

ANALISI DEL COMPORTAMENTO MECCANICO DI SANDWICH ECO-COMPATIBILI RINFORZATI CON FIBRE NATURALI

D. Incorvaia, R. Scaffaro^b, B. Zuccarello^a.

^aUniversità degli Studi di Palermo – DICGM; ^bUniversità degli Studi di Palermo – DICAM
Viale delle Scienze, 90128 Palermo, e-mail: bernardo.zuccarello@unipa.it; roberto.scaffaro@unipa.it.

Sommario

La crescente sensibilità ambientale in molti settori della produzione industriale, da quello automobilistico a quello navale, da quello aeronautico a quello della nautica da diporto, unita ad un legislazione sempre più stringente in termini di impatto ambientale delle attività di manifattura industriale, ha portato negli ultimi anni ad una sempre maggiore richiesta di cosiddetti biomateriali o materiali eco-compatibili, che talora possono essere anche materiali rinnovabili, cioè materiali riciclabili o biodegradabili la cui manifattura non comporta alcuna produzione aggiuntiva di CO₂ o altri materiali inquinanti nell'ambiente. Al fine di dare un contributo alla messa punto di materiali strutturali eco-compatibili, nel presente lavoro sono messi a punto sandwich costituiti da core in balsa e skins in composito a matrice epossidica "green", rinforzata con fibre di agave striata e americana, estratte attraverso un processo innovativo da piante di agave coltivate nell'ambito di un progetto della Regione Siciliana sostenuti da fondi europei. Sistematiche prove sperimentali hanno consentito di rilevare le performance meccaniche di tali bio-materiali e di ottenere sufficienti indicazioni per l'ulteriore miglioramento delle prestazioni strutturali.

Abstract

The increasing environmental sensitivity in many industrial fields, from automotive to aeronautics to naval field, has led to an increasing demand of new bio-materials or renewable structural materials. In order to give a contribution to the design of eco-compatible structural materials, in this work new sandwich materials constituted by a core made by balsa and skins made by a composite material made by a "green" epoxy reinforced by agave fibers extracted from *striated* and *americana* agave obtained in Sicily by a proper research program financed by European funds. Previous theoretical analysis followed by systematical experimental analysis of the core, of the skins and the of the sandwich, have permitted to detect the actual mechanical behavior and the corresponding mechanical performance of such materials in term of strength and stiffness, as well as to have sufficient knowledge for their theoretical design and for further improvements of the structural performances.

Parole chiave: Biocompositi, sandwich, fibre di agave

1. INTRODUZIONE

Sandwich costituiti da skins in composito e core di vario materiale, sono ampiamente impiegati nella moderna progettazione industriale, non solo nel campo delle costruzioni aeronautiche, dove si sono inizialmente sviluppati, ma anche nel settore automobilistico, navale e della nautica da diporto. Per le loro peculiari caratteristiche, come l'elevata resistenza a flessione e la buona rigidezza [1], l'elevata resistenza all'urto [2,3], l'elevata resistenza alla corrosione [4] e la bassa conduttività termica e acustica [5,7], le strutture in sandwich sono infatti preferite ai materiali convenzionali in svariate applicazioni industriali.

Con l'aumentare della sensibilità ambientale della committenza/utenza, in molti settori della produzione industriale (nautica, automobilistico ecc.) è notevolmente accresciuta la richiesta di materiali "green" cioè di materiali a basso impatto ambientale, che possono essere facilmente riciclati o addirittura che possano considerarsi rinnovabili in quanto utilizzano essenzialmente materiali naturali biodegradabili. Sebbene sono riportati in letteratura diversi studi sui sandwich con skins in composito e sulla correlata progettazione strutturale di sistemi meccanici che ne fanno uso, pochi studi sono stati ancora indirizzati alla analisi del comportamento meccanico di sandwich "green" o eco-compatibili o ecosostenibili, la cui progettazione, per la peculiarità e la molteplicità dei meccanismi di danneggiamento [8-10] e delle relative resistenze, è compito tuttora piuttosto impegnativo che necessita di accurate informazioni sperimentali e di metodologie numeriche o teoriche sufficientemente provate. Obiettivo del presente lavoro è la messa a punto di un sandwich bio-compatibile costituito da skins in composito a matrice polimerica "green" rinforzato con fibre naturali, e core anche esso in materiale naturale. In particolare, è stato considerato un sandwich avente core in balsa e skins in resina epossidica tri-componente "green" (tipo SUPERSAP) rinforzata con fibre di agave di tipo striata e americana, coltivate nel territorio siciliano nell'ambito di un progetto di ricerca finanziato con fondi europei e finalizzato allo sfruttamento dei terreni marginali.

Tra le fibre naturali [11], le fibre di agave presentano buone proprietà meccaniche (resistenza e rigidità), unite ad una buona adesione con diverse matrici green termoindurenti e termoplastiche [11] e basso costo. Attraverso una sistematica campagna di prove sperimentali è stata eseguita la caratterizzazione di tale materiale sandwich proposto e sono stati altresì individuate le metodologie di previsione dei vari meccanismi di danneggiamento e della relativa resistenza meccanica, che possono essere vantaggiosamente utilizzate nella moderna progettazione industriale di componenti strutturali in materiale sandwich eco-compatibile.

2. MECCANISMI DI ROTTURA E PREVISIONE TEORICA DELLA RESISTENZA

Per procedere ad una sistematica caratterizzazione meccanica di un sandwich è necessario tenere conto che, come è noto dalla letteratura [8-10] relativa ai sandwich con skins in composito tradizionale (rinforzato con fibre di vetro, aramide o carbonio), il danneggiamento di simili strutture può avvenire attraverso vari meccanismi di danneggiamento quali:

- (1) Rottura a compressione/trazione delle skins [14];
- (2) Rottura a taglio del core [15,16];
- (3) Delaminazione alla interfaccia skin-core [17];
- (4) Corrugamento locale delle skins [18-20];
- (5) Cedimento per indentazione del core, dovuto ad elevata pressione specifica [21,22].

