



Received: 15-08-2019  
Accepted: 23-11-2019

Anales de Edificación  
Vol. 5, Nº3, 1-7 (2019)  
ISSN: 2444-1309  
Doi: 10.20868/ade.2019.4060

## Análisis experimental de la incorporación de fibras en el comportamiento mecánico de compuestos de escayola-caucho NFU

### Experimental analysis of the incorporation of different fibers in the mechanical behaviour plaster and ELT rubber composites

Sofía Herrero-del Cura, Óscar López-Zaldívar, Rafael Vicente Lozano-Díez, Pablo Luís Mayor-Lobo & Francisco Hernández-Olivares

Universidad Politécnica de Madrid (Spain, sofia.herrero@upm.es, minetra@gmail.com, rafaelvicente.lozano@upm.es, pabloluis.mayor@upm.es, f.hernandez@upm.es)

**Resumen**— En este trabajo se analizan los efectos de la incorporación de algunas de las fibras más utilizadas en el Mercado (basalto, vidrio, poliolefina y polipropileno) en las propiedades mecánicas de compuestos de yeso-caucho de neumáticos fuera de uso (NFU). Para ello, se elaboran probetas de escayola-caucho NFU con adición de fibras en proporciones del 1% en peso y se caracterizan mediante ensayos físicos y mecánicos estudiando su densidad aparente, resistencia a flexión y compresión y módulo de elasticidad dinámico. Los resultados obtenidos muestran mejoras en todos los aspectos analizados, obteniéndose materiales más ligeros y con mejor comportamiento mecánico especialmente en los compuestos que incorporan fibra de vidrio.

**Palabras Clave**— Escayola; residuos de caucho NFU; fibras de vidrio; fibras de basalto; fibras de polipropileno; fibras sintéticas.

**Abstract**— In this work, an analysis of the effects of the incorporation of fibers on the mechanical properties of gypsum-rubber compounds from end-of-life tyres (ELT) is made. To this end, plaster-rubber ELT specimens are prepared with the addition of four of the most used fibers in the industry (basalt, glass, polyolefin and polypropylene) in proportions of 1% by weight. The composites are characterized by means of physical and mechanical tests, studying their apparent density, bending and compression resistance and dynamic modulus of elasticity. The results obtained show improvements in all the aspects analyzed, obtaining lighter materials with better mechanical behavior especially in those that incorporate glass fiber.

**Index Terms**— Plaster; ELT rubber; Glass fibres; Basalt fibres; Polypropylene fibres; Synthetic fibres.

#### I. INTRODUCCIÓN

La creciente necesidad de eliminación de residuos de la sociedad actual, por su fuerte incremento en el ritmo de

generación, ha convertido la reutilización y reciclaje de materiales en objetivo preferente en los últimos años.

Los neumáticos fuera de uso (NFU), son un tipo de residuo

Sofía Herrero-del Cura, Óscar López-Zaldívar, Rafael Vicente Lozano-Díez y Pablo Luís Mayor-Lobo pertenecen al Departamento de Tecnología de la Edificación de la Escuela Técnica Superior de Edificación, Universidad Politécnica de Madrid.

Francisco Hernández-Olivares pertenece al Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid.

que según la directiva 99/31/CE del Consejo de la Unión Europea sobre vertido de residuos, no puede depositarse en vertedero debido al riesgo de incendios por su alto poder calorífico, a su difícil compactación, a la facilidad para acumular gases y lixiviados debido a su forma, etc. Por este motivo se han investigado diferentes procedimientos para su reutilización y reciclado. Entre ellos, el más frecuente es el reciclado triturando los neumáticos para obtener fibras textiles y metálicas y especialmente caucho como producto granulado y en polvo de diferentes granulometrías para la elaboración de nuevos materiales.

En esta línea han trabajado múltiples investigadores incorporando caucho NFU granulado y en polvo a los conglomerantes hidráulicos utilizados habitualmente en construcción, especialmente a morteros de cemento (N. Segre & I. Joekes, 2000) y hormigones (N. Eldin & A. Senouci, 1993) y en menor medida a compuestos de yeso (S. Herrero, P. Mayor & F. Hernández-Olivares, 2013). Se observa en los estudios realizados la disminución de la densidad, dando como resultado materiales más ligeros (A. Turatsinze, S. Bonnet & J.L. Granju, 2005), y de la rigidez (F. Hernandez Olivares, G. Barluenga, M. Bollati & B. Witoszek, 2002), que supone una mayor capacidad de absorber energía por deformación con la consiguiente mejora del comportamiento acústico (Z. Ghizda'veț, B.M. Ștefan, D. Nastac, O. Vasile & M. Bratu, 2016) y la disminución de la fisuración. También se observan modificaciones en la microestructura del material (O. López-Zaldívar, R. Lozano-Díez, S. Herrero del Cura, P. Mayor-Lobo & F. Hernández-Olivares, 2017) y mejoras en el comportamiento térmico (A. Benazzouk, O. Douzane, K. Mezreb, B. Laidoudi & M., Quéneudec, 2007) y frente al fuego (F. Hernandez Olivares & G. Barluenga, 2004).

