

ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN EN PAPEL ALUMINIO PLEXOPLEGADO

Luis Alejandro Alcaraz Caracheo

Instituto Tecnológico de Celaya
alejandro.alcaraz@itcelaya.edu.mx

Diego Iván Cruz Camacho

Instituto Tecnológico de Celaya
diego_cruz@hotmail.com

Susana Elizabeth Altamirano Romo

Instituto Tecnológico de Roque

Álvaro Sánchez Rodríguez

Instituto Tecnológico de Celaya

José Guadalupe Zavala Villalpando

Instituto Tecnológico de Celaya

Resumen

La importancia de emplear materiales que presenten una buena combinación entre respuesta mecánica y una baja densidad es hoy en día una creciente demanda para industrias como la automotriz y la aeronáutica, ya que esto impacta directamente en la reducción del consumo de combustible. Recientemente, los materiales plexoplegados han despertado gran interés en la comunidad científica debido a su fácil fabricación y baja densidad para posibles usos en el área estructural. El propósito de este trabajo es evaluar experimentalmente las propiedades mecánicas de aluminio plexoplegado, módulo elástico y resistencia a la fluencia, así como su capacidad de absorción de energía mediante ensayos de compresión cuasi-estáticos, con el fin de aportar

conocimiento para un mejor entendimiento de su respuesta mecánica. Para ello se fabricaron probetas con tres diferentes densidades de forma cilíndrica y se sometieron a compresión empleando una máquina electromecánica. Los resultados mostraron que existe una relación de potencia entre la densidad relativa de las probetas y las propiedades del módulo elástico y la resistencia a la fluencia. Además se observó que incrementa la capacidad de absorción de energía conforme aumenta la densidad relativa.

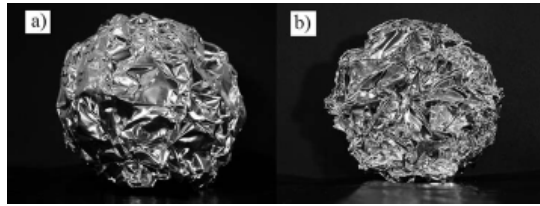
Palabra(s) Clave(s): Energía de absorción, Esfuerzo a la fluencia, Materiales plexoplegados, Modulo de elasticidad.

1. Introducción

En la presente investigación se muestra un estudio del fenómeno de compresión en materiales plexoplegados y se define en ensayos mecánicos, propiedades físicas y elementos estadísticos, cuyo objetivo principal es analizar el efecto de la densidad relativa y la velocidad de deformación como variables de mayor influencia en las propiedades mecánicas, como lo son el módulo de elasticidad (E_0) y la resistencia a la fluencia (σ_y).

En la actualidad se ha despertado un gran interés por parte de la comunidad científica enfocado a estudiar materiales cuya estructura no sea completamente sólida y que presente una elevada rigidez, una combinación adecuada entre densidad-resistencia mecánica, así como una elevada capacidad de absorción de energía, además de un bajo costo de fabricación. Los materiales plexoplegados son materiales corrugados, los cuales no poseen una estructura sólida. La geometría de estos materiales usualmente consta de pliegues, puntas y bordes, los cuales le dan al material la característica de tener una estructura consistente.

Al momento de construir un material de este tipo, donde lo más típico que se realiza es la compresión de una hoja de material delgado, se generan imperfecciones irregulares en las crestas de los pliegues formados; donde la energía se concentra más notoriamente, lo cual permite al momento de aplicar una fuerza, la energía se disipe lo más satisfactoriamente posible [1] (ver figura 1).



**Fig. 1. Materiales plexoplegados de aluminio a) Esfera corrugada antes de ser ensayada
b) Esfera corrugada ensayada.**

Los materiales plexoplegados son una nueva alternativa, y han mostrado cierta similitud con las espumas metálicas en su comportamiento a compresión, ya que en estudios anteriores se ha mostrado que presentan un comportamiento mecánico híbrido entre los materiales fibrosos y las espumas metálicas, ya que el material plexoplegado presentó una curva esfuerzo-deformación con una clara plasticidad y baja histéresis como las espumas pero no muestra la región de la meseta (plateau) posterior a la resistencia de fluencia, en lugar de esto, el material plexoplegado exhibe un comportamiento de endurecimiento por deformación continuo, se puede encontrar más detalles en [5].

