

Reutilización sostenible del caucho de NfVU para la fabricación de neumáticos macizos

Autores: F.M. Salamanca^{*1}, Zenen Zepeda Rodríguez², María Dolores de Dios Caputto¹, Alejandra Rubio¹, Laura Diñeiro García¹, Santiago Esteban Pozo¹, Alberto Fernández-Torres¹, R. Herrero¹, Horacio W. Bonifacio², R. Navarro¹, J.L. Valentín¹.

¹ Grupo de Elastómeros, Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros (ICTP-CSIC)

² ValORIZA Teruel S.L.

*fms@ictp.csic.es



Resumen

El polvo de neumático al final de su vida útil (NFVU) puede utilizarse como aditivo en la fabricación de nuevos neumáticos, para lo cual hay que corregir las formulaciones tradicionales utilizadas. En este trabajo se incluyó una fracción de polvo de NFVU en la banda de rodadura y en el relleno de neumáticos macizos, que son un tipo de neumático especialmente diseñado para evitar pinchazos y que tengan una alta durabilidad.

Los nuevos compuestos se caracterizaron mediante pruebas de tracción uniaxial para obtener las propiedades mecánicas y medianas técnicas de caracterización avanzada de RMN de bajo campo en el dominio del tiempo para estudiar la cinética de reacción del relleno elastomérico, concluyendo el registro de la patente de estos materiales para su posterior explotación.

Palabras clave: NFVU, neumático, caucho, poliuretano, sostenibilidad.

Introducción

Los materiales elastoméricos son únicos y sus propiedades características los hacen la opción idónea para un gran número de aplicaciones [1,2]. Una de las aplicaciones más importantes son los neumáticos. Estos productos deben alcanzar unos elevados requerimientos técnicos en términos de seguridad, eficiencia y durabilidad, entre otros. Además, son productos de gran complejidad, constituidos por más de 200 ingredientes y aproximadamente 15 tipos de caucho diferentes, los cuales varían en función del uso y tipo del propio neumático [3].

En este sentido, existen diferentes tipos de neumáticos, clasificados en las categorías siguientes. Los neumáticos pequeños (de moto, turismo, furgoneta, etc.), los neumáticos medianos (camión y autobús) y los neumáticos grandes (de uso agrícola o industrial en general). Entre ellos, existen los neumáticos macizos (ver **Figura 1**), utilizados en vehículos lentos con un alto riesgo de impacto y daño. Son estables, resistentes y apenas requieren mantenimiento. Además, tienen un bajo costo y soportan mucho peso debido a su composición.

El principal objetivo de este trabajo es mejorar la gestión de los neumáticos al final de su vida útil (NFVU) a través de la incorporación de elevadas cantidades de polvo de caucho procedente de otros neumáticos para la fabricación de un producto de altas prestaciones y alto valor añadido, como son las bandas de rodadura de los neumáticos macizos. También se pretende describir un producto que sirve de relleno sólido en neumáticos de aire. Este material se diferencia, y supera a las soluciones existentes, ya que forma un relleno macizo basado en una formulación de poliuretano y alto contenido de polvo de neumático y que, además, puede aplicarse empleando la maquinaria existente.

Este trabajo se enmarca dentro de los Objetivos de la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible de la Organización de las Naciones Unidas pretendiendo impulsar la transición hacia una economía circular, en la cual el valor de los productos, los materiales y los recursos se mantiene en la economía durante el máximo tiempo posible y en la que se reduce al mínimo la generación de residuos, provocando un aumento en la competitividad en los mercados, un crecimiento económico sostenible y la creación de nuevos puestos de trabajo [5].



Figura 1.
Componentes
de un
neumático
macizo
de forma
esquemática
[4].

rentes tipos de molinos. Además, durante ese proceso se separan prácticamente la totalidad del acero y parte del textil. El material de caucho que no se ha separado para su comercialización en el proceso anterior se introduce bien en uno o varios molinos por debajo de donde se consiguen tamaños por debajo de 10 mm (precio aproximado de 100 €/tonelada) o bien, en un molino de finos directamente para obtener polvo de caucho de tamaño inferior a 0,8 mm (hasta tamaños mínimos de aproximadamente 50 µm en productos industriales a gran escala con un precio aproximado de 900 €/tonelada) [13,14].

