



Diseño de una unión mecánica entre carcasa y banda de rodadura para eco-neumáticos

D. García-Pozuelo¹, F. Afshari¹, M.A. Martínez², D. Lavayen³, F. Viadero-Monasterio¹, M. González¹

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid,

(dgramos@ing.uc3m.es; fafshari@pa.uc3m.es; viadero@ing.uc3m.es; maigonza@pa.uc3m.es)

² Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales, Universidad Carlos III de Madrid, mamc@ing.uc3m.es

³ Departamento de Ingeniería Mecánica, Pontificia Universidad Católica del Perú, dlavayen@pucp.edu.pe

Aunque es bien conocido el problema medioambiental y para la salud que generan la fabricación, el uso y los residuos procedentes de los neumáticos, es un asunto de gran envergadura y difícil de resolver. En este contexto, y habida cuenta de la enorme importancia del neumático para la dinámica, comportamiento y seguridad de los vehículos automóviles, surge la necesidad de crear una nueva estructura de neumático que permita separar la parte sometida a desgaste y la parte estructural, manteniendo sus capacidades. Este reto podría ser enfrentado por la industria del recauchutado, que sustituye la banda de rodadura cuando está desgastada, aprovechando la carcasa si esta se encuentra en buen estado. Sin embargo, esto mitiga sólo parcialmente el problema, reduciendo la cantidad de residuos generados, pero no evita los microplásticos altamente nocivos que se generan por el desgaste de la banda de rodadura.

Con el fin de introducir materiales de menor impacto medioambiental en la banda de rodadura, resulta necesario ir más allá de las soluciones actuales, posibilitando el uso de materiales completamente diferenciados en la carcasa y en la banda de rodadura, y evitando la necesidad de unirlos mediante procesos termoquímicos. Es en este punto en el que surge el proyecto ECOTIRE/ECOTIRE, con un planteamiento novedoso, basado en la unión mecánica entre ambas partes del neumático.

En este estudio se avanza en el diseño de la unión mecánica entre carcasa y banda de rodadura mediante el estudio de geometrías de unión y materiales candidatos a ampliar la vida útil de la carcasa o a sustituir al caucho en la banda de rodadura. Para ello se ha diseñado y fabricado un dispositivo para ensayar “huellas de contacto virtuales”, obteniendo resultados con diferentes configuraciones de unión mecánica. Además, este estudio experimental sirve de base para la definición de un modelo de simulación que permitirá ampliar las configuraciones estudiadas, así como las pruebas a las que serán sometidas.

Por último, con los resultados alcanzados en este documento, se definirán geometrías y materiales-candidatos que puedan ser aplicados en un primer prototipo completo de neumático sostenible, ECOTIRE.

1. Introducción

La dinámica de un vehículo automóvil depende en gran medida del comportamiento y las características de sus neumáticos. Es a través de la zona de contacto del neumático que todas las fuerzas y momentos se transmiten al suelo, ya sea en rodadura, aceleración, frenado o paso por curva. Durante las últimas décadas, el desarrollo de neumáticos para turismos ha mejorado y optimizado continuamente para mejorar el rendimiento general del vehículo y al mismo tiempo mantener un equilibrio con otros factores de rendimiento de los neumáticos, como el desgaste y la durabilidad. Uno de los puntos clave en dicho desarrollo es la introducción de los neumáticos como parte de los sistemas de control activo del vehículo, en lugar de mantenerlo desacoplado de los sistemas de medida y control para la asistencia a la conducción, lo que motiva el estudio del concepto de neumático inteligente [1-7]. Sin embargo, este concepto se basa en un neumático instrumentado que necesita componentes adicionales y contribuiría negativamente al impacto medioambiental de los neumáticos, ya de por sí elevado [8-12]. Este escenario aparentemente requiere elegir entre mejorar la seguridad del vehículo o reducir el impacto ecológico del neumático.

