

ESTUDIO DE FRACTURA DE ESTRUCTURAS RETICULARES DE TERMOPLÁSTICOS FABRICADAS MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

A. López-Pasarón¹, E. García-Rodríguez², J. Martínez¹, S. I. Molina¹, A. Illana² y D. L. Sales^{1*}.

¹Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Q. I., Universidad de Cádiz
Avda. Ramón Puyol s/n, 11202 Algeciras, España

²Departamento de Ingeniería Industrial e Ingeniería Civil, Universidad de Cádiz, Avda. Ramón Puyol s/n, 11202 Algeciras, España

*Persona de contacto: david.sales@uca.es

RESUMEN

Las estructuras reticulares están presentando un auge especial, principalmente ligado al uso cada vez más extendido de equipos comerciales de fabricación aditiva o impresión 3D. Estas estructuras, utilizadas en planchas o perfiles, presentan una excelente rigidez a la vez que se maximiza la liviandad. El presente trabajo consiste en un estudio de la evolución de la fractura de paneles sándwich con núcleo de estructura reticular, cuando son sometidos a esfuerzos de compresión y de flexión. Se ha considerado el uso de retículas de tipo de celda abierta y de celda cerrada, fabricadas en ABS y PC mediante modelado por deposición fundida (FDM del inglés *Fused Deposition Modelling*). Se estudia la evolución de la fractura mediante grabación en vídeo con cámaras HD, que adquieren video desde dos direcciones de forma simultánea en el transcurso de ensayos de compresión y flexión a tres puntos. Aunque la evolución teórica de la fractura de este tipo de estructuras es ya conocida, el proceso de fabricación FDM introduce ciertas peculiaridades que son las que se esperan extraer tras este estudio.

PALABRAS CLAVE: Modelado por deposición fundida, Microrretícula, Fractura, Retícula abierta

ABSTRACT

Lattice structures are presenting a special interest lately, mainly linked to the increasingly widespread use of commercial equipment for additive manufacturing or 3D printing. These structures, used in plates or beams, present an excellent stiffness while maximizing lightweight. The present work consists in a study of the evolution of the fracture of sandwich panels with core of reticular structure, when subjected to compression and bending stresses. The use of open cell and closed cell type lattices, manufactured in ABS and PC using fused deposition modelling (FDM) has been considered. The evolution of the fracture is studied by using HD cameras acquiring video from two directions simultaneously in the course of compression and 3-point bend tests. Although the theoretical evolution of the fracture of this type of structures is already known, the FDM manufacturing process introduces certain peculiarities that are expected to be extracted after this study.

KEYWORDS: Fused Deposition Modelling, Microlattice, Fracture, Open-lattice.

INTRODUCCIÓN

El interés por obtener estructuras lo más ligeras posibles manteniendo unas propiedades mecánicas adecuadas ha sido una constante en la industria del transporte en general, y en particular en el sector aeroespacial. Un ejemplo de esta búsqueda es el de la empresa Boeing, que en el año 2015 anunció que era capaz de fabricar un material que prometía una gran reducción de peso en un volumen en el que el 99,99% era aire, sin que esta reducción de material supusiese un inconveniente en su comportamiento a flexión. [1] Este material consiste en un panel sándwich con un núcleo del tipo “*microlattice*”

o micro-retícula. Este nuevo material ha sido objeto de muchas investigaciones en estos últimos años, debido al amplio espectro de posibilidades que plantea para futuras aplicaciones. Entre las que destacan disminución de peso de estructuras, aislantes acústicos/térmicos, absorbedor de energía, protección para explosivos, etc. [2]

Las estructuras micro-reticulares se basan en la repetición de estructuras periódicas compuesta por pequeñas vigas. La resistencia mecánica de estas estructuras dependerá directamente de la densidad relativa (ρ) y de la topología de las vigas, estructura que formen y ángulo de estas.