En el caso de espumas metálicas y plexoplegados [5-7] se ha reportado que las propiedades mecánicas, como el módulo elástico y la resistencia a la fluencia, están en función de la densidad relativa del material a través de una ecuación de potencia (Ecuación 1 y Ecuación 2)

$$\frac{E_o}{E_s} \propto \left(\frac{\rho_o}{\rho_s}\right)^n \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_o}{\sigma_s} \propto \left(\frac{\rho_o}{\rho_s}\right)^m \quad (2)$$

Donde los valores de los exponentes m y n , para el caso de las espuma, dependen de su arquitectura y de su mesomecanismo de deformación. En la Tabla 1 se muestra un resumen de los valores exponentes, la arquitectura del material y su mesomecanismo de deformación predominante.

Una de las aplicaciones importantes de la espuma de aluminio es como elementos de absorción de energía. Los estudios realizados con anterioridad acerca de las

propiedades de los materiales plexoplegados arrojan luz sobre este tema, destacando la importancia de usar esta nueva clase de materiales como elementos estructurales capaces de absorber energía [1,5]. La ecuación 3, representa la energía que el material absorbe por unidad de volumen, W , y puede obtenerse del área bajo la curva esfuerzo-deformación a compresión. Esta energía es considerada por algunos autores como densidad de energía de deformación [1].

Tabla.1. Clasificación de los materiales celulares en función de su arquitectura y mesomecanismos de deformación.

Arquitectura de material	Mesomecanismo de deformación	n	m
Espuma abierta	Dominado por flexión (columna)	2	3/2
Armadura	Dominado por estiramiento (columna)	1	1
Espuma cerrada (con engrosamiento de los bordes)	Flexión (columna) y estiramiento (placa)	$1 < n < 2$	$1 < m < 3/2$
Espuma cerrada ideal (sin engrosamiento de los bordes celulares)	Dominado por flexión (placa)	3	2
Panal hexagonal	Dominado por flexión (placa)	3	3

Se expresa en unidades que se obtienen dividiendo unidades de energía por unidades de volumen. En el SI se tendrá entonces J/m^3 .

$$W(\epsilon_D) = \int_0^{\epsilon_D} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (3)$$

2. Desarrollo

2.1. Materiales y preparación de probetas

Con el propósito de evaluar la influencia de la densidad relativa y la velocidad de deformación en las propiedades mecánicas de los cilindros de aluminio plexoplegados, se realizaron ensayos de compresión uniaxial cuasi-estáticos.

Los ensayos fueron realizados en una maquina electromecánica con una celda de carga de 300 N de capacidad (ver Figura 2).



Fig. 2. Máquina Analizadora de textura T.A.X.T. de 300 N.

Esta máquina está conectada a un sistema de adquisición de datos y a una computadora que permite el control y registro de datos mediante el software EXPONENT Stable Micro System.

Los ensayos a las probetas cilíndricas de aluminio plexoplegado se realizaron utilizando platos de compresión, como se observa en Figura 2. Para realizar las pruebas se usaron hojas de papel aluminio estándar (densidad $\rho_s = 2.7 \text{ g/cm}^3$, espesor $t = 18 \text{ }\mu\text{m}$), que presentan un comportamiento elasto-plástico con un módulo de Elasticidad $E_s = 70 \text{ GPa}$. Las probetas fueron fabricadas de papel aluminio con forma cilíndrica y diámetro aproximado de 31.5 mm (ver figura 3), siguiendo la metodología de [5]. Se utilizó un molde de acero para dar la forma cilíndrica. Todas las probetas se midieron con un calibrador vernier digital y fueron pesadas con una balanza digital. Las medidas de altura, diámetro y masa se tomaron al menos tres veces por probeta.



Fig. 3. Probetas cilíndricas de aluminio plexoplegado para ensayo cuasiestático de compresión a) vista transversal b) vista longitudinal.

En base a la ecuación (4) y con los registros obtenidos se manipularon los datos para obtener las diferentes densidades relativas donde se varió la altura de acuerdo a la tabla 2.

$$\rho_R = \frac{m}{V_p \rho_s} \quad (4)$$

Donde: ρ_R es la densidad relativa, m es la masa del aluminio, V_p es el volumen de la probeta y ρ_s es la densidad del sólido.