Así es posible obtener un granulado o un polvo de caucho de diferentes tamaños, morfologías y naturaleza química [15,16], además de otros materiales como un acero de alta calidad y fibras textiles. El tipo de polvo o granulado final depende de la materia prima empleada (el tipo de neumático o las partes utilizadas), la tecnología de mollienda (a temperatura ambiente, criogénica o por chorro de agua) y la configuración de los parámetros clave para cada uno de los tratamientos industriales. Esto significa que en estos materiales procedentes del NFVU podrían plantearse la aplicación de los criterios para el fin de la condición de residuo para convertirse en materias primas secundarias de calidad para diferentes sectores. Aquí surge el reto científico-tecnológico de evaluar y caracterizar las principales propiedades de estos materiales, encontrar el mercado y aplicaciones industriales necesarias para revalorizar esta materia prima secundaria de calidad, optimizar su uso atendiendo a los requerimientos de cada aplicación y así incrementar el consumo de este material, que se genera a partir de estos procesos de mollienda en productos de elevadas prestaciones, calidad y alto valor añadido.

Para caracterizar el polvo de NFVU y poder utilizarlo como materia prima secundaria en compuestos de caucho se deben tener en cuenta varios fenómenos: las mejores propiedades mecánicas se obtienen con los derivados de NFVU de menor tamaño y mayor superficie específica [17,18], encontrando también pequeñas diferencias derivadas de la

a recuperación de material, alrededor de 1,3 millones de toneladas de neumáticos [6]. Dentro del importante volumen de NFVU gestionados para la valorización material, una pequeña proporción se emplea en aplicaciones donde se utiliza el neumático entero (sin tratar) para arrefrices artificiales y elementos de protección en puertos, barreras acústicas, macizos de suelo reforzado, etc [10]. Sin embargo, la mayor tasa de valorización material (102,522 toneladas) [11] se logra tras la separación de los principales componentes de los neumáticos (caucho, acero y fibra textil) a través de diferentes procesos que se desarrollan en las plantas de tratamiento [12]. En primer lugar, la trituración consiste en introducir los neumáticos enteros en una máquina que generalmente se compone de un conjunto formado por uno o dos rotores o ejes de cuchillas que giran en sentido contrario para cortar el neumático. Dependiendo de las dimensiones de las cuchillas y de la criba que se coloque a la salida de la trituradora, se obtienen partículas de neumático de entre 20 y 400 mm. En segundo lugar, la granulación comienza en una primera etapa; el triturado de neumático puede reducirse a tamaños de hasta por debajo de 25 mm mediante dife-

La industria del caucho en Europa representa 4200 compañías con 360.000 empleados, generando unos beneficios por encima de 47.000 millones de euros [6]. La industria del neumático es la más importante de este sector.

En España, desde 2005 se obliga a los productores a garantizar la recogida y correcta gestión de tantos NFU [7] como neumáticos se introduzcan anualmente en el mercado de reposición. De esta forma surgieron entidades operacionales sin ánimo de lucro como SIGNUS [8] y TNU [9], dando una respuesta definitiva al difícil reto de garantizar la correcta gestión y valorización de los NFU bajo su responsabilidad, con el mayor respeto a las leyes y el medio ambiente.

En 2015, aproximadamente el 92% de los casi 4 millones de toneladas de neumáticos fuera de uso (NFU) en Europa han sido gestionados para alguna de las siguientes tareas: reutilización como neumáticos de segunda mano o recauchutados (18%) o bien reciclados a través de recuperación energética o material una vez se considera un neumático al final de su vida útil (NFVU). Aproximadamente el 48% de los NFVU de Europa se destinaron

morfología de las partículas de polvo de NFVU [20]. Con todo, estas propiedades distan mucho de poder ser comparadas con las cargas tradicionales de la industria del caucho (como los diferentes tipos de negro de carbono). Otro fenómeno para tener en cuenta es el hecho de que las partículas de NFVU contienen gran cantidad de compuestos procedentes de los ingredientes inicialmente presentes en los compuestos de caucho que componen los neumáticos y los subproductos de la reacción de vulcanización inicial, entre otros [21]. Esto hace que, por ejemplo, se modifique la reacción de vulcanización de los compuestos en los que se añade una fracción de este polvo de NFVU debido a procesos de migración [22], reduciendo sustancialmente la densidad de entrecruzamientos de la matriz elastomérica. Mecánicamente esto se puede observar en las propiedades a tracción [23], que se ven muy reducidas, aunque mejora la resistencia a la abrasión y fatiga [24,25]. Finalmente, también es importante tener en cuenta que las partículas de NFVU presentan una pobre interacción con las matrices poliméricas derivada principalmente de su composición, densidad de entrecruzamiento y extremadamente baja área superficial.

