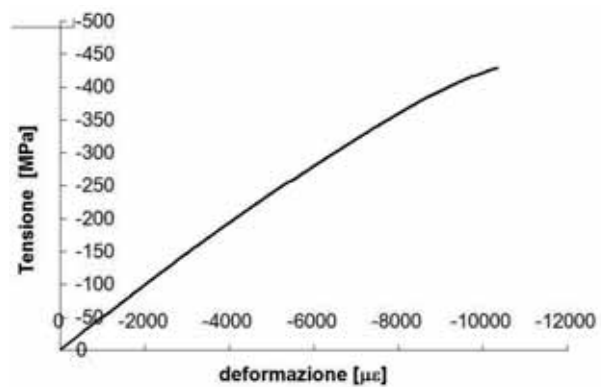


Pannelli sandwich per uso aeronautico

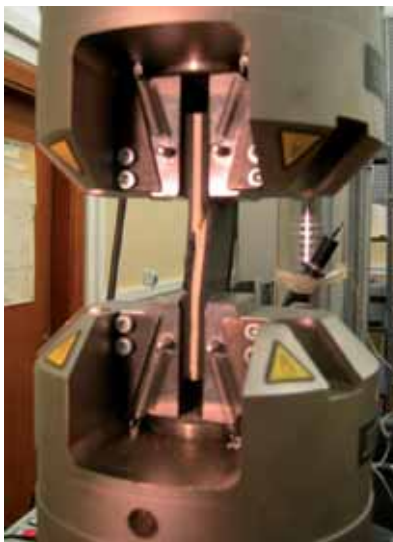


I. Prova di compressione su Cfrp non forato
(a) e relativa curva stress-strain (b).

L'utilizzo di strutture sandwich nella progettazione e realizzazione di sistemi di trasporto quali aerei, treni e navi veloci è sempre più connesso agli enormi vantaggi che tale costruzione comporta dal punto di vista strutturale, tecnologico e progettuale. La notevole efficienza strutturale derivante dall'elevato rapporto resistenza/peso, le ottime capacità di isolamento acustico e termico e di assorbire gli urti, la maggiore versatilità progettuale, legata alla possibilità di scegliere soluzioni di collegamento meno invasive rispetto alle saldature, giustificano il crescente impiego di strutture di tipo sandwich nel campo dei trasporti leggeri. Nell'ambito di un progetto nazionale di ricerca sviluppato in collaborazione con Alenia Aeronautica Spa, nei laboratori di Meccanica Sperimentale del Politecnico di Bari si sono effettuate prove di caratterizzazione meccanica su provini sandwich con facesheet in resina epos-

Confronto tra le caratteristiche resistenziali di provini di tipo Syncore e di provini di riferimento in Cfrp per valutarne la differente efficienza strutturale e le possibilità di impiego nel campo dei trasporti leggeri.

Nello specifico sono state eseguite prove di compressione e prove di trazione a temperatura ambiente e prove in condizioni hot/wet

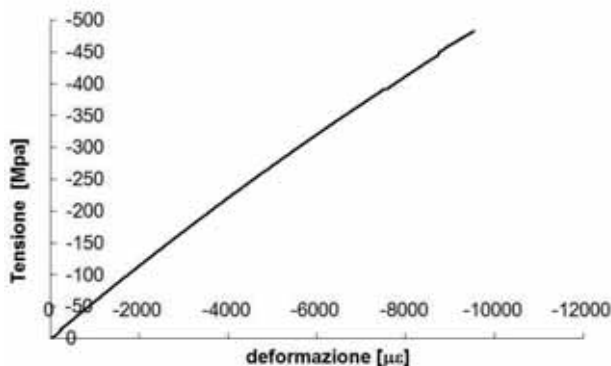


sidica rinforzate da fibre di carbonio multidirezionali (Cfrp, quasi isotropo) e un core in schiuma polimerica di tipo Syncore. La scelta di una schiuma sintattica nelle strutture sandwich assicura, rispetto alle altre schiume polimeriche, una più alta rigidità e resistenza a compressione, una minor igroscopicità, e una maggiore stabilità termica, rendendola più idonea a svolgere funzioni di elemento strutturale in campo aerospaziale. La campagna di prove è stata pianificata in modo da studiare le caratteristiche meccaniche della costruzione Cfrp/Syncore nelle diverse condizioni di lavoro del velivolo.