Sin embargo, se destaca de forma unánime la pérdida progresiva de resistencia, tanto a flexión como a compresión, a medida que se incrementa la proporción de caucho NFU (D. Fedroff, S. Ahmed & D.Z. Savas, 1996; A.R. Khaloo, M. Dehestani & P. Rahmatabadi, 2008; Giedrius Girskas & Dz'igita Nagrockiene, 2017).

Por otro lado diversos trabajos muestran como la incorporación de fibras a diferentes conglomerantes han mejorado las propiedades mecánicas del material, aumentando la resistencia a flexotracción, la tenacidad o la resistencia al impacto. En todos ellos se destaca la influencia de las longitudes de las fibras y su porcentaje de adición, así como el grado de dispersión. Entre las fibras empleadas podemos encontrar fibras de polipropileno (Hsie, Tu & Song, 2011), de basalto (Ralegaonkar, Gavali, Aswath & Abolmaali, 2018), de vidrio (M. del Río Merino, F. Hernández Olivares & P. Comino Almenara, 2004), fibras de lana mineral (S. Romaniega Piñeiro, M. Del Río Merino, C. Pérez García, A. & San Antonio González, 2013).

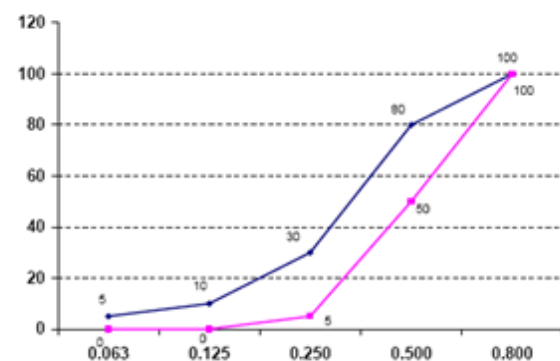
TABLA I  
PROPIEDADES CAUCHO NFU

Análisis químico	Mínimo (%)	Máximo (%)
<i>Extracto cetónico</i>	10	20
<i>Polímeros NR/SR</i>	40	55
<i>Caucho natural NR</i>	21	42
<i>Negro de carbono</i>	30	38
<i>Cenizas</i>	3	7
<i>Azufre</i>	-	5
Propiedades físicas		
<i>Densidad aparente</i>	0,5±0,05 gr/cm <sup>3</sup>	
<i>Humedad</i>	< 0,75 % en peso	
<i>Contenido en materiales ferromagnéticos</i>	<0,01 % en peso	
<i>Contenido en materiales textiles</i>	< 0,25 % en peso	
<i>Contenido en otras impurezas</i>	< 0,25 % en peso	

Caucho reciclado en polvo procedente de neumáticos fuera de uso (NFU).  
Propiedades físicas y análisis químico.

No se han encontrado estudios sobre los efectos de la incorporación de fibras de otros materiales a compuestos de yeso-caucho NFU.

El objetivo de este trabajo, como continuación de estudios anteriores, es mejorar las propiedades mecánicas de compuestos de yeso-caucho procedente del reciclado de residuos de caucho de neumáticos fuera de uso (NFU), tanto en forma de fibras (R.V. Lozano-Díez, O. López-Zaldívar, S. Herrero-del Cura, P. Mayor & F. Hernández-Olivares, 2019) como de polvo (S. Herrero, P. Mayor & F. Hernández-Olivares, 2013), mediante la incorporación de fibras de diferentes materiales.



% PASA POR CADA TAMIZ

Abertura nominal de tamiz (mm)	Mínimo (%)	Máximo (%)
0,800	100	100
0,500	50	80
0,250	5	30
0,125	0	10

Fig. 1 Polvo de caucho 0,0mm-0,6mm. Análisis granulométrico..

Los compuestos se caracterizan mediante ensayos de densidad, resistencia a flexión y a compresión y módulo de elasticidad dinámico.

