

CONAMA 2024

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

ECOTIRE

Primeras etapas de diseño de un nuevo concepto de neumático sostenible



CONAMA 2024

ECOTIRE

Autor Principal: Daniel García-Pozuelo Ramos (Depto. Ing. Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid. Email: dgramos@ing.uc3m.es)

Otros autores: Miguel Ángel Martínez Casanova (Depto. Ciencia e Ing. Materiales, Universidad Carlos III de Madrid. Email: mamc@ing.uc3m.es); Ignacio Requena Rodríguez (Advantaria S.L. Email: idi@advantaria.com); María Jesús López Boada (Depto. Ing. Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid. Email: mjboada@ing.uc3m.es); Beatriz López Boada (Depto. Ing. Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid. Email: bboada@ing.uc3m.es).

ÍNDICE

1. Resumen
2. Retos medioambientales del neumático
3. Estudio de la unión mecánica entre carcasa y banda de rodadura
 - 3.1. Geometría de la unión mecánica
 - 3.2. Evaluación de la unión mecánica
4. Estudio inicial para la protección de la carcasa de caucho
5. Conclusiones
6. Bibliografía

RESUMEN

El diseño de los neumáticos actuales ha seguido un proceso de evolución progresivo y acumulativo, mejorando su comportamiento en todo momento sobre la misma base constructiva: matriz de caucho reforzado mediante fibras metálicas y textiles. Sin embargo, presenta un importante impacto medioambiental en todas las etapas de su vida útil, desde la fabricación, pasando por su utilización y la gestión final del neumático desgastado. Dicho impacto afecta muy significativamente a cualquier ecosistema en el que esté presente, por lo que resulta prioritario el desarrollo de materiales alternativos o, al menos, tratamientos que permitan aumentar su vida útil. Es en este contexto en el que se plantea este nuevo concepto de neumático mixto-desmontable. Es decir, un neumático compuesto por una parte estructural de mayor vida útil, o carcasa de larga duración, y otra desmontable sometida a fricción y desgaste, o banda de rodadura biocompatible. De este modo, separando el neumático en dos componentes independientes, cuya unión se realice por procedimientos mecánicos y no termoquímicos, se pueden utilizar materiales disimilares, buscando minimizar su impacto ecológico y optimizando las propiedades de cada componente para la función que debe desempeñar.

Concretando esta breve introducción al concepto ECOTIRE, la parte estructural o carcasa es el componente menos expuesto al desgaste por contacto, rozamiento o abrasión y puede ser diseñada o tratada para aumentar su duración. Esto añade la posibilidad de albergar sensores o componentes adicionales que aumenten sus capacidades. Por su parte, la banda de rodadura está sometida a desgaste por rozamiento, siendo esta progresiva pérdida de material una de las principales causas de generación de microplásticos. La posibilidad de aplicar materiales completamente diferenciados en la carcasa y en la banda de rodadura permite introducir en el diseño de esta última una mayor variedad de materiales con menor impacto medioambiental.

En este artículo se exponen las primeras fases de esta línea de investigación, enfatizando los tratamientos que permiten aumentar la vida útil de una carcasa, y el estudio de la unión por procedimientos puramente mecánicos entre la carcasa y la banda de rodadura.

RETOS MEDIOAMBIENTALES DEL NEUMÁTICO

El neumático desempeña un papel crucial en la dinámica del vehículo. A través de la superficie de contacto del neumático se transmiten al suelo todas las fuerzas y momentos generados durante la aceleración, el frenado, paso por curva y la rodadura. En las últimas décadas, el desarrollo de neumáticos para turismos se ha mejorado y optimizado continuamente para mejorar el rendimiento general del vehículo, manteniendo al mismo tiempo un equilibrio con otros factores de rendimiento del neumático, como el desgaste y la durabilidad. Sin embargo, también es fundamental destacar la importancia de abordar los retos ecológicos asociados a la fabricación, el uso y el reciclado de los neumáticos, ya que estos procesos tienen importantes consecuencias para el medio ambiente y la salud [1]. Desde este punto de vista, además de mantener o mejorar el rendimiento actual de los neumáticos, es esencial reducir el impacto medioambiental y en la salud asociado a todo el ciclo de vida de los neumáticos de automóvil.

Al mismo tiempo, y dada la enorme importancia del neumático en la dinámica del vehículo, el desarrollo de un neumático que forme parte de los sistemas de control activo del vehículo, en lugar de ser un mero elemento pasivo, ha motivado estudios relacionados con el concepto de neumático inteligente [2-10]. Sin embargo, este concepto se basa en un neumático instrumentado que necesita componentes adicionales y contribuiría de forma negativa al impacto medioambiental de los neumáticos. Aparentemente, este escenario exige elegir entre mejorar la seguridad del vehículo o reducir el impacto ecológico del neumático. Es en este punto donde resulta necesario profundizar en el estudio de una nueva estructura para el neumático y revisar a fondo su diseño y componentes actuales.

