

---

# *Efecto de pretratamientos desvulcanizantes y de aditivos en materiales compuestos con matriz de HDPE y neumáticos fuera de uso*

**J. Cañavate, P. Casas, X. Colom, M. Jeanbon, F. Nogués, F. Carrillo**  
Departamento de Ingeniería Química. Universitat Politècnica de Catalunya.  
C/ Colom, 1. E-08222 Terrassa Ecole des Mines d'Ales  
INTEXTER, Universitat Politècnica de Catalunya, C/ Colom, 15, E-08222, Terrassa.

---

*Effect of devulcanized pretreatments and additives composite materials with HDPR matrix and used tires*

*Efecte de pretractaments desvulcanizat i d'additius en materials compostos amb matriu de HDPE i pneumàtics fora d'ús*

*Recibido: 15 de febrero de 2011; aceptado: 30/03/2011*

## RESUMEN

La gestión de los neumáticos al final de su ciclo de vida precisa soluciones para potenciar su reutilización y reciclado. Un paso previo consiste en la pulverización de los neumáticos por parte de empresas especializadas. La incorporación de este granulado como refuerzo en matrices termoplásticas se ha propuesto como método de valorización del polvo de neumático. Este sistema se ve limitado por la incompatibilidad entre matriz y refuerzo. Recientemente, un nuevo polvo de neumático, denominado comercialmente "desvulcanizado" ha aparecido en el mercado. En este artículo se comparan materiales compuestos formulados con polvo de neumático desvulcanizado con los obtenidos con el mismo material sin tratamiento en matriz de polietileno de alta densidad. También se estudia el efecto de distintos métodos de mezclado, del uso de aditivos dispersantes y del tamaño de partícula.

**Palabras clave:** HDPE, neumáticos reciclados, materiales compuestos, desvulcanizado, compatibilidad matriz-refuerzo

## SUMMARY

Management of end of life tyres needs solutions in order to improve their reuse and recycling. A previous step consists in the grinding of the tyres by specialized companies. The inclusion of this ground tyre rubber as a reinforcement in thermoplastic matrixes has been proposed as a method of upgrading of the tyres. This system is limited by the lack of compatibility between matrix and reinforcement. Recently, a new ground tyre rubber, commercially known as "devulcanized" is available. In this paper, composite mate-

rials formulated with devulcanized ground tyre rubber are compared with materials including the untreated ground tyre rubber in a matrix of high density polyethylene. The influence of the blending method, of the use of dispersing additives and the particle size are also studied.

**Keywords:** HDPR, recycled tyres, composite materials, devulcanized rubber, matrix-reinforcement compatibility

## RESUM

La gestió dels pneumàtics al final del seu cicle de vida precisa solucions per potenciar la seva reutilització i reciclatge. Un pas previ consisteix en la polvorització dels pneumàtics per part d'empreses especialitzades. La incorporació d'aquest granulat com a reforç en matrius termoplàstiques s'ha proposat com a mètode de valorització del pols de pneumàtic. Aquest sistema es veu limitat per la incompatibilitat entre matriu i reforç. Recentment, una nova pols de pneumàtic, anomenada comercialment "desvulcanitzat" ha aparegut en el mercat. En aquest article es comparen materials compostos formulats amb pols de pneumàtic desvulcanitzat amb els obtinguts amb el mateix material sense tractament en matriu de polietilè d'alta densitat. També s'estudia l'efecte dels mètodes de mescla, de l'ús d'additius dispersants i de la grandària de les partícules.

**Paraules clau:** HDPE, pneumàtics reciclats, materials compostos, desvulcanitzat, compatibilitat matriu-reforç

---

\*Autor para la correspondencia: francisco.javier.canavate@upc.edu; Tel.: 93 739 82 17

## INTRODUCCIÓN

La gestión de los neumáticos al final de su ciclo de vida obliga a buscar soluciones para potenciar la reutilización y el reciclado. La prohibición para depositar los neumáticos usados en vertederos por la entrada en vigor del Real Decreto 1619/2005, agilizó la búsqueda de vías de reutilización y valorización. En 2009 se generaron en España cerca de 188.000 toneladas de neumáticos usados, de las cuales un 9% fueron reutilizadas en el mercado de ocasión o recauchutado y del resto, un 53,5% se destinó a reciclaje y valorización del material y un 37,5% a valorización energética. La aplicación principal que tienen los neumáticos fuera de uso son los rellenos de césped artificial y la fabricación de suelos de seguridad en parques infantiles [1]. También se han efectuado ensayos industriales de interés en cementeras, al utilizar los neumáticos como combustible de sustitución, habiéndose llevado a cabo importantes estudios sobre el impacto medioambiental de su uso [2,3,4].

En esta situación, la necesidad de encontrar métodos de valorización de los neumáticos constituye un reto para numerosos grupos de investigación. Una de las estrategias en desarrollo consiste en la fabricación de materiales compuestos basados en matrices termoplásticas reforzadas con polvo de neumático triturado. Este polvo es, en la actualidad, un producto que se obtiene industrialmente en plantas diseñadas a tal fin. El sistema requiere un gran reto: la compatibilización de las fases, ya que el polvo de neumático vulcanizado no interacciona con la fase termoplástica. De esta manera, se obtienen materiales compuestos con propiedades mecánicas insuficientes. Para subsanar este inconveniente, se han llevado a cabo varias estrategias basadas en pretratamientos del polvo mediante radiación, ataque oxidativo con ácidos o recubrimientos reactivos [5,6]. También se han utilizado aditivos o métodos de encapsulación añadiendo copolímeros y agentes de vulcanización.

