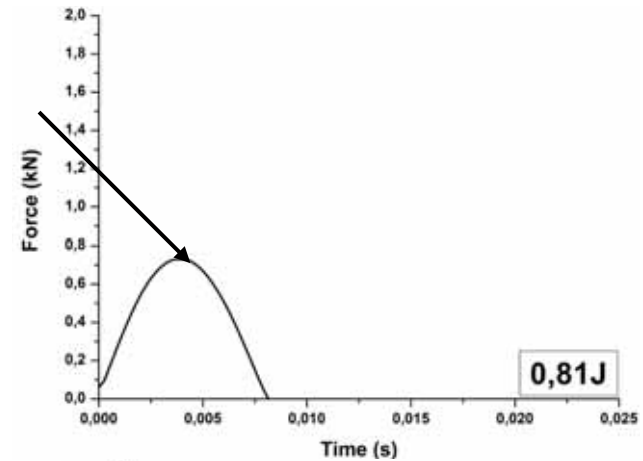
1° risultato: l'integrazione delle SMA aumenta il livello di energia minimo richiesto per l'innescio del danno

Campione non ibridizzato

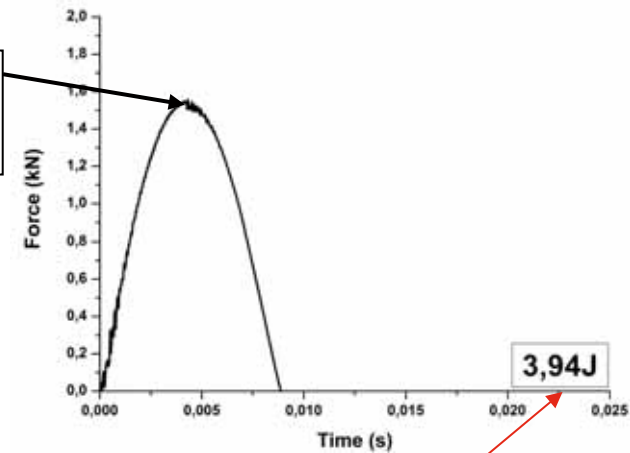
Campione ibrido



A basse energie la forma delle curve è simmetrica e parabolica (nessun danno)



Curve non simmetriche denotano l'inizio del danno



L'integrazione delle SMA raddoppia il livello di energia richiesto per l'innescio del danno

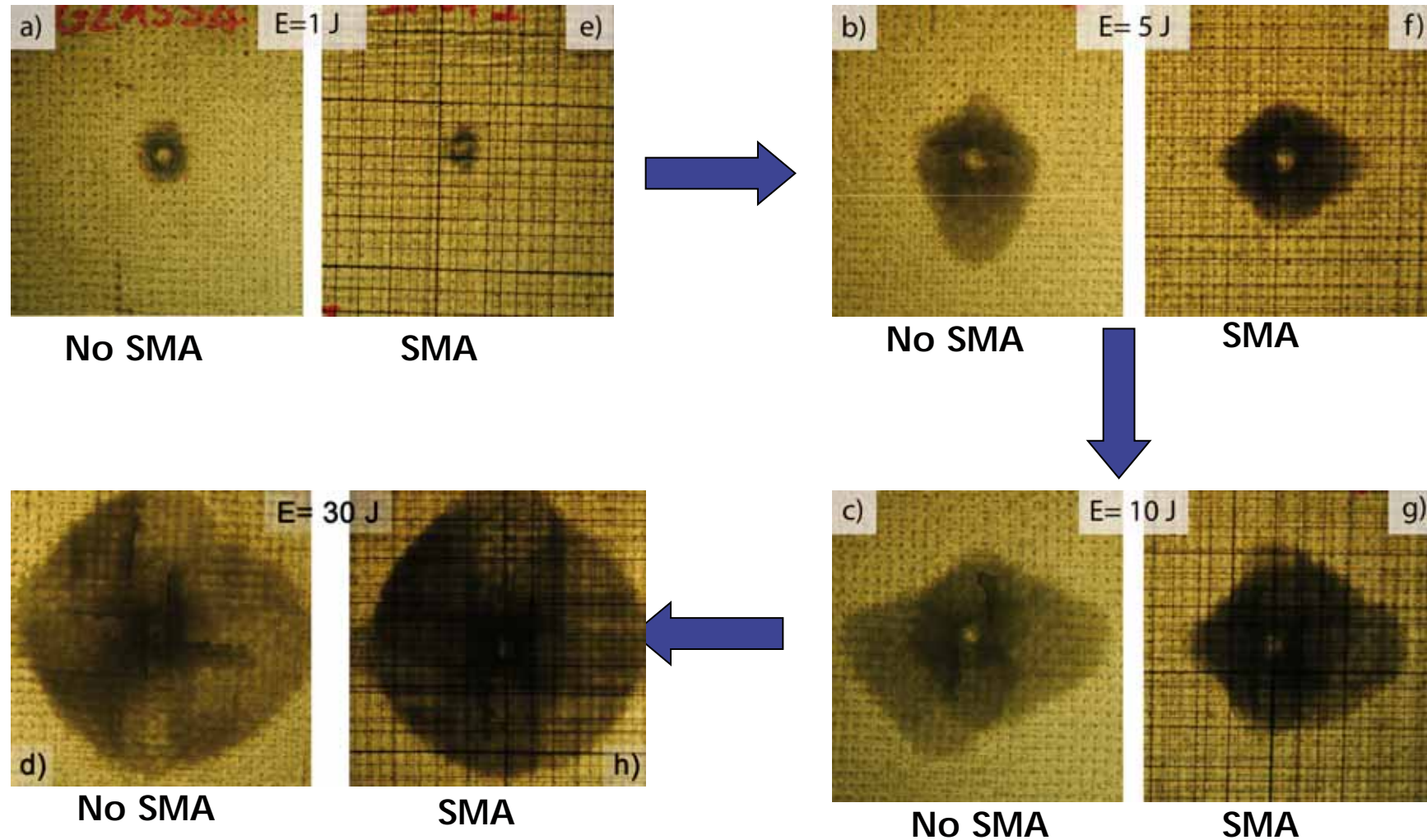
Laminati compositi ibridi con elevata damage tolerance

