

# Confronto del comportamento a compressione, proprietà meccaniche ed energia assorbita dell'honeycomb e delle schiume a celle chiuse in alluminio

A. Ceci, G. Costanza, M.E. Tata

In questo lavoro l'attenzione è focalizzata sugli aspetti peculiari caratterizzanti le schiume di Al a celle chiuse e i pannelli di honeycomb in alluminio, in particolare la loro capacità di assorbimento di energia sotto condizione di sollecitazione statica di compressione. Mediante prove sperimentali è stata valutata l'energia specifica assorbita da diversi campioni: nei pannelli di honeycomb è stato analizzato il comportamento meccanico sia per strutture di grandi dimensioni sia per strutture con un numero ridotto di celle; inoltre, è stato studiato anche l'effetto del numero di celle. Per le strutture di dimensioni maggiori, inoltre, è stata calcolata l'energia specifica assorbita. Per le schiume di Al a celle chiuse, prodotte in laboratorio tramite *powder compaction method* con diverse percentuali di SiC e TiH<sub>2</sub> e caratterizzate da diverse densità relative, è stata valutata l'energia specifica assorbita. I risultati sperimentali hanno dimostrato che l'energia specifica assorbita dall'honeycomb di Al risulta sempre superiore a quella delle diverse tipologie di schiume a celle chiuse. Tuttavia, nella scelta del materiale per ciascuna specifica applicazione, è necessario tenere conto di numerosi parametri quali: densità relativa, energia assorbita, sforzo di picco, sforzo di plateau, estensione del plateau, deformazione di densificazione e così via. Di conseguenza le prestazioni complessive devono essere valutate di volta in volta in base al tipo di applicazione.

**PAROLE CHIAVE:** SCHIUME DI ALLUMINIO A CELLE CHIUSE, HONEYCOMB DI ALLUMINIO, COMPORTAMENTO A COMPRESSIONE STATICA, ENERGIA SPECIFICA ASSORBITA;

## INTRODUZIONE

Le strutture cellulari, come schiume, honeycomb e strutture reticolari, trovano sempre maggiore impiego nei settori dei trasporti, aeronautico [1], navale [2], aerospaziale, veicoli ad alte prestazioni [3, 4] e la bioingegneria, in cui il rapporto rigidità/peso ha un ruolo cruciale [5]. L'honeycomb, in particolare, trova applicazione come assorbitore di energia grazie alle proprietà meccaniche che lo contraddistinguono [6]. Vari studi, infatti, hanno evidenziato l'importanza dell'honeycomb nel migliorare la resistenza agli urti dei componenti strutturali [7, 8, 9]. Queste strutture, come l'honeycomb super esagonale [7] e i pannelli di honeycomb riempiti di schiuma, dimostrano capacità di assorbimento di energia, assorbimento di energia specifica e assorbimento di energia volumica [7] superiori rispetto ai design tradizionali, mostrando progressi in termini di resistenza agli urti ed efficienza [6]. Anche le schiume metalliche sono sempre più utilizzate come assorbitori di energia grazie alla loro bassa densità e

**Alessandra Ceci, Girolamo Costanza,  
Maria Elisa Tata**

Dipartimento di Ingegneria industriale, Università di Roma  
"Tor Vergata", Roma, Italia

alla capacità di assorbimento di energia [10, 11, 12, 13, 14]. Tali schiume - realizzate con vari metalli come alluminio, magnesio, ferro, titanio, nichel, rame e le loro leghe - possono essere prodotte a partire dal fuso o la metallurgia delle polveri, dando luogo a strutture a celle chiuse o aperte con diverse applicazioni in base alla densità. Diversi studi [15, 16] hanno dimostrato che l'inserimento di schiume metalliche in strutture come tubi, sandwich o sistemi più complessi può migliorare significativamente la capacità di assorbimento dell'energia, le modalità di deformazione e la riduzione della forza d'impatto, rendendole di notevole interesse nelle applicazioni ingegneristiche per la resistenza agli urti e il miglioramento delle prestazioni sismiche.

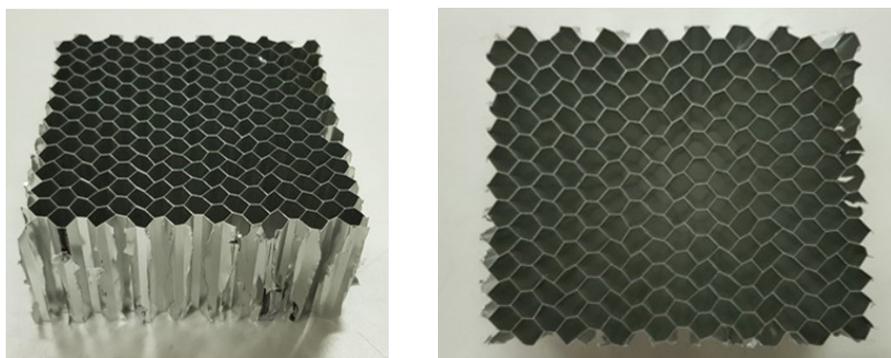
L'attività sperimentale ha avuto come obiettivo quello di calcolare l'energia specifica assorbita di strutture di honeycomb in Al e di schiume di Al. La prima fase della campagna sperimentale ha riguardato l'esecuzione delle prove di compressione statica su campioni di honeycomb. Dalle prove di compressione è stato possibile ricavare le curve sforzo-deformazione e da queste ultime calcolare l'energia specifica assorbita. Inoltre, si è voluto analizzare il comportamento meccanico di strutture con numero ridotto di celle, a partire da una singola cella fino ad arrivare

a una struttura con 6 celle, per stabilire una correlazione tra la variazione delle proprietà in base al numero delle celle. La seconda fase della campagna sperimentale ha avuto inizio con la realizzazione delle schiume di Al a celle chiuse tramite il metodo di compattazione delle polveri. Sono state realizzate diverse schiume al variare della quantità di agente schiumante ( $TiH_2$ ) e agente stabilizzante (SiC). Dopo la realizzazione, le schiume prodotte sono state tagliate per poter effettuare le prove di compressione statica, al fine di ottenere, come per l'honeycomb, il diagramma sforzo-deformazione e successivamente calcolare l'energia specifica assorbita. Infine, è stato effettuato un confronto tra honeycomb e schiume a celle chiuse in termini di energia specifica assorbita.

## MATERIALI E METODI

### HONEYCOMB

Le prove di compressione statica sull'honeycomb di alluminio sono state eseguite su 4 campioni (vedi figura 1) le cui dimensioni sono riportate in tabella 1, estrapolati da un unico pannello di honeycomb di alluminio a celle esagonali. Le prove sono state condotte con una velocità di avanzamento della traversa costante pari a 5 mm/min e sono state interrotte in prossimità di una deformazione dell'80%.