Recientemente, las industrias dedicadas a la producción de polvo de neumático han desarrollado un nuevo producto de neumático triturado denominado comercialmente "desvulcanizado". La potencialidad de este nuevo tipo de caucho parece alta, a priori, puesto que la ausencia o disminución de vulcanizado debería aumentar las posibilidades de contacto intermolecular matriz-refuerzo favoreciendo, de esta forma, la compatibilidad.

Por otra parte, la distribución del tamaño de partícula media suele tener una gran influencia en las propiedades finales de estos materiales. En este caso, el polvo de neumático existente en el mercado tiene una granulometría determinada. Reducir el tamaño de partícula significaría la utilización de equipos más sofisticados como los criogénicos, que encarecerían en exceso el material final [7]. La granulometría de este polvo de neumático desvulcanizado será asimismo un factor importante para conseguir propiedades mecánicas adecuadas.

Por último, la utilización de aditivos compatibilizantes y dispersantes, puede contribuir a mejorar la interacción entre ambas fases y por lo tanto, a la estructura del material compuesto, tanto en el caso de polvo de neumático desvulcanizado como en el de polvo sin tratar. [8]

En este artículo se presentan materiales compuestos basados en una matriz de polietileno de alta densidad (HDPE) reforzados con polvo de neumático (NFU). Se estudian distintos métodos de mezcla, así como las diferencias en las propiedades obtenidas, comparando el polvo de neumático desvulcanizado frente al habitual (vulcanizado), utilizando distintos tamaños de partícula. También se analiza el efecto compatibilizador de pretratamientos con aditivos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Materiales y preparación de muestras

El polietileno de alta densidad (HDPE) utilizado como matriz fue suministrado por Repsol-YPF (ALCUDIA® 4810-B), con una densidad de 960 kg/m<sup>3</sup>. El HDPE posee un índice de fluidez (Melt Flow Index) (MFI190/2.16) de 1.0g/10min, una resistencia a tracción de 21 MPa y una elongación a rotura de 700%.

El polvo de neumático fuera de uso (NFU) fue suministrado por Gestión Medioambiental de Neumáticos S.L. (GMN) (Maials, Lleida, España) con un tamaño medio de partícula entre 400 y 600 µm. El producto desvulcanizado termomecánicamente con tamaño de partícula entre 200 y 800 µm, fue también suministrado por la misma empresa.

Como aditivo humectante y dispersante, se ha utilizado BYK®-P105, suministrado por BYK-Chemie GmbH (Wesel, Alemania), cuya acción está basada en su estructura, compuesta por grupos afines a partículas y cadenas compatibles con las matrices poliméricas. La interacción entre los grupos químicos de estos aditivos y la superficie del polvo de neumático facilita la compatibilidad del polvo de neumático con la matriz. Las características de este aditivo aparecen en la Tabla 1.

Tabla 1: Características de los aditivos utilizados

Nombre	Tipo	Valor ácido (mg KOH/g)	Descripción
BYK-P105	Agente de humectación	365	Polímero de bajo peso molecular basado en un ácido policarboxílico insaturado

Las muestras se han preparado en dos etapas: mezclado y consolidación. La etapa de mezclado se ha realizado mediante dos sistemas distintos para comparar su eficiencia. Los equipos de mezcla utilizados han sido un sistema de rodillos Collin W100T y un mezclador Brabender modelo Plastograph.

El sistema de mezclado mediante rodillos se realiza a una temperatura de 150-155°C durante 15 min. La etapa de consolidación se lleva a cabo en una prensa de platos calientes Collin P200E a una presión de 100 kN y 170°C durante 10 min, obteniéndose planchas de material compuesto de 150x150x2 mm<sup>3</sup>.

El mezclado en Brabender se realiza a una temperatura de 150°C durante 4 min. En estas condiciones, la mezcla es perfectamente homogénea. La etapa de consolidación

en prensa se realizó en las mismas condiciones descritas anteriormente.

Las láminas de materiales compuestos obtenidos se troquelan en forma de probetas halterio según las especificaciones de la norma ASTM-D-412-98.

En los ensayos en los que se añadió el aditivo dispersante, éste fue incorporado previamente al polvo de neumático, agitando manualmente hasta conseguir una mezcla homogénea. Este caucho pretratado fue mezclado posteriormente con el HDPE, siguiendo el método especificado.

### Técnicas de estudio aplicadas

*Ensayos mecánicos:* Se han estudiado las propiedades mecánicas de las muestras, determinando la evolución del módulo de Young, la resistencia a tracción, la elongación a rotura y la tenacidad de los distintos materiales.

Se han ensayado tres tipos de muestras: a) HDPE y polvo de neumático, b) HDPE y polvo de neumático de tamaño de partícula comprendido entre 800 a 200  $\mu\text{m}$  y c) HDPE y polvo de neumático de tamaño de partícula comprendido entre 500 a 200  $\mu\text{m}$ .

Los ensayos se realizaron con una máquina Instron 3366 de acuerdo con la norma ASTM D-638. La velocidad de ensayo fue de 20 mm/min, temperatura  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  y humedad relativa de  $50 \pm 5\%$ . La sección de las muestras fue de  $6.1 \times 2.0 \text{ mm}^2$ . Para cada medición, se ensayaron cinco muestras distintas, calculándose el promedio y la desviación estándar.