En este contexto surge el concepto de ECOTIRE o iECOTIRE, un nuevo neumático sostenible con una carcasa instrumentada de larga duración (más del 80% del peso y material del neumático) y una banda de rodadura removible y biodegradable/biocompatible (sometida a desgaste y responsable actual de desechar el neumático completo). Para plantear este proyecto es fundamental diseñar un sistema de unión entre ambas partes que posibilite la utilización de materiales disimilares. Es decir, parece necesario dejar a un lado las uniones termoquímicas con el objetivo de introducir los materiales más adecuados en cada parte del neumático, sin limitar su selección por condiciones impuestas por dicha unión. Esto conduce indefectiblemente a considerar las posibilidades de las uniones mecánicas por cierre de forma, fricción, etc. En este sentido el proyecto tiene varios puntos a considerar y que requieren estudios y desarrollos específicos:

- Diseño y optimización de una unión mecánica entre carcasa y banda de rodadura.
- Aumento de la vida útil de la carcasa mediante protección del material frente a degradación medioambiental.
- Instrumentación de la carcasa para una correcta medición de parámetros dinámicos necesarios para el control del vehículo.
- Diseño de una banda de rodadura fabricada con materiales de bajo impacto medioambiental que cumpla con los requerimientos mecánicos/dinámicos, así como de duración y coste que permitan su uso generalizado.

Aunque este documento está centrado en el primer punto, diseño y optimización de la unión mecánica, es necesario decir que este trabajo se desarrolla dentro de un proyecto que integra todos estos objetivos, ya que el estudio tiene que ser coherente e integrativo, con el fin de avanzar en desarrollos que permitan alcanzar un neumático con estas características de forma efectiva. En este sentido, aunque se el equipo investigador ha desarrollado previamente diversos avances en materia de neumático inteligente [1-7], está actualmente enfocado en instrumentación específica para este tipo de neumático mixto o de carcasa desmontable. Del mismo modo, la parte de desarrollo de materiales, tanto para proteger la carcasa como para diseñar nuevas bandas de rodadura ya ha permitido alcanzar hitos y realizar publicaciones [13-15] que consolidan progresivamente la viabilidad del concepto. Concretamente, los recubrimientos en base a poliuretanos, poliuretanos modificados y siliconas han proporcionado ya prometedores resultados. En el caso del último material que se está estudiando, basado en el uso de silicona, se ha comprobado que su utilidad no se limita a usarla para proteger la superficie del caucho (previa activación superficial), si no que muestra características mecánicas, de sostenibilidad y biocompatibilidad muy interesantes para su uso en la propia banda de rodadura. El mero hecho de eliminar o reducir el uso de negro de humo (potencialmente neurotóxico) en estas nuevas formulaciones supone un avance muy significativo.

No obstante, muchos de estos avances son objeto de análisis específicos y se detallan en otras publicaciones, siendo el núcleo de este estudio el análisis de geometrías de unión entre carcasa y banda de rodadura. En este sentido, los primeros análisis se basaron en el estudio de la dinámica del vehículo y de las solicitaciones a las que están sometidos los neumáticos, para la determinación de una geometría adecuada para la transmisión de fuerzas entre carcasa-banda de rodadura-pavimento [16,17]. Esta primera fase del estudio mostraba una mejor transferencia de fuerzas entre componentes cuando la geometría de la unión estaba adaptada a los límites de adherencia que caracterizan la transmisión de fuerzas neumático-pavimento en las direcciones longitudinal y lateral. Esto proporcionaba una solución basada en pirámides truncadas, tal y como se puede ver en la Figura 1, cuyos parámetros geométricos han de ser adaptados y optimizados tanto a la aplicación como a los materiales que se usen en su fabricación. Asimismo, esta geometría cumple una función muy importante en el proceso de montaje y desmontaje de la banda de rodadura sobre la carcasa, ya que uno de los objetivos es que esta operación se pueda hacer únicamente inflando y desinflando la carcasa o una cámara de aire en su interior.