Al fine di comprendere meglio l'effetto dell'ibridizzazione sulle proprietà a impatto del composito è stato analizzato l'avanzamento del danno attraverso metodologie di analisi non distruttive.

Ad esempio attraverso **l'ispezione visiva** dei campioni danneggiati effettuata su uno sfondo illuminato, è stata valutata la riduzione della trasmissione della luce in seguito a difetti quali cricche nella matrice e delaminazioni.

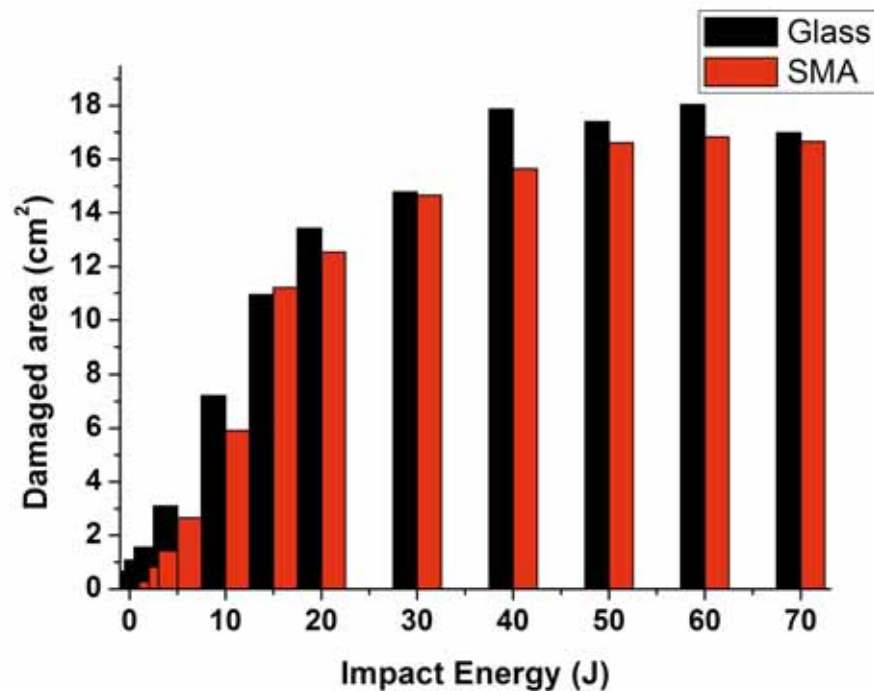
In questo modo ad esempio è stato possibile valutare l'area danneggiata in funzione dell'energia di impatto, per entrambe le tipologie di provini.

Laminati compositi ibridi con elevata damage tolerance



Laminati compositi ibridi con elevata damage tolerance

2° risultato: l'integrazione delle SMA diminuisce l'estensione della superficie danneggiata. Questa influenza è maggiormente visibile per bassi livelli di energia.