*Microscopía electrónica de barrido (SEM):* Se ha utilizado un microscopio de barrido JEOL JSM 6480 para estudiar cualitativamente la superficie de fractura. Las superficies de estudio se cubrieron previamente con una fina capa de carbono antes de la observación, para incrementar la conductividad de las muestras.

*Microscopía óptica:* Esta técnica fue utilizada para comparar la dispersión de las partículas de NFU en la matriz de HDPE cuando el aditivo dispersante es añadido en la mezcla. Mediante una cuchilla afilada, se seccionaron finos cortes de las muestras y se observaron con un microscopio óptico Jenaval. Se examinaron cuatro muestras de cada probeta.

*Calorimetría diferencial de barrido (DSC):* Se utilizó el termoanalizador Mettler TA4000, con una célula de análisis DSC 30. La temperatura y la entalpía fueron calibradas utilizando In y Pb como estándares. Las muestras de entre 3 y 3.5 mg se sometieron a ensayo entre 40 y  $200^{\circ}\text{C}$ . La velocidad de calentamiento fue de 10 K/min.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Comparación entre sistemas de mezclado

El sistema de mezclado de polímeros con rodillos se usa en numerosos estudios, debido a que permite admitir una capacidad variable de material y a que es un procedimiento sencillo y económico, con posibilidades de ser utilizado industrialmente. No obstante, la homogeneidad que se

consigue no puede comprobarse in situ más que de forma cualitativa visual. El mezclado en Brabender es también ampliamente utilizado industrialmente, debido a las posibilidades de seguimiento que proporciona, de cara a la homogenización de las mezclas. La posibilidad de controlar la fuerza de cizalla y la presión durante el proceso de mezcla permite hacerse una idea de los parámetros de fabricación en planta. Este sistema de mezcla es utilizado ampliamente por la comunidad científica y es considerado como estándar en un gran número de estudios. No obstante, posee la desventaja de su capacidad limitada. Se ha realizado un estudio comparativo con el fin de determinar el sistema de mezclado que proporciona mejores resultados.

Los resultados de los ensayos se muestran en la figura 1. Como puede apreciarse, los valores de las propiedades estudiadas con el procedimiento de rodillos son algo inferiores a los del Brabender. Esto es debido a la mayor homogeneización de las partículas y a la mejor dispersión producida por el mezclador Brabender, difícil de obtener mediante el sistema de rodillos. Por otra parte, la degradación producida en el proceso de mezcla es más difícil de controlar en el calandrado, debido al diferencial de temperaturas existente en las zonas en contacto con los cilindros y la masa del material. La mayor degradación también conduce a peores propiedades mecánicas. Esto se pone de manifiesto ya en el tratamiento aplicado a la matriz sola (sin refuerzo), con un decremento del 13% en el módulo de Young y del 7% en la resistencia a la tracción. La elongación a rotura y la tenacidad aún decrecen más: un 21% y un 17%, respectivamente. La disminución de propiedades observada en la matriz tratada por rodillos respecto al Brabender viene dada por la degradación. La mayor disminución observada en la elongación y tenacidad viene dada por la especial sensibilidad de dichas propiedades a la rotura de cadenas poliméricas, como consecuencia del mezclado en cilindros. En vista de los resultados obtenidos, se ha desestimado el sistema de rodillos y el sistema elegido para realizar los ensayos posteriores ha sido el que utiliza el mezclador Brabender.

Por otra parte, en todos los casos se observa una marcada disminución de propiedades al añadir el polvo de neumático a la mezcla. Como se ha indicado anteriormente, este efecto es debido a la poca compatibilidad entre los componentes de la mezcla [9]. La adhesión interfacial es escasa y, por tanto, las partículas de NFU actúan como concentradores de tensiones. La baja interacción matriz-refuerzo suele ponerse de manifiesto, especialmente, en la elongación y en la tenacidad. Estos resultados propician el uso de pretratamientos en los NFU granulados para conseguir aumentar la interacción interfacial entre las dos fases y mejorar así sus propiedades mecánicas.

### Materiales compuestos con polvo de NFU desvulcanizado.

Se han realizado diversos ensayos utilizando polvo de neumático desvulcanizado. En primer lugar, conviene tener en cuenta que el tamaño de partícula influye de forma importante en las propiedades de este tipo de materiales [10]. Para estudiar su influencia, en el caso del NFU desvulcanizado, se ha tamizado el polvo suministrado industrialmente, cuyo tamaño de partícula varía entre 800 y 200  $\mu\text{m}$ , y se ha obtenido un polvo más fino de tamaño

