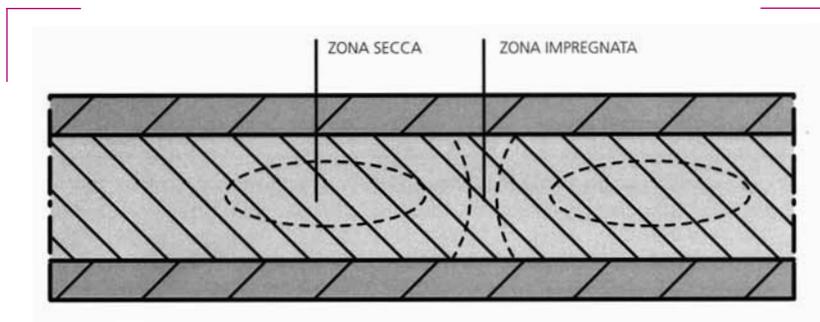


Leggere e resistenti



Strutture sandwich sottili, aventi pelli in composito a fibre continue e strato centrale in feltro a basso costo, sono state ampiamente usate in passato, sia nel settore automobilistico che in altri settori quali attrezzature sportive come caschi, scarpe, ecc. [1]; nonostante ciò, allo stato attuale esiste poca letteratura in materia.

Va inoltre evidenziato come strutture sandwich di questo tipo sono normalmente più sottili e più semplici da produrre [2-5].

In tutti gli esempi citati, i feltri tessuti non tessuti erano utilizzati in modo da risultare completamente impregnati e legati alla matrice polimerica utilizzata.

Pertanto, anche se una certa porosità residua rimane all'interno del tessuto non tessuto, le fibre risultano completamente impregnate e legate alla matrice al fine di ottenere le proprietà di rigidità desiderate.

Nel presente lavoro, strati sufficientemente spessi di feltro tessuto non tessuto sono stati

utilizzati in combinazione con sottili strati di pre-impregnato del tipo tessuto intrecciato, al fine di massimizzare lo spessore e ridurre peso e costo del pannello.

Questa tecnologia porta alla produzione di strutture relativamente spesse con un differente contenuto di fibre secche all'interno dello spessore dello strato centrale.

Nel caso in cui il livello di impregnazione dello strato centrale era risultato troppo basso, il livello di rigidità del sistema risultava del tutto insufficiente a causa della scarsa presenza di legami tra i diversi strati; tutto ciò si rifletteva in pannelli soffici e con scarsa stabilità dimensionale.

Dall'altro lato, quando la quantità di matrice era sufficiente, la formazione di un adeguato numero di punti di legame tra i diversi strati della struttura era possibile ed i pannelli risultavano sufficientemente rigidi e con una buona stabilità dimensionale. Inoltre, è stato osservato che per piccole deformazioni tali pa-

Le strutture SIMS*

(Semi-impregnated

Micro-Sandwich),

con caratteristiche

fuori dal comune,

rappresentano

una nuova

configurazione

per pannelli in materiale

composito a basso costo

con elevata tenacità

*SIMS™ è trade-mark di proprietà Delta-Tech Spa. Brevetto depositato

	Contenuto di resina nelle fibre di vetro (%)	36,4
Pannello A	Contenuto di resina nel tessuto non tessuto in PET (%)	0
	Contenuto di resina nelle fibre di vetro (%)	36,4
Pannello B	Contenuto di resina nelle fibre di vetro (%)	40,9
	Contenuto di resina nel tessuto non tessuto in PET (%)	0
	Contenuto di resina nelle fibre di vetro (%)	40,9
Pannello C	Contenuto di resina nelle fibre di vetro (%)	49,4
	Contenuto di resina nel tessuto non tessuto in PET (%)	0
	Contenuto di resina nelle fibre di vetro (%)	49,4
Pannello D	Contenuto di resina nel tessuto non tessuto in PET (%)	60,0
	Contenuto di resina nelle fibre di vetro (%)	36,4

Tabella 1. Composizione
dei pannelli prodotti.

rametri sono relativamente indipendenti dal livello di impregnazione.