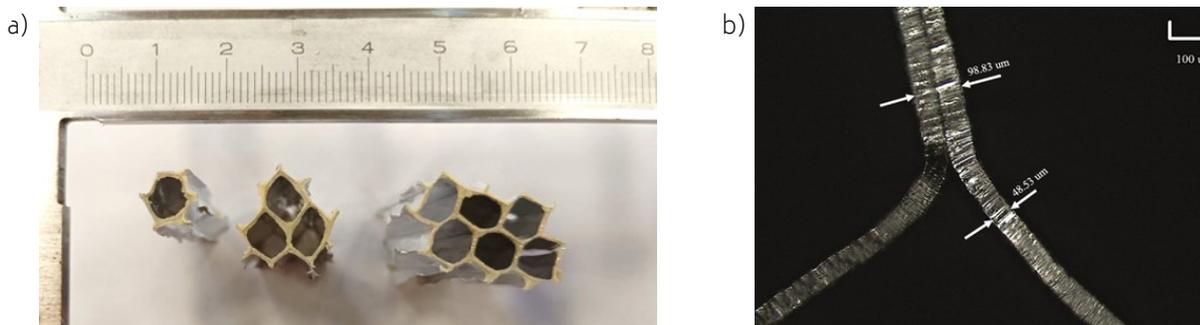
**Fig. 1** - a) Vista laterale; b) vista dall'alto del provino di honeycomb di Al /  
*a) Side view; b) top view of the Al honeycomb sample.*

**Tab. 1** - Caratteristiche geometriche dei provini di honeycomb di Al /  
*Geometrical characteristics of honeycomb samples.*

	Area di base [mm <sup>2</sup> ]	Altezza [mm]
<b>Provino 1</b>	1091	50
<b>Provino 2</b>	1185	50
<b>Provino 3</b>	1215	50
<b>Provino 4</b>	1496	50

Come si può osservare dalla figura 1, a causa del taglio effettuato sul pannello in honeycomb per ricavare i vari provini, sono presenti difettosità sui bordi. Infatti, le celle più esterne, talvolta si presentano distorte e non regolari, rispetto alla originaria forma esagonale. Oltre alle prove di compressione statica su campioni con

un elevato numero di celle, si è voluto anche valutare come varia, all'aumentare del numero di celle, la capacità di resistenza del materiale. Le prove sono state effettuate a partire da una singola cella, fino ad arrivare a 6 celle, aumentando di volta in volta di una unità il numero di celle.



**Fig.2** - a) Celle esagonali dell'honeycomb di alluminio, 1 cella, 3 celle e 6 celle; b) micrografia al microscopio ottico con misurazioni dello spessore della parete della cella esagonale / a) Hexagonal cells of Al honeycomb, 1 cell, 3 cells and 6 cells; b) Optical micrograph with thickness measurements of the hexagonal cell walls.

### SCHIUME METALLICHE

La tecnica adottata in laboratorio per la produzione delle schiume di Al utilizzate per la prova di compressione è quella della fusione delle polveri compattate dettagliatamente descritta in precedenti lavori [17, 18]. Per la realizzazione delle schiume in alluminio è stato impiegato, come agente schiumante, l'idruro di titanio ( $TiH_2$ ), la cui temperatura di inizio decomposizione ( $400^\circ C$ ) si adatta bene alla temperatura di fusione dell'alluminio ( $660^\circ C$ ); come agente stabilizzante sono state utilizzate polveri di carburo di silicio (SiC). L'alluminio è il complemento a 100.

In tabella 2 sono riassunte le principali caratteristiche delle polveri suddette. In base a studi condotti in precedenza [6] si è stabilito di analizzare sperimentalmente il comportamento a compressione statica di sei diverse composizioni:

- 0,1%  $TiH_2$  - 2,8% SiC
- 0,1%  $TiH_2$  - 6,0% SiC
- 0,2%  $TiH_2$  - 2,8% SiC
- 0,2%  $TiH_2$  - 6,0% SiC
- 0,4%  $TiH_2$  - 2,8% SiC
- 0,4%  $TiH_2$  - 6,0% SiC

**Tab. 2** - Caratteristiche delle polveri utilizzate per la realizzazione delle schiume di Al a celle chiuse / Characteristics of the powders used for the manufacturing of Al closed-cell foams.

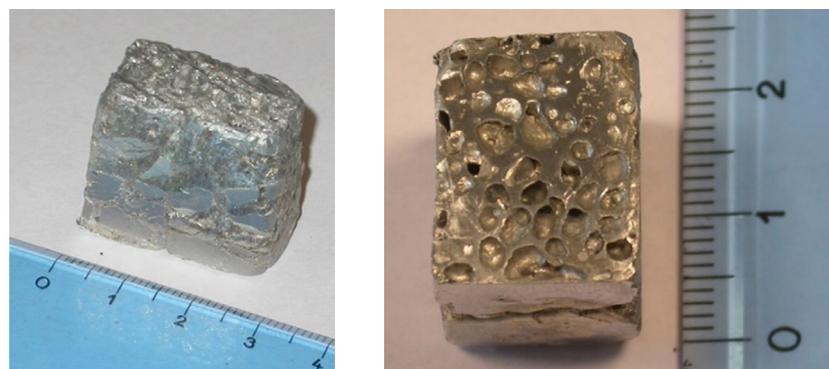
Polveri di Alluminio	
Dimensione massima	45 $\mu m$
Dimensione media	40 $\mu m$
Temperatura di fusione	660 $^\circ C$
Densità	2.7 g/cm <sup>3</sup>
Purezza	99.50%

Polveri di Idruro di Titanio	
Ti	95% wt min
H	3.8% wt min
N	0.3% wt min
Dimensione massima	63 $\mu\text{m}$
Dimensione media	5 $\pm$ 1 $\mu\text{m}$

Polveri di Carbuo di Silicio	
Dimensione massima	37 $\mu\text{m}$

Il mescolamento delle polveri è determinante nella preparazione del precursore, perché solo una distribuzione omogenea dei componenti assicura alla schiuma una porosità di buona qualità, omogenea e regolare. Per mescolare le polveri è stato utilizzato un contenitore in plastica, montato eccentricamente sul mandrino di un trapano. Il tempo di mescolamento, che garantisce una sufficiente omogeneità della miscela, per pesi non superiori ai 30 grammi, è di 10 minuti. Il tipo di compressione utilizzata per ottenere il precursore è uniassiale a freddo e garantisce la frantumazione dello strato di ossido presente nelle polveri di Al quando la pressione di compattazione applicata è di almeno 200 MPa. L'operazione di schiumatura del precursore, ottenuto dalla pressatura, avviene introducendo in forno un crogiuolo in acciaio, in cui sono contenuti due precursori affiancati. Il crogiuolo funge da stampo per i precursori che, in fase liquida all'atto della

schiumatura, ne assumono la forma. Il crogiuolo viene inserito all'interno del forno mantenuto a una temperatura di 700°C. Dopo 4-5 minuti inizia la schiumatura che si articola nei seguenti step: una prima fase in cui la crescita risulta lenta con formazione di piccole bolle sulla superficie del precursore ancora solido, poi un rapido aumento di volume del metallo liquido, per circa 20 secondi; una volta che si è raggiunta la crescita massima, il crogiuolo, contenente la schiuma, è estratto dal forno e immerso in acqua per farlo solidificare e fissare a temperatura ambiente la forma ottenuta al culmine della crescita (figura 3a). Le schiume prodotte con la procedura appena descritta hanno una forma esterna piuttosto grezza (figura 3a). Per ottenere dei provini impiegabili nelle prove di compressione è stato necessario limare le imperfezioni ed effettuare tagli per ottenere le facce parallele e poter eseguire la prova di compressione (figura 3b).



