

Studio a compressione statica di pannelli honeycomb

G. Costanza, S. Ferrigno, M.E. Tata

Lo scopo del presente lavoro è illustrare i risultati dello studio condotto su pannelli a struttura sandwich in honeycomb di alluminio con celle esagonali mediante prove di compressione statica. In particolare si è voluto valutare il comportamento dell'anima di tali pannelli sottoposti a carichi di compressione. Lo studio è stato condotto in due fasi: nella prima fase sono stati realizzati dei campioni, a partire da un pannello di honeycomb di alluminio, con la stessa area superficiale e sono stati sottoposti a prove di compressione statica per valutare la ripetibilità dei risultati. Nella seconda fase sono state effettuate delle prove di compressione statica su campioni con diverso numero di celle, realizzati in modo analogo alla prima fase dello studio. Dall'analisi dell'andamento delle curve si evidenzia un comportamento ripetibile del materiale nei confronti di una sollecitazione di compressione statica. Le prove nella seconda parte dello studio sono state effettuate per analizzare l'effetto del numero di celle, della loro configurazione e del numero di pareti sulla resistenza del materiale a compressione. È stata riscontrata una proporzionalità diretta tra lo stress di plateau e il numero di celle sottoposte a compressione statica. Il valore medio del carico specifico (carico/perimetro delle celle) ottenuto è di 17,2 N/mm per il picco massimo iniziale e un carico specifico medio di 6,7 N/mm nel plateau. All'aumentare del numero di celle, aumentando il perimetro, si osserva una redistribuzione pressoché uniforme del carico tra le celle; è pertanto possibile, partendo dal valore di resistenza a compressione della singola cella, determinare il numero di celle necessario in funzione delle caratteristiche meccaniche da ottenere.

PAROLE CHIAVE: MATERIALI COMPOSITI, PANNELLI SANDWICH, HONEYCOMB DI ALLUMINIO, COMPRESSIONE STATICA, CELLE ESAGONALI

INTRODUZIONE

I materiali cellulari, comprese schiume e honeycomb, sono una classe di materiali con bassa densità, buona resistenza specifica, elevato modulo specifico ed eccellente capacità di assorbire energia. Diversi studi si sono concentrati su questi nuovi materiali permettendone applicazioni soprattutto nell'industria automobilistica, aerospaziale, dei trasporti e protezioni per esplosioni [1-6]. Le proprietà meccaniche delle strutture cellulari sono state studiate da diversi autori focalizzandosi sulla topologia geometrica [7, 8], metodi di produzione [9, 10] meccanismi di deformazione [11, 12], assorbimento di energia [13] effetto della velocità di deformazione [14, 15] e resistenza allo shock [16, 17]. Infatti l'utilizzo di materiali cellulari permette di ridurre il peso dei componenti realizzati e, sfruttando l'elevata rigidità specifica e l'integrazione multifunzionale, garantisce al contempo prestazioni equiparabili e talvolta superiori ai materiali tradizionali [16, 17]. Si considerano sempre materiali cellulari anche combinazioni di questi con altri materiali massivi, come i pannelli sandwich. Questi sono strutture costituite da tre parti distinte: le pelli, il core e l'adesivo.

G. Costanza, S. Ferrigno, M.E. Tata

Dipartimento di Ingegneria Industriale,
Università di Roma Tor Vergata, Roma, Italia

Le pelli del pannello sandwich sono in genere due lamiere sottili, rigide e resistenti formate da materiale denso, separate da uno strato spesso di materiale cellulare, il core. La rigidità flessionale che si ottiene con questa disposizione è di gran lunga superiore a quella che si ottiene con una singola piastra solida avente stesso peso e costituita dallo stesso materiale delle lamine superficiali. Il core è un elemento essenziale nei pannelli sandwich e ha molteplici funzioni: deve avere un'adeguata rigidità al taglio, per garantire che quando il pannello è piegato, le facce non scorrano una rispetto all'altra. Se quest'ultima condizione non è soddisfatta le facce si comportano semplicemente come due travi indipendenti. Il core deve essere anche abbastanza rigido da impedire che si verifichino delle instabilità locali a causa di sforzi di compressione agenti sulla lamina superficiale. Que-