En matrices termoplásticas se puede emplear agentes compatibilizantes, dando lugar a los elastómeros termoplásticos [26,27], que mejoran las propiedades sin llegar a dar una solución óptima. Sin embargo, en compuestos de caucho la compatibilidad es óptima, ya que el polvo de NFVU suele utilizarse en caucho de uso común como el caucho natural (NR), caucho de estireno-butadieno (SBR) y caucho de butadieno (BR), que son las principales matrices empleadas en la fabricación de neumáticos [28].

Por tanto, este trabajo pretende abordar uno de los mayores retos tecnológicos en este campo. Este reto consiste en aplicar todos y cada uno de los conceptos definidos en la literatura científica y técnica para poder incrementar la proporción de polvo de NFVU en compuestos de caucho destinados a productos técnicos de altas prestaciones, como son la banda de rodadura de neumáticos macizos y el relleno que sirve de sistema de amor-



tiguación para este tipo de neumáticos tan utilizados en ciertos sectores de la industria.

Banda de rodadura

La banda de rodadura es la parte exterior circunferencial de todo tipo de neumático, es decir, es la parte que entra en contacto directo con el pavimento [29-34]. Es importante que genere la mayor tracción y el mayor agarre posible con el suelo, independientemente de si éste está mojado o seco. También debe generar la mínima resistencia a la rodadura, en caso contrario se estaría desperdiciando una cantidad de energía en forma de calor que aumentaría el consumo de combustible y desgaste del neumático. Por último, al ser esta la parte que se encuentra en contacto directo con el suelo es importante que la durabilidad sea máxima, por ello la resistencia al desgaste debe ser máxima. El agarre y la resistencia a la rodadura dependen de las propiedades viscoelásticas del caucho, por lo que vienen directamente determinadas por la matriz de caucho originada durante el proceso de vulcanización, mientras que la adición de cargas reforzantes se justifica por los elevados requerimientos mecánicos y de desgaste necesarios para garantizar una vida útil tan larga como sea posible dado que siempre esta adición se traduce en un efecto negativo sobre las propiedades viscoelásticas del caucho [35].

Por tanto, uno de los mayores problemas a la hora de diseñar el material para fabricar bandas de rodadura de neumáticos es encontrar el compromiso entre estas tres propiedades, que conforman el llamado "triángulo mágico" [37-39]. En el caso particular de los neumáticos macizos, la principal propiedad es la durabilidad del neumático. Por lo tanto, se desarrollará un compuesto de caucho con el máximo contenido de NFVU que alcance las propiedades de resistencia al desgaste, resistencia a la abrasión, propiedades de tracción y dureza características de las bandas de rodadura de un neumático macizo, asegurando la máxima durabilidad, sin afectar notablemente a sus propiedades de agarre y resistencia a la rodadura. En la **Figura 2** se puede observar el detalle de la estructura de un neumático comercial.

Relleno de neumático

El relleno de un neumático macizo consiste en un compuesto normalmente blando que puede absorber los impactos originados por las imperfecciones del pavimento y que es capaz de soportar grandes cargas, pudiendo contar con diferentes naturalezas y orígenes [40]. Entre ellos, en este trabajo se van a utilizar rellenos elastoméricos sólidos. Se caracterizan porque se pueden bombear en la cavidad entre el neumático y la llanta a través de la válvula de inflado. Se trata de un líquido que con el tiempo va convirtiéndose en un material sólido elastomérico resilien-

te para formar un neumático sólido o macizo mediante un proceso de curado. De esta manera, el neumático no solo es a prueba de pinchazos, sino que tiene propiedades de flexión que se aproximan a las del neumático inflado con gas y propiedades de baja histéresis, previniendo así la generación excesiva de calor en el neumático durante el servicio. En el llenado no deben producirse burbujas y debe poder controlarse la presión a la que se transfiere el material líquido, optimizando la fluidez y la entrada de manera homogénea del fluido en el espacio que queda libre entre la llanta y el neumático. Inicialmente el material de relleno utilizado consiste en un relleno