**Fig.3** - a) Schiuma di Al prodotta con il metodo di compattazione delle polveri; b) vista in sezione della schiuma di Al prodotta / a) Al foam produced through powder compaction method; b) cross-section view of the produced Al foam.

I provini di schiuma di Al analizzati hanno le caratteristiche geometriche riportate in tabella 3.

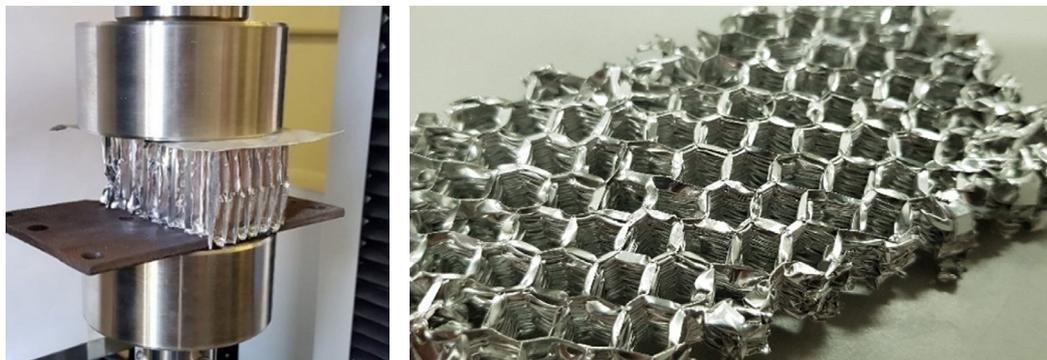
**Tab.3** - Caratteristiche geometriche dei provini in schiuma di Al / *Geometrical characteristics of Al foam samples.*

Composizione	N° provino	Sezione iniziale [mm <sup>2</sup> ]	Altezza iniziale [mm]	Volume [cm <sup>3</sup> ]
0,1% TiH <sub>2</sub> -2,8% SiC	1	410,0	20,0	8,2
	2	412,7	19,1	7,9
0,1% TiH <sub>2</sub> -6,0% SiC	1	432,7	17,8	7,7
	2	422,0	20,1	8,5
0,2% TiH <sub>2</sub> -2,8% SiC	1	434,0	22,3	9,7
	2	437,1	22,3	9,7
0,2% TiH <sub>2</sub> -6,0% SiC	1	429,3	23,0	9,9
	2	431,5	22,8	9,8
0,4% TiH <sub>2</sub> -2,8% SiC	1	429,7	23,1	9,7
	2	430,3	22,9	9,8
0,4% TiH <sub>2</sub> -6,0% SiC	1	396,3	25,8	10,2
	2	402,6	25,0	10,1

## RISULTATI SPERIMENTALI HONEYCOMB

Di seguito è riportato l'immagine di un campione di honeycomb posizionato tra i piatti della macchina di com-

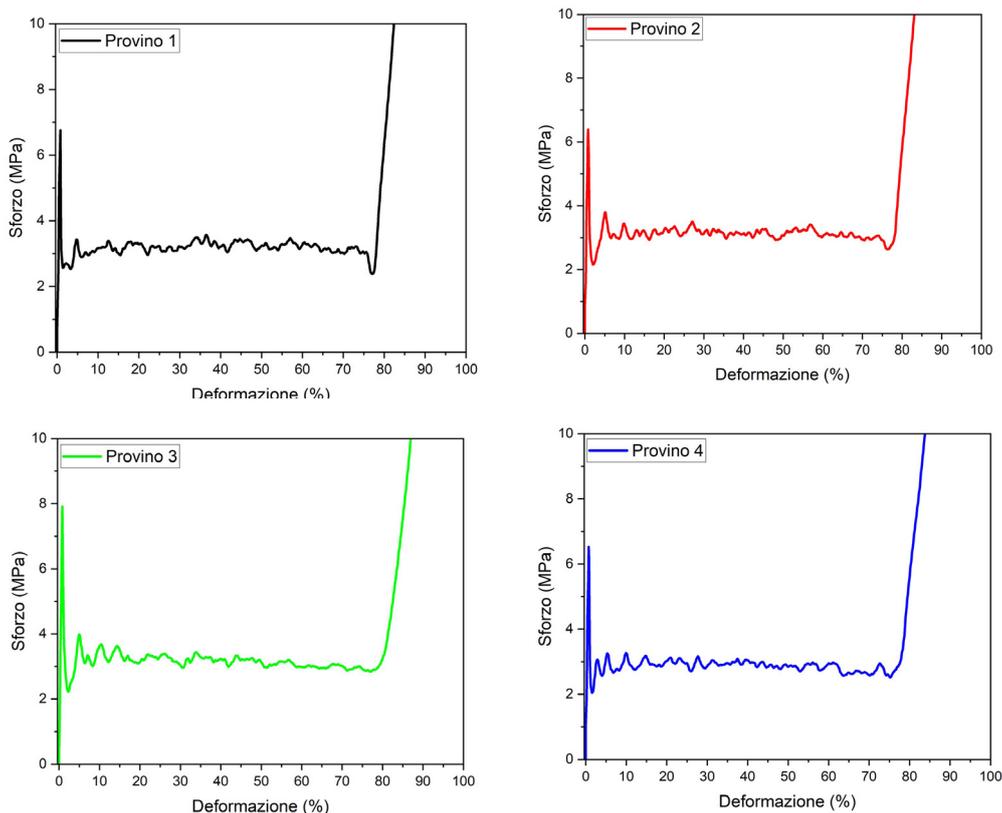
pressione in uno step iniziale della prova (figura 4a) e lo stesso provino a compressione terminata (figura 4b).



**Fig.4** - a) Prova di compressione dell'honeycomb di Al; b) provino di honeycomb di Al al termine della prova di compressione statica / *a) Al honeycomb compression test; b) Al honeycomb sample after static compression test.*

Eccezion fatta per i bordi del provino, durante la compressione la deformazione delle celle esagonali interne è avvenuta uniformemente, senza slittamenti; il collasso plastico delle pareti della struttura esagonale ha dato luogo a strutture alveolari sovrapposte l'una sull'altra, come è possibile notare in figura 4b.

