



# Reciclado de neumáticos fuera de uso mediante su incorporación en matriz de poliuretano

A. Guerrero, P. Lamela, M. Merino, C. Xu

E.T.S.I. de Caminos, Canales y puertos, Universidad Politécnica de Madrid, C/ Profesor Aranguren 3, E28040, Madrid, Spain

## INFORMACIÓN

### Información del Proyecto:

Entrega anteproyecto 24 Febrero 2019

Entrega Proyecto 15 Mayo 2019

Disponible online 27 Mayo 2019

### Keywords:

GTR

Poliuretano

Aislante

## ABSTRACT

Este proyecto busca, a grandes rasgos, mejorar las propiedades tanto mecánicas como físicas de la espuma de poliuretano a través de la mezcla de ésta con residuo de neumático (GTR) en diferentes proporciones dependiendo de la aplicación deseada. De esta forma, tras realizar los diferentes ensayos para calcular sus características, se puede comprobar la mejora de las mismas. Cada proporción de mezcla está pensada de tal manera que sus propiedades se adapten al objetivo deseado.

© 2019 ESTRUMAT 2.0. All rights reserved.

## 1. Introducción

El uso del automóvil y su masificación ha supuesto a lo largo de la historia una de las mayores revoluciones tecnológicas a nivel mundial. No obstante, también ha traído consecuencias negativas como la contaminación por gases u otros residuos. Entre ellos uno de los más perjudiciales son los neumáticos fuera de uso (NFU); en España se generan alrededor de 300.000 toneladas de residuos de neumáticos al año.

Los materiales elastoméricos tienen una gran variedad de aplicaciones importantes, siendo la fabricación de neumáticos una de las principales actualmente. Entre los materiales más utilizados para su fabricación se encuentran el caucho natural (NR) y los cauchos sintéticos como el poli-butadieno (BR) y el estireno-butadieno (SBR), siendo el negro de carbono la carga reforzante más comúnmente empleada para este tipo de aplicaciones. Sin embargo, debido a la naturaleza termoestable de estos materiales, surge una problemática medioambiental al momento de finalizar su tiempo de vida útil. Esto se traduce en una necesidad de plantear y buscar alternativas que permitan desarrollar óptimos procesos de reciclado para disponer mejor de los desechos, así como de promover procesos viables para aumentar el tiempo de vida útil de estos materiales. Varios de los usos que puede tener este desecho varían desde su incorporación para la fabricación de suelos de seguridad, barreras de protección de circuitos, para la construcción de taludes, como material de drenaje, reductores de altura de ola y pantallas acústicas.

Por otra parte, las espumas de poliuretano, debido a sus propiedades únicas, se han utilizado como materiales de construcción en diferentes áreas tales como las industrias automotrices y de muebles o en la producción de aislamientos térmicos. La multiplicidad de sus aplicaciones mantiene promueve la realización de muchos trabajos de investigación relacionados con la estructura y las propiedades de las espumas de poliuretano. Debido a su estructura reticulada, se puede usar GTR como modificador de impacto o absorbente de vibraciones; el reemplazo parcial de poliuretano con partículas de GTR puede mejorar las propiedades mecánicas de los

materiales resultantes, reduciendo simultáneamente su costo de producción, debido a la incorporación de material de desecho de bajo coste.

Se tiene como objetivo concreto a lo largo de este proyecto, la mejora de las propiedades del poliuretano al añadir GTR. Además, dar una utilidad al este desecho con la finalidad de promover su reciclado. De esta forma evitar sus efectos dañinos en el medio ambiente.

## 2. Materiales

### 2.1. Desechos de neumático en polvo (GTR)

Para la reutilización de los neumáticos, se utilizarán desechos en polvo (GTR: Ground Tire Rubber) previamente procesados por la empresa SIGNUS Ecovalor (Figura 1). Esta es una entidad sin ánimo de lucro creada como iniciativa de los principales fabricantes de neumáticos, con la finalidad de que pueda ser utilizado como mecanismo con el que todos los productores que lo deseen puedan cumplir con las obligaciones que les impone el Real Decreto 1619/2005.



Fig. 1. GTR

El tamaño de partícula obtenido mediante los procesos de trituración y molienda que realiza la empresa puede variar entre 0,8 mm y 8 mm;

en este caso, se utilizó el menor tamaño posible con el objetivo de mejorar la dispersión y las interacciones entre las fases del material a fabricar. Sin embargo, mayores tamaños de partícula podrían resultar óptimos para otras aplicaciones.