In generale, nel caso di rottura del tipo (1) e (2) è possibile eseguire una previsione analitica [1] della resistenza del sandwich a partire dalla conoscenza delle caratteristiche meccaniche degli skins e del core. Più dettagliatamente, considerando una generica condizione di carico costituita da un momento flettente M e da una forza di taglio T (vedi Fig.1a), la rottura del composito avviene per cedimento delle skins se lo sforzo normale massimo $\sigma'_{x,max}$ che agisce sulla superficie esterna degli skin supera la corrispondente tensione di rottura $\sigma_{s,u}$. Si ha invece la rottura del core se lo sforzo di taglio massimo $\tau_{xz,max}$ che agisce sul piano medio del core supera la corrispondente resistenza a taglio $\tau_{c,u}$.

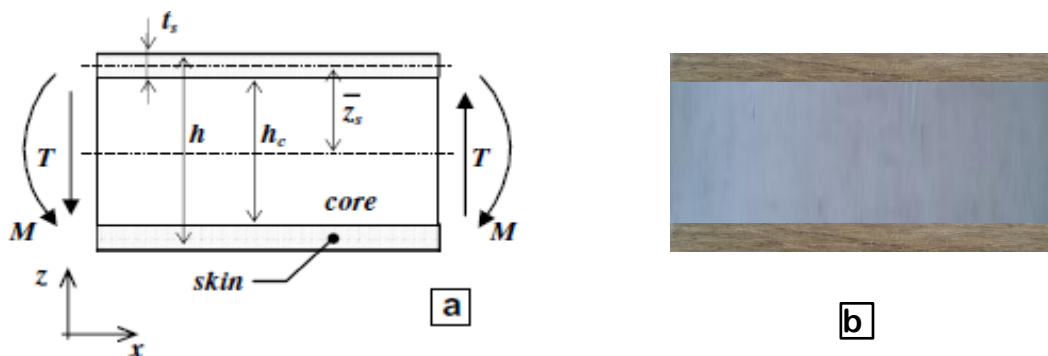


Figura 1: (a) schema di pannello sandwich e notazioni generali; (b) sandwich "green" con skins in composito unidirezionale rinforzato con fibre di agave e core in balsa.

Usando la notazione riportata in Fig.1, così come ampiamente discusso nella Teoria classica dei laminati [1], per il calcolo di $\sigma'_{x,max}$ e $\tau_{xz,max}$ la rottura delle skins e del core avviene quando M e T superano il corrispondente valore M_{max} e T_{max} dato da:

$$M_{max} = \frac{2D}{E_s h} \sigma_{s,u} \quad (\text{sollecitazione limite di rottura degli skins}) \quad (1)$$

$$T_{max} = \frac{N}{G_c} \tau_{c,u} \quad (\text{sollecitazione limite di rottura del core}) \quad (2)$$

dove E_s è il modulo di Young delle skins, G_c è il modulo di elasticità trasversale del core, mentre D è la rigidezza flessionale e N è la rigidezza a taglio del sandwich, date dalle seguenti formule:

$$D = \frac{E_s(h^3 - h_c^3)}{12(1 - \nu_s^2)} \quad (3)$$

$$N = \frac{G_c(h + h_c)^2}{4h_c} \quad (4)$$

Va notato che poiché la resistenza a compressione di skins in composito è in generale maggiore rispetto alla resistenza a trazione, sotto sollecitazione applicata di flessione pura la rottura della skin soggetta a trazione anticipa in genere la rottura della skin opposta, soggetta a compressione. Dalle equazioni (1) e (2) segue che, in presenza di un carico complesso (flessione + taglio), la rottura del sandwich composito è causata dalla trazione della skin se il rapporto di carico $r = M/T$ è maggiore rispetto al corrispondente valore critico $r_{max} = M_{max}/T_{max}$, cioè:

$$r = \frac{M}{T} > r_{max} = \frac{G_c}{E_s} \frac{2D}{Nh} \frac{\sigma_{s,u}}{\tau_{c,u}} \quad (5)$$

Altrimenti, se il rapporto r è inferiore rispetto a r_{max} , allora la rottura è causata dal cedimento del core a meno che non intervengano meccanismi di danneggiamento a carico della interfaccia core-skins. Ad esempio, se la struttura del sandwich è soggetta a flessione per tre punti (three point bending, *TPB*), allora il rapporto caratteristico r corrisponde alla metà della cosiddetta *span length* a_1 [23], e la rottura è dovuta al cedimento degli skins se a_1 soddisfa la condizione:

$$a_1 > 2r_{max} \quad (TPB) \quad (6)$$

In caso contrario (eq.6 non soddisfatta) la rottura del sandwich avviene per cedimento del core. Sfortunatamente, a causa di vari parametri che possono influenzare il cedimento della struttura (adesione tra skin-core, concentrazioni di tensione, ecc.) le condizioni effettive di cedimento possono differire da quelle previste in funzione delle equazioni (3)-(5), così come la previsione teorica del meccanismo di rottura e le corrispondenti resistenze valutate mediante le equazioni (1) e (2), possono risultare in generale non affidabili o non accurate. Conseguentemente, una valutazione affidabile delle performance meccaniche di una struttura sandwich, ed in particolare della resistenza meccanica e dei meccanismi di danneggiamento, richiede una opportuna e sistematica analisi sperimentale o/e numerica [24,25].

