

ANALISI SPERIMENTALE DEL COMPORTAMENTO A FATICA DI UNA STRUTTURA SANDWICH COMPOSITO-HONEYCOMB

*G. Belingardi^a, P. Martella^{*a}, L. Peroni^a*

^a Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino – Corso Duca degli Abruzzi, 24 – 10129 Torino – Italy

Sommario

Il comportamento flessionale di una struttura sandwich composito-honeycomb è stato studiato attraverso prove sperimentali di flessione su 4 punti, sia statiche che a fatica. Due differenti tipologie di provini sono stati testati: integri e difettosi. Nei difettosi una delle lamine in composito risultava parzialmente scollata dal nucleo in honeycomb di alluminio. Dall'interpolazione dei risultati delle prove di fatica sono stati ottenuti i diagrammi SN, mentre il limite di fatica è stato valutato attraverso una procedura "stair-case". Sono stati riscontrati due differenti meccanismi di cedimento: per i provini integri il cedimento è avvenuto a causa del collasso della lamina in composito sottoposta a compressione, mentre i provini difettosi hanno ceduto a causa della rottura delle pareti delle celle del honeycomb all'apice della zona difettosa.

Abstract

The fatigue behaviour of honeycomb sandwich beams was experimentally investigated through four-point bending tests. Two kinds of specimens, initially undamaged and damaged due to an interface debonding, have been tested. The fatigue tests results are presented in standard SN diagrams with a best curve fit of the experimental data, while the fatigue limit is evaluated through a stair-case procedure. Two different failure mechanisms were detected: undamaged specimens failure happened due to the collapse of the compressed face, while damaged specimens failure occurred due to the collapse of the honeycomb cell walls at the tip of the debonded portion.

Parole chiave: sandwich, fatica, difetto

1. INTRODUZIONE

Com'è noto le strutture sandwich nascono come risposta all'esigenza di coniugare leggerezza e resistenza, caratteristiche spesso contrastanti nella maggior parte dei materiali di interesse ingegneristico. Una costruzione sandwich è costituita da un nucleo con bassa densità unito a due lamine sottili e molto resistenti; combinando materiali e geometrie diverse si ottiene una grande varietà di strutture, e quindi una notevole versatilità di impiego. Lo sviluppo di nuovi materiali negli ultimi decenni ha permesso la diffusione di queste strutture in molti settori, da quello aerospaziale, a quello dei trasporti, a quello civile. L'interesse dei ricercatori si è però focalizzato sul comportamento a fatica di queste strutture soltanto negli ultimissimi anni; questo è quindi un campo ancora relativamente inesplorato, anche a causa della gran varietà di materiali che possono costituire nucleo e lamine.

Studi sul comportamento a fatica flessionale di strutture sandwich sono stati svolti da Olsson e Lönnö [1], Echtermeyer et al. [2], Buene et al. [3], Allen and Shenoi [4], Shenoi et al. [5], Burman e Zenkert [6,7,8]. Tali ricercatori hanno, nella maggior parte dei casi, considerato strutture con nuclei costituiti da schiume polimeriche, solo in un lavoro [8] Burman and Zenkert hanno considerato un nucleo in honeycomb di alluminio.

La resistenza meccanica di un componente strutturale è in generale influenzata dalla presenza di difetti, la quale determina una riduzione, più o meno evidente, delle proprietà strutturali del componente, tra cui il limite di fatica. Nelle strutture sandwich difetti tipici, come la mancanza di adesione all'interfaccia lamina-nucleo o danneggiamenti del nucleo stesso, possono essere causati dal processo di fabbricazione, da impatti o da altri eventi accidentali.

Stabilire la riduzione di durata a fatica, dovuta alla presenza di un difetto, è un problema molto complesso. Nei loro studi ([7] e [8]) Burman and Zenkert hanno proposto un approccio semplificato per determinare la durata a fatica di una struttura sandwich in presenza di un difetto. Tale approccio si basa sostanzialmente sulla riduzione della durata a fatica del componente integro per mezzo di un fattore moltiplicativo, che tiene conto della diminuzione della resistenza statica del componente difettoso rispetto al componente integro.

In questo lavoro si presentano i risultati di una campagna di prove di fatica flessionale su strutture sandwich, sia integre che difettose, effettuate presso il laboratorio La.Di.Spe. Meccanici di Vercelli della II Facoltà di Ingegneria del Politecnico di Torino. Gli obiettivi principali di questo studio sono: approfondire la conoscenza sul comportamento a fatica di strutture sandwich con nucleo in honeycomb, ricavare i digrammi di fatica SN, determinare la variazione di rigidità flessionale del componente durante le prove e misurare le proprietà meccaniche residue al termine delle prove. Inoltre si vuole valutare se il modello proposto da Burman e Zenkert in [7] e [8] possa essere applicato anche ai risultati di questo studio pur essendo in presenza di una struttura con geometria e tipologia di difetto piuttosto differenti da quelli studiati dai due autori citati sopra.

2. PROVINI E METODO DI PROVA

I provini (figura 1) sono stati forniti dall'azienda aerospaziale spagnola EADS-CASA nell'ambito del progetto europeo COMPASS. Le dimensioni geometriche del provino sono mostrate in figura 2.