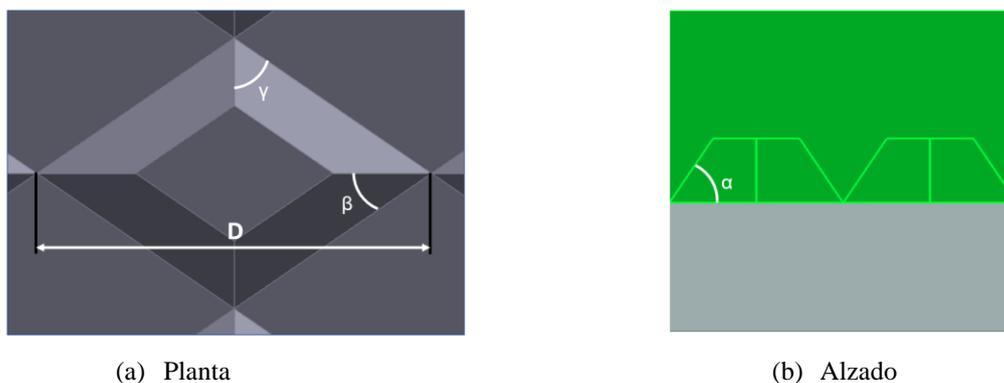


Figura 1: Parámetros seleccionados para la optimización del elemento geométrico utilizado para la unión entre carcasa y banda de rodadura. Se muestra en color gris la geometría de la carcasa y en color verde la de la banda de rodadura que encaja sobre dicha carcasa (positivo y negativo de la geometría).

2. Estudio experimental de una conexión mecánica entre carcasa y banda de rodadura

Este estudio experimental se ha planteado para incluir tanto el montaje como el desmontaje de ambas superficies con autocentrado, considerando el ángulo α más adecuado, así como la maximización de las fuerzas transmitidas desde la carcasa a la banda de rodadura y de ésta a la superficie de la carretera. Por esta razón, se ha diseñado un dispositivo de ensayo que se incorpora en una máquina universal de tracción-compresión, pudiendo aplicar una carga normal (dirección normal a la superficie de contacto, que representa la carga radial o vertical sobre el neumático) y, simultáneamente, establecer un desplazamiento mientras se mide la fuerza de tracción tangencial (que representa la fuerza longitudinal/lateral sobre la superficie de contacto). La Figura 2 muestra la disposición del área de contacto (a), los moldes metálicos utilizados para fabricar la muestra (b) y el dispositivo utilizado para aplicar una fuerza normal que garantice el contacto entre las dos superficies durante los ensayos de tracción (c). Todos estos elementos permiten realizar los primeros ensayos del concepto a través de un modelo plano de la huella de contacto. Si bien los resultados no serán completamente representativos de un neumático real, son el primer paso para probar y optimizar la geometría de unión mecánica, con el fin de realizar posteriormente un prototipo de “ECOTIRE” completo. Estos ensayos permiten evaluar el concepto y orientar el futuro prototipo.

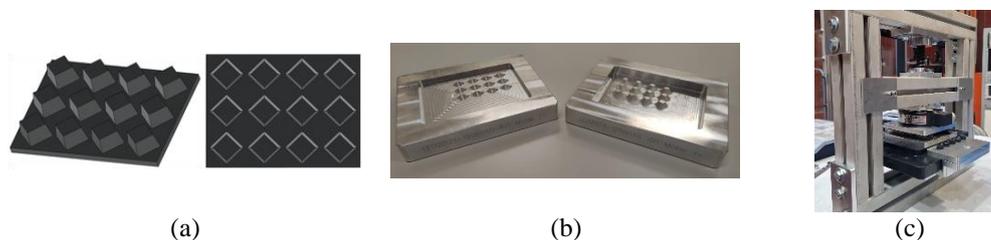


Figura 2: (a) Geometría de las probetas de ensayo, (b) moldes con la geometría de las probetas, (c) dispositivo de ensayo diseñado y fabricado para probar “huellas de contacto virtuales”.

2.1. Metodología

Para diseñar y evaluar el comportamiento de la unión mecánica, se han fabricado probetas de caucho con la geometría y dimensiones previamente estudiadas con el fin de someterla a ensayos en diferentes condiciones. Con el objetivo de optimizar la transmisión de fuerza entre ambas partes unidas únicamente por contacto, se emplea la máquina de ensayo que se muestra en la Figura 3. Este dispositivo permite medir mediante dos células de carga la fuerza normal (fuerza vertical y de presión soportada por el neumático) y la fuerza tangencial (fuerza longitudinal o lateral en la huella de contacto). El procedimiento de ensayo comienza con la aplicación de una fuerza normal inicial sobre el conjunto de la banda de rodadura del neumático. A continuación, la fuerza de tracción aumenta hasta alcanzar el desplazamiento predeterminado en dirección tangencial, siendo este de 15 mm, a una velocidad de 5 mm/min. Este aumento progresivo de la fuerza permite una evaluación precisa del comportamiento de la probeta bajo diferentes condiciones de fuerza normal (presión/carga normal). Los valores de fuerza normal aplicados en los ensayos se han calculado a partir de la presión de inflado que debe soportar el propio neumático, y que tiene que ser suficiente para mantener unidas ambas partes, aunque el neumático no esté apoyado en el suelo. Tal y como se muestra en los siguientes apartados, se han estudiado diversos valores de fuerza normal inicial: 300 N, 500 N, 700 N, 1000 N, 1500 N y 2000 N. Para no extender innecesariamente el estudio, en este documento se comienza explicando el análisis en detalle que se ha realizado para fuerzas aplicadas en dirección normal a la superficie de 1000N y 1500N en el inicio del ensayo. Considerando la superficie de geometría analizada, estos