Le analisi effettuate su questa tipologia di pannelli hanno inoltre mostrato che la presenza di regioni secche all'interno del feltro tessuto non tessuto influenzano notevolmente il meccanismo di frattura ed il comportamento ad impatto dei pannelli stessi, con importanti conseguenze sulla tenacità.

Procedura sperimentale

I materiali usati sono stati: tessuti di vetro pre-impregnati per la produzione delle pelli esterne. Le caratteristiche del tessuto non tessuto sono riportate qui di seguito.

Fibre, Roving di vetro 300 tex; grammatura del tessuto secco 380 g/m²; tipologia di tessuto: Twill 2x2; matrice Delta-Preg DT806R; contenuto di resina 36,4%; 40,9%; 49,4% rispettivamente. Il feltro utilizzato ha una grammatura di 400 g/m² ed è basato su fibre di Pet agugliate; per la produzione dei pannelli è stata usata sia la versione secca sia quella pre-impregnata con il 60% in peso della stessa matrice utilizzata per le pelli esterne.

Tutti i pannelli sono stati utilizzati utilizzando le medesime procedure di laminazione e cura.

Uno strato di pre-impregnato è stato laminato su una superficie piana in metallo precedentemente trattata con un distaccante, successivamente uno strato di tessuto non tessuto e lo strato finale di pre-impregnato sono stati laminati sopra al primo strato. Una seconda lastra in metallo trattata con distaccante è stata quindi posizionata sopra al laminato; infine, il tutto è stato posizionato all'interno di un sac-

co a vuoto facendo attenzione affinché il feltro nel laminato potesse comunicare con il sistema di vuoto. I pannelli sono poi curati in autoclave a 100 °C per 90 min con una rampa di riscaldamento a 2÷3 °C/min e una pressione di 4 bar. Una volta raggiunta la pressione, il sacco viene riportato a pressione atmosferica.

Quattro tipologie di pannelli sono stati prodotti e riportati in tabella 1.

Le prove

In primo luogo, è stata eseguita una analisi morfologica tramite microscopia ottica sulla sezione di ogni campione, utilizzando uno ste-

reo-microscopio Leica MZ 12,5 equipaggiato con una camera per acquisizione digitale DFC R2. La presenza di regioni secche all'interno dello strato centrale è stata valutata visivamente considerandone anche l'estensione.

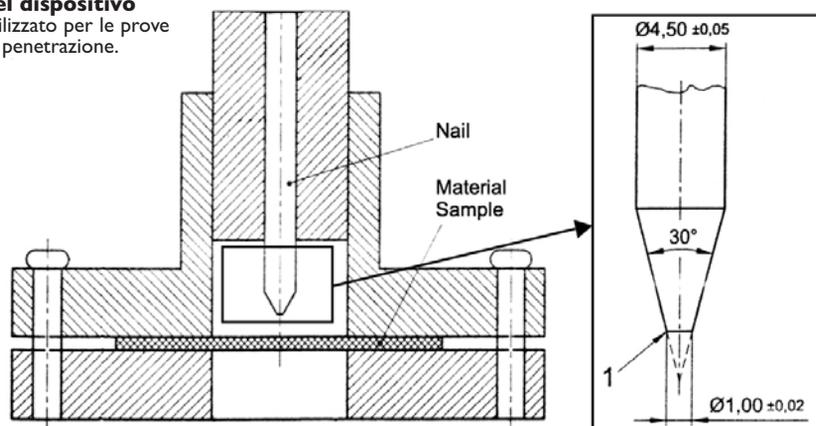
Successivamente, è stata eseguita una caratterizzazione meccanica completa al fine di analizzare il comportamento meccanico dei diversi materiali prodotti e correlarlo alla struttura del micro-sandwich.

Nello specifico, sono stati condotti test di trazione in campioni con le pelli esterne orientate a ± 45° in accordo alla normativa Astm D 3039 M [6] e test di flessione in campioni con le pelli a 0/90 °C seconda la normativa Astm D 790 M [7].