3. DESCRIZIONE DEI MATERIALI

Al fine di valutare l'influenza sul comportamento meccanico del sandwich, di diverse tipologie di fibre di agave e dei relativi trattamenti, nonché di diverse matrici termoindurenti, nel presente lavoro sono considerati 3 tipi di sandwich "green", aventi tutti core in legno di balsa (densità 150 kg/m³) con spessore di 5 mm, e skins in composito a matrice polimerica rinforzato con fibre di agave. In particolare, il primo sandwich ha skins in composito unidirezionale dello spessore di 2 mm, realizzati in matrice epossidica tipo SX-10 rinforzata con fibre di Agave Striata estratta per pressatura a Rulli Non trattata di età pari a 4 anni (ASRN 4), con concentrazione in volume $V_f=0.2$; il secondo ha invece skins in resina epossidica "green" tri-componente tipo SUPERSAP CNR epoxy con induritore tipo IHN rinforzata e da fibre di Agave Americana estratta per pressatura a Rulli Trattata in NaOH in Trazione con carico medio applicato di 50g/fibra

(AARTT); il terzo infine ha skins in composito con matrice tipo SUPERSAP rinforzata con fibre di agave Striata estratta per pressatura a Rulli e trattata in NaOH in trazione con carico medio applicato di 50g/fibra (ASRTT). Le skin sono state ottenute da pannelli di composito appositamente realizzati, ed aventi concentrazione in volume di fibre rispettivamente del 19% per AARTT, 15% per ASRTT, 20% per ASRN 4, ricavati per laminazione manuale e curati a temperatura ambiente. Le fibre sono state estratte con apposito sistema di pressatura a rulli messo a punto presso il DICGIM di Palermo, a partire da foglie di agave raccolte da campi sperimentali finanziati dalla Regione Siciliana con fondi europei PSR, nell'ambito di un progetto dedicato allo sfruttamento dei terreni marginali. Nella seguente figura sono riportate le immagini delle fibre estratte ed utilizzate per la preparazione delle skins.

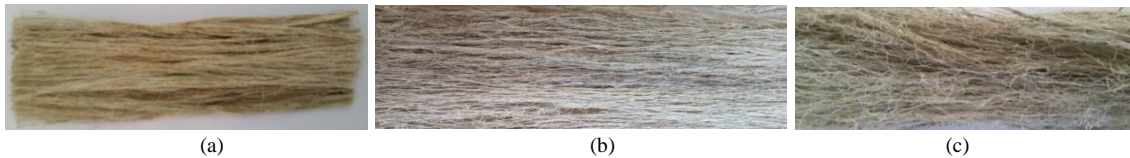


Figura 2: (a) fibre di ASRTT; (b) AARTT e (c) ASRN 4 utilizzate per la realizzazione delle skins.

I sandwich ottenuti mediante incollaggio skin-core eseguito utilizzando la stessa resina epossidica usata per realizzare le pelli (co-curing), polimerizzata a temperatura ambiente per 48 ore sono sinteticamente illustrati nella seguente figura 3:

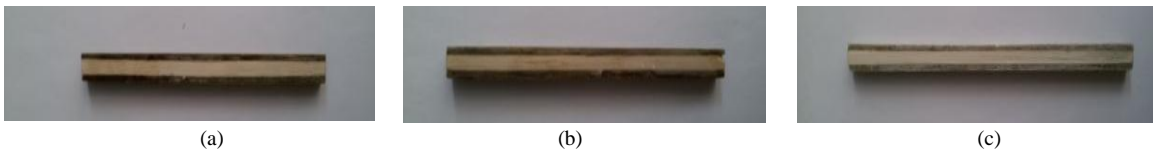


Figura 3: (a) sandwich con skins rinforzate con ASRTT; (b) con AARTT e (c) con ASRN 4.

4. ANALISI SPERIMENTALE

Le prove sperimentali per la caratterizzazione dei sandwich realizzati, sono stati eseguiti utilizzando una macchina prove materiali tipo INSTRON 3367 da 30 kN. Sono state eseguite prove per la caratterizzazione preliminare degli dei vari materiali compositi costituenti gli skins, del materiale del core, quindi prove per la caratterizzazione dei sandwich.

4.1 Caratterizzazione delle skins

Trattandosi di materiale composito ortotropo, la caratterizzazione sperimentale delle skins è stata fatta mediante prove di trazione, compressione e taglio. I risultati delle prove di trazione per i 3 tipi di skins esaminati sono riportati nella seguente figura 4.

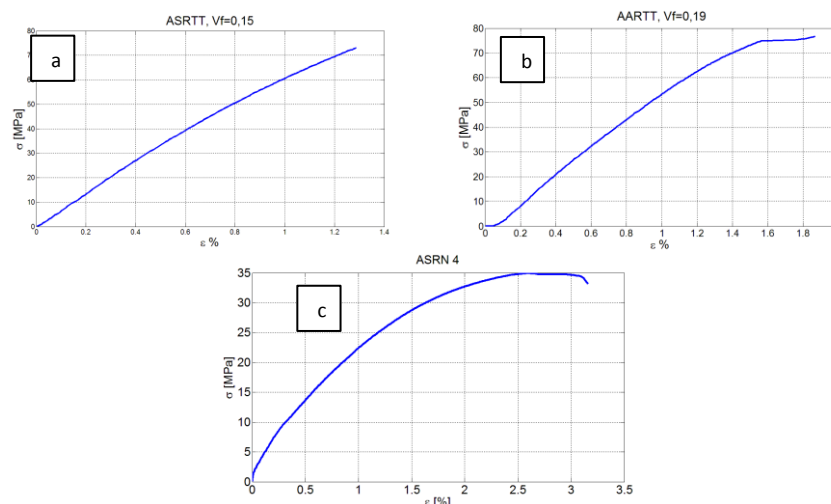


Figura 4: Curve di trazione per skins (a) in ASRTT, (b) in AARTT e (c) in ASRN 4.

Come è possibile osservare dalla Fig.4, sotto sollecitazione di trazione le skins manifestano un comportamento elastico lineare fino a una deformazione di circa 1%, con una deformazione limite di rottura di circa 1.5%. Inoltre, tutti i provini hanno mostrato una rottura di tipo LGM o AGM [26], con parziale pull-out delle fibre (vedi fig. 5).