Algunos estudios determinan que las estructuras piramidales proporcionan mayor resistencia, y que en la medida de lo posible se evite emplear vigas en el eje Z, ya que podría provocar colapsos menos homogéneos y por tanto no alcanzaría una gran rigidez. Sin embargo, otros autores como Luxner [3] sugiere que las estructuras más ordenadas son más fuertes, pero en contraposición, también son más sensibles a deformaciones localizadas y suelen sufrir un daño localizado en una cierta orientación. Por ello, propone el estudio de estructuras aleatorias que permitan mejorar las propiedades mecánicas en todas las direcciones, provocando el efecto de eliminar planos de fallas naturales que son el anticipo de un colapso general de la estructura.

El potencial que puede proporcionar este tipo de estructuras es muy alto, pero existen algunos inconvenientes. Uno de ellos se encuentra en el proceso de fabricación, a día de hoy la producción de este tipo de estructuras se lleva a cabo en laboratorios y no se ha llevado aún a escalas industriales. Está en un proceso de maduración en donde no se ha establecido un método de optimización eficaz para fabricar estructuras de este tipo con unas propiedades dadas, y, además no existe un modelo que permita predecir con la suficiente antelación el colapso de las estructuras. La resolución a estos pequeños inconvenientes logrará situar a este tipo de materiales como una gran alternativa a lo ya existente.

En cuanto a la fabricación, los métodos más empleados hasta ahora son variedades de fabricación 3D, que en función del tipo de material con el que se quiera construir determinará la tecnología de fabricación 3D. El material seleccionado, así, como el proceso de fabricación influirá directamente en las propiedades de la estructura microreticular. En relación con la impresión 3D en metales, se emplea la tecnología SLM (Selective Laser Melting). Esta consiste en una capa de polvo de metal en donde un láser funde ese polvo para crear una capa, tras esa nueva capa se vuelve a depositar polvo de metal y así progresivamente hasta que se construye la estructura. Si hablamos de impresión 3D con polímeros solemos hablar de modelado por deposición fundida (FDM del inglés *Fused Deposition Modelling*) que es el más conocido y extendido, gracias a la “democratización” de la impresora 3D doméstica. Las probetas que se emplearon en este estudio fueron fabricadas con este proceso. Un aspecto que aporta más interés al FDM es la posibilidad de aditivar el material polimérico que alimenta el proceso con nanopartículas que añadan a la pieza fabricada un carácter funcional de utilidad en plasmónica, electrónica o fotónica.[4]

Si se quisiese usar los materiales micro-reticulares como unidad estructural de alguna construcción o elemento, lo normal sería que se usase como panel tipo sándwich. Este tipo de configuración permite dotar al material de una superficie plana que le ofrece la posibilidad de formar parte, por ejemplo, de un suelo u otra superficie plana.

Además, el panel tipo sándwich permite distribuir las fuerzas a través de toda la estructura, lo cual hace realmente útil este tipo de configuración.

Algunos estudios previos determinan unas variables a tener en cuenta para la fabricación de las micro-retículas, en este caso para metales, pero pudiendo extrapolarse para materiales poliméricos alguna de ellas. Hasan [2] identifica cuatro variables para asignar de forma adecuada un metal en función de la aplicación en la que se requiera, estas variables son: morfología, tipo de celda, material y proceso de fabricación.

El presente trabajo consiste en un estudio sobre la evolución de la fractura de seis probetas sometidas a compresión, correspondientes a estructuras tipo sándwich con núcleo de material reticular de celda abierta (*microlattice*) y cerrada, fabricadas mediante FDM en poli-carbonato (PC), ABS o termoplástico de acrilonitrilo, butadieno y estireno, y ácido poliláctico (PLA). Se pretende así evaluar de forma preliminar la capacidad de la técnica de fabricación aditiva más común, la FDM, para fabricar estructuras con un comportamiento mecánico y una fiabilidad adecuados para un uso extendido en la industria. Este estudio también pretende ser el punto de partida para evaluar la aplicación de este tipo de estructuras en dispositivos activos fotónicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio comprende un total de seis probetas tipo sándwich con núcleo reticular, tres de ellas con retícula de celda abierta, y las restantes de celda cerrada, fabricadas en tres polímeros termoplásticos distintos: PC, ABS y PLA. La tecnología de fabricación aditiva empleada fue FDM, y el equipo de fabricación el Fortus 450mc (Stratasys®), de alta precisión y rendimiento instalado en la División de Fabricación Aditiva de SCCYT-UCA. También se ha considerado el análisis comparativo de una de las probetas fabricada por una impresora 3D más convencional, la Witbox de BQ. La Tabla 1 resume los datos de identificación de cada probeta.