Tabla 2. Densidad inicial relativa y altura inicial de cada muestra de aluminio plexoplegado.

Muestra	Densidad inicial relativa ρ_o/ρ_s	Longitud inicial L (mm)
1	0.051	34.2
2	0.065	27.45
3	0.082	20.7

Se usaron tres diferentes tasas de deformación para realizar las pruebas (ver tabla 3).

Tabla 3. Comparativa entre la velocidad de prueba y tasa de deformación.

Velocidad de prueba (mm/min)	Densidad relativa ρ_o/ρ_s	Velocidad de deformación (s^{-1})
1	0.051	4.873×10^{-4}
	0.065	6.0716×10^{-4}
	0.082	8.0515×10^{-4}
10	0.051	4.873×10^{-3}
	0.065	6.0716×10^{-3}
	0.082	8.0515×10^{-3}
2000	0.051	0.9746
	0.065	1.2143
	0.082	1.6103

La compresión se hizo hasta alcanzar la capacidad máxima de celda de carga. Así se ensayaron cinco probetas de densidad diferentes, para cada tipo de velocidad de prueba. Para investigar la mesoestructura de las estos materiales, así como su absorción de energía, se fabricaron otro tipo de probetas ($d = 16$ mm y una altura $L_i = 15$ mm), se observa que la altura es constante por lo que se utilizó un método alterno para poder obtener las tres densidades relativas diferentes (ver tabla 2). Se realizaron dos tipos de pruebas de compresión uniaxial denominadas: pruebas volumétricas (las

probetas se encuentran confinadas dentro de un molde durante el proceso de compresión) y pruebas no confinadas; esto con el fin de ver si el material presentaba cambios en sus propiedades mecánicas al restringir su deformación lateral al eje de la fuerza. Durante el ensayo se obtuvieron aproximadamente 40 datos por minuto. Cada registro incluía una medición de desplazamiento del cabezal, correspondiente al acortamiento de la probeta ensayada (Δ_L), y una medición de la fuerza aplicada (F). Con esa información se determinaron los valores instantáneos de compresión y deformación y por consiguiente la estimación de las propiedades mecánicas del aluminio plexoplegado. Los datos de acortamiento, Δ_L , y carga aplicada, F, fueron usados para el cálculo de los valores de deformación nominal, ε_N y esfuerzo nominal, σ_N , según las expresiones:

$$\varepsilon_N = \frac{\Delta_L}{L_i} \quad (5)$$

$$\sigma_N = \frac{F}{A_o} \quad (6)$$

Siendo, L_i la longitud inicial de la probeta cilíndrica (antes de ser ensayada) y A_o , el área inicial de su sección transversal. Una vez que se obtuvieron los diagramas de esfuerzo-deformación de cada probeta, se determinó el módulo de elasticidad y la resistencia a la fluencia de acuerdo a la gráfica (ver Fig. 4).

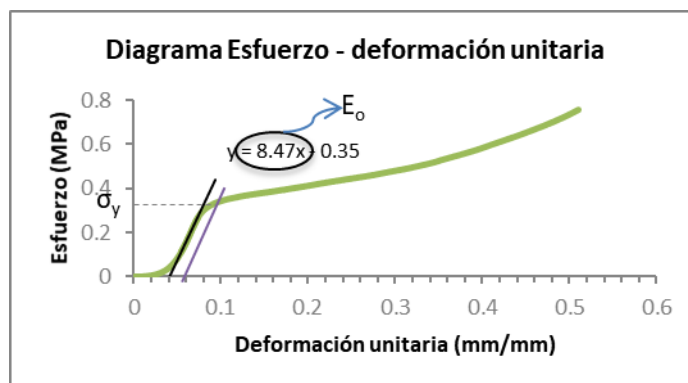


Fig. 4. Diagrama esfuerzo-deformación típico, se puede apreciar el módulo elástico (E_o) y la resistencia a la fluencia (σ_y).

3. Resultados

Podemos observar la curva característica que describen los cilindros plexoplegados respecto a sus diferentes densidades relativas, al ser sometidos a la prueba de compresión uniaxial (ver Fig. 5), la influencia de la ρ_R juega un papel importante en este tipo de materiales ya que cuando esta aumenta se requiere de un mayor esfuerzo para lograr su deformación, esta tipo de deformación es notablemente diferente al observado durante la compresión de las espumas ya que no existe esa meseta constante [6-7].