espumado, que tiene como inconveniente la generación excesiva de calor durante el servicio que puede llevar a la rotura del relleno y, en consecuencia, a la pérdida o eliminación del apoyo o sostén de la carcasa del neumático, causando un daño severo a la misma. Por esta razón, posteriormente se han desarrollado rellenos elastoméricos sólidos libres de huecos (macizos) que mejoran las prestaciones respecto al espumado, ya que se flexionan menos y genera menos calor. Se conocen como rellenos sólidos en base a material de poliuretano y hacen uso de una formulación de dos componentes en estado líquido, denominados de forma genérica "iso" y "poliol" [41], en la que el componente iso contiene un poliisocianato reaccionado con un poliol de tipo éter o éster formado por un prepolímero acabado en grupos isocianato, y el componente poliol está formado por un poliol de éster o éter. También existen formulaciones de poliuretano sólido incluyendo plastificante (ver **Figura 3**).

Metodología

La adición de polvo de NFVU a las formulaciones de banda de rodadura y relleno de neumático macizo es un proceso complejo dado que las formulaciones tradicionales no incluyen este tipo de sustancia y darán propiedades adicionales a los compuestos resultantes.



Figura 2. Partes de la banda de rodadura de un neumático [36].



Figura 3. Dos ejemplos de rellenos de neumático macizo [42].



En algunos casos estas propiedades pueden repercutir en una mejora de las prestaciones deseadas, pero no siempre será así. Las peculiaridades del polvo de NFVU tienen que ser cuantificadas con diferentes técnicas de caracterización, aunque en este trabajo nos centramos únicamente en el procedimiento para obtener el compuesto de caucho utilizado en una banda de rodadura de un neumático macizo, así como en la descripción de la síntesis del poliuretano que sirvió de relleno para este tipo de neumáticos.

En lo que respecta a la mezcla de la banda de rodadura, se han fabricado 5 materiales diferentes (ver **Tabla 1**), los cuales difieren únicamente en la cantidad de polvo de NFVU que contienen; desde las 40 partes por cien de caucho (phr) hasta las 150 phr. En primer lugar, se hizo uso de un mezclador interno Haake Rheomix [43] para obtener una mezcla homogénea de todos los ingredientes salvo el sistema de vulcanización (azufre y acelerantes), evitando que en este mezclador se produzca la reacción de vulcanización. Después, se añadió el sistema de vulcanización a temperatura ambiente en un sistema de rodillos convencional. Posteriormente se obtuvo la curva de vulcanización de cada uno de los materiales y el cálculo del tiempo óptimo para la reacción de vulcanización (t_{97}) mediante reómetros. En este caso, las propiedades mecánicas han sido analizadas en una máquina de ensayos universales con un ensayo a tracción a una velocidad de 500 mm/min. Por último, la vulcanización se llevó a cabo en una prensa a 200 kPa y 160°C, donde se obtuvieron las probetas para obtener las propiedades mecánicas de los compuestos que servirán como comparación con la banda de rodadura para los neumáticos macizos con polvo de NFVU como aditivo.

En lo que se refiere al relleno de los neumáticos macizos, se han sintetizado varios compuestos de poliuretano a partir de diferentes mezclas de polioles e isocianatos, algunas mezclas comerciales y otras con compuestos de laboratorio cuyo resultado final atiende a las necesidades de un relleno de neumático macizo como el que ya se ha descrito. En este caso, se utilizó un método de caracterización

Tabla 1. Receta para la formulación de caucho para la banda de rodadura de neumáticos macizos con polvo de NFVU como aditivo.

Ingredientes	Cantidad (phr)
S-SBR TDAE	103,1
BR	25
Sílice ZEOSIL 1165-P	80
Silano TESPT	8
NFVU	40, 60, 80, 100, 150
Negro de carbono (N234)	5
TDAE	5
Óxido de zinc	3
Ácido esteárico	1,5
CBS	1,74
DPG	2
Azufre	1,4

Resultados

La reutilización del polvo de NFVU en formulaciones de neumáticos macizos es un asunto complejo, como ya se ha descrito. No obstante, para abordar el problema, se han repasado los requerimientos técnicos de la banda de rodadura de los neumáticos macizos, así como del relleno elastomérico que se pretende utilizar para evitar la alta probabilidad de pinchazos que se tiene en este tipo de aplicaciones.

Los requerimientos mecánicos de la banda de rodadura se resumen en una buena tracción y agarre, así como una baja resistencia a la rodadura. Pero lo más importante es que sean duraderos, dado que son neumáticos que soportan cargas muy elevadas y que trabajan en terrenos difíciles, por lo que la presencia de cargas reforzantes en esta parte del neumático será crucial. Los resultados de los ensayos mecánicos sobre las muestras preparadas se pueden ver en la **Figura 4**.