La fabricación, el uso y el reciclado de neumáticos tienen un impacto medioambiental importante debido en gran parte a la emisión de gases de efecto invernadero durante su producción [11], a los microplásticos generados por el desgaste de la banda de rodadura de los neumáticos y a la vida útil del caucho vulcanizado, que no puede reutilizarse fácilmente para la fabricación de neumáticos nuevos [12-14]. Anualmente, se fabrican y venden más de 3.000 millones de neumáticos en todo el mundo, de los que aproximadamente 310 millones de unidades corresponden únicamente a la Unión Europea [1]. Dado el gran número de neumáticos que se utilizan en todo el mundo, los avances en estas áreas son de suma importancia, en consonancia con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) indicados por las Naciones Unidas en su marco SDG2030, tal y como se indica en la figura 1.



Figura 1. Objetivos de desarrollo sostenible a los que contribuye el proyecto ECOTIRE.

Diversos estudios han puesto de relieve la importancia del impacto de los neumáticos en el medio ambiente y la salud. Asimismo, se han propuesto numerosas mejoras en el diseño y la fabricación de neumáticos para reducir las emisiones contaminantes a lo largo de su ciclo de vida, abarcando también la gestión al final de la misma. En cuanto al diseño de neumáticos ecológicos, se plantean varios retos, así como diferentes líneas de investigación. Recientemente, se han propuesto mejoras en el uso de diferentes materiales, como la fibra de palma de aceite

[15] y el sílice [16], para reforzar los compuestos de caucho o como rellenos ecológicos en el caucho sintético [17]. También se han propuesto materiales superelastoméricos ecológicos [18], así como técnicas específicas para probar y evaluar las propiedades de los nuevos neumáticos ecológicos [19]. Muchos de estos estudios demuestran que la resistencia a la tracción, el módulo elástico, la deformación a la rotura, la resistencia al desgaste y la propia dureza dependen de los sistemas de unión utilizados. Por este motivo, el desarrollo de materiales para las propuestas de neumáticos ecológicos debe apoyarse en un profundo conocimiento de los sistemas de unión, siendo este aspecto un punto crucial en el diseño de los futuros neumáticos ecológicos.

Por otro lado, la gestión de los neumáticos al final de su vida útil es una cuestión que no está bien resuelta en la actualidad y algunos estudios específicos analizan las estrategias de distintos países y sus implicaciones con el desarrollo sostenible de las ciudades inteligentes [20]. En cuanto a soluciones técnicas concretas, ya se han publicado estudios prometedores que utilizan el caucho triturado de los neumáticos como refuerzo de bajo coste en otros materiales, como la espuma rígida de poliuretano [21]; otros combinan nuevos materiales en compuestos de caucho y el uso de los propios residuos de neumáticos como relleno sostenible [22] y muchos otros proponen el uso de residuos de neumáticos para pavimentos [23,24] o, en un ámbito más general, para materiales de construcción [25].

Como ya se ha indicado, existe una necesidad acuciante de profundizar en la investigación, sobre todo en neumáticos inteligentes y ecológicos [26]. En este contexto, se ha propuesto un nuevo concepto de neumático denominado «ECOTIRE», que señala una dirección prometedora para futuros estudios y desarrollos.



Figura 2. Pilares del proyecto ECOTIRE que integra neumáticos instrumentados con carcasa de larga duración y banda de rodadura desmontable fabricada con materiales biodegradables.

Como se muestra en la figura 2, aunque este innovador concepto de neumático se centra principalmente en mejoras medioambientales y para la salud, como la mitigación de la contaminación de la superficie terrestre y marina, la lucha contra el cambio climático mediante el aumento de la vida útil de la carcasa y la reducción de residuos mediante la utilización de materiales ecológicos en la banda de rodadura; contribuye a una potencial mejora de la seguridad en el transporte.

ESTUDIO DE LA UNIÓN MECÁNICA ENTRE CARCASA Y BANDA DE RODADURA

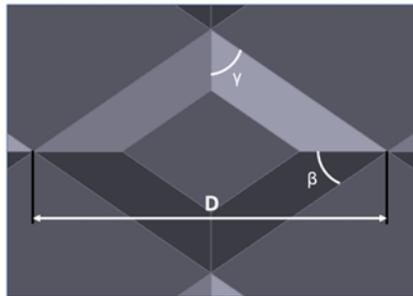
Podría decirse que uno de los aspectos más críticos en el diseño de este nuevo concepto de neumático es la conexión entre la carcasa y la banda de rodadura [27]. Esta conexión debe facilitar el montaje y desmontaje, idealmente con el neumático sin carga vertical. El proceso debe implicar el desinflado del neumático, la sustitución de la banda de rodadura y el posterior inflado del neumático. Por lo tanto, al explorar las posibles conexiones, se establecen los siguientes objetivos:

