

CUADERNOS DE INVESTIGACIÓN EN LA INGENIERÍA

VOL I 2016

“AVANCES EN EL ÁREA DE MATERIALES Y
SUS PROCESOS”

Editores:

*José E. Crespo Amorós
Antonio V. Nadal Gisbert
David Juárez Varón*



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Ingeniería y Tecnología

3ciencias

CUADERNOS DE INVESTIGACIÓN EN LA INGENIERÍA

VOL. I 2016

AVANCES EN EL ÁREA DE MATERIALES Y SUS PROCESOS

Autores: Varios

Editores: José E. Crespo Amorós
Antonio V. Nadal Gisbert
David Juárez Varón

**Escuela Politécnica Superior de Alcoy
Universitat Politècnica de València**



Esta publicación ha sido sometida a un proceso de revisión por pares entre expertos internacionales del área para garantizar la calidad de sus aportaciones.

Esta publicación no puede ser reproducida, ni total ni parcialmente, ni registrada, ni transmitida por un sistema de recuperación de información, ya sea fotomecánico, electrónico, por fotocopia o cualquier otro medio, sin el permiso previo de los propietarios del copyright.

© del texto: **Los autores**

© de la edición: **Área de Innovación y Desarrollo, S.L.**
C/ Els Alzamora, 17 · 03802 - Alcoy
e-mail: info@3ciencias.com

Universitat Politècnica de València
Campus de Alcoy (EPSA)
Plaza Ferrándiz y Carbonell, 1
03801 Alcoy (Alicante)

Diseño de la portada: Inés Poveda Pastor

Primera edición: diciembre 2016

ISBN: 978-84-946684-9-4

DOI: <http://dx.doi.org/10.17993/IngyTec.2016.17>

Índice

Efecto de la incorporación de cargas celulósicas en polímeros de carácter natural

F. Parres, J.E. Crespo, J. Fontoba Ferrándiz, A.V. Nadal-Gisbert.....9

Neuromarketing. Parte 1. Análisis de equipos de Eye Tracking

D. Fenollar, D. Juárez, V. Tur-Viñes, V. Veja.....29

Neuromarketing. Parte 2. Análisis de equipos de Electroencefalografía

D. Fenollar, D. Juárez, V. Tur-Viñes, V. Veja.....37

Caracterización mecánica de biocomposites basados en residuos de pinocha

A. Mengual, D. Juárez, R. Balart, S. Ferrándiz.....45

Caracterización de Ground Tire Rubber y Crumb Tire Rubber mediante modelos matemáticos

A.V. Nadal-Gisbert, M. Boix, F. Parres, M.A. Peydró, A. Macías-García.....53

Variaciones de resistencia en laminados biodegradables

J. Fontoba Ferrándiz, J.E. Crespo, F. Parres García, A.V. Nadal-Gisbert, S. Sánchez-Caballero.....61

Técnicas de caracterización físico-acústica de materiales fibrosos y el diseño de equipos para su medida

M. Zamorano Cantó, J. Segura Alcaraz, A.V. Nadal-Gisbert, J.E. Crespo, P. Miró i Martínez.....69

Espectroscopía Raman bajo presión del compuesto In₂Se₃

R. Vilaplana, S. Gallego, A.V. Nadal-Gisbert, J.E. Crespo.....77

Estudio técnico-económico del proceso de triturado de envases recuperados

J. Fuente, S. Sánchez-Caballero, M.A. Selles, J.E. Crespo....93

Caracterización física y acústica de agregados granulares de naturaleza cerámica

T.V. Esquerdo Lloret, A.V. Nadal-Gisbert, C. Puchades González, L.M. Pérez.....109

Normas para la publicación en la colección Cuadernos de investigación de la Ingeniería

E. Ramis Claver, A.V. Nadal-Gisbert, J.M. Gadea Borrell, J.E. Crespo.....123

Análisis de la estructura interna de materiales porosos de matriz rígida elaborados con base cementicia

T.V. Ezquerdo Lloret, P. Micó, A.V. Nadal-Gisbert, J. Segura Alcaraz, E. Juliá Sanchis.....133

Estudio de aplicación de materiales compuestos con fibras naturales para la fabricación de componentes de automoción

B. Oliver-Borrachero, S. Sánchez-Caballero, M.A. Selles, J.E. Crespo.....141

Estudio del comportamiento acústico de agregados granulares ligeros

R. Maderuelo, A.V. Nadal-Gisbert, J.E. Crespo, J.M. Barrigón, F. Parres, E. Juliá, L.M. Pérez.....157

“Efecto de la incorporación de cargas celulósicas en polímeros de carácter natural”

**F. Parres ^{(1)*}, J.E. Crespo ⁽¹⁾, J. Fontoba Ferrándiz ⁽¹⁾,
A.V. Nadal-Gisbert ⁽¹⁾**

*(1) Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales,
Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Universitat Politècnica de València
Plaza Ferrándiz y Carbonell, 1 03801 Alcoy (Alicante)*

RESUMEN

Se han preparado tres mezclas con diferentes porcentajes de carga mediante extrusión de doble husillo para su posterior caracterización mecánica y térmica. El análisis de las propiedades mecánicas mostró variaciones en la energía absorbida durante el impacto y en el módulo de elasticidad de las diversas muestras, en cambio, la tensión de rotura y el alargamiento a la rotura permanecieron en valores prácticamente constantes. Las micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido indican una buena interacción entre la matriz polimérica y las cargas celulósicas incorporadas. En cuanto a las propiedades térmicas, la calorimetría diferencial de barrido indica un incremento de la cristalinidad del biopolímero con la presencia de cargas de origen natural, así como un incremento de la temperatura de flexión térmica.

* Contacto: F. Parres García; Tel. 966528570; e-mail: fraparga@dimm.upv.es

INTRODUCCIÓN

La necesidad de cambiar los hábitos de la sociedad es indudable, la generación de residuos es tan alta que existen verdaderos problemas medioambientales. El consumo de polímeros se ha ido incrementando desde su aparición, a día de hoy no entenderíamos nuestra vida sin este tipo de materiales. El gran inconveniente que presentan es la gran cantidad de residuos que se generan en ciertos sectores, tales como el sector del envase y embalaje [1, 2].

Dada esta problemática, desde hace décadas se viene investigando en polímeros biodegradables [3, 4]. En la actualidad, son múltiples los estudios realizados, éstos abarcan desde la incorporación de aditivos para mejorar propiedades [5, 6], estudios del proceso de degradación [7], o el efecto de la adición de partículas sobre sus propiedades en general [8, 9].

A pesar de la existencia de polímeros biodegradables su aplicación a nivel industrial aún no ha experimentado una gran implementación. Uno de los motivos por los que esta implementación no se haya llevado a cabo es la diferencia de precio que existe entre los polímeros convencionales (procedentes del petróleo) y los biopolímeros.

Existen diversas formas de reducir el precio de un material, en primer lugar y quizás la más difícil, es la búsqueda de materia prima más económica, en segundo lugar, fomentar el consumo de biopolímeros para así aumentar la demanda y producir en mayores cantidades, finalmente, otra forma de reducir costes es a través de la incorporación de cargas en el material.

A día de hoy esta parece ser la opción más viable, dado que puede ser aplicada de forma inmediata. Las cargas se han utilizado desde hace mucho tiempo es el abaratamiento de costes en

polímeros, es este caso nos encontramos con un condicionante, la carga incorporada debe mantener las características biodegradables del polímero.

Son múltiples las cargas aditivadas en matrices poliméricas de carácter biodegradable, organomontmorillonita, lignina, TiO_2 [10-12] son algunas de ellas.

Por otro lado, la industria maderera obtiene en su proceso productivo una serie de subproductos que aprovecha para generar derivados de la madera, para la revalorización energética [13, 14] e incluso para el sector agroalimentario como parte del alimento del ganado [15, 16] y tratamiento de enfermedades intestinales en humanos [17].

La harina de madera ha sido estudiada y analizada como carga en diferentes materiales [18-21]. Este tipo de material, ha evolucionado de tal forma que en la actualidad existen casas comerciales que vende harina de madera clasificada en tamaño y forma, para diversos usos, tales como camas de animales, material absorbente, ahumar carne. A continuación, se enuncian algunas de las muchas empresas que existen que dedican su actividad a la producción de harina de madera.

P.J. Murphy Forest Products Corp.
Eden Products Ltd
American Wood Fibers
Dejno's, Inc.
East Coast Woodshavings
Ellinger's Agatized Wood Inc
Fiber By-Products, Corp.
Marth Wood Shaving Supply, Inc.
P.W.I. Industries Inc.
Raka, Inc

LA SOLE EST SRL
BIOKEY LTD
LIGNUM - RESOURCE
J. RETTENMAIER & SÖHNE GmbH + Co KG

Con estas premisas el objetivo del presente trabajo es analizar la influencia de la harina de madera de diferente granulometría en las propiedades mecánicas y térmicas del biopolímero.

EXPERIMENTAL

Materiales

Los materiales utilizados en el presente estudio son: mezcla de Ácido poliláctico (PLA) y Policaprolactona (PCL), y cargas celulósicas con diversa granulometría.

Preparación de Mezclas

La preparación de las mezclas ha sido llevada a cabo mediante el uso de una extrusora de doble husillo con las siguientes temperaturas de extrusión 135 – 150 – 160 – 165 °C.

Caracterización Mecánica

Las propiedades mecánicas de las diversas muestras se obtuvieron a través del uso de una máquina universal de ensayos ELIB 30 – Ibertest (S.A.E. Ibertest, Madrid, Spain), con una célula de carga de 5 kN. Todos los ensayos siguieron la UNE-EN ISO 527, a una velocidad de 30 mm min⁻¹.

La energía de impacto fue determinada con el uso de un péndulo Charpy (S.A.E. Ibertest, Madrid, Spain) según la norma ISO-179.

Todos los valores representados han sido calculados a partir de la media de cinco muestras ensayadas.

Caracterización Térmica (DSC – TGA - HDT)

El análisis calorimétrico ha sido llevado a cabo mediante el uso de un DSC Mettler-Toledo 821 (Mettler-Toledo Inc., Schwerzenbach, Switzerland). El peso de las muestras está comprendido entre 6 y 7 mg. La temperatura programada ha sido la siguiente: un primer calentamiento iniciado con un tramo isotérmico de 5 minutos a 25 °C, para posteriormente alcanzar 220 °C a 5 °C min⁻¹ seguido de un enfriamiento a 5 °C min⁻¹ hasta 30 °C y proceder a un segundo calentamiento a 5 °C min⁻¹ hasta alcanzar de nuevo los 220 °C. Todos los ensayos se realizaron en atmósfera inerte de nitrógeno con un flujo de 30 ml min⁻¹.

La termogravimetría ha sido llevada a cabo mediante el uso de un Mettler-Toledo TGA/SDTA 851 (Mettler-Toledo Inc, Schwerzenbach, Switzerland) con un programa térmico que se inicia a 30 °C y finaliza a 800 °C a una velocidad de 5 °C min⁻¹ en atmosfera de nitrógeno (20 ml min⁻¹). El peso de las muestras son de aproximadamente 5 mg.

Para la obtención de la temperatura de flexión térmica se ha utilizado un equipo Vicat/HDT modelo Deflex 687-A2 (Metrotec, S.A, San Sebastián, Spain), el cual utiliza aceite siliconado (DOW Corning 200 Fluid 100 CS). Todos los ensayos siguieron la norma correspondiente (ASTM D-648), con una velocidad de calentamiento de 120 °C min⁻¹ y una flecha de 0,25 mm.

Microscopía Electrónica (SEM)

El análisis de la morfología de las diversas fracturas se analizó mediante un Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM-6300 (Jeol USA, Peabody). Las muestras previamente fueron preparadas para su observación con la deposición de una fina capa de oro.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Previo al análisis de resultados se incluye una tabla con la codificación de las muestras indicando el contenido y tamaño de las cargas utilizadas.

Tabla 1. Codificación utilizada en las diferentes mezclas.

Tamaño	Porcentaje			
	5	10	20	30
1 mm	Bio-5%-1	Bio-10%-1	Bio-20%-1	Bio-30%-1
0.5 mm	Bio-5%-0.5	Bio-10%-0.5	Bio-20%-0.5	Bio-30%-0.5
0.1 mm	Bio-5%-0.1	Bio-10%-0.1	Bio-20%-0.1	Bio-30%-0.1

A nivel ingenieril, la aplicación de un material, sea cual sea su naturaleza viene determinada en muchas ocasiones por las propiedades mecánicas que presenta. Son diversas las propiedades que deben ser analizadas, tales como la tensión de rotura, el alargamiento a la rotura, la energía de impacto y el módulo de elasticidad.

La tensión de rotura es una de las propiedades de mayor importancia ya que esta determina la máxima carga que es capaz de soportar el material. La incorporación de cargas en un material puede influir de forma negativa si no se produce interacción entre la matriz y la partícula. Cuando la interacción es baja frecuentemente se produce una pérdida generalizada de propiedades mecánicas.

En este caso, los valores de tensión de rotura permanecen prácticamente constantes a lo largo de todas las mezclas independientemente del tipo de carga celulósica utilizada. Las cargas de 1 mm y de 0,5 mm muestran un ligero incremento si son comparadas con la carga de menor tamaño (0,1 mm).

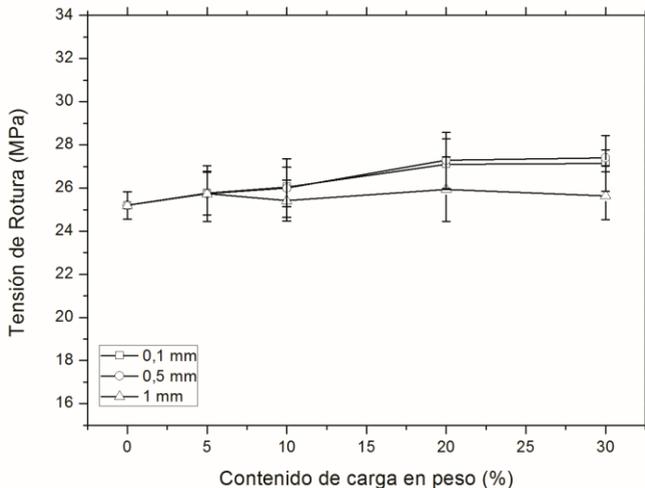


Figura 1. Influencia del contenido de carga y su tamaño sobre la tensión de rotura.

Normalmente la adición de cargas provoca un descenso de la tensión de rotura, pero en este caso que los valores permanezcan constantes indican una buena interacción entre las partículas y la matriz polimérica. Tanto la rugosidad de las partículas, como el carácter fibroso de estas son determinantes en la interacción con la matriz y consecuentemente con las propiedades finales de las mezclas.

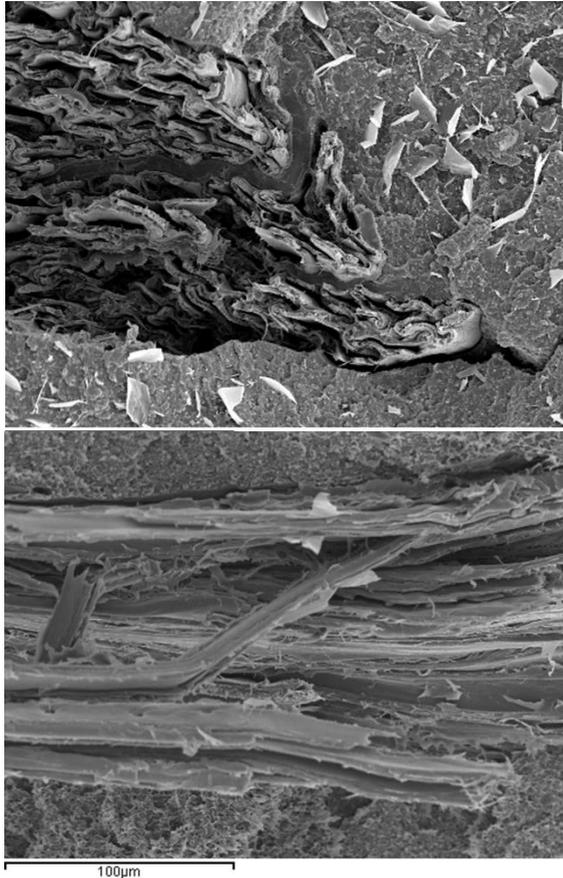


Figura 2. Micrografía SEM correspondientes a superficies de fractura de biopolímero con cargas celulósicas. Bio-20%-1 a 500X (arriba) y bio 20 %-0,5 a 500X (abajo).

En cuanto al alargamiento a la rotura, los valores de alargamiento a la rotura están comprendidos entre un 2 – 3 %, si analizamos la tendencia, las muestras con tamaños de partícula intermedios y grandes presentan una ligera tendencia decreciente en los valores de alargamiento a la rotura, en cambio, la muestra

con tamaños de partícula más pequeños, tamaños de 0,1 mm, muestra un ligero aumento del alargamiento a la rotura hasta un porcentaje del 20 % siendo un poco menor para las muestras con un 30 %.

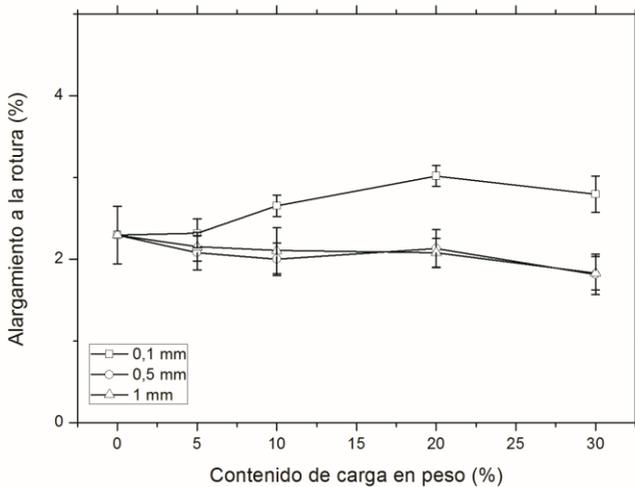


Figure 3. Variación del alargamiento a la rotura en función del contenido de carga.

Si los valores de tensión de rotura y alargamiento a la rotura presentaban ligeros variaciones respecto el material sin carga, la aplicación de esfuerzos a alta velocidad mediante un impacto el comportamiento de las muestras si presenta grandes diferencias. Las muestras con tamaños de partícula grande, la resistencia al impacto muestra un ligero descenso, un 10 % de pérdida de energía de impacto para las muestras con un 30 % de carga. En cambio, las muestras con tamaños intermedios y pequeños, la energía de impacto aumenta a medida que el porcentaje de carga es mayor, alcanzando valores de un 140 % para las cargas intermedias y un 180 % para las cargas de mayor tamaño. Este máximo se produce

para un contenido en carga del 20 %, superado este porcentaje se produce el colapso de la matriz y se inicia un descenso de los valores de resistencia al impacto.

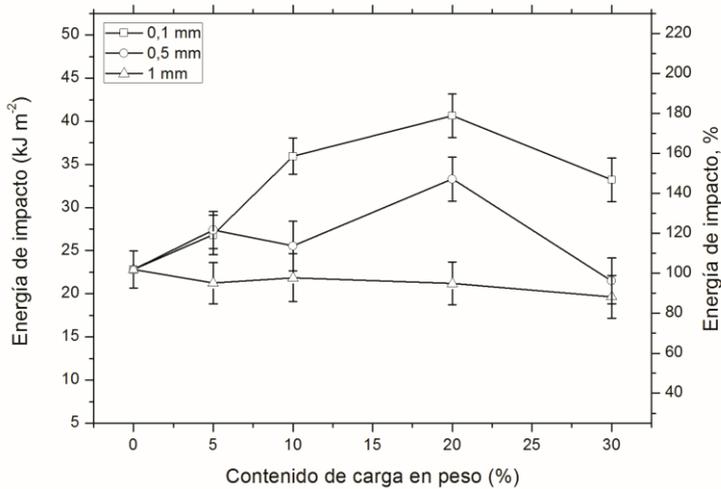


Figura 4. Efecto del contenido de carga y tamaño de la partícula sobre la energía de impacto

Finalmente, y no menos importante, el módulo de elasticidad presenta un incremento de los valores a medida que se incrementa el porcentaje de carga, alcanzando máximos para las muestras con contenidos de carga del 30 %.

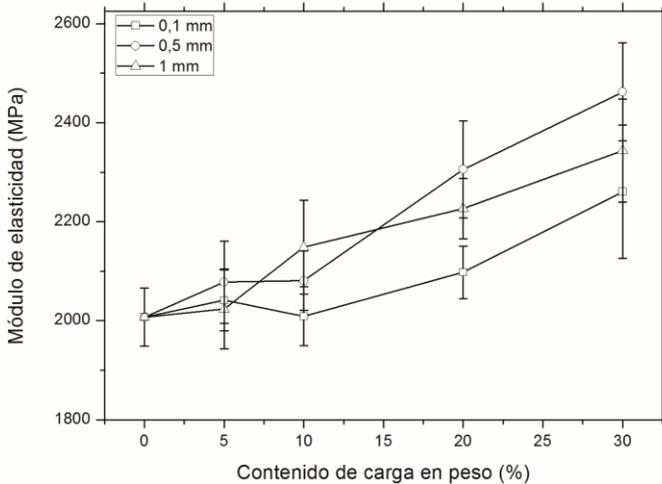


Figura 5. Influencia de la presencia de cargas en el módulo de elasticidad.

La calorimetría diferencial de barrido ofrece información diversa, la temperatura de transición vítrea, cristalizaciones en frío, temperaturas de fusión, además permite detectar mezclas de polímeros, la cual justifica en muchas ocasiones las variaciones en las propiedades mecánicas que muestran las diversas mezclas.

La curva calorimétrica muestra tres tipos de transiciones térmicas, dos reacciones endotérmicas, una alrededor de 60 °C por la presencia de policaprolactona en la mezcla y otro en torno a 160 °C correspondiente a la fase de ácido poliláctido. Por otro lado, entre 70 y 90 °C aparece una reacción de carácter endotérmico que corresponde a una reacción de cristalización en frío del PLA.

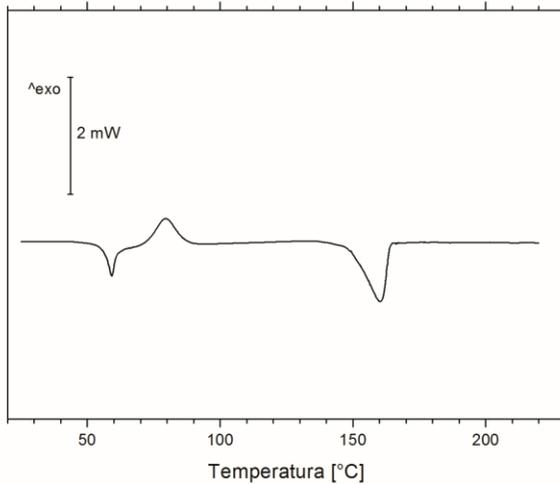


Figura 6. Curva calorimétrica del biopolímero.

La presencia de dos fases en el material queda corroborada a través de la microscopia electrónica de barrido, donde la micrografía a 500 aumentos presenta claramente la presencia de dos fases, este hecho es de alta relevancia ya que la interacción entre ambas fases determina las propiedades del material. La fase dispersa se caracteriza por ser una fase de escamas embebido en la fase matriz (Figura 7).

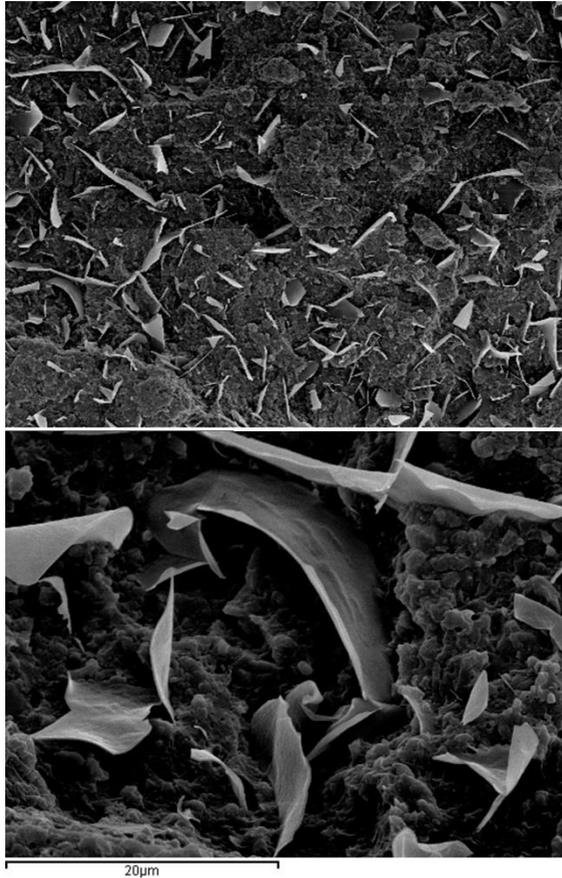


Figura 7. Micrografía SEM correspondientes a superficies de fractura de la mezcla de biopolímeros. 500X (arriba) y 3000X (abajo).

Por otro lado, la curva termogravimétrica permite conocer la relación y naturaleza de la fase matriz y la fase dispersa. La máxima velocidad de degradación se produce a 342 °C y a 462 °C correspondiendo a la fase de PLA y PCL respectivamente.

Importante conocer la fase matriz ya que es la que define las propiedades del material siendo la fase dispersa influyente pero no determinante.

Claramente se puede observar como el primer salto es mucho mayor al segundo indicando que la fase matriz del material está formado por el PLA, este dato es de elevada importancia, ya que las propiedades mecánicas son el resultado de la interacción del PLA con el PCL y del PLA con las partículas de carácter celulósico aditivadas.

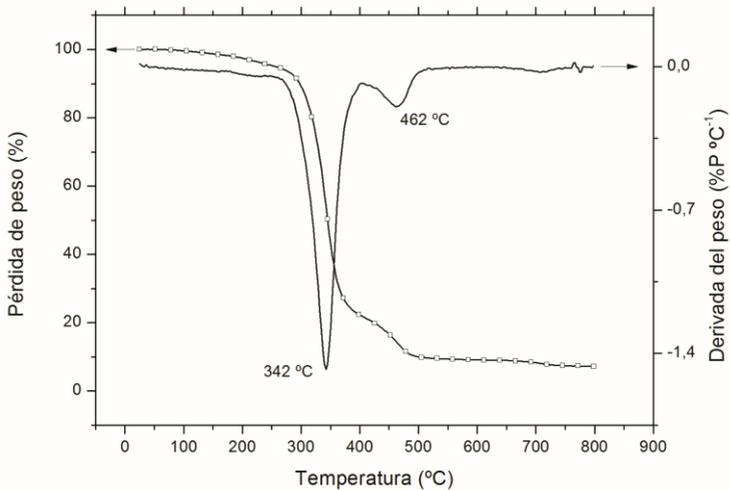


Figura 8. Curva termogravimétrica y su derivada de la mezcla de PLA y PCL.

Como se ha comentado anteriormente, la cristalinidad es uno de los factores que puede marcar el comportamiento mecánico de un polímero, cualquier variación en esta repercute en las propiedades mecánicas del material.

El cálculo de la cristalinidad del PLA puede ser obtenida mediante la siguiente ecuación:

$$\chi_{c(\% \text{ Cristalinidad})} = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times \frac{100}{w}$$

donde

$$\Delta H_m^0 = 93.7 \text{ Jm}^{-1}$$

$w = \text{Fracción en peso de PLA en la muestra}$

Pero en este caso, debe hacerse uso de una variante de esta primera ecuación debido a la presencia de la cristalización en frío del PLA.

$$\chi_{c(\% \text{ Cristalinidad})} = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\Delta H_m^0} \times \frac{100}{w}$$

donde

$\Delta H_{cc} = \text{Entalpía de cristalización en frío}$

Tabla 2. Porcentaje de cristalinidad en función del tamaño y porcentaje de carga.

Material	% carga	Primer calentamiento		
		ΔH_{cc} (J g ⁻¹)	ΔH_m	Cristalinidad (%)
Virgen	0	6.43	14.31	8.41
0,1 mm	5	6.48	14.23	8.71
	10	6.40	14.70	9.85
	20	4.70	15.43	14.32
	30	4.42	16.80	18.89
0,5 mm	5	3.50	11.50	8.99
	10	3.60	12.15	10.14
	20	5.84	14.18	11.12
1 mm	30	5.17	14.85	14.76
	5	6.23	13.11	7.73
	10	5.92	13.27	8.71
	20	4.77	13.61	11.79
	30	4.23	12.56	12.70
Material	% carga	Segundo calentamiento		
		ΔH_{cc} (J g ⁻¹)	ΔH_m	Cristalinidad (%)
Virgen	0	---	12.62	13.47
0,1 mm	5	---	11.86	13.32
	10	---	12.17	14.43
	20	---	12.62	16.84
	30	---	14.11	21.51
0,5 mm	5	---	12.22	13.73
	10	---	12.43	14.74
	20	---	13.66	18.22
1 mm	30	---	14.28	21.77
	5	---	10.54	11.84
	10	---	10.66	12.64
	20	---	12.16	16.22
	30	---	11.12	16.96

La cristalinidad de un polímero queda determinada por la posible orientación de cadenas poliméricas. La velocidad de enfriamiento es un factor determinante, es por este motivo, por el cual se ha procedido a realizar un ciclo térmico para eliminar el historial

térmico y sólo son comparables los resultados obtenidos tras el segundo calentamiento.