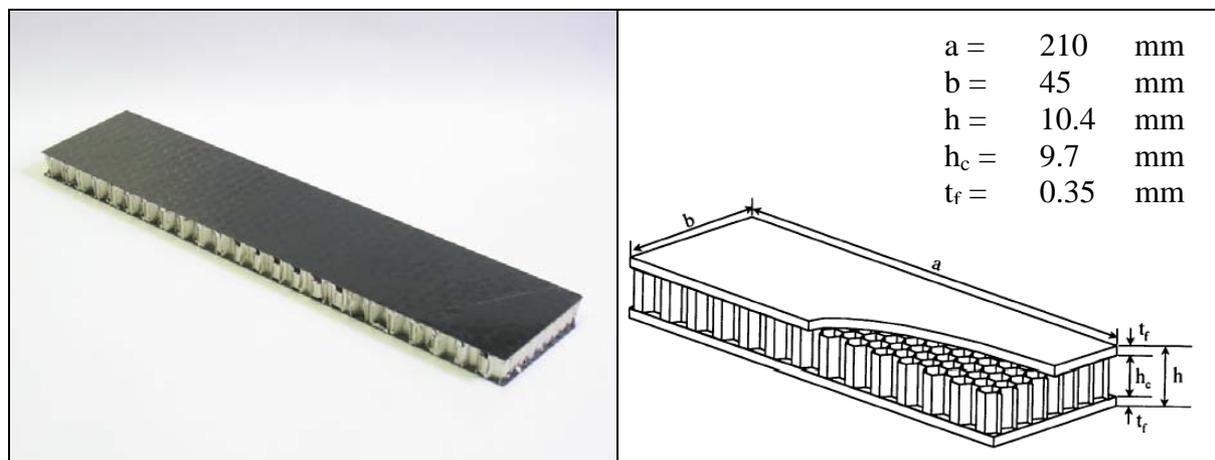


Figura 1: Provino sandwich: nucleo in honeycomb di alluminio e lamine in composito in fibra di carbonio

Figura 2: Dimensioni geometriche del provino

Le facce del provino sono costituite da lamine in composito formate da 3 strati (-60/+60/0, spessore dello strato 0.07 mm, densità 1650 Kg/m²) in fibra di carbonio CYCOM 950-1 / 33% / M55J / 70, le cui proprietà meccaniche sono riportate in tabella 1. Il nucleo del provino è un honeycomb (3/16-5056-0.001; HON-/50, densità 50 Kg/m², diametro delle celle 4.8 mm, spessore della parete delle celle 0.025 mm) costituito da fogli in alluminio piegati ed incollati in modo da formare una struttura a celle esagonali. Come mostrato in figura 3, il metodo di assemblaggio del honeycomb produce alcune celle

“a parete doppia”; nella configurazione provata le celle a parete doppia erano parallele all’asse longitudinale del provino.

Tabella 1: Proprietà meccaniche degli strati in fibra di carbonio delle facce

	Direzione delle fibre	Direzione trasversale alle fibre
Modulo elastico: trazione (GPa)	293	5.8
Modulo elastico: compressione (GPa)	289	6.9
Valore di prima rottura: trazione (MPa)	1361	17
Valore di prima rottura: compressione (MPa)	605	199

Due tipi di strutture sono stati sottoposti ad indagine sperimentale. Una struttura integra, priva di difetti visibili nello strato di adesivo tra le facce e il nucleo, ed una struttura difettosa, che presentava un evidente difetto di fabbricazione dovuto alla parziale mancata adesione al nucleo in honeycomb di un’estremità di una delle due lamine, come mostrato in figura 4. La lunghezza del difetto, definita come lunghezza della porzione di lamina non incollata al nucleo, era pari a circa 60 mm. Tutti i provini con difetto sono stati esaminati in modo da verificare che la lunghezza del difetto fosse la stessa in ogni provino.