2.2. *Espuma de poliuretano multiusos (PU)*

El poliuretano se forma combinando polioli e isocionato. Tienes grandes propiedades como aislante hidrófugo, térmico y antihumedad. Es ligero, poroso y moldeable durante su aplicación. Específicamente, el material utilizado ha sido Espuma Expansiva Multiusos AXTON, de 750 mL (Figura 2):



Fig. 2. Espuma de poliuretano

3. **Materiales**

3.1. *Mezclado*

Se mide la cantidad de poliuretano en un recipiente milimetrado. De esta manera, al añadir primero el poliuretano, se evita su solidificación en forma de espuma. Posteriormente, se introduce una cantidad de GTR, también medida, en la proporción idónea para que se adapte a las propiedades deseadas. Por último, se deposita todo en un recipiente y con ayuda de una espátula se remueve hasta obtener una mezcla lo más homogénea posible. Se estima una espera de 2 horas hasta que la espuma haya alcanzado su máximo volumen.

También se utilizó un segundo método alternativo para evitar la rápida solidificación del poliuretano. Se introduce una cantidad de GTR conocida en un recipiente. Posteriormente se añade la espuma. Una vez mezclado y solidificado se procede a calcular el volumen total de la mezcla mediante el método de Arquímedes. Al ser el poliuretano impermeable, se sumerge en un recipiente milimetrado con una cantidad de agua conocida y posteriormente se observa lo que ha aumentado. De esta manera también podemos conocer las proporciones de la mezcla. Las proporciones finales obtenidas se presentan a continuación:

Tabla 1. Proporción PU/GTR en las mezclas.

Probetas	PU (%)	GTR (%)
P1	100	0
P2	98,41	1,59
P3	96,23	3,77
P4	14,29	85,71

Cabe destacar la relación entre el volumen de la mezcla final y las proporciones utilizadas, ya que se observaba que a mayor cantidad de GTR, el volumen de la espuma (en concreto del aire de los poros) se reducía considerablemente.

3.2. *Ensayos*

Las dimensiones de las probetas ensayadas son de 10,8x1,5x1,7 cm (Figura 3):



Fig. 3.- Probetas del material compuesto fabricado.

3.2.1. *Ensayo de tracción*

Se ata en un punto fijo (barandilla) la cuerda, la cual, agarra el extremo superior de la probeta con pinzas y cinta americana. En el extremo inferior, la cuerda es atada a un cubo para medir el peso que es capaz de resistir la probeta añadiendo agua hasta que rompe.

3.2.2. *Ensayo de Charpy*

Se amarró la cuerda a un punto del techo, encima del soporte en el que estará apoyado la probeta. En el extremo de la cuerda se ató un martillo. Para la prueba se eleva el martillo a determinada altura probando a qué altura mínima se rompe y también se tiene en cuenta la altura que se eleva tras romper la probeta.

3.2.3. *Ensayo de conductividad eléctrica*

Mediante un circuito eléctrico de pila, cable y resistencia (bombilla) se probó si a través de las probetas, actuando como resistencia, la bombilla iluminaba.

3.2.4. *Ensayo de conductividad térmica*

En una probeta larga y fina se ponen a cada 5 cm una gota de cera, en uno de los extremos se calienta con una fuente de calor y ver si la cera se derrite progresivamente.

3.2.5. *Ensayo de permeabilidad*

En un cubo de agua se reposa durante 1 minuto y tras este tiempo se ve si ha absorbido agua.

4. **Resultados**

4.1. *Propiedades mecánicas*

4.1.1. *Ensayo de tracción*

A partir de la determinación de la masa que cada probeta es capaz de soportar, se ha calculado la resistencia a tracción en cada caso a partir de las siguientes ecuaciones:

$$F = mg \tag{1}$$

Donde:

- m es la masa total, correspondiente a la suma de la masa de agua agregada en cada caso más la masa del cuenco utilizado [kg]
- g es la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

$$\sigma = F/A \tag{2}$$

Donde:

- F es la fuerza que soporta cada probeta [N]
- A es al área transversal de las probetas [m<sup>2</sup>]

Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Tabla 2. Resistencia a tracción para cada grupo de probetas.

Probeta	Masa (± 0,1 kg)	Fuerza (± 0,1N)	Resistencia a tracción (± 0,8 kPa)
P1	1,30	15,46	60,62
P2	1,55	17,91	70,25
P3	1,90	21,34	83,69
P4	N/A	N/A	N/A

A partir de estos datos, se puede obtener gráficamente la relación entre el contenido de GTR y la resistencia a tracción.