En todos los casos, la presencia de cargas celulósicas provoca un aumento de la cristalinidad, siendo mayor en las muestras de pequeño y medio tamaño. Este incremento de la cristalinidad tiene un efecto sobre las propiedades mecánicas analizadas en el apartado anterior.

Por otro lado, el uso de mezclas en el campo de los polímeros ha supuesto un gran avance ya que se han conseguido propiedades que ambos materiales por separado no proporcionan, pero la dificultad que presentan es que en ciertas ocasiones hay ciertas transiciones térmicas que pueden quedar ocultas por la presencia de otro polímero, este es el caso de la temperatura de transición vítrea del PLA la cual queda oculta por el proceso de fusión del PCL.

Finalmente, la temperatura de flexión térmica (HDT) indica la máxima temperatura de servicio de un material sometido a carga. En este caso los resultados indican un ligero incremento de la HDT de las muestras a medida que el porcentaje de carga es mayor. Ya en el apartado de caracterización mecánica se observó como la presencia de partículas producían cambio significativos en el comportamiento mecánico de las muestras.

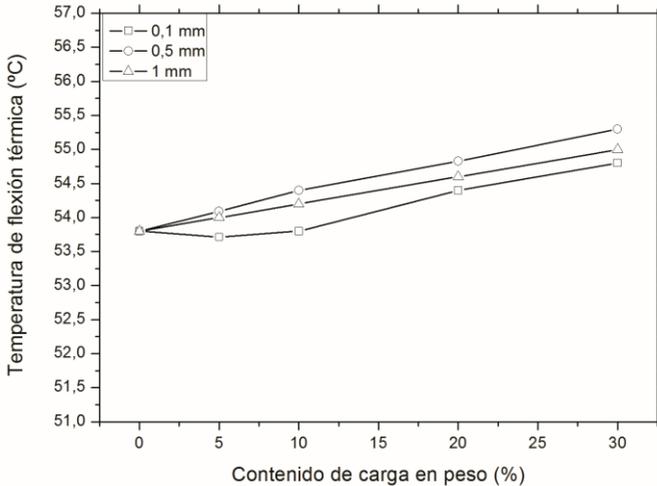


Figura 9. Variación de la temperatura de flexión térmica en función de la presencia de cargas celulósicas.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación indican diferencias significativas en los valores de la energía de impacto y el módulo de elasticidad, donde las presencias de cargas celulósicas producen un incremento de dichas propiedades. En cambio, tanto la tensión de rotura como el alargamiento a la rotura permanecen prácticamente constantes.

Las técnicas de análisis térmico permiten observar las variaciones producidas en las diversas propiedades térmicas en función de las cargas aditivadas, aunque en ciertas ocasiones estas variaciones pueden quedar ocultas por el solapamiento de transiciones térmicas de las distintas fases. El análisis de la

crystalinity indicates an increase of this as the load is added is greater.

REFERENCIAS

- [1] Hamilton, J.D., et al., *Journal of the Air & Waste Management Association*, 45, 247-251 (1995)
- [2] Kolek, Z., *Polish Journal of Environmental Studies*, 10, 73-76 (2001)
- [3] Owen, A.J. and Jones, R.A.L., *Macromolecules*, 31, 7336-7339 (1998)
- [4] Plucknett, K.P., et al., *Polymer*, 41, 2319-2323 (2000)
- [5] Aguilar, R., et al., *Construction and Building Materials*, 114, 625-637 (2016)
- [6] Vanamudan, A. and Sudhakar, P.P., *International Journal of Biological Macromolecules*, 86, 262-268 (2016)
- [7] Chamieh, J., et al., *Biomacromolecules*, 16, 3945-3951 (2015)
- [8] Bagheriasl, D., et al., *Cellulose*, 23, 1885-1897 (2016)
- [9] John, M.J., *Polymer Composites*, 36, 2042-2050 (2015)
- [10] Bouakaz, B.S., et al., *Applied Clay Science*, 116, 69-77 (2015)
- [11] Gordobil, O., et al., *Industrial Crops and Products*, 72, 46-53 (2015)
- [12] Mofokeng, J.P. and Luyt, A.S., *Polymer Testing*, 45, 93-100 (2015)
- [13] Nosek, R., et al., *Bioresources*, 11, 44-53 (2016)
- [14] Rollinson, A.N. and Williams, O., *Royal Society Open Science*, 3, (2016)
- [15] Kuzmina, I., *Zootekhnika*, 6-8 (2015)
- [16] Lindahl, K.B. and Westholm, E., *Forests*, 2, 51-65 (2011)
- [17] Besnier, P., *Nekka-rich composition, used to treat intestinal diseases e.g. traveler's diarrhea caused by enterotoxigenic Escherichia coli in humans and as food supplement for human and animals, comprises bark extracts of oak wood of Quercus acuta*, EP2687221-A1; FR2993459-A1; FR2993459-B1
- [18] Li, X., et al., *PVA (polyvinyl alcohol)-based modified silica gel wood ceramic and preparation method thereof*, CN104446636-A
- [19] Lin, J.-H., et al., *Journal of Composite Materials*, 50, 2099-2109 (2016)

- [20] Samarzija-Jovanovic, S., et al., Journal of Thermoplastic Composite Materials, 29, 656-669 (2016)
- [21] Sun, L., et al., Journal of Fire Sciences, 34, 226-239 (2016)

“Neuromarketing. Parte 1. Análisis de equipos de Eye Tracking”

D. Fenollar ^{(1)†}, D. Juárez ⁽¹⁾, V. Tur-Viñes ⁽²⁾, V. Veja ⁽³⁾

*(1) Instituto de Tecnología de Materiales
Universidad Politécnica de Valencia (Campus de Alcoy)
Plaza Ferrándiz y Carbonell, S/N, 03801 Alcoy (Alicante)*

*(2) Facultad de Economía y Empresariales
Universidad de Alicante
Carretera San Vicente del Raspeig S/N, 03690, San Vicente del Raspeig, (Alicante)*

*(3) Facultad de Administración y Dirección de Empresas
Universidad Politécnica de Valencia
Camino de Vera, S/N, 46022 Valencia*

RESUMEN

El neuromarketing es una disciplina dentro del marketing que aplica las técnicas e instrumentos de medición de las neurociencias para la realización de estudios de mercado basados en las reacciones inconscientes de los consumidores. El seguimiento ocular (Eye Tracking) es una de las técnicas del neuromarketing que se ocupa de determinar la fijación de la mirada del consumidor tanto en diseños como en productos o comerciales de tv. En este artículo se van a explicar las principales marcas proveedoras, las características diferenciadoras entre ellas, así como todas las aplicaciones donde se están utilizando dichos equipos.

† Contacto: D. Fenollar; Tel. 966528467; e-mail: dfenollar@macom.upv.es

INTRODUCCIÓN

La comunicación publicitaria ha supuesto en España una inversión de 11.742,2 millones de euros en 2015, lo que representa aproximadamente un 1,4 % del PIB y un aumento de un 4,7 % con respecto a la inversión de 2014 ^{[1], [2]}. Esto significa que la comunicación publicitaria es cada vez más utilizada por las empresas para persuadir a su público objetivo de la compra de sus productos o servicios. Actualmente, y a diferencia de en el pasado, la comunicación publicitaria se basa en comunicar emociones. Esto es debido a que existe una correlación entre las marcas que despiertan emociones, teniendo el proceso de toma de decisiones de los consumidores a favor de estas ^[3].

Los objetivos de este trabajo son, por una parte, realizar un análisis de la comunicación publicitaria desde el punto de vista del neuromarketing, es decir, aplicando equipos correspondientes a las neurociencias para el estudio del consumidor y en concreto equipos de seguimiento ocular (o eye tracking). Por otra parte, se pretende realizar una comparativa de las principales marcas comerciales de equipos de eye tracking con la intención de ofrecer una visión de las principales características a la hora de obtener un eye tracker. Finalmente, se mostrarán algunas de las aplicaciones del eye tracking tanto a nivel clínico como de la optimización de la comunicación.

El Neuromarketing

El neuromarketing es la disciplina dentro del marketing que analiza las reacciones involuntarias del consumidor utilizando los instrumentos propios de las neurociencias (electroencefalografía, resonancia magnética funcional, respuesta galvánica de la piel, ritmo cardiaco, seguimiento ocular..., entre otros), tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo.

El neuromarketing permite la realización de estudios de mercado de una forma diferente a las habituales, a través del análisis de las respuestas de los consumidores a estímulos publicitarios, marcas, música... Esta disciplina se combina con otras del marketing para unos mejores resultados en el lanzamiento o reorientación de las estrategias de marketing y comunicación de las empresas.

El Eye Tracking

Dentro del neuromarketing encontramos diferentes técnicas para la realización de estudios sobre atención y atracción de los consumidores. Una de ellas es el eye tracking o seguimiento ocular, la cual se trata de una técnica cuantitativa (ya que ofrece resultados de lo que se está midiendo en una escala numérica). El eye tracking realiza el seguimiento de la pupila del consumidor mientras se le muestra desde un cartel o spot publicitario hasta un lineal o cualquier situación real en la que interactúe con una marca, de forma que se genera un mapa de calor que indica, con un gradiente de azul a rojo, las zonas en las que menos ha parado la mirada (azul) y las que más (rojo).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El eye tracking, tecnologías y sistemas.

Diferentes tecnologías en el seguimiento ocular y características
Para hacer el seguimiento de los ojos se utilizan diferentes técnicas que se basan, o bien en el seguimiento del globo ocular y la pupila, o bien en la detección de los músculos que interaccionan en cada momento, traducándose en el consiguiente movimiento del ojo.

Uno de los métodos más utilizados en el pasado para hacer el seguimiento de los ojos es el de la electro-oculografía, la cual se

sigue utilizando actualmente, sobretodo en ensayos clínicos relacionados con el sueño [4], [5], con la finalidad de detectar trastornos del sueño. Más recientemente se está trabajando en intentar solucionar los problemas de movilidad de la gente mediante estudios con electro-oculografía [6].

Otro de los métodos mediante el que se puede medir el seguimiento de los ojos son las lentes de contacto esclerales, las cuales consisten en lentes de contacto esclerales normales con dos filamentos de un material conductor mediante los cuales se genera un campo magnético que cambia de intensidad en función de la posición del ojo.

El mayor problema de estos métodos radica en la invasión que suponen cuando son colocados en el objeto del estudio, de forma que se hace complicado actuar de forma normal y condiciona, aunque sea de forma leve, los resultados.

Por ello el último método para realizar ensayos de eye tracking es no invasivo, con lo que se tiene la ventaja de no condicionar los resultados del ensayo. Este método es el de reflexión infrarroja de la pupila, por la cual el equipo en cuestión, que está equipado con una o más cámaras infrarrojas y uno o más emisores de rayos infrarrojos, emite rayos infrarrojos que rebotan en la pupila y son leídos por las cámaras infrarrojas. Este equipo puede trabajar de dos formas diferentes: 1º iluminando la pupila leyendo los movimientos de la misma o; 2º haciendo la pupila negra y leyendo los reflejos de los haces infrarrojos en la córnea.

Para la realización de estudios de neuromarketing los equipos más utilizados de eye tracking son los últimos mencionados, como se verá en el apartado de aplicaciones.

Principales proveedores

Se puede observar una diferencia notable de características entre los 3 primeros proveedores (Tobii, SMI y Eye Tracking) con respecto a los dos siguientes (Gaze point, y Eye Tribe). En primer lugar, la frecuencia de refresco o de toma de datos en el caso de los 3 primeros proveedores es mayor, con lo que se consigue una precisión mayor de toma de datos. De igual forma con los grados de apreciación y los puntos de calibración, lo que muestra claramente que se trata de marcas más profesionales, que a la vez tendrán un precio superior. La mayor de las diferencias se puede observar en la posibilidad de hacer el seguimiento ocular en imágenes reales, lo cual es posible con las marcas de mejores características pero no con Gaze Point o Eye Tribe (Tabla 1).

Tabla 1. Principales proveedores de equipos de eye tracking.

	TOBII	SMI	Eye Tracking	Gaze Point	Eye Tribe
Frecuencia de Refresco (Hz)	50 - 120	120 - 500	30 - 2000	60	30 - 75
Apreciación (Grados)	0,4	0,4	0,4	0,5 - 1	0,5 - 1
Puntos de Calibración	1	2, 5, 9	-	5, 9	6, 9, 12
Transportable	✓	✓	✓	✓	✓
Brillo de pupila	✓	✓	✓	✓	✓
Negro de pupila	✓	✓	✓	X	X
Video*	✓	✓	✓	✓	✓
Foto*	✓	✓	✓	✓	✓
Web*	✓	✓	✓	✓	✓

3D*	✓	✓	✓	X	X
-----	---	---	---	---	---

*Video, foto y web se refiere a si el software permite analizar un video, una foto o la interacción con una web. Por otra parte, 3D se refiere a poder realizar ensayos de eye tracking en un lugar físico, no a través de una pantalla, sino en las 3 dimensiones del espacio real (normalmente se suelen llevar los eye trackers montados sobre los ojos con gafas).

Aplicaciones

Existen múltiples aplicaciones del seguimiento ocular en el campo de la medicina, para detectar enfermedades como la esquizofrenia o el autismo [7], o también para interactuar con objetos como sillas de ruedas y demás, mediante softwares específicos para personas con diversidad funcional [8], [9].

A nivel de neuromarketing se utiliza el eye tracking, y en concreto la electrooculografía, para analizar la toma de decisiones de diferentes usuarios y los elementos que influyen en dicha toma de decisiones [10].

El eye tracking se puede utilizar tanto para comparar la repercusión de las marcas en los lineales reales de supermercados y cómo se relacionan con las ventas [11] como para simular dichos supermercados en realidad virtual para estudiar el mismo proceso de compra y repercusión de dichas marcas [12].

CONCLUSIONES

El eye tracking, utilizado para estudiar el comportamiento involuntario de los consumidores, ofrece información muy clara y fácilmente visible acerca de la reacción ocular de dichos usuarios. Con técnicas de eye tracking se podrán optimizar los diseños tanto de cartelería, web, anuncios o incluso lineales reales de supermercado para ajustar los elementos a la trayectoria visual

normal para estos, haciendo que la marca (o elementos de la marca) deseados causen el mayor impacto en el consumidor final.

REFERENCIAS

- [1] Sánchez M. A., "Estudio Infoadex de la Inversión Publicitaria en España," (2016).
- [2] Melorose J., Perroy R., and Careas S., "Radiografía de la industria publicitaria en España," *Statew. Agric. L. Use Baseline 2015*, vol. 1, 2015. *Statew. Agric. L. Use Baseline 2015*, 1, (2015).
- [3] Rampl L. V., Opitz C., Welpel I. M., and Kenning P., "The role of emotions in decision-making on employer brands: insights from functional magnetic resonance imaging (fMRI)," *Mark. Lett.*, 361–374, (2014).
- [4] Virkkala J., Hasan J., Värri A., Himanen S. L., and Müller K., "Automatic sleep stage classification using two-channel electro-oculography," *J. Neurosci. Methods*, 166:1, 109–115, (2007).
- [5] Virkkala J., Hasan J., Värri A., Himanen S.-L., and Müller K., "Automatic detection of slow wave sleep using two channel electro-oculography.," *J. Neurosci. Methods*, 160:1, 171–177, (2007).
- [6] Barea R., Boquete L., Mazo M., and López E., "System for assisted mobility using eye movements based on electrooculography," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, 10: 4, 209–218, (2002).
- [7] Sasson N. J., Pinkham A. E., Weittenhiller L. P., Faso D. J., and Simpson C., "Context Effects on Facial Affect Recognition in Schizophrenia and Autism: Behavioral and Eye-Tracking Evidence," *Schizophr. Bull.*, 42:3, 675–683, (2016).
- [8] Pasqualotto T., Emanuele Matuz, Federici S., Ruf C., Bartl M., Belardinelli M. O., Birbaumer N., and Halder S., "Usability and Workload of Access Technology for People With Severe Motor Impairment: A Comparison of Brain-Computer Interfacing and Eye Tracking," 29: 10, 950–957, (2015).
- [9] Eid N., Mohamad A. Giakoumidis and El Saddik A., "A Novel Eye-Gaze-Controlled Wheelchair System for Navigating Unknown Environments:

- Case Study With a Person With ALS," *Electr. Electron. Eng. INC*, 4, 558–573, (2016).
- [10] Marandi R. Z. and Sabzpushan S. H., "Qualitative modeling of the decision-making process using electrooculography.," *Behav. Res. Methods*, 47:4, 1404–12, (2015).
- [11] Chandon P., Hutchinson J. W., Bradlow E. T., and Young S. H., "Does In-Store Marketing Work? Effects of the Number and Position of Shelf Facings on Brand Attention and Evaluation at the Point of Purchase," *J. Mark.*, 73:6, 1–17, (2009).
- [12] Bigné E., Llinares C., and Torrecilla C., "Elapsed time on first buying triggers brand choices within a category: A virtual reality-based study," *J. Bus. Res.*, 69:4, 1423–1427, (2016).

“Neuromarketing. Parte 2. Análisis de equipos de Electroencefalografía”

D. Fenollar ^{(1)*}, D. Juárez ⁽¹⁾, V. Tur-Viñes ⁽²⁾, V. Veja ⁽³⁾

*(1) Instituto de Tecnología de Materiales
Universidad Politécnica de Valencia (Campus de Alcoy)
Plaza Ferrándiz y Carbonell, S/N, 03801 Alcoy (Alicante)*

*(2) Facultad de Economía y Empresariales
Universidad de Alicante
Carretera San Vicente del Raspeig S/N, 03690, San Vicente del Raspeig, (Alicante)*

*(3) Facultad de Administración y Dirección de Empresas
Universidad Politécnica de Valencia
Camino de Vera, S/N, 46022 Valencia*

RESUMEN

La comunicación publicitaria es aquella que intenta persuadir al consumidor de la compra de cualquier producto o servicio. El neuromarketing analiza la eficiencia de la comunicación publicitaria en el consumidor con equipos y metodologías pertenecientes a las neurociencias para determinar cuáles son las reacciones naturales e involuntarias de este. La Electroencefalografía (EEG) forma parte de las técnicas del neuromarketing y es la que se ocupa de medir las ondas eléctricas emitidas por nuestro cerebro en las diferentes regiones del mismo. En este trabajo se explicarán los principales proveedores de equipos de EEG así como dónde se está utilizando dicha técnica sobre todo en comunicación. Se observará que en la mayoría de estudios las zonas del cerebro parietal posterior y temporal son las más íntimamente relacionadas con las emociones, produciéndose mayor recuerdo cuanta más actividad (ondas Beta de alta frecuencia) existe en dichas zonas mientras dura el estímulo publicitario.

* Contacto: D. Fenollar; Tel. 966528467; e-mail: dfenollar@macom.upv.es

INTRODUCCIÓN

En este artículo se pretende realizar un análisis de la comunicación publicitaria a través del neuromarketing, y en concreto de la electroencefalografía. Se explicará en qué consiste esta técnica así como las principales marcas que comercializan equipos para EEG, comparando las prestaciones y características que diferencian a una de otra. Finalmente se expondrán las principales aplicaciones de esta técnica desde un punto de vista del marketing, es decir, para la optimización de las comunicaciones y los productos y packaging.

La Comunicación

La comunicación publicitaria ha supuesto en España representa aproximadamente un 1,4 % del PIB, lo que significa que es cada vez más utilizada por las empresas para persuadir a su público objetivo de la compra de sus productos o servicios ^[1] ^[2].

Existe una tendencia actual en las estrategias de comunicación de las empresas a basar las comunicaciones e incluso las marcas en sentimientos, a diferencia del pasado. Esto se debe a la relación directa que existe entre entre las marcas que despiertan emociones en el consumidor y la intención de compra de sus productos o incluso el recuerdo de las mismas en la mente del usuario ^[3].

El Neuromarketing

La disciplina que mide las reacciones involuntarias de los consumidores frente a estímulos publicitarios se llama neuromarketing. Este nombre es debido a que utiliza, para medir y cuantificar las reacciones, instrumentos propios de las neurociencias (como pueden ser el eye tracking, la respuesta galvánica de la piel, el ritmo cardiaco, o la electroencefalografía entre otras).

Estas técnicas se utilizan para realizar y complementar estudios de mercado de una forma diferente, ya que permite la cuantificación de reacciones involuntarias, teniendo la certeza de que lo que se está comunicando es óptimo para el consumidor [4].

La Electroencefalografía (EEG)

La técnica de las neurociencias que registra los impulsos eléctricos que emiten las neuronas es la electroencefalografía. En el campo del neuromarketing se realizan ensayos de EEG para determinar cuál es la actividad cerebral del sujeto consumidor al mostrarle estímulos publicitarios y en qué región del cerebro se produce.

Existen 4 grandes zonas en las que podemos dividir la corteza cerebral (a grandes rasgos) como se observa en la Figura 1. La zona frontal, parietal, occipital y temporal. Cada una de estas zonas experimenta una subida de actividad cuando dependiendo de por qué sentido se producen los estímulos. Para el campo del neuromarketing las dos más importantes son el área occipital y temporal. El lóbulo occipital contiene las áreas visuales primarias y las de asociación visual. El temporal se ocupa de procesar estímulos auditivos y relacionarlos con los visuales, además de tener una zona que está relacionada con la memoria a largo plazo. Esto es debido a que se los estímulos que generan emociones son los que se recuerdan a largo plazo [3], y a que la dicha región está relacionada con la amígdala, la cual añade un tono emocional a los inputs sensoriales y a la memoria [5].

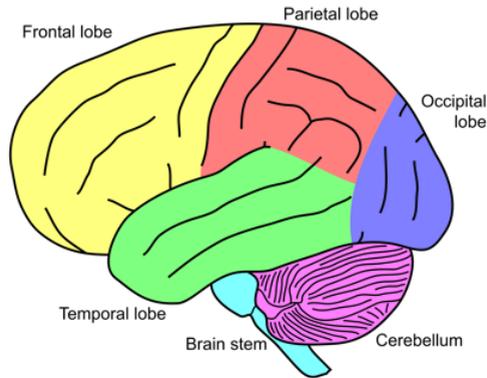


Figura 1. Zonas cerebrales (fuente: wikipedia.com)

Por otra parte existen 5 tipos de ondas (4 de las cuales son más comunes) que emite el cerebro, como se observa en la Figura 2, de más lentas (menor actividad cerebral) a más rápidas (mayor actividad cerebral): Las ondas Delta (1-4 Hz), las que emite el cerebro en sueño profundo y sin soñar. Estas ondas son emitidas por los niños recién nacidos, dado que un adulto por su actividad diaria y sus recuerdos no es capaz de llegar a este punto de actividad cerebral; Las ondas Theta (4-8 Hz), las cuales se producen cuando el cerebro está en la fase REM del sueño, o cuando se está relajado o meditando; Las ondas Alfa (8-12 Hz) cuando el individuo está despierto pero relajado; Las ondas Beta (12-20 Hz) son las que produce un cerebro con una actividad normal del día a día. Las ondas Beta de cerca de los 20 Hz se corresponden con un estado de excitación e intensa actividad cerebral; Finalmente se encuentran las ondas Gamma (>20 Hz), las cuales se producen en estados de ansiedad y pánico del cerebro. En estados donde predominan las ondas Gamma es imposible relajarse o dormir [6].



Figura 2. Ondas cerebrales (fuente: taringa.net)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Principales proveedores

La Tabla 2 muestra las principales empresas fabricantes y distribuidoras de equipos de EEG, así como las características más comunes a tener en cuenta a la hora de adquirir un equipo de electroencefalografía.

Como se observa, tener una alta frecuencia de refresco es importante a la hora de tener una mayor precisión en los datos. Las bandas de frecuencias ofrecen información sobre las frecuencias del cerebro que son capaces de captar los equipos. El número de canales corresponde al número de puntos que dispone el equipo para captar las ondas cerebrales. Finalmente, ambas marcas disponen de equipos que puede ponerse un sujeto en movimiento por ser pequeños y poco invasivos además de inalámbrico.

Tabla 2. Principales proveedores de equipos de electroencefalografía.

	Emotiv	ABM
Frecuencia de Refresco (Hz)	128, 256	256
Bandas de Frecuencias (Hz)	0,2 - 43	0,2 - 60
Nº Canales	5, 14	4, 10, 24

Transportable	✓	✓
Inalámbrico	✓	✓

Aplicaciones

En el área del neuromarketing podemos encontrar la electroencefalografía para la realización de estudios sobre cualquier diseño, ya que cualquiera de ellos suscita emociones en el consumidor, que son las que van a generar recuerdo. Dentro del capo de diseño se está trabajando en diseño de producto [7], utilizando la imagen cerebral para medir la interacción, la curva de aprendizaje o incluso la satisfacción del usuario con un producto.

En el capo de la publicidad se está trabajando en la aplicación del EEG para detectar el grado de memorización de spots publicitarios, observando que los más recordados son aquellos en los que se produce una activación de la zona parietal posterior y el área prefrontal [8]. De la misma forma se trabaja también para observar qué emociones producen ciertos spots televisivos en los consumidores, midiendo así el grado de felicidad y de aburrimiento [9] [10].

Pero no solo se utiliza la imagen cerebral para estímulos visuales. Actualmente existen estudios que determinan que determinados tipos de música suscitan emociones tan positivas en el consumidor, que éste es capaz de recordar lo que está observando en el momento que la música suena [11].

CONCLUSIONES

La técnica de la electroencefalografía permite registrar la actividad cerebral de un consumidor frente a un estímulo publicitario, ya sea visual o auditivo, con lo que se puede determinar qué emociones está sintiendo dicho sujeto. Se determina en la mayoría de estudios que las zonas del cerebro parietal posterior y temporal son las más íntimamente relacionadas con las emociones, produciéndose mayor recuerdo cuanta más actividad (ondas Beta de alta frecuencia) existe en dichas zonas mientras dura el estímulo publicitario. Por otra parte, se concluye el potencial de ésta técnica para la realización de estudios de neuromarketing, y su amplia utilidad, no solo para estímulos visuales, sino para cualquier tipo de estímulo.

REFERENCIAS

- [1] M. A. Sánchez, "Estudio Infoadex de la Inversión Publicitaria en España," 2016.
- [2] J. Melorose, R. Perroy, and S. Careas, "Radiografía de la industria publicitaria en España," *Statew. Agric. L. Use Baseline* 2015, vol. 1, 2015.
- [3] L. V. Rampl, C. Opitz, I. M. Welp, and P. Kenning, "The role of emotions in decision-making on employer brands: insights from functional magnetic resonance imaging (fMRI)," *Mark. Lett.*, pp. 361–374, 2014.
- [4] D. L. Fugate and D. L. Fugate, "Neuromarketing : a layman ' s look at neuroscience and its potential application to marketing practice," 2014.
- [5] F. Román Lapuente, M. Del Pino Sánchez, and M. J. Rabadán, *Tratado de neuropsicología clínica: Tema 2 Organización y Función cerebral*. 2010.
- [6] G. Buzsáki, *Rhythms of the Brain*. 2009.

- [7] J. Barre, A. Afonso-Jaco, S. Buisine, and A. Aoussat, "BRAIN IMAGING AND PRODUCT DESIGN: TOWARDS NEW EVALUATION METHODS," *Trav. Hum.*, vol. 78, no. 3, pp. 217–238.
- [8] R. Soranzo, "Brain activity related to the memorization of TV commercials Brain Activity Related to the Memorization of TV Commercials," 2016.
- [9] P. Lewinski, "Don't look blank, happy, or sad: Patterns of facial expressions of speakers in banks' YouTube videos predict video's popularity over time.," *J. Neurosci. Psychol. Econ.*, vol. 8, no. 4, pp. 241–249, Dec. 2015.
- [10] B. Yilmaz, S. Korkmaz, D. B. Arslan, E. G??ng??r, and M. H. Asyali, "Like/dislike analysis using EEG: Determination of most discriminative channels and frequencies," *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 113, no. 2, pp. 705–713, 2014.
- [11] Y. P. Lin, Y. H. Yang, and T. P. Jung, "Fusion of electroencephalographic dynamics and musical contents for estimating emotional responses in music listening," *Front. Neurosci.*, vol. 8, no. 8 MAY, pp. 1–14, 2014.

“Caracterización mecánica de biocomposites basados en residuos de pinocha”

A. Mengual ^{(1)§}, D. Juárez ⁽²⁾, R. Balart ⁽²⁾, S. Ferrándiz ⁽²⁾

*(1) Departamento de Organización de Empresas
Universitat Politècnica de València
Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, Alcoy, (Alicante)*

*(2) Departamento de Ingeniería Mecánica y Materiales
Universitat Politècnica de València
Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, Alcoy, (Alicante)*

RESUMEN

A nivel industrial, el desarrollo de bio-composites basados en pinocha y resinas naturales resulta de interés. En este trabajo de investigación se han llevado a cabo planchas basadas en pinocha (formato polvo y fibra) y resinas naturales (ELO y GREENPOXY), mediante el proceso de termocompresión.

Tras la caracterización mecánica de las mezclas, se ha elegido la combinación óptima y se han llevado a cabo paneles sándwich basados en madera de balsa y corcho, para su posterior caracterización.