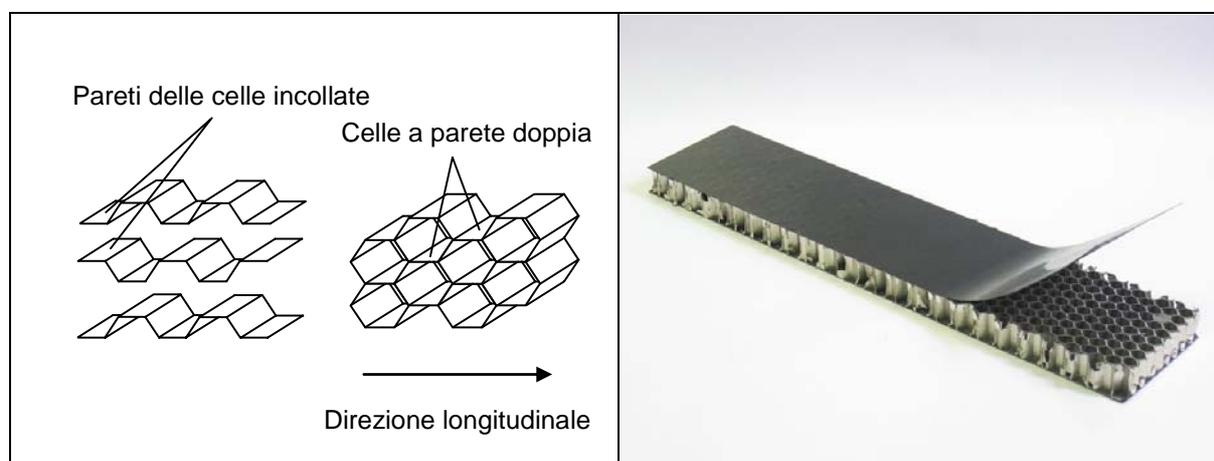


Figura 3: Schema della costruzione del nucleo in honeycomb

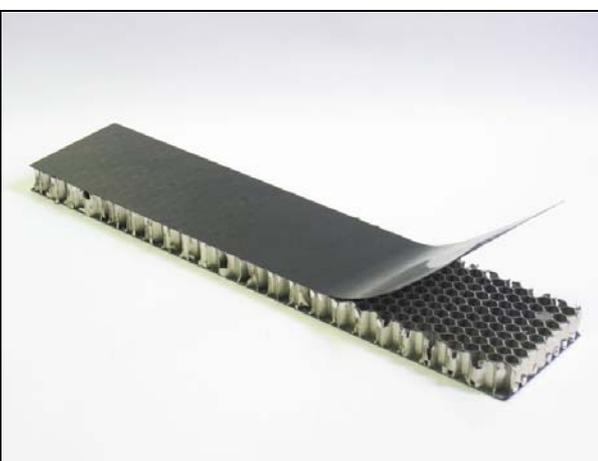


Figura 4: Provino difettoso

Il provino difettoso può essere suddiviso in due parti: la prima nella quale entrambe le facce risultano incollate al nucleo in honeycomb, e la seconda nella quale una delle due facce è completamente scollata dal nucleo. Come è naturale aspettarsi, la rigidezza flessionale della prima parte è molto maggiore rispetto a quella della seconda. E’ importante sottolineare che le facce in composito, il nucleo in honeycomb, le dimensioni del provino e la posizione iniziale del difetto sono piuttosto differenti rispetto a quanto investigato da Burman and Zenkert in [7] e [8].

Le prove sperimentali, sia statiche che di fatica, sono state eseguite con un’attrezzatura di flessione su 4 punti il cui schema è rappresentato in figura 5. Tale sistema, progettato e costruito specificatamente per queste prove, è stato collegato ad una macchina di prova servo-idraulica DARTEC. Nel sistema di prova adottato i supporti interni possono ruotare attorno all’asse passante per il perno centrale. Quando un provino difettoso è sottoposto alla prova di flessione, si ottiene una deformata asimmetrica a causa della differente rigidezza flessionale delle due parti (con difetto e senza difetto) in cui esso può essere diviso. La rotazione dei supporti interni permette all’attrezzatura di prova di adattarsi alla configurazione asimmetrica del provino; in questo modo è possibile ottenere, durante tutta la prova, lo stesso carico su entrambi i supporti interni e di conseguenza mantenere la condizione di flessione su quattro punti.

In figura 5 è rappresentato, schematicamente, un provino posizionato sull’attrezzatura di prova. Nelle porzioni di provino comprese tra i supporti esterni ed i supporti interni la forza di taglio è costante, mentre il momento flettente cresce linearmente dal supporto esterno, dove ha valore nullo, verso quello interno. Nella porzione di provino compresa tra i supporti interni il momento flettente è

costante, mentre la forza di taglio è nulla; di conseguenza il valore massimo del momento flettente si raggiunge nella parte compresa tra i supporti interni. Essi sono stati posizionati in modo tale che, nel caso di provino difettoso, la parte finale della lamina scollata dal nucleo in honeycomb (zona di passaggio da lamina scollata a lamina incollata al nucleo) si venisse a trovare nella zona a momento costante. Due tipi di prove, statiche e dinamiche, sono state svolte su entrambe le tipologie di provino, integro e difettoso.

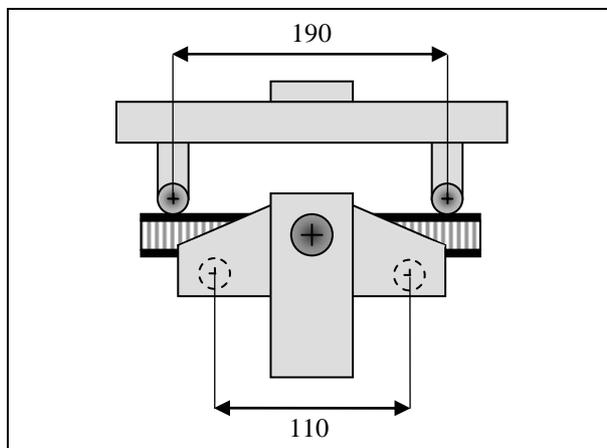


Figura 5: Schema del sistema di prova per flessione a 4 punti

3. PROVE STATICHE

Le prove statiche sono state eseguite in controllo di spostamento ad una velocità di 0.01 mm/s in modo da ottenere una condizione di carico quasi-statica. Esse sono state condotte prima delle prove di fatica allo scopo di valutare sia la rigidità flessionale sia la resistenza del componente, in modo da stabilire i livelli di carico per le prove di fatica. Per entrambe le tipologie di provino sono state svolte 6 prove, durante le quali sono stati misurati lo spostamento dei supporti interni dell'attrezzatura di prova e il carico applicato. Da questi valori è stata ricavata, tramite un'operazione di regressione lineare, la "rigidità flessionale" del provino definita come pendenza del tratto lineare della curva momento flettente-spostamento.

3.1 Provini integri

Nel caso di provini integri, il momento flettente di rottura per unità di larghezza del provino (valore medio e deviazione standard) è riportato in tabella 2 unitamente alla rigidità flessionale per unità di larghezza.

Tabella 2: Risultati delle prove statiche sui provini integri

	Rigidità flessionale / spessore (N/mm)	Momento flettente di rottura / spessore (Nmm/mm)
Valore medio	292	425
Deviazione standard	8.8	28

In figura 6 sono rappresentate alcune curve momento flettente-spostamento ottenute dalle prove sperimentali statiche sui provini integri. In tutte le prove l'andamento è lineare fino alla rottura che avviene in maniera improvvisa, non sono stati quindi rilevati cambiamenti di rigidità fino alla rottura. Tutti i provini hanno ceduto per 'face wrinkling', cioè per collasso localizzato della faccia compressa, in accordo con quanto riportato in [9]; la linea di frattura, come mostrato in figura 7, è parallela alla larghezza del provino. La maggior parte delle rotture sono avvenute vicino ai supporti interni, mentre non è stata rilevata nessuna rottura nelle celle del honeycomb o nello strato di adesivo.