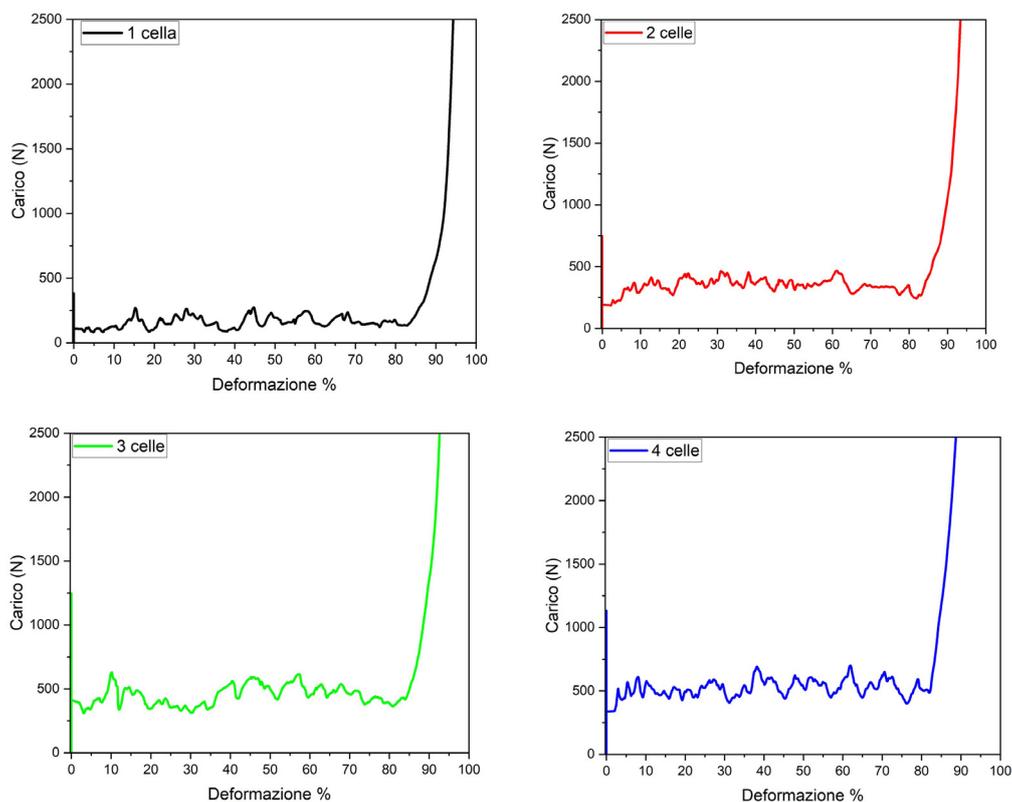
Nella figura 5 sono riportati i diagrammi sforzo-deformazione dei 4 provini di honeycomb analizzati: si nota un primo picco di stress dovuto all'instabilità delle pareti delle celle, seguito da un esteso plateau corrispondente al progressivo collasso plastico delle pareti delle celle esagonali e, infine, un ultimo tratto di densificazione finale.

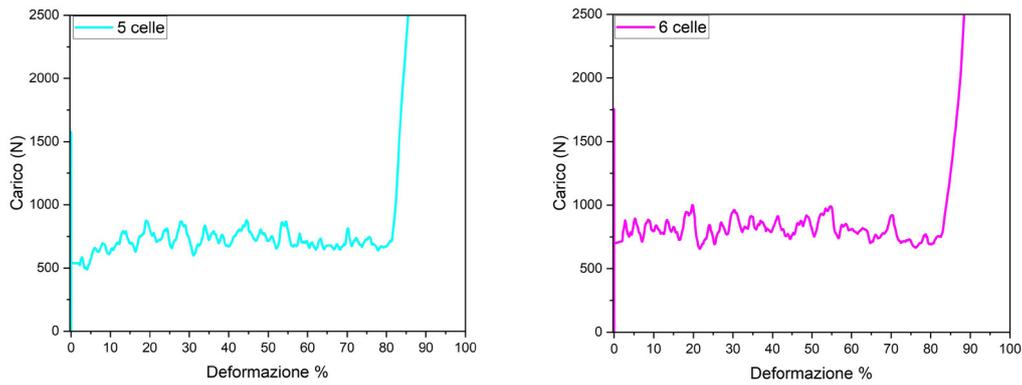


**Fig.5** - Diagrammi Sforzo-Deformazione dei provini di honeycomb / *Diagrams Stress-Strain of honeycomb samples.*

Sono state inoltre effettuate delle prove di compressione su campioni di honeycomb di Al con un numero di celle

crescente, da 1 a 6, i cui diagrammi Carico-Deformazione sono riportati in figura 6.





**Fig.6** - Diagrammi Carico-Deformazione delle celle di Honeycomb di Al / *Diagrams Load-Strain of Al honeycomb cells.*

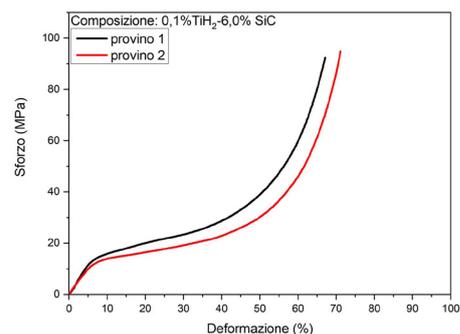
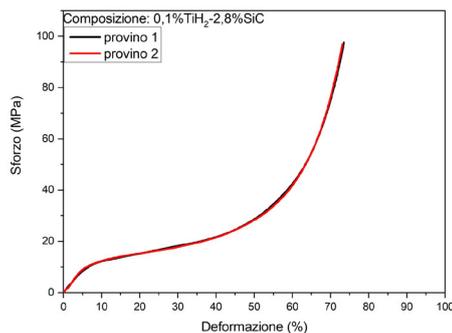
### SCHIUME METALLICHE

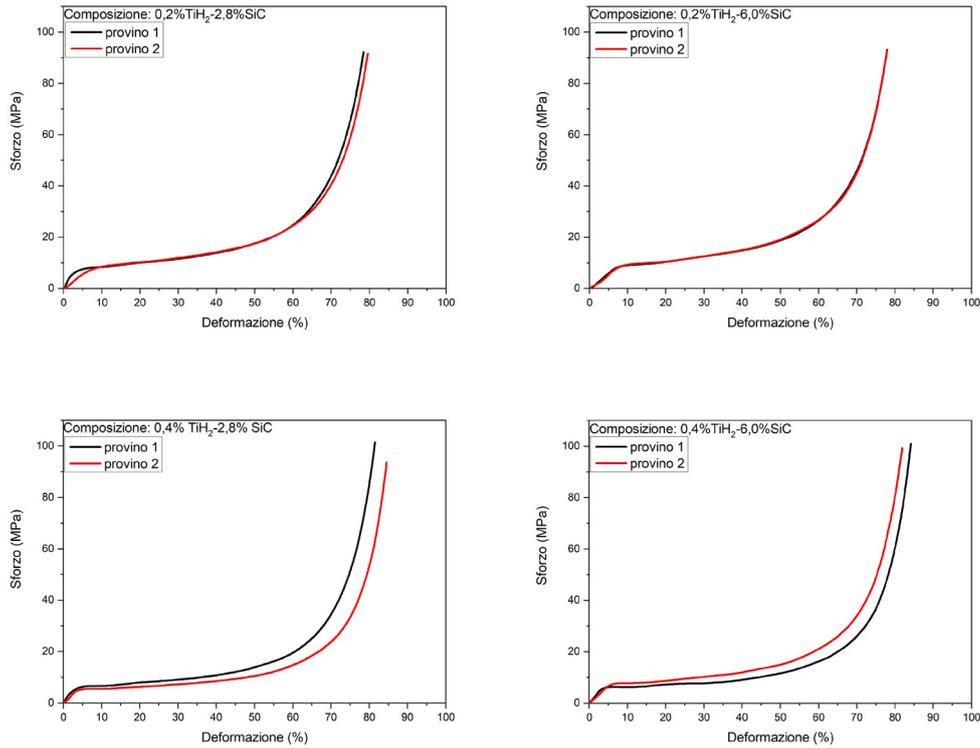
In figura 7 sono riportati i diversi step di avanzamento della prova di compressione e in figura 8 i corrispondenti diagrammi Sforzo-Deformazione delle schiume in Al. Dopo un primo tratto lineare segue un esteso plateau a sforzo