Prove di compressione a temperatura ambiente

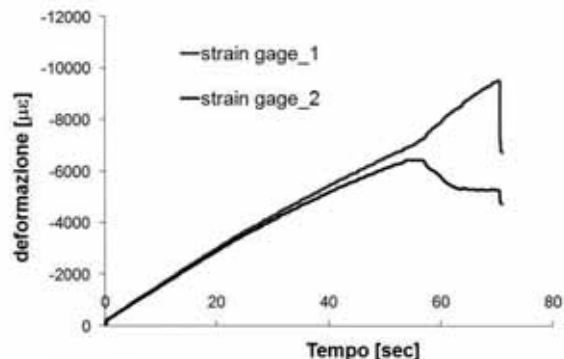
Si sono svolte prove di compressione edgewise su provini di lunghezza utile 50 mm e larghezza nominale 40 mm. Sono stati sottoposti a tale prova 5 provini non forati in Cfrp e 5 provini non forati di tipo sandwich Syncore, 5 provini forati in Cfrp e 5 provini forati di tipo sandwich, 5 provini forati e rivettati in Cfrp e 5 provini forati e rivettati di tipo sandwich (diametro nominale dei fori $d = 6$ mm). Il provino è stato afferrato direttamente nella macchina di prova. Le curve stress-strain tipicamente osservate durante i test sui provini non forati sono mostrate nelle figure 1 e 2 da cui si possono osservare anche i pattern di rottura.

Fenomeni di buckling hanno interessato due provini Syncore compromettendone la resistenza a compressione. La figura 3 riporta i valori di



2. Prova di compressione su sandwich non forato (a) e relativa curva stress-strain (b).

3. Instabilità del provino sandwich in compressione (a) e andamento delle deformazioni in mezzeria in funzione del tempo (b).



deformazione misurati da estensimetri elettrici a resistenza incollati sulle due superfici opposte del provino. La media per i valori misurati di resistenza a compressione e modulo di elasticità è stata calcolata comunque su tutti i valori, inclusi quelli riferiti ai provini che hanno manifestato il buckling.

Non sono stati osservati cambiamenti significativi del modulo di elasticità che viene calcolato sul tratto lineare non interessato da tale fenomeno.



4. Macrografia del sandwich: delaminazione e debonding delle pelli e rottura del core.

meno. Tuttavia i valori di tensione di rottura a compressione per i sandwich Syncore manifestano una maggiore dispersione dei risultati. L'instabilità elastica è ben visibile dall'analisi delle deformazioni nel tempo, misurate in mezzeria dei provini con estensimetri elettrici a resistenza unidirezionali (figura 3b).

Si può affermare che la presenza della schiuma sintattica nei sandwich Syncore, nelle condizioni di carico di compressione, non abbia incrementato le prestazioni del laminato fibro-rinforzato, che costituisce le due facesheet del provino, ma abbia amplificato la tendenza del laminato all'instabilità globale, poiché la sezione re-



5. Rottura di provini nelle prove di open hole compression: a) Cfrp, b) sandwich.



ni a 45° rispetto al piano di simmetria del provino (figura 4).

Nei test open hole la rottura del Cfrp avviene nelle due fasi successive di delaminazione e rottura delle fibre. La rottura del sandwich avviene per distacco delle pelli dal core e delaminazione delle pelli. Nello stesso tempo la schiuma cede, rompendosi lungo i piani delle tensioni principali, a 45° rispetto all'asse di carico (figura 5). Il foro presente in mezzeria crea una elevata concentrazione di tensione tale per cui Cfrp e Syncore sandwich si rompono in prossimità della sezione forata.

In corrispondenza del foro centrale per la prova filled hole si è applicato un fastener BACB30NX8K con coppia di serraggio pari a 10 Nm. Come per l'open hole, la rottura dei provini rivettati avviene laddove si concentra lo stato di stress, ovvero nell'intorno del foro. Le caratteristiche resistenziali aumentano con l'inserimento del fastener che collabora in maniera significativa alla resistenza a compressione del laminato e del sandwich, irrigidendo localmente il provino fino a conferirgli una resistenza superiore a quella misurata per provini non forati.

Dai dati sperimentali relativi alle tre condizioni studiate, risulta che il materiale sandwich Syncore presenta un incremento fino all'11% delle caratteristiche resistenziali. Delle prove di compressione svolte l'incremento maggiore si ha per la prova di compressione open hole mentre l'in-

cremento è meno evidente per provini unnotched.

Prove di trazione a temperatura ambiente

Si sono svolte prove di trazione edgewise su provini di lunghezza utile 70 mm e larghezza nominale 40 mm. Sono stati sottoposti a tale prova 5 provini non forati in Cfrp e 5 provini non forati di tipo sandwich Syncore, 5 provini forati in Cfrp e 5 provini forati di tipo sandwich, 5 provini forati e rivettati in Cfrp e 5 provini forati e rivettati di tipo sandwich (diametro nominale dei fori $d = 6$ mm).