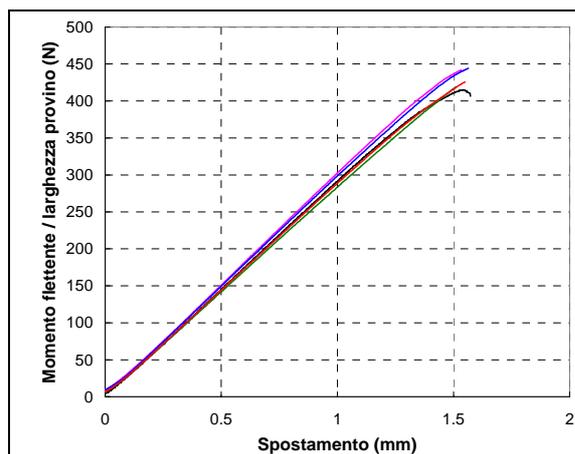


Figura 6: Prove statiche: curve carico – spostamento per il provino integro

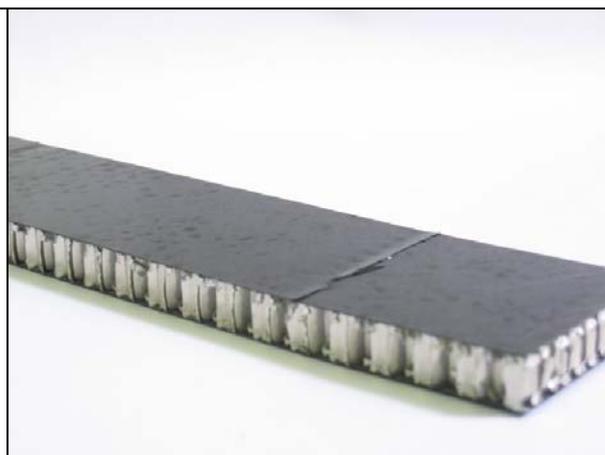


Figura 7: Prove statiche: rottura nel provino integro

3.2 Provini difettosi

I provini difettosi sono stati provati in due differenti configurazioni, A e B, come mostrato in figura 8; in entrambi i casi la parte finale della lamina scollata è stata posizionata tra i supporti interni.

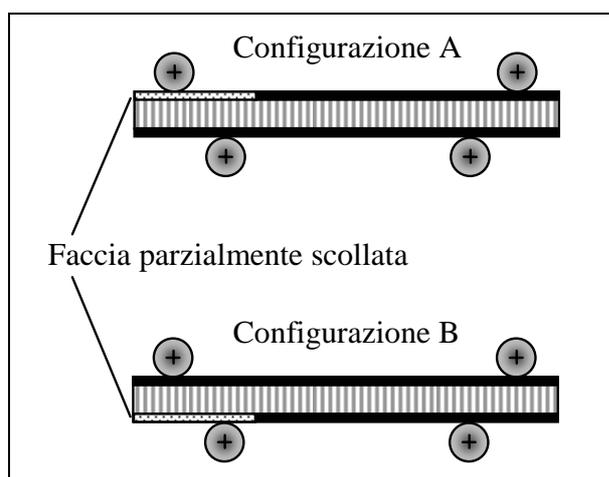


Figura 8: Configurazioni di prova statica per i provini difettosi

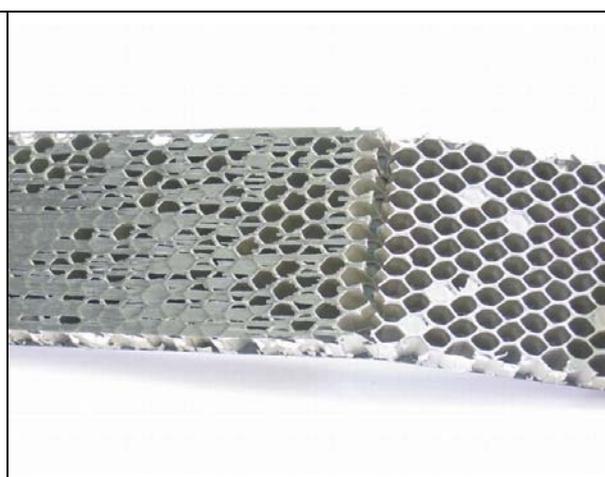


Figura 9: Prove statiche configurazione A: rottura nel provino difettoso

Nella configurazione A la faccia parzialmente scollata è stata posizionata in modo tale da trovarsi in uno stato di trazione. In tale condizione di carico la rottura è avvenuta nel nucleo in honeycomb in corrispondenza della fine del difetto (zona di passaggio da lamina scollata a lamina incollata). Responsabili del cedimento del nucleo in honeycomb sono state le tensioni di trazione parallele alla lunghezza del provino dovute al momento flettente. Come mostrato in figura 9, la frattura è iniziata nella parte superiore della parete delle celle, dove la tensione di trazione era più elevata, e si è propagata per tutto lo spessore del provino. Nessun cedimento nell'incollaggio delle pareti del honeycomb è stata rilevata.

In figura 10 sono rappresentate alcune curve momento flettente-spostamento ottenute dalle prove sperimentali. Le curve sono praticamente lineari fino alla prima caduta di carico dovuta alla rottura di una delle pareti delle celle del honeycomb. In seguito si verifica una serie di cadute nel carico dovute alle rottura in sequenza di altre pareti, fino ad arrivare alla rottura del provino.

Il momento flettente di rottura per unità di larghezza del provino (valore medio e deviazione standard) è riportato in tabella 3 unitamente alla rigidezza flessionale per unità di larghezza

Nella configurazione B, la faccia parzialmente scollata è stata posizionata in modo da trovarsi in uno stato di compressione. In tale condizione di carico le celle del honeycomb alla fine del difetto (zona di passaggio da lamina scollata a lamina incollata) si trovano sottoposte ad uno stato di compressione nella loro parte superiore.