- La banda de rodadura puede fabricarse con materiales de menor impacto ambiental (en el mejor de los casos biodegradables) que no tengan que adherirse a la carcasa.
- El material utilizado, además de generar residuos con menor impacto sobre el medio ambiente, puede tener una composición y escultura adaptada a las diversas condiciones de rodadura (asfalto, barro, nieve, etc.). De este modo, si el intercambio de bandas de rodadura es sencillo y rápido, sería posible instalar en diferentes momentos la banda de rodadura que mejor se adapte al uso que se vaya a hacer.
- Una vez inflado el neumático, la banda de rodadura debe permanecer unida a la carcasa con la mayor firmeza posible. Para ello, y sin perder facilidad de sustitución, parece adecuado unir ambas superficies mediante mecanismos de fricción y «cierres geométricos». Así, el principal mecanismo de unión entre ambas superficies es el generado por la fuerza normal proporcionada por la presión de inflado.
- El neumático completo debe transmitir fuerzas longitudinales y laterales a través de la superficie de contacto, al igual que lo hacen los neumáticos convencionales, sin la separación de sus elementos.

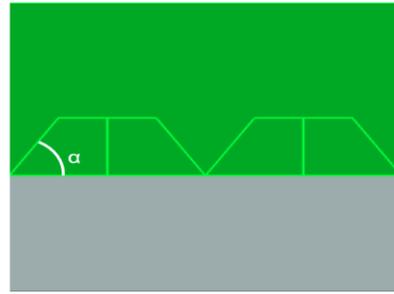
Teniendo en cuenta que los materiales de ambas partes del neumático deben desarrollarse en paralelo al diseño del mecanismo de unión, no es posible conocer con exactitud el coeficiente de fricción entre ambas superficies. En estas primeras fases del diseño, se estudia la geometría de las superficies a unir para permitir una mejor transmisión de las fuerzas tangenciales (combinación de fuerza longitudinal y lateral), además de facilitar el montaje, garantizando una fácil colocación banda de rodadura-carcasa al introducir presión en la carcasa.

GEOMETRÍA DE LA UNIÓN MECÁNICA

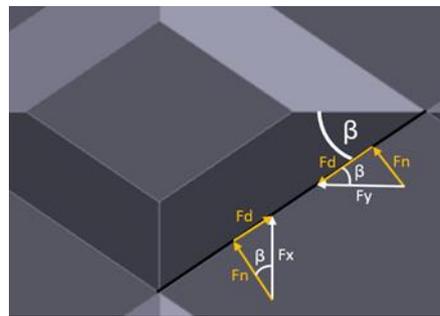
En las primeras etapas del estudio se han evaluado las sollicitaciones dinámicas que ha de soportar la unión mecánica entre la carcasa y la banda de rodadura para una correcta selección de la geometría, alcanzando una propuesta basada en elementos romboidales con forma de pirámide truncada, tal y como se indica en la figura 3. Dicha geometría responde a la máxima capacidad de transmitir fuerzas que presenta un neumático por capacidad adherente.



(a) Vista en planta



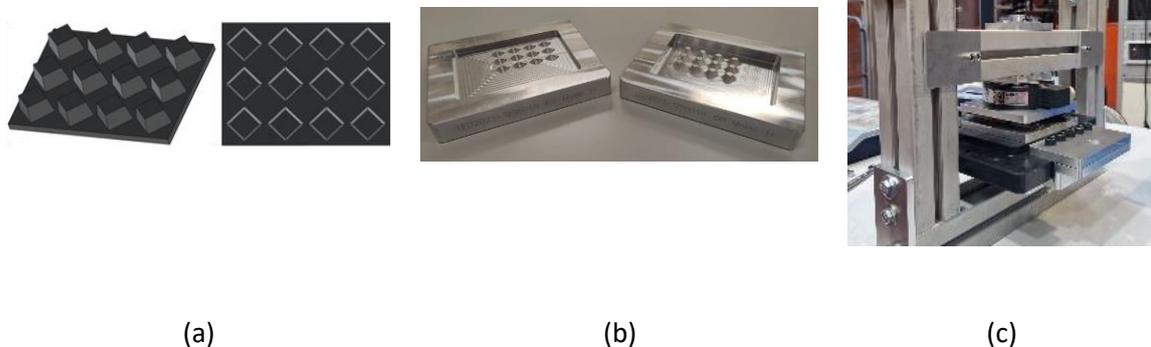
(b) Vista de perfil



(c) Fuerzas transmitidas a través de la pirámide truncada de base romboidal

Figura 3. Parámetros elegidos para la optimización geométrica propuesta para la conexión entre la carcasa y la banda de rodadura. La geometría de la carcasa se muestra en color gris y la banda de rodadura que encaja en dicha carcasa se muestra en color verde (geometrías positiva y negativa).