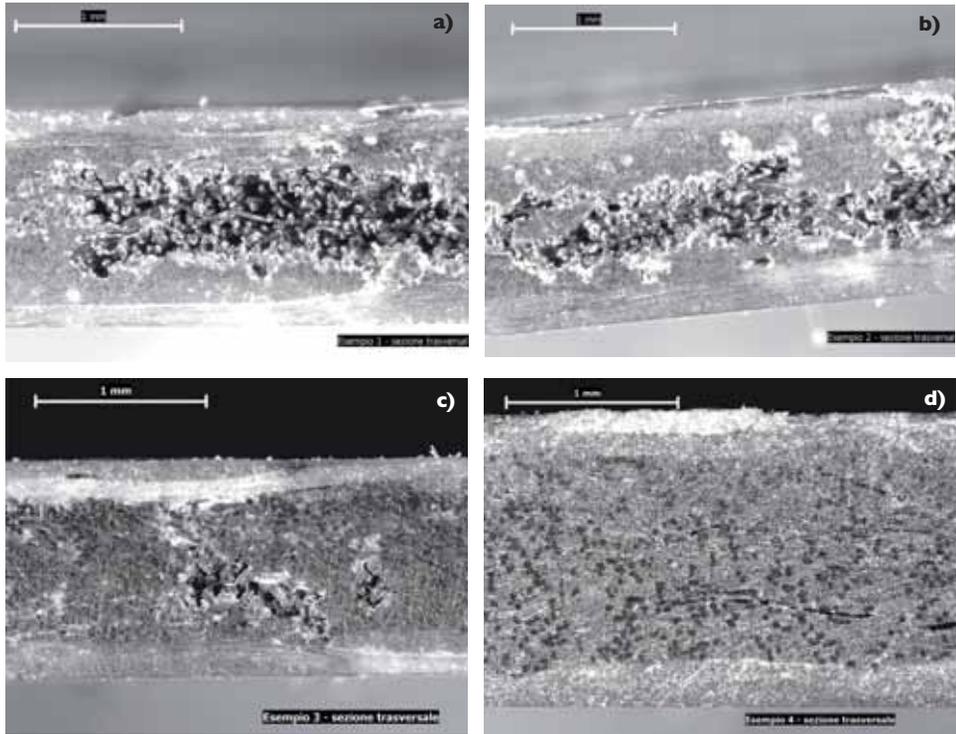
Tali misure sono state effettuate in un dinamometro elettronico della Lloyd modello LR 30K, nei test di trazione è stata utilizzata una cella di carico da 30 kN ed una velocità di 5 mm/min, per i test di flessione, invece, è stata utilizzata una cella di carico da 500 N ed una velocità di 1,7 mm/min. Inoltre sono stati eseguiti test di impatto con la metodologia ball drop su campioni di dimensioni 20 cm x 40 cm; l'impatto è stato prodotto con un dardo di 15,5 kg che cade da diverse altezze; l'energia di impatto e la forza sono state registrate durante il test in funzione del tempo.

Infine, sono stati condotti test di penetrazione secondo la norma Uni En 12568 2001 [8]; per l'esecuzione di tali test è stato utilizzato il medesimo dinamometro delle prove di flessione e trazione, utilizzando però un apposito dispositivo (figura 1).

1. Rappresentazione schematica del dispositivo utilizzato per le prove di penetrazione.



2. Micrografie della sezione dei pannelli: a) pannello A, b) pannello B, c) pannello C, d) pannello D.



Tutti i test sono stati condotti a temperatura ambiente ed almeno 5 campioni per ogni tipo di misura e per ogni materiale sono stati testati al fine di avere una validità statistica dei risultati.

I risultati

I risultati della microscopia ottica sono riportati in figura 2.

Si può chiaramente notare come il livello di impregnazione dello strato centrale sia diverso nei quattro campioni prodotti, così come si può notare una diversa interconnessione dei vari strati dovuta alla presenza di matrice.

La percentuale di zone secche nello strato centrale è direttamente correlata al livello di impregnazione dei tessuti di vetro utilizzati nelle pelli; in particolare il pannello D non mostra presenza di zone secche.

I risultati del test di trazione sono riportati in figura 3 ed i relativi dati in tabella 2.