Se han obtenido como conclusión que el empleo de resina GREENPOXY y madera de balsa da los mejores resultados, eligiendo pinocha micronizada o en fibra según el interés industrial.

§ Contacto: A. Mengual; Tel. 966528467; e-mail: anmenre1@upvnet.upv.es

INTRODUCCIÓN

Es posible originar nuevos materiales a partir de residuos orgánicos. Su habitual destino es como fuente de desechos. Sin embargo, su reutilización es posible.

Concretamente, la pinocha de los pinos es un residuo orgánico que puede ser el motivante de incendios y su reutilización favorece la eliminación de dicho material como residuo y la generación de nuevos materiales ^[1, 2], que a priori podrían incorporar aspecto y olor a madera.

Existe bibliografía previa relativa a autores que han caracterizado mecánicamente ^[3] y térmicamente ^[4] la pinocha, mientras que otros han desarrollado nuevos materiales basados en la misma ^[5-11]. En este trabajo se ha llevado a cabo una línea completa de bio-composites basados en pinocha.

Se ha estructurado en varias fases la investigación. En la primera fase se ha procedido a analizar la influencia del contenido en pinocha en las propiedades de composites con bio-PE.

Tras el mezclado, se han procesado mediante inyección, generando probetas normalizadas para ensayos de tracción y charpi, y posteriormente, se ha llevado a cabo ensayos de caracterización mecánica y térmica.

La segunda fase ha consistido en la optimización de las mezclas. Una vez seleccionadas las muestras con mejor comportamiento, se ha procedido a la mejora mediante el aditivado con diferentes compuestos con base ácido maleico. Esta optimización de las mezclas seleccionadas ha derivado en la mejora de la compatibilidad y reducción de la hidrofilia mediante aditivos.

Tras el procesado mediante inyección de probetas normalizadas para ensayos de tracción y charpy, se ha vuelto a llevar a cabo ensayos de caracterización térmica y mecánica, para analizar las posibles mejoras.

La última fase ha consistido en el desarrollo de paneles sándwich basados en madera de balsa y corcho con pinocha y aceites biodegradables. Esto ha sido procesado mediante termoconformado, para seleccionar aquellos compuestos de mayor interés industrial, en sectores como la construcción, por sus bondades tanto acústicas como térmicas, mejorando la ligereza de los actuales materiales empleados.

MÉTODO EXPERIMENTAL

Equipos de laboratorio empleados

La preparación de este composite se ha llevado a cabo mediante termocompresión con prensa de platos calientes (Figura 1.a). Para realizar la mezcla, se vierte la resina de origen bio y las partículas de pinocha en una cubeta mezcladora (Figura 1.b). El molde empleado está mostrado en la Figura 2.



(a)



(b)

Figura 1. (a) Prensa ROBIMA de 10Tn. Sistema de control de temperatura de DUPRA y (b) Mezcladora, de tipo planetario, modelo 5KPMS.



Figura 2. Molde para termoconformado.

Probetas normalizadas

Las resinas de origen bio empleadas son ELO (aceite de linaza epoxidado) y GREENPOXY (resina epoxi con bio).

La pinocha empleada para la elaboración de las planchas por termocompresión ha sido empleada en 2 formatos: micronizada (polvo) y triturada (fibra), previo secado a 60 grados durante 24 horas.

Las muestras empleadas, en base a su composición, se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición de las muestras.

% Pinocha	% Resina ELO	% Resina GREENPOXY
Micronizada - 15 %	85 %	85 %
Micronizada - 30 %	70 %	70 %
Triturada - 15%	85 %	85 %
Triturada - 30%	70 %	70 %

La Figura 3.a muestra la probeta normalizada elaborada por termo compresión empleando pinocha micronizada. En la figura 3.b se muestra el mismo resultado, pero con pinocha en formato fibra.



Figura 3. (a) Probeta normalizada elaborada por termo compresión, empleando pinocha micronizada. (b) Probeta normalizada elaborada por termo compresión, empleando pinocha en fibra triturada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para calcular la energía de deformación (por unidad de volumen) se ha llevado a cabo un ensayo de resiliencia. Los resultados obtenidos se muestran a continuación en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de los ensayos de resiliencia.

ENERGIA DE IMPACTO O RESILIENCIA (kJ/m ²)		Número de probeta						
	Proporción	1	2	3	4	5	Media	
Greenpoxy	Fibra	70-30 %	0,333	0,667	1,000	0,333	1,000	0,667
		85-15%	0,333	0,667	0,333	0,000	0,000	0,267
	Polvo	70-30 %	1,000	0,667	0,667	0,667	1,000	0,800
		85-15%	1,000	1,000	1,000	1,667	1,667	1,267
ELO	Fibra	70-30 %	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		85-15%	0,000	0,333	0,333	0,000	0,000	0,000
	Polvo	70-30 %	0,000	0,000	0,333	0,333	0,000	0,133
		85-15%	0,333	0,667	0,333	0,333	0,333	0,400

Los resultados más resaltables son aquellos donde se aplica el uso de la resina GREENPOXY, siendo el formato polvo el más interesante, concretamente la mezcla 70-30 %.

A continuación, se muestra en la Figura 4 cómo se han llevado a cabo los paneles sándwich, uniendo las diferentes capas con la misma resina empleada previamente en el desarrollo de las mezclas resina-pinocha.



Figura 4. Paneles sándwich basados en las mezclas 70-30 de resinas ELO y GREENPOXY y pinocha en formato polvo y fibra.

Los resultados a flexión se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados del ensayo a flexión de los paneles sandwich.

	d	c	b	L	t	P _c	Core Shear	Facing bending Stress	P _z	P _z	Valores Medios	
	espesor sandwich	espesor nucleo	anchura sandwich	distancia entre apoyos	espesor caras	F Max (kN)					F Max (N)	F Max (N)
Polvo-Balsa p.1	14,25	8,57	46,27	100	2,84	0,99	0,94	17	991,4	1125,70		
Polvo-Balsa p.2	14,37	8,5	46,10	100	2,94	1,19	1,13	19	1188,7			
Polvo-Balsa p.3	14,23	8,26	45,45	100	2,99	1,20	1,17	20	1197			
Polvo-Corcho p.1	14,06	7,94	45,22	100	3,06	0,98	0,98	16	977,2	830,90		
Polvo-Corcho p.2	14,30	9,28	46,38	100	2,51	0,76	0,70	14	763,9			
Polvo-Corcho p.3	14,24	7,65	45,65	100	3,30	0,75	0,75	11	751,6			
Fibra-Balsa p.1	14,28	7,72	46,01	100	3,28	0,65	0,64	10	645,7	796,50		
Fibra-Balsa p.2	14,34	8,48	46,17	100	2,93	0,78	0,74	13	780,7			
Fibra-Balsa p.3	14,00	7,67	46,48	100	3,17	0,96	0,96	15	963,1			
Fibra-Corcho p.1	17,18	7,98	45,46	100	4,60	0,48	0,42	5	480,1	578,37		
Fibra-Corcho p.2	17,32	9,34	48,12	100	3,99	0,65	0,50	6	647,6			
Fibra-Corcho p.3	17,17	8,92	46,82	100	4,13	0,61	0,50	6	607,4			

CONCLUSIONES

Los compuestos por termoconformado más interesantes, conforme a los resultados obtenidos, que son los incorporan resina GREENPOXY. Respecto a los paneles sándwich, los que más interés muestran, en relación a propiedades y comportamiento mecánico, son los que incorporan el relleno de balsa, tanto en el parámetro densidad como en el parámetro flexión, respectivamente. Consecuentemente, el empleo de resina GREENPOXY y madera de balsa da los mejores resultados, eligiendo pinocha micronizada o en fibra según el interés industrial.

REFERENCIAS

- [1]. Chawla, J.S., INDUSTRIAL-PRODUCTS FROM PINE NEEDLES. Holzforschung Und Holzverwertung, 1981. 33(6): p. 114-118.
- [2]. Ghosh, M.K. and U.K. Ghosh, UTILIZATION OF PINE NEEDLES AS BED MATERIAL IN SOLID STATE FERMENTATION FOR PRODUCTION OF LACTIC ACID BY LACTOBACILLUS STRAINS. Bioresources, 2011. 6(2): p. 1556-1575.
- [3]. Dong, C., D. Parsons, and I.J. Davies, Tensile strength of pine needles and their feasibility as reinforcement in composite materials. Journal of Materials Science, 2014. 49(23): p. 8057-8062.

- [4]. Fateh, T., et al., Characterization of the burning behavior and gaseous emissions of pine needles in a cone calorimeter - FTIR apparatus. *Fire Safety Journal*, 2016. 82: p. 91-100.
- [5]. Damaj, A., et al., Activated carbon prepared from crushed pine needles used for the removal of Ni and Cd. *Desalination and Water Treatment*, 2015. 53(12): p. 3371-3380.
- [6]. Gupta, M., et al., Studies on Biocomposites Based on Pine Needles and Isocyanate Adhesives. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 2010. 4(4): p. 353-362.
- [7]. Malkapuram, R., V. Kumar, and Y.S. Negi, Novel Treated Pine Needle Fiber Reinforced Polypropylene Composites and Their Characterization. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2010. 29(15): p. 2343-2355.
- [8]. Singha, A.S. and V.K. Thakur, Synthesis, Characterization and Study of Pine Needles Reinforced Polymer Matrix Based Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2010. 29(5): p. 700-709.
- [9]. Singha, A.S. and V.K. Thakur, STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF UREA-FORMALDEHYDE THERMOSETS REINFORCED BY PINE NEEDLE POWDER. *Bioresources*, 2009. 4(1): p. 292-308.
- [10]. Thakur, V.K. and A.S. Singha, Natural fibres-based polymers: Part I- Mechanical analysis of Pine needles reinforced biocomposites. *Bulletin of Materials Science*, 2010. 33(3): p. 257-264.
- [11]. Thakur, V.K., A.S. Singha, and M.K. Thakur, Fabrication and Physico-Chemical Properties of High-Performance Pine Needles/Green Polymer Composites. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 2013. 62(4): p. 226-230.

“Caracterización de Ground Tire Rubber y Crumb Tire Rubber mediante modelos matemáticos”

A.V. Nadal-Gisbert ^{(1)**}, **M. Boix** ⁽²⁾, **F. Parres** ⁽¹⁾, **M.A. Peydró** ⁽¹⁾,
A. Macías-García ⁽³⁾

*(1) Instituto de Tecnología de Materiales,
Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Universitat Politècnica de València
Plaza Ferrándiz y Carbonell, 1 03801 Alcoy (Alicante)*

*(2) Departamento de Matemática Aplicada,
Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Universidad Politécnica de Valencia
Paseo del Viaducto, 1 03801 Alcoy (Alicante)*

*(3) Departamento de Electrónica e Ingeniería Electromecánica,
Universidad de Extremadura
Avda. Elvas 06071, Badajoz*

RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio del ajuste de la distribución granulométrica del polvo GTR (Ground Tire Rubber) del tipo: 1-3 mm y CTR (Crumb Tire Rubber) del tipo 4-7 mm a los modelos de Rosin-Rammler, Gates-Gaudin-Schuhmann (que se emplean para el control de molienda) y a un modelo polinómico. El material a emplear es GTR y CTR de diferente granulometría; ambos materiales provienen del triturado de NFUs (Neumáticos Fuera de Uso) o ELT (End of Life Tires) como se conoce en la terminología anglosajona.

** Contacto: A.V. Nadal -Gisbert; Tel. 966528478; e-mail: anadal@dimmm.upv.es

INTRODUCCIÓN

El reciclado de neumáticos es hoy una necesidad creciente por la problemática medioambiental que su depósito genera. En EE.UU: se generan 250 millones de NFUs todos los años. En España es difícil de evaluar debido a que existen diferentes empresas encargadas de la gestión de los neumáticos fuera de uso, pero no es difícil aventurar que 250 Tm de NFUs son generados anualmente. Uno de los pasos más efectivos para su reciclado es el triturarlos, en principio para disminuir el volumen ocupado y en segundo lugar poder emplear este residuo en diferentes aplicaciones.

El control del triturado en el caso de CTR y de la molienda en el GTR es pues fundamental, dado que los suministros de material en grano se encuentran en las empresas estandarizado como 0.2-0.7, 1-3, 4-7, etc. Los usuarios ya se han acostumbrado a la utilización de este tipo de productos y un cambio en el proceso de transformación, puede suponer una modificación importante de las propiedades de los productos fabricados con estas granulometrías.

Los neumáticos, una vez molidos (GTR) o triturados (CTR), se pueden utilizar en aplicaciones de ingeniería civil, por ejemplo; como un aditivo en el pavimento de carreteras, superficies de zona de juegos como producto aglomerado con adhesivo o bien sinterizado mediante un proceso de termocompresión; se utiliza también en los suelos de uso agrícola para aminorar los procesos de compactación, entre otros.

El proceso de triturado y/o molienda puede ser criogénico o no criogénico, siendo el proceso criogénico el que da un triturado de mayor calidad y exento de contaminantes (ASTM D-5603-96) ^[1].

MÉTODOS EXPERIMENTALES

Las Tabla 1 y la Tabla 2 muestran los valores obtenidos en gramos retenidos y acumulados en cada tamiz para el GTR de 1-3 mm y el CTR de 4-7 mm respectivamente.

Tabla 1. Masa retenida y acumulada en cada tamiz (GTR (1-3 mm)).

luz de malla (mm)	Peso tamiz (g)	Peso total (g)	Retenido (g)	Acumulado (g)	Acumulado (/1)
0	350	350	0	0	0
0,063	305,6	306,2	0,6	0,6	0,00150451
0,125	312,4	312,4	0	0,6	0,00150451
0,25	316,2	316,2	0	0,6	0,00150451
0,5	342,4	356,8	14,4	15	0,03761284
1	370,8	605,4	234,6	249,6	0,62587763
2	397,6	546,8	149,2	398,8	1
4	434,6	0	0	398,8	1
8	454,2	0	0	398,8	1

Tabla 2. Masa retenida y acumulada en en cada tamiz (CTR (4-7 mm)).

luz de malla (mm)	Peso tamiz (g)	Peso total (g)	Retenido (g)	Acumulado (g)	Acumulado (/1)
0	350	350,2	0,2	0,2	0,00066489
0,063	305,6	305,8	0,2	0,4	0,00132979
0,125	312,4	312,2	0	0,4	0,00132979
0,25	316,2	316,2	0	0,4	0,00132979
0,5	342,4	342,2	0	0,4	0,00132979
1	370,8	371,2	0,4	0,8	0,00265957
2	397,6	527,6	130	130,8	0,43484043
4	434,6	604,4	169,8	300,6	0,99933511
8	454,2	454,4	0,2	300,8	1

En primer lugar, se realizó un estudio para comprobar si la función de distribución granulométrica se ajustaba a alguno de los modelos más utilizados en la bibliografía [2-9]. Se propusieron dos modelos: el de Rosin-Rammler y el de Gates-Gaudin-Schuhmann. La distribución Rosin-Rammler se usa habitualmente para describir la distribución del tamaño de partículas generadas por molienda. Los

modelos de la función de distribución **F(d)** para ambos modelos son los siguientes:

- Rosin-Rammler

$$F(d) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d}{l} \right)^m \right] \quad (1)$$

donde **F(d)** es la Función de distribución, **d** es el diámetro de la partícula, **m** es el parámetro de forma de la distribución y **l** es el parámetro de tamaño.

Si aplicamos logaritmos neperianos dos veces a la función de distribución (1) y representamos esta función tomando como eje de abcisas el **ln(d)**, el resultado será una recta donde podremos determinar los valores tanto de **m** como de **l**.

- Gates- Gaudin-Schuhmann

$$F(d) = \left[\frac{d}{d_{max}} \right]^m \quad (2)$$

donde **F(d)** es la Función de distribución, **d** es el diámetro de la partícula, **d_{max}** es el diámetro máximo de la partícula en la distribución granulométrica y **m** es un parámetro característico de la distribución granulométrica a estudio.

Al aplicar logaritmos a la expresión (2) se obtiene la expresión:

$$\log F(d) = m \log d - m \log d_{max} \quad (3)$$

y al representar esta función tomando como eje de abcisas el **log d**, el resultado será una recta donde podremos determinar los valores tanto de **m** como de **d_{max}**.

Una vez estudiados estos dos modelos, se pasó a estudiar la aproximación de la distribución granulométrica a un polinomio de grado n . Se muestran a continuación los resultados obtenidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mostramos en primer lugar los resultados obtenidos para el GTR (1-3 mm) al aproximar por el modelo de Rosin-Rammler y Gates-Gaudin-Schuhmann así como el coeficiente de determinación R^2 obtenido (que para el modelo de regresión simple coincide con el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson). Los resultados obtenidos para el CTR (4-7 mm) son similares. De la expresión (1), aplicando logaritmos neperianos dos veces, se tiene:

$$-\ln(1 - F(d)) = \left(\frac{d}{l}\right)^m$$

$$\ln(-\ln(1 - F(d))) = m \ln(d) - m \ln(l) \quad (4) \quad (4)$$

$$[y = mx + n]$$

Tabla 3. Masa retenida y acumulada en cada tamiz (GTR (1-3 mm)).

d	F(d)	x=ln(d)	y=ln(-ln(1-F(d)))
0	0		
0,063	0,00150451	-2,76462055	-6,49853293
0,125	0,00150451	-2,07944154	-6,49853293
0,25	0,00150451	-1,38629436	-6,49853293
0,5	0,03761284	-0,69314718	-3,26130185
1	0,62587763	0	-0,01697084
2	1	0,69314718	
4	1	1,38629436	
8	1	2,07944154	

$$\left. \begin{aligned} m &= 2,34475053 \\ n &= -m \ln(l); \\ n &= -1,30799654 \rightarrow l = 1,7468958 \end{aligned} \right\}$$

$$y = 2,34x - 1,31 \Rightarrow F(d) = 1 - e^{-\left(\frac{d}{1,75}\right)^{2,34}} \quad (5) \quad (5)$$

$$R^2 = 0,78255825$$

Realizando un estudio análogo, encontramos, para el GTR (1-3 mm) en el modelo de Gates-Gaudin-Schuhmann.

$$\left. \begin{aligned} m &= 1,7245458 \\ n &= -m \log(d_{max}); \\ n &= -1,00317424 \rightarrow d_{max} = 3,81683556 \end{aligned} \right\}$$

$$y = 1,72x - 1 \Rightarrow F(d) = \left(\frac{d}{3,82}\right)^{1,72} \quad (6)$$

$$R^2 = 0,8538585$$

A continuación, se estudió el ajuste de una función polinómica $p(x)$ a los m pares de puntos.

$$p(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (7)$$

Se probaron varios grados ($n > 1$) en el polinomio ($n < m$) encontrándose un mejor ajuste para $n > 2$ que en los modelos descritos con anterioridad. A modo de ejemplo, la representación de la línea de tendencia con $n=3$ para el GTR (1-3 mm) aparece en la Figura 1 (A) y para el CTR (4-7 mm) en la Figura 1 (B).

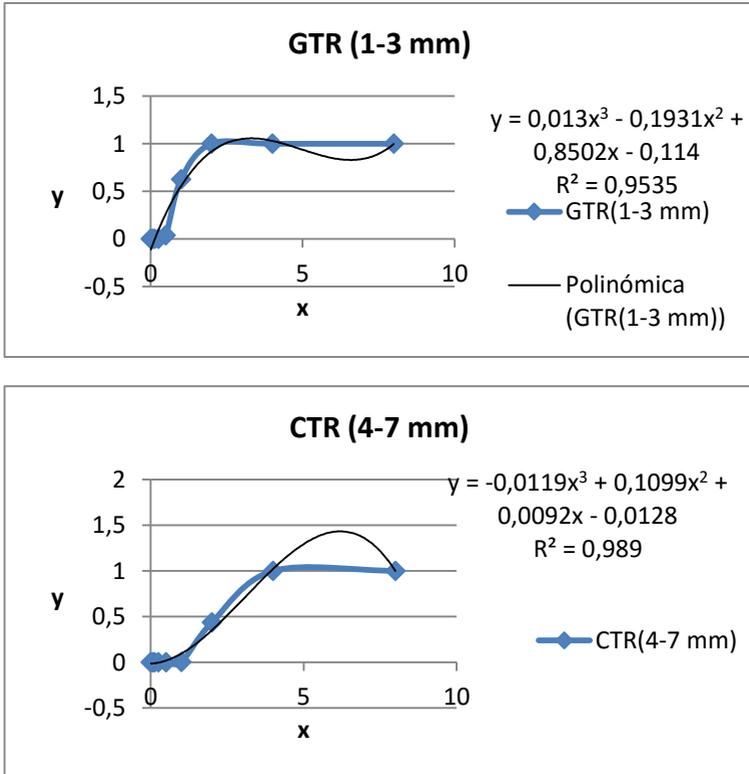


Figura 1. Ajuste polinómico de grado 3. Línea de tendencia (A) para GTR, (B) para CTR.

CONCLUSIONES

Se ha realizado un estudio de la composición granulométrica del GTR y del CTR mediante el tamizado y posteriormente se ha estudiado su ajuste a un modelo determinado. Han sido aplicados dos modelos ampliamente utilizados en la bibliografía: el de Rosin-Rammler y el de Gates-Gaudin-Schuhmann y un modelo polinómico. La calidad del ajuste (R^2) a las dos primeras distribuciones no supera

el 86% tanto en la granulometría 1-3 mm como en la de 4-7 mm por lo que no se considera un ajuste adecuado para describir la distribución de los tamaños de partículas de molienda. Con el estudio de una función polinómica, se encontró un mejor ajuste (superior al 95%) para grados mayores a 2.

REFERENCIAS

- [1] ASTM D-5603-96, Standard Classification for Rubber Compounding Materials - Recycled Vulcanizate Particulate Rubber.
- [2] Nadal, A., "Investigación del reciclado de neumáticos a requisitos elastoméricos por técnicas de termocompresión". Tesis doctoral. (Editorial Universitat Politècnica de València) (2004).
- [3] Perry, R.H. "Manual del Ingeniero Químico". Madrid: (Ed. McGraw-Hill), pp 20-6,20-8.
- [4] Macías-García, A., Cuerda-Correa, E., Díaz-Díez, M.A., *Materials Characterization*, 52, 159-164 (2004).
- [5] Ferrer-Giménez, C., López Martínez, J., Nadal-Gisbert, A., Cuerda-Correa, E.M., Macías-García, A. *Plastics, Rubber and Composites*, 38 (5), 195-200 (2009).
- [6] Nadal, A., Boix, M., Parres, F., Agud, L., Crespo, E., Macías-García, A. *A. Mat.-wiss. u. Werkstofftech* 47 (4), 326-334 (2016).
- [7] Nadal, A., Boix, M., Crespo, J. E., Macías-García, A. "Evaluación de la granulometría del GTR mediante los modelos de Rosin-Ramler y de Gates-Gaudin-Schuhman". Libro actas III Congreso I+D+i Campus de Alcoi. Creando sinergias. (Ed. UPV), (2015).
- [8] Nadal-Gisbert, A. V., Crespo-Amorós, J. E., Parres-García, F., López-Martínez, J. "Investigation of the influence of the GTR in the elaboration of composite materials with thermoplastic matrix". IICIEM (Portugal-Badajoz) (2009).
- [9] Crespo, J. E., Nadal, A. V., Parres, F., Maderuelo, R., Macías, A. "Investigation of the acoustic properties of EPDMCR recycled products obtained by means of thermal-compression". ACE-X-(2)

“Variaciones de resistencia en laminados biodegradables”

**J. Fontoba Ferrándiz ^{(1)††}, J.E. Crespo ⁽¹⁾, F. Parres García ⁽¹⁾,
A.V. Nadal-Gisbert ⁽¹⁾, S. Sánchez-Caballero ⁽²⁾**

(1) Grupo de Investigación en Caracterización y Aplicaciones de Ecomateriales (GICAE), Universitat Politècnica de València Plaza Ferrándiz y Carbonell, 1 03801 Alcoy (Alicante)

(2) Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales, Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Universitat Politècnica de València Plaza Ferrándiz y Carbonell, 1 03801 Alcoy (Alicante)

RESUMEN

La búsqueda de alternativas a los materiales tradicionales empleados en la absorción acústica, lleva a la realización de diversas investigaciones para la obtención de placas de biocomposites por infusión de resinas biodegradables y fibras de refuerzo /o tejidos de naturaleza lignocelulósicos de origen natura con el objetivo que estos materiales sean más amigables y respetuosos con el medio ambiente. Una vez concluido el proceso de infusión, se realizará el estudio de la caracterización mecánica concretamente la resistencia máxima a la tracción de los distintos biocomposites con el fin de analizar su comportamiento. Y a posteriori realizar un estudio comparativo con los composites tradicionales (fibra de vidrio y resina de poliéster).

†† Contacto: J. Fontoba; Tel. 966528570; e-mail: Jorge.fontoba.ferrandiz@gmail.com

INTRODUCCIÓN

El mercado de productos naturales ha establecido en las últimas décadas la aplicación de procedimientos amigables y respetuosos con el medio ambiente, lo que ha originado el incremento de las normas de calidad y la optimización de los estudios en laboratorios. Se han dedicado años de investigación en la obtención de biocomposites reforzados con fibras lignocelulósicas naturales, estos estudios conllevan al conocimiento de las propiedades de los materiales y de las técnicas industriales para satisfacer las necesidades de las aplicaciones a las que se van a destinar ^[1].

En los últimos años se ha producido un crecimiento rápido en el uso de los materiales reforzados con fibras sintéticas en la mayoría de los sectores industriales. Este crecimiento se ha debido a que sus propiedades y costes de producción les han permitido reemplazar a los materiales tradicionales como los metales en un gran número de aplicaciones. Las fibras naturales como refuerzo en composites de matriz polimérica han recibido una gran atención en las últimas décadas debido a propiedades como su baja dureza; la cual minimiza el nivel de desgaste en los equipos de procesado, por su costo competitivo, baja densidad, por tener buenas propiedades mecánicas específicas, a actuar como aislantes térmicos y acústicos, a su biodegradabilidad y renovabilidad. Debido a sus elevadas propiedades mecánicas y bajo peso, en aplicaciones como el transporte, suponen un ahorro de energía y de mayor rendimiento. Pero debido a una prohibición en los países de la Unión Europea en el vertido de materiales compuestos basados en polímeros y refuerzos de fibra de vidrio. Las industrias fabricantes de materiales compuestos, han tenido que buscar nuevas alternativas de materiales con prestaciones similares a los existentes, y en este sentido las fibras naturales se han convertido en un sector en desarrollo.

Sin embargo, las disponibilidades de muchas de las fibras naturales se encuentran limitadas, debido a que sus precios sufren fuertes oscilaciones, dependiendo este de los métodos específicos de tratamiento y preparación. Estos aspectos limitan en gran medida la sustitución de las fibras de vidrio por las fibras naturales. También hay que considerar que el promedio de las propiedades físicas de los composites con fibras naturales, es muy inferior al de los materiales compuestos convencionales con refuerzos de fibras de vidrio, lo que obliga a evaluar una pérdida de propiedades mecánicas frente a los problemas de reciclado y deposición de residuos plásticos.

MATERIALES EMPLEADOS

Los materiales utilizados son principalmente las fibras naturales y él de origen reciclado, como es el manto de residuo de fibra textil. El componente que realiza la función de matriz es la resina biodegradable, de marca comercial "Entropy Resins" [2], este material termoestable está formado por dos partes, en proporción 100:47, que al mezclarse generan una reacción exotérmica que produce el endurecimiento de la resina.

En la Tabla1, se recogen los datos de los diferentes tipos de materiales empleados en éste trabajo.

En la Tabla 2 se realiza una recopilación de las propiedades mecánicas de las fibras y/o tejidos ensayados.

Tabla3. Fibras Naturales utilizadas.

Fibras	Gramaje	Capas
Yute	570 g/m ²	6
Lino biaxial	670 g/m ²	6
Residuo textil borra	415 g/m ²	5
Coco	2516 g/m ²	1
Cáñamo	2245 g/m ²	1

Tabla 2. Propiedades mecánicas de las fibras.

Fibras	Densidad (g/m³)	Resistencia tracción (MPa)	Módulo elasticidad (MPa)
Yute	1,3	393 – 773	26.500
Lino	1,5	345 – 1035	27.600
Coco	1,2	175 – 220	4.000 – 6.000
Cáñamo	1,4	690	1.600

En la Tabla 3 se recogen las propiedades de la resina biodegradable utilizada en el estudio.

Tabla 3. Propiedades de la resina Biodegradable.

Características	
Denominación comercial	SUPERSAP CLR
Viscosidad @ 25°C (cPs)	2000-4000
Densidad (kg/lt)	1.0
Tiempo de gelificación @ 25°C (min)	20

Una vez fabricadas las placas de biocomposite, se realizar mediante la máquina universal de tracción Ibertest el ensayo de tracción. Las dimensiones de las probetas que se utilizan para estos ensayos tendrán un dimensionado de 20 mm x 100 mm. Con un espesor medio próximo a los 5 mm. El número de probetas a ensayar será de diez. La Normativa aplicada al ensayo es la UNE EN ISO 527:2010.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez fabricadas las placas de biocomposites, hemos obtenido la relación en porcentaje de fibra y matriz teniendo en cuenta el peso de la placa y sus dimensiones. En la Tabla 4, se pueden observar los valores obtenidos.