A partir de esta propuesta geométrica se han diseñado probetas, fabricado moldes para su obtención y se ha diseñado un dispositivo para evaluar el comportamiento de dicha conexión mecánica, tal y como se puede ver en la figura 4.



(a)

(b)

(c)

Figura 4. (a) Geometría de las probetas de ensayo, (b) moldes con la geometría de las probetas de ensayo, (c) banco de pruebas diseñado y fabricado para ensayar «modelos virtuales de huellas de contacto».

EVALUACIÓN DE LA UNIÓN MECÁNICA

A partir de la geometría definida, con las probetas y el equipamiento de ensayo fabricados se han realizado ensayos que han permitido comprobar la adecuación del diseño para la función que debe desempeñar: mantener unida la banda de rodadura a la carcasa mediante aplicación, únicamente, de presión de inflado.

Las condiciones de ensayo utilizadas para evaluar las probetas se muestran de modo esquemático en la figura 5.

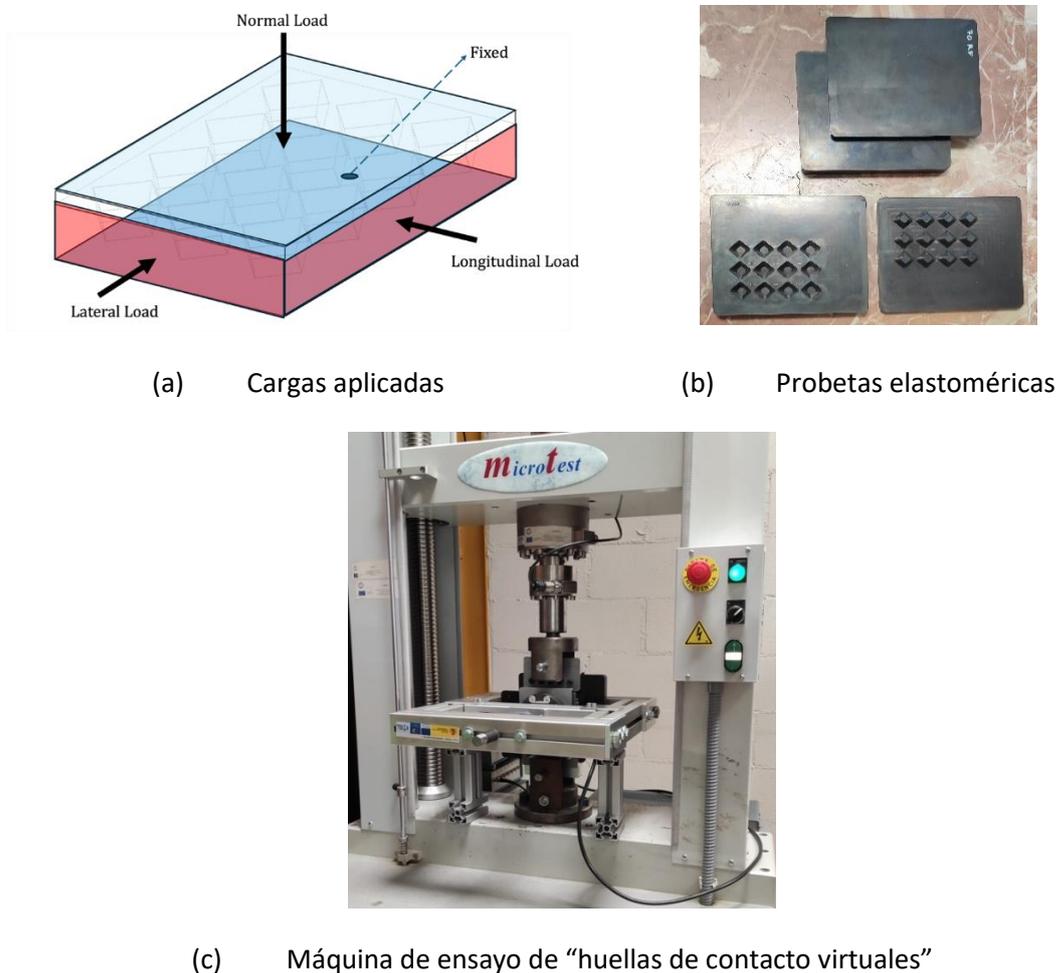


Figura 5. Elementos de ensayo para la evaluación de la conexión carcasa-banda de rodadura.

Como resultado de los ensayos realizados, se han obtenido las gráficas de evolución de fuerzas que se muestran en las figuras 6 y 7 para diferentes fuerzas normales a la superficie de contacto (fuerzas “aplicadas por presión de inflado”).