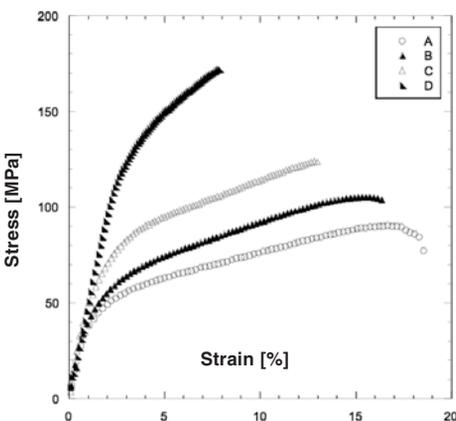
Dall'analisi di questi dati si può notare uno stretto legame tra la tenacità e la morfologia dei materiali; in particolare, maggiore è il conte-

nuto di regioni secche, maggiore è la percentuale a rottura; mentre la resistenza a rottura mostra un comportamento opposto, con una crescita della resistenza al diminuire delle regioni secche.

Dal confronto delle curve stress-strain è chiaro che la presenza di regioni secche influenza il meccanismo di deformazione e il comportamento in trazione del materiale. Infatti, mentre la pendenza iniziale, corrispondente alla regione di elasticità lineare, è simile per tutti i

campioni, la resistenza e la deformazione a snervamento e il tratto seguente sono strettamente correlati alle regioni secche.

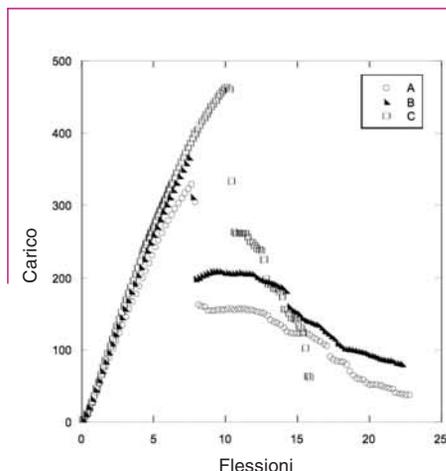
Il tessuto non tessuto è in grado di subire deformazioni molto elevate prima di arrivare alla rottura completa grazie ad un meccanismo di scorrimento delle fibre interne al feltro. Nel caso di completa impregnazione, tale scorrimento è definitivamente impedito dalla resina curata che lega tutte le fibre presenti, pertanto il meccanismo di deformazione risulta del tutto simile



3. Curve stress-strain ottenute con il test di trazione per i materiali.

Tabella 2. Proprietà a trazione dei materiali analizzati.

Materiale	Modulo di Young [MPa]	Resistenza a Trazione [MPa]	Deformazione a rottura [%]
Pannello A	7207 ± 291	92,9 ± 2,3	17,85 ± 0,46
Pannello B	7560 ± 334	103,3 ± 3,2	15,06 ± 1,06
Pannello C	8292 ± 367	125,5 ± 3,2	12,63 ± 0,53
Pannello D	9163 ± 177	171,3 ± 5,9	7,72 ± 0,33



4. Curve ottenute dal test di flessione.

Tabella 3. Proprietà del materiale nelle condizioni di flessione.

Materiale	Modulo di Young a Flessione [MPa]	Resistenza a Flessione [MPa]
Pannello A	16934 ± 1783	304,3 ± 16,5
Pannello B	17501 ± 772	325,7 ± 18,6
Pannello C	18350 ± 424	435,9 ± 9,7

a quello di una struttura in composito di tipo tradizionale. È invece chiaro che la presenza di regioni secche nel micro-sandwich implica un meccanismo di deformazione ibrido in cui le zone secche agiscono come punti di legame residui dopo la rottura delle zone rigide di resina. La conseguenza a livello macroscopico è una maggiore tenacità ed un meccanismo di rottura in cui si ha un progressivo cedimento del materiale al posto di una rottura repentina determinata dal cedimento delle zone a più elevata rigidità.

È dunque evidente che maggiore è il livello di impregnazione, minore è la possibilità per le fibre di scorrere reciprocamente e quindi minore saranno la deformazione di rottura e la tenacità, con un meccanismo di rottura del tutto simile alle strutture tradizionali in composito.