Il test di trazione prevede che il provino venga afferrato con un sistema di carico opportuna-

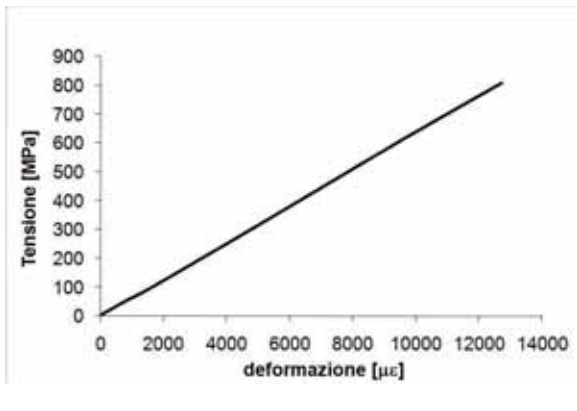
mente progettato che garantisca il perfetto allineamento dell'asse longitudinale del provino con la direzione di carico. Si è progettato un sistema con perni di collegamento, collegato al provino con bulloni aeronautici che lavorano a taglio. In figura 6a è mostrato il set up di prova.

La curva stress-strain della prova di trazione per sandwich Syncore e laminati Cfrp presenta il classico andamento dei materiali fibro-rinforzati in matrice epossidica. In figura 6b è mostrato l'andamento tipo per il sandwich Syncore non forato. La deformazione è elastica fino a rottura, non si distingue una fase di plasticizzazione e la rottura è fragile e avviene di schianto.

La deformazione è governata dalla resistenza delle fibre in carbonio. La rottura avviene secondo piani a 45° rispetto all'asse di carico nella zona di tratto utile del provino, in prossimità del raccordo. Tale fenomeno è dovuto alla presenza del foro e al particolare lay-up delle facesheet con fibre orientate a $0, 90$ e $\pm 45^\circ$. La schiuma sintattica del core del sandwich si frantuma con l'aumentare del carico e non contribuisce alla resistenza a trazione del componente. In figura 7 è mostrata una macrografia a bassa risoluzione della zona di rottura di un provino sandwich open hole.

Tutti i provini forati e rivettati si rompono secondo direzioni di $\pm 45^\circ$ rispetto all'asse di simmetria del provino, in mezzeria, precisamente in corrispondenza del foro. La resistenza a trazione misurata per i provini con rivetto risulta mag-

6. Curva stress-strain di trazione su sandwich non forato
(a) e set-up della prova (b).





7. Vista in piano della rottura a trazione del sandwich Syncore (a) e vista laterale (b).



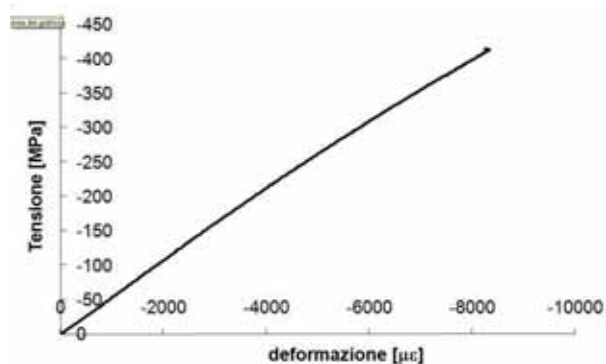
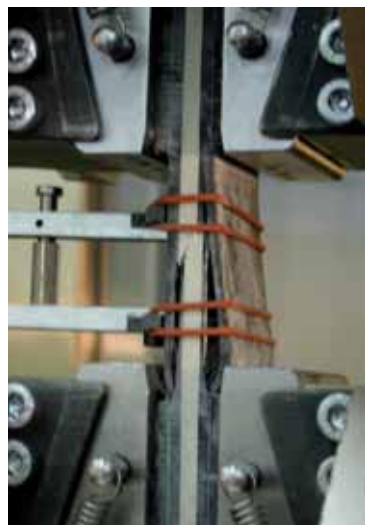
giore della resistenza misurata su provini a foro aperto. Ciò si può spiegare in parte considerando che durante la deformazione del provino, che ne precede la rottura, il materiale nella zona del foro, che si deforma trasversalmente a causa della strizione laterale, 'incontra' un elemento più rigido (il rivetto) che ne impedisce l'ulteriore deformazione. L'inserto, un fastener BACB 30NX8K con coppia di serraggio pari a 10 Nm, collabora alla resistenza del materiale, opponendosi rigidamente alla deformazione laterale che sorge con il carico di trazione.