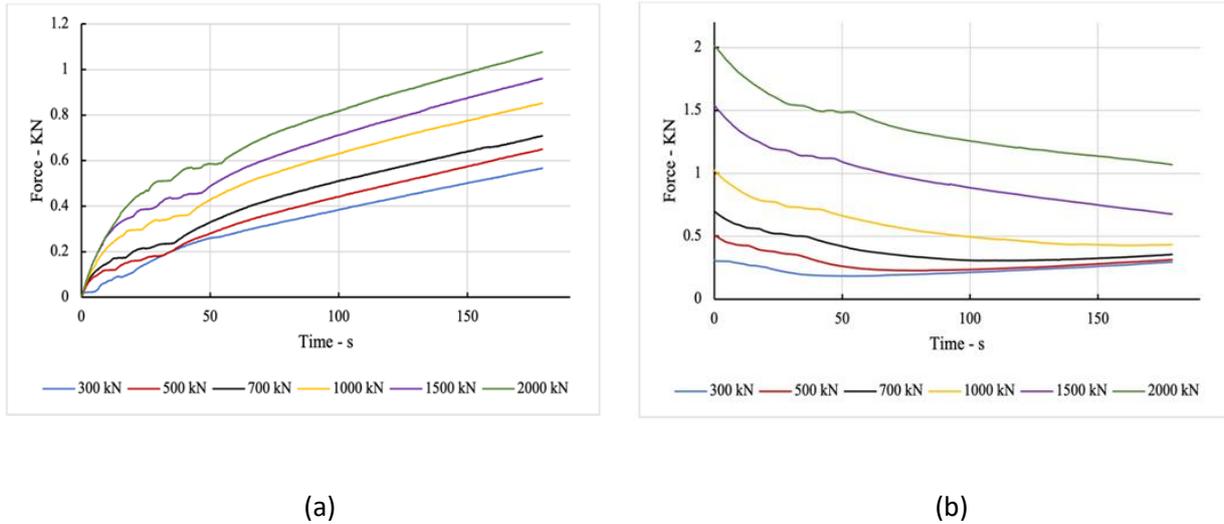


Figura 6. (a) Evolución de la fuerza longitudinal al imponer una consigna de desplazamiento en esa dirección de 5 mm/min. (b) Evolución de las cargas normales a las superficies en contacto cuando se aplica la fuerza longitudinal indicada en la Fig. 18 (a).

En la figura 6 (a) se puede ver la fuerza de tracción que se aplica a la pareja de probetas cuando están sometidas a una fuerza normal, o de unión por presión, desde 300 kN hasta 2000 kN. Estos valores de fuerza normal, teniendo en cuenta la superficie en contacto, equivale a una presión de inflado desde 0.3 bar a 2 bar, valores por debajo de la presión de inflado recomendada para la mayor parte de neumáticos. Esta fuerza creciente en la dirección del plano de contacto produce sollicitaciones en la unión mecánica y hace que la fuerza normal evolucione de diferentes maneras, tal y como muestra la figura 6 (b). En dicha figura 6 (b) se puede apreciar que la fuerza normal disminuye para valores superiores a 1 kN, equivalente a 1 bar de presión de inflado. Únicamente para valores de fuerza normal inicial inferior a 1 kN se observa que a partir de un determinado instante de tiempo la fuerza empieza a aumentar, identificándose así el momento en que la banda de rodadura tiende a separarse de la carcasa, ascendiendo la pared inclinada de las pirámides truncadas.

De estas gráficas se puede inferir el correcto comportamiento de la unión mecánica y su adecuación para mantener unida la banda de rodadura a la carcasa en condiciones de funcionamiento del neumático.

ESTUDIO INICIAL PARA LA PROTECCIÓN DE LA CARCASA DE CAUCHO

Al analizar las posibles vías para aumentar la vida útil de la carcasa de caucho se observa la conveniencia de proteger la misma frente a la oxidación y humedad ambientales, así como a la radiación ultravioleta. Como consecuencia de la degradación se produce una pérdida de propiedades mecánicas del caucho, afectando fundamentalmente su flexibilidad. Por lo tanto, es necesario un recubrimiento de protección que vaya adherido a la superficie del caucho. Los primeros estudios se basan en una mejora de la adhesión para aplicar diferentes materiales protectores de manera efectiva.