Tabla 1: Resumen del tipo, material y equipo de fabricación de las probetas consideradas en el estudio.

Probeta	Tipología	Material	Impresora
1PC	Cerrada	PC	Fortus 450mc
2PC	Abierta	PC	Fortus 450mc
3ABS	Abierta	ABS M30	Fortus 450mc
4ABS	Cerrada	ABS M30	Fortus 450mc
5PLA	Cerrada	PLA	BQ Witbox
6ABS	Abierta	ABS M30	Fortus 450mc

La Tabla 2 muestra las dimensiones de las probetas, medidas tras la impresión. En el caso de las probetas con

celdas abiertas, se incluye la medida promedio de la sección transversal de las vigas (espesor y ancho).

Tabla 2: dimensiones de las probetas tras la fabricación.

Probeta	Lado A (mm)	Diámetro de viga/ espesor de pared (mm)	Lado B (mm)	Alto (mm)
1PC	69,0	1,5	69,0	40,2
2PC	70,3	2,5	70,3	40,6
3ABS	70,0	2,3	70,0	40,4
4ABS	69,0	1,5	69,0	40,4
5PLA	69,0	1,5	69,0	40,0
6ABS	70,5	2,1	70,5	40,2

En cuanto al diseño de las probetas, como se muestra en el esquema de la Ilustración 1, las probetas con núcleo de celda abierta se corresponden con una estructura reticular o *microlattice* con una red cúbica de vigas repetida periódicamente. Ninguna de las vigas se encuentra contenida en las direcciones de los ejes X, Y, Z, sino que tienen ángulos de inclinación. La celda cerrada se ha diseñado conservando la misma estructura que la del tipo *microlattice*, con la peculiaridad de hacer desaparecer las vigas, sustituyéndolas por paredes, formando la misma geometría entre nodos.

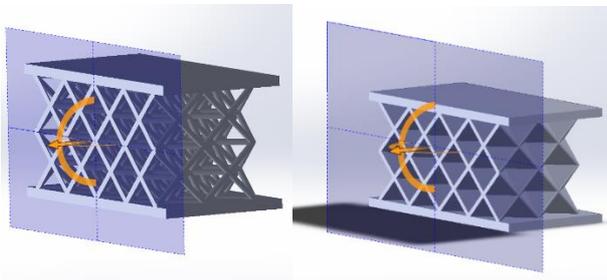


Ilustración 1: Sección de las probetas de celda abierta (izquierda) y de celda cerrada (derecha).

Todas ellas han sido ensayadas a compresión a temperatura ambiente, con una velocidad de ensayo de 30mm/s, a excepción de la probeta 5PLA que fue ensayada a 3mm/s. Estos ensayos se han llevado a cabo en la máquina de ensayos universales SHIMADZU AG-X, de 50kN de carga máxima. Para dicho ensayo se han utilizado útiles de compresión de 100 mm de diámetro con suficiente área de apoyo en la pieza de ensayo. Además, los ensayos fueron grabados con tres cámaras de vídeo en formato HD, permitiendo una de las cámaras una tasa de 240fps.



Ilustración 2: Detalle de la configuración experimental del ensayo de compresión.

RESULTADOS

La Ilustración 3 muestra las curvas resultantes de los ensayos de compresión. En ella se aprecia que en la zona superior se concentran las curvas de las estructuras de celda cerrada, mientras que en la parte inferior lo hacen las de celda abierta. Se identifican tres puntos críticos en la evolución del grafo, donde se tiene una relación directa con la deformación de la pieza:

- **Lineal**, corresponde a la zona donde la probeta sufre una deformación elástica, alcanzando una mayor tensión en las de celda cerrada, antes de empezar a producirse el colapso de la estructura.
- **Colapso**, tras una deformación lineal, se alcanza un máximo tras el cual, o bien disminuye el esfuerzo que soporta la estructura de la probeta (estructuras *microlattice*), o bien en el caso de la celda cerrada se produce una meseta donde la estructura se sigue deformando a un valor de esfuerzo prácticamente constante. En cuanto a las probetas de celda abierta, al estar compuesta por pequeñas vigas, el colapso no es homogéneo, sino que se van produciendo fallas localizadas principalmente en los nodos. Estos pequeños colapsos se visualizan en el gráfico como pequeños dientes de sierra.
- **Densificación**, tras haberse colapsado toda la estructura de la probeta se produce un amontonamiento del material aumentando drásticamente el esfuerzo que soporta la probeta, lo que produce una curva de pendiente elevada hasta finalizar el ensayo, cuando alcanza la capacidad máxima de la máquina.