Figura 5: Modalità e superficie di rottura tipica degli skins esaminati in trazione.

Le prove di taglio sono state eseguite in accordo con la normativa ASTM D 5379/D 5379M – 98 [28], utilizzando in pratica la cosiddetta prova “Iosipescu” che utilizza un provino di dimensioni relativamente piccole con doppio intaglio a V strumentato con apposita rosetta estensimetrica a 2 griglie (vedi Fig.6a). La curva sperimentale di taglio ha mostrato che i materiali esaminati (ASRTT, AARTT e ASRN 4) esibiscono un comportamento elastico lineare fino a rottura che avviene in corrispondenza ad uno scorrimento del 2% circa. Inoltre, dall’esame dei provini dopo rottura, si osserva che il cedimento avviene sempre per “trazione” su piani inclinati di 45° rispetto alla direzione di applicazione del carico (vedi Fig.6b).

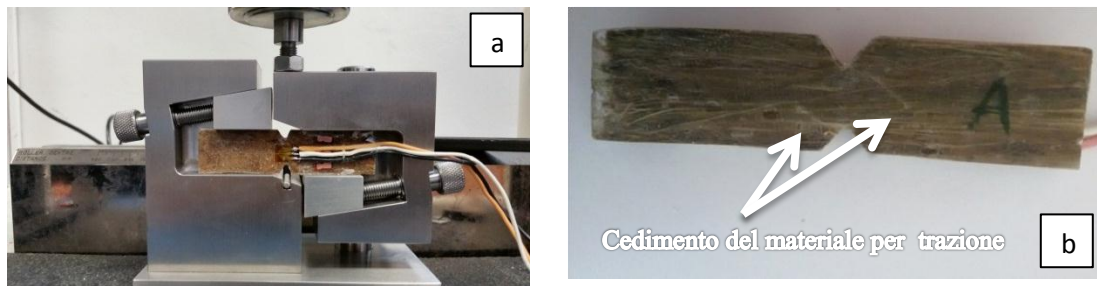


Figura 6: (a) prova di taglio, (b) modalità e superficie di rottura a taglio degli skins esaminati.

In accordo con gli standard ASTM, tutte le costanti elastiche delle skins, cioè il modulo di Young ($E_{L,s}$), il coefficiente di Poisson $\nu_{LT,s}$ ed il modulo di elasticità trasversale $G_{LT,s}$, sono state determinate considerando il tratto elastico-lineare della curva tensione-deformazione. I valori così ottenuti sono stati riportati in tabella 1, assieme ai risultati relativi alla resistenza a trazione $\sigma_{L,s}$, e alla la resistenza a taglio $\tau_{LT,s}$.

Tabella 1: Proprietà meccaniche degli skins, del core e dei sandwich determinate sperimentalmente.

| | Prova di trazione [MPa] | Prova di taglio [MPa] | Prova di compressione [MPa] | Prova di flessione [MPa] |
|---------------|---|--|--------------------------------|-----------------------------|
| Skin ASRTT | $\sigma_{L,s}=65,3$ $E_{L,s}=5500$ $\nu_{LT,s}=0,4$ | $\tau_{LT,u}=24,7$ $G_{LT,s}=1060$ - | - - - | - - - |
| Skin AARTT | $\sigma_{L,s}=63,6$ $E_{L,s}=5200$ $\nu_{LT,s}=0,4$ | $\tau_{LT,u}=26,4$ $G_{LT,s}=1188$ - | - - - | - - - |
| Skin ASRN 4 | $\sigma_{L,s}=34,9$ $E_{L,s}=2100$ - | - - - | - - - | - - - |
| Core di balsa | $\sigma_{L,c}=4,9$ $E_{L,c}=4300$ $\nu_{LT,c}=0,4$ | $\tau_{LT,c}=1,5$ $G_{LT,c}=1100$ - | - - - | - - - |

| | | | | |
|-----------------|--------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| Sandwich AARTT | $\sigma_{L,s}^* = 46,5$ | - | - | $\tau_{LT,c}^a = 1,99$ |
| | - | - | - | $G_{LT,c} = 1100$ |
| | - | - | - | - |
| | - | - | - | - |
| Sandwich ASRTT | $\sigma_{L,s}^a = 47,82$ | - | - | $\tau_{LT,c}^a = 2,11$ |
| | - | - | - | $G_{LT,c} = 1100$ |
| | - | - | - | - |
| | - | - | - | - |
| Sandwich ASRN 4 | $\sigma_{L,s}^a = 40,7$ | - | - | $\tau_{LT,c}^a = 1,21$ |
| | - | - | - | $G_{LT,c} = 1100$ |
| | $\sigma_{T,c} = 1,1$ | $\tau_{LT,c}^b = 0,26$ | $\sigma'_{T,c} = 1,4$ | - |
| | $E_{T,c} = 64,82$ | $G_{LT,c}^b = 1300$ | $E'_{T,c} = 55,28$ | - |

^a sono i valori ricavati dalle prove di flessione con l'utilizzo delle normative ASTM [22]; ^b risultati dello shear test da ASTM C237-61 [30]

4.2 Caratterizzazione del core

La caratterizzazione a trazione longitudinale (L) del core di balsa è stata eseguita in accordo alla norma ASTM D3039/D3039-93 [26], utilizzando provini dog-bone con teste rinforzate con tabs in alluminio. La caratterizzazione a taglio nel riferimento principale del materiale (LT) è stata ottenuta in accordo con la ASTM D 5379/D 5379M – 98 [27], cioè tramite prova di taglio “Iosipescu”.

La caratterizzazione a trazione trasversale (T) è stata ottenuta mediante *flatwise tensile test* eseguito direttamente sul core in accordo con la norma ASTM C297-61 [28], usando provini quadrati incollati a piatti metallici che ne trasferiscono il carico tramite apposito adesivo.