all'incirca costante durante il quale avviene la deformazione delle pareti delle schiume e, infine, si evidenzia un rapido incremento dello sforzo dovuto alla densificazione finale.



**Fig.7** - Successivi step di compressione di un provino in schiuma di Al / *Compression steps of an Al foam sample.*





**Fig.8** - Diagrammi Sforzo-Deformazione dei provini di schiuma in Al / *Diagrams Stress-Strain of Al foam samples.*

**DISCUSSIONE  
HONEYCOMB**

Confrontando i dati ottenuti dalle quattro prove di compressione effettuate sui provini di honeycomb (figura 5), si può notare come a parità (o quasi) di area di base e di altezza del provino, il comportamento dell'honeycomb di alluminio sia all'incirca equivalente. Si osserva una buona ripetibilità dei dati nelle 4 prove; infatti, i valori di tensione di picco iniziale  $\sigma_{pk}$  e di tensione di plateau  $\sigma_{pl}$  si mantengono su un valore pressoché costante, come riportato nella tabella 4 ove si riportano i principali parametri ottenuti dalle curve di compressione. Con il pedice *pk* si

intende il punto in cui si ha il picco iniziale di sforzo massimo e la corrispondente deformazione  $\epsilon_{pk}$ , con il pedice *pl* il plateau. La  $\sigma_{pl}$  è stata calcolata come valore medio che lo sforzo assume da 0,8% a 80% di deformazione. Questo trend costante evidenzia che l'honeycomb possiede una risposta meccanica intrinsecamente stabile, governata principalmente dalla geometria cellulare e dallo spessore delle pareti. Tale regolarità rende il comportamento del materiale prevedibile e particolarmente affidabile per applicazioni in cui la sicurezza e la ripetibilità delle prestazioni sono fondamentali.

**Tab.4** -Caratteristiche meccaniche dei provini in honeycomb di Al / *Mechanical characteristics of Al honeycomb samples.*

	$\epsilon_{pk}$ %	$\sigma_{pk}$ [MPa]	$\sigma_{pl}$ [MPa]
<b>Provino 1</b>	0,8	6,8	3,2
<b>Provino 2</b>	0,8	6,4	3,1
<b>Provino 3</b>	0,8	7,9	3,1
<b>Provino 4</b>	0,8	6,2	2,8

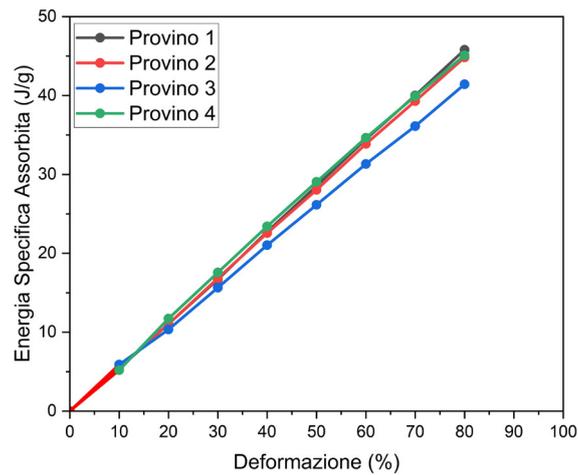
Il grafico seguente (figura 9) riporta gli andamenti dell'assorbimento dell'energia specifica in funzione della deformazione subita dall'honeycomb di Al durante la compres-

sione. I valori di energia specifica assorbita si calcolano con la formula seguente:

$$E_{specifica} = v \int_0^{\bar{\epsilon}} \sigma d\epsilon$$

Dove  $v = 0,018 \frac{m^3}{kg}$  è il volume specifico, dato dall'inverso della densità che da specifiche tecniche risulta

essere pari a  $56 \frac{kg}{m^3}$ .



**Fig.9** - Diagramma Energia specifica assorbita-Deformazione nelle prove di compressione statica sull'honeycomb di Al / *Diagram Specific energy absorption-Strain in static compression test on Al honeycomb.*

Nella tabella 5 sono riportati i valori di energia specifica assorbita per i vari provini in honeycomb di Al corrispondenti a diversi valori di deformazione.

**Tab.5** -Caratteristiche meccaniche dei provini in honeycomb di Al / *Mechanical characteristics of Al honeycomb samples.*

Deformazione %	Energia Specifica Assorbita [J/g]			
	Provino 1	Provino 2	Provino 3	Provino 4
10	5,4	5,5	5,9	5,2
20	11,0	11,0	10,3	11,7
30	16,7	16,8	15,6	17,6
40	22,7	22,6	21,0	23,4
50	28,5	28,0	26,1	29,0
60	34,5	33,9	31,3	34,6
70	40,0	39,3	36,1	39,9
80	45,8	44,8	41,4	45,1

Andando ad analizzare l'assorbimento di energia specifica (figura 9 e tabella 5), si può notare che il comportamento delle 4 prove sia pressoché simile. Per una deformazione dell'80% si ha un valore medio di energia specifica assorbita di circa 44 J/g. Questo risultato fornisce ulteriore conferma sulla buona ripetibilità dei dati sperimentali e dimostra come l'honeycomb presenti un comportamento stabile e prevedibile. La presenza di un plateau esteso e costante, legato al progressivo collasso plastico delle pareti cellulari, è un aspetto chiave: esso garantisce una dissipazione di energia regolare e controllata, evitando

picchi di sollecitazione che potrebbero compromettere la sicurezza strutturale. Questo comportamento rende l'honeycomb particolarmente interessante per applicazioni nel settore automobilistico e aerospaziale, dove la capacità di assorbire urti in modo controllato rappresenta un requisito di primaria importanza.

Per le prove di compressione statica condotte sulle strutture con numero ridotto di celle, in tabella 6, sono riportati i valori del carico massimo e del carico di plateau.