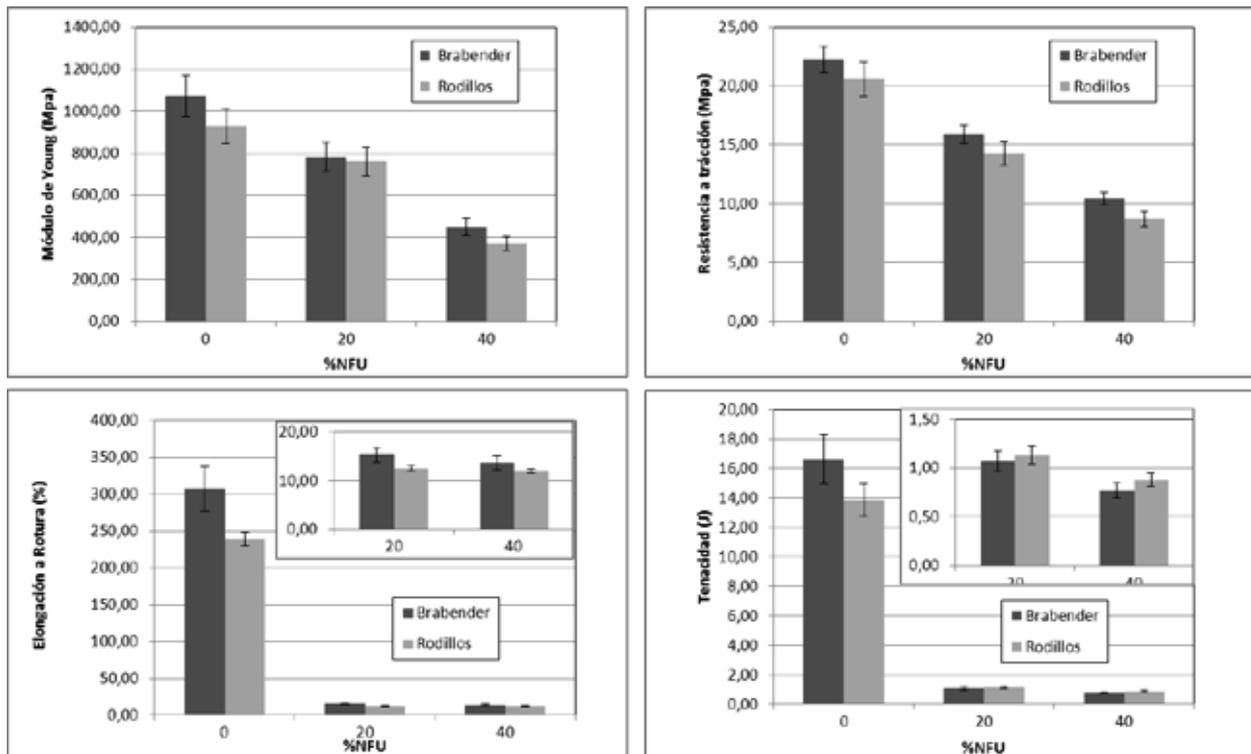


Figura 1. Comparación de propiedades mecánicas, según el procesamiento mediante mezclador Brabender y equipo de rodillos.

de partícula inferior, que oscila entre 500 y 200  $\mu\text{m}$ . De esta forma, se eliminan también los posibles efectos de partículas grandes que pueden, aun siendo infrecuentes, actuar de forma drástica sobre las propiedades del material y conducir a equívocos resultados en la observación del comportamiento general. Otro factor importante es la aglomeración de partículas, resultando un tamaño efectivo muy superior al esperado.

En la figura 2 puede estudiarse el efecto del tamaño de partícula. Observando los resultados obtenidos se aprecia en primer lugar que todas las propiedades decrecen enormemente con la incorporación del polvo de neumático. El módulo de Young decrece aproximadamente en un 60%, la resistencia a la tracción en más de un 50%. La elongación y la tenacidad, propiedades generalmente muy ligadas a la interacción interfacial en los componentes del material compuesto, tienen una caída drástica. También se observa que la disminución de propiedades es mayor cuando el polvo de neumático incluye partículas grandes, mayores de 500  $\mu\text{m}$ . En este caso la superficie de interacción de las partículas disminuye de forma acusada. El tamizado efectuado permite obtener mejores propiedades. Debido a la escasa interacción interfacial existente entre matriz y refuerzo, las partículas mayores actúan disminuyendo la sección efectiva en mayor grado que las pequeñas y provocan la aparición de grietas críticas. Las tensiones generadas en el interior de la probeta tienen un alto grado de triaxialidad (x, y, z). Esto significa una baja tendencia a la absorción de energía, pero una clara tendencia al crecimiento de grietas [11]. Este resultado coincide con estudios realizados sobre materiales similares [9, 12].

Por otra parte, el tratamiento de desvulcanizado no ofrece propiedades superiores a las obtenidas con polvo de neumático sin tratar. El proceso de desvulcanizado habitual es termo-mecánico. Éste consiste en someter a los NFU granulados bajo fuerza de cizalla y temperatura. En ocasiones se añaden aceites para facilitar el proceso. En principio, la desvulcanización debería implicar la rotura de enlaces disulfuro, deshaciendo la red tridimensional que proporciona al elastómero un carácter termoestable, reduciendo, a su vez, el peso molecular de las macromoléculas. Este cambio debería facilitar el mezclado y la interacción con la matriz, que debería traducirse en propiedades mecánicas superiores. Este efecto es probablemente debido al cambio de morfología que tiene lugar con el desvulcanizado. El polvo de neumático desvulcanizado presenta un aspecto mucho más plástico que el normal, debido a la energía mecánica aplicada y tiende a aglomerarse fácilmente bajo presión, resultando un tamaño efectivo de la fase dispersa superior. Este aspecto puede tener gran influencia en las propiedades y motiva la consideración de utilización de agentes dispersantes. En este tipo de materiales, la adhesión se produce básicamente de forma mecánica [6]. La mayor o menor porosidad y la facilidad de producir encajes entre la matriz solidificada y las partículas es el principal mecanismo de consolidación. A pesar del cambio químico producido, la superficie no es apta para la adhesión y las interacciones químicas no son suficientemente fuertes como para mejorar el comportamiento mecánico. En realidad, la degradación que sufre el NFU en el proceso de desvulcanizado podría dar lugar a grupos no aptos para una interacción interfacial apropiada.