sto studio ha riguardato il core in honeycomb a celle esagonali. Esso si presenta come una struttura a nido d'ape capace di assolvere le principali funzioni del core e di minimizzare il peso della struttura. In particolare, il nido d'ape d'alluminio (Fig. 1) è leggero, resistente alla compressione ed al taglio, resistente al fuoco e alla corrosione ed è riciclabile. Lo studio dei meccanismi di deformazione realizzato sulle celle esagonali dell'honeycomb evidenzia che se sollecitate nel loro piano, esse presentano una rigidità e una resistenza basse poiché le sollecitazioni hanno la tendenza a curvare le pareti cellulari. La rigidità e la resistenza nella direzione normale al piano X-Y sono invece molto maggiori essendo legate alla compressione o all'estensione delle pareti delle celle.

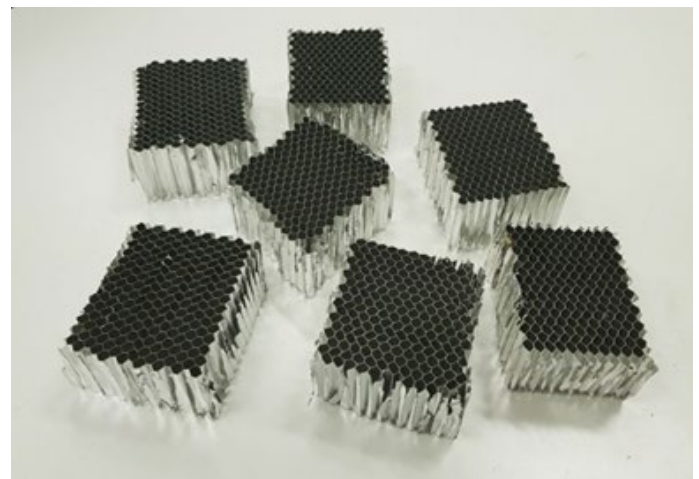


Fig.1 - Pannello e campioni con struttura a nido d'ape in alluminio /
Panel and aluminum samples with honeycomb structure.

Le proprietà del core dei pannelli sandwich nel piano e fuori piano sono sostanzialmente diverse perché i meccanismi con cui le celle si deformano e giungono a rottura sono differenti. Gli honeycomb sono molto più rigidi se vengono caricati lungo l'asse di sviluppo del prisma delle celle, ovvero parallelamente a Z. La funzione del core di un pannello sandwich è quella di resistere allo sforzo normale e al taglio agenti nel piano degli assi dei prismi esagonali. Quando un pannello viene caricato lungo l'asse Z, le pareti cellulari vengono tirate o compresse e il loro modulo è maggiore rispetto a quello ottenuto nel caso di sollecitazione del pannello nel piano. La resistenza al collasso plastico aumenta in maniera considerevole. C'è la possibilità che alcune celle degli honeycomb si rompano o si deformino durante lo svolgimento del proprio ruolo a causa di eventi di varia natu-

ra. Diverse simulazioni numeriche [18] mettono in evidenza che la resistenza di un honeycomb è fortemente dipendente dalla geometria e dai difetti delle celle: una perdita di solo il 5% delle pareti cellulari provoca una riduzione di più del 30% del modulo di resistenza. Lo studio di honeycomb in alluminio con celle regolari ha indicato che il collasso di una singola cella causa l'innesco della frattura interna al materiale. In questa ottica si è testato a compressione il core in honeycomb al variare del numero di celle.

MATERIALI E PROCEDURE SPERIMENTALI

L'attività sperimentale, composta di due distinte fasi, è stata condotta mediante prove di compressione statica, su dei campioni di honeycomb in lega di alluminio (lega serie 3000) con celle esagonali (lato 4 mm), estratti da un pannello san-

dwich (dimensioni 2500 mm x 1300 mm) privato delle pellicole esterne. Nella prima parte dello studio è stato valutato il comportamento dell'honeycomb di alluminio, mediante 4

campioni di forma quadrata, aventi approssimativamente la stessa area di base (1100 mm² e 1400 mm²) e di altezza pari a 50 mm (Fig. 4).