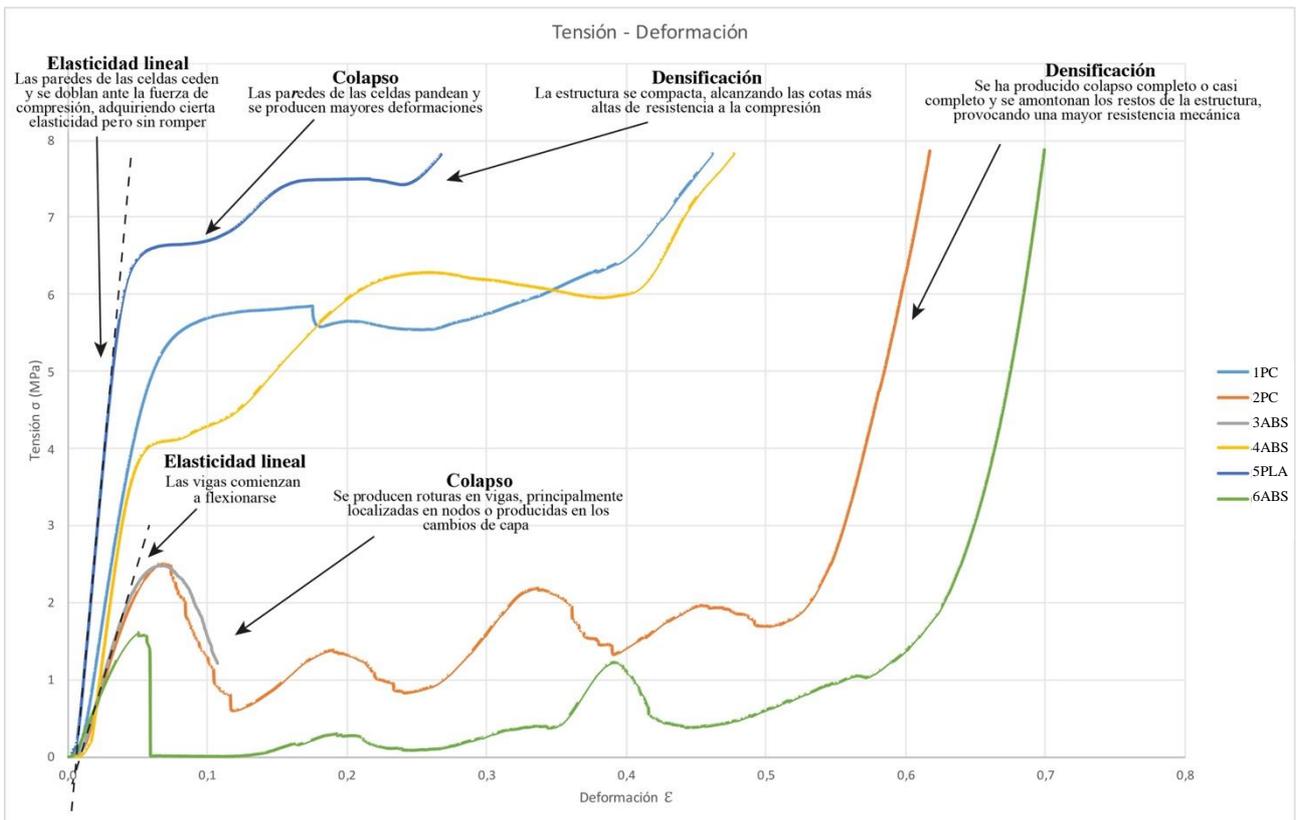


Ilustración 3: Curvas tensión-deformación resultantes de los ensayos de compresión.