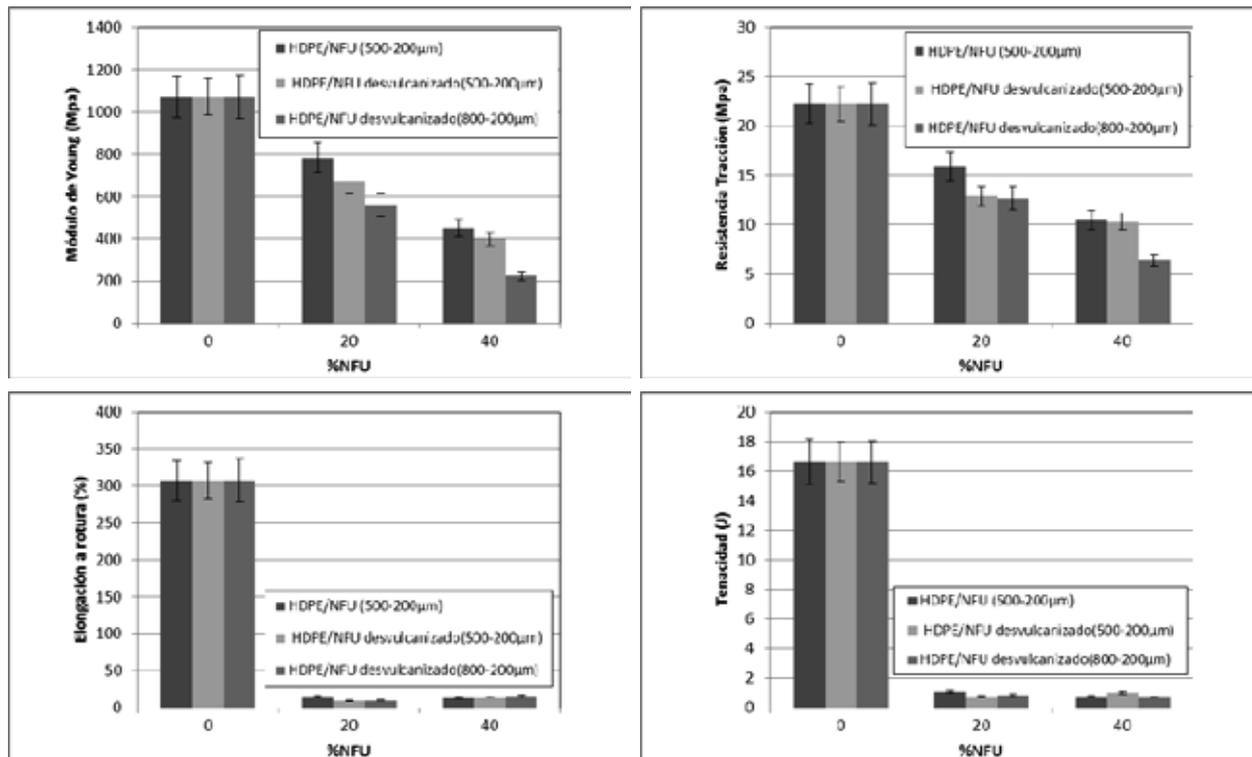


Figura 2. Efecto de la influencia del tamaño de partícula y del pretratamiento de desvulcanizado en las propiedades mecánicas.

### Estudio del pretratamiento mediante aditivos

BYK®-P 105 es un agente humectante basado en un ácido policarboxílico de bajo peso molecular. Actúa interactuando con las partículas mediante grupos afines de tipo ácido y con la matriz mediante una cadena oligomérica compatible con ésta [13]. Se ha seleccionado este aditivo debido a que por su estructura puede interactuar con las partículas de NFU y el termoplástico. Por otro lado, el NFU desvulcanizado debe poseer más grupos polares tipo éter, éster o cetona, debido a la degradación sufrida durante el proceso mecánico y, por lo tanto, debería interactuar con el agente humectante, permitiendo actuar a éste como compatibilizador. El porcentaje de BYK-P105 utilizado corresponde a las especificaciones del producto. Se ha realizado una prueba con el 20% de NFU debido a que es una proporción que guarda un buen equilibrio entre propiedades mecánicas y procesabilidad.

Los resultados obtenidos en una mezcla del 20% de NFU se muestran en la figura 3. Puede observarse que la adición de 3% de BYK-P105 mejora todas las propiedades estudiadas utilizando NFU desvulcanizado. Este efecto es consecuencia de la mayor interacción interfacial y dispersión. Es destacable que las propiedades que obtienen mejores resultados son la resistencia a tracción, la elongación y, sobre todo, la tenacidad. Estas propiedades están más relacionadas con la interacción entre fases del material compuesto que el módulo de Young. No obstante, los resultados son inferiores a los conseguidos con el NFU sin tratar. Solo la tenacidad se ve mejorada sustancialmente (30% aproximadamente). Esta propiedad está relacionada con la dispersión de partículas. El hecho de tener partículas unitarias en lugar de aglomerados conlleva a una

mayor distribución de éstas y, por lo tanto, a una mejor absorción de las tensiones internas. Por otro lado, la interacción del aditivo entre las fases no es suficiente para mejorar las demás propiedades.