Dai dati sperimentali relativi alle tre condizioni studiate, risulta che la costruzione sandwich presenta sempre un incremento delle caratteristiche resistenziali. Dal confronto Cfrp – Syncore sandwich per test di trazione risulta che i provini non forati mostrano un incremento più alto in termini di resistenza ultima.

Prove in condizioni hot/wet

Prima di sottoporre i provini unnotched a test di trazione e compressione in condizioni hot/wet si è fatta un'analisi di igroscopicità della costruzione Syncore.

Si sono svolte prove di water absorption su provini sandwich di dimensioni 76,2 x 76,2 mm² e spessore nominale 8 mm in accordo con la normativa Astm C 272-01, al fine di valutarne le caratteristiche di assorbimento in condizioni di elevata umidità relativa. Tutti i provini sono stati pesati con un'accuratezza dello 0,5% e completamente immersi in ac-

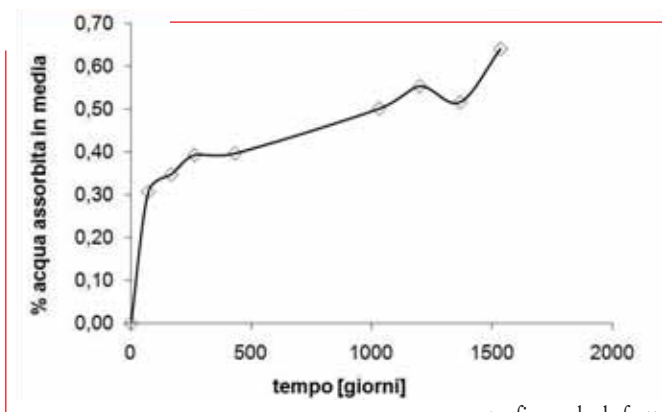


9. Modalità di rottura in compressione hot/wet (a) e curva stress-strain di compressione u sandwich non forato in condizioni di hot/wet (b).

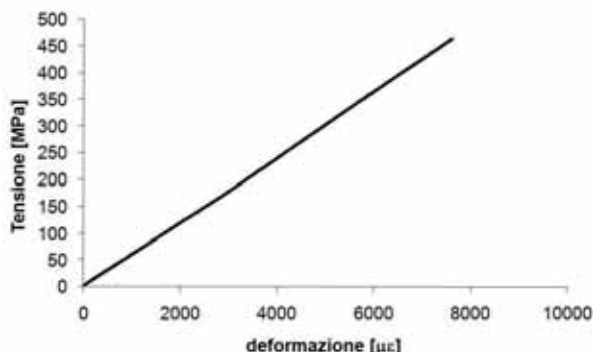
qua distillata a temperatura di 23 ± 3 °C. Dopo 60 giorni la curva di assorbimento non si è stabilizzata, ovvero il campione di provini non ha raggiunto saturazione, con un incremento totale in peso pari a 0,64%. Il grafico in figura 8 rivela una elevata capacità di assorbimento di acqua del materiale Syncore, circostanza inadeguata per le condizioni di esercizio in ambito aeronautico. I test di compressione eseguiti sui provini sandwich hanno evidenziato che nella maggior parte dei casi la rottura avviene per piani trasversali inclinati nella zona del tratto utile (figura 9a), in prossimità degli afferraggi. Due provini presentano un comportamento leggermente diverso dagli altri, probabilmente dovuto

all'insorgere di un lieve disallineamento delle prolunghe del sistema di carico oppure ad un meccanismo di rottura che vede cedere prima una parte del provino, con la restante parte ancora capace di sopportare il carico applicato,

fino a che la frattura non interessa tutta la sezione portando l'intero provino alla rottura finale. La macchina di carico utilizzata per il test di trazione (figura 10a), su cui si è potuto installare la camera climatica, ha capacità di 100 kN e purtroppo non ha permesso di raggiungere la rottura dei provini (che non è avvenuta fino al carico di 96 kN a cui sono state interrotte



8. Curva di assorbimento di acqua dei Syncore sandwich in funzione del tempo.



10. Set up di prova
(a) e curva stress-strain di trazione su sandwich non forato in condizioni di hot/wet (b).

sandwich Cfrp/Syncore, sottoposto a condizioni di carico all'interno del campo elastico del materiale, non è stata influenzata dal grado di umidità e temperatura in cui esso ha operato. Dai dati relativi alle prove di trazione unnotched per condizioni di temperatura ambiente e in hot/wet non risultano variazioni significative del modulo di Young sia per i provini Cfrp sia per i sandwich Syncore. Non sono disponibili i dati relativi al carico di rottura in condizioni hot/wet.