valores equivalen a una presión de inflado aproximada de 1 y 1.5 bares respectivamente, es decir, presiones bajas para un neumático convencional, pero significativas para explicar el análisis del enlace mecánico. De este modo, se ha observado si con estas fuerzas normales, inferiores a las esperables en el neumático real, se alcanza una unión adecuada y las diferentes partes del neumático funcionan de manera solidaria. Al monitorizar y analizar los datos recopilados de las celdas de carga a lo largo del procedimiento de prueba, es posible estudiar el comportamiento de la unión mecánica con detalle y su evolución temporal al aplicar una carga tangencial creciente equivalente a una aceleración longitudinal o lateral. El objetivo de estas primeras pruebas experimentales y su análisis es perfeccionar el diseño geométrico y dimensional de la unión de la carcasa y la banda de rodadura del neumático, chequeando los modelos utilizados y validando las simulaciones realizadas con estos modelos.

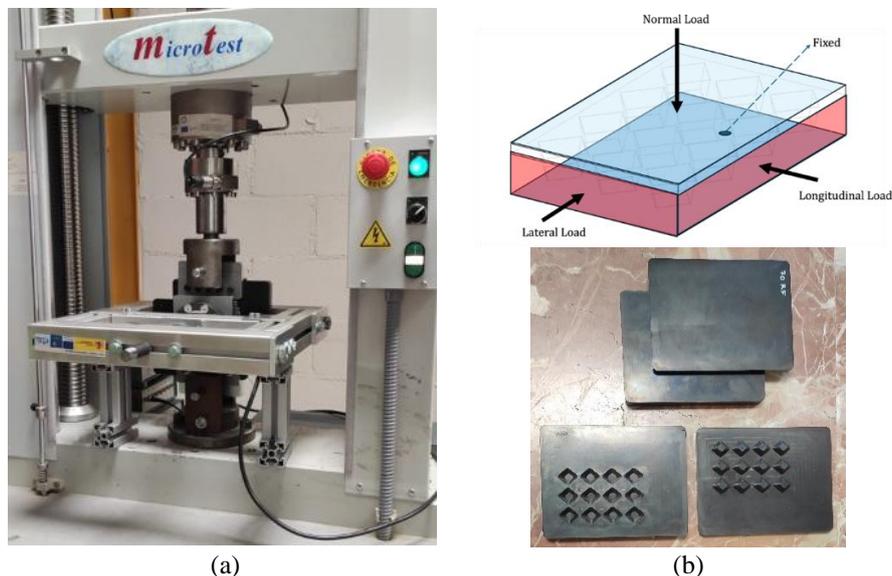


Figura 3: (a) Máquina de ensayo de “huellas de contacto virtuales” completa, incluyendo probeta de ensayo instalada. (b) Muestra de caucho ensayada y esquema de las condiciones de contorno aplicadas.

2.2. Características de las probetas de ensayo

En cuanto a las probetas ensayadas, representan la huella de contacto de un neumático real de un vehículo de tipo turismo seleccionado como referencia (205/55 R16), con unas dimensiones efectivas de 140 mm x 90 mm. Asimismo, los cálculos y simulaciones previos sugieren que las geometrías de tipo “pirámide truncada” proporcionan un buen comportamiento, seleccionando una altura de 10 mm y un ángulo de pared con respecto a la base de 80° para la fabricación de las probetas ensayadas. Estos valores han sido previamente simulados en modelos de elementos finitos, demostrado un buen comportamiento de “autocentrado” para el montaje y desmontaje, una transmisión de fuerza adecuada entre superficies en contacto y una altura compatible con las dimensiones reales del neumático seleccionado. Por todos estos motivos, estos valores han sido preseleccionados y utilizados para la fabricación de las probetas, pero tienen que ser evaluados experimentalmente.