## II. MATERIALES

Los materiales empleados para la elaboración de los compuestos son los siguientes:

### A. Residuos de caucho de neumáticos fuera de uso (NFU)

Se han empleado dos tipos de caucho, el primero en polvo procedente de la trituración mecánica en atmósfera ambiental de neumáticos fuera de uso (NFU) y el segundo, en forma de fibras, con origen en el recauchutado de NFU. Ambos materiales han sido proporcionados por la planta de tratamiento de NFU que la empresa VALORIZA servicios medioambientales, tiene en Chiloeches (Guadalajara). Las propiedades físicas y el análisis químico, según se indica en la ficha técnica de los productos se reflejan en la tabla I.

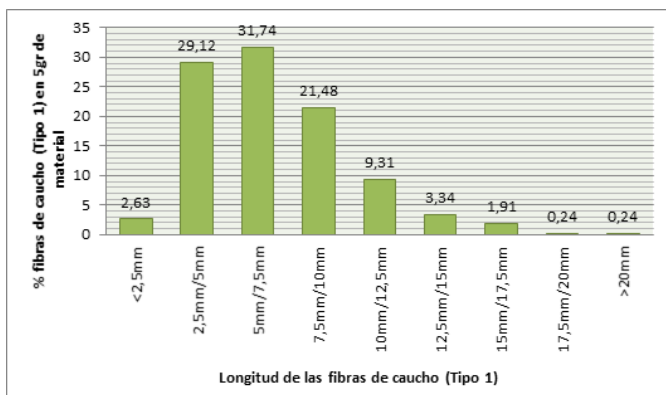


Fig.2. Caracterización de las longitudes de las fibras de caucho recauchutado.

El análisis granulométrico del producto en polvo utilizados se muestra en la Fig 1. En la Fig. 2 se incluye la caracterización de las longitudes de las fibras de caucho recauchutado. Se utilizaron una serie de tamices normalizados, seleccionándose las fracciones granulométricas retenidas en el tamiz de 1 mm. Para el tamizado se ha seguido lo establecido en la Norma EN 933-2 y los requisitos de las Normas ISO 3310-1 y 3310-2. Los tamices se han colocado en la máquina tamizadora de arriba abajo, en orden decreciente de tamaños de abertura, agitando de manera mecánica durante 3 minutos.

TABLA II  
PROPIEDADES FIBRAS

Tipo de Fibra	Densidad (Kg/m)	Longitud (mm)	Diámetro (µM)	Módulo de elasticidad (GPa)	Alargamiento a rotura (%)
Basalto	2699	12	17,4	>85	2,5
Vidrio	2540	12	12	>80	3
Poliolefina	0,91	15	1500	>6	7
Polipropileno	0,91	12	31	>1470	80-140

Propiedades de las fibras utilizadas.

### B. Fibras

Para mejorar las propiedades mecánicas de los compuestos de yeso y caucho se han seleccionado 4 tipos de fibras (basalto,

vidrio, poliolefina y polipropileno), cuyas propiedades se muestran en la tabla II.

### C. Yeso

Para la confección de los morteros, se ha utilizado un único tipo de escayola E-35, perteneciente a la empresa ALGÍSS URALITA.

## III. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### A. Dosificaciones

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en trabajos anteriores, en los que la incorporación de caucho producía pérdidas de resistencia incrementadas a medida que se aumentaba su proporción, se decide trabajar con porcentajes de peso del caucho respecto al peso de escayola del 5% y del 15%, tanto para el polvo NFU como para las fibras de recauchutado. Para analizar la influencia de la incorporación de las distintas fibras analizadas se ha mantenido en todos los casos una proporción de un 1% en peso, elaborándose mediante el manejo de estas variables 21 series diferentes (tablas III y IV).

En la tabla III se incluyen las denominaciones y dosificaciones de la serie de referencia y las elaboradas con polvo de caucho.

TABLA III  
SERIES Y DOSIFICACIONES POLVO DE CAUCHO

Denominación Serie	Tipo de Fibra	Caucho (g)	Agua (g)	Escayola E-35 (g)
R	-	0	0	600
C5	-	0	50	600
C15	-	0	150	600
C5-B1	Basalto	10	50	600
C15-B1	Basalto	10	150	600
C5-V1	Vidrio	10	50	600
C15-V1	Vidrio	10	150	600
C5-S1	Poliolefina	10	50	600
C15-S1	Poliolefina	10	150	600
C5-P1	Polipropileno	10	50	600
C15-P1	Polipropileno	10	150	600

Denominación de series elaboradas con polvo de caucho NFU. Tipos de fibra utilizados (basalto, vidrio, poliolefina y polipropileno) y dosificaciones.