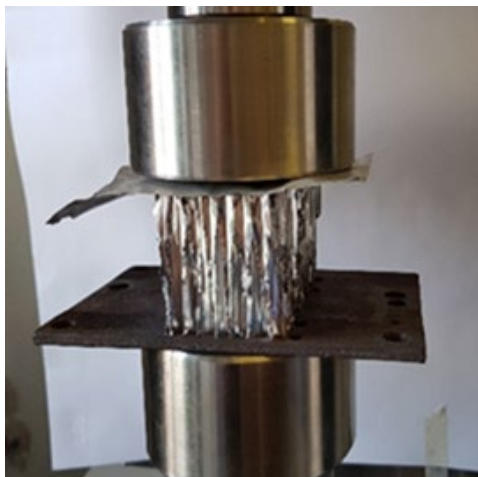


Fig.2 - Provino in honeycomb fra i piatti della macchina di compressione / Honeycomb sample in the compression machine plates.

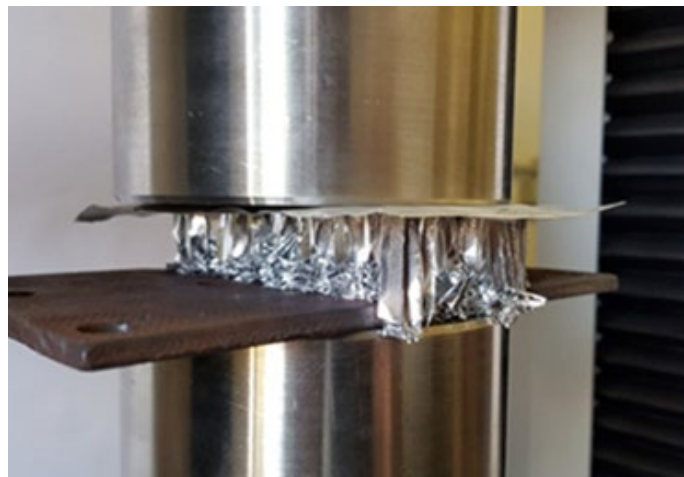


Fig.3 - Provino in honeycomb durante la prova di compressione. / Specimen in honeycomb during the compression test.

La prova di compressione statica, a cui sono stati sottoposti i campioni una volta tagliati, è avvenuta a velocità di spostamento della traversa costante pari a 5 mm/min. La prova è stata interrotta una volta raggiunta una deformazione del campione dell'80%. Nelle fig. 2 e 3 si può vedere un cam-

pione prima della prova di compressione e durante la stessa rispettivamente. Nelle Fig. 4 e 5 si può vedere la vista laterale di un campione indeformato e un ingrandimento di una porzione della faccia del campione al termine della prova di compressione.



Fig.4 - Vista laterale di un provino in honeycomb / Side view of a honeycomb specimen.

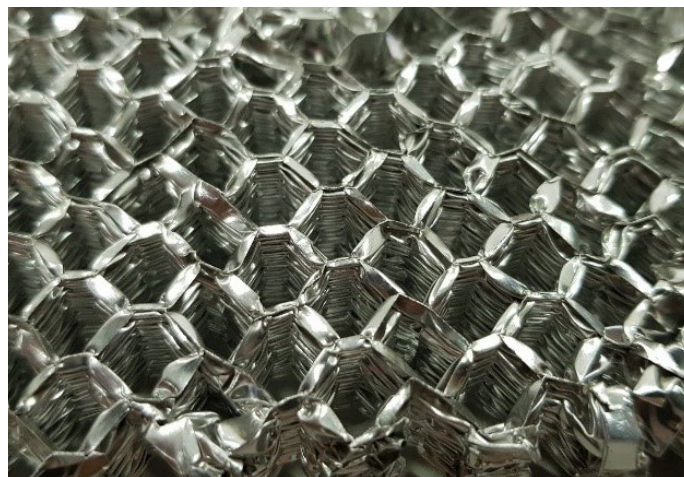


Fig.5 - Ingrandimento su una porzione della faccia del provino al termine della prova di compressione / Magnification of the face of the specimen at the end of the compression test