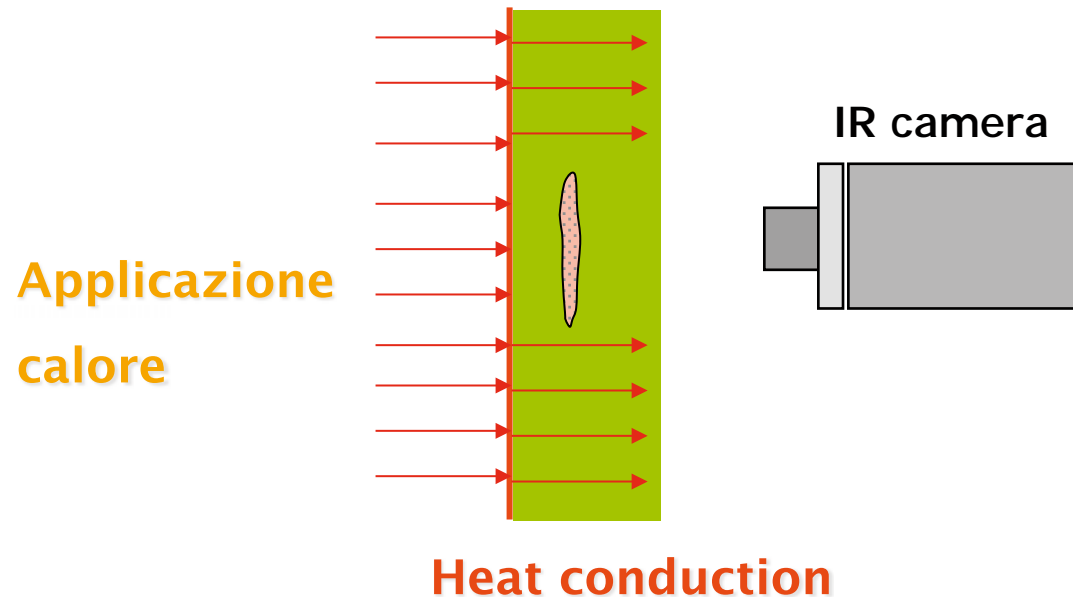


Impact Energy (J)	Damaged area, No SMA (cm ²)	Damaged Area, SMA (cm ²)
1	0.663	0.281 (-58%)
2	1.084	0.819 (-24%)
3	1.558	1.426 (-8.5%)
5	3.095	2.658 (-14%)

Valori dell'estensione dell'area danneggiata in funzione dell'energia di impatto.

Laminati compositi ibridi con elevata damage tolerance

Successivamente i provini impattati sono stati analizzati mediante analisi termografica per trasmissione.

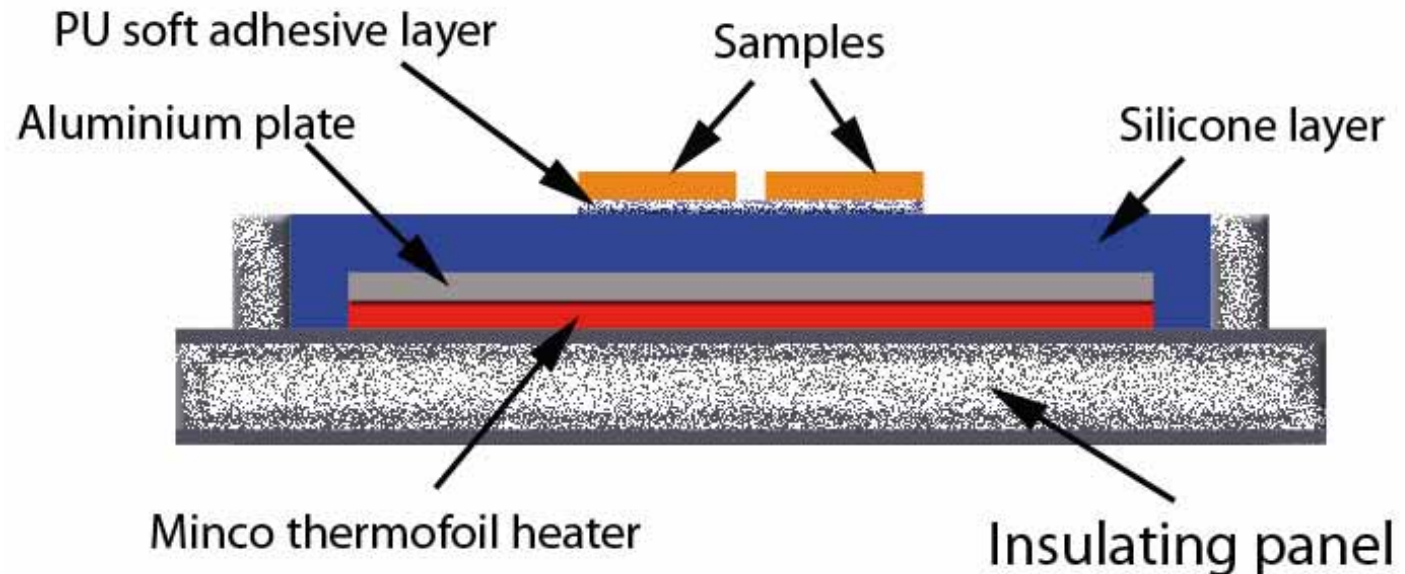


In questo caso la presenza di difetti all'interno del materiale si oppone alla propagazione del calore attraverso lo spessore del provino.

Per questo motivo le aree in corrispondenza delle zone più danneggiate appaiono più fredde delle zone danneggiate

Laminati compositi ibridi con elevata damage tolerance

Al fine di ottenere una distribuzione uniforme di calore è stato realizzato il set-up sperimentale schematizzato in figura. Si è utilizzata una resistenza planare siliconica, che a sua volta è stata incollata a una lastra di alluminio per una maggiore uniformità della distribuzione di calore.