**Tab.6** - Principali parametri delle prove di compressione di honeycomb di Al / *Main parameters of Al honeycomb compression tests.*

N° di celle	Carico massimo [N]	Carico di plateau [N]
<b>1 cella</b>	363	142
<b>2 celle</b>	736	337
<b>3 celle</b>	1183	385
<b>4 celle</b>	1031	520
<b>5 celle</b>	1634	639
<b>6 celle</b>	1738	793

Infine, si è analizzato lo sforzo di picco ( $\sigma_{pk}$ ), corrispondente al punto in cui si ha lo sforzo massimo, e lo sforzo di plateau ( $\sigma_{pl}$ ) in funzione della deformazione per i campioni con un numero di celle crescenti da 1 a 6 (tabella 7). Come

area si è considerata quella totale dell'esagono, non considerando le cavità come tali (stessa considerazione effettuata per le prove sui campioni di grandi dimensioni).

**Tab.7** - Valori di sforzo di picco  $\sigma_{pk}$  e di sforzo di plateau  $\sigma_{pl}$  per i campioni con diverso numero di celle / *Stress peak values  $\sigma_{pk}$  and plateau stress values  $\sigma_{pl}$  for samples with different cell numbers.*

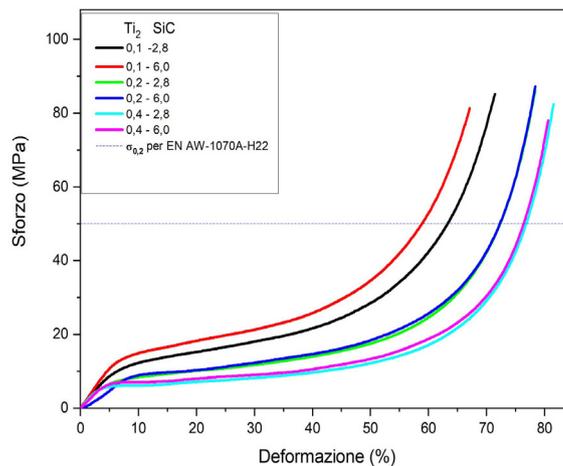
N° di celle	$\sigma_{pk}$ [MPa]	$\sigma_{pl}$ [MPa]
<b>1 cella</b>	8,8	3,4
<b>2 celle</b>	8,9	4,1
<b>3 celle</b>	9,5	3,1
<b>4 celle</b>	6,2	3,1
<b>5 celle</b>	7,9	3,1
<b>6 celle</b>	7,0	3,1

Dai risultati delle prove condotte sulle singole celle di honeycomb, si può osservare il valore crescente del carico massimo e di quello di plateau all'aumentare del numero di celle (tabella 6). Questi valori crescenti, sia del carico massimo sia del carico di plateau, mettono in luce come all'aumentare del numero di celle, e quindi della superficie su cui è distribuito il carico, aumenta la resistenza dell'honeycomb di alluminio. Per quanto riguarda, inoltre, i valori ottenuti dividendo il carico per l'area, risultano essere pressoché costanti e indipendenti dal numero di celle. Il valore medio ottenuto risulta pari a 8 MPa per  $\sigma_{pk}$  e 3,3 MPa per  $\sigma_{pl}$ . Ciò suggerisce che le proprietà meccaniche specifiche non siano influenzate dalle dimensioni complessive del campione, ma siano caratteristiche della cella elementare. Ne deriva che l'honeycomb può essere scalato a diverse dimensioni mantenendo inalterate le

prestazioni relative: un aspetto cruciale per l'ingegneria modulare e per componenti che richiedono adattamenti dimensionali senza perdita di efficienza.

### SCHIUME DI AL

Il seguente grafico (figura 10) riporta il confronto fra i grafici delle schiume di Al con diversa composizione. Le singole curve sono state ricavate come medie degli andamenti dei due provini utilizzati per le varie composizioni. Inoltre, come confronto, viene riportato il valore dello snervamento allo 0,2% per una lega di alluminio EN AW-1070 A-H22 (contenuto Al  $\geq$  99,70%) di 50 MPa (secondo la norma EN 485-2: 2016).



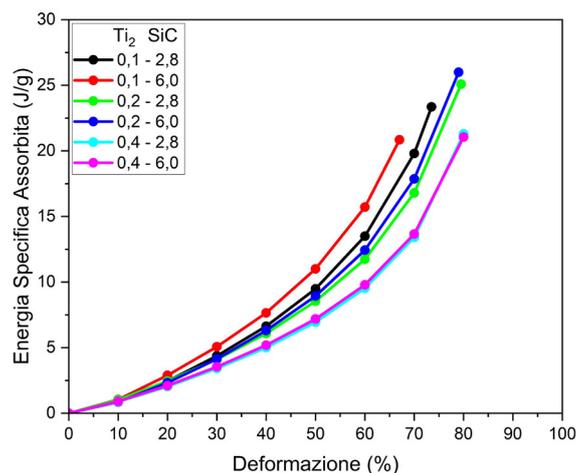
**Fig.10** - Diagramma Sforzo-Deformazione delle schiume di Al / *Diagram Stress-Strain of Al foams.*

Il grafico seguente (figura 11) riporta gli andamenti dell'assorbimento dell'energia specifica in funzione della defor-

mazione subita dalle schiume. Tale valore di energia specifica si calcola con la formula seguente:

$$E_{spec} = v \int_0^{\bar{\epsilon}} \sigma d\epsilon$$

Dove  $v$  è il volume specifico, dato dall'inverso delle densità riportate in tabella 8.



**Fig.11** - Diagramma Energia specifica assorbita-Deformazione delle schiume di Al / *Diagram Specific energy absorption-Strain of Al foams.*

Si riportano in tabella 8 le caratteristiche principali ottenute per le varie composizioni di schiume di Al analizzate, in termini di resistenza, di densità e di crescita percentuale. Con  $\rho$  si intende la densità media della singola composizione di schiuma, mentre con  $\rho_0$  si indica la densità del materiale massivo ( $\rho_0 \approx 2.72 \text{ g/cm}^3$ ). E è il modulo di Young medio individuato per le varie composizioni, calcolato

attraverso la pendenza del tratto lineare della curva sforzo-deformazione.  $E_0$  è il modulo di Young dell'alluminio puro, pari a circa 68000 MPa. Con  $\sigma_{el}$  lo sforzo al termine del tratto lineare elastico. Infine, la crescita o espansione è definita come  $\frac{H_{finale}-H_{iniziale}}{H_{iniziale}}$  dove  $H_{iniziale}$  è l'altezza del precursore non schiumato, pari a 8.0 mm.

**Tab.8** - Caratteristiche meccaniche delle schiume di Al analizzate / *Mechanical characteristics of the analyzed Al foams.*

Composizione	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho/\rho_0$	E [MPa]	E/E <sub>0</sub> [%]	$\sigma_{el}$ [Mpa]	Crescita %
0,1% TiH <sub>2</sub> - 2,8% SiC	0,872	0,321	193,2	0,284	8,0	186,9
0,1% TiH <sub>2</sub> - 6,0% SiC	0,901	0,331	246,2	0,362	11,0	187,0
0,2% TiH <sub>2</sub> - 2,8% SiC	0,640	0,236	267,5	0,393	6,7	248,0
0,2% TiH <sub>2</sub> - 6,0% SiC	0,636	0,233	143,8	0,211	6,7	293,8
0,4% TiH <sub>2</sub> - 2,8% SiC	0,558	0,205	211,7	0,311	4,5	387,8
0,4% TiH <sub>2</sub> - 6,0% SiC	0,595	0,218	170,5	0,251	5,4	390,0

Nella tabella 9 sono riportati i valori di Energia specifica assorbita per tutti i provini in schiuma di Al.