Tabella 3: Risultati delle prove statiche sui provini difettosi: configurazione A

	Rigidezza flessionale / spessore (N/mm)	Momento flettente di rottura / spessore (Nmm/mm)
Valore medio	43	78.3
Deviazione standard	5.8	8.2

Come mostrato in figura 11, in questa configurazione, i provini hanno ceduto nel nucleo in honeycomb a causa del collasso, dovuto alla compressione, delle pareti delle celle parallele alla lunghezza del provino, tale meccanismo di cedimento è noto come ‘dimple’ [9]. Nessun cedimento nell’incollaggio delle pareti del honeycomb è stata rilevato.

Le prove di fatica sono state condotte nella configurazione A, in quanto si è voluta valutare la possibilità in una propagazione del difetto nello strato di adesivo.

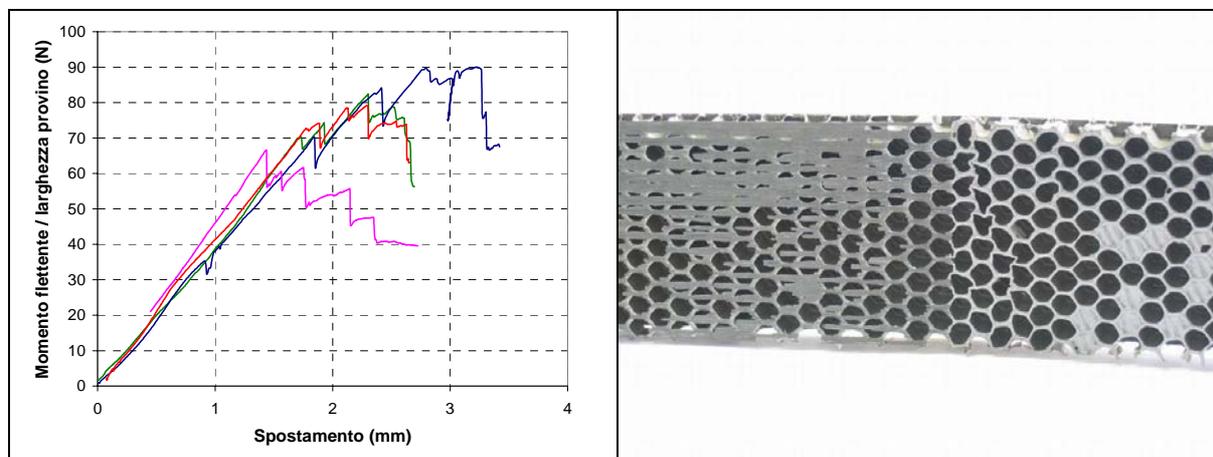


Figura 10: Prove statiche: curve carico – spostamento per il provino difettoso: configurazione B

Figura 11: Prove statiche configurazione B: rottura nel provino difettoso

4. PROVE DI FATICA

Gli obiettivi delle prove di fatica sono la valutazione del limite di fatica per 10^6 cicli utilizzando una procedura “stair-case” e l’ottenimento delle curve SN. Inoltre si vuole valutare se il modello previsionale di Burman and Zenkert sia applicabile al caso considerato. Le prove sono state condotte in controllo di carico, con ampiezza scelta in base ai risultati delle prove statiche; per il carico è stato scelto un andamento sinusoidale con frequenza $f = 10$ Hz e rapporto di carico $R = 0.1$. In tale condizione la faccia del provino in contatto con i supporti esterni si trova sottoposta a tensioni di trazione variabili nel tempo, mentre l’altra faccia, in contatto con i rulli interni, si trova sottoposta a tensioni di compressione variabili nel tempo. Il valore della rigidezza flessionale del provino è stato misurato durante ogni prova in modo da valutare una possibile riduzione di rigidezza a causa del carico ciclico. I dati sperimentali sono stati interpolati tramite una funzione di Weibull:

$$M_f(N) = M_{f,D(50\%)} + (M_s - M_{f,D(50\%)}) \cdot e^{-[(\log N)/a]^b} \quad (1)$$

dove $M_f(N)$ è il valore massimo del momento flettente a N cicli, $M_{f,D}$ è il limite di fatica valutato secondo la procedura “stair case” e M_s è il momento di rottura statico. I parametri, a e b , sono stati calcolati minimizzando l’errore quadratico tra i risultati sperimentali e i valori ottenuti tramite l’equazione 1. Tutti i valori di momento flettente si riferiscono ad una probabilità di rottura del 50%.

4.1 Provini integri

I limiti di fatica in termini di momento flettente M_f per unità di larghezza del provino per tre differenti probabilità di rottura, 10% 50% e 90%, ottenuti tramite la procedura “strair case”, sono riportati in tabella 4.

Tabella 4: Risultati delle prove di fatica sui provini integri

	Limite di fatica $M_{f,D} / w$ (Nmm/mm)
Probabilità di rottura 50%	289
Probabilità di rottura 10%	281
Probabilità di rottura 90%	296

Come nelle prove statiche, tutti i provini hanno ceduto per collasso della faccia compressa con una linea di frattura parallela alla larghezza del provino e disposta nella zona tra i supporti interni. Il nucleo in honeycomb non ha subito danneggiamenti. In alcuni casi, in concomitanza con la rottura, si è verificato uno scollamento localizzato tra lamina e nucleo nella zona attorno alla linea di frattura (figura 12).



Figura 12: Prove di fatica: rottura nel provino integro

I risultati delle prove di fatica sono rappresentati, in termini di diagramma SN, in figura 13. Il carico è espresso come valore massimo del momento flettente normalizzato rispetto al valore del momento flettente di rottura statica, la curva interpolante è stata ottenuta tramite l'equazione 1.