La piastra di alluminio e la resistenza planare sono state inglobate in una colata di silicone: in questo modo, la superficie soffice del silicone assicura il contatto con tutti i punti della superficie dei campioni

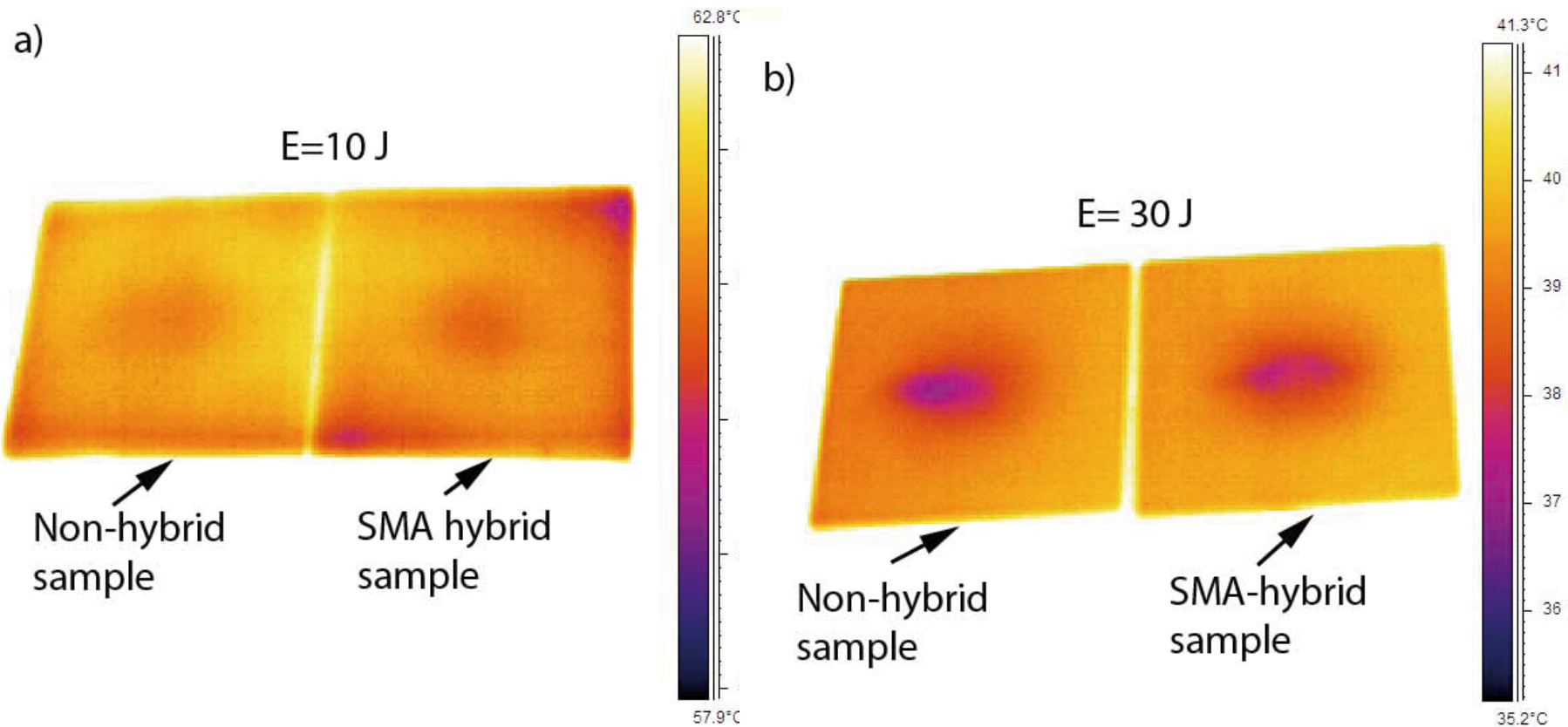
Laminati compositi ibridi con elevata damage



Immagine del set-up
sperimentale

Laminati compositi ibridi con elevata damage tolerance

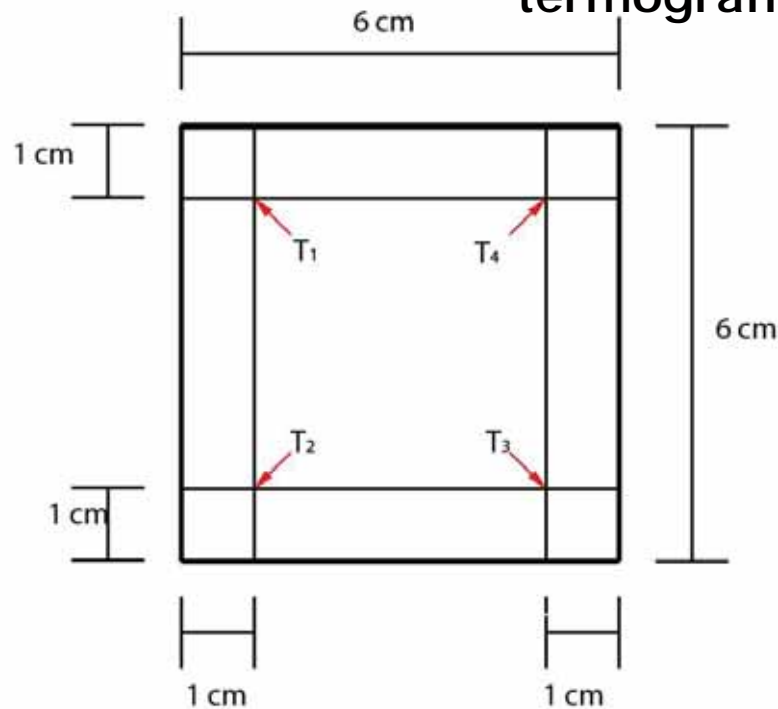
Risultati dell'analisi con la termografia per trasmissione.