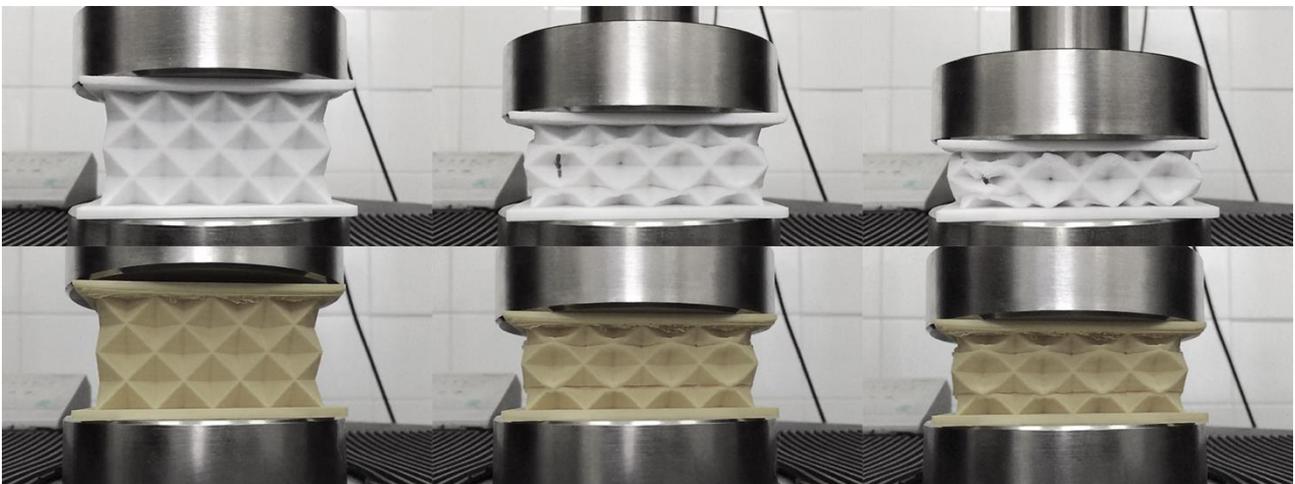


Ilustración 4: Secuencia de compresión. La pieza superior corresponde a la probeta 1PC ensayada a 30mm/s; pieza inferior corresponde a la probeta 5PLA ensayada a 3mm/s

El posicionamiento de las curvas de ensayo en una zona superior o inferior está relacionada con la densidad relativa de las probetas. En el caso de las de celda abierta, las vigas de menor diámetro no han conseguido cotas tan altas de absorción de energía en los puntos críticos de las zonas de relación lineal y de colapso, siendo las de menor grosor las que se encuentran en la zona inferior. Las de celda cerrada, sin embargo, tienen niveles similares ya que las densidades relativas son similares, las pequeñas

variaciones en los gráficos que puedan existir entre la probeta 4ABS y 1PC se deben a los posibles fallos durante el proceso de fabricación.

A pesar de estar fabricada con una impresora comercial más convencional, la probeta 5PLA consigue una resistencia a la compresión más elevada que las probetas fabricadas con el equipo de mejores prestaciones. Además del equipo de fabricación, hay otras dos

variables en estos resultados que pueden haber influido en este mejor comportamiento de la muestra 5PLA. Una es el material, PLA, y la otra es la velocidad de ensayo, 10 veces menor que la del resto de probetas ensayadas. La velocidad de ensayo es una variable que afecta directamente en la absorción de energía de deformación, ya que la probeta tiene más tiempo para distribuir el esfuerzo al que está sometido por toda la estructura, y por tanto, sufrir menor deformación en comparación con el resto (como se observa en las fotografías de la derecha en la Ilustración 4). Además, a una velocidad más lenta se produce una mejor disipación del calor generado por la deformación, aspecto importante a considerar en polímeros por su baja conductividad térmica. En cuanto al material, el PLA tiene una resistencia en el material masivo muy superior a la del ABS M30 y ligeramente inferior a la del PC (ver Ilustración 5). Para tener una visión más acertada sobre cómo afectan la velocidad de ensayo y el equipo de fabricación se van a llevar a cabo más estudios en el futuro.