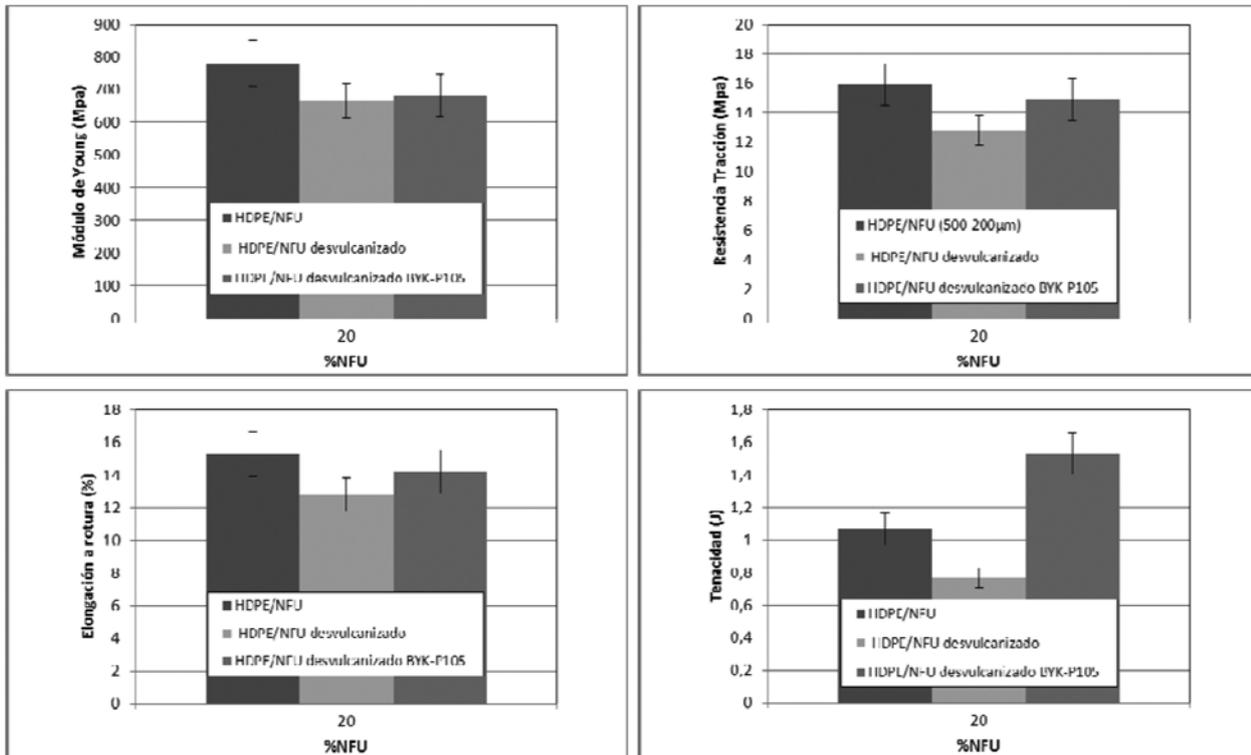
El BYK-P105 es un aditivo dirigido a la interacción con grupos de tipo básico. Los resultados obtenidos están relacionados con el contenido de negro de carbono presente en el NFU. Generalmente, las formulaciones de neumáticos incluyen un 20-40% de este pigmento. El negro de humo contiene grupos básicos en forma de óxidos básicos superficiales, procedentes de su proceso de fabricación. Estos óxidos pueden proporcionar un anclaje en el NFU.

### Estudio DSC

Para dilucidar el efecto del aditivo BYK-P105 se han estudiado muestras de HDPE solo y con el mismo contenido en aditivo incluido en la mezcla 80/20. Los resultados se muestran en la tabla 2. Como puede observarse, tanto la entalpía de fusión como las temperaturas de fusión disminuyen. La variación de las temperaturas de fusión en mezclas de polímeros se interpreta como un signo de interacción entre los componentes [14]. La aparición de una única temperatura de fusión implica que el aditivo interviene en la cristalización del HDPE, formando un cocrystal de temperatura de fusión menor [15, 16]. Al mismo tiempo, la disminución de la entalpía de fusión indica que el contenido en fase cristalina disminuye [17]. El BYK-P 105 interactúa con la matriz de polietileno y por ello proporciona los cambios en las propiedades mecánicas detectados.

**Tabla II:** Análisis DSC de HDPE con aditivos

Muestra	DH (kJ/kg)	T <sub>inicio</sub> (°C)	T <sub>pico</sub> (°C)
HDPE	182.51	121.41	131.21
3% BYK-P105	175.24	118.43	131.15



**Figura 3.** Efecto del pretratamiento de desvulcanizado en el NFU y de la adición de 3% de BYK-P105 en las propiedades mecánicas.