Respecto al ensayo de resistencia máxima a la tracción los resultados obtenidos se ponen de manifiesto en la Tabla 5.

Tabla 4. Características de las placas de biocomposites.

Resultado características de las placas de biocomposites					
Materiales	Peso final (kg)	Espesores Finales (mm)	(%) Peso fibra	(%) Peso matriz	Relación peso Resina/Fibra
Yute	2,39	5,1	44	56	1,5
Lino biaxial	2,39	4,62	51	49	1,5
Residuo textil borra	2,3	5,1	27	73	2,5
Coco	3,58	8,14	22	78	3,5

Cáñamo	2.03	4,24	32	68	3,5
---------------	------	------	----	----	-----

Tabla 5. Recopilación de resultados de resistencia máxima a la tracción.

Biocomposite	Resistencia máxima (MPa)	Error
Yute	60,71	± 4%
Lino biaxial	77,56	± 3%
Coco	12,80	± 1%
Residuo textil borra	21,68	± 4%
Cáñamo	25,46	± 5%

Como se puede comprobar de los resultados de la Tabla 6, el comportamiento del biocomposite de Lino biaxial es que presenta un valor mayor a la resistencia máxima a la tracción.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de los biocomposites fabricados con fibras no tejidas, presentan unas características mecánicas más bajas independiente del tipo de fibra utilizada que los biocomposites fabricados con tejido, debido al entrelazado y/o combinación de la fibra con varias orientaciones en el mismo tejido.

Un dato a destacar en las características mecánicas es la resistencia a la tracción en los biocomposites donde el factor de orientación de la fibra formando tejido en comparación con las fibras no tejidas es más notable, alcanzándose valores de hasta 4 veces más. De los composites tejidos, el que mejor propiedades mecánicas alcanza es el de lino biaxial.

En el caso de utilizar fibras como material de refuerzo en composites, mejora notablemente las propiedades mecánicas, además existen numerosos estudios de los ensayos realizados a efectos dinámicos y estáticos de estos materiales [2].

Los procesos de fractura en ciclos de carga presentan mayor duración en el tiempo, dependiendo siempre con las características de la matriz [3].

El comportamiento de los composites no tejidos, no presenta fibras continuas siendo semejantas al de bioresina; es decir son muy frágiles y con poca deformación y tensiones de rotura elevados.

Las fibras naturales derivados de plantas demuestran un gran potencial para su uso en plásticos , automotriz e industrias de envasado debido a sus excelentes características tales como baja densidad, alta rigidez específica, buenas propiedades mecánicas, biodegradabilidad, respeto con el medio ambiente, toxicológicamente inofensivo, buen aislamiento térmico y acústico.

REFERENCIAS

- [1] Van Vuure, A.W., et al., *Compressive properties of natural fibre composites*. Materials Letters, 2015. 149: p. 138-140.
- [2] Komuraiah, A.; N.S. Kumar, and B.D. Prasad, *Chemical Composition of Natural Fibers and its Influence on their Mechanical Properties*. Mechanics of Composite Materials, 2014. 50(3): p. 359-376
- [3] Shah, D.U.; P.J. Schubel, and M.J. Clifford, *Can flax replace E-glass in structural composites A small wind turbine blade case study*. Composites Part B-Engineering, 2013. 52: p. 172-181.

“Técnicas de caracterización físico-acústica de materiales fibrosos y el diseño de equipos para su medida”

M. Zamorano Cantó ^{(1)}, J. Segura Alcaraz ⁽²⁾, A.V. Nadal-Gisbert ⁽³⁾,
J.E. Crespo ⁽⁴⁾. P. Miró i Martínez ⁽⁵⁾**

(1) Universitat Politècnica de València, Departamento Ingeniería Textil y Papelera, Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Plaza Ferrándiz y Carbonell, 1 03801 Alcoy (Alicante)

(2) Universitat Politècnica de València, Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Plaza Ferrándiz y Carbonell, 1 03801 Alcoy (Alicante)

(3-4) Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales, Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Universitat Politècnica de València Plaza Ferrándiz y Carbonell, 1 03801 Alcoy (Alicante)

(5) Universitat Politècnica de València, Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Departamento de Estadística e Investigación Operativa Aplicadas y Calidad, Plaza Ferrándiz y Carbonell, 1 03801 Alcoy (Alicante)

RESUMEN

El objetivo del trabajo, es la enumeración de diferentes técnicas de caracterización de las propiedades físicas y de caracterización acústica en el estudio de materiales compuestos por agregados fibrosos.

** Contacto: M. Zamorano Cantó; Tel. 966528570; e-mail: mzamoran@upvnet.upv.es

INTRODUCCIÓN

Los no tejidos son estructuras de material textil, como fibras, filamentos continuos o hilos cortados de cualquier origen o naturaleza, que, mediante cualquier medio, forman redes y se han unido, exceptuando el entrelazado de los hilos como en las telas tejidas, las telas tricotadas, encajes, telas trenzadas o tejidos afelpados ^[1]. Estudiamos la determinación del coeficiente de absorción acústica, como propiedad acústica y la resistencia, el alargamiento a la rotura ^[2], la porosidad, la tortuosidad y la permeabilidad al aire como propiedades físicas.

METODOS EXPERIMENTALES

El procedimiento para la compactación del material, se realiza mediante la compresión en un molde de aluminio Figura 1, el molde ha sido acoplado a una prensa hidráulica de 50 T, equipada con platos calefactores, y adaptándola mediante el montaje de resistencias eléctricas programables por medio de un sistema termométrico, dotado de temporizador de dimensiones de trabajo de 50 x 60 cm fabricada por la empresa: Construcciones Dupra S.L de Castalla (Alicante).

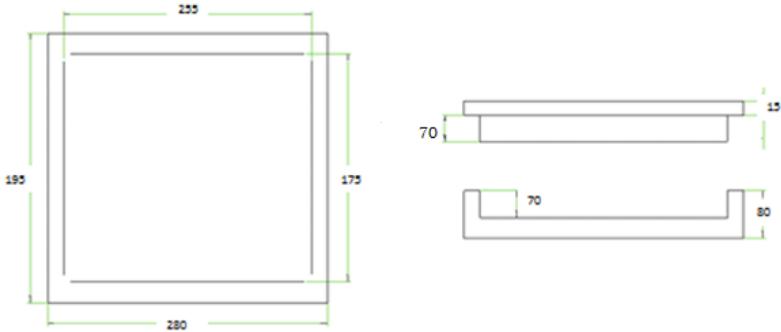


Figura 1. Plano del molde de aluminio con frontal abatible.

Determinación del coeficiente de absorción acústica

El procedimiento para medir la absorción acústica mediante el tubo de impedancia acústica, se basa en la norma ISO 10534-2 [3] Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia. El tubo de impedancia acústica es un tubo rígido de sección circular, con una fuente de sonido en un extremo, un porta muestras en el extremo opuesto y dos micrófonos.

El esquema del equipo para medir el coeficiente de absorción acústica se muestra en la Figura 2.

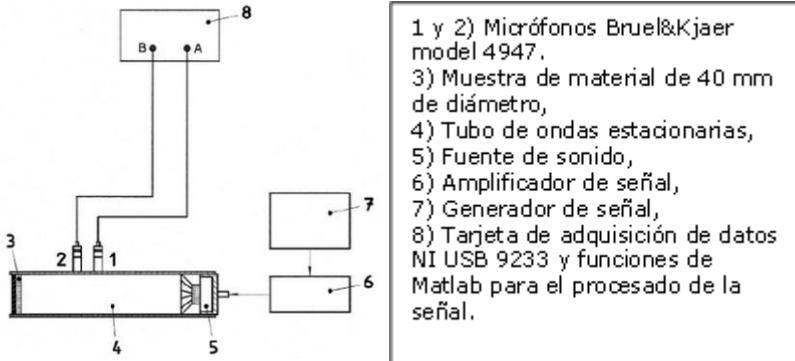


Figura 2. Esquema del montaje del tubo de impedancia acústica: ISO 10534-2.

Para comparar las propiedades absorbentes del sonido de estos nuevos materiales se obtiene la curva de absorción acústica en función de la frecuencia. El coeficiente de absorción acústica se determina con la siguiente Ecuación:

$$\alpha = 1 - |r|^2$$

r es el coeficiente de reflexión que se determina mediante la siguiente Ecuación:

$$r = \frac{H_{12} - H_i}{H_g - H_{12}} e^{2 \cdot j \cdot k_0 \cdot x_1}$$

Dónde: H12 es la función de transferencia compleja, Hi es la función de transferencia de la onda incidente, HR es la función de transferencia de la onda reflejada, k0 es el número de onda complejo, x1 es la distancia desde la muestra hasta el micrófono más alejado. El coeficiente de reflexión varía entre 0 y 1 en función de si el material se comporta como absorbente o reflectante acústico, respectivamente.

Ensayo de tracción

Estos ensayos se han realizado con la utilización de una máquina de ensayos de gradiente constante de alargamiento, Figura 3. Concretamente el modelo DO-FB005TN de la marca Zwick/Roell [2].

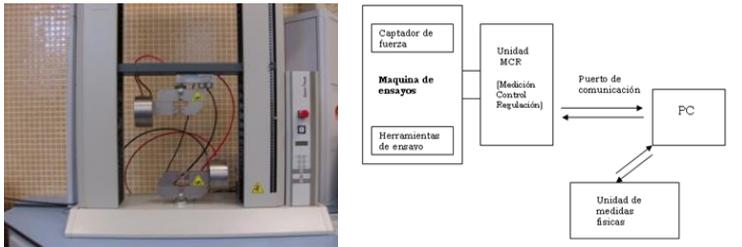


Figura 3. Máquina de ensayos de gradiente constante de alargamiento.

Determinación de la porosidad

La estructura de los materiales absorbentes porosos de naturaleza fibrosa consiste básicamente en un esqueleto, en nuestro caso flexible. El aire existente en el interior del material poroso-fibroso, es obligado a moverse produciéndose pérdidas de energía por el rozamiento con las fibras del material. Los poros del material, deben estar intercomunicados entre sí. La porosidad de un material (\emptyset) se puede definir [4] como la relación existente entre el volumen de aire que ocupan, los poros existentes dentro de un material y el volumen total del material poroso, Figura 4. Si denominamos (V_E) al volumen del esqueleto y (V_A) al volumen de aire dentro del material, podemos definir (V_T) como el volumen total del material poroso.

$$\emptyset = \frac{V_A}{V_T} = \frac{V_A}{V_A + V_E}$$

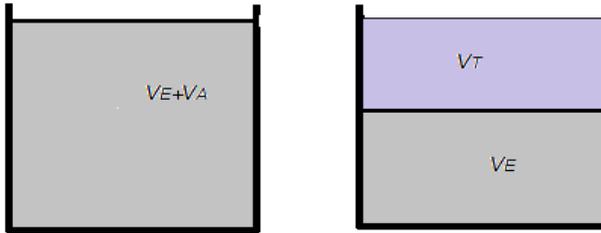


Figura 4. Croquis porosimetría método directo.

Determinación de la Tortuosidad

Este parámetro adimensional representa las características internas del esqueleto de los materiales porosos absorbentes, estando relacionado con la porosidad, morfología de los poros, variación de la sección recta del poro y las derivaciones y conexiones con otros poros, La metodología extendida para determinar este parámetro se basa en la analogía entre las propiedades acústicas y las eléctricas de materiales granulares no conductores [5]. La diferencia de presión entre las dos caras de una muestra de un material poroso que es atravesada por un flujo de aire es:

$$\Delta P = R * \varphi$$

Donde R es la resistencia que muestra el material al paso del flujo de aire y φ es el flujo de aire. Teniendo en cuenta la similitud con el campo eléctrico, Figura 5, la diferencia de tensión ΔV entre ambos lados de la muestra producirá un paso de corriente eléctrica I, para una resistencia eléctrica del material R_{elec} .

$$\Delta V = R_{elec} I$$

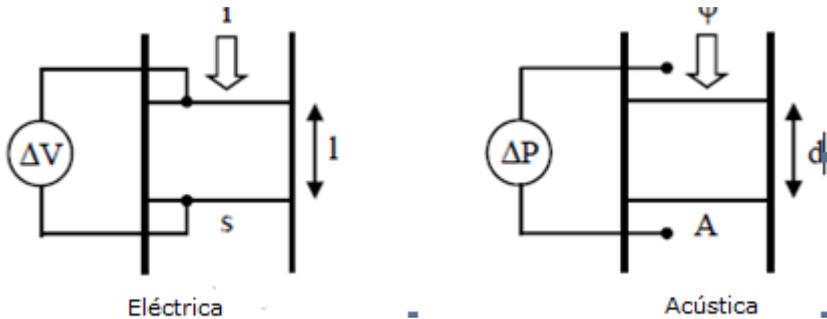


Figura 5 Similitud flujo de aire con el campo eléctrico.

La metodología seguida es hacer pasar una corriente que circula a través del electrolito con el material insertado entre los dos electrodos y medir la diferencia de tensión. Posteriormente se repite el ensayo sin el material absorbente. La expresión para determinar la tortuosidad α_{∞} es:

$$\alpha_{\infty} = \frac{\rho_{\text{mat}}}{\rho_{\text{elec}}} \phi$$

Con ρ_{mat} la resistividad eléctrica con material y electrolito, ρ_{elec} la resistividad eléctrica del electrolito y ϕ la porosidad. Las resistividades están relacionadas con la resistencia eléctrica y dependen de la superficie de los electrodos s y su separación d .

Resistencia específica al flujo

La determinación de la resistividad al flujo de aire [6], evalúa la oposición que ejerce un material poroso al paso de un flujo de aire a través de él, Figura 6. El término resistividad parte de la consideración, de la resistencia de una muestra al paso de una corriente de aire que se puede definir, como la relación entre la caída de presión (ΔP) entre ambos lados y el flujo (F) que la atraviesa siendo la resistencia al flujo de aire (σF) Ecuación:

$$\sigma_F = \frac{\Delta P}{F} \quad (\text{Pa} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s} = \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1})$$



Figura 6. Equipo de resistencia al flujo.

REFERENCIAS

- [1] UNE-EN ISO 9092:2011. *No tejidos. Definición.*
- [2] UNE-EN ISO 9073-18 *Determinación de la resistencia y el alargamiento a la rotura de materiales no tejidos mediante el ensayo de tracción por agarre. (ISO 9073-18:2007).*
- [3] UNE-EN ISO 10534-2 *Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia. (ISO 10534-2:1998).*
- [4] Yvan Champoux, Michael R. Stinson, and Gilles A. Daigle *Physics Division, National Research Council, Ottawa, Ontario K1A 0R6, Canada.*
- [5] R.J. Brown, *Geophysics*, 45 (1980) 1269-1275.
- [6] UNE -EN 29053-1994 *Determinación de la resistencia al flujo de aire.*

“Espectroscopía Raman bajo presión del compuesto In_2Se_3 ”

**R. Vilaplana ^{(1)§§}, S. Gallego ⁽¹⁾, A.V. Nadal-Gisbert ⁽²⁾,
J.E. Crespo ⁽²⁾**

*(1) Departamento de Física Aplicada,
Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Universitat Politècnica de València
Plaza Ferrándiz y Carbonell, 1 03801 Alcoy (Alicante)*

*(2) Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales,
Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Universitat Politècnica de València
Plaza Ferrándiz y Carbonell, 1 03801 Alcoy (Alicante)*

RESUMEN

En el presente trabajo se presenta la caracterización del compuesto In_2Se_3 en condiciones de alta presión (hasta 20 GPa) desde el punto de vista vibracional. Así mismo, se describe el uso de la técnica la espectroscopia Raman y las medidas bajo presión utilizando las celdas de yunques de diamante. Se abordan algunas cuestiones abiertas relacionadas con las transiciones estructurales de compuesto In_2Se_3 gracias a la información proporcionada por fonones calculados mediante la técnica computacional Ab initio o de primeros principios. Los resultados muestran que este compuesto sufre una transición de fase a 0.9 GPa desde su estructura inicial romboédrica (con grupo espacial $R3m$) a una estructura monoclinica distorsionada ($C2/m$). Posteriormente, se produce una segunda transición de fase a una estructura de tipo Bi_2Te_3 ($R-3m$) alrededor de 10 GPa. Esta última fase se mantiene estable hasta aproximadamente 20 GPa. Los cálculos Ab initio en este compuesto han sido determinantes para identificar la fase $C2/m$ en las medidas Raman, así como el uso de filtros adecuados con el fin de evitar que la muestra se descomponga por efecto térmico del láser.

§§ Contacto: R. Vilaplana; Tel. 966528526; e-mail: rovilap@fis.upv.es

INTRODUCCIÓN

El seleniuro de indio (In_2Se_3) es un semiconductor con un gap 1.45 eV,^[1] que está siendo ampliamente estudiado debido a sus múltiples aplicaciones. No sólo es un buen termo-eléctrico, sino que también es un material adecuado para el diseño de las memorias de fase de acceso aleatorio y en los campos de la fotodetección y las células solares.

El In_2Se_3 es un compuesto complejo del que se conocen muchos politipos. Los estudios del In_2Se_3 en función de la temperatura han sido numerosos;^[2] sin embargo, los estudios en función de la presión han dejado algunas cuestiones por clarificar. De acuerdo a un experimento reciente de difracción de rayos X (DRX) en muestras de polvo a altas presiones, la primera transición de fase ocurre a 0,9 GPa, desde la estructura romboédrica inicial (R3m) a una estructura monoclinica distorsionada (C2/m). Posteriormente, alrededor de 5.02 GPa identifican una transición de fase a una estructura de tipo Bi_2Te_3 (R-3m) que se mantiene hasta aproximadamente unos 20 GPa.^[3] Ésta última estructura es la que presentan varios aislantes topológicos con estequiometría A_2X_3 .^[4] Los mismos autores llevan también a cabo medidas de dispersión Raman y reportan fonones con pendiente negativa que, como demostraremos, no concuerdan con datos teóricos, por lo que asumimos que la muestra fue dañada por la excitación láser utilizada en la medida Raman debido al pequeño gap que presenta este compuesto. Otros autores han realizado medidas de espectroscopia Raman de este compuesto.^[5,6] En términos generales, en ambos experimentos plantean que el compuesto transita a la estructura de tipo Bi_2Te_3 directamente, sin pasar por la monoclinica distorsionada C2/m. Para resolver las controversias aquí planteadas, nosotros hemos realizado medidas de espectroscopia Raman y cálculos *Ab initio* del In_2Se_3 hasta 20 GPa que nos han permitido explicar el aparente desacuerdo entre las medidas de XRD y de dispersión Raman previamente publicadas.

TÉCNICA DE ESPECTROSCOPIA RAMAN BAJO PRESIÓN

Fundamento de la espectroscopia Raman

La espectroscopia Raman consiste en hacer incidir un haz láser de frecuencia ν_0 sobre una muestra el cuál es dispersado mayoritariamente de modo elástico (dispersión Rayleigh), existiendo una cantidad pequeña de luz que se dispersa inelásticamente y que presenta un cambio en su frecuencia. Microscópicamente, se puede describir como una excitación de la nube electrónica de las moléculas del material debido a la interacción con el fotón incidente el cual provoca la excitación de las moléculas a un estado virtual; emitiéndose otro fotón con el objetivo de regresar a su estado fundamental. Sin embargo, si el choque ha sido inelástico y se ha perdido o ganado energía, la molécula no volverá exactamente al estado fundamental, sino que se encontrará en un estado distinto de la inicial. La diferencia de energía entre estos estados es lo que modifica la frecuencia del fotón emitido. Si la frecuencia del fotón emitido es menor, $\nu_0 - \nu_1$, esto quiere decir que ha transferido energía a la molécula, la cual se encontrará ahora en un estado vibracional o rotacional (estado excitado) superior al inicial (líneas Stokes). Por el contrario, si la frecuencia del fotón emitido es mayor, $\nu_0 + \nu_1$, entonces la molécula no se encontraba en el estado fundamental sino en un estado excitado, y al proporcionar energía al fotón, la molécula decae al estado fundamental de mínima energía (líneas Anti-Stokes). Cada una de estas líneas Stokes y Anti-Stokes en el espectro Raman caracteriza las diferentes formas de vibrar de la molécula o red cristalina. Concretamente dentro de un cristal, todas las vibraciones generadas pueden ser vistas como superposiciones de ondas planas, conocidas como cuasi partículas llamadas fonones, que describen los modos de vibración del sistema.

Para entender el origen del fenómeno, es necesario analizar como la luz incidente induce un momento dipolar, \vec{P} , en los átomos de la red. El momento dipolar es dependiente del tensor polarizabilidad, $\vec{\alpha}$, y del campo electromagnético de dicha fuente, \vec{E}_0 (obviando su componente magnética), a tenor de la ecuación (1), donde ν_0 es la frecuencia de la radiación monocromática incidente y t la variable tiempo.

$$\vec{P} = \vec{\alpha} \times \vec{E}_0 \cos(2\pi\nu_0 t) \quad (1)$$

Los términos del tensor polarizabilidad pueden ser descritos como función de las coordenadas de los modos de vibración, lo cual condiciona a que cada elemento de \vec{P} sea un sumatorio de términos (ver ecuación 2), donde α_{ij}^0 y Q_0 son la polarizabilidad y las coordenadas de los modos de vibración en el equilibrio.

$$P_i = \sum_j \alpha_{ij} \times E_j = \sum_j \left[\alpha_{ij}^0 \times E_{0j} \cos(2\pi\nu_0 t) + \frac{E_{0j} Q_0}{2} \left(\frac{\partial \alpha_{ij}}{\partial Q} \right)_{Q=Q_0} [\cos(2\pi(\nu_0 - \nu_1)t) + \cos(2\pi(\nu_0 + \nu_1)t)] + \dots \right] \quad (2)$$

Dicha ecuación contiene tres términos de gran relevancia. El término $\cos(2\pi\nu_0 t)$ corresponde a la dispersión Rayleigh, mientras que los términos $\cos(2\pi(\nu_0 - \nu_1)t)$ y $\cos(2\pi(\nu_0 + \nu_1)t)$ predicen las líneas Stokes y Anti-Stokes. Es por tanto que, si el factor $\left(\frac{\partial \alpha_{ij}}{\partial Q} \right)_{Q=Q_0} \neq 0$, el fenómeno Raman será observable, para lo cual es necesario que la polarizabilidad cambie continuamente para que la vibración sea detectable por espectroscopia Raman.

La presión y las celdas de yunques de diamantes

El uso de la espectroscopia Raman permite evaluar los cambios estructurales entre las distintas fases bajo presión, ya que estos

cambios de fase implican variaciones en los modos de vibración de la red [7]. La evolución de los fonones de una red cristalina y su seguimiento al aumentar la presión permite obtener información sobre dichos cambios estructurales y sobre algunas otras propiedades del material.

En los experimentos de altas presiones se utilizan las celdas de yunques de diamantes (ver **Figura 1**).

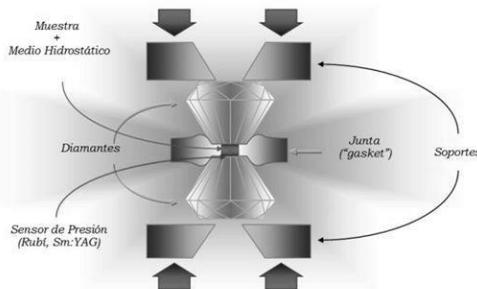


Figura 1. Celda de yunques de diamante.

El principio físico en el que se basa la celda de yunques es muy simple y se basa en el principio de Pascal. La presión se genera por la compresión de una muestra confinada entre las puntas truncadas de dos diamantes que ejercen presión sobre una junta metálica. En dicha junta se practica un orificio en el que se introduce un trozo del material a estudiar, unos pedazos de rubí y un medio fluido transmisor de presión, que típicamente es etanol-metanol en una proporción 1:4. Debido a que la luminiscencia del rubí (Al_2O_3 dopado con impurezas de Cr^{+3}) varía con la presión, se puede evaluar el valor de la misma al aumentar la presión.

La celda de diamantes se acopla con un espectrómetro Raman para la medición de los fonones del material a diferentes presiones (ver Figura 2a). Este sistema instrumental tiene incorporado una cámara (ver Figura 2b) que permite elegir en que zona de la muestra

se quiere medir el espectro Raman. La Figura 2c muestra una imagen del cristal y de los rubís.

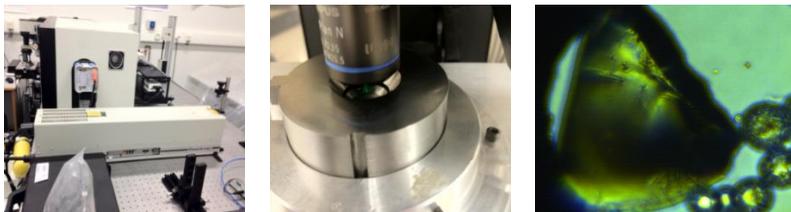


Figura 2a ,2b y 2c. a) Izquierda: espectrómetro Raman, b) Centro: cámara de visualización c) Derecha: imagen de la muestra y rubís.

Aplicaciones: cambios de fases bajo presión y caracterización de nanomateriales

La alta sensibilidad de la espectroscopia Raman a cambios estructurales, y el hecho de ser una técnica no destructiva, ha popularizado la espectroscopía Raman como un método de análisis complementario a técnicas como DRX o la microscopía electrónica de barrido (SEM).

Los estudios bajo presión son de gran interés ya que la presión induce transiciones de fase estructurales en los materiales y en ocasiones permite la captura de fases a presión ambiente (fases metastables) que en condiciones ambientes de presión y temperatura no se dan y que posteriormente se descubre que se pueden producir en condiciones de no equilibrio. Un ejemplo típico es el diamante, que se ha sintetizado en forma de capas delgadas en la última década.

En la caracterización de nanomateriales la presión también es de gran interés, por ejemplo:

- Identificación y transición de fases en nanopartículas.
- Análisis de nanodominios amorfos.

- Determinación de tamaño de nanopartículas.
- Estudio de alotropías de carbono. Análisis de los modos de vibración de especies como el grafeno, nanotubos de carbono, fullereno, etc, en direcciones preferentes.

MEDIDAS RAMAN Y CÁLCULOS *Ab initio* DEL COMPUESTO In_2Se_3

Como se ha mencionado previamente el objetivo de este trabajo es realizar medidas espectroscópicas Raman así como cálculos *Ab initio* del compuesto In_2Se_3 bajo presión, con el fin de entender el mecanismo de transición desde la fase romboédrica inicial (R3m) que presenta este compuesto en condiciones ambiente a la fase de los materiales topológicos (R-3m).

Cálculos *Ab initio*

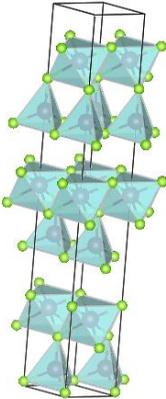
Los cálculos *Ab initio* bajo presión realizados se basan en la determinación estructural que llevan a cabo Zhao *et al.* 2014. Como se ha mencionado previamente, las tres fases que se determinan por DRX se corresponden con la secuencia R3m, C2/m y R-3m. En la Tabla 1 se muestran dos imágenes de las tres estructuras obtenidas a partir de los cálculos teóricos y haciendo uso del software VESTA. En las imágenes superiores a), b) y c) se destacan los polígonos asociados a los átomos de In, mientras que en las imágenes inferiores e), f) y g) los asociados a los átomos de Se.

A partir de estas estructuras se han obtenido las distancias de enlace asociadas a cada uno de los polígonos centrados en los átomos de In y Se de las tres fases, así como el índice de coordinación efectivo en función de la presión.

Tabla 1. Vista esquemática de las estructuras del compuesto In_2Se_3 a diferentes presiones. La cabecera indica los grupos espaciales de cada estructura. La parte superior representa los polígonos centrados en los átomos de In, la inferior los polígonos centrados en los átomos de Se.

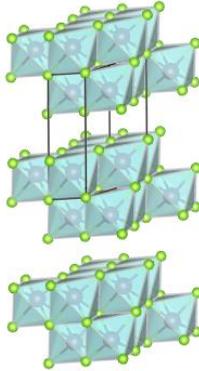
R3m (No. 160)

a)



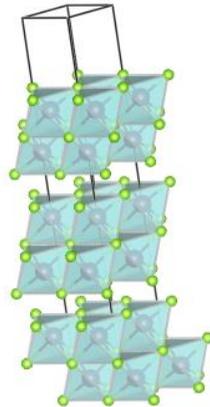
C2/m (No. 12)

b)

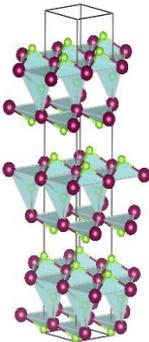


R-3m (No. 166)

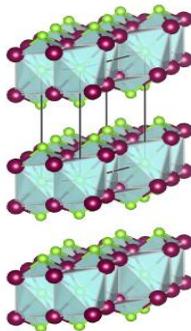
c)



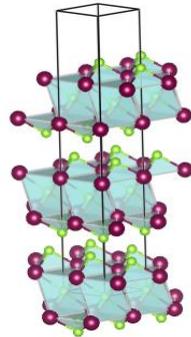
e)



f)



g)



En la Figura 3a y 3b se muestra la evolución de las distancias In-Se de los polígonos de In y de las distancias Se-In de los polígonos de Se en función de la presión, de las tres estructuras que se muestran en la parte superior e inferior de la Tabla 1, respectivamente.