El material de la muestra de caucho utilizado para la fabricación de las probetas es una mezcla de etileno propileno (EPDM) con una dureza Shore de 65: EPDM Código 65. Se considera que estas mezclas pueden replicar el comportamiento elástico y las propiedades mecánicas de los elastómeros de la carcasa y la banda de rodadura del neumático. Sin embargo, en estas mezclas pueden estar presentes contaminantes con características tóxicas, como el negro de humo, que puede tener características cancerígenas y/o neurotóxicas. Por este motivo, estos materiales son únicamente componentes iniciales que permiten avanzar en la unión mecánica mientras se procede a buscar un material más sostenible y con menor influencia en la salud de las personas. En relación a las propiedades de estas probetas, y al tratarse de mezclas fabricadas específicamente para realizar estos ensayos, el objetivo fue estudiar materiales con un comportamiento mecánico equivalente al de un neumático real.

2.3. Análisis del contacto entre ambas superficies

A partir de los resultados experimentales obtenidos con la metodología descrita, es posible estudiar la evolución de las fuerzas en el tiempo, obteniendo información del comportamiento de la unión por contacto entre ambos componentes. En concreto, es posible identificar dónde una parte del enlace mecánico intenta separarse y no funciona correctamente, indicando cuando comienza a fallar la conexión mecánica. Este proceso de “escalar” una superficie sobre la otra genera que la carga normal entre ambas superficies comience a aumentar. Aprovechando este fenómeno, la identificación de zonas lineales en estas curvas, y el valor de la pendiente, permiten cuantificar fuerzas y desplazamientos en el interior de la unión y si se están comportando como un material continuo, que es el objetivo del diseño de la unión mecánica. Más específicamente, cuando la pendiente en la carga normal es

positiva, se puede suponer que ambas superficies deslizan y una “escala” sobre la otra. Por el contrario, un valor negativo de la pendiente indica que las superficies en contacto no se están separando y, posiblemente por efecto Poisson, el material se está estrechando en esa dirección. Esto se puede cuantificar mejor identificando adecuadamente las partes lineales de la curva.

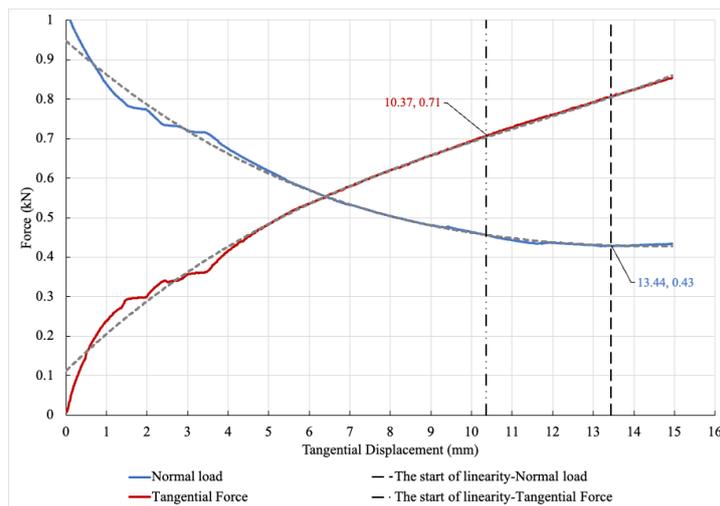
Para identificar las áreas en los ensayos de fuerza-desplazamiento donde la unión mecánica entre las partes se comporta como una pieza continua, se ha utilizado la norma ASTM E 111-97, específicamente desarrollada para el cálculo del módulo de Young [18], pero que permite en este caso la identificación de las zonas lineales (estables) en la transmisión de fuerzas entre ambas partes.