En la tabla IV se incluyen las denominaciones y dosificaciones de la serie de referencia, nuevamente, y de las muestras elaboradas con fibras de caucho.

El procedimiento de amasado ha sido el mismo en todas las muestras, de acuerdo a la norma UNE EN 13279-2, mezclándose previamente en seco el yeso y el caucho, incorporándose en último lugar las diferentes fibras utilizadas hasta conseguir una dispersión de las mismas lo más homogénea posible. Las dimensiones de las probetas son las normalizadas para ensayos mecánicos 4 cm x 4 cm x 16 cm, elaborándose tres probetas por serie. La relación agua/yeso se ha mantenido constante en un valor de 0,6 recomendado por el fabricante de yeso.

Se determinan para cada una de ellas las principales

TABLA IV  
SERIES Y DOSIFICACIONES FIBRA DE CAUCHO

Denominación Serie	Tipo de Fibra	Caucho (g)	Agua (g)	Escayola E-35 (g)
R	-	0	0	600
FC5	-	0	50	600
FC15	-	0	150	600
FC5-B1	Basalto	10	50	600
FC15-B1	Basalto	10	150	600
FC5-V1	Vidrio	10	50	600
FC15-V1	Vidrio	10	150	600
FC5-S1	Poliolefina	10	50	600
FC15-S1	Poliolefina	10	150	600
FC5-P1	Polipropileno	10	50	600
FC15-P1	Polipropileno	10	150	600

Denominación de series elaboradas con fibra de caucho NFU. Tipos de fibra utilizados (basalto, vidrio, poliolefina y polipropileno) y dosificaciones.

propiedades físicas y mecánicas, comparándolas entre si y con las de referencia sin fibras de caucho. Se incluyen también medidas del módulo de elasticidad dinámico.

### B. Ensayos

Los ensayos físicos y mecánicos se han realizado de acuerdo con lo especificado en las correspondientes normas UNE sobre yesos y escayolas. Determinándose: densidad seca, resistencia a flexión y resistencia a compresión (UNE EN 13279-1 y UNE EN 13279-2).

Para calcular la velocidad de propagación se utiliza el equipo de medición de ultrasonidos, portátil, modelo E-46 de IEP. Las

TABLA V  
SERIES Y PROPIEDADES

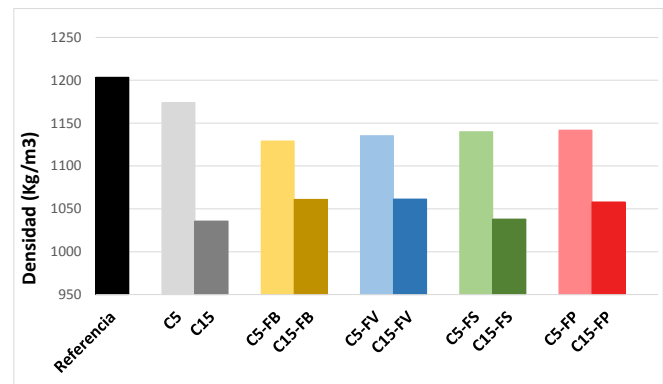
Denominación Serie	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	R. Flexión (N/mm <sup>2</sup> )	R. Compresión (N/mm <sup>2</sup> )	Módulo Young (Mpa)
R	1203,38	6,68	17,73	8569,02
C5	1173,95	5,34	12,53	6844,39
C15	1035,67	3,69	6,75	3876,29
FC5	1187,89	5,52	12,24	6661,64
FC15	1097,78	3,81	6,81	4849,57
C5-B1	1129,03	5,94	13,25	6447,52
C15-B1	1061,07	4,30	7,99	4662,13
FC5-B1	1169,14	6,47	13,61	6852,14
FC15-B1	1081,12	4,65	7,72	5074,65
C5-V1	1135,42	7,48	12,94	6462,94
C15-V1	1061,45	5,56	7,82	4738,31
FC5-V1	1141,01	7,02	14,84	7236,65
FC15-V1	1074,61	5,77	8,53	5473,39
C5-S1	1139,97	5,71	13,69	6434,28
C15-S1	1038,15	3,61	7,55	4164,90
FC5-S1	1160,67	5,30	12,46	5730,62
FC15-S1	1063,80	3,67	6,65	4734,78
C5-P1	1141,79	6,08	13,43	5933,84
C15-P1	1057,94	4,21	7,58	3610,41
FC5-P1	1161,45	5,09	12,23	6261,76
FC15-P1	1092,45	3,96	7,21	4932,35

Densidad aparente. Resistencia a flexión y a compresión. Módulo de elasticidad dinámico.