En cuanto a la evolución de la deformación, se observa que ésta no se produce de forma homogénea a lo largo del núcleo de la probeta. La Ilustración 4 muestra que la fila superior de celdas (en contacto con el plato superior móvil de la máquina de ensayos) comienza a deformarse en mayor medida, le sigue la fila más inferior (en contacto con el plato inferior fijo de la máquina de ensayos), y finalmente la central.

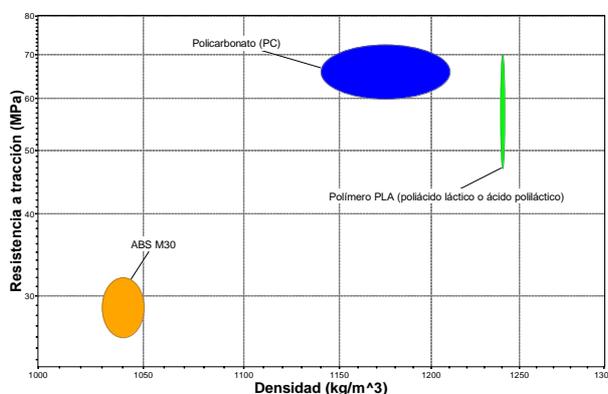


Ilustración 5: Mapa de globos resistencia a compresión – densidad de los tres materiales utilizados en la fabricación de las probetas.

CONCLUSIONES

Se ha estudiado la evolución de la fractura de seis probetas sometidas a compresión, correspondientes a estructuras tipo sándwich con núcleo de material reticular de celda abierta (*microlattice*) y cerrada, fabricadas mediante fabricación aditiva FDM en PC y ABS haciendo uso de un equipo de altas prestaciones. A modo de comparación se ha fabricado la misma estructura en un equipo más convencional en material PLA.

La rotura a compresión de todas las probetas muestran las tres etapas típicamente encontradas en las estructuras reticulares: lineal – colapso – densificación. A pesar de que todas las probetas tenían el mismo tamaño de celda, las probetas de celda abierta presentaron una resistencia a la compresión muy inferior a las de celda cerrada. De forma relativa, las probetas de PC presentaron mayor resistencia a compresión que las de ABS, teniendo relación directa con las propiedades de los materiales masivos con los que fueron fabricados. Así mismo, a igualdad de condiciones las probetas de ABS tienen una rotura más suave y menos escalonada que las de PC.

De forma contraria a lo esperado, la probeta fabricada en el equipo comercial más convencional en material PLA presenta la mejor resistencia a compresión superior y la menor deformación. No obstante, es necesario ampliar el estudio para diferenciar cómo afectan por separado la velocidad de ensayo, el material y el equipo de fabricación utilizados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la División de Fabricación Aditiva de los Servicios Centrales de Investigación Científica y Tecnológica de la Universidad de Cádiz, al MINECO (proyecto TEC2017-86102-C2- 2-R), y a la Junta de Andalucía (grupo de investigación PAI TEP-946 INNANOMAT).

REFERENCIAS

- [1] J. A. Kolodziejka, C. S. Roper, S. S. Yang, W. B. Carter, y A. J. Jacobsen, Research Update: Enabling ultra-thin lightweight structures: Microsandwich structures with microlattice cores, *APL Materials* 3 (2015), <http://dx.doi.org/10.1063/1.4921160>
- [2] R. Hasan, Progressive Collapse of Titanium Alloy Micro-lattice Structures Manufactured Using Selective Laser Melting PhD thesis University of Liverpool, 2013, <http://research-archive.liv.ac.uk/11933/>
- [3] M.H. Luxner, A.Woesz, J. Stampfl, P. Fratzl, H.E. Pettermann, A finite element study on the effects of disorder in cellular structures, *Acta Biomater.* 5 (2009) 381–390, <http://dx.doi.org/10.1016/j.actbio.2008.07.025>.
- [4] H. Kim, F. Torres, M. Li, Y. Lin y T.-L. B. Tseng, Fabrication and characterization of 3D printed BaTiO₃/PVDF nanocomposites, *Journal of Composite Materials* 52 (2018) 197–206, <http://dx.doi.org/10.1177/0021998317704709>.