Termogrammi per i provini standard e ibridi con energia di impatto uguale a 10 J (a) e 30 J (b).

Laminati compositi ibridi con elevata damage tolerance

La differenza di temperatura ΔT tra l'area danneggiata e quella non danneggiata, calcolata sulla media di 4 punti come indicato in figura, è stata plottata per avere maggiori informazioni dalle analisi termografiche.

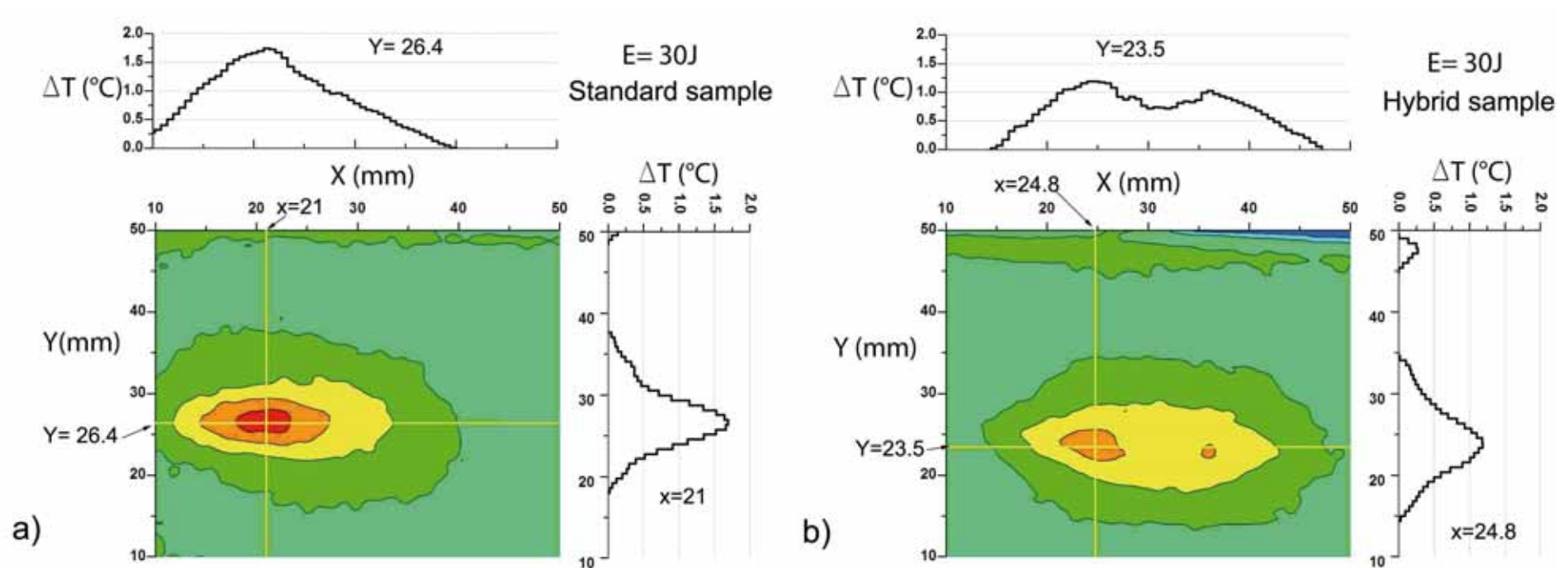


$$\Delta T = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{4} - T$$

Laminati compositi ibridi con elevata damage

tolerance

Nei grafici in basso si può osservare come la zona danneggiata (aree di colore rosso e arancio) sia più estesa per il provino standard rispetto a quello ibrido.