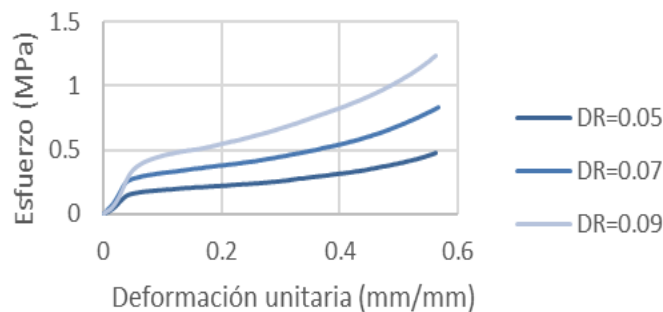


Fig. 5. Curva esfuerzo-deformación unitaria.

Para analizar el efecto de la tasa de deformación sobre el módulo de elasticidad y la resistencia a la fluencia, se realizaron las gráficas de las figuras 6 y 7, donde E_0 es módulo de elasticidad, σ_y es la resistencia a la fluencia y ρ_i/ρ_s es la densidad relativa.

Como puede notarse, el efecto de la tasas de deformación en las propiedades mecánicas para el rango de velocidades estudiado no es significativo esto se deduce ya que los valores de las propiedades mecánicas de nuestro interés se mantienen casi constantes en las diferentes velocidades que se utilizaron para realizar esta prueba (ver tabla 4).

Por otro lado también se analizó la relación entre el modulo elástico y la densidad relativa (ver figura 8) así como entre densidad relativa y la resistencia a la fluencia (ver figura 9). Se puede apreciar en ambas figuras que los datos obedecen a un modelo potencial.

Tabla. 4. Valores de las propiedades mecánicas a diferentes velocidades de prueba.

Velocidad de prueba (mm/min)	Densidad relativa ρ_o/ρ_s	Eo (MPa)	Sy (MPa)
1	0.05	4.5068	0.1414
	0.065	5.3850	0.2138
	0.08	5.8512	0.3243
10	0.05	4.2677	0.1332
	0.065	5.3777	0.2196
	0.08	5.9084	0.3288
2000	0.05	4.2847	0.1458
	0.065	5.6365	0.2311
	0.08	6.4818	0.3434

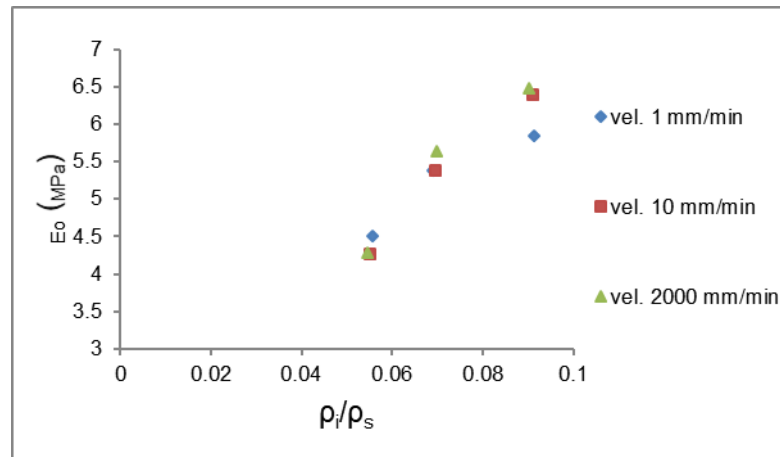


Fig. 6. Efecto de la tasa de deformación en el módulo elástico inicial.

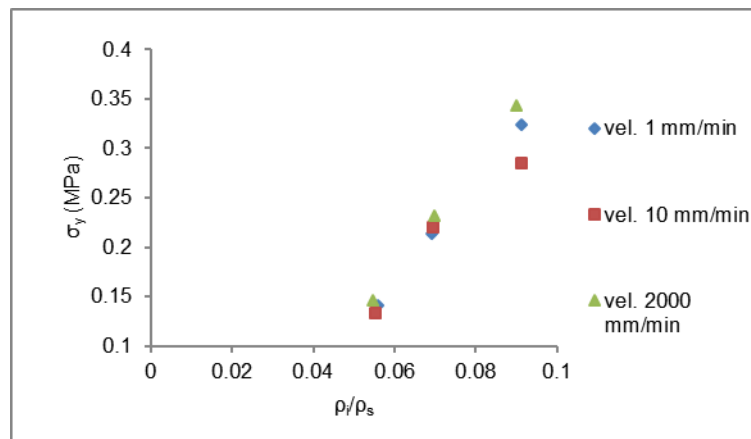


Fig. 7. Efecto de la tasa de deformación en la resistencia de fluencia.