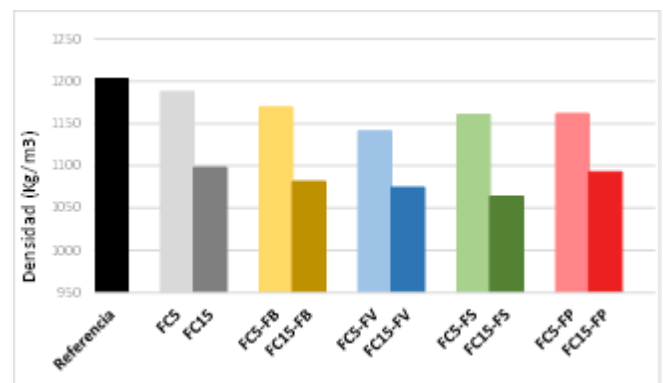
lecturas se han efectuado en el sentido longitudinal de las probetas. El procedimiento seguido en el ensayo está basado en las directrices de la norma española UNE EN 12504-4 2006.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las muestras que sólo contenían caucho tanto en polvo como en forma de fibras eran fácilmente trabajables, dado que la proporción de caucho no es elevada, siendo más homogéneas las formadas por polvo de caucho. Al incorporar los distintos



(a)



(b)

Fig.3. Densidad de muestra de referencia, compuestos escayola-caucho 5% y 15% y escayola-caucho (5% y 15%) 9-fibra (1%) de basalto, de vidrio, de poliolefinas y de polipropileno para caucho en polvo (a) y caucho en forma de fibras (b).

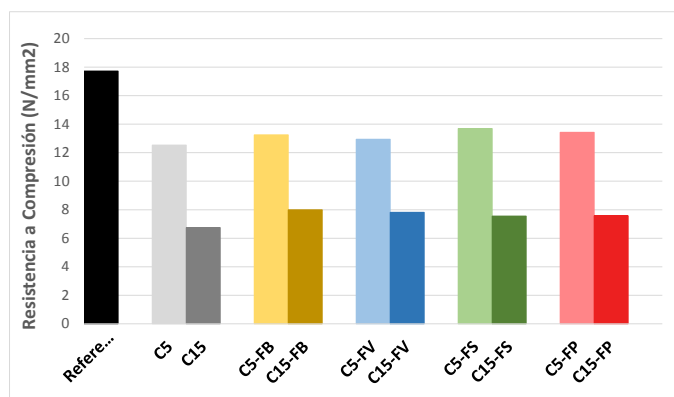
tipos de fibras la homogeneidad y trabajabilidad variaban dependiendo de la fibra añadida. Las de fibra de vidrio y polipropileno resultaron fáciles de amasar y homogéneas. Las que incorporan fibras de basalto presentaban una mayor dificultad durante el amasado, pero sobre todo durante la fabricación de las probetas, por la pérdida de fluidez, siendo necesario vibrarlas para evitar la formación de coqueas.

En la tabla 5 se recogen los valores de densidad, resistencia a flexión, resistencia a compresión y módulos de elasticidad dinámico, obtenidos para todas las series elaboradas

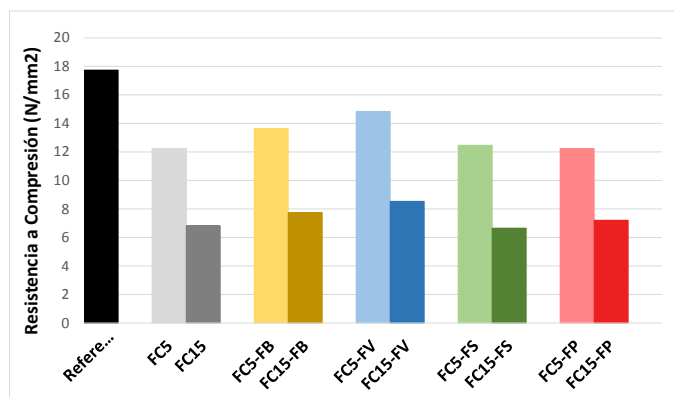
La figura 3 muestra los resultados de densidad aparente seca de las muestras elaboradas. Comparando con las de referencia, se observa que la adición de caucho en proporciones del 5% y 15%, produce importantes reducciones de la densidad, mayores con el producto en polvo que con la fibra de caucho. La incorporación de otros tipos de fibras modifica la densidad de los compuestos en proporciones similares para todas las fibras añadidas. En los compuestos de fibra de caucho en todos los casos se produce una ligera disminución de la densidad y en los