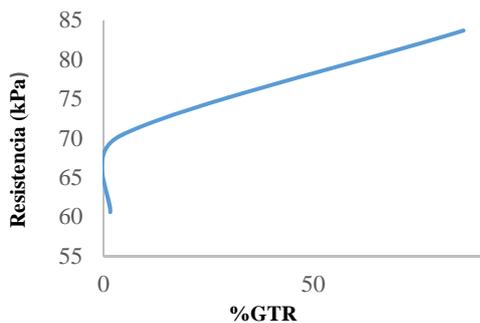


Fig.4.- Resistencia en función del contenido de GTR en las muestras

En consecuencia, se verifica que la adición de GTR en mayor proporción aumenta la resistencia del material compuesto. Esto permite corroborar que la incorporación del desecho ocurre de manera eficiente, ya que hay una buena interacción entre carga/matriz que permite mejorar el desempeño mecánico del material. Como observación adicional, se tiene que el hecho de añadir el desecho de neumático en polvo impide o limita el crecimiento de la espuma, reduciendo la entrada de aire y, como consecuencia, la porosidad. Esta última, al ser una fase adicional, afecta directamente el comportamiento mecánico de las probetas ya que constituyen zonas de concentración de esfuerzos; es por esto que, para el caso de la probeta 4 se observa que el hecho de tener una porosidad prácticamente nula hace que no sea posible lograr la ruptura de la misma bajo las condiciones de ensayo utilizadas.

4.1.2. Ensayo Charpy

A partir de la metodología utilizada para llevar a cabo el ensayo de Charpy, es posible determinar la diferencia de energía potencial del péndulo mediante las siguientes ecuaciones:

$$E_p = mgh \tag{3}$$

- m es la masa del martillo [kg]
- g es la gravedad [m/s<sup>2</sup>]
- h es la altura final que alcanza al martillo luego de romper la probeta [m] y se calcula a partir del teorema de Pitágoras aplicado a la imagen representada en la Figura 2:

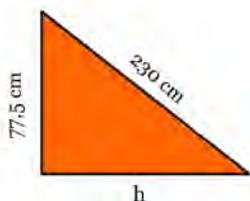


Fig.5. Triángulo base para el cálculo de la altura h.

Los resultados obtenidos para cada caso se presentan a continuación:

Tabla 3. Diferencia en la energía potencial de cada probeta utilizando el ensayo de Charpy.

Probeta	Ep1 (J)	Ep2 (J)
P1	1,70	0,91
P2	1,70	0,64
P3	1,70	0,05
P4	4,76	N/A

A partir de estos resultados es posible obtener el siguiente gráfico para describir la diferencia entre las energías potenciales final e inicial:

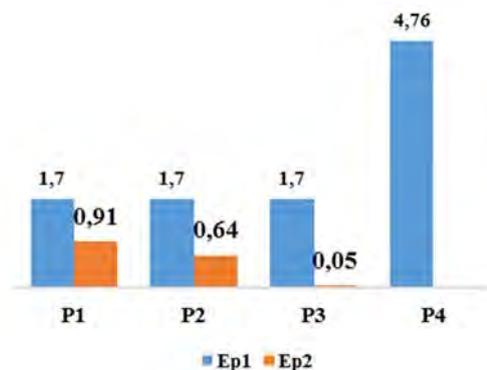


Fig. 6. Variación de la energía potencial para cada una de las probetas.

Como se observa en la Figura 3, la energía potencial inicial (qué es igual para las primeras 3 probetas), disminuye drásticamente al aumentar el contenido de desecho de neumático en la muestra; para el caso de la probeta cuatro, la cual tiene el mayor contenido de GTR, se observa que no es posible determinar la energía potencial final ya que no se logró romper el material mediante la metodología utilizada. Estas observaciones se traducen en que el material fabricado presenta una mayor resistencia al impacto a medida que aumenta el porcentaje de desechos. Esto es posible gracias a la buena interacción entre matriz y refuerzo.

Como se ha mencionado anteriormente, la adición de GTR cambia la cinética de polimerización y el volumen final de la espuma, lo que resulta en el aumento de la densidad aparente del material. Otro factor que afecta a la densidad de las espumas resultantes es la mayor densidad de GTR en comparación con la del poliuretano; este incremento supone un aumento significativo de la resistencia para todas las muestras investigadas.

4.2. Propiedades eléctricas

Mediante la metodología empleada se ha determinado que para todas las probetas y para cada proporción de PU/GTR, el material no es conductor eléctrico ya que, al cerrar el circuito utilizado para el ensayo, no es posible lograr el encendido de la bombilla. Sin embargo, mediante la herramienta CES EduPack ha sido posible determinar el valor de algunas propiedades eléctricas del material:

Tabla 4. Valores de propiedades eléctricas asociadas al material fabricado.