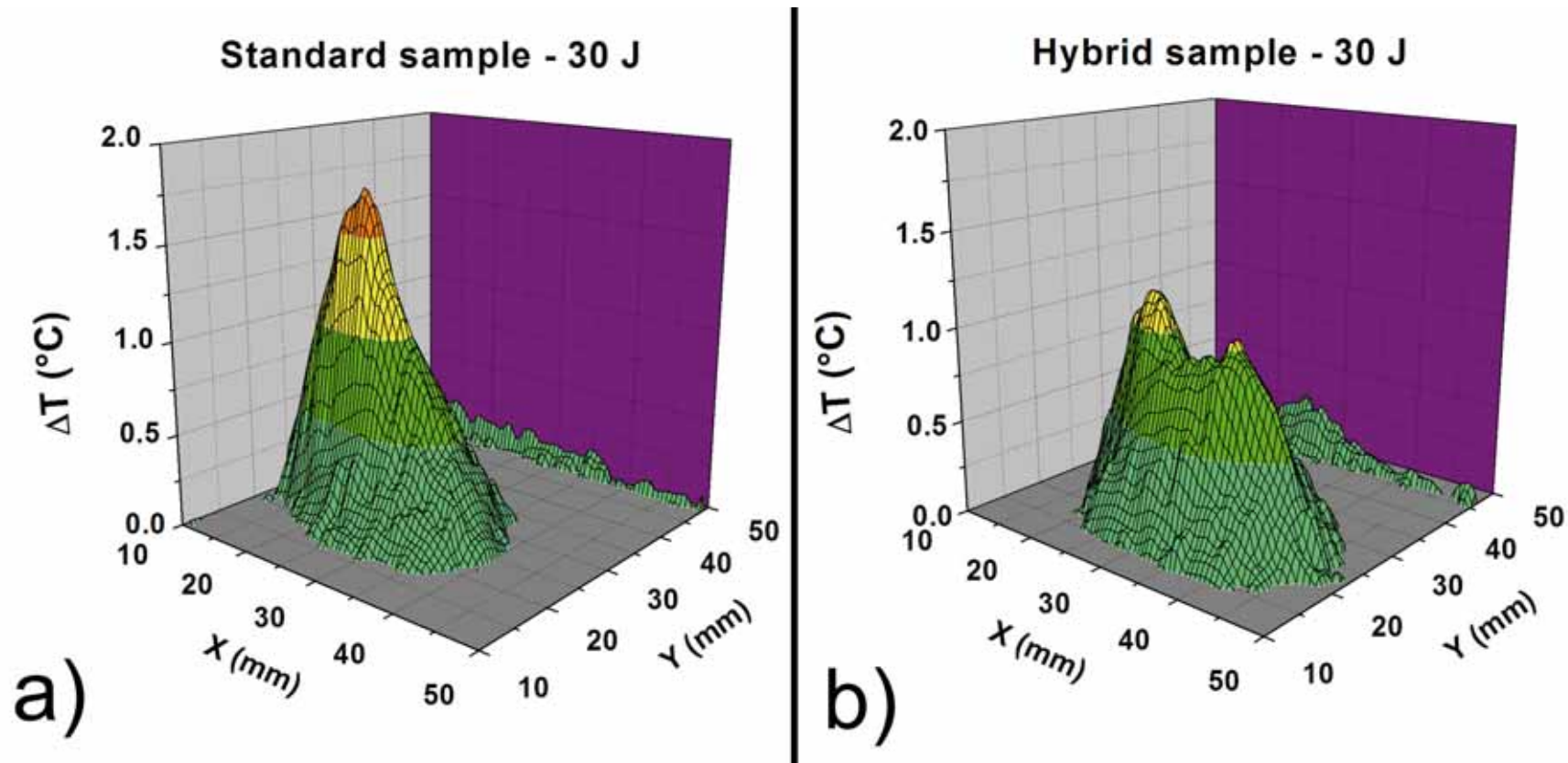
Central color maps



Laminati compositi ibridi con elevata damage

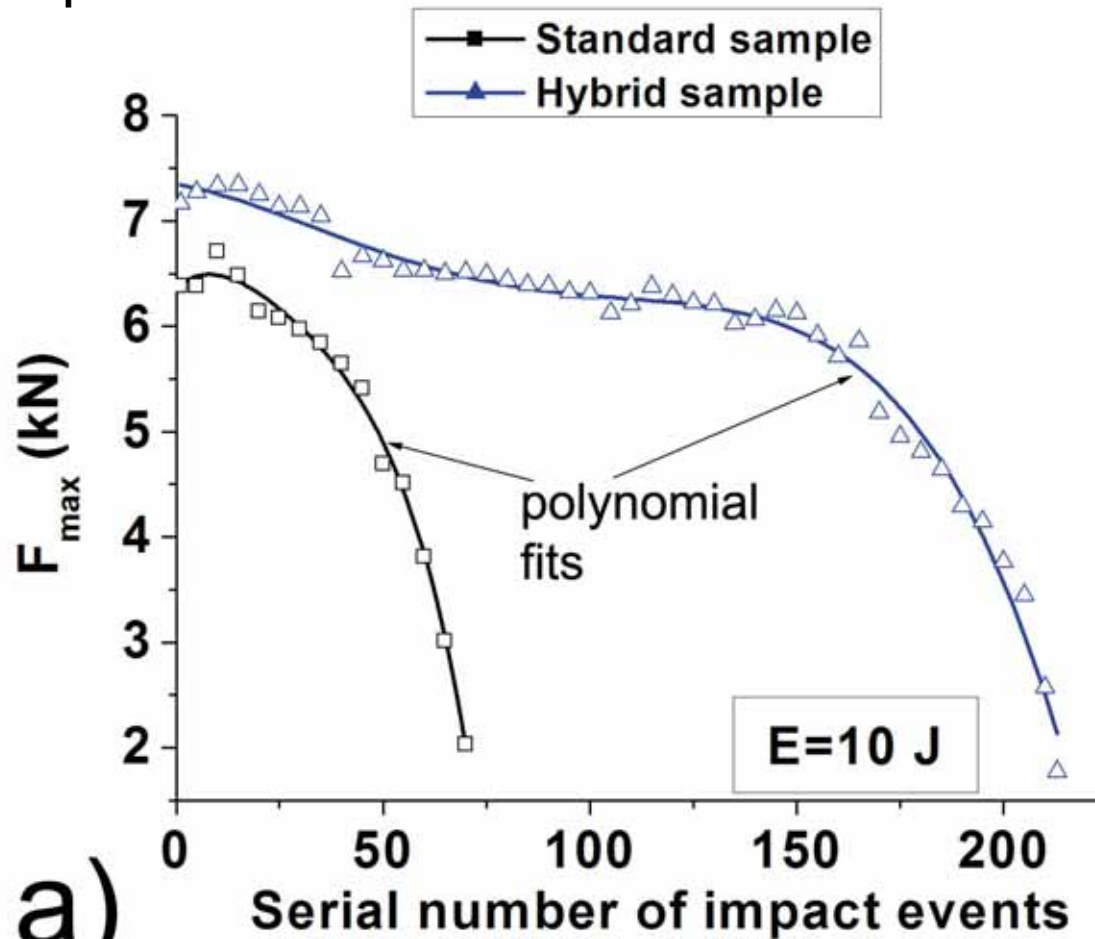
tolerance

Gli stessi risultati sono stati riportati in dei grafici 3D, dove è evidente l'effetto di aumento della damage tolerance dovuto all'ibridizzazione.



Laminati compositi ibridi con elevata damage tolerance

I campioni testati sono stati sottoposti a ulteriori impatti, al fine di valutare l'influenza delle SMA sui meccanismi di propagazione del danno. I risultati sono stati riportati come valori di forza massimi della curva F-t in funzione del numero di impatti.