Prova di flessione

I risultati dei test a flessione sono riportati in figura 4 e in tabella 3. Anche con questa tipologia di sollecitazione, si

può osservare come il meccanismo di rottura sia molto progressivo per i materiali con regioni secche nello strato centrale. In particolare si vede che subito dopo il cedimento della pelle esterna si ha una diminuzione repentina del carico, ma lo scorrimento delle fibre nel tessuto non tessuto secco implica una frattura progressiva del laminato. Ancora una volta si può notare come il comportamento a rottura sia fortemente legato alla morfologia e al contenuto di regioni secche.

Prova di impatto

In questo tipo di test di impatto è possibile misurare l'energia di impatto e registrare l'andamento della forza in funzione del tempo, consentendo dunque anche la valutazione della forza massima raggiunta durante il test (figura 5).

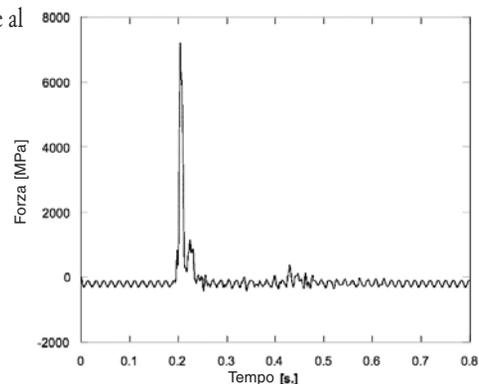
I risultati sono riassunti in tabella 4; è importante evidenziare che i risultati del pannello di tipo D devono essere visti come un limite superiore: infatti non è stato possibile determinare l'energia di rottura poiché era inferiore al

minimo misurabile nell'apparecchiatura a disposizione.

Dai dati in tabella 4 si può notare l'influenza delle zone secche sull'energia di impatto. Nel materiale A la frattura è progressiva grazie alla presenza di zone secche nel tessuto non tessuto; il pannello di tipo D invece mostra un comportamento opposto con una frattura improvvisa in corrispondenza dell'impatto. Questa differenza di comportamento è chiaramente dovuta a due diversi meccanismi di rottura ad impatto. Nel primo caso l'energia assorbita è più alta mentre la forza massima raggiunta è più bassa; viceversa nel secondo caso l'energia assorbita è la più bassa, mentre la forza massima è la più alta.

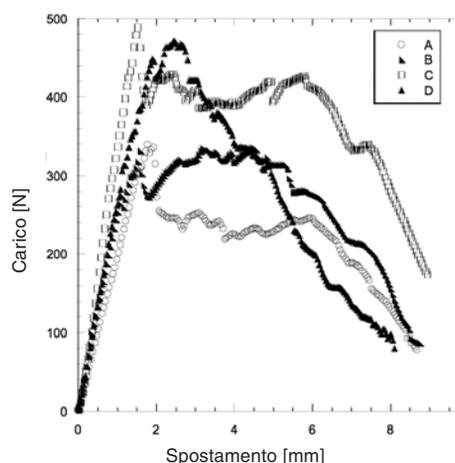
Un'importante conclusione che si può trarre da

5. Rappresentazione schematica del dispositivo utilizzato per i test di penetrazione.



Materiale	Energia di Impatto (J)	Forza Massima (N)
Pannello A	388	7221 ± 142
Pannello B	321	7623 ± 150
Pannello C	321	9467 ± 179
Pannello D	< 229	19890 ± 352

Tabella 4. Risultati dei test di impatto con la tecnica ball drop.



6. Curve ottenute con il test di penetrazione sui vari materiali testati.

Tabella 5. Risultati del test di penetrazione.