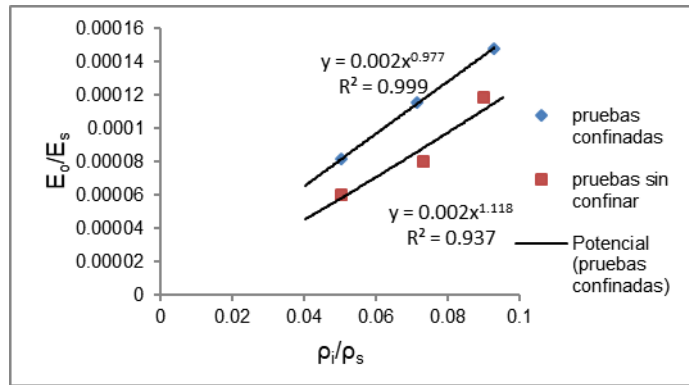


Fig. 8. Módulo de Elasticidad inicial relativo como función de la densidad relativa.

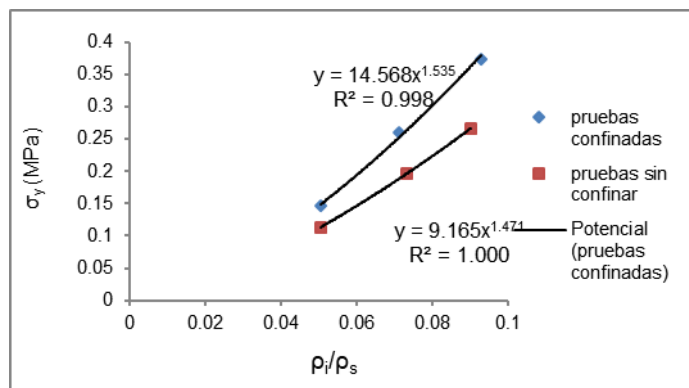


Fig. 9. Esfuerzo de fluencia como función de la densidad relativa.

Para el caso de las pruebas no confinadas los parámetros encontrados se muestran en las ecuaciones 7 y 8. Y para las pruebas confinadas los modelos empíricos encontrados se presentan en las ecuaciones 9 y 10.

$$\frac{E_i}{E_s} = 0.002 \left(\frac{\rho_i}{\rho_s} \right)^{1.118} \quad (7)$$

Pruebas no confinadas

$$\sigma_y = 9.165 \left(\frac{\rho_i}{\rho_s} \right)^{1.471} \quad (8)$$

$$\frac{E_i}{E_s} = 0.002 \left(\frac{\rho_i}{\rho_s} \right)^{0.977} \quad (9)$$

Pruebas confinadas

$$\sigma_y = 14.568 \left(\frac{\rho_i}{\rho_s} \right)^{1.535} \quad (10)$$

Los datos obtenidos de la ecuación de potencia (3) en las gráficas (8) y (9), fueron comparados en la tabla (1), para analizar su mesomecanismo de deformación, en

donde los exponentes n y m corresponden al módulo de elasticidad y esfuerzo a la fluencia, respectivamente. Se puede apreciar que los valores obtenidos están en el orden de los reportado en [5], por lo que de esta manera podemos validar los resultados presentados.

Para analizar la capacidad de absorción de energía fue necesario calcular, el área bajo la curva esfuerzo-deformación (Fig. 4) de cada probeta de papel aluminio plexoplegado. La deformación que se realizó fue del 50 % en todas las muestras con el fin de delimitar la curva esfuerzo-deformación a una misma longitud de compresión y poder observar el efecto de la densidad relativa, estas pruebas se llevaron a cabo a una velocidad de deformación de 10 mm/min (0.17 mm s^{-1}) reproduciendo así las pruebas realizadas por Bouaziz [5] al utilizar los mismos parámetros, y poder comparar resultados.