**Tab.9** -Energia specifica assorbita dalle varie schiume di Al prodotte / *Specific energy absorption of the various produced Al foams.*

Deformazione %	Energia Specifica Assorbita [J/g]					
	0,1%-2,8%	0,1%-6,0%	0,2%-2,8%	0,2%-6,0%	0,4%-2,8%	0,4%-6,0%
10	0,9	1,0	1,0	0,8	0,9	0,9
20	2,4	2,9	2,4	2,3	2,0	2,1
30	4,4	5,1	4,1	4,1	3,4	3,5
40	6,6	7,6	6,1	6,3	5,0	5,2
50	9,5	11,0	8,5	8,9	6,9	7,2
60	13,5	15,7	11,7	12,4	9,5	9,8
70	19,8	20,8	16,8	17,9	13,4	13,7

Per quanto riguarda le schiume di Al a celle chiuse, dalla figura 11 si evince che anche in questo caso si è avuta una buona ripetibilità dei risultati. In particolare, si può notare che le schiume con lo 0.1% di TiH<sub>2</sub> sono quelle che hanno il plateau ai più alti livelli di tensione; le schiume 0.2% TiH<sub>2</sub> presentano un plateau più basso rispetto alle precedenti in termini di stress. Infine, le schiume con lo 0.4% TiH<sub>2</sub> evidenziano i plateau più bassi e le maggiori deformazioni in assoluto. Questo andamento è riconducibile al ruolo del TiH<sub>2</sub> come agente espandente: aumentando la sua percentuale, si ottiene una struttura con porosità di maggiori dimensioni e minore densità relativa, che comporta una riduzione dello sforzo sopportabile ma anche un incremento della capacità di deformazione. In applicazioni pratiche, ciò permette di "tarare" le proprietà delle schiume in base alle necessità: composizioni a basso TiH<sub>2</sub> per resistenze più elevate e assorbimento in spazi ridotti, composizioni a più alto TiH<sub>2</sub> per deformazioni più ampie e smorzamento progressivo delle sollecitazioni.

Per quanto riguarda invece le deformazioni raggiunte, l'ordine è inverso. Andando ad analizzare l'assorbimento di energia specifica (tabella 9) si nota che, per deformazioni del 50%, le 0.1% TiH<sub>2</sub> assorbono tra il 12%, per la composizione con 0.2 % TiH<sub>2</sub>, e il 38% in più di energia per la composizione con 0.4 % TiH<sub>2</sub>. Queste differenze salgono, a deformazioni del 60%, fino ad arrivare al 26 e 60% rispettivamente. Questi risultati confermano che le schiume non presentano un unico comportamento stan-

dard, ma offrono un margine di variabilità progettuale che può essere sfruttato per applicazioni diversificate. Tuttavia, tale variabilità rappresenta allo stesso tempo anche un limite in termini di riproducibilità e controllo industriale, in quanto piccole differenze di processo o composizione possono portare a variazioni significative delle proprietà finali.

Confrontando i risultati di honeycomb e schiume di Al a celle chiuse si nota come il comportamento dell'honeycomb sia nettamente superiore in termini di energia specifica assorbita. In particolare, per una deformazione pari al 50%, l'energia specifica assorbita dall'honeycomb è circa 160% più elevata rispetto a quella delle schiume. Tuttavia, questa differenza di comportamento va relativizzata alle applicazioni. L'honeycomb risulta più adatto quando è richiesto un elevato assorbimento di energia in spazi ridotti e con comportamento stabile (aerospazio, crash box automobilistici), mentre le schiume possono risultare preferibili in applicazioni dove è importante ridurre i picchi di sollecitazione e favorire una deformazione più graduale, come nei dispositivi di protezione individuale, nei componenti sportivi o nei sistemi di attenuazione delle vibrazioni.

## CONCLUSIONI

In questo lavoro sono state effettuate prove di compressione statica su provini di honeycomb di Al e su schiume

di alluminio con lo scopo di calcolare l'energia specifica assorbita durante tali prove. È stato evidenziato che i dati ottenuti dalle 4 prove effettuate sull'honeycomb sono più o meno equivalenti e quindi si ha buona ripetibilità dei risultati. I valori dello sforzo di picco iniziale e dello sforzo di plateau si mantengono su un valore pressoché costante, pari a 6,8 MPa e 3 MPa rispettivamente, e l'energia specifica assorbita assume all'incirca gli stessi valori (per una deformazione del 50% pari a 28 J/g).

Si è voluto anche analizzare il comportamento delle singole celle per comprendere come il numero di queste influenzi il comportamento del materiale. Dallo studio sui provini con ridotto numero di celle si evince che i valori di stress di picco e di sforzo di plateau assumono un valore all'incirca costante, indipendentemente dal numero di celle, rispettivamente pari a 8 MPa e 3,3 MPa.

Per quanto riguarda le schiume di Al, quelle con lo 0,1%

di  $TiH_2$  sono quelle che hanno il plateau ai più alti livelli di sforzo; le schiume 0,4%  $TiH_2$  presentano i plateau più bassi. Inoltre, a parità di deformazione le schiume 0,1 $TiH_2$ -6,0%SiC presentano maggiore energia specifica assorbita delle altre e tale fenomeno è tanto più marcato quanto maggiore è la deformazione. Questo fatto è da imputare al maggiore sforzo a cui si ha il plateau nel caso della schiuma con lo 0,1%  $TiH_2$ .

Confrontando l'energia specifica assorbita dall'honeycomb di Al e dalle schiume di alluminio si evince che l'honeycomb presenta valori più elevati a parità di deformazione rispetto alle schiume. Nella tabella 10 è riportato il confronto tra il provino 1 di honeycomb di Al (figura 9 e tabella 5) e la schiuma di Al con 0,1%  $TiH_2$ -6,0%SiC (figura 11 e tabella 9) che risulta avere la più alta energia specifica assorbita:

**Tab.10** -Confronto Energia specifica assorbita / Specific energy absorption comparison.

Deformazione %	Energia Specifica Assorbita [J/g]	
	Honeycomb di Al Provino 1	Schiuma di Al 0,1% $TiH_2$ -6,0% SiC
10	5,4	1,0
20	11,0	2,9
30	16,7	5,1
40	22,7	7,6
50	28,5	11,0
60	34,5	15,7
70	40,0	20,8

Dal confronto di tabella 10 si può osservare che, per una deformazione pari al 50%, l'honeycomb presenta un valore di energia specifica assorbita di circa il 160% maggiore rispetto alla schiuma con 0,1% $TiH_2$ -6,0%SiC.