Se observa que el módulo de tracción al 100% de deformación (bastante por debajo del límite de rotura), se ve mermado en las formulaciones con mayor concentración de polvo de NFVU, influyendo negativamente en el esfuerzo a esa deformación dada. Esto puede deberse al efecto diluyente de las cargas incluidas en el polvo de NFVU, haciendo que esta propiedad decaiga, pero no afectando a la propiedad más importante: la durabilidad.

Respecto del relleno de neumáticos macizos a base de elastómero solidificado, se ha mencionado la técnica de RMN de bajo campo en el dominio del tiempo. En ella se magnetizan los protones de la muestra y se obtienen dos curvas (ver **Figura 5**): la intensidad de referencia (todas las transiciones posibles) y la intensidad de doble coherencia cuántica (las transiciones de orden dos o superior, que se consideran prohibidas por la regla de oro de Fermi). De esta segunda curva se puede obtener la cinética de reacción mostrando la población de protones excitados como función del tiempo de reacción (ver **Figura 6**).

Como se ve en la **Figura 6**, al inicio se cuenta con una población de protones magnetizados

avanzada con un espectrómetro de bajo campo, dado que la espectroscopía de resonancia magnética nuclear (RMN) ha demostrado ser una técnica útil, potente y versátil para obtener los parámetros que definen la estructura de red de los elastómeros. Existen diferentes aproximaciones dentro de los experimentos de RMN, por ejemplo, los experimentos de relajación transversal de protones, combinaciones de Hahn-echo y solid-echo [44] o los experimentos de espectroscopía bidimensional de magnetización. Estos experimentos se han usado para evaluar el acoplamiento dipolar residual desde las diferentes secuencias de pulsos electromagnéticos que pueden aplicarse. En este sentido, los experimentos de doble coherencia (DQ) cuántica de protones (o, más generalmente, de múltiple coherencia cuántica) [45] hacen un uso más directo del acoplamiento dipolar residual y por ello pueden considerarse el método cuantitativo más fiable para un uso directo de este observable. A partir del análisis de estos datos experimentales es posible obtener información detallada sobre la distribución espacial de los

entrecruzamientos y la fracción de defectos de red. Así se obtienen detalles sobre la heterogeneidad de la red, pudiendo asociarse estas heterogeneidades con una naturaleza diferente de los entrecruzamientos como interacciones entre la matriz y las cargas reforzantes, así como con una matriz imperfecta cuyas propiedades no provienen de la totalidad de la misma sino de una fracción de la misma debido a la presencia de una fracción elásticamente inactiva formada fundamentalmente por finales de cadena, bucles u otro tipo de imperfecciones [46,47] que pueden ser cuantificadas gracias a este tipo de experimentos. Esta información es útil en compuestos sin cargas reforzantes (más simples) pero también se aplica en cauchos cargados o compuestos formados por una cantidad muy alta de ingredientes como los neumáticos al final de su vida útil [48]. En este caso se va a utilizar esta técnica para caracterizar la cinética de la reacción.



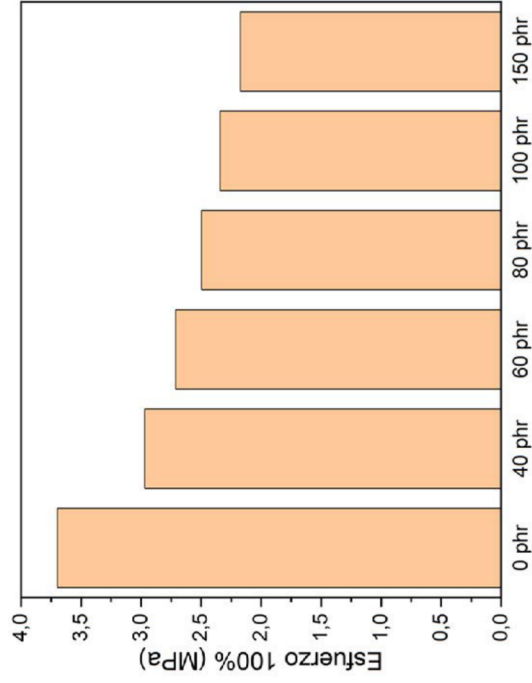


Figura 4. Evolución del esfuerzo a 100% de deformación en función de la cantidad de polvo de NFVU en diferentes mezclas de compuestos para banda de rodadura de neumático macizo.