La seconda fase del lavoro ha avuto come scopo l'analisi della resistenza del materiale al variare del numero di celle di cui esso è composto. Sono stati altresì analizzati fenomeni d'instabilità e le modalità di collasso del provino durante la compressione. Inizialmente sono stati ricavati, a partire

dal pannello di honeycomb di alluminio, diversi campioni aventi un numero di celle crescenti, da uno fino a sei celle, disposte adiacenti fra di loro, come rappresentato nella Fig. 6. Per ciascuna tipologia di campione (con diverso numero di celle), sono stati realizzati 3 provini uguali.

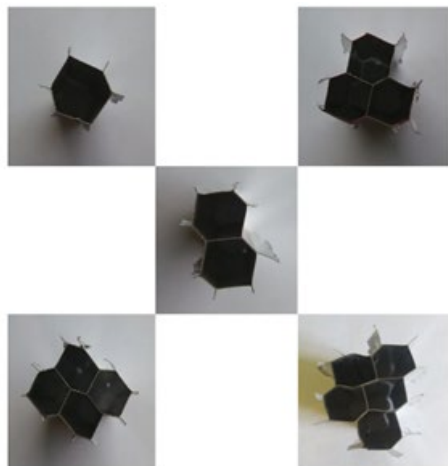


Fig.6 - Vista dall'alto delle celle esagonali estratte dall'honeycomb di alluminio / Top view of the hexagonal cells extracted from the aluminum honeycomb

Realizzare più prove su campioni con uno stesso numero di celle è risultato utile per due ragioni. In primis valutare la ripetibilità nel comportamento a compressione statica nel caso di una data configurazione di celle; secondariamente valutare l'instabilità del provino, che è prodotta dalle inevitabili imperfezioni della struttura legate al metodo manuale di realizzazione dei provini. L'inflessione che può generarsi in fase di compressione causa l'instabilità del provino e il conseguente collasso della struttura. Il provino non si deforma lungo il suo asse in fase di compressione, ma si disallinea. Lo studio è stato condotto per valutare come all'aumentare del numero di celle e a seconda della loro reciproca disposizione, si vadano a modificare le proprietà dell'honeycomb stesso. Anche in questa seconda parte del lavoro le prove di compressione sono state effettuate con velocità di spostamento della traversa pari a 5 mm/min. Tutti i provini, indipendentemente dal numero di celle, presentano sempre un'altezza pari a 50 mm. Nella Fig. 7 si possono vedere alcuni provini con diverso numero di celle al termine della prova di compressione.



Fig.7 - Vista dall'alto delle celle esagonali dopo compressione / Top view of the hexagonal cells after compression

RISULTATI E DISCUSSIONE

Il risultato delle prove di compressione è rappresentato dalla curva carico-spostamento a cui è stato sottoposto ciascuno dei quattro provini. Per il calcolo dell'area della sezione è stata fatta una approssimazione in quanto l'honeycomb ha una configurazione a nido d'ape e quindi presenta in gran parte una superficie cava. Per semplicità è stata presa in considerazione tutta la superficie, come se fosse stata piena, trascurando le zone cave. Nella Fig. 8 vengono rappresentate insieme le curve $\sigma - \epsilon$ dei 4 campioni. È possibile individuare in ciascuna curva tre zone caratteristiche: per piccole deformazioni abbiamo il picco massimo iniziale raggiunto dal campione sottoposto a compressione statica, una zona centrale in cui è possibile identificare un'ampia zona di plateau e infine una parte di densificazione per grandi deformazioni. La Tab. 1 riporta i principali risultati ricavati dall'analisi dei grafici di compressione statica, in particolare: l'area di base, il picco iniziale e il sigma medio di plateau.