3. Resultados experimentales

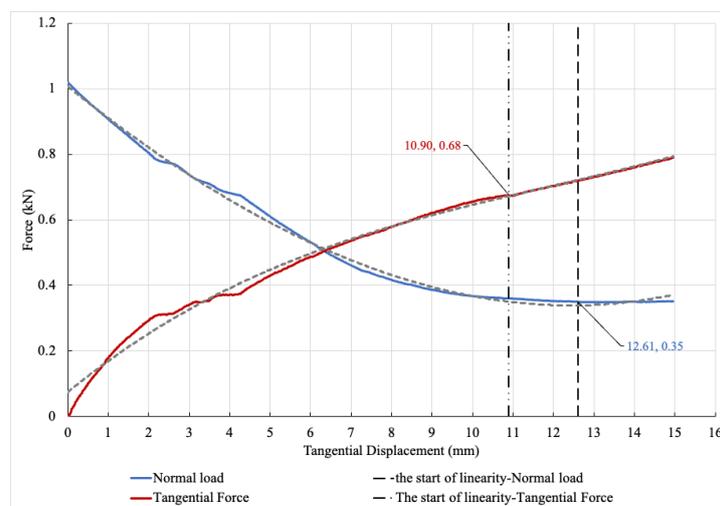
3.1. Primera condición de ensayo significativa

Para la primera condición de ensayo se ha establecido una carga normal de 1000 N con un desplazamiento permitido de 15 mm tanto en dirección longitudinal como lateral y una velocidad de 5 mm/min.

Las Figuras 4 (a) y (b) ilustran los resultados y el comportamiento de la muestra bajo una carga normal inicial de 1000 N, que evoluciona conforme se aplica un desplazamiento permitido de 15 mm en las direcciones longitudinal y lateral, respectivamente. En ambas figuras, el gráfico “Fuerza vs. Desplazamiento” muestra una tendencia similar: a medida que aumenta la fuerza tangencial, la fuerza normal inicialmente disminuye y a partir de un determinado punto, la carga normal comienza a aumentar gradualmente, indicando que la zona de contacto comienza a deslizar, iniciándose así la etapa de “ascenso” de una sobre otra y la correspondiente separación de ambas partes.



(a)



(b)

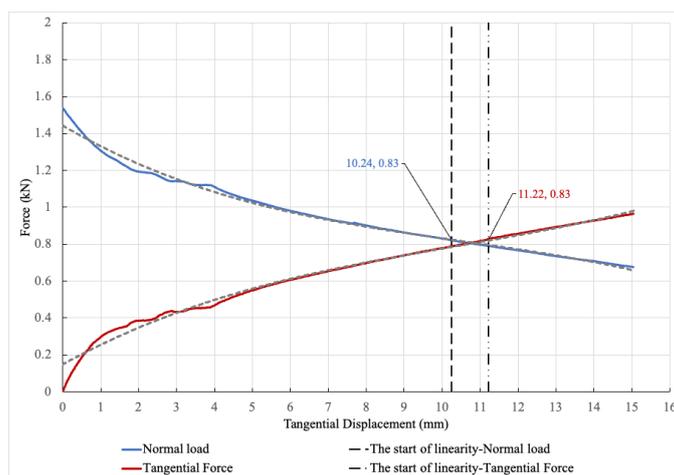
Figura 4: Fuerza normal inicial: 1000 N. (a) Fuerzas tangencial/longitudinal y normal en función del desplazamiento longitudinal, (b) Fuerzas tangencial/lateral y normal en función del desplazamiento lateral.

En la figura 4 (a), para la condición de tracción longitudinal, el comportamiento de la muestra se puede considerar lineal a partir de 13,44 mm de desplazamiento con una fuerza normal en ese instante de 0,43 kN, mientras que en la gráfica de fuerza tangencial el comportamiento es lineal a partir de 10,37 mm de desplazamiento y para una fuerza tangencial de 0,71 kN. De manera similar, en la figura 4 (b), para la condición lateral, el gráfico de fuerza normal comienza a exhibir un comportamiento lineal después de 12,61 mm de desplazamiento, para un valor de fuerza normal de 0,35 kN, mientras que el gráfico de fuerza tangencial muestra linealidad a partir de 10,90 mm de desplazamiento y para una fuerza tangencial de 0,68 kN. Este comportamiento lineal y estable de la fuerza normal, pero evolucionando con pendiente positiva, implica separación de las superficies. Es por este motivo que el análisis de estos parámetros se ha identificado como fundamental para la evaluación del correcto funcionamiento del nuevo concepto de neumático que se propone.