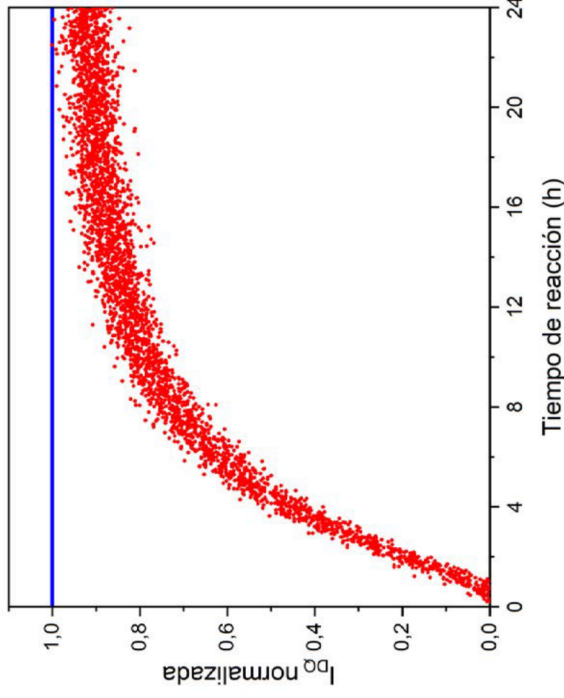


Figura 6. Cinética de la reacción de formación del poliuretano, la intensidad de doble coherencia cuántica crece hasta situarse muy cerca del 100% tras aproximadamente 24 h de reacción.

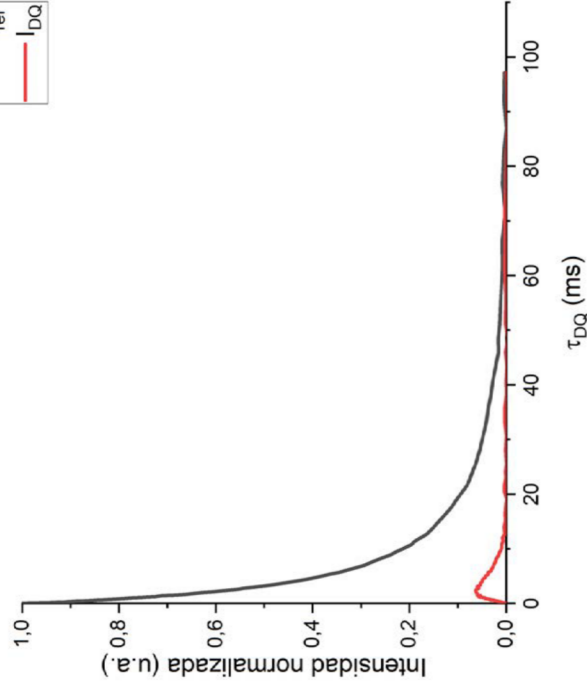
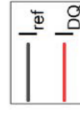


Figura 5. Intensidad de referencia y de doble coherencia cuántica obtenidas en el espectrómetro de bajo campo.

muy pobre, dado que la reacción entre el polioli y el isocianato apenas acaba de comenzar, por lo que el relleno elastomérico aún se encuentra en formación. Al cabo de algunas horas la proporción de protones magnetizados aumenta, llegando asintóticamente al valor del 100% para un tiempo infinito. Se puede observar que a partir de las 24 h de reacción se tiene una población de protones excitados suficientemente alta como para concluir que la formación del elastómero sólido se ha llevado a cabo con éxito. La razón principal por la que no todos los protones de la muestra pueden magnetizarse en tiempo finito es la presencia de otros ingredientes que requieren tiempos de magnetización mucho más altos o que no interactúan con el campo magnético proporcionado por el espectrómetro usado en la caracterización.

Esta formulación de relleno elastomérico se ha registrado como patente (P202131107) en la oficina española de patentes y marcas como producto de relleno de neumáticos con caucho micronizado dadas las potenciales

aplicaciones que tendrá en el uso como relleno sólido de neumáticos macizos.