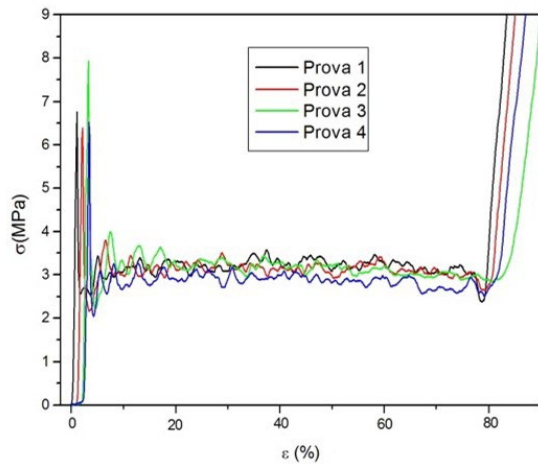


Fig.8 - Grafici di compressione dei 4 campioni di honeycomb/ Compression graphs of the 4 honeycomb samples

Andando a confrontare i dati ottenuti dalle quattro prove effettuate si può notare come a parità (o quasi) di area di base e di altezza del provino, il comportamento dell'honeycomb di alluminio sia equivalente. I valori del picco iniziale vanno da 6,4 a 7,9 MPa e il valore medio del sigma di plateau varia da 2,8 a 3,1 MPa mantenendosi quindi pressoché costanti. Si evidenzia come il provino numero 4, pur avendo un'area di base più estesa, raggiunga in proporzione un valore di picco iniziale inferiore. I risultati ottenuti sono soddisfacenti in quanto mettono in evidenza un comportamento del materiale stabile e ripetibile.

Per quanto riguarda la seconda parte dello studio, in Fig. 9 sono rappresentate le curve carico-deformazione al variare del numero di celle. Ciascuna delle curve è stata ottenuta facendo la media dei risultati delle prove svolte

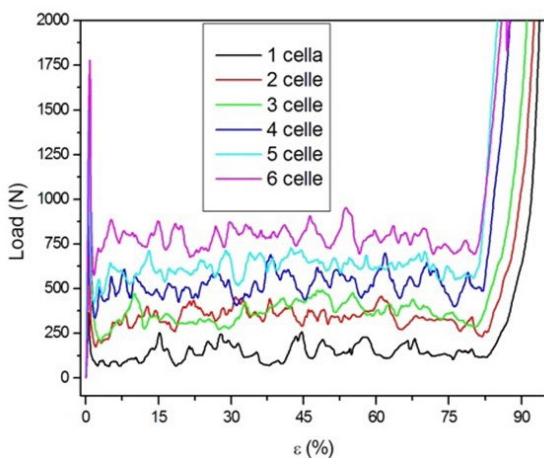


Fig.9 - Grafici carico-deformazione dei provini con differente numero di celle / Load-strain graphs of specimens with different number of cells.

	Prova 1	Prova 2	Prova 3	Prova 4
Area di base (mm ²)	1091	1185	1215	1496
Deformazione finale (%)	86,9	87,9	93,2	89,4
Picco iniziale (MPa)	6,8	6,4	7,9	6,5
Sigma medio di Plateau (MPa)	3,2	3,1	3,1	2,8

Tab.1 - Risultati delle prove di compressione/ Compression test results

sui 3 provini con lo stesso numero di celle. Dall'analisi dei grafici in Fig. 9 si può osservare che: le curve ottenute per i provini con un diverso numero di celle presentano un andamento analogo. Il valore del picco massimo iniziale e del sigma di plateau aumentano al crescere del numero di celle. L'andamento simile delle curve mette in evidenza un comportamento regolare del materiale nei confronti di una prova di compressione statica. I valori crescenti sia del picco massimo che del sigma di plateau sono dovuti al fatto che all'aumentare del numero di celle e quindi della superficie su cui è distribuito il carico si riduce la tensione e quindi aumenta la resistenza dell'honeycomb di alluminio. La Tab. 2 presenta i risultati medi delle prove di compressione statica realizzati sui provini con differente numero di celle.