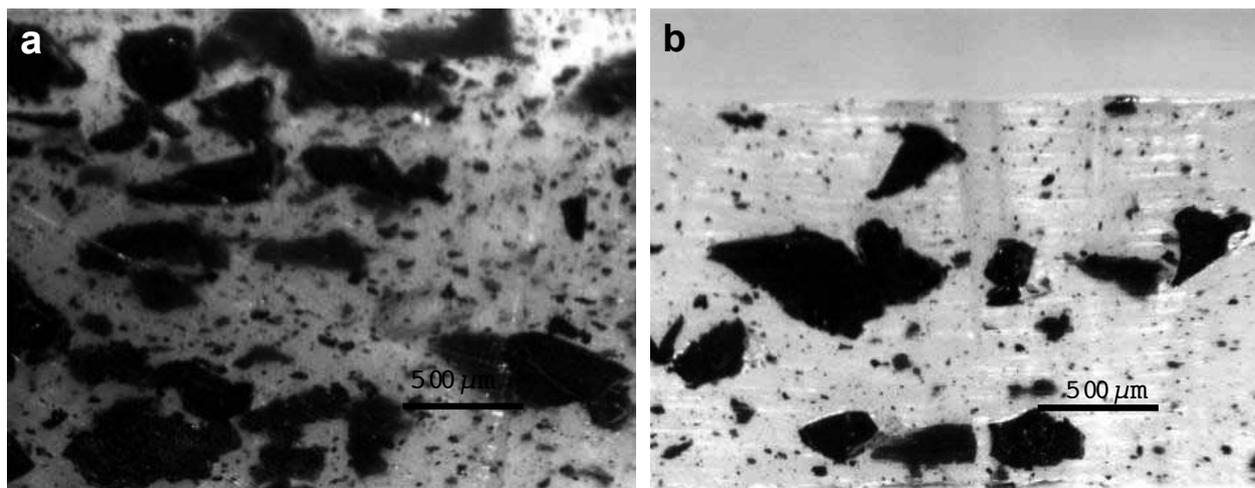
**Microscopía óptica: dispersión de las partículas NFU en la matriz de HDPE**

Se examinaron cuatro muestras de cada probeta para observar la dispersión de las partículas de NFU en la matriz. La energía mecánica suministrada por el mezclador actúa disgregando los aglomerados de polvo de NFU, creando así una mayor área interfacial y por tanto mayor capacidad de interacción con la matriz. Desafortunadamente, este estado de dispersión es ideal y debido a las fuerzas de interacción secundarias entre las partículas de NFU, éstas se vuelven a aglomerar siendo éste su estado de mínima energía. Por este motivo, es necesario añadir a la mezcla un agente humectante que se interponga entre las partículas de NFU y evite la creación de estas fuerzas intermoleculares débiles. El aditivo utilizado BYK®-P105 ayuda a la dispersión, contribuyendo a la mejora de las propiedades mecánicas.

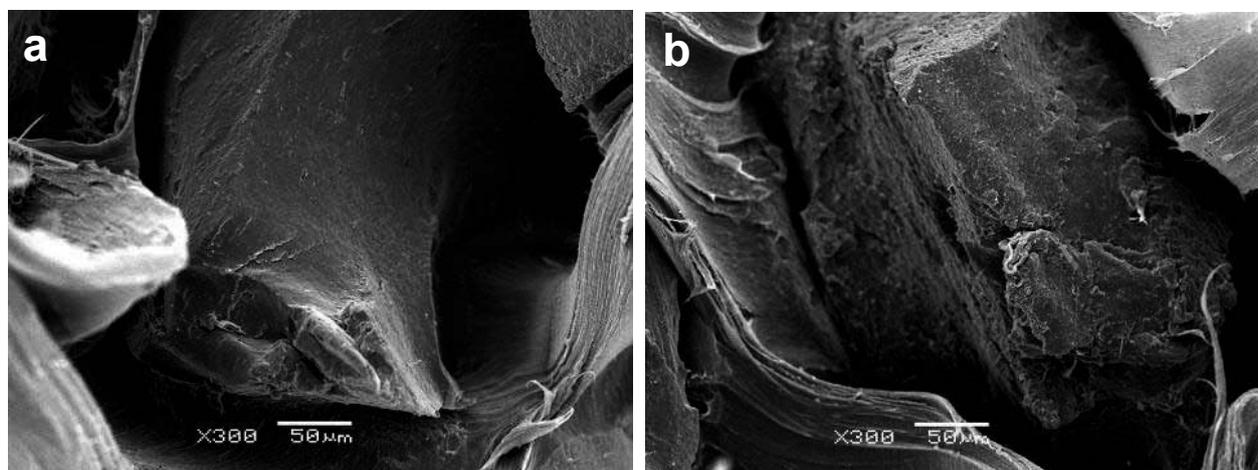
En la figura 4 se muestran microfotografías de mezclas con 20% de NFU. La micro fotografía (a), correspondiente a la mezcla sin aditivos, muestra mayores aglomerados que la muestra (b), que contiene un 3% de BYK-P 105. En ésta última la matriz aparece rodeando mejor las partículas de NFU y situándose entre ellas.

**Microscopía SEM: compatibilidad de las partículas NFU en la matriz de HDPE**

En la figura 5 se muestran fotografías SEM de la superficie de fractura de mezclas con 20% de NFU. La microfotografía (a) corresponde a los materiales compuestos sin ningún aditivo. Se observa que la superficie de la partícula central aparece totalmente lisa, no posee ningún tipo de conexión con la matriz. En la microfotografía (b) existen indicios de filamentos de polietileno que indican una mayor interacción de las partículas con la matriz. El efecto humectante del aditivo se consigue mediante la adsorción de sus grupos afines ácidos en la superficie de la partícula de NFU. Por otro lado, la interacción con la resina se debe a la compatibilidad de su cadena, proporcionándole también más plasticidad, debido a su bajo peso molecular. Por tanto, la adsorción sobre la partícula y la plastificación de la matriz que realiza el aditivo mejora la interacción partícula-resina que se observa en la microfotografía (b). Estos efectos se ven reflejados también en la mejora de las propiedades mecánicas.