Se realizó una gráfica a partir de la ecuación (4) con respecto a la densidad relativa de las diferentes probetas ensayadas (Fig. 10).

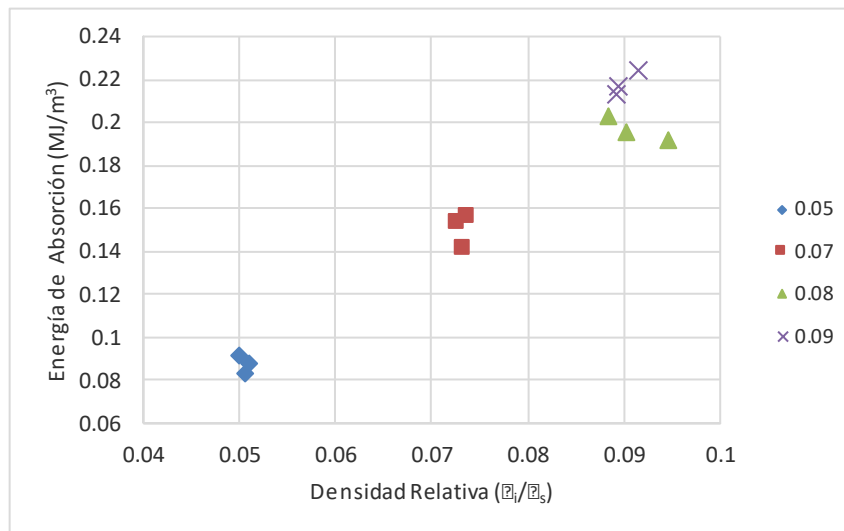


Fig. 10. Energía de Absorción como función de la densidad relativa.

Se observa que la capacidad de energía de absorción del aluminio plexoplegado aumenta conforme a su densidad relativa.

4. Conclusiones

Se observó que en base a los exponentes del ajuste de la ecuación de potencia para la gráfica del módulo elástico y resistencia a la fluencia, el aluminio plexoplegado presentó un meso-mecanismo combinado, es decir existe doblez y estiramiento de los pliegues.

Se concluye también que la velocidad de deformación, para el rango estudiado en este trabajo, no tuvo un efecto significativo en las propiedades mecánicas del material, módulo elástico y resistencia a la fluencia.

Respecto a la capacidad de energía de absorción se nota una tendencia que a mayor densidad relativa aumenta esta capacidad de absorción. Se plantea para futuros trabajos analizar un mayor rango de densidad relativa de este material para tener un mejor entendimiento de su comportamiento mecánico de este material.

Estos materiales plexoplegados da luz a la utilización para aplicaciones donde se requiera de absorción de impacto, no obstante se debe calcular en futuras investigaciones la eficiencia de absorción de energía ya que esta nos dará un amplio rango de visión y un mayor campo de utilización de estos materiales.

6. Referencias

- [1] O. Martínez, Caracterización fractal de superficies corrugadas en papel aluminio. Tesis de doctorado. 2010. Instituto Politécnico Nacional, México D.F., México.
- [2] Gutiérrez-Vázquez, J.A.; Oñoro, J.; Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones; Revista de metalurgia, 44 (5), Septiembre-Octubre, 2008, pp. 457-476
- [3] Garcia, J. B. C., M. A. F. Gomes, T. I. Jyh, and T. I. Ren. "Critical properties of non-equilibrium crumpled systems." *Journal of Physics A: Mathematical and General* 25, no. 7 (1992): L353.
- [4] Balankin, Alexander S., Rolando Cortes Montes de Oca, and Didier Samayoa Ochoa. "Intrinsically anomalous self-similarity of randomly folded matter." *Physical Review E* 76, no. 3 (2007): 032101.
- [5] L.J. Gibson, M.F. Ashby, *Cellular Solids: Structure and Properties*, second ed., Cambridge University Press, Cambridge, 1999.

- [6] Bouaziz, O.; Masse, J.P. ; Allain, S.; Oregas, L.; Latil, P., Compression of crumpled aluminum thin foils and comparison with other cellular materials; *Materials Science & Engineering A* 570, 2013;pp 1-7.
- [7] M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, H.N.G. Wadley, *Metal Foams: A Design Guide*, Butterworth-Heinemann, Boston (MA), 2000.