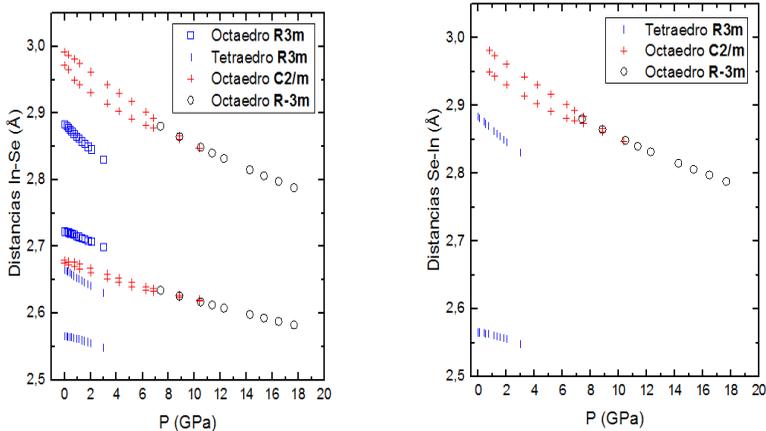


Figura 3a y 3b. Distancias In-Se y Se-In en función de la presión de los distintos polígonos mostrados en las figuras de la Tabla 1.

La transición de la fase C2/m a la R-3m, los octaedros de In se van regularizando. Pasan de tener 4 distancias desiguales a tener sólo dos. Sin embargo, los octaedros de Se, se regularizan completamente. En ambos casos esto ocurre a una presión de aproximadamente 10 GPa. Todo está indicando que dicha transición está relacionada con una tendencia a la regularización paulatina de los octaedros tanto de In como de Se, por lo que no se observa un cambio brusco en las distancias de enlace. Por contra, en cuanto a la transición de fase de la R3m a la C2/m, si se observa una discontinuidad en las distancias de enlace de los poliedros implicados. Dicho de otro modo, la primera transición de fase es de primer orden y la segunda además de ocurrir a una presión algo

superior (10 GPa) a lo indicado en experimento de DRX de Zhao *et al.*, es de segundo orden.

Adicionalmente, las Figuras 4a y 4b muestran cómo varía el índice de coordinación efectivo de los octaedros de In y de Se mostrados en la Tabla 1. Estas dos figuras apoyan que la transición es paulatina y que se completa alrededor de 10 GPa. Hacemos notar como el índice de coordinación del octaedro de Se alcanza un valor constante e igual a 6.

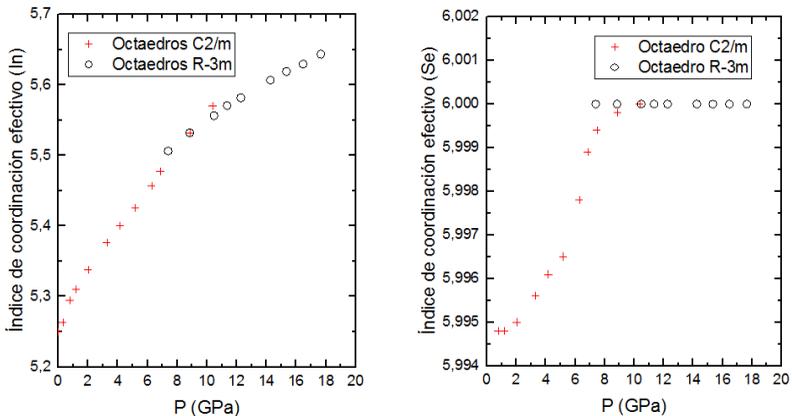


Figura 4a y 4b. Índices de coordinaciones efectivos de los octaedros de In y de Se de las estructuras correspondientes a las fases C2/m y R-3m.

Medidas de espectroscopía Raman

En cuanto a las tres medidas previas realizadas de espectroscopia Raman del compuesto bajo estudio In_2Se_3 , en ninguno de los tres experimentos se identifican los fonones correspondientes a la fase C2/m.^[3,5,6] En las medidas Raman realizadas por Zhao *et al.* 2015 aparecen fonones con pendiente negativa. En trabajos previos con compuestos que contienen Se, Vilaplana *et al.* 2013 observan y demuestran que estos fonones con

pendiente negativa están relacionados con la formación de nanocluster de Se y que son una consecuencia de la descomposición local que produce el láser al absorber la de energía del mismo en la zona que incide si no se usa los filtros adecuados.^[8] En materiales que tienen un gap pequeño y en los que además el mismo se cierra al aumentar la presión este efecto hay que tenerlo muy presente. Dicho de otro modo, esto es lo que parece haber ocurrido en las medidas de Raman de estos autores.^[3] En cuanto al experimento Raman llevado a cabo por Rasmussen *et al.* 2013 los autores argumentan -aun a pesar de haber realizado medidas DRX- que el cambio de fase de la R3m a la R-3m es directo y aproximadamente a una presión de 0.7 GPa.^[5] Por otro lado, en el experimento Raman realizado por Feng *et al.* 2014 estos autores - en un intento de explicar el mecanismo que conduce directamente de la fase R3m a la R-3m alrededor de 0.8 GPa - argumentan que hay un deslizamiento de planos. Estos autores también realizan medidas de DRX.^[6]

El motivo de que sólo las medidas DRX de Zhao *et al.* 2015 discriminen la fase C2/m como fase intermedia entre la R3m y R-3m se debe a que la diferencia de los difractogramas de estas dos fases es muy sutil. Estos autores, en el material suplementario, reportan que la diferencia estriba tan sólo en un doble pico que se observa en el difractograma que con el incremento de la presión se convierte en un único pico. De acuerdo a estos autores esto ocurre a unos 5.0 GPa. Este detalle en los difractogramas parece pasar desapercibido por los otros dos grupos de autores que también reportan experimentos de DRX.^[5,6]

En cuanto al Raman se refiere, las representaciones irreducibles de los fonones activos Raman en centro de zona, para las tres fases, sin incluir los modos acústicos, son los mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Fonones activos Raman en centro de zona.

R3m	$\Gamma = 4A_1 + 4E$
C2/m	$\Gamma = 4A_g + 2B_g$
R-3m	$\Gamma = 2A_{1g} + 2E_g$

En la Figura 5a se muestran los fonones calculados junto a los resultados de nuestro experimento Raman en función de la presión. Lo primero que hay que destacar, en cuanto a cálculos se refiere, es la similitud de los modos calculados en las tres fases. Especialmente parecidos son los modos correspondientes a las fases C2/m y R-3m. En nuestras medidas Raman han sido esenciales los cálculos teóricos para poder discriminarlos (ver Figura 5a). Los modos A_g^1 y B_g^1 de la fase C2/m y el modo E_g^1 de la fase R-3m están solapados y lo mismo sucede con los modos A_g^3 y B_g^2 de la fase C2/m y el modo E_g^2 de la fase R-3m. Por otro lado, los modos A_g^2 de la fase C2/m y el modo A_{1g}^1 de la fase R-3m también solapan, así como el A_g^4 de la fase C2/m y el A_{1g}^2 de la fase R-3m. Dicho de otro modo, esta es la razón por la cual es difícil por Raman discriminar el paso de la fase R3m a R-3m, a través de C2/m. Entre 5 y 10 GPa los cálculos muestran una inestabilidad en los fonones de más altas frecuencias (A_g^4 , A_g^3 y B_g^2) de la fase C2/m indicando que esta estructura se vuelve inestable en este rango de presiones.

En la Figura 5b se muestran una serie de espectros Raman apilados a diferentes presiones, donde se identifican los espectros de las tres fases. En el espectro a presión ambiente se identifican todos los modos de la fase inicial, a excepción del modo E^1 . Dado que la transición a la fase C2/m ocurre en torno a 0,9 GPa, el espectro a dicha presión, aun a pesar de mostrar claramente la fase R3m, ya muestra algún pico de la fase siguiente (ver el símbolo asterisco). Esto indica que el material está transitando a la siguiente fase. Los espectros de las siguientes presiones se corresponden con los de la fase C2/m. Hemos ajustado con perfiles pseudo-Voigt los picos de los espectros de dispersión Raman y de este modo hemos podido resolver los dos picos que se corresponde con los modos A_g^1 y B_g^1 (ver espectro a 3,8 GPa) y más adelante los que se corresponde con los modos A_g^3 y B_g^2 (ver espectro a 9.8 GPa). Según nuestras medidas la transición a la R-3m tiene lugar alrededor de 10 GPa y no de 5 GPa como indican las medidas de DRX llevadas a cabo por

Zhao *et al.* 2014. Ya hemos mencionado previamente que este proceso es paulatino apoyándonos en los cálculos y mostrado la razón por la cual tampoco parece sencillo el discriminar estas dos fases por DRX.

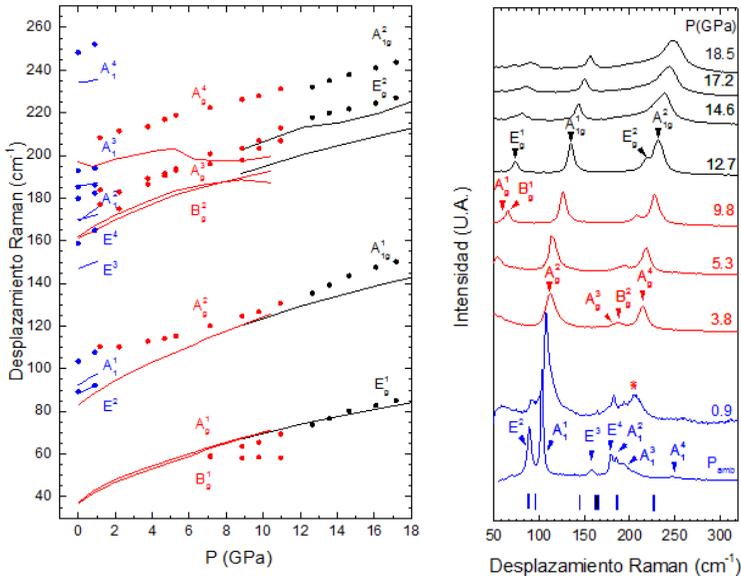


Figura 5a y 5b. A la izquierda los fonones teóricos y experimentales de las tres fases identificadas: R3m (azul), C2/m (roja) y R-3m (negro). Los cálculos en línea continua y las medidas en círculos relleno. A la derecha los espectros Raman medidos a algunas presiones, diferenciadas por colores en consonancia con la figura de la izquierda.

Con el fin de corroborar experimentalmente en torno a que intervalo de presión ocurre la transición de la C2/m a la R-3m, en la Figura 6 se muestra la anchura a mitad de altura (FWHM) del fonón A_g² de la fase C2/m. Este modo vibracional al aumentar la presión se corresponde con el modo A_{1g}¹ de la fase R-3m. Según indica la Figura 6, la FWHM del modo A_g² se estabiliza a partir de 10 GPa, presión a la cual los pares de modos B_g¹ y A_g¹, B_g² y A_g³ de la fase C2/m pasan a ser los E_g¹ y E_g² de la fase R-3m (ver Figura 5a),

evidenciando de este modo que la presión de transición a la R-3m está torno a 10 GPa y no en torno a 5 GPa como indican las medidas de DRX.^[3]

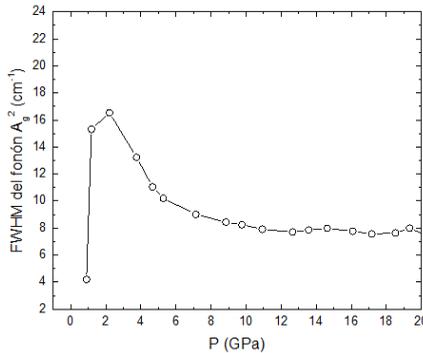


Figura 6. FWHM en función de la presión del modo A_g^2 de la fase C2/m y del modo A_{1g}^1 de la fase R-3m.

CONCLUSIÓN

A partir de nuestras medidas de espectroscopia Raman hemos sido capaces de identificar las tres transiciones de fases determinadas por medidas previas de DRX, desde la estructura inicial romboédrica de grupo espacial R3m pasando por la monoclinica distorsionada (C2/m) hasta llegar a una estructura de tipo Bi_2Te_3 (R-3m). Las presiones de transición encontradas son 0.9 y 10 GPa, respectivamente. Los cálculos *Ab initio* han sido de vital importancia para poder entender la razón por la cual, en experimentos previos, tanto de espectroscopia Raman como de DRX, no había sido posible identificar la estructura monoclinica distorsionada intermedia. La conclusión a la que llegamos es que la transición de fase de la C2/m a la R-3m conlleva una regularización paulatina de los octaedros tanto de In como de Se, que no se completa hasta una presión de 10 GPa. Es decir, estamos ante una transición de fase de segundo orden difícil de detectar

experimentalmente, tanto en los espectros Raman como en los difractogramas de DRX, ya que comporta cambios muy sutiles en estas medidas. Además, también hemos evidenciado que el uso de filtros adecuados es fundamental para evitar que la muestra se descomponga localmente por efecto térmico del láser.

Es decir, que el compuesto In_2Se_3 es un buen ejemplo del especial cuidado que hay que tener al realizar medidas Raman en semiconductores de gap bajo y así mismo un ejemplo de la gran utilidad de los cálculos teóricos (como *Ab initio*) cuando se trata de transiciones de segundo orden. Finalmente, al establecer de forma precisa las transiciones de fases del compuesto In_2Se_3 bajo presión estamos contribuyendo a un mejor enfoque de cara a presentes y/o futuras aplicaciones de un compuesto que tiene un gran interés tecnológico.

REFERENCIAS

- [1] Ho, C.H. Lin, C.H. Wang, Y.P. Chen, Y.C. Chen, S.H Huang, Y.S., *Appl. Mater. Interfaces*, 5, 2269–2277 (2013).
- [2] Han, G. Chen, Z.G., Drennan, J. and Zou, J., *Small*, 14, 2747-2765 (2014).
- [3] Zhao, J. and Yang, L., *J. Phys. Chem. C*, 118, 5445-5452 (2014).
- [4] Manjón, F.J. Vilaplana, R. Gomis, O. et. al. *Phys. Status Solidi B*, 250, 669-676 (2013).
- [5] Rasmussen, A.M. Teklemichael, S. T. Mafi, E. Gu, Y. McCluskey, M. D., *Appl. Phys. Lett.*, 102, 062105 (1–4) (2013).
- [6] Feng, K. Cailong, L. Gao, Yang, G. et al. *Appl. Phys. Lett.*, 104, 212-102 (2014).
- [7] Montes, J.M.M. Aguado, F. Barroso, R.V. Muñoz, J.M.R., *Materia a Alta Presión: Fundamentos Y Aplicaciones*, Ed. Universidad de Oviedo y de Cantabria (2011).

- [8] Vilaplana, R. Gomis, O. Manjón, F.J. et al., *J. Phys. Chem. C*, 117, 15773–15781 (2013).

“Estudio técnico-económico del proceso de triturado de envases recuperados”

J. Fuente⁽¹⁾, S. Sanchez-Caballero⁽¹⁾*, M.A. Selles⁽¹⁾, J.E. Crespo ⁽¹⁾**

*(1) Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales,
Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Universitat Politècnica de València
Plaza Ferrándiz y Carbonell, 1 03801 Alcoy (Alicante)*

RESUMEN

El objetivo del presente proyecto es estudiar los efectos del proceso de triturado de envases recuperados en el posterior proceso de prensado, con el fin de determinar su rentabilidad económica. Se comprueba que en diferentes residuos plásticos con forma de botella el proceso de trituración previa al prensado influye de manera considerable en la densidad final de la bala. Así mismo, se obtienen datos para poder dimensionar adecuadamente el conjunto de máquinas industriales destinadas al tratamiento de residuos, optimizándolas para que el proceso de compresión y la instalación resulte más rentable.

*** Contacto: S.Sanchez-Caballero; Tel. 966528575; e-mail: sasanca@dimm.upv.es

METODOLOGÍA EMPLEADA

Materiales

Se ha buscado el caracterizar la respuesta que ejerce el triturado sobre la compresión de dos materiales muy habituales en los procesos regulares de recogida y tratamiento de residuos.

En primer lugar, el material más utilizado en envases de plástico es el Polietileno de Tereftalato (PET), en segundo orden se ha deseado estudiar otro material que actualmente se encuentra en un punto crítico donde, a pesar que es totalmente reciclable, no se procesa por el hecho de que resulta totalmente inviable económicamente. Estaremos hablando del Poliestireno extruido (XPS).

Con estos materiales se realizarán ensayos de triturado y compresión, con el fin de optimizar la viabilidad económica.

Procedimiento de triturado

Se ha utilizado un molino empleado normalmente para triturar los excesos sobrantes de plástico de una máquina de inyección. El funcionamiento de este triturador consiste en un rodillo con 3 cuchillas que giran a alta velocidad, el material pasa a través de estas cuchillas y va triturando hasta que tiene el calibre deseado (este calibre lo definirá el diámetro de los agujeros de la criba).

En el caso del PET, sólo se ha escogido por triturar envases en forma de botella ya que nuestra misión es intentar reducir los huecos de aire que pueden quedar en los cuellos de las botellas después del proceso de prensado.



Figura 1. Muestra de polietileno de tereftalato (PET) después del proceso de triturado.

Por otro lado, trabajando con poliestireno extruido, se ha optado por triturar bandejas utilizadas para alimentación. El triturado se hará de forma manual debido a la pequeña cantidad de las muestras y a la facilidad de triturar este tipo de material.



Figura 2. Muestra de poliestireno extruido (XPS) después del proceso de triturado.

Procedimiento de compactación

Para realizar los ensayos de compresión, se ha empleado una prensa utilizada con fines educativos a la que se ha instalado un cajón y una placa de compresión que irá unida al vástago del pistón hidráulico.

La capacidad de carga de la prensa es de 100.000 N, por lo tanto, sería la fuerza máxima a aplicar con un recorrido del cilindro de 299,95 mm.

Los ensayos se realizan todos con fuerza tarada a 160 N/cm², automáticamente el sistema detiene la prensa al llegar a esta fuerza.

Se tomará lectura de la fuerza y el desplazamiento en función del tiempo mediante unos sensores acoplados a la prensa.

El software desde el cual controlaremos la prensa será el CATMAN 4.0. Mediante esta aplicación se han adquirido todas las lecturas correspondientes efectuadas en la prensa.

A posteriori, con ayuda de la plataforma de programación Matlab se procesarán los datos obtenidos y nos realizará las gráficas que nos darán toda la información necesaria para la ejecución de este proyecto.

Para poder llevar a cabo este estudio, se ha de comparar las curvas resultantes de compactar el mismo material triturado y no triturado.

A parte, se puede distinguir dos metodologías que se han empleado para efectuar los ensayos.

- La primera donde solo se ha guardado el proceso de compresión.
- La segunda donde a parte del proceso de compresión, se ha guardado también el proceso de recuperación.

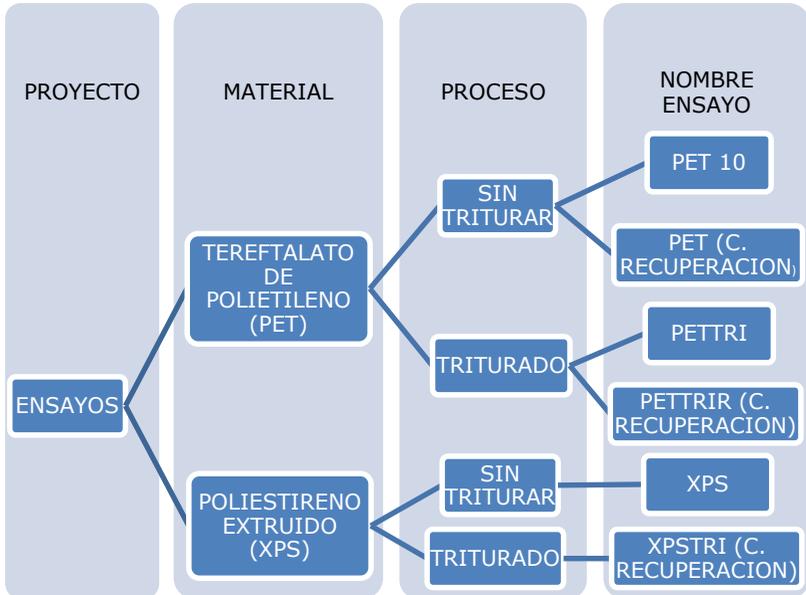


Figura 3: Esquema jerárquico de los ensayos de compactación realizados.

Procedimiento de cálculo

Densidad de entrada y densidad de salida del material prensado, en kg/m³:

$$\rho_{entrada} = \frac{m}{V_{entrada}} \text{ (ec. I)}$$

$$\rho_{salida} = \frac{m}{V_{salida}} \text{ (ec. II)}$$

Volumen de entrada y volumen de salida del material prensado:

$$V_{entrada} = A \cdot h \text{ (ec. III)}$$

$$V_{salida} = A \cdot t \text{ (ec. IV)}$$

Donde A es el área del bloque de prensado, constante durante todo el ensayo.

$$A = 250 \cdot 250 = 62.500 \text{ mm}^2 = 0,0625 \text{ m}^2 \text{ (ec. V)}$$

Y las variables h y t son las distancia de prensado, h es la altura de la prensa, por tanto, también constante e igual en todas las series de prensado, $h = 299,95 \text{ mm}$, lo que hace que el $V_{entrada}$ sea también constante en todos los ensayos. t es la altura a la que queda el bloque o bala resultante.

El ratio de compresión i se obtiene por la relación entre volumen de entrada y salida:

$$i = \frac{V_{salida}}{V_{entrada}} = \frac{\rho_{entrada}}{\rho_{salida}} = \frac{A \cdot t}{A \cdot h} = \frac{t}{h} \text{ (ec. VI)}$$

La presión específica de prensado PE es la relación entre la Fuerza aplicada F y el área de prensado A (cte). La unidad de trabajo MPa.

$$PE = \frac{F}{A} \text{ (ec. VII)}$$

La proporción de carrera x es la relación entre la altura inicial del bloque de residuos antes de prensar y la altura al final del de prensado:

$$x = \frac{h - t}{h} = 1 - \frac{t}{h} = 1 - i \text{ (ec. VIII)}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Optimización en el transporte

Se ha estudiado el valor de densidad óptimo para el transporte por carretera. Para ello, se ha necesitado conocer cuál es la masa máxima autorizada de un camión que se emplea para el transporte de las balas de material recuperado:

$$Carga\ útil_{camión\ transporte} = 24000kg$$

$$\rho_{transporte} = \frac{24000kg}{12.5m \times 2.45m \times 2.45m} \cong 320kg/m^3$$

La prensa forma unas balas que suele tener unas dimensiones de:

$$Dimensiones\ bala = 800mm \times 700mm \times 1000mm$$

Siempre se intentará optimizar el espacio dentro del habitáculo de carga de camión, aun así, quedaran huecos debido a que debemos poder cargar y descargar las balas dentro del camión.

$$\rho_{eficiente\ transporte} = \frac{24000kg}{12m \times 2.4m \times 2.1m} \cong 400kg/m^3$$

Este valor de densidad es más elevado que el requerido por las plantas de reciclaje ($190kg/m^3$) por lo que será totalmente válido.

[7]

Interpretación de las gráficas

En lo que se refiere a representación de gráficas de salida, se mostrarán 4 diferentes:

- Tipo A: %Cambio de volumen – Presión específica (MPa).
- Tipo B: %Cambio de volumen – Densidad (Kg/m^3).
- Tipo C: Densidad (Kg/m^3)- Presión específica (MPa).
- Tipo D: Ratio de compresión- Presión específica (MPa).
- **Polietileno de tereftalato (PET)**

Se ha estudiado en profundidad las gráficas tipo B ya que se han encontrado resultados relevantes al comparar PET triturado respecto a PET sin triturar.

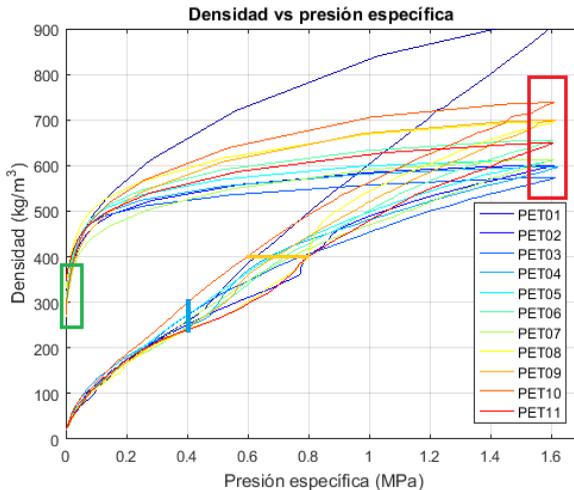


Figura 4. Densidad (kg/m^3) - presión específica (MPa) de PET sin triturar correspondiente a los ensayos con nombre PET.

Se ha tomado la densidad eficiente para el transporte y a partir de ella se obtiene el rango de presión específica óptima (Línea amarilla).

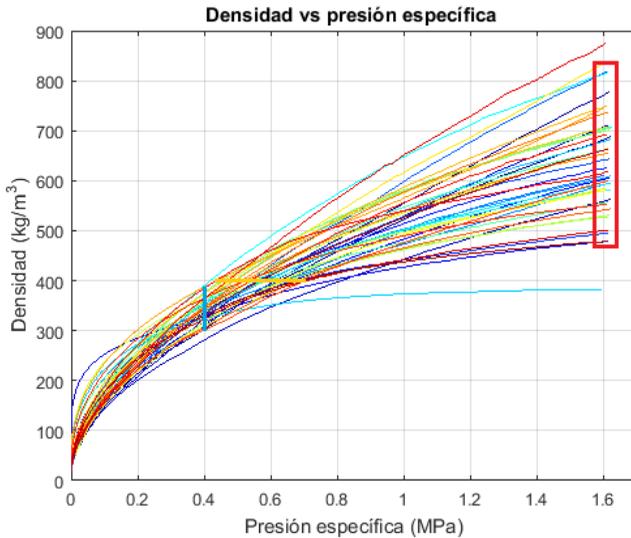


Figura 5. Densidad (kg/m^3) - presión específica (MPa) de PET triturado correspondiente a los ensayos con nombre PETTRI.

Tabla 4. Resultados para las gráficas tipo B donde se muestra valores de presiones específicas en MPa para una densidad de 400Kg/m^3 en el prensado de PET sin triturar y triturado.

GRAFICAS TIPO B		P. ESPECÍFICA (MPa)	P. ESPECÍFICA MEDIA (MPa)
DENSIDAD $\rho = 400 \text{ Kg/m}^3$	PET SIN TRITURAR	0,6-0,8	0,70
	PET TRITURADO	0,4-0,7	0,55

Para una densidad de 400Kg/m^3 , se necesita una prensa con presión específica de 0.7 MPa tratando material PET sin triturar.

Para una densidad de 400Kg/m^3 se necesita una prensa con presión específica de 0.55 MPa tratando PET triturado, lo que supone una reducción del 21% respecto al PET sin triturar.

- **Poliestireno extruido (XPS)**

Tras realizar los ensayos, se han obtenido las siguientes graficas que caracterizan su comportamiento:

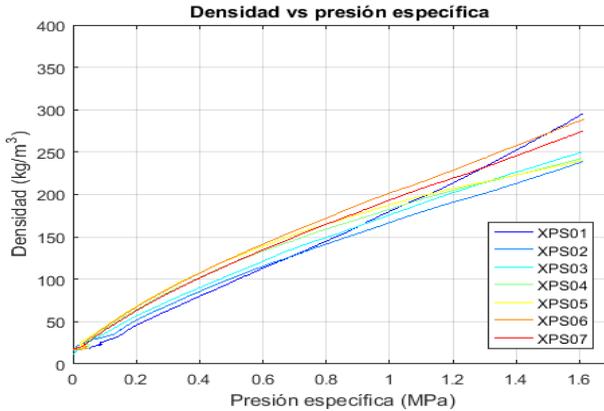


Figura 5. Densidad (kg/m³) - presión específica (MPa) de XPS sin triturar.

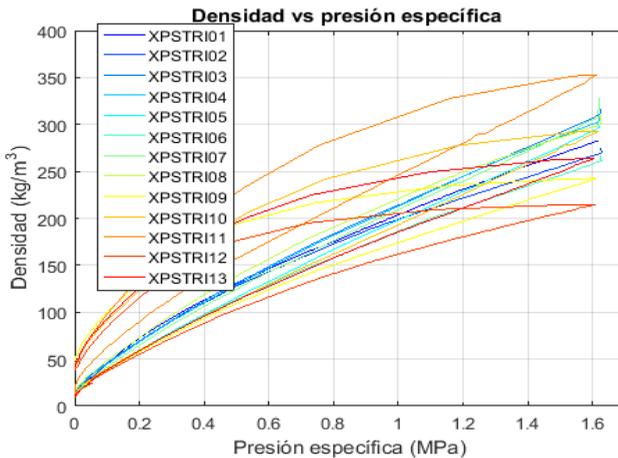


Figura 6. Densidad (kg/m³) - presión específica (MPa) de XPS sin triturado. Incluye curvas de recuperación del material tras el prensado (XPSTRI).

Se observa una similitud en la dispersión de las gráficas de las muestras.

La forma que tenga el material a la entrada de la prensa no afecta, en cierta medida, a los resultados en el proceso de prensado.