Infine, la caratterizzazione delle performance a compressione trasversale (T) è stata eseguita mediante il *flatwise compressive test* in accordo con la norma ASTM C365-57 [29].

L'andamento della curva tensione-deformazione ottenuta dal *flatwise tensile test*, mostra un comportamento elastico lineare fino ad un livello di deformazione di circa 1,8%, seguito da una rottura repentina per distacco trasversale. L'evidenza sperimentale ha mostrato che sotto trazione trasversale (fuori dal piano) la rottura del sandwich è causata dal cedimento del core in balsa. La resistenza a trazione trasversale del core è pertanto inferiore alla adesione core-skin.

Più complesso è il comportamento tipico sotto compressione fuori dal piano, rappresentato nella seguente Fig.7 che riporta l'andamento della curva carico-deformazione ottenuta dal *flatwise compressive test* per i sandwich in ASRN 4. Simile comportamento è stato rilevato per gli altri tipi di skins.

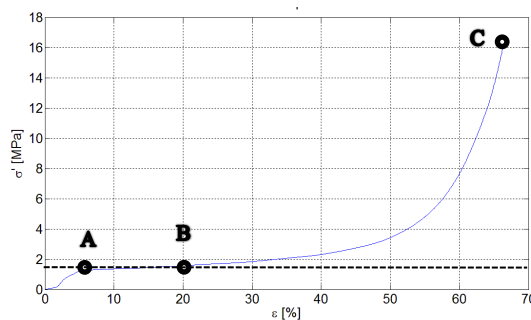


Figura 7: flatwise compressive test su sandwich ASRN 4 e core di balsa

Dalla figura 7 si osserva come il materiale presenta inizialmente un comportamento elastico lineare (tratto lineare 0-A), seguito da una sorta di scorrimento plastico (plateau A-B) che corrisponde al collasso per *microbuckling* della balsa [25], con successivo tratto curvilineo (tratto B-C) con progressiva crescita della pendenza [10,13,31], corrispondente ad una progressiva densificazione [25] a compressione della balsa.

Le caratteristiche elastiche e la resistenza del core, quali il modulo di Young $E_{L,c}$ e la resistenza $\sigma_{L,c}$ ottenute dalla prova di trazione, il modulo di Young a trazione trasversale $E_{T,c}$ e compressione trasversale $E'_{T,c}$ e la relativa resistenza a trazione trasversale $\sigma_{L,c}$ e a compressione trasversale $\sigma_{L,c}'$, sono riportate nella sopra riportata tabella 1. Si osserva in pratica una buona rigidezza longitudinale ($E_L = 4300$ MPa) associata ad una resistenza piuttosto modesta (4.9 MPa); inoltre, la rigidezza a compressione trasversale risulta di poco

inferiore di quella a trazione trasversale, mentre al contrario la resistenza a compressione trasversale risulta un poco più elevata della resistenza a trazione trasversale.

4.3 Caratterizzazione strutturale del sandwich

La caratterizzazione dei 3 tipi di sandwich considerati nel presente studio, è stata ottenuta tramite prova di flessione a tre punti (TPB), prova di taglio (Short Beam Shear Test, SBST), flatwise tensile test e il flatwise compressive test. Nella seguente figura è riportato un provino sandwich opportunamente strumentato e montato sulla macchina prova materiali per il TPB.

4.3.1 Prova di flessione a tre punti (TPB)

Le prove TPB e SBST sono state eseguite in accordo con la normativa ASTM C393-62 [23]. Per queste prove, sono stati realizzati provini in sandwich con span length minore e maggiore del valore critico corrispondente a $2r_{max}$ (147,2 mm, 139,0 mm e 78 mm rispettivamente per sandwich con skins in ASRTT, AARTT e ASRN 4).

Di seguito a titolo di esempio sono riportate l'immagine di un provino (Fig.8) soggetto a flessione, i valori delle caratteristiche limite e le curve sperimentali delle prove di flessione per alcuni dei sandwich esaminati. In pratica non sono stati rilevati significativi scostamenti nel comportamento meccanico dei sandwich dovuti alle diverse tipologie di matrici usate né alle diverse tipologie di fibre di agave considerate, striata e americana, trattata in NaOH con eventuale trazione, e non trattata. Gli scostamenti in ogni caso sono quelli prevedibili sulla base delle caratteristiche delle fibre determinate mediante apposite prove dei compositi da essi ottenuti, ovvero mediante prove sperimentali su singola fibra.

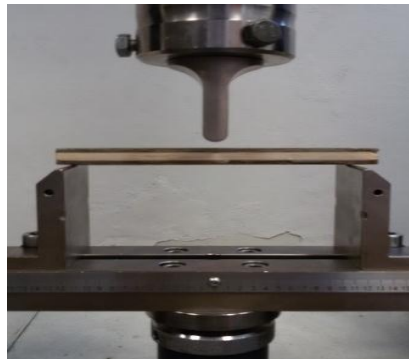


Figura 8: Provino sandwich montato sulla macchina di prova per TPB test.

Tabella 2. Valori teorici e sperimentali e relativi scostamenti percentuali delle caratteristiche di sollecitazione limite flettente e di taglio, e del relativo rapporto per i diversi sandwich esaminati.

| Valori teorici | | Risultati sperimentali | | Scost. % | |
|----------------|------------------|------------------------|--------------------|----------|-------|
| AARTT | M_{max} (N) | 1225,2 | M_{max}^* (N) | 890,0 | -37,7 |
| | T_{max} (N/mm) | 17,6 | T_{max}^* (N/mm) | 23,4 | 24,6 |
| | r_{max} (mm) | 69,5 | - | - | - |
| ASRTT | M_{max} (N) | 1414,0 | M_{max}^* (N) | 1040,2 | -35,9 |
| | T_{max} (N/mm) | 19,2 | T_{max}^* (N/mm) | 27,0 | 28,9 |
| | r_{max} (mm) | 73,6 | - | - | - |
| ASRN 4 | M_{max} (N) | 703,9 | M_{max}^* (N) | 818,6 | 14,0 |
| | T_{max} (N/mm) | 18,1 | T_{max}^* (N/mm) | 14,6 | -24,0 |
| | r_{max} (mm) | 39,0 | - | - | - |