N. celle	Picco max iniziale (N)	Deformazione finale (%)	Carico di Plateau (N)
1	365,4	94,4	142,0
2	738,2	93,5	337,0
3	1125,6	93,2	363,2
4	1130,2	89,5	520,5
5	1536,6	87,5	617,8
6	1779,0	90,0	784,0

Tab.2 - Risultati medi delle prove di compressione statica realizzati su provini con differente numero di celle / Average results of static compression tests carried out on specimens with different number of cells.

Dall'analisi dei risultati si può desumere quanto segue:

- 1) Il picco massimo iniziale del carico sopportato dal provino è direttamente proporzionale al numero di celle presenti. Tanto maggiori è il numero di celle tanto più alto è il valore di tale carico.
- 2) I provini con le celle disposte a forma di triangolo o simili, ovvero quelli aventi 3 celle, 5 celle e 6 celle, sono quelli più stabili in fase di compressione.
- 3) Il valore medio del carico che si registra durante il plateau risulta essere proporzionale al numero di celle del provino, analogamente a quanto visto per il picco massimo iniziale.

Tab.3 - Perimetro in funzione dei lati effettivi, Risultati medi delle deformazioni e dei carichi lineari (carico/perimetro effettivo) delle prove di compressione statica su provini con differente numero di celle / Perimeter as a function of the actual sides, Average results of deformations and linear loads (load / actual perimeter) of static compression tests on specimens with different number of cells.

N. celle	N. lati effettivi	Perimetro effettivo (mm)	Picco max iniziale (N/mm)	Def. Finale (%)	Carico di Plateau (N/mm)
1	6	24	15,2	94,4	5,9
2	11	44	16,7	93,5	7,7
3	15	60	18,6	93,2	6,0
4	19	76	14,9	89,5	6,9
5	23	92	16,7	87,5	6,7
6	27	108	16,5	90,0	7,3

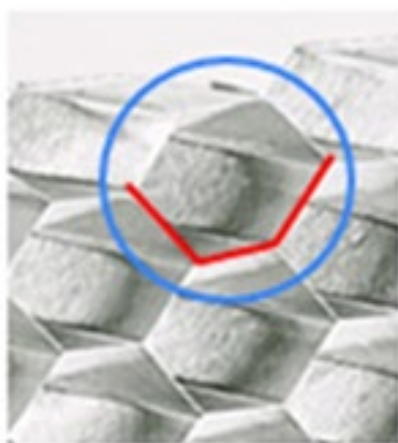


Fig.10 - Esempio di lati in comune fra le diverse celle/
Example of sides in common between the different cells.

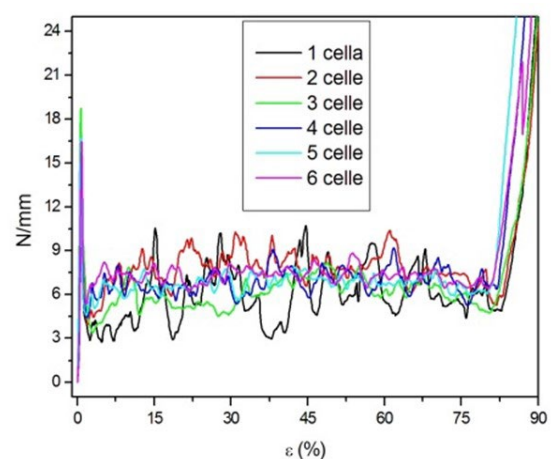


Fig.11 - Curve medie carico/perimetro effettivo - deformazione per i provini con differente numero di celle./
Average load / effective perimeter curves - deformation for specimens with different number of cells.