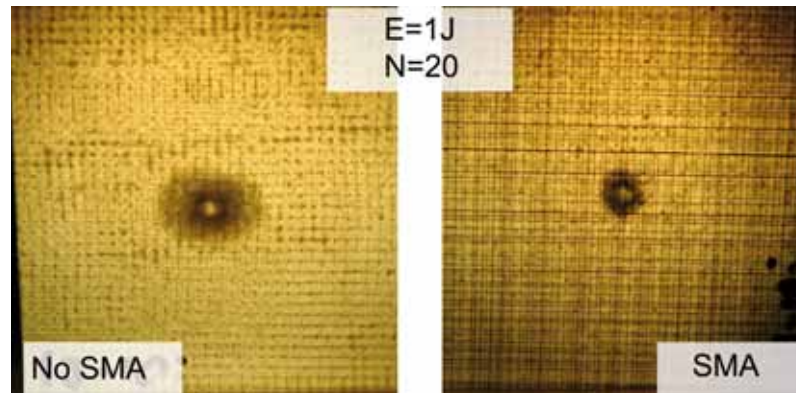


3° risultato: l'integrazione delle SMA riduce aumenta la damage tolerance del composito. Infatti mentre il composito standard si rompe dopo circa 75 impatti, quello con le SMA resiste oltre 200 impatti.

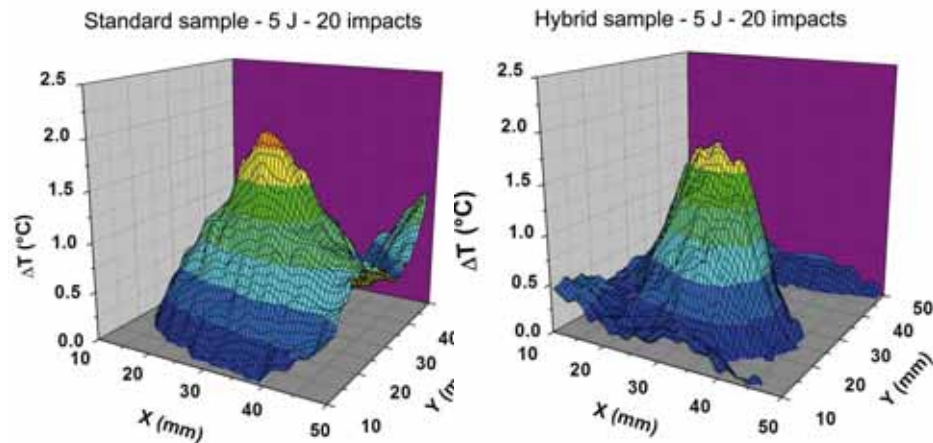
a)

Laminati compositi ibridi con elevata damage tolerance

Per impatti a più bassa energia non si è arrivati a rompere i provini, in quanto sarebbe stato necessario un numero troppo elevato di impatti. In questo caso sono state utilizzate le tecniche di analisi non distruttiva per valutare gli effetti delle SMA sulla damage tolerance.