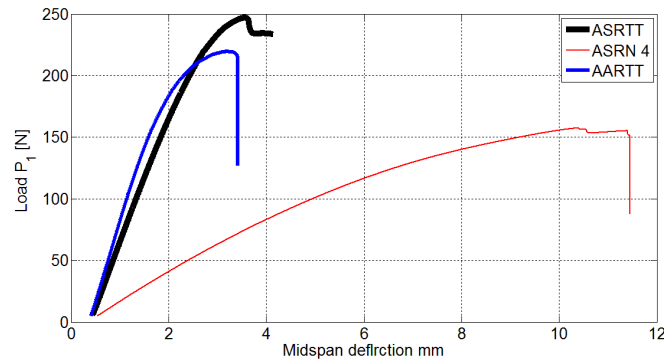


Figura 9: Curve carico-abbassamento relative alle prove TPB per i 3 diversi sandwich esaminati.

In particolare, in Fig.9 le curve relative ai sandwich con skins in ASRTT e AARTT si riferiscono a provini lunghi soggetti a flessione dominante, mentre la curva relativa al sandwich con skins in ASRN 4 si riferisce a provini corti soggetti a taglio prevalente. Come è pure possibile osservare esplicitamente dalla seguente figura 10, in accordo con il modello teorico i provini lunghi in ASRTT e AARTT hanno ceduto per delaminazione all'interfaccia skin-core (Fig.10a) mentre i provini corti in ASRN 4 hanno ceduto per trazione della skin inferiore (Fig.10b).

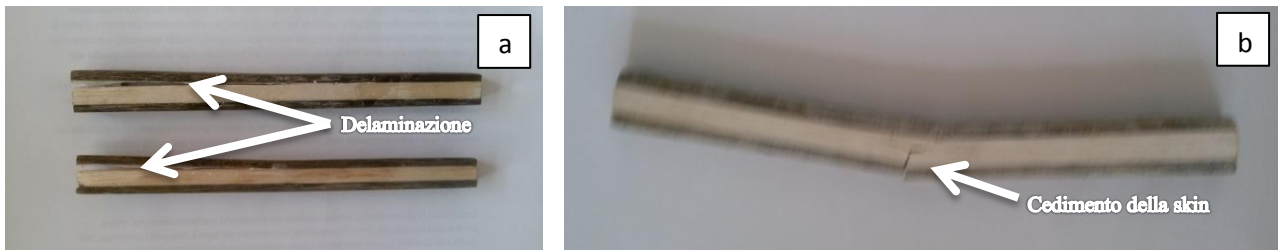


Figura 10: Cedimento dei provini corti con skin in (a) ASRTT e AARTT e dei provini lunghi con skins (b) in ASRN 4.

Dalle prove eseguite sui provini sandwich sono stati stimati sperimentalmente i valori di $\tau_{LT,c}^*$ e $\sigma_{L,s}^*$ utilizzando le formule date dalla norma ASTM [23].

4.3.2 Prova di taglio nel piano

La prova di taglio nel piano del sandwich è stata eseguita seguendo la normativa ASTM C237-61 [30], con l'utilizzo di un trasduttore LVDT HBM W 10 TK per misurare lo spostamento relativo delle due facce opposte della struttura del sandwich. La figura 11 mostra la tipica curva τ - γ ottenuta dalle prove di taglio sulle tre tipologie di provini.

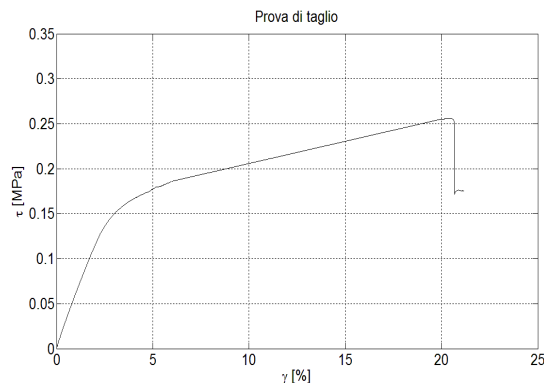


Figura 11: Curva tipica tensione tangenziale-scorrimento, relativa alla prova di taglio nel piano.

Dalla Fig.11 si osserva che i sandwich esaminati presentano sotto sollecitazione di taglio nel piano, un comportamento essenzialmente bi-lineare con significativo scorrimento a rottura che può arrivare al 20%

circa. Questo comportamento è da attribuire principalmente alla balsa che presenta appunto un notevole scorrimento a rottura in presenza di taglio sul piano, comportamento peraltro tipico di materiali compositi unidirezionali. Usando l'approccio indicato dalla norma ASTM C237-61 [30], da questa prova è possibile calcolare il modulo di elasticità trasversale $G_{LT,c}$ del core che è stato già stimato (vedi tabella 1).

L'analisi sperimentale dimostra che la rottura dei sandwich analizzati avviene per delaminazione all'interfaccia skin-core. Nella seguente figura 12, a titolo di esempio è mostrata una foto del sandwich con skin in ASRN 4, dopo la prova di taglio:



Figura 12: Meccanismo di rottura del sandwich con skins ASRN 4

Si osserva che la resistenza a taglio del sandwich determinata con tale prova ($\tau_{TL,c}=0.26$) è molto inferiore di quella ricavata nella prova di taglio "Iosipescu" ($\tau_{LT,c}=1.5$). Peraltro, questo avviene per delaminazione all'interfaccia core-skins e ciò evidenzia che la resistenza a taglio nel piano dell'adesivo è inferiore a quella della balsa. I risultati di cui si è discusso sono riportati in tabella 1.