I provini caratterizzati dallo stesso numero di celle hanno risposto alla prova di compressione in maniera equivalente. Il carico registrato durante le prove di compressione statica è stato poi diviso per il perimetro relativo per ciascuno dei provini, per studiare come si redistribuisce all'aumentare del numero di celle. È stato deciso di dividere il carico per il perimetro e non per l'area della sezione resistente, poiché di fatto non si tratta di aree vere e proprie. Per semplicità di calcolo è stata assunta una lunghezza standard del lato della cella pari a 4 mm e si è tenuto conto una sola volta dei lati in comune tra celle adiacenti (fig.10). La Tab. 3 riporta il valore numerico del perimetro effettivo dei provini con un differente numero di celle che è stato considerato per il calcolo. La Fig. 11 mostra le sei curve medie (carico lineare in funzione della deformazione) ottenute per i provini con diverso numero di celle (da 1 a 6 celle). Analizzando il

grafico di Fig. 11 si possono notare due aspetti importanti: le curve ottenute per i provini con un diverso numero di celle presentano un andamento analogo; il valore pressoché costante del picco massimo iniziale e del sigma di plateau all'aumentare del numero di celle. Ciò vuol dire che all'aumentare della resistenza del provino, aumentando di pari passo anche il perimetro effettivo, il carico si redistribuisce equamente fra le varie pareti delle celle. La Tab. 3 sintetizza i principali risultati numerici al fine di poterli facilmente confrontare fra di loro. Si può notare che il valore medio del carico lineare associato al plateau è di circa 6,7 N/mm e un valore medio del picco massimo iniziale di circa 17 N/mm. Tali valori risultano all'incirca costanti e non dipendono dal numero di celle costituenti l'honeycomb.

CONCLUSIONI

L'honeycomb di alluminio (serie 3000) è un materiale che si contraddistingue per la sua leggerezza e per la sua elevata resistenza a compressione. I risultati ottenuti nello studio effettuato presentano una ridotta variabilità, mettendo in evidenza un comportamento del materiale piuttosto affidabile. Le prove di compressione statica effettuate nella prima fase dello studio, su campioni delle stesse dimensioni, hanno evidenziato una buona ripetibilità nei risultati, con dei valori del sigma di plateau e del picco massimo iniziale equivalenti.