de polvo de caucho, disminuyen cuando la proporción de caucho es del 5% y aumentan cuando es del 15%. Hay que tener en cuenta que el porcentaje de adición de las diferentes fibras es muy bajo, del 1% en peso, y por tanto la influencia debe ser pequeña; sin embargo, las variaciones en la densidad no siempre son acordes con las densidades de las fibras añadidas. Por ejemplo, los compuestos con proporciones de caucho del 5% a los que se incorpora fibra de vidrio, dan como resultado menores valores de densidad que los que incorporan poliolefinas o polipropilenos, materiales menos densos que la fibra de vidrio. Esto puede deberse al menor diámetro de este tipo de fibras.

Los resultados de las probetas ensayadas a compresión (Fig. 4) muestran destacables pérdidas de resistencia de los compuestos de yeso-caucho en relación a la serie de referencia. La de yeso sin caucho alcanza resistencias de 17,73 N/mm<sup>2</sup> reduciéndose en aproximadamente un 40% para adiciones del 5%, con variaciones mínimas tanto para el polvo de caucho



(a)

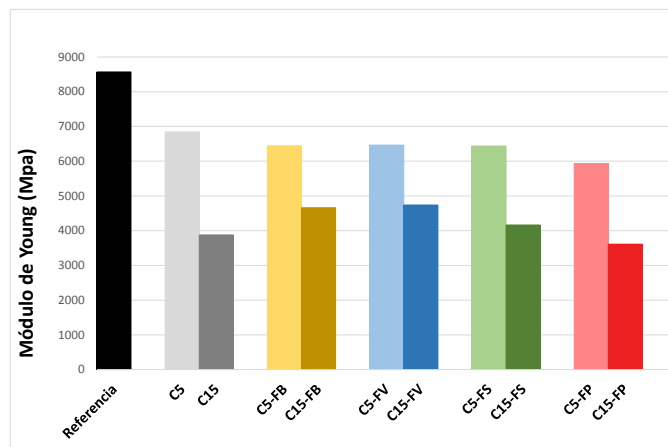


(b)

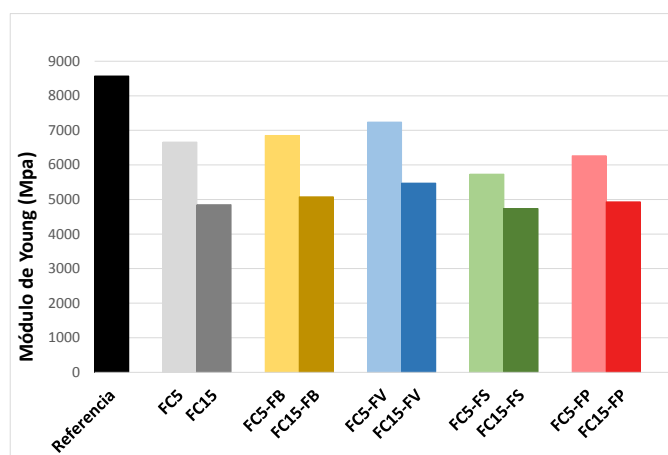
Fig.4. Resistencia a compresión de muestra de referencia, compuestos escayola-caucho 5% y 15% y escayola-caucho (5% y 15%) fibra (1%) de basalto, de vidrio, de poliolefinas y de polipropileno para caucho en polvo (a) y caucho en forma de fibras (b).

como para la fibra de caucho, la reducción se acerca al 60% cuando la proporción de caucho añadida es del 15%, manteniéndose igualmente en valores muy similares las de polvo y fibra de caucho, manteniéndose siempre dentro de los admisibles según la norma UNE.

Este descenso se modera en las muestras que contienen otros tipos de fibras especialmente en las de fibra de vidrio y de basalto, no observándose casi mejoras en las de polipropileno y poliolefinas. Los mejores resultados se dan en las muestras que contienen fibra de vidrio y fibra de caucho, con valores de 14,84



(a)



(b)

Fig.6. Módulo de elasticidad dinámica de muestra de referencia, compuestos escayola-caucho 5% y 15% y escayola-caucho (5% y 15%) fibra (1%) de basalto, de vidrio, de poliolefinas y de polipropileno para caucho en polvo (a) y caucho en forma de fibras (b).