4.3.3 Flatwise tensile test

Il flatwise tensile test è stato eseguito considerando la normativa ASTM C297-61 [28]. In figura 13(a) è mostrata la tipica curva tensione-deformazione ottenuta con i sandwich esaminati.

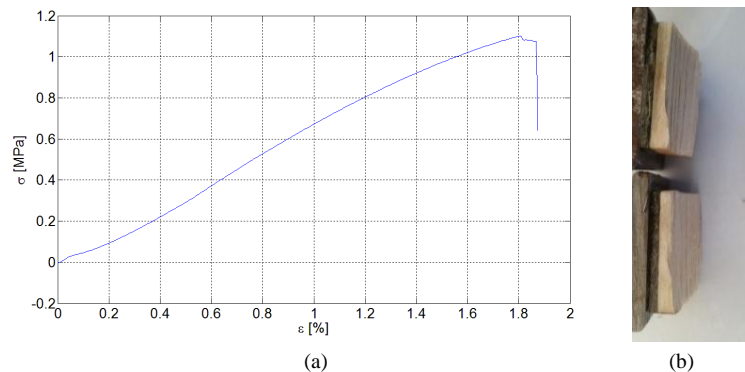


Figura 13: curva tipica σ - ε relativa al flatwise tensile test su sandwich (a) e immagine di provino rotto (b).

Il meccanismo di danneggiamento coinvolge la rottura del core per cedimento a trazione trasversale (vedi Fig.13b). Dalla prova effettuata è quindi possibile valutare la resistenza a trazione trasversale del core $\sigma_{T,c}$ (vedi tab.1).

4.3.4 Flatwise compressive test

Il flatwise compressive test è stato eseguito in conformità alle normative ASTM C365-57 [29], usando provini quadrati ottenuto da ciascun sandwich esaminato. Il comportamento meccanico del sandwich sotto tale sollecitazione è fortemente dominato da quello del core, già analizzato sotto la stessa sollecitazione al paragrafo 4.2, e da cui si sono ricavati $E'_{T,c}$ ed $\sigma'_{T,c}$ (vedi tabella 1) per maggiore dettaglio sui relativi risultati ottenuti.

5. DISCUSSIONE

L'evidenza sperimentale ha mostrato per i sandwich eco-compatibili esaminati un comportamento in linea di principio in buon accordo con le previsioni teoriche. Infatti, è stata confermata con buona approssimazione come la lunghezza critica sia per sandwich con skins in ASRTT e AARTT, che per sandwich con skins in ASRN 4, regola le modalità di cedimento del sandwich sotto sollecitazioni prevalenti di flessione e taglio. In altre parole, è stato confermato che per provini con lunghezza inferiore al valore critico stimato teoricamente, la rottura dei sandwich esaminati avviene per taglio e questo in particolare produce cedimento della interfaccia core-skin. Al contrario, per provini di lunghezza superiore al valore critico, il cedimento avviene per collasso degli skins ed in particolare dello skin soggetto a tensioni positive.

Non sono stati osservati fenomeni di corrugamento né di indentazione durante l'esecuzione dei test, ed è pertanto possibile affermare che questi non sono in genere meccanismi di ordinario danneggiamento dei sandwich esaminati. Si è inoltre osservato dal *flatwise tensile test* che la resistenza del sandwich alla trazione trasversale è relativamente modesta per via della limitata resistenza in tale direzione del core. La resistenza del legno di balsa sottoposto a trazione trasversale risulta essere più bassa della resistenza della interfaccia incollata core-skin. Infine, i risultati sperimentali in termini di resistenza a flessione e taglio mostrano in generale un discreto accordo le previsioni teoriche. In particolare, se la rottura del sandwich è data dal cedimento della skin soggetta a trazione, il valore di M_{max} calcolato mediante l'equazione (1) sottostima il valore sperimentale del 14% (vedi tabella 2). Al contrario se la rottura avviene per delaminazione, il valore T_{max} calcolato dall'equazione (2) sovrastima il valore sperimentale del -24%. Infine, prove di taglio nel piano hanno evidenziato che il cedimento dei sandwich esaminati avviene in genere con meccanismo di danneggiamento che involge la delaminazione alla interfaccia core-skin evidenziando come la resistenza a taglio nel piano di tale interfaccia risulti in questo caso più bassa della resistenza del core. In definitiva è possibile affermare che ulteriori miglioramenti delle performance meccaniche dei sandwich esaminati possono ottenersi mediante incollaggio core-skin da eseguirsi utilizzando un apposito adesivo in grado di aumentare la resistenza della interfaccia; altresì, ulteriori miglioramenti potrebbero ottenersi mediante sostituzione del core in balsa con altro materiale naturale (es. sughero o altro) che esibiscano un migliore comportamento a trazione trasversale.

6. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono stati messi a punto sandwich eco-compatibili costituiti da core in balsa e skins in composito a matrice epossidica "green" rinforzata con fibre di agave della varietà striata ed americana, appositamente estratti da piante coltivate in campi sperimentali nell'ambito di un progetto finanziato con fondi europei dalla Regione Siciliana e finalizzato allo sfruttamento dei terreni marginali. Attraverso una campagna sistematica di prove sperimentali è stato rilevato l'effettivo comportamento meccanico di tali biomateriali con particolare riferimento agli effettivi meccanismi di danneggiamento. La caratterizzazione sperimentale eseguita, da accurate indicazioni per la progettazione meccanica di tali materiali che possono essere vantaggiosamente utilizzati in svariati campi della produzione industriale, da quello automobilistico a quello navale, a quello della nautica da diporto ecc. L'analisi sperimentale mostra per tali sandwich una significativa non linearità, con un differente comportamento sotto carico di trazione, compressione e taglio. Le previsioni teoriche sulla resistenza a flessione e taglio non sono in genere molto accurate: se la modalità di rottura avviene per cedimento delle skins, la previsione teorica sottostima il momento limite di rottura con un errore medio del 14%, mentre in caso contrario (rottura a taglio) il valore teorico della resistenza a taglio sovrastima quello effettivo con un errore medio del 24%.