Los resultados de densidades máximas alcanzadas son idénticos. Lo mismo ocurre respecto a ratios de compresión a presión máxima y en porcentajes de cambio de volumen según la densidad.

Analizando visualmente las muestras, puede existir más de un subtipo de material dentro del poliestireno extruido ya que se observa un comportamiento diferente en la recuperación del material.

Estudio económico

Tomamos de partida el dato de la cantidad de residuos totales de envases ligeros del año 2014, en la tabla superior se puede observar que se ha recuperado un total de 1038,88 toneladas en el total del año.

De éstas 1038.88 Tn de envases ligeros recuperados, un 52% corresponde a envases de plástico. ^[5]

$$1038.88 \text{ Tn} * 0.52 = 540.22 \text{ Tn (envases plasticos)}$$

Y a su vez, un 60% corresponde a envases de PET:

$$540.22 \text{ Tn} * 0.60 = 324.13 \text{ Tn (PET)}$$

Se deberá seleccionar una prensa que supere la presión específica para cada uno de los estados que se encuentra el PET:

Tabla 5: Características orientativas de maquinaria para el embalaje de PET.

MODELO	Sección bala	Pe Max MPa	Boca tolva	Potencia (kW)	r _{salida} kg/m ³	Precio € aprox.
A-3	70x60	0,58	120x60	11,2	440	43.085
B-5	80x70	0,78	110x70	18,6	470	57.096

- Modelo de prensa para PET sin triturar cuya presión específica máxima sea superior a 0.7 MPa.
Mod. B-5: $0.78MPa \geq 0.7 MPa$
- Modelo de prensa para PET triturado cuya presión específica máxima sea superior a 0.55 MPa.
Mod. A-3: $0.58MPa \geq 0.55 MPa$

Se ha elegido el modelo T-800/25 como máquina trituradora, ya que tiene una producción suficiente para alimentar cualquiera de las dos prensas seleccionadas.

Tabla 6. Características orientativas de maquinaria para el triturado de PET.

MODELO	Potencia CV	Boca entrada	Boca salida	Producción t/h papel	Precio € aprox.
T-800/25	25	800 x 1000	800 x 460	5	20.783 €

El costo total de la inversión para PET triturado superará en 6772 € a la inversión de PET sin triturar.

En segundo lugar, se han de contemplar los gastos para ambas vías de estudio; para el PET sin triturar, se obtendrá un coste total

de 23120,8 €, en cambio, triturando el PET, aumentaremos hasta 31520,8 €.

Como observación, se ha considerado un uso diario de la maquinaria de 2h debido a la cantidad de PET a procesar, por lo que el consumo está calculado para ese tiempo.

Los ingresos anuales por la venta de producto separado ascienden a 48620€. Como la ciudad elegida es la misma y para el mismo año, se tomará como referencia la misma cantidad.

Una vez se hayan definido los ingresos y los gastos, se podrá calcular el beneficio neto anual para cada proceso.

A consecuencia de tener unos gastos más elevados triturando el PET, el beneficio será menor. Obteniendo así una diferencia anual de 8400 €.

Por último, se calculará el TIR para cada procedimiento:

Tabla 7. Resultados del TIR y VAN de la inversión total de la planta para PET triturado.

TIR DE LA INVERSION	26%	
VAN DE LA INVERSION	152.783,12 €	10.185,54 €

Tabla 8. Resultados del TIR y VAN de la inversión total de la planta para PET sin triturar.

TIR DE LA INVERSION	44%	
VAN DE LA INVERSION	265.239,80 €	17.682,65 €

Se obtiene una mayor rentabilidad prensando directamente PET sin triturar, como se ha visto anteriormente, el valor del TIR es mayor.

Este valor es meramente teórico y su obtención es a efectos comparativos; sirve para darnos una idea que proceso resulta más rentable.

CONCLUSIONES

En relación a los efectos del triturado en el posterior proceso de prensado, se pueden destacar varios aspectos en relación a los materiales ensayados:

1. Para el Tereftalato de Polietileno (PET), un triturado previo al proceso de prensado no afecta en la dispersión de las muestras, ya que esta depende fundamentalmente del material.

2. El aspecto más importante del efecto del triturado es que se obtiene una mayor densidad de salida a baja presión específica.

3. Tras realizar un estudio económico sobre la rentabilidad de triturar el PET recuperado previamente al prensado, se puede concluir que se obtiene una mayor rentabilidad prensando directamente PET sin triturar, por lo que se desaconseja proceder al triturado del PET.

4. Respecto al Poliestireno Extruido (XPS), se ha comprobado que el triturado no afecta al posterior proceso de prensado, por lo que se deduce que el proceso de triturado carece de sentido. Es por esto que no se ha llevado a cabo ningún estudio económico para comprobar su rentabilidad. Sin embargo, si se ha detectado un aspecto muy importante en el estudio de prensado de este material; se observa más de un tipo de material dentro del poliestireno extruido con comportamientos diferentes al ser compactado. Se dejará así la puerta abierta a futuros proyectos para estudiar en profundidad estos subtipos de materiales que engloban el Poliestireno extruido.

Por lo tanto, como resultado del presente proyecto, se puede concluir que no es recomendable, ni desde el punto de vista técnico ni económico, el triturado de envases de PET o XPS.

REFERENCIAS

- [1] Diseño de máquinas. ROBERTL.NORTON.
- [2] Manual McGraw-Hill de reciclaje. Herbert F. Lund.
- [3] Construcción y diseño de una prensa hidráulica. Santiago Sánchez López de Lerma y Francisco José Valero Chuliá. UPV ETSI
- [4] Larburu Arrizabalaga, Nicolás. Máquinas Prontuario. Técnicas, máquinas, herramientas (1989).
- [5] DEPARTAMENT DE MEDI AMBIENT (2014). *MEMÒRIA ANUAL DE GESTIÓ 2014*. [PDF FILE]. Recuperado de http://www.alcoi.org/export/sites/default/es/areas/medi_ambient/gestio_mediambiental/memoria_anual/descargas/Mem2014/10_5-6residus_convenis.pdf
- [6] Hung, Alex; Ip, Dora; Comstock, Nathan, An Investigation into Styrofoam Recycling on Campus, The University of British Columbia, (2010).
- [7] Ecoembes (2014). Plantas de selección de envases ligeros. [PDF FILE]. Recuperado de https://www.ecoembes.com/sites/default/files/archivos_estudios_idi/plantas-de-seleccion-de-envases-ligeros.pdf

“Caracterización física y acústica de agregados granulares de naturaleza cerámica”

**T.V. Esquerdo Lloret ^{(1)†††}, A.V. Nadal-Gisbert ⁽²⁾,
C. Puchades González ⁽²⁾, L.M. Pérez ⁽²⁾**

*(1) Instituto de Diseño para la Fabricación y Producción Automatizada
Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales,
Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Universitat Politècnica de València
Plaza Ferrándiz y Carbonell, 1 03801 Alcoy (Alicante)*

*(2) Instituto de Tecnología de Materiales (ITM).
Universitat Politècnica de València, Campus de Alcoy
Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, 03801, Alcoy, Alicante (España)*

RESUMEN

El objetivo del trabajo, es la enumeración de las técnicas de caracterización física y acústica de agregados granulares y la determinación de dichas propiedades en el estudio de un material compuesto fabricado a partir de áridos ligeros de vermiculita y empleando como adhesivo cemento Portland. Se incluye en el presente artículo una descripción de los materiales utilizados, los principales factores considerados en el proceso de selección, las normativas aplicadas en las técnicas de caracterización, tanto para determinar las propiedades acústicas (impedancia acústica y coeficiente de absorción) como las no acústicas (Tortuosidad, Porosidad y Resistividad al flujo). Los resultados obtenidos han sido evaluados y comparados en relación aquellos definidos por estudios previos, que han permitido la definición de modelos matemáticos citados a lo largo del texto y que demuestran la relación establecida, en el momento de la fabricación, de ambos tipos de propiedades acústicas y no acústicas. Los materiales compuestos biodegradables aquí propuestos se corresponden con una solución con beneficios para el medio ambiente, una alternativa sostenible a los materiales compuestos de uso extendido en el sector de la construcción, de naturaleza sintética.

††† Contacto: T.V. Esquerdo; Tel. 966528477; e-mail: toesllo1@mcm.upv.es

INTRODUCCIÓN

El uso de materiales sostenibles se está convirtiendo en una práctica común para la reducción de ruido en las industrias de la edificación e ingeniería civil. Entre estos materiales, los minerales a base de silicatos ofrecen ventajas interesantes: bajo coste y densidad, así como buen comportamiento acústico y térmico. La vermiculita es un producto derivado ligero obtenido a partir de áridos naturales que ofrece buenas propiedades térmicas y acústicas, por lo que es susceptible de ser utilizado en el ámbito de la acústica de la edificación.

MÉTODOS EXPERIMENTALES

Materiales y procesos

El material base estudiado en este trabajo se ha seleccionado a partir de sus propiedades físicas: ligereza, resistencia térmica a altas temperaturas y buenas propiedades desde un punto de vista medioambiental. Otra característica del material es la posibilidad de emplear cemento como elemento ligante, lo cual confiere variedad en la obtención de formas constructivas. Las probetas se han elaborado con vermiculita suministrada por el fabricante Perlindustria.

La denominación en el caso de la vermiculita está dada a partir del tamaño de las partículas. El menor tamaño disponible es la vermiculita Tipo 0 que está formada por partículas muy finas de polvo. Para el estudio realizado se ha seleccionado un tamaño de grano medio: Vermiculita Tipo 2.

A partir de la proporción en peso de vermiculita-cemento-agua, la preparación de las muestras se ha iniciado disolviendo cemento

blanco Portland BL I 52,5 R de alta resistencia en el agua hasta conseguir una mezcla homogénea: preparación de la lechada de cemento. Seguidamente, se vierte lentamente la vermiculita con mezcladora rotativa, para reducir en lo posible la formación inicial de grumos. El tiempo de amasado ha variado entre 10 y 15 min.

El amasado automático se ha realizado mediante una amasadora mecánica disponible en el DIMM, de tipo orbital marca BOMANN, modelo CB 332, siguiendo la norma UNE EN 196-1 [1].

Propiedades físicas

Propiedades mecánicas

La norma UNE-EN 196-1 [1] describe el método para la determinación de las resistencias mecánicas a compresión y a flexión, de probetas prismáticas de dimensiones 40 x 40 x 160 mm. A partir de los ensayos realizados, se calcula la resistencia a flexión R_f (en megapascales) mediante las fórmulas siguientes:

$$R_f = \frac{1,5 F_F l}{b^3} \text{ (megapascales, MPa) } \quad (1)$$

donde F_F es la carga aplicada en la mitad del prisma en la rotura (en Newtons), l distancia entre soportes (mm) y b el lado de la sección cuadrada del prisma.

Porosidad

Uno de los elementos que resultan determinantes para estudiar y caracterizar el comportamiento acústico de un material es la porosidad. Los materiales porosos están formados por partículas en contacto que dejan volúmenes interconectados de aire entre ellas. Cuando una onda acústica atraviesa estos materiales y entra en

contacto con estos huecos, el aire de su interior es obligado a moverse, transformándose parte de la energía acústica en calor.

La porosidad se mide utilizando el método de saturación de agua como indica Vašina et al.^[2]. Con el objetivo de eliminar las burbujas de aire en su interior, todas las muestras se secan a 70 °C durante 10 días. Posteriormente, se pesan las muestras en seco. A continuación, se introducen en un recipiente, cubriéndose completamente con agua (la densidad del agua es $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$) y se hace el vacío. Después de 24 horas se retiran cuidadosamente y se pesan de nuevo obteniendo m_{saturada} .

La porosidad abierta o conectada se calcula mediante la expresión $\Omega = V_w / V_s$, donde V_w es el volumen de agua en la muestra saturada y V_s es el volumen total de la muestra.

El volumen de agua que contiene el material poroso se puede encontrar como

$$V_w = \frac{m_{\text{saturada}} - m_{\text{seca}}}{\rho_w} \text{ (Kg/m}^3\text{)} \quad (2)$$

donde m_{saturada} y m_{seca} son la masa saturada y la masa de la muestra seca, respectivamente.

Tortuosidad

Este parámetro adimensional indica la facilidad de una onda acústica a propagarse en el interior del material.^[3]

La tortuosidad se mide utilizando el método indicado por Brown^[3], basado en una analogía electroacústica. El ensayo consiste en determinar la corriente que circula entre dos placas circulares de cobre (electrodos) al ser sometidas a una diferencia de tensión, estando intercalado entre ambos electrodos el material a analizar.

El paso de corriente de un electrodo se garantiza con un fluido conductor (electrolito) entre ambos. La disolución empleada es el sulfato de cobre (CuSO_4) disuelto al 10 %.

La resistividad eléctrica se calcula entonces a través de mediciones de corriente y voltaje. Siendo ρ_c y ρ_f las resistividades medidas del material saturado y del fluido, respectivamente, y, la porosidad(Ω), la tortuosidad viene dada por la siguiente ecuación: [3]

$$T = \Omega \frac{\rho_c}{\rho_f} \text{ (Adimensional) } (3)$$

Resistencia al flujo

La propagación del sonido en un medio poroso puede ser descrita a partir de la dificultad que ofrece este material al paso de una corriente de aire: resistividad al flujo. Este parámetro aparece en todos los modelos matemáticos y es clave para conocer el comportamiento del material, ya que da una idea de la pérdida de energía que se produce en el interior del mismo

La resistividad al flujo de aire R_f está definida como el cociente entre la diferencia de presión en ambas caras de la sección recta de un material y el caudal volumétrico q_v que atraviesa la muestra, es decir: $R_f = \Delta P/q_v$, donde ΔP es la diferencia de presión a través del espesor del material poroso entre las dos caras, en N/m^2 y q_v es el caudal volumétrico que atraviesa la superficie de la muestra (m_3/s).

La norma UNE-EN 29053 [4] indica dos métodos para determinar la resistividad al flujo de aire de materiales porosos empleados para aplicaciones acústicas: un primer método con el empleo de un flujo de aire unidireccional y un segundo método con un flujo de aire alterno. El ensayo consiste en determinar la diferencia de presión

en ambas caras de la probeta cuando es atravesada por una corriente de aire.

Una alternativa al uso de una corriente de aire para cuantificar la resistividad al flujo que ofrece un material es el método basado en el tubo de ondas estacionarias con dos micrófonos: Método de Ingard-Dear [5], y se basa en suponer que la caída de presión en el interior del tubo es lo suficientemente pequeña para considerar que la velocidad del aire es igual en ambas caras de la probeta y que su espesor es mucho menor que la longitud de onda (suposición de que la velocidad es constante en el interior del material).

Propiedades acústicas

Coefficiente de absorción acústico

El coeficiente de absorción del material poroso se ha determinado experimentalmente a partir de un ensayo en tubo de impedancia según la norma UNE-EN ISO 10534-2 [6] en el rango de frecuencia 200- 2200 Hz. Para ello se ha adaptado un tubo metálico y se ha construido un portamuestras que ajusta exactamente con las muestras y da continuidad al tubo de diámetro interior 72 mm. La distancia entre el altavoz y la muestra es 1600 mm, garantizando un frente de onda plano en el material poroso.

El coeficiente de absorción α para una muestra de espesor h con incidencia normal de una onda acústica se puede determinar a partir de la expresión:

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_S - \rho_0 c_0}{Z_S + \rho_0 c_0} \right|^2 ; \text{ (Adimensional) (4)}$$

siendo Z_S impedancia característica superficial, ρ_0 la densidad del aire y c_0 la velocidad de propagación de las ondas acústicas en el fluido (aire). [2]

MODELOS MATEMATICOS

Modelo matemático para materiales granulares

Se encuentran en la vasta literatura modelos matemáticos de gran precisión que describen el comportamiento de los materiales porosos y granulares, similares a los propuestos en el presente artículo, ante estímulos sonoros. Se expone en estos modelos la relación existente entre propiedades no acústicas: La tortuosidad (T), la porosidad (Ω), la resistividad al flujo (R_f), la desviación estándar del tamaño de los poros (σ) y la propiedad acústica: el coeficiente de absorción acústico, que es una medida asociada a la impedancia acústica, así como la incidencia de un factor sobre otro.

Según Vašina et al [2], existe una fuerte relación directa entre la resistividad al flujo, el tamaño de las partículas y la concentración del aglomerante utilizado definida por las propiedades acústicas antes mencionadas y al cambio de estado energético producido en la absorción:

Los citados autores proponen las expresiones:

$$C_b(\omega) = \Omega(\gamma P_0)^{-1} [\gamma - (\gamma - 1)/\rho_x (\varepsilon N_{pr})]; (\text{Pa}^{-1}) \quad (5),$$

que representa la compresibilidad del fluido, o la propia capacidad de este a reducir su volumen ante la aplicación de una presión externa. Se considera en esta expresión el comportamiento térmico del sistema.

$$\rho_b(\omega) = \rho_0 \frac{T^2}{\Omega} \left[1 + \frac{F(\varepsilon)}{(T\varepsilon)^2} \right] = \rho_0 \frac{R_f^2}{\Omega} \rho_x(\varepsilon); (\text{Kg}/\text{m}^3) \quad (6),$$

que representa la densidad dinámica, como los parámetros cuya relación mutua define el valor de la impedancia acústica característica:

$$Z_b(\omega) = (\rho_0 c_0)^{-1} \sqrt{\frac{\rho_b(\omega)}{C_b(\omega)}}; (\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}) \quad (7)$$

dependiente de la velocidad angular (ω).

En las anteriores expresiones, $F(\varepsilon)$ es la llamada función de corrección de la viscosidad, N_{pr} es el número de Prandtl y, γ es la relación entre los calores específicos. ρ_0 es la densidad del aire, P_0 la presión atmosférica y c_0 la velocidad de propagación del sonido. La función de la corrección de la viscosidad considera las dimensiones y forma de los poros en el material compuesto.

$$F(\varepsilon) \cong \frac{1+a_1\varepsilon+a_2\varepsilon^2}{1+b_1\varepsilon}; (\text{Adimensional}) \quad (8)$$

Los parámetros de la función de corrección $F(\varepsilon)$ son $\varepsilon = \sqrt{-i\omega\rho_0 q^2/R\Omega}$, $a_1 = \theta_1/\theta_2$, $a_2 = \theta_1$, $b_1 = a_1$, $\theta_1 = \frac{4}{3}e^{4\xi} - 1$, $\theta_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}e^{\frac{3\xi}{2}}$, donde $\xi = (\sigma \ln 2)^2$ y σ la desviación estándar del tamaño de los poros antes mencionada. Los valores de θ_1 y θ_2 (adimensionales) describen la forma de los poros formados en los intersticios de la unión de los granos de material aligerante con el aligerante cerámico. En particular, las expresiones aquí expresadas para estos coeficientes, se corresponden con unos poros de forma esférica.

En función la impedancia característica (Z_b), y el espesor de la muestra (h), expresada en metros) y la constante de propagación k_b ($k_b = \omega\sqrt{\rho_b(\omega)C_b(\omega)}$) se obtiene la impedancia superficial:

$$Z_s = Z_b \cot h(-ik_b h); (\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}) \quad (9)$$

En definitiva, el coeficiente de absorción acústico viene dado por la siguiente expresión:

$$\alpha = 1 - \left| \frac{z_s - \rho_0 c_0}{z_s + \rho_0 c_0} \right|^2; \text{ (adimensional) (10)}$$

Modelo matemático para materiales fibrosos

En el caso de los materiales fibrosos con porosidades cercanas a 1 (materiales muy porosos), el modelo matemático más citado es el propuesto por Delany y Bazley [7]. Dos parámetros principales se definen, la impedancia característica (Z_c) y la constante de propagación (k_b):

$$Z_c = \rho_0 c_0 \left[1 + 9,08 \left(10^3 \frac{f}{R_f} \right)^{-0,75} - j 11,9 \left(10^3 \frac{f}{R_f} \right)^{-0,73} \right];$$

(Pa·s/m) (11)

$$k_b = \frac{\omega}{c_0} \left[1 + 10,8 \left(10^3 \frac{f}{R_f} \right)^{-0,70} - j 10,3 \left(10^3 \frac{f}{R_f} \right)^{-0,59} \right];$$

(adim.) (12)

Estas expresiones dependen de la resistividad al flujo (R_f , expresada en N.m⁻⁴.s), la velocidad angular (ω , Rad/s) y la frecuencia f . del sonido incidente (Hertzios, Hz) La relación entre la frecuencia y la resistividad al flujo oscila entre los siguientes valores:

$$0,01 \leq \frac{f}{R_f} \leq 1$$

Al igual que con los materiales no fibrosos, la impedancia característica permite obtener la impedancia superficial en función de la constante de propagación(k_b), y el espesor de la muestra(h) y la impedancia característica(Z_c):

$$Z_s = Z_c \coth(-ik_b \cdot h) \text{ (Pa}\cdot\text{s/m)} \quad (13)$$

A partir de la impedancia se puede obtener el coeficiente de absorción acústica de la misma manera que se obtiene para los materiales granulares ^[10].

El citado modelo empírico propuesto por estos investigadores y avalado por posteriores investigaciones se basa en el análisis matemático de una gran base de datos producto de un proceso de ensayo muy preciso. Los estudios posteriores han logrado ajustar el modelo a otros materiales, obteniendo en su experimentación nuevos valores, entre otros, podemos citar los trabajos desarrollados por Garai y Pompoli ^[8], Allard J.-F. y Champoux ^[9] y Miki ^[10].

A modo comparativo, los modelos definidos para materiales granulares y fibrosos, dependen de los mismos parámetros: La porosidad la tortuosidad y la resistividad al flujo. Así, en general para un mayor grado de porosidad, dispersión del tamaño de los poros, dificultad de conexión entre un poro y otro y la resistividad al flujo mayor será la capacidad del material para convertir la energía sonora en energía calorífica y otros tipos de energía en menor proporción.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los materiales reciclados se caracterizan por haber soportado diferentes ciclos de reprocesados que provocan degradación térmica y por contener frecuentemente una serie de impurezas de distinta procedencia.

Los resultados muestran que en los casos estudiados, un ABS reprocesado dos veces tiene una pérdida de propiedades de un 5 % y la presencia de impurezas del 4 % una pérdida de propiedades de un 15 %. La suma de estos dos factores da como resultado una pérdida de propiedades del 20 %. El factor de la degradación térmica tiene un peso de un 25 %, mientras que el otro factor, la presencias de impurezas, tiene un peso del 75 % en la caída de propiedades.

Los resultados obtenidos para las distintas proporciones en peso de Vermiculita (Tipo 2) - Cemento - Agua se muestran en la tabla siguiente:

Muestra	Porosidad (%)	Resistividad al flujo (Pa·s/m²)	Tortuosidad
V2 20-70-49	0.76	7612	1.33
V2 20-80-64	0.82	2154	1.56
V2 20-70-56	0.77	4736	1.63
V2 20-100-60	0.72	5433	1.59
V2 20-80-48	0.74	8923	1.78
V2 20-60-48	0.87	2630	2.21

La porosidad obtenida indica la presencia de un material altamente poroso y con resistividades al flujo elevadas. La relación entre porosidad y tortuosidad parece indicar que el incremento de la porosidad va acompañado de un incremento de la tortuosidad.

CONCLUSIONES

Los materiales bajo estudio, de elevada porosidad y tortuosidad, presentan una gran resistividad al flujo, lo que los convierte en materiales con un buen comportamiento como absorbentes de la contaminación acústica. El criterio para llegar esta conclusión es la comparativa con estudios previos con materiales de naturaleza similar y que se presentan en la literatura científica como solución a los efectos del ruido en entornos habitados.

A partir de los modelos matemáticos de la literatura se ha definido un sistema de ecuaciones capaz de predecir el comportamiento acústico de la familia de materiales para el aislamiento acústico de ámbitos habitables. La posibilidad de definición del modelo matemático permitirá producir el material deseado ante un requerimiento específico en un entorno o ambiente conocido.

Los modelos matemáticos se acercan a la realidad y relacionan parámetros acústicos y no acústicos, siendo los primeros dependientes de los segundos. Los parámetros no acústicos antes mencionados (Tortuosidad, Porosidad y Resistividad al flujo), se introducen en el material durante la fabricación. Es estos procesos, donde al modificar factores como la temperatura, presión de compactación, porcentajes del material cerámico aligerante y del ente cerámico aglomerante, el tiempo de exposición altas temperaturas, el tiempo de secado, etc.

El material propuesto en el presente trabajo es una solución de alto impacto medioambiental al ser biodegradables, tanto los procesos utilizados como el origen de los materiales se consideran sostenibles.

REFERENCIAS

- [1] UNE-EN 196-1:2005 Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas
- [2] M. Vašina, D.C. Hughes, K.V. Horoshenkov, L. Lapcik, *Applied Acoustics*, 67 (2006) 787-796.
- [3] Brown, R. Connection between formation factor for electrical resistivity and fluid-solid coupling in Biot's equation for acoustic waves in fluid-filled porous media. *Geophysics*, 45 (5), 1269-1275, 1980.
- [4] UNE- EN 29053. Acústica. Materiales para aplicaciones acústicas. Determinación de la resistencia al flujo de aire. UNE -EN 29053-1994.
- [5] Ingard, K. and Dear, T. Measurement of acoustic flow resistance. *Journal of Sound and Vibration*, 103 (24), 567-572, 1985.
- [6] UNE-EN ISO 10534-2:2002 Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia.
- [7] Delany M. E. and Bazley E. Acoustical properties of fibrous absorbent materials, *Applied Acoustics* 3, 1970, pp. 105-116
- [8] Garai y Pompoli A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications, *Applied Acoustics* 66 (2005) 1383-1398
- [9] Allard J.-F. and Champoux Y., New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials, *J. Acoust. Soc. Am.* 91(6), 1992, pp. 3346-3353
- [10] Miki Y., Acoustical properties of porous materials - Modifications of Delany-Bazley models, *J. Acoust. Soc. Jpn (E)*. 11(1), 1990, pp. 19-24
- [11] R. Maderuelo-Sanz, A.V. Nadal-Gisbert, J.E. Crespo-Amorós, F. Parres-García, *Applied Acoustics*, 73 (2012) 402-408

- [12] J. Carbajo, T.V. Esquerdo-Lloret, J. Ramis, A.V. Nadal-Gisbert, F.D. Denia, *Materiales De Construcción*, 65 (2015).
- .

“Normas para la publicación en la colección Cuadernos de investigación de la Ingeniería”

E. Ramis Claver ⁽¹⁾, A.V. Nadal-Gisbert ^{(1)*}, J.M. Gadea Borrell ⁽²⁾
J.E. Crespo ⁽¹⁾**

*(1) Instituto de Tecnología de Materiales, Universitat Politècnica de València
Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, Alcoi, (Alicante)*

*(2) Centro de Tecnologías Físicas, Universitat Politècnica de València
Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, Alcoi, (Alicante)*

RESUMEN

El método de elección y selección de materiales a través del programa CESEdupack, nos permite un proceso optimizado de selección de materiales en el campo de la ingeniería de materiales. En los procesos de investigación de nuevos materiales es una herramienta muy útil para ubicar nuestros nuevos materiales y sus ventajas e inconvenientes respecto al universo de materiales existentes en el al mercado. Frente a los métodos tradicionales, el método del profesor Mike Ashby integra en el proceso de elección y selección los conceptos de función, forma, proceso y material.

*** Contacto: A.V. Nadal-Gisbert; Tel. 966528478; e-mail: anadal@dimm.upv.es

INTRODUCCIÓN

Fundamento del Método Ashby ^[1-2]

El proceso de elección y selección supone en cualquier aplicación para un producto la consideración de dos o más propiedades del material a utilizar. Propiedades que pueden ser mecánicas, eléctricas, magnéticas, ópticas, térmicas y químicas. El método se basa en la determinación de los índices de rendimiento que nos permitirán realizar el proceso de elección y selección. Estos índices se representan mediante la siguiente expresión:

$$IR = y^n/x$$

Donde IR (índice de rendimiento), y (propiedad del material), n (valor numérico que depende del sistema de cargas), x (propiedad del material)

En el proceso de elección y selección se pueden emplear varios de estos índices, en función de los requerimientos que exijamos al producto. El método se basa en métodos cuantitativos y en concreto en el proceso maximin o minimax (se emplea también en teoría de decisión).

Ashby plantea la necesidad de elaborar una función objetivo que pueda ser expresada como el producto de tres funciones independientes:

$$F(x) = H(y)G(z)Z(w)$$

Tan solo si es posible esta separación, el proceso de elección y selección se podrá realizar.

- Se plantea max. (min) una función objetivo (ej. (minimizar masa, maximizar rigidez). Se obtiene una ecuación 1

- Se plantea una restricción max. (min), (ej. Maximizar tenacidad, minimizar coste). Se obtiene otra ecuación 2
- Se elimina la variable dependiente de la selección (área, radio) y se obtiene la función objetivo a maximizar/minimizar:

$$\min F(x) = H(y)G(z)Z(w)$$

H(y) contiene parámetros funcionales (ej. carga a soportar (definida)).

G(z) contiene parámetros geométricos (ej. altura de una columna (definido)).

Z(w) contiene las propiedades del material. Índice de rendimiento.