Conclusiones

Se ha incluido polvo de NFVU como aditivo en la formulación de caucho de la banda de rodadura de neumáticos macizos, así como en la síntesis de un relleno elastomérico sólido para evitar pinchazos y obtener unas prestaciones óptimas en las aplicaciones tecnológicas de este tipo de compuestos. Se han caracterizado los compuestos obtenidos de la banda de rodadura y se han analizado las propiedades mecánicas medidas mediante ensayos de tracción uniaxial, demostrando que el módulo a un 100% de deformación decae cuando la fracción de polvo de NFVU se ve incrementada, obteniendo el máximo esfuerzo en la muestra que sirvió de control y que no contenía polvo de NFVU. Por otro lado, se ha caracterizado la cinética de reacción de un poliuretano a partir de la reacción entre polioli e isocianato, pudiendo demostrar



mediante experimentos avanzados de RMN (con técnicas de análisis numérico) [49] que se forma un elastómero sólido con estructura de red. Este compuesto además ha podido ser registrado para su posterior explotación.

Agradecimientos

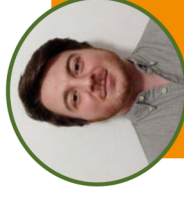
Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia e Innovación (MINECO) la financiación de los proyectos MAT2017-87204-R, RTI2018-096636-J-100, PID2020-119047RB-I00 y PLEC2021-007793, así como al CSIC a través del proyecto intramural 20190E004. Agradecen también al Gobierno de Aragón la financiación por el proyecto EC-22-2021. FMS agradece a la Convocatoria de Garantía Juvenil CAM2019 por la financiación. El grupo de Elastómeros pertenece a SUSPLAST, plataforma interdisciplinar del CSIC.

Referencias

1. "Rubber Products Manufacturing Technology". (1994) Ed. A.K. Bhowmick, M.M. Hall, H.A. Bencrey, Marcel Dekker, Inc, New York, USA.
2. Lechtenboehmer, A. Moneypenny, H. G., Mersch, F. (1990) A Review of Polymer Interfaces in Tyre Technology. British Polymer Journal, 22 (4), 265-301.
3. Lindemuth, B. E. (2006) Chapter 1: An Overview of Tyre Technology in "Pneumatic Tyre". Ed. A. N. Gent, J. D. Walter. U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration.
4. https://www.deporvillage.com/antipinchazos-vittoria-air-liner-m-para-neumaticos-de-2-25-a-2-5-mm?gclid=CjwKCAJwgr6TBHAGEIwA3aVuITf0zNeDj8KA-lbsJwN311JUX3oX50xaDVoegDAgEb1mTf-h6elyzh0c3-KQAVD_BwE
5. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>
6. European Tyre and Rubber Industry Statistics Edition 2017: <http://www.etrma.org/statistics-2>
7. <https://www.boe.es/boe/dias/2006/01/03/pdfs/A00352-00357.pdf>