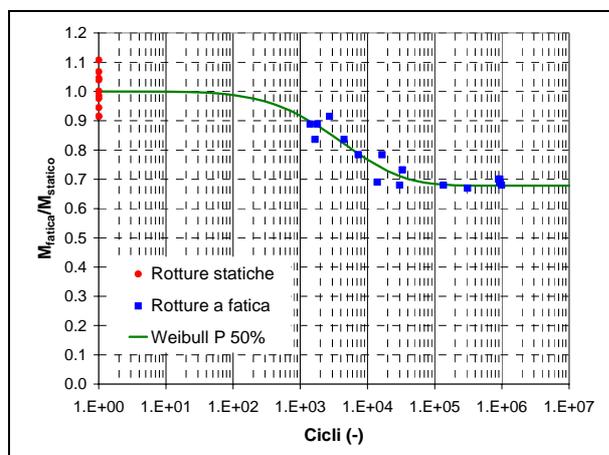


Figura 13: Prove di fatica: digramma SN per i provini integri

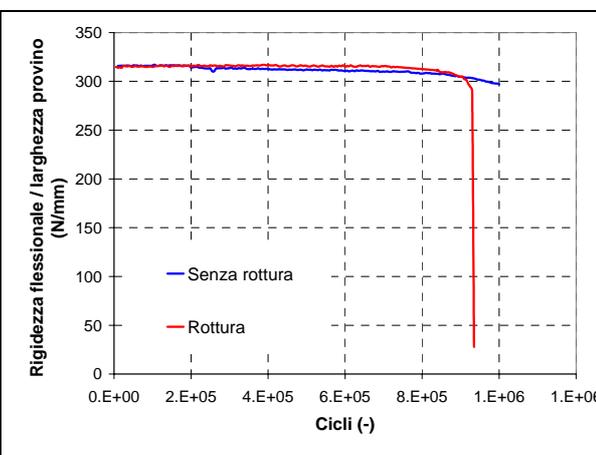


Figura 14: Prove di fatica: andamento della rigidezza flessionale per i provini integri

In figura 14 sono rappresentati gli andamenti del valore della rigidezza flessionale in funzione del numero di cicli per due differenti prove, una conclusasi a 10^6 cicli senza rottura ed una con rottura prima di 10^6 cicli. In entrambi i casi la rigidezza flessionale si è mantenuta costante, nel caso con rottura un'improvvisa e brusca riduzione di rigidezza si è verificata appena prima della rottura stessa. Tale comportamento risulta compatibile con la modalità di cedimento, collasso della lamina compressa, dei provini integri. Pertanto la fase di nucleazione e crescita del danneggiamento a fatica è avvenuta senza riduzione di rigidezza fino alla rottura.

4.2 Provini difettosi

Il limite di fatica in termini di momento flettente M_f per unità di larghezza del provino per tre differenti probabilità di rottura, 10% 50% e 90%, ottenuti tramite la procedura "strair case", sono riportati in tabella 5. Come nelle prove statiche la rottura è avvenuta nel nucleo in honeycomb al confine tra la parte di faccia scollata e la parte di faccia incollata al nucleo. Responsabili del cedimento del nucleo in honeycomb sono state, anche in questo caso, le tensioni di trazione parallele alla lunghezza del provino dovute al momento flettente.

Tabella 5: Risultati delle prove di fatica sui provini difettosi

	Limite di fatica $M_{f,D}/w$ (Nmm/mm)
Probabilità di rottura 50%	26.3
Probabilità di rottura 10%	22.8
Probabilità di rottura 90%	29.8

Come mostrato in figura 15, le cricche si sono originate nella parte superiore delle pareti delle celle del honeycomb, dove le tensioni di trazione erano più elevate, e quindi si sono propagate nello spessore del nucleo. Nessun cedimento nell'incollaggio delle pareti del honeycomb è stata rilevato.

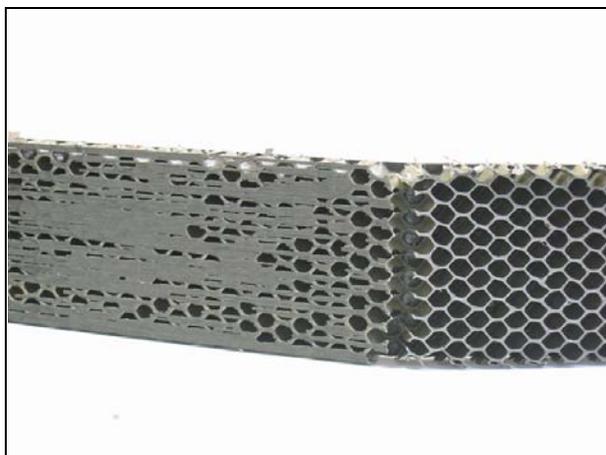


Figura 15: Prove di fatica: rottura nel provino integro

I risultati delle prove di fatica sono rappresentati, in termini di diagramma SN, in figura 16. Il carico è espresso come valore massimo del momento flettente normalizzato rispetto al valore del momento flettente di rottura statica, la curva interpolante è stata ottenuta tramite l'equazione 1.

In figura 17 sono rappresentati gli andamenti del valore della rigidezza flessionale in funzione del numero di cicli per due differenti prove, una conclusasi a 10^6 cicli senza rottura ed una con rottura prima di 10^6 cicli. In entrambi i casi la rigidezza flessionale si è mantenuta costante, è possibile individuare solo variazioni di piccola entità. Nella prova con rottura un'improvvisa e brusca riduzione di rigidezza si è verificata appena prima del cedimento, cioè quando le cricche nelle pareti delle celle hanno iniziato a propagare. Pertanto, anche per i provini difettosi, la fase di nucleazione e crescita del danneggiamento a fatica avviene senza riduzione di rigidezza fino alla rottura.