Luego:

$$\min F(x) = \min H(y)G(z)Z(w)$$

$$\min F(x) \Rightarrow \min Z(w) \Leftrightarrow \max(1/Z(w))$$

Las gráficas de elección y selección fueron implementadas en un programa informático elaborado por GRANTA DESIGN (Construtor y Selector). La Universitat Politècnica de València dispone de una versión educacional CESEdunpack, cofinanciada por el Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

- Elección y selección de materiales para una lama de persiana resistente y ligera.
 1. Planteamos el sistema de cargas: Flexión (Figura 1)

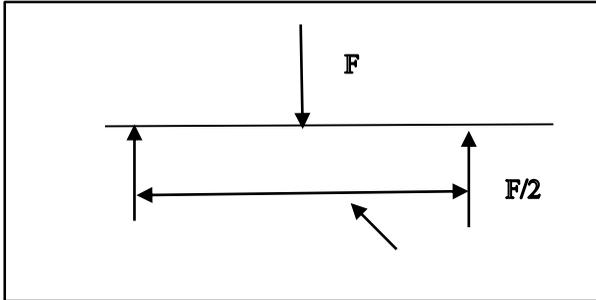


Figura 1. Sistema de cargas: Flexión.

Hacemos la hipótesis de carga y suponemos que la lama trabaja como una viga trabajando a flexión y carga puntual de valor igual a F , con una distancia entre apoyos igual a l .

Planteamos la función objetivo a partir de una de los requerimientos exigidos: ligera

$$\text{Min } m = \rho l A$$

Dónde: ρ es la densidad, A es la sección de la lama y l la longitud de la lama, m la masa.

Planteamos la restricción a partir de una de los requerimientos exigidos: Resistente: Max resistencia (flexión):

$$\sigma = \frac{M_f}{W_r} \leq \frac{\sigma_f}{S_f}$$

Donde σ es la tensión a la que está sometida la lama, M_f . El momento flector máximo que está en el centro de la lama y es igual a:

$$M_f = \frac{F}{2} * \frac{l}{2}$$

El módulo resistente W_r para una sección supuesta circular es:

$$W_r = \frac{A^2}{4\pi}$$

S_f es el coeficiente de seguridad y σ_f la tensión del fallo del material*

*La tensión de fallo del material puede ser a tracción o compresión, a flexión o cortadura, límite elástico o tensión de rotura en función de la naturaleza del material y/o criterios de diseño.

Eliminando la variable dependiente de la selección; A^* y operando obtenemos:

$$\text{Min } m \Rightarrow \text{Min } \frac{\rho}{\sigma_f^{2/3}} \Leftrightarrow \text{Max } \frac{\sigma_f^{2/3}}{\rho}$$

* A es la variable dependiente de la selección, debido a que la selección del material o los materiales a elegir está vinculada al hecho de haber planteado en la restricción maximizar resistencia.

Con este índice rendimiento entramos en el CES Edupack.

Seleccionamos el nivel 1 y la opción “universo de materiales”. Aparecen a la izquierda de la pantalla el conjunto de materiales sobre el que realizaremos la selección. Figura 2.

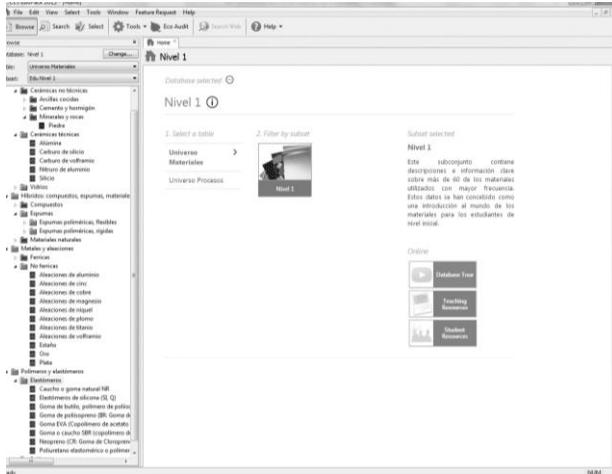


Figura 2. Nivel de elección y selección.

Seguidamente optamos por la opción “graph”. Figura 2

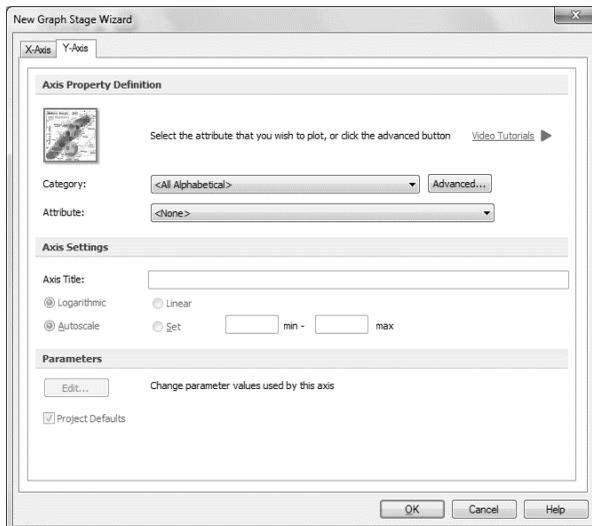


Figura 2. “Graph”.

A continuación, elegimos propiedades para los ejes Y y X, el tipo de propiedades y el eje donde se representan. Figura 3.

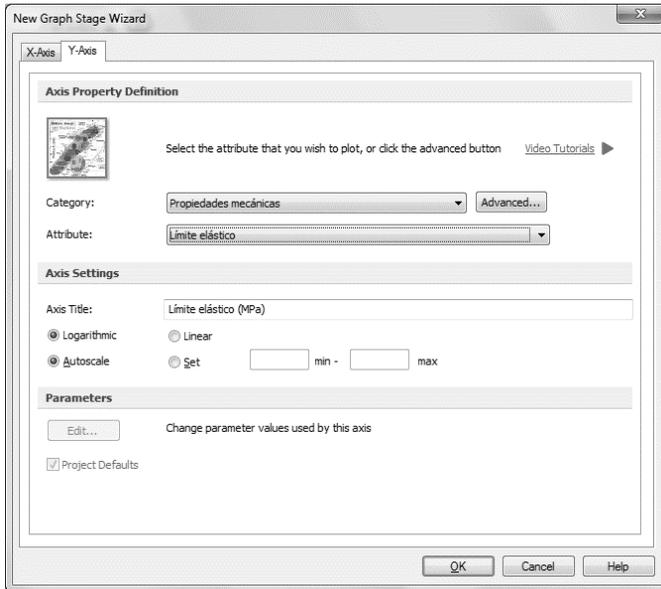


Figura 3. Propiedades y ejes de representación.

Como ya hemos determinado nuestro índice de rendimiento y hemos elegido las de propiedades para los ejes Y y también X. El conjunto de materiales ordenado según este criterio aparece en la Figura 4.

Como podemos ver en la Figura 5 aparecen seleccionados una serie de materiales que compiten en el proceso de selección. En nuestro caso y como ejemplos aparecen: 1) dentro de las maderas, las de corte paralelo al grano, bambú. 2) otros que nos pueden sorprender; papel y cartón, el cartón puede ser también una solución para determinado número de aplicaciones en forma de lama. 3) en el campo de los polímeros; el PVC, la poliamida y le nylon. 4) Ya en el campo de materiales metálicos, las aleaciones de aluminio, magnesio, titanio y cobre. 5) Si vemos los materiales compuestos nos aparece el CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic), entre otros. Observamos que el programa nos elige un conjunto de materiales, naturales, poliméricos, metálicos y materiales compuestos que compiten entre ellos, obviamente algunos ya se emplean en la fabricación de lamas, como la madera o las aleaciones de aluminio y el PVC y otros aparecen como potencialmente útiles.

En el proceso de elección y selección siempre se plantean varias funciones objetivos y restricciones, hasta llegar a un proceso de selección más refinado. El programa también permite el proceso de selección sobre una selección previa y permite encadenar una selección tras otra.

Otra posibilidad del programa es aportar información sobre los productos a elegir como se puede ver en la Figura 6.



Figura 6. Información técnica sobre un determinado material.

CONCLUSION

Para todos aquellos que trabajamos en nuevos materiales, la caracterización de estos nuevos materiales y su ubicación en las gráficas de Ashby es indispensable, de ahí que sea tremendamente interesante reservar un apartado en nuestros artículos para el método y las gráficas de Ashby ubicando nuestros nuevos materiales en el universo de materiales existentes en el mercado.

REFERENCIAS

- [1] Ashby M.F. Materials Selection in Mechanical Design. Ed. Butterworth-Heinemann. Oxford (2000).
- [2] Ashby M.F et al. Materials (Engineering, Science, Processing and Design) Ed. Butterworth-Heinemann. Oxford (2008).

“Análisis de la estructura interna de materiales porosos de matriz rígida elaborados con base cementicia”

**T.V. Ezquerdo Lloret ^{(1)§§§}, P. Micó ⁽²⁾, A.V. Nadal-Gisbert ⁽³⁾,
J. Segura Alcaraz ⁽⁴⁾, E. Juliá Sanchis ⁽⁴⁾**

*(1) Instituto de Diseño para la Fabricación y Producción Automatizada,
Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Universitat Politècnica de València
Plaza Ferrándiz y Carbonell, 1 03801 Alcoy (Alicante)*

*(2) Departamento de Informática de Sistemas y Computadores,
Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Universitat Politècnica de València
Plaza Ferrándiz y Carbonell, 1 03801 Alcoy (Alicante)*

*(3) Instituto de Tecnología de Materiales,
Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Universitat Politècnica de València
Plaza Ferrándiz y Carbonell, 1 03801 Alcoy (Alicante)*

*(4) Centro de Tecnologías Físicas,
Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Universitat Politècnica de València
Plaza Ferrándiz y Carbonell, 1 03801 Alcoy (Alicante)*

RESUMEN

En la caracterización de los materiales, la estructura interna del material está determinada por la porosidad o la tortuosidad y condiciona diversos comportamientos como la capacidad de absorción o la ligereza. Existen diversas técnicas para su cuantificación experimental, necesitando equipamiento específico, siendo en ocasiones un proceso laborioso o impreciso. En este trabajo se analizan diversas metodologías para cuantificar estos parámetros de caracterización interna en materiales granulares de base cementicia aligerados con productos naturales expandidos. El estudio demuestra que estas técnicas experimentales pueden emplearse para cuantificar la porosidad y tortuosidad con un procedimiento experimental sin necesidad de equipamiento específico que puede resultar inaccesible para los grupos de investigación.

§§§ Contacto: T.V. Ezquerdo; Tel. 966528477; e-mail: toesllo1@mcm.upv.es

INTRODUCCION

El sector de la construcción requiere productos que presenten buenas propiedades: fácil manejabilidad, económicos, resistentes, reciclables y no contaminantes, entre otras. Uno de los parámetros que condiciona el comportamiento térmico-acústico es la porosidad de estos productos. Las características internas de la matriz de los materiales porosos absorbentes, morfología de los poros, variación de la sección recta del poro y las derivaciones y conexiones con otros poros está determinada por la tortuosidad o factor de estructura, que representa la orientación de los conductos respecto a la dirección principal.

En cierto modo, la tortuosidad α_∞ de un material poroso está relacionada con la porosidad ϕ . Son parámetros adimensionales, donde $\phi=1$ representa un material totalmente poroso y $\alpha_\infty=0$ indica un material con conductos porosos perfectamente alineados con la dirección predominante. Fácilmente se observa que un material puede ofrecer tortuosidad superior a 1.

Entre los minerales de origen natural formados por silicatos de hierro y magnesio se encuentra el grupo de los materiales cerámicos expandidos. Materiales como arlita, perlita o la vermiculita se obtienen por exfoliación de la roca virgen. Son altamente interesantes en la construcción por sus ventajas: ligeros, buen comportamiento térmico y acústico ^[1] derivado de su proceso de producción, inalterables a productos, no tóxicos, entre otros, lo que les confiere como un producto interesante para mejorar las condiciones de confort ambiental en las edificaciones.

El comportamiento resistente y acústico de un material está determinado por la red porosa interna. La porosidad ϕ indica el volumen de aire V_a retenido en los huecos del material con respecto al volumen total del material V_T , considerando el volumen de la estructura del material V_e

$$\phi = \frac{V_a}{V_T} = \frac{V_a}{V_a + V_e}$$

La porosidad se puede determinar mediante diversas técnicas experimentales: 1.- intrusión de helio o mercurio con estereopícnómetro [2]; 2.- métodos acústicos con ultrasonidos [3]; 3.- métodos másicos en baja y alta presión [4]; 4.- técnicas con saturación de agua [5] y 5.- métodos volumétricos [6].

Por otra parte, la tortuosidad da información de la red interna, aunque resulta muy difícil de cuantificar. En ocasiones debe recurrirse a ensayos destructivos. Para evitar este inconveniente se puede recurrir modelos teóricos de predicción o bien a ensayos experimentales no destructivos mediante técnicas acústicas [7], ultrasonidos [8] o por analogía con el campo eléctrico [9].

Estas metodologías requieren equipamiento específico y son laboriosos. En este artículo se analizan los resultados experimentales en laboratorio de la porosidad y tortuosidad con equipamiento sencillo y accesible.

MATERIALES

El material utilizado en este estudio ha sido obtenido a partir de diversas proporciones de cemento y agua con vermiculita o arlita, empleando cemento blanco de alta resistencia Portland BL I 52.5 R como aglutinante.

Materiales naturales expandidos, tales como la arlita, vermiculita o perlita son productos con muy baja densidad que se obtiene a mediante un tratamiento térmico en la planta de producción. Tras un triturado en pequeños tamaños de partículas, este proceso consiste en elevar rápidamente la temperatura de la roca triturada

hasta valores en torno a los 1000 °C. Las partículas de agua inmersas en la roca provocan la expansión de los granos y la obtención de materiales muy ligeros, aumentando el volumen hasta 30 veces, con una densidad entre 60 y 130 kg/m³.

El amasado se ha realizado mediante una amasadora mecánica tipo orbital marca BOMANN, modelo CB 332. Los materiales analizados se han obtenido con agregado de arlita, vermiculita de grano grueso (V3) y de grano fino (V2). Se han preparado 5 probetas de cada material presentando diversa granulometría. El material amasado se ha fraguado en moldes de 72 mm de diámetro y 50 mm de altura manteniendo controladas las condiciones ambientales: 25 °C y 52 % de humedad relativa. Para facilitar el fraguado homogéneo del interior de estas probetas, fueron extraídas a las 48 h del molde y secadas al aire durante 28 días.



Figura 1. Probeta de material granular de matriz cementicia con arlita.

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Estimaciones en laboratorio

La porosidad experimental se ha determinado mediante la técnica de saturación volumétrica ^[5] empleando agua. Dada la alta capacidad de absorción de agua que presenta el material, las muestras necesitan ser humectadas previamente durante 48 horas con el fin de evitar errores en la medición. La porosidad se expresa a partir de la relación entre el volumen de aire interno del material, obtenido a partir del volumen de agua que ocupa los huecos internos, en relación al volumen de material.

La tortuosidad se ha obtenido mediante el método experimental con electrolito ^[9] y considerando la analogía eléctrica y la acústica descritas anteriormente. El ensayo consiste en determinar la corriente que circula entre dos placas metálicas (electrodos) al ser sometidas a una diferencia de tensión, estando intercalado entre ambos electrodos el material a analizar. El paso de corriente de un electrodo se garantiza con un fluido conductor (electrolito) entre ambos. La disolución empleada es el sulfato de cobre (CuSO_4) disuelto al 10%. Para garantizar que no aparece ningún cambio químico en el proceso de electrólisis, los electrodos utilizados son de cobre, con un espesor de 5 mm.

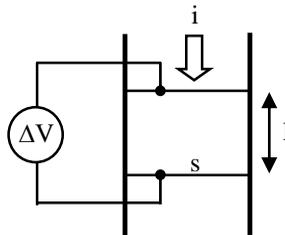


Figura 2. Analogía eléctrica para cuantificar la tortuosidad.

Resultados experimentales

Los resultados experimentales se han determinado sobre 5 probetas de cada tipo de material y han sido secadas adecuadamente antes de cada ensayo, requiriendo alrededor de 20 días para el secado interno del material. Los valores medios obtenidos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados experimentales de porosidad y tortuosidad para distintos materiales granulares con productos expandidos.

Material	Porosidad (ϕ)	Tortuosidad (α_{∞})
Arlita	0.38	1.55
Vermiculita Tipo V3	0.4	1.37
Vermiculita Tipo V2	0.39	1.2

La característica común observada en estos productos es la baja porosidad que ofrecen estos compuestos frente a las fibras o las espumas, obteniéndose valores de porosidad muy similar entre ellos. La tortuosidad ofrece diferencias importantes entre ellos.

La combinación de esta información permite afirmar que el material elaborado con arlita y vermiculita tipo 3 con mayor tamaño de grano presenta mayor dificultad al paso en los conductos internos que la vermiculita tipo 2, con grano fino. Sin embargo, en el caso del compuesto con arlita los granos son más uniformes en tamaño y esféricos, existiendo granos de forma aleatoria en los compuestos de vermiculita. Esta diferencia de comportamiento interno condiciona la posible aplicación de estos nuevos productos y queda sesgada solamente con la porosidad, completándose con los datos de tortuosidad.

CONCLUSIONES

A partir del estudio realizado, se concluye que estas técnicas experimentales resultan sencillas y accesibles para cuantificar estos parámetros que son necesarios para caracterizar un material. El empleo de un ensayo no destructivo para cuantificar la tortuosidad es interesante dado que resulta muy difícil de cuantificar este factor y proporciona información que es útil en aplicaciones tan diversas como la acústica, térmica, resistencia estructural o de absorción de líquidos, entre otras.

Como alternativa a este tratamiento experimental, la aplicación de las técnicas de Visión por Computador ofrece ventajas importantes: cuantificación rápida de estos parámetros, ensayo no destructivo, determinación de otros factores en la caracterización morfológica del material como son la configuración interna de los conductos, estrangulaciones, cavidades cerradas, entre otras. En este sentido puede hacerse uso de modelización en 2D y 3D, aunque en este caso requiere de equipamiento específico. En el caso de la técnica 2D el tratamiento solo permite evaluar la circularidad, proporcionando información parcial del comportamiento real.

REFERENCIAS

- [1] Carbajo, J., Esquerdo, T.V., Ramis, J., Nadal, A. y Denia, F.D. "Acoustic properties of porous concrete made from arlite and vermiculite lightweight aggregates". *Materiales de Construcción*, 65:320, 1-11 (2015).
- [2] Maderuelo, R., Barrigón, J y Gómez, V. "Acoustical performance of loose cork granulates". *European Journal of Wood and Wood Products*, 72, 321-330 (2014).
- [3] Umnova, O. , Attenborough, K., Shin, H. y Cummings, A. "Deduction of tortuosity and porosity from acoustic reflection and transmission

- measurements on thick samples of rigid-porous materials". *Applied Acoustics*, 66, 607-624 (2005).
- [4] Salissou, Y. y Panneton, R. "Pressure/mass method to measure open porosity of porous solids. *Journal of Applied Physics*, 101, 129413 (2007)
- [5] M. Vasina, D. Hughes, K., Horoshenkov, y L. Lapcik, "The acoustical properties of consolidated expanded clay granulates". *Applied Acoustics*, 67, 787-796 (2006).
- [6] Neithalath, N., Sumanasooriya, M. y Deo, O. "Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction". *Materials Characterization*, 61:8, 802-813 (2010).
- [7] Johnson, D., Plona, T., Scala, C., Pasierb, F. y Kojima, H. "Tortuosity and acoustic slow waves". *The American Physical Society*, 49:25, 1840-1844 (1982).
- [8] Allard, J., Castagnede, B., Henry, M. y Lauriks, W. "Evaluation of tortuosity in acoustic porous materials saturated by air". *Review of Scientific Instruments*, 65:3, 754-755 (1994).
- [9] Maderuelo, R., Nadal, A., Crespo, J. y Parres, F. "A novel sound absorber with recycled fibers coming from end of life tires (ELTs)". *Applied Acoustics*, 73:4, 402-408 (2012).

“Estudio de aplicación de materiales compuestos con fibras naturales para la fabricación de componentes de automoción”

B. Oliver-Borrachero ^{(1)**}, S. Sánchez-Caballero ⁽¹⁾, M.A. Selles ⁽¹⁾,
J.E. Crespo ⁽¹⁾**

*(1) Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales,
Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Universitat Politècnica de València
Plaza Ferrándiz y Carbonell, 1 03801 Alcoy (Alicante)*

RESUMEN

El objetivo del presente proyecto es la caracterización de varios materiales compuestos con diferentes tipos de fibras naturales y diferentes composiciones con el fin de determinar la aptitud de estos en un posterior uso en componentes de automoción. Para ello, se ha reproducido el ensayo de tracción mediante un software de elementos finitos con el fin de poder ajustar los resultados MEF con los resultados obtenidos experimentalmente y de esta forma obtener un modelo de cálculo fiable, que permita el correcto dimensionamiento de componentes en cada uno de los compuestos. Finalmente, se ha diseñado y optimizado un componente en fibra de basalto, que posteriormente ha sido fabricado siguiendo los esquemas de laminado introducidos en el software.

**** Contacto: B. Oliver; e-mail: berolbor@epsa.upv.es

INTRODUCCIÓN

Actualmente la industria de la automoción se encuentra en un momento de adaptación a una nueva situación de mercado, determinada por las actuales circunstancias de crisis económica y por imposiciones de tipo medioambiental establecidas en protocolos internacionales que obligan a la reducción de consumo de combustible y de emisiones contaminantes además de generar compromisos que exigen a los fabricantes del sector responsabilidad sobre el reciclaje de piezas y componentes tras su ciclo de vida lo que supone una oportunidad para el desarrollo de nuevos materiales y procesos de transformación.

Cada día es más habitual la utilización de materiales compuestos debido a la demanda de mejores características y propiedades en los productos, principalmente en cuanto a su ligereza, resistencia y coste entre otras propiedades. De tal forma existe un continuo esfuerzo por parte de empresas e investigadores para mejorar los materiales tradicionales y desarrollar nuevos materiales.

Los materiales compuestos o composites son aquellos materiales constituidos por la combinación de al menos dos o más constituyentes, no solubles entre sí, con diferentes propiedades que se combinan al nivel macroscópico para alcanzar una combinación de propiedades que no es posible obtener en los materiales originales individualmente.^[1]

La ventaja de los materiales compuestos aparece cuando comparamos su módulo específico (módulo de elasticidad por unidad de peso) y su resistencia específica (resistencia por unidad de peso) con los de otros materiales. En los materiales compuestos es muy elevado, por lo que es muy importante en la industria del transporte ya suponen un ahorro energético.^[2]

La mayor parte de aplicaciones tecnológicas modernas requieren de materiales con combinaciones de propiedades imposibles de encontrar en materiales comunes. Por ejemplo, la industria aeronáutica solicita materiales de baja densidad con alta resistencia mecánica, alta rigidez, alta resistencia al impacto, a la abrasión y a la corrosión. Esta es una combinación de características que restringen la lista de materiales a emplear puesto que frecuentemente, los materiales más resistentes son relativamente más densos y además, un incremento de resistencia y rigidez se traduce en una disminución de la resistencia al impacto. Por todo ello, la combinación de las propiedades de los materiales y la gama de sus valores se han ampliado, y se siguen ampliando, mediante el desarrollo de nuevos materiales compuestos.^[3] Por ello, en la industria Aeroespacial se presenta como material imprescindible debido a su comportamiento ante los requerimientos mecánicos y térmicos de estas estructuras.

DESCRIPCIÓN

Proceso de fabricación de las probetas

El método de fabricación que se ha utilizado para la fabricación de las probetas ha sido el método de infusión de resina con bolsa de vacío. Se trata de un proceso de fabricación de composites en el cual la resina es aportada al conjunto por una canalización utilizando una diferencia de presión generada mediante una bomba de vacío conectada al molde. Este método permite que la resina empleada sea solo la estrictamente necesaria y que a su vez el compuesto de fibras se encuentre en su límite de saturación.

El proceso comienza posicionando las distintas capas de material sobre la superficie del molde, con el correspondiente tejido pelable y la malla de difusión de resina. A continuación se cubre todo con

una bolsa de vacío y se sella completamente con masilla de cierre. De esta forma al accionar la bomba se genera una presión que comprime los tejidos. En un conducto auxiliar de acceso al molde se conecta el recipiente con resina, la cual es introducida en el molde al permitirle el paso por la diferencia de presión generada.

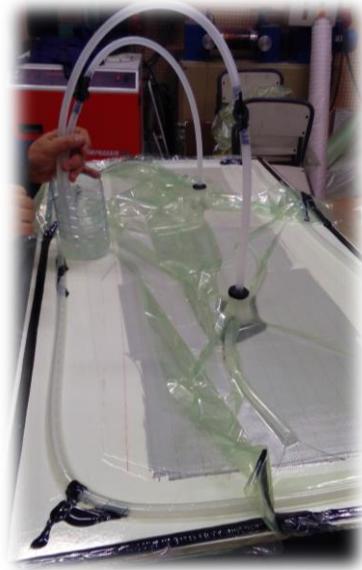


Figura 1. Fabricación de las probetas.

Las fibras a utilizadas han sido:

- Fibra de carbono: es una fibra sintética constituida por finos filamentos de carbono.
- Fibra de lino: es una fibra natural de origen vegetal que se extrae del tallo de la planta del lino.
- Fibra de yute: es una fibra natural de origen vegetal que se extrae del tallo de la planta del yute.
- Fibra de basalto: es una fibra natural de origen inorgánico que se extrae se extrae de una roca volcánica.

Como matriz se ha empleado una resina libre de sustancias CMR, resina epoxi ``resoltech 1050``.

A continuación se muestra el resumen de datos de los los materiales en seco y en composite con matriz epoxídica.

Tabla 1. Datos iniciales obtenidos de los distintos tejidos.

MATERIAL	CARBONO	CARBONO	YUTE	LINO	BASALTO
TIPO DE TEJIDO	Sarga	UD	Tafetán	Tafetán	Sarga
ESPESOR CAPA	0,26	0,31	0,92	0,95	0,45
Nº DE CAPAS	2	2	2	2	2
ESPESOR TOTAL	0,52	0,62	1,84	1,90	0,90
GRAMAJE (g/m ²)	218,98	322,66	354,95	505,96	634,23

Tabla 2. Datos finales obtenidos de las placas de material compuesto.

MATERIAL	CARBONO	CARBONO	YUTE	LINO	BASALTO
% RESINA	50,15	36,48	72,70	67,08	51,62
% FIBRA	49,85	63,52	27,30	32,92	48,37
GRAMAJE (kg/m ²)	0,88	1,02	2,59	3,07	2,62
DENSIDAD (kg/m ³)	1.179,46	1.372,27	1.168,94	1.239,56	1.248,99

Se puede destacar de los valores de las tablas el valor de gramaje en seco del basalto (634,23 g/m²) frente a los de lino (505,96 g/m²) o yute (354,95 g/m²) que son muy inferiores. Pero fijandose en el mismo valor de gramaje en composite observamos que el basalto (2,62 kg/m²) tiene un valor inferior al del lino (3,07 kg/m²) y muy proximo al del yute (2,59 kg/m²). Esto es debido a que el porcentaje de resina absorbido por el basalto (51%) es inferior al de el lino (67%) o al del yute (72%), teniendo de esta forma una mejor relación fibra-matriz lo que confiere al material mejores propiedades resistentes.

Caracterización. Ensayo de tracción

En este estudio de aplicación de materiales se han realizado distintos ensayos sobre las probetas de materiales compuestos

(tracción, flexión, dureza, vicat, etc.), de los cuales nos centraremos en el ensayo de tracción y en el módulo de Poisson para este artículo.

El ensayo de tracción consiste en someter una probeta normalizada a un esfuerzo axial de tracción, creciente hasta que se produce la rotura de la probeta. Este ensayo mide la resistencia que opone una probeta frente a una fuerza, por lo es posible obtener el diagrama de tensiones-deformaciones unitarias, obteniendo a su vez propiedades como el módulo elástico, la tensión de rotura, % alargamiento, energía de rotura. Para presentar la gráfica tensión/deformación es necesario conocer el incremento de longitud y la tensión a partir de la aplicación de la norma ISO 527-1.

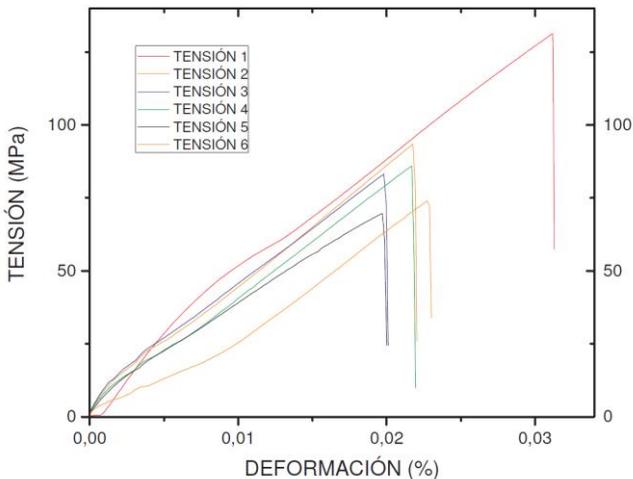


Figura 2. Gráfica del ensayo sobre fibra de lino.

Se han realizado los ensayos probetas de cada tipo de material con el tejido cortado a 90° y sobre cinco probetas más de cada tipo de material con el tejido cortado a 45° , excepto para el carbono unidireccional que no oponía resistencia en esta dirección por lo que solo se realizaron ensayos con el tejido cortado a 90° .