Tuttavia le bassissime variazioni percentuali rilevate per il modulo di Young nelle diverse condizioni di prova rendono ragionevole pensare che anche i carichi di rottura in condizioni hot/wet non siano molto differenti da quelli misurati a temperatura ambiente. Inoltre, valutando gli incrementi percentuali calcolati nel confronto tra le caratteristiche meccaniche di Cfrp e di Syncore sandwich, si evidenzia che ad alta temperatura ed elevata umidità tali incrementi si conservano, rispetto alle condizioni di temperatura ambiente.

Tabella 1. Risultati delle prove a temperatura ambiente e in condizioni hot/wet.

| COMPRESSION STRENGTH UNNOTCHED CFRP | | | | | |
|--|---------------------|---------------|----------|---------------|----------|
| RT/AR | | HOT/WET | | Variazione% | |
| Young Modulus | strength | Young Modulus | strength | Young Modulus | strength |
| [GPa] | [MPa] | [GPa] | [MPa] | | |
| 48,75 | 436,07 | 46,21 | 258,2 | 5,21 | 40,79 |
| COMPRESSION STRENGTH UNNOTCHED SYNCORE | | | | | |
| RT/AR | | HOT/WET | | Variazione% | |
| Young Modulus | strength | Young Modulus | strength | Young Modulus | strength |
| [GPa] | [MPa] | [GPa] | [MPa] | | |
| 55,32 | 442,8 | 54,05 | 355,6 | 2,30 | 19,69 |
| TENSION STRENGTH UNNOTCHED CFRP | | | | | |
| RT/AR | HOT/WET | Variazione% | | | |
| Young Modulus [GPa] | Young Modulus [GPa] | Young Modulus | | | |
| 54,78 | 53,06 | 3,14 | | | |
| TENSION STRENGTH UNNOTCHED SYNCORE | | | | | |
| RT/AR | HOT/WET | Variazione% | | | |
| Young Modulus [GPa] | Young Modulus [GPa] | Young Modulus | | | |
| 60,27 | 60,05 | 0,36 | | | |

*K. Casavola, R. Giannoccaro, C. Papalettere, Politecnico di Bari
C. Foglio, M. Riccio Alenia Aeronautica Spa.*

Relazione presentata al XXXVII Convegno Nazionale AIAS, Associazione Italiana per l'analisi delle sollecitazioni, che si è tenuto a Roma dal 10 al 13 settembre 2008.

readerservice.it n. 104

tutte le prove). Pertanto, è stato possibile calcolare solo il modulo di elasticità longitudinale. Le curve stress-strain delle prove di compressione (figura 9b) e di trazione (figura 10a) presentano il tipico andamento dei materiali fibro-rinforzati, già riscontrato per le prove a temperatura ambiente.

Analisi dei risultati

La tabella 1 riassume le variazioni % in termini di modulo di elasticità equivalente e resistenza ultima per le prove svolte. I risultati delle prove di compressione in camera climatica hanno confermato la tendenza del sandwich Syncore a diminuire la propria resistenza in condizioni di elevata umidità e presenza di acqua. Tuttavia i risultati mostrano che la risposta strutturale del

Bibliografia

- R Atkinson, *Innovative uses for sandwich constructions*, Reinf Plast, 1997.
- E. Rizzi, E. Papa, A. Corigliano, "Mechanical behavior of a syntactic foam: experiments and modeling", *International Journal of Solids and Structures*, 40 (2000).
- N. Gupta, E. Woldesenbet, Kishore, "Compressive fracture features of syntactic foams microscopic examination", *Journal of Material Sciences*, 37 (2002).
- J. Wang, P.J. Callus, M.K. Bannister, "Experimental and numerical investigation of the tension and compression strength of un-notched and notched quasi-isotropic laminates", *Composite Structures*, 64 (2004).
- C. Soutis, "Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction", *Materials Science and Engineering A*, 412 (2005).
- EN 6036 – Aerospace series – "Fibre reinforced plastics - Test method; determination of notched, un-notched and filled hole compression strength", 1996-04.
- EN 6035- Aerospace series – "Fibre reinforced plastics - Test method; determination of notched and unnotched tensile strength", 1996-04.
- ASTM C272 – 01, "Standard Test Method for Water Absorption of Core Materials for Structural Sandwich Constructions", 2007.