N/mm<sup>2</sup> en las que el contenido de caucho es del 5% y de 8,53 N/mm<sup>2</sup> en las que es del 15%. Sin embargo, si comparamos las que contienen polvo de caucho, las de fibra de vidrio dan valores muy similares a las del resto de fibras.

La carga de rotura a flexión de las muestras que contienen caucho (fig. 5) es menor que la de referencia, pero con descensos menos acusados que en compresión. La de referencia alcanza resistencias a flexión de 6,68 N/mm<sup>2</sup> (tabla 5) reduciéndose en torno a un 18% en las que contienen un 5% de caucho, y alrededor del 43% en las que contienen un 15%. Los valores son muy similares tanto para el caucho en forma de fibras como para el producto en polvo.

Los resultados de las probetas ensayadas a flexión que incorporan fibras de polipropileno, basalto y vidrio muestran mejoras en la resistencia en relación a la serie que contienen



sólo caucho, manteniéndose en valores similares las que contienen fibras de poliolefina.

Destacan de manera significativa las que contienen fibras de vidrio que alcanzan valores de resistencia a flexión superiores incluso a los de las muestras de referencia (sin contenido de caucho) para los compuestos con proporciones de caucho del 5%, tanto para el producto en polvo como en forma de fibras: C5-V1 y FC5-V1. En las que incorporan caucho en proporciones del 15% y fibra de vidrio al 1% se obtienen reducciones de la resistencia a flexión en torno al 15% en relación a la serie de referencia.

La forma de rotura de las muestras que contienen fibras es diferente de la de referencia. Las que contiene fibras, aunque parten, se mantienen cosidas por las fibras. Separar los dos fragmentos en las que sólo contienen caucho no presenta dificultad, sin embargo en las que contienen fibras, especialmente en las de basalto requiere un esfuerzo muy destacable.

En la tabla 5 Se reflejan los valores medios del módulo de elasticidad dinámico para las series estudiadas.

La velocidad ultrasónica se reduce con la incorporación de caucho (fig. 6), aumentando de manera progresiva al incrementarse su proporción. La modificación del valor por la incorporación de las diferentes fibras es poco relevante en las muestras de polvo de caucho en proporciones del 5%, manteniéndose en todas ellas en valores inferiores. Son algo mayores las diferencias en las de fibra de caucho, dando como resultado valores algo mayores en las de fibra de vidrio y basalto.

Sin embargo, en las muestras que contienen caucho en proporción del 15%, se producen pequeños incrementos de la velocidad ultrasónica.

## V. CONCLUSIONES

La densidad se reduce en todas las series estudiadas. El caucho NFU, dada su menor densidad y la proporción de carga añadida, es el elemento que más influye en esta reducción. Las destacables diferencias de densidad entre los compuestos que incorporan polvo de caucho y los que contienen fibra de caucho, se debe a que el polvo de caucho tiene una granulometría más fina, que requiere una mayor cantidad de agua para la hidratación y por lo tanto una modificación de la estructura porosa del material. La incorporación de los diferentes tipos de fibras produce pequeñas variaciones, en general con pequeñas disminuciones de la densidad. Aunque no hay diferencias destacables en función de las fibras añadidas (el porcentaje de incorporación es muy bajo, del 1% en peso), habría que considerar la influencia del diámetro de las mismas. Los menores valores se obtienen con las fibras de poliolefina.

La adición de caucho NFU disminuye la resistencia a flexión y a compresión. Las pérdidas de resistencia se mantienen con la

incorporación de fibras de polipropileno y poliolefinas. Las fibras de basalto incrementan ambas resistencias, llegando a valores similares a los de referencia en flexión para las muestras con contenido de caucho del 5%.

Los mejores resultados se producen con la incorporación de fibras de vidrio, en los que la resistencia a flexión llega a valores similares a las muestras de referencia e incluso supera esos valores en las series con un 5% de caucho NFU, tanto en forma de polvo como de fibras.

Los resultados de los módulos de elasticidad muestran la disminución de la rigidez que se produce con la adición de caucho y se mantiene al incorporar todos los tipos de fibras.

Los compuestos yeso-caucho-fibra de vidrio/fibra de basalto son dos nuevos materiales, con las mismas posibilidades de uso de los yesos convencionales con la ventaja de ser más ligero, consiguiéndose desde el punto de vista medioambiental la reutilización del caucho NFU, material de difícil eliminación para el que es importante encontrar nuevos usos. Sería por tanto de aplicación para paneles de tabiquería, placas para falsos techos, capas de compresión sobre formados en rehabilitación de edificios, etc.