Tabla 3. Datos ensayo tracción material cortado a 90°.

MATERIAL 90°	TENSIÓN MAX MPa	ALARGAMIENTO Porcentaje	MÓDULO MPa
Carbono sarga	231,43	2,13	10856
Carbono UD	565,75	4,72	11995
Lino	87,64	2,25	3890
Yute	50,62	2,74	1621
Basalto	392,11	6,56	5980

Tabla 4. Datos ensayo tracción material cortado a 45°.

MATERIAL 45°	TENSIÓN MAX MPa	ALARGAMIENTO Porcentaje	MÓDULO MPa
Carbono sarga	90,06	2,54	3454
Carbono UD	0	0	0
Lino	23,33	1,67	1394
Yute	38,40	5,01	1453
Basalto	87,73	3,52	1463

Tabla 5. Datos coeficiente Poisson.

MATERIAL Tipo	COEFICIENTE POISSON 90°	COEFICIENTE POISSON 45°
Carbono sarga	0,37	0,33
Carbono UD	0,01	0
Lino	0,27	0,52
Yute	0,28	0,54
Basalto	0,08	0,22

El siguiente apartado de caracterización necesario es el del coeficiente de Poisson, una constante elástica que proporciona una medida de la relación entre el estrechamiento de sección transversal de la probeta frente al alargamiento de la sección longitudinal principal en la que se aplica la carga en tracción.

Modelado CAE

Se van a reproducir los ensayos de tracción realizados con los distintos materiales mediante el software de elementos finitos ansys

workbench y el módulo ACP con la finalidad de obtener un modelo lo más próximo a la realidad.

El proceso de modelado empieza con el diseño del CAD, una probeta con las dimensiones de las ensayadas. El siguiente paso ha sido añadir las principales propiedades de los materiales, caracterizadas experimentalmente en los ensayos, en la base de datos del programa (módulo de Young, tensión máxima en cada dirección, coeficiente de Poisson, deformación unitaria en cada dirección, módulo de cortadura estimado, tensión cortante en cada dirección estimada).

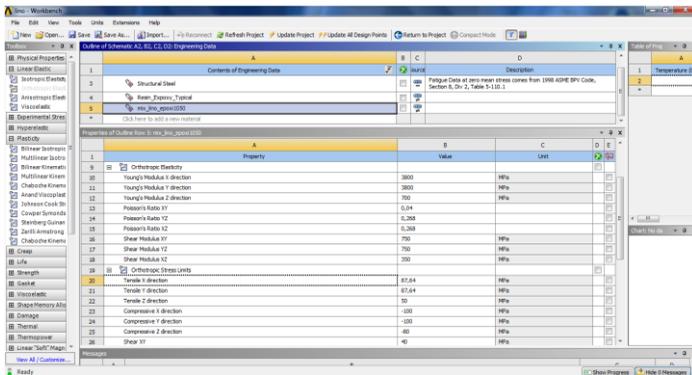


Figura 3. Introducción de datos del material.

A continuación se ha de realizar el estudio en el módulo 'Static Structural' como si se tratase de un material isotrópico, por lo que le aplicaremos un espesor y material, a su vez fijaremos sobre la pieza las cargas y restricciones del ensayo de tracción.

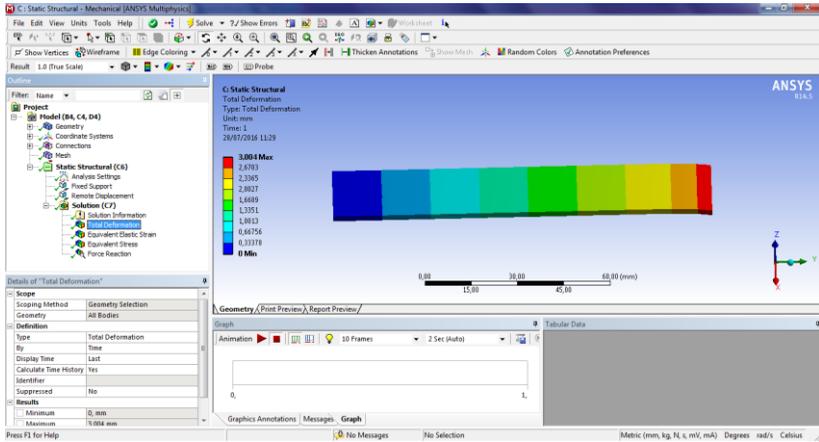


Figura 4. Resultado de la simulación en static structural como sólido.

Una vez simulado el ensayo, el cálculo es exportado al módulo ACP (Ansys composite prepost) para introducir las características del laminado de material compuesto y definir los parámetros necesarios para obtener el resultado en el post procesador.

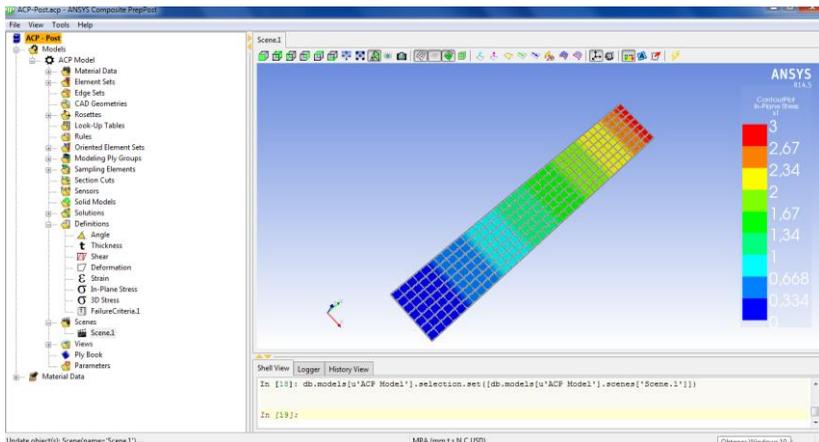


Figura 5. Resultado de la simulación en ACP post como composite.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Cabe indicar que para obtener los resultados de la simulación ha sido necesario realizar los cálculos distintas veces, variando la deformación máxima aplicada sobre la probeta y revisando los valores de la teoría de fallo por deformación hasta que se ha encontrado el valor de deformación que produce la rotura (valor de 1 en la teoría de fallo). De este punto se han extraído los valores mostrados a continuación.

Tabla 6. Comparativa de resultados de software con experimental.

Carbono sarga	Deformación mm	Deformación unitaria	Tensión MPa
Ensayo experimental	2,56	2,13	231,43
Simulación software	2,56	2,52	233,61
%Error	0,03	18,08	0,94

Tabla 7. Comparativa de resultados de software con experimental.

Carbono UD	Deformación mm	Deformación unitaria	Tensión MPa
Ensayo experimental	5,56	4,72	565,75
Simulación software	5,67	5,50	510,67
%Error	1,98	16,68	9,73

Tabla 8. Comparativa de resultados de software con experimental.

Lino	Deformación mm	Deformación unitaria	Tensión MPa
Ensayo experimental	2,70	2,25	87,64
Simulación software	2,70	2,54	85,27
%Error	0,12	12,78	2,70

Tabla 9. Comparativa de resultados de software con experimental.

Yute	Deformación mm	Deformación unitaria	Tensión MPa
Ensayo experimental	3,74	3,12	50,62
Simulación software	3,75	3,42	50,65
%Error	0,26	9,58	0,06

Tabla 10. Comparativa de resultados de software con experimental.

Basalto	Deformación mm	Deformación unitaria	Tensión MPa
Ensayo experimental	7,88	6,55	392,11
Simulación software	8,03	6,72	392,37
%Error	2,06	2,53	0,06

Observando los resultados podemos concluir que la resolución de los ensayos mediante el modelo generado por elementos finitos es muy aproximada a la realidad, con el porcentaje de error mostrado en cada caso, pero siendo prácticamente despreciable en el diseño de un componente, puesto que por norma se aplica un factor de seguridad por fallos en el material y otro por fallos en la fabricación para asegurar el correcto diseño, por esto, el error puede despreciarse frente los factores de seguridad aplicados.

De tal forma, se ha comprobado en este trabajo que es posible realizar la aproximación por elementos finitos de cualquier material del que se conozcan sus propiedades mediante ensayos previos, pudiendo así dimensionar componentes reales con materiales hasta el momento no utilizados. En este ámbito, el campo de los materiales compuestos abre un gran abanico de posibilidades sin explorar al dar la posibilidad de combinar distintos materiales para conseguir unas propiedades concretas, en este caso mejorar la relación potencia/peso de los vehiculos y con ello las emisiones contaminantes.

Diseño y fabricación de un componente.

Por definición el término automóvil se refiere a un vehículo autopropulsado destinado al transporte de personas o mercancías sin necesidad de carriles.^[4] Por ello, el componente de ejemplo a fabricar para el sector de la automoción es el colín de una motocicleta de competición Honda nsf 250 moto3.



Figura 6. Honda NSF 250 moto3.

Aunque existe colines con alta responsabilidad mecánica, como es el caso de los colines autoportantes, es más bien un componente de carácter estético y aerodinámico de baja responsabilidad mecánica, puesto que aunque el piloto se sienta sobre él, el elemento encargado de sustentar la carga es el subchasis de aluminio al que se ancla el colín.

El esquema a seguir con el software es el mismo que con la probeta del ensayo de tracción, solo que en este caso los valores parametros ya estan ajustados, conociendose todas la propiedades del material necasarias. El tejido utilizado es un tejido tafetan de basalto en dos capas.

El colín dispone de cuatro puntos de anclaje al subchasis y dos zonas de contacto a los que se le aplican las restricciones. A su vez se aplica una carga de 730N, normal a la base del sillín, que simula

el peso del piloto y otra carga normal a la base trasera de 20N que resulta despreciable en los resultados.

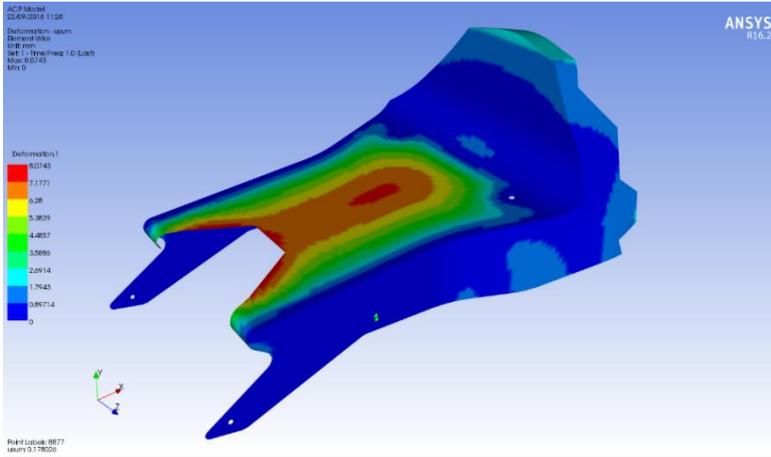


Figura 7. Resultado de la simulación. Deformación total.

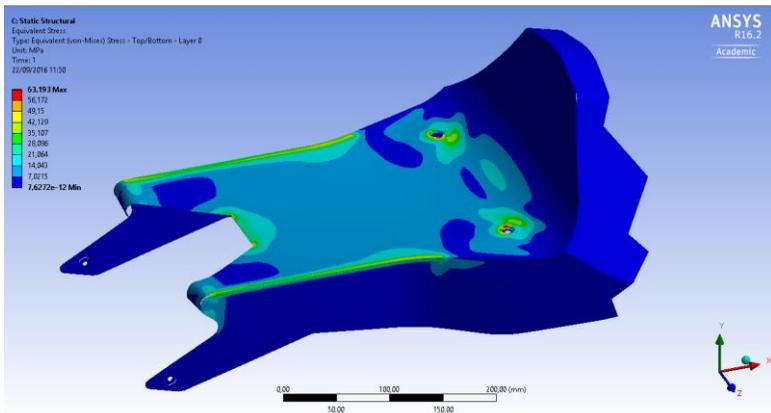


Figura 8. Resultado de la simulación. Tensión.

Este componente está correctamente dimensionado puesto que la tensión a la que se encuentra sometido (63 MPa) es muy inferior a la tensión de rotura del material (292 MPa), desde el punto de

vista del diseño por teoría de tensión máxima. En cuanto a la tensión en la zona trasera es despreciable frente a la de la base del sillín.

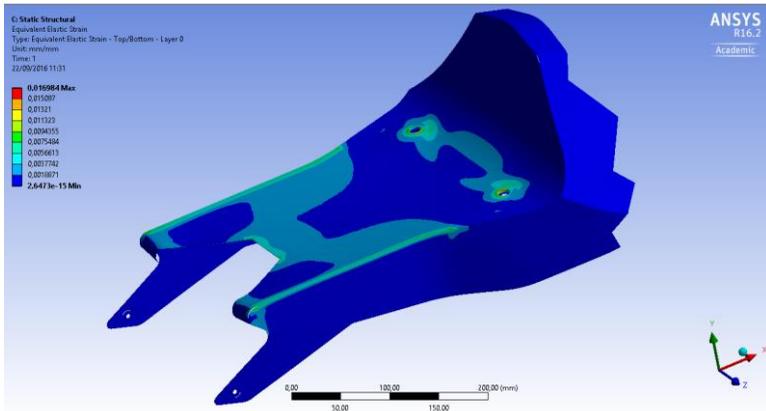


Figura 8. Resultado de la simulación. Deformación unitaria.

Según el criterio de fallo por deformación, podemos observar que la deformación unitaria a la que se encuentra sometido (1,7%) es muy inferior a la deformación unitaria de rotura del material (6,5 %), desde el punto de vista del diseño por teoría de deformación máxima.

Fabricación

Para el proceso de fabricación se requiere previamente generar un molde a partir de un colín original Honda. A continuación, se ha de preparar el molde con un tratamiento antiadherente y montarlo formando un solo cuerpo. Para la fabricación de este componente se ha utilizado el método de laminado manual con vacío.

El proceso de laminado comienza aplicando una capa inicial de gel coat, a la cual, cuando este apunto de curar se aplica una capa de resina y a continuación los distintos laminados de basalto. Se deben añadir las distintas capas de fibra con las orientaciones

definidas en el software de elementos finitos para obtener buenos resultados.

A continuación se posiciona un sangrador y un tejido fieltro para absorber el excedente de resina. Se cubre con una bolsa de vacío y se conecta la bomba de vacío.

Una vez curado ya es posible desmoldearlo con cuidado y solo quedará lijar los excedentes de resina y fibra de los bordes y las uniones.



Figura 9. Colín fabricado con basalto y epoxi junto con el molde utilizado.

REFERENCIAS

- [1] De la Figal, J. G. y Rodríguez, P. A., *El cálculo de los materiales compuestos por elementos finitos*. Instituto Panamericano de ingeniería naval, pp. 1-11 (2007).
- [2] Hull, D., *Materiales compuestos*, (Ed. Reverté) pp. 1-268, (1987).
- [3] Callister, W. D., *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*, volume 2, pp. 1-404 (2006).

[4] Ministerio de Presidencia, Real Decreto 711/2006, *Definición y categoría de los vehículos*, B.O.E., pp. 23.387-23.3

“Estudio del comportamiento acústico de agregados granulares ligeros”

**R. Maderuelo ⁽¹⁾, A.V. Nadal-Gisbert ⁽²⁾, J.E. Crespo ⁽¹⁾⁺⁺⁺⁺,
J.M. Barrigón ⁽²⁾, F. Parres ⁽²⁾, E. Juliá ⁽³⁾, L.M. Pérez ⁽²⁾**

(1) Instituto Tecnológico de Rocas Ornamentales y Materiales de Construcción, INTROMAC. Universidad de Extremadura, 10071, Cáceres, España

(2) Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales, Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Universitat Politècnica de València Pl. Ferrándiz y Carbonell, s/n, 03801 Alcoy (Alicante)

(3) Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Universitat Politècnica de València Pl. Ferrándiz y Carbonell, s/n, 03801 Alcoy (Alicante)

RESUMEN

En este trabajo se investiga el comportamiento acústico de materiales granulares ligeros fabricados con perlita, arlita y vermiculita con resina de poliuretano. Estos materiales pueden ayudar a controlar el ruido sustituyendo a otros materiales que carecen de suficiente resistencia estructural requiriendo protecciones que suponen un sobrecoste. Las ventajas de usar estos materiales compuestos en aplicaciones acústicas, como barreras acústicas, vienen de combinar ligereza con resistencia, estabilidad química y bajo coste. Además, estos materiales resisten mejor en ambientes agresivos que los clásicamente utilizados, como las lanas de roca. Las propiedades acústicas se han obtenido a partir de la normativa ISO 10534-2: 1998. Se ha estudiado su microestructura a partir de propiedades como la porosidad, tortuosidad y resistencia al flujo, estudiando su influencia con el comportamiento acústico a partir del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica.

++++ Contacto: J.E. Crespo; Tel. 966528570; e-mail: jocrean@dimmm.upv.es

INTRODUCCIÓN

La contaminación acústica se ha convertido en un problema que necesita soluciones inmediatas. La mejora en la calidad de vida y el continuado crecimiento de la población agrava este problema que tiene una influencia directa en la salud [1, 2]. Son muchos los productos comerciales que ayudan a minimizar estos problemas. Suelen ser productos espumados o basados en fibras naturales. Sin embargo, estos productos carecen de suficiente resistencia estructural y requieren la aplicación de elementos de protección contra ambientes agresivos [3].

En recientes trabajos, los materiales granulares se han estudiado para diferentes aplicaciones acústicas debido a sus propiedades para la absorción y para el aislamiento acústico. Este tipo de materiales, combinados con resinas de poliuretanos o de epoxy, adquieren un considerable grado de resistencia y de durabilidad con un alto valor de absorción acústica [4 - 7]. Algunos de estos materiales son triturados de neumático [8, 9], partículas de sílex [10], cáñamo [11] y arcillas expandidas [12].

Asdrubali y Horoshenkov caracterizaron experimentalmente el comportamiento acústico de mezclas de gránulos de arcillas expandidas, demostrando que la porosidad tiene una influencia importante. Vasina *et alter* estudiaron las propiedades acústicas de arcillas expandidas granulares usando aglutinantes cementantes con una dimensión del agregado por debajo de 3,5 mm, presentando un buen comportamiento acústico. Bartolini *et alter* estudiaron compuestos de arcilla expandida y epoxy con una concentración del 10% de aglutinante, demostrando un buen comportamiento acústico y una alta resistencia mecánica.

En este trabajo la perlita, la arlita y la vermiculita (Figura 1) se han caracterizado para mostrar su comportamiento acústico. La perlita es una roca de origen volcánico con estructura amorfa y con un alto volumen de agua en su interior. Su densidad se encuentra en el rango de 30 a 150 kg/m³. La perlita se usa en áreas como materiales de construcción, agricultura, industria médica y química.

La arlita expandida se usa en construcciones de hormigón aligerado. Ray *et al* investigaron la utilización de residuo fino de perlita como alternativa a algunos materiales cementantes. Comparada con otros materiales como la vermiculita, la arcilla expandida, el esquisto, la piedra pómez o la lana mineral, una importante ventaja es su coste.

Por otra parte, la arlita es un agregado ligero comercial en España. Su composición básica consiste en silicatos de aluminio hidratados. Su densidad oscila de 325 a 750 kg/m³. Existen distintas variedades de arlita aptas para diferentes aplicaciones: aislamiento, aplicaciones geotécnicas, jardinería, estructuras ligeras prefabricadas, losas de hormigón y morteros refractarios, entre otras.

Otro material es la vermiculita, estando formada por una mezcla de aluminio, magnesio y silicatos de hierro en forma de estructura laminar. Su densidad oscila de 60 a 130 kg/m³. La vermiculita ha sido objeto de investigación debido a sus notables propiedades físicas y químicas como su baja conductividad térmica, comportamiento refractario y su gran capacidad de intercambiar cationes. Estas propiedades hacen de la vermiculita un material apto para distintas aplicaciones industriales.



Figura 1. A) Arlita, B) Perlita, C) Vermiculita.

Por tanto, el objetivo de este trabajo se centra en el estudio de la microestructura de estos tres materiales, mezclados con distintas concentraciones de resina de poliuretano relacionando la influencia de sus propiedades físicas con su comportamiento acústico.

Propiedades no acústicas: Porosidad, Tortuosidad y Resistividad al Flujo

Se define **porosidad**, Ω , como la relación entre el volumen de aire dentro de la muestra, y el volumen total:

$$\Omega = 1 - \frac{\rho_m}{\rho_s} \quad (1)$$

donde ρ_m es la densidad aparente de la muestra y ρ_s es la densidad del material granulado.

Por su parte, la **tortuosidad**, q , es un parámetro estructural adimensional que muestra la influencia de la estructura interna en la velocidad del flujo a través del material. Depende sólo de la geometría de los poros y se ha medido con el método de Brown.

Siendo ρ_c y ρ_f las resistividades del material saturado y del fluido, respectivamente. La tortuosidad viene dada por la expresión:

$$q = \Omega \cdot \frac{\rho_c}{\rho_f} \quad (2)$$

donde Ω , es la porosidad de la muestra.

Por su parte, la resistividad al flujo, σ , es una de las características más importantes y depende de la porosidad del material y del tamaño del poro. En este trabajo, se ha determinado con la expresión:

$$\sigma = \frac{9\mu(1-\Omega)}{2r_b^2\Omega^2} \frac{5(1-\Omega)}{5-9\Theta^{(1/3)}+5\Theta-\Theta^2} \quad (3)$$

donde $\Theta=0.675(1-\Omega)$ y μ es la viscosidad dinámica del aire ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$).

Propiedades acústicas

Para evaluar las propiedades acústicas de las muestras (la impedancia superficial y el coeficiente de absorción acústica), se ha utilizado la técnica del tubo de impedancia acústica en el rango de frecuencias de 100 a 5000 Hz.

RESULTADOS

La Tabla 1 muestra los valores obtenidos de las propiedades no acústicas.

Tabla 1. Propiedades físicas y no acústicas de las muestras.

Muestra	Tamaño de Partícula (mm)	Porosidad	Tortuosidad	Resistividad al flujo (Pa·s·m⁻²)	Espesor (mm)	Concentración del aglutinante (%)
A100	3 - 4	0,697	1,738	1409	22,1	100
A050	3 - 4	0,706	1,687	1371	22,1	50
A030	3 - 4	0,714	1,545	1338	21,8	30
A020	3 - 4	0,751	1,475	1189	21,4	20
A015	3 - 4	0,783	1,404	1062	22,4	15
A010	3 - 4	0,786	1,364	1050	21,4	10
P200	2 - 3	0,765	1,834	1770	21,0	200
P150	2 - 3	0,777	1,665	1697	21,4	150
P100	2 - 3	0,785	1,542	1647	21,2	100
V110	0,5 - 3	0,862	1,774	1168	20,8	110
V200	0,5 - 3	0,837	1,864	1326	20,1	200

Las siguientes gráficas (Figura 2-4) muestran el coeficiente de absorción acústica para las distintas muestras de arlita, perlita y vermiculita.

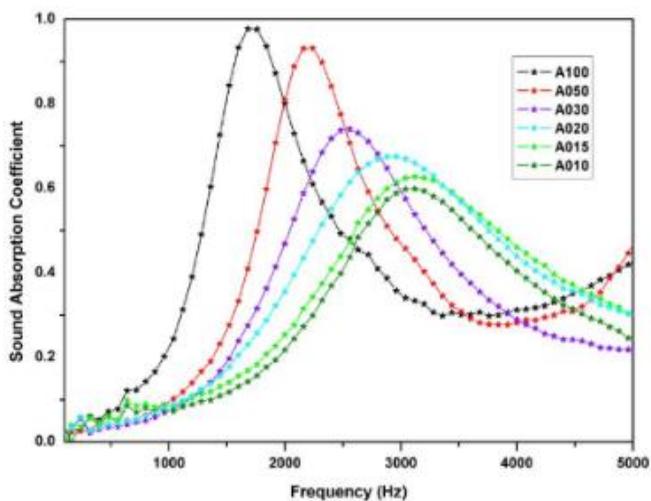


Figura 2. Coeficiente de absorción acústica de las muestras: Arlita.

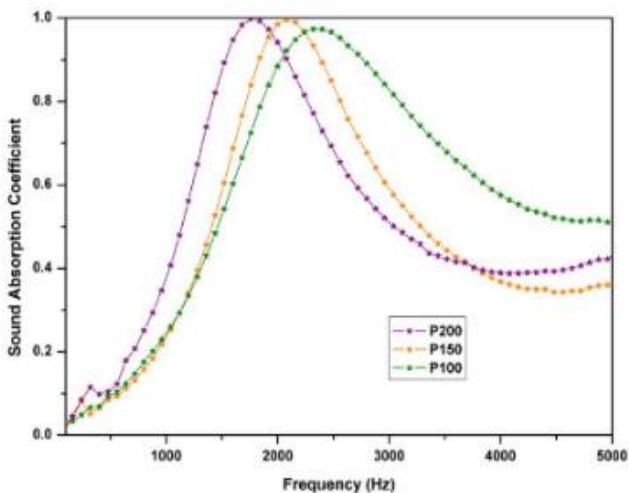


Figura 3. Coeficiente de absorción acústica de las muestras: Perlita.

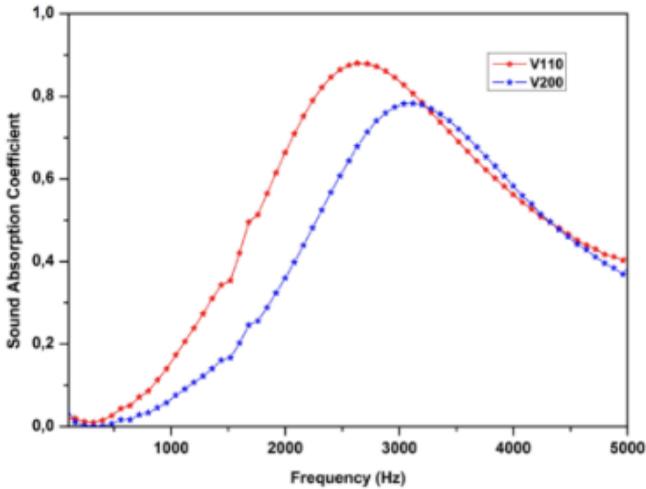


Figura 4. Coeficiente de absorción acústica de las muestras: Vermiculita.

CONCLUSIONES

Los resultados muestran que es posible conseguir un buen comportamiento acústico a ciertas frecuencias en este tipo de materiales. Es posible controlar las frecuencias en las que se quiere conseguir unas determinadas características de acondicionamiento acústico dependiendo de la concentración de aglutinante que se utilice. En este caso, el aglutinante es una resina de poliuretano (KEFREN 572), que proporciona suficiente elasticidad para favorecer la disipación de la energía acústica en el interior de la estructura porosa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de PERLINDUSTRIA S.L. (Vallirana, España).

REFERENCIAS

- [1] Barrigón, J.M., Gómez V., Rey, G., Vílchez-Gómez, R.: Possible relation of noise levels in streets to the population of the municipalities in which they are located. *J. Acoust. Soc. Am.* 128, 86-92 (2010).
- [2] Murphy, E., King, E.A.: Scenario analysis and noise action planning: Modelling the impact of mitigation measures on population exposure. *Appl. Acoust.* 72, 487-494 (2011).
- [3] Vasina, M., Hughes, D.C., Horoshenkov, K.V., Lapčík Jr, L.: The acoustical properties of consolidated expanded clay granulates. *Appl. Acoust.* 67, 787-796 (2006).
- [4] Benkreira, H., Khan, A., Horoshenkov, K.V.: Sustainable acoustic and thermal insulation materials from elastomeric waste residues. *Chem. Eng. Sci.* 66, 4517-4171 (2011).
- [5] Neithalath, N., Weiss, J., Olek, J.: Acoustic performance and damping behaviour of cellulose-cement composites. *Cem. Concr. Compos.* 26, 359-70 (2004).
- [6] Shebl, S.S., Seddeq, H.S., Aglan, H.A.: Effect of micro-silica loading on the mechanical and acoustic properties of cement pastes. *Constr. Build. Mater.* 25, 3903-3908 (2011).
- [7] Kim, H.K., Lee, H.K.: Acoustic absorption modeling of porous concrete considering the gradation and shape of aggregates and void ratio. *J. Sound. Vibration.* 329, 866-879 (2010).
- [8] Pfreundschner, J., Rodríguez, R.M.: Acoustic properties of rubber crumbs. *Polym. Test.* 18, 81-92 (1999).
- [9] Horoshenkov, K.V., Swift, P.: The effect of consolidation on the acoustic properties of loose rubber granulates. *Appl. Acoust.* 62, 665-690 (2001).
- [10] Horoshenkov, K.V., Swift, P.: The acoustic properties of granular materials with pore size distribution close to log-normal. *J. Acoust. Soc. Am.* 110, 2371-2378 (2001).
- [11] Glé, P., Gourdon, E., Arnaud, L.: Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity. *Appl. Acoust.* 72, 249-259 (2011).
- [12] Bartolini, R., Filippozzi, S., Princi, E., Schenone, C., Vicini, S.: Acoustic and mechanical properties of expanded clay granulates consolidated by epoxy resin. *Appl. Clay. Sci.* 48, 460-465 (2010).



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Ingeniería y Tecnología