In conclusione, le strutture analizzate si prestano bene per applicazioni nelle quali la riduzione dei pesi giochi un ruolo fondamentale. Ovviamente è da considerare che la scelta dell'uso di un materiale rispetto all'altro dipende dal tipo di applicazione e dalle specifiche di progetto. Anche tra la stessa tipologia di materiale, come le schiu-

me, c'è da sottolineare che ogni caratteristica deve essere rapportata alla specifica applicazione. Infatti, per esempio, pur avendo una maggiore energia assorbita la schiuma con lo 0,1% di  $TiH_2$  risulta meno adatta in caso di crash, in quanto il valore del plateau più alto indurrebbe maggiori sollecitazioni sia sulla struttura sia sui passeggeri.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] O. A. Ganilova, M. P. Cartmell, e A. Kiley, «Experimental investigation of the thermoelastic performance of an aerospace aluminium honeycomb composite panel», *Composite Structures*, vol. 257, p. 113159, feb. 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.113159.
- [2] K. Liu, S. Zong, Y. Li, Z. Wang, Z. Hu, e Z. Wang, «Structural response of the U-type corrugated core sandwich panel used in ship structures under the lateral quasi-static compression load», *Marine Structures*, vol. 84, p. 103198, lug. 2022, doi: 10.1016/j.marstruc.2022.103198.
- [3] G. Savage, «Development of penetration resistance in the survival cell of a Formula 1 racing car», *Engineering Failure Analysis*, vol. 17, fasc. 1, pp. 116–127, gen. 2010, doi: 10.1016/j.engfailanal.2009.04.015.
- [4] Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering, Bandung Institute of Technology, Indonesia, A. I. Komara, Bandung Polytechnic for Manufacturing, Indonesia, B. Budiwanto, R. Setiawan, e Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering, Bandung Institute of Technology, Indonesia, «Cellular Structure Design and Manufacturability for Electric Vehicle: A Review», *IJSTT*, vol. 5, fasc. 2, pp. 70–79, ott. 2022, doi: 10.31427/IJSTT.2022.5.2.5.
- [5] L. J. Gibson e M. F. Ashby, *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2a ed. in Cambridge Solid State Science Series. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. doi: 10.1017/CBO9781139878326.
- [6] G. Costanza, S. Ferrigno, e M. E. Tata, «Static compression study of honeycomb panel», *Metallurgia Italiana*, vol. 113, fasc. 5, pp. 13–21, 2021.
- [7] Y. Yang, H. Liu, Q. Zhang, J. Ma, X. Yang, e J. Yang, «Energy absorption characteristics of a super hexagonal honeycomb under out-of-plane crushing», *Thin-Walled Structures*, vol. 189, p. 110914, ago. 2023, doi: 10.1016/j.tws.2023.110914.
- [8] M. Fathi, M. Sameezadeh, e M. Vaseghi, «Compressive response and energy absorption of foam-filled aluminum honeycomb composite: experiments and simulation», *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 45, fasc. 11, p. 562, nov. 2023, doi: 10.1007/s40430-023-04489-z.
- [9] G. Arquilla, A. Ceci, G. Costanza, M.E. Tata, «Effect of the load application angle on the compressive behavior of Al honeycomb under combined normal-shear stress», *Materials*, 2023, 16, 5462, doi.org/10.3390/ma16155462.
- [10] H. Guo e J. Zhang, «A Novel Efficient Energy Absorber With Necking-Expansion of Foam Sandwich Tubes», *Journal of Applied Mechanics*, vol. 90, fasc. 101012, lug. 2023, doi: 10.1115/1.4062843.
- [11] B. Xu, S. Wang, W. Yan, e B. Qin, «A NOVEL EX-SITU ALUMINUM FOAM-FILLED FOURFOLD-TUBE NESTED SYSTEM AS THE ENERGY ABSORBER», *32ND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON BALLISTICS*, fasc. 0, Art. fasc. 0, 2022, doi: 10.12783/ballistics22/36190.
- [12] A. D. L. Peña, A. Sato, M. Latour, e G. Rizzano, «Conceptual design of anti-seismic devices with metal foam core for CBFs», *Procedia Structural Integrity*, vol. 44, pp. 2144–2151, 2023, doi: 10.1016/j.prostr.2023.01.274.
- [13] M. Bhuvanesh, G. Costanza, e M. E. Tata, «Research Progress on Mechanical Behavior of Closed-Cell Al Foams Influenced by Different TiH<sub>2</sub> and SiC Additions and Correlation Porosity-Mechanical Properties», *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, fasc. 11, 2023, doi: 10.3390/app13116755.
- [14] G. Costanza e M. E. Tata, «Parameters Affecting Energy Absorption in Metal Foams», *Materials Science Forum*, vol. 941, pp. 1552–1557, 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.941.1552.
- [15] Z. Wang, L. Jing, J. Ning, e L. Zhao, «The structural response of clamped sandwich beams subjected to impact loading», *Composite Structures*, vol. 93, fasc. 4, pp. 1300–1308, mar. 2011, doi: 10.1016/j.compstruct.2010.05.011.
- [16] D. D. Radford, N. A. Fleck, e V. S. Deshpande, «The response of clamped sandwich beams subjected to shock loading», *International Journal of Impact Engineering*, vol. 32, fasc. 6, pp. 968–987, giu. 2006, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2004.08.007.
- [17] J. Banhart, «Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams», *Progress in Materials Science*, vol. 46, fasc. 6, pp. 559–632, gen. 2001, doi: 10.1016/S0079-6425(00)00002-5.
- [18] G. Costanza, R. Montanari, e M. E. Tata, «Optimisation of TiH<sub>2</sub>, and SiC content in AL foams», *Metallurgia Italiana*, vol. 97, fasc. 6, pp. 41–47, 2005.

# Comparison of compressive behavior, mechanical properties, and energy absorption of honeycomb and closed-cell aluminum foams

This work focuses on the peculiar characteristics of closed-cell aluminum foams and aluminum honeycomb panels, particularly their energy absorption capability under static compressive loading. Through experimental tests, the specific energy absorption of various samples was evaluated. For the honeycomb panels, the mechanical behavior was analyzed for both large-scale structures and configurations with a reduced number of cells, also assessing the effect of cell count. In larger structures, the specific energy absorption was calculated. For the closed-cell aluminum foams, produced in the laboratory using the powder compaction method with different contents of SiC and TiH<sub>2</sub> and characterized by varying relative densities, the specific energy absorption was also assessed. Experimental results showed that the specific energy absorption of aluminum honeycomb structures consistently exceeded that of the different types of closed-cell foams. However, the choice of material for each specific application must consider several parameters such as relative density, absorbed energy, peak stress, plateau stress, plateau extension, densification strain, and others. Therefore, overall performance should always be evaluated based on the specific application requirements.

**KEYWORDS:** CLOSED-CELL ALUMINUM FOAMS, ALUMINUM HONEYCOMB, STATIC COMPRESSION BEHAVIOR, SPECIFIC ENERGY ABSORPTION;

[TORNA ALL'INDICE >](#)