El caucho es un material cuya superficie tiene poca mojabilidad, para aumentarla se usó un dispositivo con antorcha de plasma a presión atmosférica (APPT), suministrado por Plasma Treat GmbH (Steinhagen, Alemania), para tratar las muestras de caucho. Los tratamientos de plasma de equilibrio termodinámico sin potencial (es decir fríos), limpian y activan la superficie humectándola, fundamentalmente de los polímeros [28]. Este equipo opera a una frecuencia de 17 kHz y una descarga de alta tensión de 20 kV, y está provisto de un soplete giratorio terminado en una boquilla (1900 rpm) por donde se expulsa el plasma. El sistema utilizado contiene una plataforma con control electrónico de velocidad donde se colocan las muestras. El plasma de aire se generó a una presión de trabajo de 2 bares dentro de la boquilla giratoria mediante una descarga fuera de equilibrio y se expulsó a través de un orificio circular sobre las muestras. La distancia entre la muestra y la boquilla del soplete de plasma se ajustó a 10 mm y la velocidad de la plataforma se optimizó entre 20 y 5 mm/s. Al aplicar el tratamiento por chorro de plasma se observa que el ángulo disminuye desde 104 ° hasta 42 °. La optimización del tratamiento mediante ángulos de contacto con agua fue a 10,5 mm/s, al ser el ángulo más bajo obtenido. Velocidades menores (5mm/s) incrementaron el ángulo, debido a posibles migraciones desde el interior de la muestra.

Una vez realizado el tratamiento optimizado se estudia su efecto mediante medidas de ángulo de contacto. Para ello, se usa un goniómetro OCA 15 plus, suministrado por Neurtek Instruments (Eibar, Guipúzcoa, España). Los ángulos de contacto se miden mediante gotas de tres líquidos diferentes: agua, glicerol y diiodometano. Estos líquidos tienen diferente polaridad y por tanto diferente tensión superficial, una vez depositada la gota se miden los ángulos al minuto siguiente, una vez estabilizada, tal y como muestra la Figura 7.

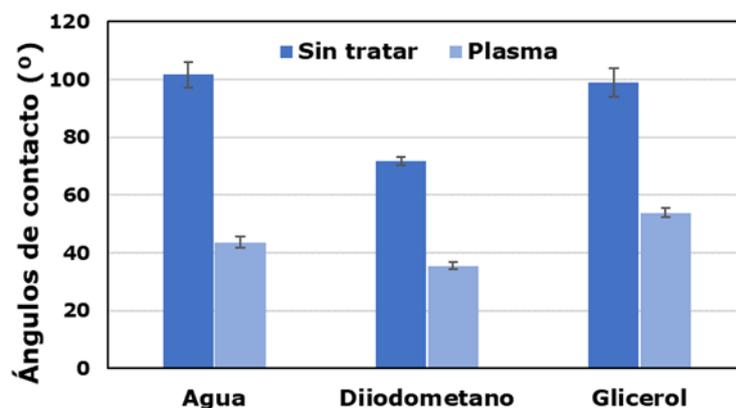


Figura 7. Ángulos de contacto con los tres líquidos medidos.

El software de DataPhysics permite medir el ángulo de la izquierda y de la derecha de la gota. Este software, a partir de los ángulos de contacto, permite conocer la energía superficial del sistema. En este estudio se ha elegido en método de OWRK [29], el cual permite conocer la componente polar (relacionada con las interacciones dipolo-dipolo y los enlaces de hidrógeno) y la dispersiva (debido a las fuerzas de tipo London) de la energía superficial. La energía superficial aumenta un 58%, pero la componente polar de la energía superficial es la que más aumenta, aproximadamente un 94%. Esto está de acuerdo con una activación superficial, con la posibilidad de oxidación en la superficie y por tanto la existencia de grupos que contengan oxígeno o nitrógeno proveniente del aire utilizado como plasma.

Este aumento en la energía superficial también se traduce en una mejor adhesión con siliconas y poliuretanos, los cuales se barajan como posibles recubrimientos de protección. Por ejemplo, la adhesión con una silicona monocomponente aumenta un 84% después del APPT, pasando de una rotura adhesiva a una cohesiva. Una rotura cohesiva garantiza una buena unión entre el caucho y el recubrimiento.

El principal hito conseguido hasta el momento es el incremento de la adhesión del posible recubrimiento con el caucho mediante el tratamiento de plasma utilizado, pero ya se ha comenzado a probar recubrimientos protectores en base a poliuretanos y siliconas, con resultados prometedores de estas últimas.

CONCLUSIONES

En este artículo se presenta ECOTIRE, un concepto de neumático de estructura desmontable sostenible cuyo objetivo es integrar nuevos materiales e instrumentación para reducir el impacto ambiental y mejorar al mismo tiempo la funcionalidad del neumático.