8. <https://www.signus.es/>
9. <https://www.tnu.es/>
10. E. Cano Serrano, L. Cerezo García, M. Urbina Fraile. Valorización material y energética de neumáticos fuera de uso. Informe de Vigilancia Tecnológica. CEIM. Dirección General de Universidades e Investigación. ISBN-13:978-84-611-8343. <http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM001755.pdf>
11. SIGNUM Ecovvalor S.L., "Memoria Anual 2016". Madrid (2016). https://www.signus.es/wp-content/uploads/2017/07/signus_memoria_2016.pdf
12. R. Perez Aparicio, L. Saiz. Revista de Plásticos Modernos. Enero 2018, Vol. 115 Número 730, 11-18.
13. Tyre recycling consulting company report: <https://weibold.com/weibold-academy-recycled-rubber-output-spectrum-and-rubber-granulates/>
14. <https://weibold.com/weibold-academy-recycled-rubber-output-spectrum-and-rubber-granulates/>
15. T. Clayfield, S. Megart, N. Schüwer. Tackling the Challenge of End of Life Tyres. Future Tyre Conference 2019.
16. L. Saiz, J.M. Bermejo, A. Rodríguez, A. Fernandez, A. Rubinos. Rubber Chem. Tech. 2014, 87, 664-678.
17. D. Gibala, D. Thomas, G. R. Hamed, Rubber Chem. Technol. 1999, 72, 357.
18. A.K. Naskar, S.K. De, A.K. Bhowmick, P.K. Pramanik, R. Mukhopadhyay, Rub. Chem. Technol. 2000, 73, 902-911.
19. L. Pysklo, W. Parasiwicz, R. Stepkowski, Elastom. 2000, 5, 15-25.
20. D. Gibala, G. R. Hamed, Rubber Chem. Technol. 1994, 67, 636.
21. S.W. Kim, H.Y. Park, J.C. Lim, I.R. Jeon, K.H. Seo. J. Appl. Polym. Sci. 2007, 105, 2396-2406.
22. S.C. Han, M.H. Han. J. Appl. Polym. Sci. 2002, 85, 2491-2500.
23. R. Ayer, Tom Rosenmayer, F. Papp. Rubber World. 2012, 245, 25-29.
24. F. Razmjooei, G. Nader, G. Bakhshandeh. J. Appl. Polym. Sci. 2012, 124, 4864-4873.
25. M.R. Abadchi, A.J. Arani, H. Nazockdast. J. of Appl. Polym. Sci. 2010, 115, 2416-2422.
26. A. A. Yehia, M. A. Mull, M. N. Ismail, Y. A. Hefny, E. M. Abdel-Bary. J. of Appl. Polym. Sci. 2004, 93, 30-36.
27. X. Zhang, X. Zhu, M. Liang, C. Lu, J. of Appl. Polym. Sci. 2009, 114, 1118-1125.
28. K.A. Grosch. Rubber Chem. Technol. 1996, 69, 495.
29. D.E. Hall, J.C. Moreland. Rubber Chem. Technol. 2001, 74, 525.
30. S. Futamura. Die Angewandte Makromolekulare Chemie. 1996, 240, 137.
31. B. Freund, F.Forster. Kautsch. Gummi Kuns. 1996, 49, 774.
32. R. Newell, I.R. Wallace. Kautsch. Gummi Kuns. 1992, 45, 380.
33. L. Nikiel, M. Gerspacher, H. Yang, C.P. O' Farrell. Rubber Chem. Technol. 2001, 74, 249.
34. A.I. Medalla. Rubber Chem. Technol. 1978, 51, 437.
35. M.J. Wang. Rubber Chem. Technol. 1998, 71, 520.
36. <https://diccionario.motoriga.com/diccionario/banda-de-rodadura-definicion-significado/gmx-niv15-con193091.htm>
37. J.B. Donnet. Rubber Chem. Technol. 1998, 71, 323.
38. D.J. Schuring. Rubber Chem. Technol. 1980, 53, 600.
39. W.C. Fultz, L.R. Evans. Rubber World. Abril 1998, 39.
40. W.H. Waddell, L.R. Evans. Rubber Chem. Technol. 1996, 69, 377.
41. Premarathna, W. A. A. S. Engineering Failure Analysis, 2021, 128, 105618.
42. https://es.made-in-china.com/co-unifil-tyre/product_Foam-Filled-Tyre-PU-Solid-Tyre-Polyurethane-Filled-Tyre_rsrnieiig.html
43. <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/567-1000>
44. Akindoyo, John O. RSC Adv, 2016, 6, 114453-114482.
45. K. Saaliwächter, Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy, 2007, 51, 1-35.

46. M. J. Wang, Rubber Chemistry and Technology, 1993, 66, 2, 178-195.
47. W. Chassé, Journal of Chemical Physics, 2011, 134, 4.
48. J.L. Valentín, Rubber Chemistry and Technology, 2020, 93, 4, 683-703.
49. F.M. Salamanca, Revista de Plásticos Modernos. Enero 2022, Vol. 123 Número 775, 21-28.



Fernando Martín Salamanca (F.M. Salamanca) es Graduado en Física por la Universidad

Complutense de Madrid (UCM) desde 2018. Posteriormente cursó el Máster de Física de Partículas y del Cosmos (2019) de la Universidad de Cantabria (UC) y la Universidad Internacional Menéndez Pelayo (UIIMP). Su Trabajo de Fin de Grado consistió en la realización de una simulación de un proceso estocástico en el contexto de un motor basado en movimiento browniano en el grupo de Mecánica Estadística en el Departamento de Estructura de la Materia, Física Térmica y Electrónica de la Facultad de Ciencias Físicas de la UCM, que obtuvo la máxima calificación. Desde 2020 desarrolla su tesis doctoral en el Grupo Elastómeros del Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (ICTP-CSIC) sobre la caracterización avanzada de los elastómeros con múltiples técnicas experimentales. Sus principales intereses son el desarrollo de nuevas metodologías de análisis y caracterización de elastómeros, la simulación computacional de redes elastoméricas y el reciclado químico y mecánico de neumáticos al final de su vida útil.