Por otro lado, teniendo en cuenta los anteriores estudios realizados, aunque debe ser objeto de comprobación en futuras investigaciones, la incorporación de caucho en cualquiera de las dos presentaciones utilizadas, fibra o polvo, produciría un mejor comportamiento térmico.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración prestada al laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

## REFERENCIAS

- Benazzouk, A., Douzane, O., Mezreb, K., Laidoudi, B. & Quéneudec, M. (2007). Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modelling. *Construction and Building Materials*, 22, 573-579.
- Eldin, N., Senouci, A. (1993). Rubber-Tire Particles as Concrete Aggregate. *J. Mater. Civ. Eng.*, (1993) 5(4), 478-496.
- Fedroff, D., Ahmed, S. & Savas, D.Z. (1996). Mechanical properties of concrete with ground waste tire rubber. *Trans. Res. Rec.*, 1532, p. 66-72.
- Ghizda˘veŃ, Z., Ștefan, B.M., Nastac, D., Vasile, O. & Bratu, M. (2016). Sound absorbing materials made by embedding crumb rubber waste in a concrete matrix. *Construction and Building Materials* 124 (2016) 755-763.
- Girskas, G. & Nagrockiene, D. (2017). Crushed rubber waste impact of concrete basic properties. *Construction and Building Materials* 140 (2017) 36-42.
- Hernandez Olivares, F., Barluenga, G., Bollati, M. & Witoszek,

- B. (2002). Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete. *Cement and Concrete Research*, 32(10), 1587-1596.
- Hernandez Olivares, F. & Barluenga, G. (2004). Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 109-117.
- Herrero, S., Mayor, P. & Hernández-Olivares, F. (2013). Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster-rubber mortars. *Materials and Design* 47(2013), 633-642.
- Hsie, M., Tu, C. & Song, P.S. (2008) Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete, *Mater. Sci. Eng. Part A* 494 (1–2) 153–157.
- ISO 3310-2 (2013). Test sieves -- Technical requirements and testing -- Part 2: Test sieves of perforated metal plate.
- ISO 3310-1 (2016). Test sieves -- Technical requirements and testing -- Part 1: Test sieves of metal wire cloth
- Khaloo, A.R., Dehestani, M. & Rahmatabadi, P. (2008). Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles. *Waste Management*, 28(12), 2472-2482.
- López-Zaldívar, O., Lozano-Díez, R., Herrero del Cura, S., Mayor-Lobo, P. & Hernández-Olivares, F. (2017). Effects of water absorption on the microstructure of plaster with end-of-life tire rubber mortars. *Construction and Building Materials*, 150, Pages 558-567.
- Lozano-Díez, R.V., López-Zaldívar, O., Herrero-del Cura, S., Mayor, P. & Hernández-Olivares, F. (2019). Influencia de la incorporación de fibras de caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) en morteros de yeso. *Estudio de las propiedades mecánicas, térmicas y acústicas. Dyna (Bilbao)* 94(4)
- Ralegaonkar, R., Gavali, H., Aswath, P. & Abolmaali, S. (2018) Application of chopped basalt fibers in reinforced mortar: A review. *Construction and Building Materials*. Volume 164, 589-602.
- Río Merino, M. del, Hernández Olivares, F. & Comino Almenara, P. (2004). Estado del arte sobre el comportamiento físico-mecánico de la escayola reforzada con fibras de vidrio E. *Informes de la Construcción*, 56 (493), 33.
- Romaniega Piñeiro, S., Río Merino, M. del, Pérez García, C. A. & Antonio González, S. (2013). Refuerzo de la escayola mediante fibras de lana mineral procedentes del reciclaje de RCD. I Congreso internacional de Construcción Sostenible y Soluciones Ecoeficientes, 136-14.
- Segre, N., Joekes, I. (2000). "Use of tire rubber particles as addition to cement paste". *Cement and Concrete Research*, 30(9), 1421-1425.
- Turatsinze, A., Bonnet, S. & Granju, J.L. (2005). Mechanical characterisation of cement-based mortar incorporating rubber aggregates from recycled worn tyres. *Building and Environment*, 40 (2), 221-226.
- UNE-EN 933-2/1M (1999). Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas.
- UNE-EN 12504-4 (2006). Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4, Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos.
- UNE-EN 13279-1 (2009). Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones.
- UNE-EN 13279-2 (2014). Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.



**Reconocimiento – NoComercial (by-nc):** Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.