- El concepto ECOTIRE permite separar la parte del neumático sometida a desgaste y aplicar nuevos materiales con menor impacto ambiental.
- Al mismo tiempo, se aumenta la vida útil de la carcasa, lo que facilita la introducción de sensores que mejoran la seguridad del vehículo.
- El diseño de la conexión entre ambas partes se basa en el estudio dinámico de un vehículo sometido a maniobras severas y de las fuerzas que debe soportar y transmitir el neumático. Este estudio ha llevado a una geometría piramidal truncada como geometría de unión.
- A partir de los ensayos dinámicos, se proponen una altura y unos ángulos para esta pirámide truncada. Es decir, una configuración básica que se ha fabricado y ensayado para evaluar su comportamiento.
- Pruebas experimentales utilizando una “huella de contacto virtual” permiten validar la viabilidad de este concepto de unión mecánica bajo cargas normales variables, demostrando resultados prometedores en las capacidades de agarre y transmisión de fuerza.
- El análisis de los gráficos de fuerza frente a desplazamiento ilustra la relación entre las fuerzas normales y de tracción, mostrando que el aumento de la fuerza normal mejora la adherencia y la estabilidad de la superficie de contacto, como era de esperar. Las pruebas realizadas con cargas normales iniciales variables de 300 N a 2000 N muestran un comportamiento prometedor (no aparecen fuerzas de separación entre ambas superficies) de la geometría propuesta a partir de 1000 N. Dado que este valor equivale a aplicar una presión interna de alrededor de 1 bar (teniendo en cuenta la geometría del parche de contacto virtual ensayado), esto demuestra que la geometría propuesta para el enlace mecánico se comporta adecuadamente.
- Se ha expuesto el estudio del tratamiento superficial para mejorar y ampliar la vida útil de la carcasa, incluyendo la activación superficial y los diferentes tratamientos de

protección que se están analizando, con resultados prometedores de los recubrimientos con silicona pulverizada.

- Aunque el camino hacia un prototipo totalmente funcional continúa, los resultados subrayan el potencial de ECOTIRE para revolucionar la tecnología de los neumáticos integrando la sostenibilidad con una funcionalidad avanzada. Este enfoque holístico no sólo responde a los retos medioambientales actuales, sino que también abre el camino a innovaciones de futuro en el diseño y la fabricación de neumáticos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Katarzyna Piotrowska, Weronika Kruszelnicka, Patrycja Bałdowska-Witos, Robert Kasner, Jacek Rudnicki, Andrzej Tomporowski, Józef Flizikowski and Marek Opielak (2019). Assessment of the Environmental Impact of a Car Tire throughout Its Lifecycle Using the LCA Method. *Materials* 2019, 12, 4177; doi:10.3390/ma12244177.
- [2] A.J. Tuononen (2008). Optical position detection to measure tyre carcass deflections. *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 46, pp. 471–481.
- [3] J. Yi (2008). A Piezo-Sensor-Based “Smart Tire” System for Mobile Robots and Vehicles. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 13, no. 1, pp. 95-103.
- [4] G. Erdogan and L. Alexander and R. Rajamani (2009). A novel wireless piezoelectric tire sensor for the estimation of slip angle, *Measurement Science and Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 10.
- [5] D. Garcia-Pozuelo, O. Olatunbosun, J. Yunta, X. Yang, and V. Diaz (2017). A Novel Strain-Based Method to Estimate Tire Conditions Using Fuzzy Logic for Intelligent Tires. *Sensors*, Feb. 2017.
- [6] D. Garcia-Pozuelo, J. Yunta, O. Olatunbosun, X. Yang, and V. Diaz (2017). A Strain-Based Method to Estimate Slip Angle and Tire Working Conditions for Intelligent Tires Using Fuzzy Logic. *Sensors*, Abr. 2017.
- [7] J. Yunta, D. Garcia-Pozuelo, V. Diaz, O. Olatunbosun (2018). A Strain-Based Method to Detect Tires’ Loss of Grip and Estimate Lateral Friction Coefficient from Experimental Data by Fuzzy Logic for Intelligent Tire Development. *Sensors*, Feb. 2018.
- [8] J. Yunta, D. Garcia-Pozuelo, V. Diaz, O. Olatunbosun (2019). Influence of camber angle on tire tread behavior by an on-board strain-based system for intelligent tires. *Measurement*, vol. 145.
- [9] M. F. Mendoza-Petit, D. García-Pozuelo, V. Díaz, O. Olatunbosun (2020). A Strain-Based Intelligent Tire to Detect Contact Patch Features for Complex Maneuvers. *Sensors*, vol. 20, no. 6.
- [10] M. F. Mendoza-Petit, D. García-Pozuelo, V. Díaz, M. Garrosa (2022). Characterization of the loss of grip condition in the Strain-Based Intelligent Tire at

severe maneuvers. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 168.

[11] Warit Jawjit, C. Kroeze and Suwat Rattanapan (2010). Greenhouse gas emissions from rubber industry in Thailand. *Journal of Cleaner Production* 18(5):403-411.

[12] B.A.R. Environmental Inc. (1992). Evaluation of the potential toxicity of automobile tires in the aquatic environment. Report to Environment Canada. National Water Institute. Burlington, Ontario. 15p.