Nella seconda fase dello studio sono stati sottoposti a compressione statica alcuni campioni di honeycomb con un numero crescente di celle esagonali disposte secondo diverse configurazioni. I risultati dei test hanno mostrato un aumento proporzionale del carico massimo e del sigma medio di plateau all'aumentare del numero di celle. Inoltre, si è osservato che all'aumentare della resistenza, aumentando di pari passo anche il numero di celle e quindi il perimetro, il carico complessivo si redistribuisce equamente fra le varie pareti delle celle. Lo dimostrano i valori di picco massimo iniziale e carico iniziale medio (N/mm) che assumono un valore all'incirca costante, indipendentemente dal numero di celle costituenti l'honeycomb.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano i Sigg. Benedetto Iacovone e Piero Plini per l'assistenza fornita nella preparazione dei provini.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Evans AG, Hutchinson JW, Ashby MF. Multifunctionality of cellular metal systems. *Prog Mater Sci* 1998; 43: 171–221. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(98\)00004-8](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(98)00004-8).
- [2] Gibson LJ, Ashby MF. *Cellular solids: structure and properties*. Cambridge university press; 1999. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139878326>.
- [3] Sun Y, Li QM. Dynamic compressive behaviour of cellular materials: a review of phenomenon, mechanism and modelling. *Int J Impact Eng* 2018; 112: 74–115. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.10.006>.
- [4] Tan PJ, Reid SR, Harrigan JJ, Zou Z, Li S. Dynamic compressive strength properties of aluminium foams. Part I-experimental data and observations. *J Mech Phys Solids* 2005; 53: 2174–205. <https://doi.org/10.1016/j.JMPS.2005.05.007>.
- [5] Zhao H, Gary G. Crushing behaviour of aluminium honeycombs under impact loading. *Int J Impact Eng* 1998; 21: 827–836. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(98\)00034-7](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(98)00034-7).
- [6] Ghorbel E. A viscoplastic constitutive model for polymeric materials. *Int J Plast* 2008; 24: 2032–2058. <https://doi.org/10.1016/j.IJPLAS.2008.01.003>.
- [7] Zhu HX, Knott JF, Mills NJ. Analysis of the elastic properties of open-cell foams with tetrakaidecahedral cells. *J Mech Phys Solids* 1997; 45: 319–343. [https://doi.org/10.016/S0022-5096\(96\)00090-7](https://doi.org/10.016/S0022-5096(96)00090-7).
- [8] Duan Y, Du B, Zhao X, Hou N, Shi X, Hou B, et al. The cell regularity effects on the compressive responses of additively manufactured Voronoi foams. *Int J Mech Sci* 2019; 164: 105–151. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105151>.
- [9] Costanza G, Montanari R, Tata ME. Optimization of TiH₂ and SiC content in Al foams. *Metall Ital* 2005; 97 (6): 41–47.
- [10] Costanza G, Tata ME. Metal foams: recent experimental results and further developments. *Metall Ital* 2011; 103(3): 3–7.
- [11] Bonatti C, Mohr D. Mechanical performance of additively-manufactured anisotropic and isotropic smooth shell-lattice materials: simulations & experiments. *J Mech Phys Solids* 2019; 122: 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2018.08.022>.
- [12] Ruan D, Lu G, Wang B, Yu T. In-plane dynamic crushing of honeycombs—a finite element study. *Int J Impact Eng* 2003; 28: 161–182. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(02\)00056-8](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(02)00056-8).
- [13] Avalor M, Belingardi G, Montanini R. Characterization of polymeric structural foams under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram. *Int J Impact Eng* 2001; 25: 455–472. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(00\)00060-9](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(00)00060-9).
- [14] Deshpande VS, Fleck NA. High strain rate compressive behaviour of aluminium alloy foams. *Int J Impact Eng* 2000; 24: 277–298. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(00\)00060-9](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(00)00060-9) [15] Zhao H, Elnasri I, Abdennadher S. An experimental study on the behaviour under impact loading of metallic cellular materials. *Int J Mech Sci* 2005; 47: 757–74. <https://doi.org/10.1016/j.IJMECSCI.2004.12.012>.
- [16] Reid SR, Peng C. Dynamic uniaxial crushing of wood. *Int J Impact Eng* 1997; 19: 531–570. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(97\)00016-X](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(97)00016-X).
- [17] Zheng Z, Wang C, Yu J, Reid SR, Harrigan JJ. Dynamic stress–strain states for metal foams using a 3D cellular model. *J Mech Phys Solids* 2014; 72: 93–114. <https://doi.org/10.1016/j.JMPS.2014.07.013>
- [18] Zhang L, Liu B, Gu Y, Xu XH. Modelling and characterization of mechanical properties of optimized honeycomb structure. *Int J Mech Mater Des* 2020; 16: 155–166. <https://doi.org/10.1007/s10999-019-09462-0>.

Static compression study of honeycomb panel

The aim of the present work is to illustrate the results of the study carried out on sandwich panels in aluminum honeycomb with hexagonal cells by means of static compression tests. In particular, the focus is to evaluate the behavior of the core of these panels subjected to compressive loads. The study was carried out in two steps: in the first step, samples were manufactured, starting from an aluminum honeycomb panel, with the same surface area and were subjected to static compression tests to evaluate the repeatability of the results. In the second step, static compression tests were performed on samples with different number of cells, carried out in a similar way to the first step of the study. The analysis of the curves shows a repeatable behavior of the material in static compression tests. In the second part of the study tests were carried out to analyze the effect of the number of cells, their configuration and the number of walls on the compressive strength of the material. A direct proportionality was found between plateau stress and the number of cells subjected to static compression. The average value of the specific load (load / cell perimeter) obtained is 17.2 N / mm for the initial maximum peak and an average specific load of 6.7 N / mm in the plateau. As the number of cells increases, by increasing the perimeter, a uniform redistribution of the load between the various cells is observed; it is therefore possible, starting from the specific compressive strength value of the single cell, to determine the number of cells required as a function of the mechanical characteristics to be obtained.

KEYWORDS: COMPOSITE MATERIALS, SANDWICH PANEL, ALUMINUM HONEYCOMB, STATIC COMPRESSION, HEXAGONAL CELLS