I risultati delle prove di fatica per i provini difettosi presentano un livello di dispersione maggiore rispetto ai provini integri.

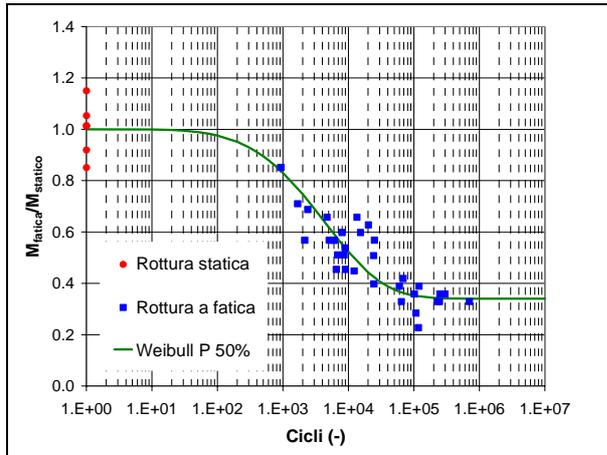


Figura 16: Prove di fatica: digramma SN per i provini difettosi

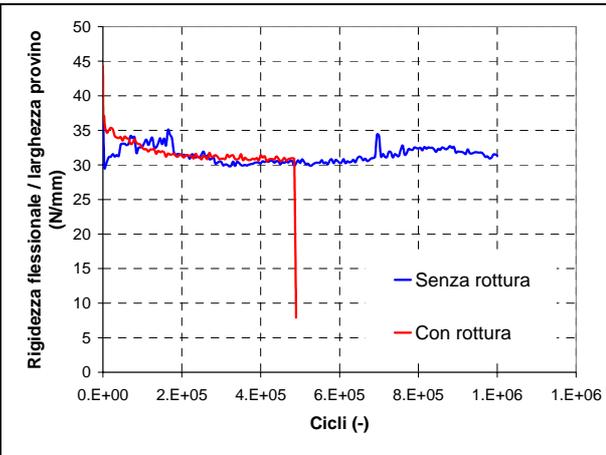


Figura 17: Prove di fatica: andamento della rigidezza flessionale per i provini difettosi

4.3 Modello previsionale

In [7] e [8] Burman and Zenkert propongono un approccio semplificato per determinare il limite di fatica di strutture a sandwich con difetti iniziali. Tale approccio si basa sostanzialmente sulla riduzione della vita a fatica del componente integro per mezzo di un fattore moltiplicativo che tiene conto della riduzione di resistenza statica del componente difettoso rispetto al componente integro, secondo la relazione seguente:

$$M_{f,d}(N) = k_D \cdot k_{amp} \cdot M_{f,in}(N) \tag{2}$$

dove $M_{f,d}(N)$ è la resistenza a fatica prevista per il componente difettoso in corrispondenza di N cicli, k_D è il fattore di riduzione della esistenza statica definito come rapporto tra la resistenza statica del provino difettoso e la resistenza statica del provino integro, k_{amp} è il fattore di ampiezza di apertura della cricca, il cui valore dipende dal rapporto di carico R (per $R = 0.1$ $k_{amp} = 0.9$), $M_{f,in}(N)$ è la resistenza a fatica del provino integro dopo N cicli, dato dalla funzione di Weibull riportata in equazione 1.

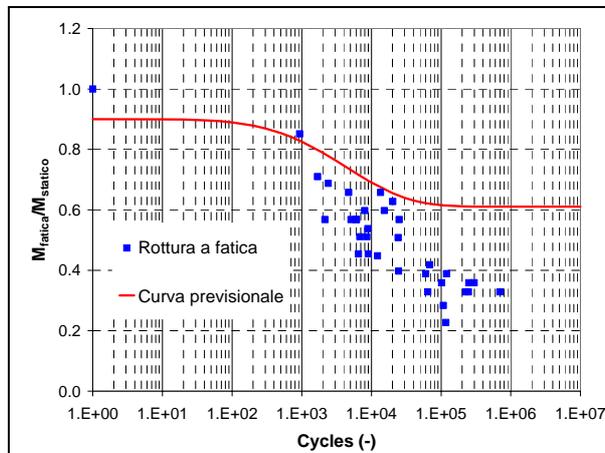


Figura 18: Prove di fatica provini difettosi: confronto con modello previsionale

La figura 18 mostra il digramma SN con i risultati delle prove sperimentali sui provini difettosi e la curva di Weibull di previsione della vita a fatica. Come si può notare, nel caso in esame, il modello previsionale di Burman and Zenkert non risulta corretto a causa dei meccanismi di cedimento completamente diversi tra provino integro e provino difettoso.

5. RESISTENZA RESIDUA DEI PROVINI INTEGRATI

Poichè durante le prove di fatica i provini integri non sono soggetti a riduzioni di rigidità flessionale, è stata valutata, al fine di confrontarla con quella dei provini integri “non affaticati”, la resistenza residua di quei provini integri che hanno raggiunto 10^6 cicli senza rottura.

Il momento flettente di rottura per unità di larghezza del provino (valore medio e deviazione standard) è riportato in tabella 6 unitamente alla rigidità flessionale per unità di larghezza.