[13] Bin-Shafique, M.S., Benson, C.H., Edil, T.B.& Hwang, K (2006). Leachate concentrations from water leach and column leach tests on fly-ash stabilized soil. *Environmental Engineering Science*, 23(1): 51-65.

[14] Tik Root (2019). Tires: The plastic polluter you never thought about. *Environment. The story of plastic*. National Geographic. September 20, 2019.

[15] Hanafi Ismail, N. Rosnah and H. D. Rozman (1997). Effects of various bonding systems on mechanical properties of oil palm fibre reinforced rubber composites. *Eur. Polym. J.* Vol. 33, No. 8. pp. 1231-1238.

[16] Dongju Lee and Sung Ho Song (2019). A Study of Silica Reinforced Rubber Composites with Eco-Friendly Processing Aids for Pneumatic Tires. *Macromolecular research* 27(9), 850-856, DOI 10.1007/s13233-019-7125-1

[17] Xianjie Ren, Erol Sancaktar (2019). Use of fly ash as eco-friendly filler in synthetic rubber for tire applications. *Journal of Cleaner Production* 206, 374-382, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.202>.

[18] Xuan Qin, Jiadong Wang, Bingyong Han, Bo Wang, Lixin Mao and Liqun Zhang (2018). Novel Design of Eco-Friendly Super Elastomer Materials With Optimized Hard Segments Micro-Structure: Toward Next-Generation High-Performance Tires. *Frontiers in Chemistry*, July 2018/Volume6/Article 240, <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00240>.

[19] Nanang Ali Sutisna and Femiana Gapsari (2019). Rolling Resistance and Noise Estimation for Product Design and Development of Eco-Tyre using Finite Element and Numerical Method. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 494, 012021, doi:10.1088/1757-899X/494/1/012021.

[20] Tatyana Khudyakova, Andrey Shmidt, Svetlana Shmidt (2020). Sustainable development of smart cities in the context of the implementation of the tire recycling program. *Entrepreneurship and sustainability issues* 2020, Volume 8, Number 2 (December), [http://doi.org/10.9770/jesi.2020.8.2\(42\)](http://doi.org/10.9770/jesi.2020.8.2(42)).

[21] Formela, K.; Hejna, A.; Zedler, L.; Przybysz, M.; Ryl, J.; Saeb, M.R.; Piszczyk, L. (2017). Structural, thermal and physico-mechanical properties of polyurethane/brewers' spent grain composite foams modified with ground tire rubber. *Ind. Crop. Prod.* 2017, 108, 844–852.

- [22] Javier Araujo-Morera, Marianella Hernández Santana, Raquel Verdejo and Miguel Ángel López-Manchado (2019). Giving a Second Opportunity to Tire Waste: An Alternative Path for the Development of Sustainable Self-Healing Styrene–Butadiene Rubber Compounds Overcoming the Magic Triangle of Tires. *Polymers* 2019, 11, 2122; doi:10.3390/polym11122122.
- [23] Matteo Sambucci, Danilo Marini and Marco Valente (2020). Tire Recycled Rubber for More Eco-Sustainable Advanced Cementitious Aggregate. *Recycling* 2020, 5, 11; doi:10.3390/recycling5020011.
- [24] Isam Mohamad Ali, Ahmed Samir Naje and Mohammed Salah Nasr (2020). Eco-friendly chopped tire rubber as reinforcements in fly ash based geopolymer concrete. *Global NEST Journal*, 22(3), 342-347, <https://doi.org/10.30955/gnj.003192>.
- [25] Moncef L. Nehdi, Manal F. Najjar, Ahmed M. Soliman, Tareq M. Azabi (2017). Novel eco-efficient Two-Stage Concrete incorporating high volume recycled content for sustainable pavement construction. *Construction and Building Materials* 146, 9–14, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.065>.
- [26] Ignacio Requena Rodríguez (2020). La rueda se reinventa. Verde en todos los sentidos. *Tecnologías Emergentes, Boletín de Observación Tecnológica en Defensa* nº67.
- [27] Ignacio Requena Rodríguez, Daniel García Pozuelo-Ramos, Miguel Ángel Martínez Casanova, José Manuel Pérez Ventura (2024). Neumático con banda de rodadura menos contaminante y unión mediante procedimientos no termoquímicos. *Solicitud de Modelo de Utilidad*, enero 2024.
- [28] N. Encinas, B. Díaz-Benito, J. Abenojar, M.A. Martínez (2010). Extreme durability of wettability changes on polyolefin surfaces by atmospheric pressure plasma torch. *Surf. Coat. Technol.* 205, 396–402. doi:10.1016/j.surfcoat.2010.06.069.
- [29] D.K. Owens, R.C. Wendt (1969). Estimation of the surface free energy of polymers. *J. Appl. Polym. Sci.* 13, 1741-1747. doi:10.1002/app.1969.070130815.