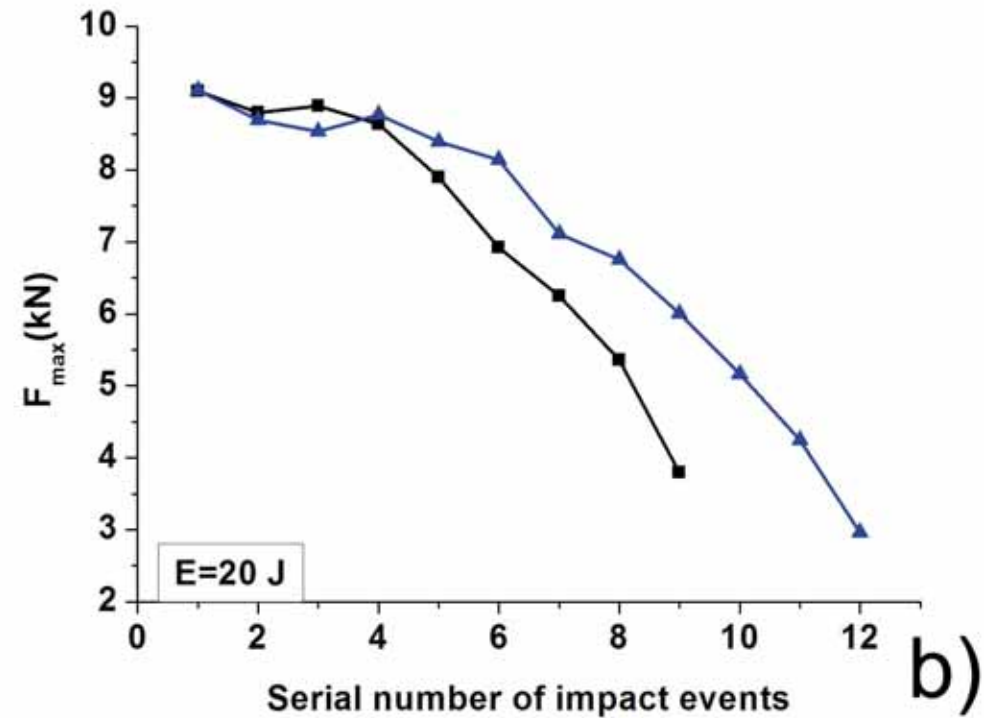
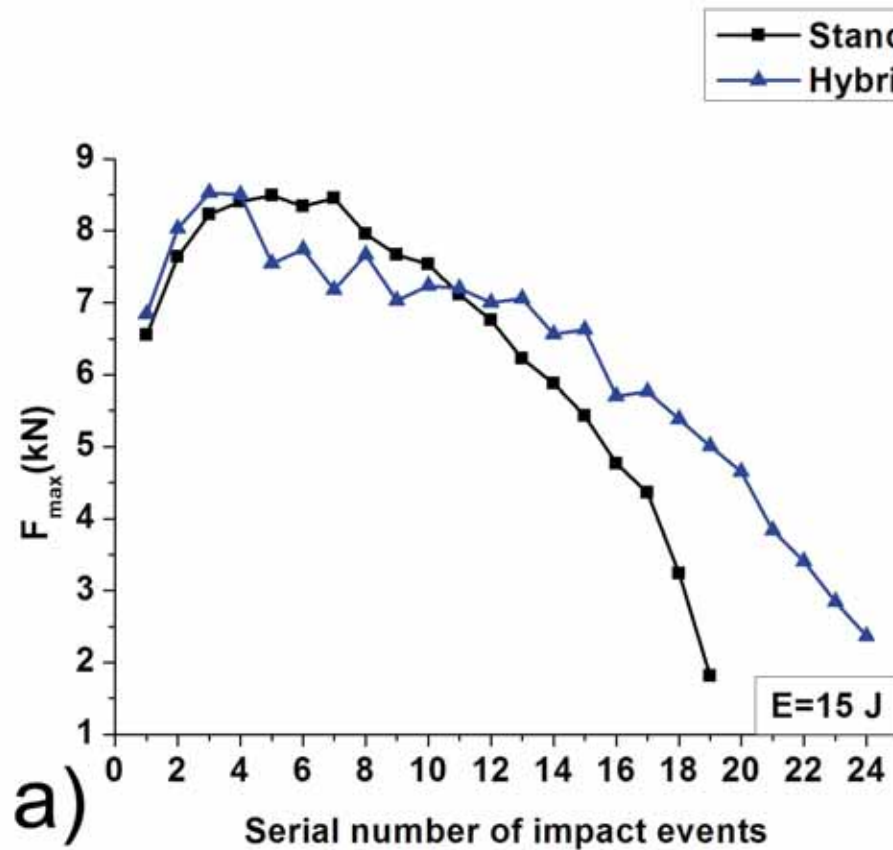
Fotografie dopo 20 impatti a 1 J



Risultati delle analisi termografiche su campioni impattati 20 volte a 5 J.

Laminati compositi ibridi con elevata damage tolerance

A più alte energie l'influenza delle SMA sulla damage tolerance è sempre positiva, ma diventa via via meno influente.



Laminati compositi ibridi con elevata damage tolerance

Conclusioni

L'ibridizzazione con filamenti SMA superelastici ha avuto tre effetti positivi

sul composito rinforzato con fibre di vetro realizzato:

1. Aumento dell'energia minima per l'innesco del danno;
2. Diminuzione dell'estensione dell'area danneggiata e del livello di danneggiamento su provini impattati una sola volta a diversa energia.
3. Aumento della resistenza a impatti ripetuti.

Gli effetti osservati sono più influenti per energie inferiori a 10 J, anche se

l'influenza positiva è stata osservata per tutti i livelli di energia.