Tabella 6: Risultati delle prove statiche sui provini integri “affaticati”

	Rigidità flessionale / spessore (N/mm)	Momento flettente di rottura / spessore (Nmm/mm)
Valore medio	290	434
Deviazione standard	14.2	39

Come è possibile notare, il valor medio del momento flettente di rottura e della rigidità flessionale dei provini “affaticati” sono molto prossimi a quelli dei provini “non affaticati”. Tale comportamento appare compatibile con i meccanismi di cedimento dei provini integri. Poiché infatti in questo tipo di provino la rottura avviene per collasso localizzato della faccia compressa, senza riduzione della rigidità fino a rottura, è ragionevole pensare che la resistenza residua e la rigidità dei provini “affaticati”, che hanno terminato la prova di fatica senza rottura, sia molto vicina a quella dei provini non affaticati.

6. CONCLUSIONI

Sono state svolte delle prove di flessione su 4 punti, sia statiche che di fatica, al fine di valutare il comportamento flessionale di una struttura a sandwich costituita da un nucleo in honeycomb di alluminio a celle esagonali e da due facce in composito di fibra di carbonio. Due tipi di provini, integro e difettoso, sono stati sottoposti ad indagine; nel provino difettoso uno delle facce risultava scollata dal nucleo per una lunghezza di 60 mm a partire da una delle estremità del provino.

Nelle prove statiche i provini integri hanno ceduto nella zona compresa tra i supporti interni per collasso localizzato della faccia compressa. Mentre nei provini difettosi il cedimento è avvenuto nel nucleo in honeycomb al confine tra la parte con la faccia scollata e la parte con entrambe le facce correttamente incollate. La rottura nel nucleo è stata causata dalle tensioni di trazione parallele alla lunghezza del provino dovute al momento flettente, la frattura è iniziata nella parte superiore della parete delle celle, dove la tensione era più elevata, e si è propagata per tutto lo spessore del provino.

Le prove di fatica sono state svolte allo scopo di valutare il limite di fatica per 10^6 cicli utilizzando una procedura “stair-case” ed ottenere le curve SN. Inoltre si è voluto valutare se il modello di Burman and Zenkert [7,8], fosse applicabile al caso considerato.

Come nelle prove statiche, i provini integri hanno ceduto a fatica per collasso localizzato della faccia compressa con una linea di frattura parallela alla larghezza del provino e disposta nella zona tra i supporti interni. In alcuni casi appena prima della rottura si è verificato uno scollamento localizzato tra lamina e nucleo nella zona attorno alla linea di frattura.

Anche per i provini difettosi nelle prove di fatica è stata ottenuta una modalità di cedimento analoga a quella delle prove statiche: la rottura avviene nel nucleo in honeycomb al confine tra la parte con la faccia scollata e la parte con entrambe le facce correttamente incollate. Responsabili del cedimento del nucleo in honeycomb sono state le tensioni di trazione parallele alla lunghezza del provino dovute al momento flettente, le cricche si sono originate nella parte superiore delle pareti delle celle del honeycomb, dove le tensioni di trazione sono più elevate, e quindi si sono propagate nello

spessore del nucleo. Pertanto due meccanismi di cedimento completamente differenti sono stati riscontrati, collasso localizzato della faccia compressa nel caso del provino integro e rottura nel nucleo in honeycomb per il provino difettoso.

Il modello previsionale di Burman and Zenkert basato sulla riduzione della vita a fatica del componente integro per mezzo di un fattore moltiplicativo che tiene conto della riduzione di resistenza statica del componente difettoso rispetto al componente integro, è risultato non valido per i componenti esaminati. Tale circostanza si è verificata a causa dei meccanismi di cedimento completamente diversi tra provino integro e provino difettoso.

Al termine delle prove di fatica è stata valutata la resistenza residua di quei provini integri che hanno raggiunto 10^6 cicli senza rottura. Il confronto di tali valori con i corrispondenti dei provini integri “non affaticati” ha mostrato come il carico di fatica non influenzi la resistenza statica e la rigidità flessionale dei provini integri.

7. RINGRAZIAMENTI

Questo studio è stato parzialmente finanziato dall’Unione Europea nell’ambito del progetto COMPASS, contratto n. G5RD-CT-2001-00575.

BIBLOGRAFIA

- [1] Olsson KA, Lönnö A. Test procedures for foam core materials. In: Olsson KA, Reichard RP editors. Proceedings of the First International Conference on Sandwich Constructions. Solihull (UK): EMAS Ltd. 1989, pp. 293-318.
- [2] Echtermeyer AT, Buene L, McGeorge D, Sund OE. Four Point Bend Testing of GRP Sandwich Beams – Part 1. Der Norske veritas VR-91-P0013. 1991.
- [3] Buene L, Echtermeyer AT, Sund OE. Fatigue Properties of PVC Foam Core Materials. Der Norske veritas Report 91-2049. 1991.
- [4] Allen HG, Sheno RA. Flexural Fatigue tests on Sandwich Structures, In: Weismann-Bermann D, Olsson KA, editors. Proceedings of the Second International Conference on Sandwich Constructions. Solihull (UK): EMAS Ltd. 1989, pp.499-517.
- [5] Sheno RA, Clark SD, Allen HG. Fatigue Behaviour of Polymer Composite Sandwich Beams. Journal of Composite Materials 1995;29(18):2423-2445.
- [6] Burman M, Zenkert D. Fatigue of foam core sandwich beams, Part I : Undamaged specimens. International journal of fatigue 1997;19(7):551-561.
- [7] Burman M, Zenkert D. Fatigue of foam core sandwich beams, Part II : Effect of initial damages. International journal of fatigue 1997;19(7)563-578.
- [8] Burman M, Zenkert D. Fatigue of undamaged and damaged honeycomb sandwich beams. Journal of sandwich structures and materials 2000;2:50-74.
- [9] Gibson LJ, Ashby MF. Cellular solids – Structures and properties 2nd ed. Cambridge University Press. 1997.
- [10] Weibull W. A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. Journal of Applied Mechanics, Transaction of the ASME. 1051;18(1):293-297.S. J. Cimpoeu, N. W. Murray