Resistividad eléctrica (μohm.cm)	2,04e20 3,46e20
Constante dieléctrica	6,38-7,03
Factor de disipación	0,0601-0,0722

4.3. Propiedades térmicas

Mediante el ensayo llevado a cabo se ha determinado que el material compuesto resultante no es capaz de conducir el calor. Sin embargo, mediante la herramienta CES EduPack ha sido posible determinar el valor de algunas propiedades térmicas del material:

Tabla 5. Valores de propiedades térmicas asociadas al material fabricado.

Conductividad térmica (W/m.°C)	0,289-0,324
Capacidad calorífica específica (J/kg.°C)	1,68e3-1,77e3
Coefficiente de expansión térmica (μstrain/°C)	87,8-94,5

#### 4.4. Permeabilidad

Se ha determinado tras el ensayo realizado que el material es impermeable al agua.

#### 4.5. Viabilidad económica e impacto medioambiental

Para este caso, también se ha empleado el CES EduPack con el objetivo de obtener un coste aproximado para el producto y determinar qué efecto tendría su fabricación sobre la emisión de gases por de efecto invernadero (huella de CO<sub>2</sub>). A partir de esta herramienta se ha determinado que el precio del producto variaría alrededor de los 3,31 - 4,28 EUR/kg y que la emisión de GEI estaría alrededor de 2,98 - 3,31 kg/kg.

### 5. Conclusiones

Tras la realización de este experimento, se puede concluir que:

- La resistencia a tracción aumenta según aumenta el contenido de desecho de caucho utilizado, esto se debe a que la espuma por sí sola es débil y, debido al aire, que también forma parte de su estructura. Sin embargo, cuando se mezcla con el caucho este le trasfiere parte de sus propiedades con lo que se consigue una mayor resistencia a tracción.
- De esta misma manera sucede algo muy parecido con la resistencia al impacto, la espuma por sí sola es débil frente a un impacto de carácter metálico.
- Como era de esperar, este material no conduce la electricidad, ya que ninguno de los dos materiales empleados (matriz/refuerzo) es buen conductor por separado.
- De igual manera que no conducen el calor, lo que no significa que se pueda quemar.
- Un matiz importante concluido en base a los distintos compuestos que se han realizado es que cuanto mayor es el desecho de caucho, menor poder de crecimiento tiene la espuma, esto se debe en gran medida a la disminución de porcentaje de espuma en la composición.
- Por último, como breve recomendación, a la hora de realizar este experimento recomendamos la utilización de una mezcladora profesional con el fin de garantizar una buena dispersión del material por toda la espuma y de esta manera crear un material uniforme.

### 6. Agradecimientos

En primer lugar, dar las gracias al profesor y director de departamento Juan Gallego de la Universidad Politécnica de Madrid en concreto de la Escuela Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, por ceder el caucho empleado en la experimentación. También debemos agradecer al ICTP, Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros por generar buenas expectativas acerca del caucho y generar nuestra inspiración para tratar el trabajo sobre este material. Por último, gracias a los señores Merino Casado por ceder su domicilio para la realización de los experimentos necesarios para la obtención de datos acerca del material creado.

### 7. Bibliografía

- [1] Piszczyk, L., Hejna, A., Danowska, M., Strankowski, M., Formela, K. (2015). Polyurethane/ground tire rubber composite foams based on polyglycerol: Processing, mechanical and thermal properties. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*.
- [2] Zhang, X., Lu, Z., Lu, C., Tian, D., Lin, H. (2012). Mechanochemical devulcanization of ground tire rubber and its application in acoustic absorbent polyurethane foamed composites. *Journal of Applied Polymer Science*.
- [3] SIGNUS Ecovalor. <https://www.signus.es/>
- [4] Peláez, G., Velázquez, S., Giraldo, D. (2017). Aplicaciones de caucho reciclado: una revisión de la literatura. *Ciencia e Ingeniería Neoranadina, Colombia*.
- [5] Gregori, B., Alba, L., Brown, A., Fernández, M., Moura, J., de la Hoz, Y., Álvarez, A. (2007). Los poliuretanos biodegradables. Estudio bibliográfico de su síntesis y aplicaciones. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. La Habana, Cuba.
- [6] Martín, A. (2015). Aplicación del caucho reciclado como solución constructiva ecológica. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- [7] Verdejo, R., López-Manchado, M., Hernández, M., Huete, M., Lamedo, P. (2018). Sustainable styrene-butadiene rubber/ground tire rubber compounds showing good tradeoff between mechanical properties and self-healing ability. CSIC-ICTP, Madrid, España.