**Figura 4.** Fotografías de microscopía óptica de materiales compuestos con 20% de NFU: a) sin aditivo; b) con 3% de BYK-P105



**Figura 5.** Fotografías SEM de los materiales compuestos con 20% de NFU: a) sin aditivo; b) con 3% de BYK-P105

## CONCLUSIONES

El mezclado en rodillos, aunque proporciona resultados aceptables en muchos casos, produce una degradación no medible superior a la que se consigue mediante mezclado en Brabender. La degradación se pone de manifiesto por una disminución de las propiedades mecánicas entre el 13 y el 20%.

La eliminación de partículas grandes, superiores a 500 µm, mediante tamizado produce una mejora de las propiedades mecánicas estudiadas tanto en el caso del NFU sin tratar como en el desvulcanizado.

El pretratamiento de desvulcanizado no produce mejoras en las propiedades mecánicas. Los resultados obtenidos son mejores utilizando NFU no tratado. Se atribuye este comportamiento a la diferencia en la morfología y a la mayor dispersión obtenida mediante el NFU sin tratar.

La adición del dispersante BYK®-P105 permite obtener valores superiores de las propiedades mecánicas estudiadas en el caso del NFU desvulcanizado. La mejora de las

propiedades viene dada por el efecto compatibilizador del aditivo, por su capacidad dispersante y por su efecto en la matriz de HDPE.

La matriz de HDPE se ve afectada por la presencia del BYK®-P105. El aditivo interviene en la estructura cristalina del polímero, según se deduce de los termogramas obtenidos mediante calorimetría diferencial de barrido.

La microscopía óptica y electrónica de barrido corroboran los resultados anteriores mostrando mayor dispersión en presencia de aditivo y mayor anclaje de las partículas en la matriz.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Educación y Ciencia la financiación del proyecto MAT2007-64659, del cual el presente trabajo forma parte y a Gestión Medioambiental de Neumáticos S.L. (GMN) (Lleida) por la provisión de polvo de neumático para este estudio.

---

## BIBLIOGRAFÍA

1. Signus (Memoria 2009). El auténtico valor de los neumáticos usados.
2. Carrasco, F., N. Bredin, Y. Gningue y M. Heitz. "Environmental Impact of the Energy Content Recovery of Scrap Tires in a Cement Kiln". *Environmental Technology*, **19**(5), 461-474 (1998).
3. Bredin, N., F. Carrasco, Y. Gningue y M. Heitz. "Simulation of the Atmospheric Dispersion of Gaseous Effluents Emitted by a Cement Kiln". *Environmental Technology*, **20**(10), 1075-1084 (1999).
4. Bredin, N., F. Carrasco y M. Heitz. "Emisión y dispersión atmosférica de metales al valorizar neumáticos usados en la fabricación de cemento". *Afinidad*, **55**(477), 348-356 (1998).
5. Rajalingam, P., Sharpe, J. and Baker, W.E. (1993). Ground Rubber Tire/Thermoplastic Composites: Effect of Different Ground Rubber Tires, *Rubber Chemistry and Technology*, **65**: 664-677.
6. Colom, X., Carrillo, F. and Cañavate, J. (2006). Composites Reinforced with Reused Tyres: Surface Oxidant Treatment to Improve the Interfacial Compatibility, *European Polymer Journal*, **42**: 2369-2378.
7. Oliphant, K. and Baker, W.E. (1993). The Use of Cryogenically Ground Tires as a Filler in Polyolefin Blends, *Polymer Engineering and Science*, **33**: 166-174.
8. Hess, R. (2002). Modern Dispersing Agents for Polypropylene, *Plastic Additives and Compounding*, **4**: 28-31.
9. Bartczak, Z., Argon, A.S., Cohen, R.E. and Weinberg, M. (1999). Toughness Mechanism in Semi-crystalline Polymer Blends: I, Polyethylene Toughened with Rubbers, *Polymer*, **40**: 2331-2346.
10. Colom, X., Cañavate, J., Carrillo, F. and Suñol J.J. (2009). Effect of the Particle Size and Acid Pretreatments on Compatibility and Properties of Recycled HDPE Plastic Bottles Filled with Ground Tyre Powder, *Journal of Applied Polymer Science*, **112**: 1882-1890.
11. D. R. Paul, C. B. Bucknall. (2000) Deformation mechanisms in rubber-toughened polymers. Pags.: 84-116. "Polymer Blends". Vol. 2: Performance. Wiley-Interscience publication. John Wiley and Sons.
12. H.S. Liu, C.P. Richard, J.L. Mead and R.G. Stacer (2000). Development of Novel Applications for Using Recycled Rubber in Thermoplastics. Chelsea Center for Recycling and Economic Technical Research Program nº 18.
13. Scholz, W. Technical Information, Coating Additives, Die bibliothek der technik, Vol. 288, pp. 7-22, Wetting and dispersing additives, D-80992 Munich, Germany.
14. J. E. Mark. Physical Properties of Polymer Handbook. American Institute of Physics Press: Woodbury, NY, 1996
15. Hato, M.J. and Luyt, A.S. (2007). Thermal Fractionation and Properties of Different Polyethylene/Wax Blends, *Journal of Applied Polymer Science*, **104**: 2225-2236.
16. Krupa, I. and Luyt, A.S. (2002). PE/Wax Blends: Interesting Observations, *Macromolecular Symposium*, **178**: 109-116.
17. S. L. Aggarwal. Polymer Handbook. J. Brandrup and E. H. Immergut eds. 2<sup>nd</sup> Eds. John Wiley and Sons, New York 1975.