Materiale	Resistenza a penetrazione [N]	Spostamento a rottura [mm]
Pannello A	325 ± 20	1,75 ± 0,16
Pannello B	340 ± 81	1,55 ± 0,18
Pannello C	494 ± 28	1,51 ± 0,08
Pannello D	477 ± 111	2,30 ± 0,44

questi test è che la presenza di zone secche conferisce una elevata potenzialità in termini di energia assorbita durante il test. Tale caratteristica è molto importante nell'industria automobilistica soprattutto in termini di sicurezza. Inoltre, è importante notare che la risposta ad impatto può essere in qualche modo regolata a piacimento agendo sul livello di impregnazione dello strato centrale. Infatti, i materiali B e C mostrano dei comportamenti intermedi rispetto ad A e D. Questa caratteristica implica una flessibilità di applicazione di queste strutture semi-impregnate micro-sandwich in diversi settori industriali.

Prova di penetrazione

In figura 1 si riporta una rappresentazione schematica del dispositivo utilizzato per eseguire il test di penetrazione sui pannelli prodotti.

I risultati sono riportati in figura 6 e tabella 5 in termini di resistenza a penetrazione e spostamento a rottura. In particolare la resistenza a penetrazione rappresenta la forza massima in corrispondenza della comparsa del primo segno di rottura sul materiale; lo spostamento a rottura è il corrispondente spostamento della punta del dispositivo. Anche in questo tipo di test la presenza di regioni secche nello strato centrale implica differenze molto significative nel comportamento del materiale.

Osservando i risultati si nota che sia la resistenza a penetrazione sia il meccanismo di penetrazione della punta nel materiale dopo la prima perforazione sono strettamente correlati al livello di impregnazione dello strato centrale. In particolare, maggiore è il livello di im-

pregnazione, maggiore è la resistenza a penetrazione e minore la deformazione. Inoltre, ad elevati livelli di impregnazione, la resistenza all'avanzamento della punta dopo la perforazione decresce molto rapidamente; invece, la presenza di regioni secche nello strato centrale implica maggiori livelli di resistenza a penetrazione dopo la perforazione; questo è evidenziato dalla presenza di una sorta di plateau dopo la rottura iniziale nelle curve dei materiali corrispondenti ai pannelli aventi regioni secche.

Cosa dire

Le proprietà dei materiali prodotti e provati in questo lavoro sono fortemente influenzate dalla microstruttura ottenuta in fase di processo. Tali materiali possono mostrare una elevata tenacità dovuta al meccanismo di deformazione delle regioni secche dello strato centrale; in particolare le fibre in queste zone possono scorrere reciprocamente senza mostrare una frattura netta, tale meccanismo implica alti livelli di deformazione a rottura del materiale ed alti livelli di energia assorbita durante la deformazione.

La possibilità di modificare secondo le proprie esigenze la microstruttura modificando il livello di impregnazione dello strato centrale offre una flessibilità di utilizzo e un'importante possibilità di personalizzare il materiale durante il processo di produzione.

La buona combinazione di performance meccanica ed il basso costo dei materiali rende queste strutture sandwich sottili una valida opzione a livello industriale per diverse tipologie di

applicazione; in particolare sono privilegiati settori in cui si richiede un basso peso specifico e un basso costo uniti a una elevata tenacità, come ad esempio il settore dei trasporti e delle protezioni individuali.

P. Nieri, Delta-Tech (www.delta-tech.it) – I. Montanari, Dallara automobili- A. Terenzi, L. Torre, Università degli Studi di Perugia – J. M. Kenny, UdR Instm. Il presente lavoro è stato presentato al Sampe Europe 29th International Conference and Forum, Seico 08.

readerservice.it n. 52

Bibliografia

- [1] Patent US2002/0064640A1 Thin composite laminate and use thereof in making sports articles, especially boots.
- [2] Extending the concept of sandwich structures, *Reinforced Plastics*, February 1997.
- [3] C. S. Lee, D. G. Lee, Manufacturing of composite sandwich robot structures using the co-cure bonding method, *Composite Structures* 65 (2004) 307-318.
- [4] K.F. Karlsson, B.T. Astrom, Manufacturing and applications of structural sandwich components, *Composites Part A* 28A (1997), 97-111.
- [5] O. Ronzant, P.E. Bourban, J.A.E. Manson, Manufacturing of three dimensional sandwich parts by direct thermoforming, *Composites Part A* 32 (2001) 1593-1601.
- [6] Astm D 3039 M.
- [7] Astm D 790 M.
- [8] Uni-En 12568 2001.