Sotto trazione trasversale i sandwich esaminati esibiscono una resistenza molto bassa dovuta alla limitata resistenza del core in questa direzione; tale resistenza è ancora più bassa di quella di adesione skin-core. L'uso di altri materiali naturali per il core (es. sughero ecc.) potrebbe pertanto migliorare le performance dei sandwich eco-compatibili messi a punto. Infine, la prova di taglio ha mostrato che il cedimento dei sandwich è dovuto alla più bassa resistenza a taglio dell'adesivo (resina epossidica green) rispetto al legno di balsa. Ulteriori studi per aumentare l'adesione a taglio della interfaccia core-skin, per esempio mediante uso di apposito adesivo, piuttosto che la resina usata quale matrice degli skins, potrebbero pertanto migliorare le prestazioni a taglio nel piano.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Vinson JR. The behaviour of sandwich structures of isotropic and composite materials. Westport: Technomic; 1999.
- [2] Mines RAW, Worrall CM, Gibson AG. Low velocity perforation behaviour of polymer composite sandwich panels. *Int J Impact Engng.* 1998; 21(10): 855–79.
- [3] Torre L, Kenny JM. Impact testing and simulation of composite sandwich structures for civil transportation. *Compos Struct.* 2000; 50: 257–67.
- [4] Kootsookos A, Burchill PJ. The effect of the degree of cure on the corrosion resistance of vinyl ester/glass fibre composites. *Composites A* 2004; 35: 501–8.
- [5] Allard JF. Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials. Elsevier Applied Science; 1993.
- [6] Sahraoui S, Mariez E, Etchessahar M. Mechanical testing of polymeric foams at low frequency. *Polym Test* 2001; 20:93–6.
- [7] Kalaprasad G, Pradeep P, George Mathew, Pavithran C, Sabu Thomas. Thermal conductivity and thermal diffusivity analyses of low-density polyethylene composites reinforced with sisal, glass and intimately mixed sisal/glass fibres. *Compos Sci Technol.* 2000; 60: 2967–77.
- [8] Anderson, Melvin S. Optimum proportions of truss core and web-core sandwich plates loaded in compression. NASA TN D-98; 1959.
- [9] Steeves CA, Fleck NA. Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part I: analytical models and minimum weight design. *Mech Sci* 2003; 46: 561–83.
- [10] Steeves CA, Fleck NA. Material selection in sandwich beam construction. *Scripta Mater* 2004; 50: 1335–9.
- [11] Furqan Ahmad, Heung Soap Choi, Myung Kyun Park. A Review: Natural Fiber Composites Selection in View of Mechanical, Light Weight, and Economic Properties. *Macromol. Mater. Eng.* 2015, 300, 10–24.
- [12] Danielsson M, Grenestedt JL. Gradient foam core materials for sandwich structures: preparation and characterisation. *Composites A* 1998; 29:981–8.
- [13] Lin Hong-Ru. The structures and property relationships of commercial foamed plastics. *Polym Test* 1997; 16: 429–43.
- [14] Vaikhanski L, Nutt SR. Fiber-reinforced composite foam from expandable PVC microspheres. *Composites A* 2003; 34: 1245–53.
- [15] Kim J, Swanson R. Design of sandwich for concentrated loading. *Compos Struct* 2001;52:365–73.
- [16] Belingardi G, Cavatorta MP, Duella R. Material characterization of a composite-foam sandwich for the front structure of a high speed train. *Compos Struct.* 2003; 61: 13–25.
- [17] Corigliano AZ, Rizzi E, Papa E. Experimental characterization and numerical simulations of a syntactic-foam/glass-fibre composite sandwich. *Compos Sci Technol.* 2000; 60: 2169–80.
- [18] Mouritz AP, Thomson RS. Compression, flexure and shear properties of a sandwich composite containing defects. *Compos Struct.* 1999; 44: 263–78.
- [19] Gdoutos EE, Daniel IM, Wang KA. Compression facing wrinkling of composite sandwich structures. *Mech Mater* 2002; 35: 511–22.
- [20] Hadi BK, Matthews FL. Development of Benson–Mayers theory on the wrinkling of anisotropic sandwich panels. *Compos Struct.* 2000; 49: 425–34.
- [21] Sokolinsky VS, Shen H, Vaikhanski L, Nett SR. Experimental and analytical study of nonlinear bending response of sandwich beams. *Compos Struct.* 2003; 60: 219–29.
- [22] Petras A, Sutcliffe MPF. Indentation failure analysis of sandwich beams. *Compos Struct* 2000;50:311–8.
- [23] Mines RAW, Alias A. Numerical simulations of the progressive collapse of polymer composite sandwich beams under static loading. *Composites A* 2002; 33: 11–26.
- [24] Mines RAW, Alias A. Numerical simulations of the progressive collapse of polymer composite sandwich beams under static loading. *Composites A* 2002; 33: 11–26.
- [25] Borsellino C, Calabrese L, Valenza A. Experimental and numerical evaluation of sandwich composite structures. *Compos Sci Technol* 2004; 64: 1709–15.
- [26] ASTM D3039/D3039-93, Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials; 1993.
- [27] ASTM D 5379/D 5379M – 98, Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method; 1998.

- [28] ASTM C297-61, Standard test method for tensile strength of flat sandwich constructions in flatwise plane; 1961.
- [29] ASTM C365-57, Standard test method for flatwise compressive strength of sandwich cores; 1957.
- [30] ASTM C273-61, Standard test method for shear properties in flatwise plane of flat sandwich constructions or sandwich cores; 1961.
- [31] Mines RAW, Jones N. Approximate elastic–plastic analysis of the static and impact behavior of polymer composite sandwich beams. *Composites* 1995; 26: 803–14.