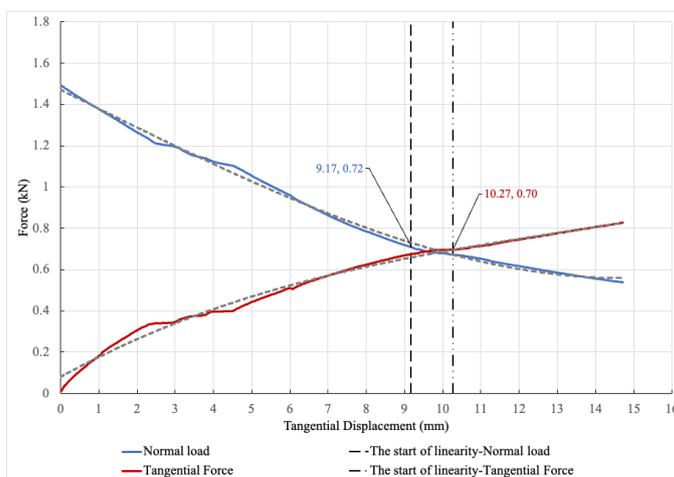
3.2. Segunda condición de ensayo significativa

De forma análoga al primer ensayo, para la segunda condición de ensayo se ha establecido una carga normal de 1500 N con un desplazamiento permitido de 15 mm tanto en dirección longitudinal como lateral y una velocidad de 5 mm/min.

Las Figuras 5 (a) y (b) ilustran los resultados y el comportamiento de la muestra bajo una carga normal inicial de 1500 N, que evoluciona conforme se aplica un desplazamiento permitido de 15 mm en las direcciones longitudinal y lateral, respectivamente. En ambas figuras, el gráfico “Fuerza vs. Desplazamiento” muestra una tendencia similar: a medida que aumenta la fuerza tangencial, la fuerza normal disminuye y, a diferencia de la primera condición de ensayo, para esta fuerza normal inicial no se observa el cambio de pendiente negativa a pendiente nula o positiva en las fuerzas tangenciales dentro del rango de desplazamiento analizado, 15 mm. Es decir, en todo momento la zona de contacto parece no presentar deslizamiento y comportarse como un sólido continuo, condición que garantiza una unión adecuada de ambas superficies, aun cuando la presión de inflado equivalente es de solamente 1.5 bares.



(a)



(b)

Figura 5: Fuerza normal inicial: 1500 N. (a) Fuerzas tangencial/longitudinal y normal en función del desplazamiento longitudinal, (b) Fuerzas tangencial/lateral y normal en función del desplazamiento lateral.

En la figura 5 (a), para la condición longitudinal, el comportamiento de la muestra se puede considerar lineal a partir de 10,24 mm de desplazamiento para una fuerza normal en ese instante de 0,83 kN, mientras que en la gráfica de fuerza tangencial el comportamiento es lineal a partir de 11,22 mm de desplazamiento y para una fuerza tangencial de 0,863 kN. De manera similar, en la figura 5 (b), para la condición lateral, el gráfico de fuerza normal comienza a exhibir un comportamiento lineal después de 9,17 mm de desplazamiento, para un valor de fuerza normal de 0,72 kN, mientras que el gráfico de fuerza tangencial muestra linealidad a partir de 10,27 mm de desplazamiento y para una fuerza tangencial de 0,70 kN. Este comportamiento lineal y estable, junto con la ausencia de separación que viene dado por la fuerza normal que evoluciona con pendiente negativa en todo momento, indica que para una presión de inflado de 1,5 bares la unión mecánica está cumpliendo ya su función de manera adecuada.

3.3. Análisis de ensayos completos

Con el fin de ampliar la información proporcionada por estos dos ensayos, y haciendo una comparativa más completa de cada una de las condiciones de ensayo, se estudian los ensayos para diferentes fuerzas normales iniciales entre 300 N y 2000 N. Para ello se han usado las mismas probetas, desplazamientos y velocidades de desplazamiento ya indicados.

Al examinar el comportamiento de la fuerza normal y longitudinal en la Figura 6, normal y lateral en la Figura 7, las curvas de fuerza frente a desplazamiento muestran que al aumentar la fuerza normal inicial los gráficos de fuerza normal comienzan a exhibir una pendiente negativa que no cambia de tendencia. Dicha pendiente negativa indica que las zonas de contacto no sólo permanecen en contacto, sino que también se adhieren más firmemente, lo cual es crucial para el buen funcionamiento del diseño, esto sucede a partir de 1500 N. Es importante resaltar que la presión operativa y la fuerza normal son mayores en un neumático convencional, oscilando aproximadamente entre 2 kN y 2,5 kN.

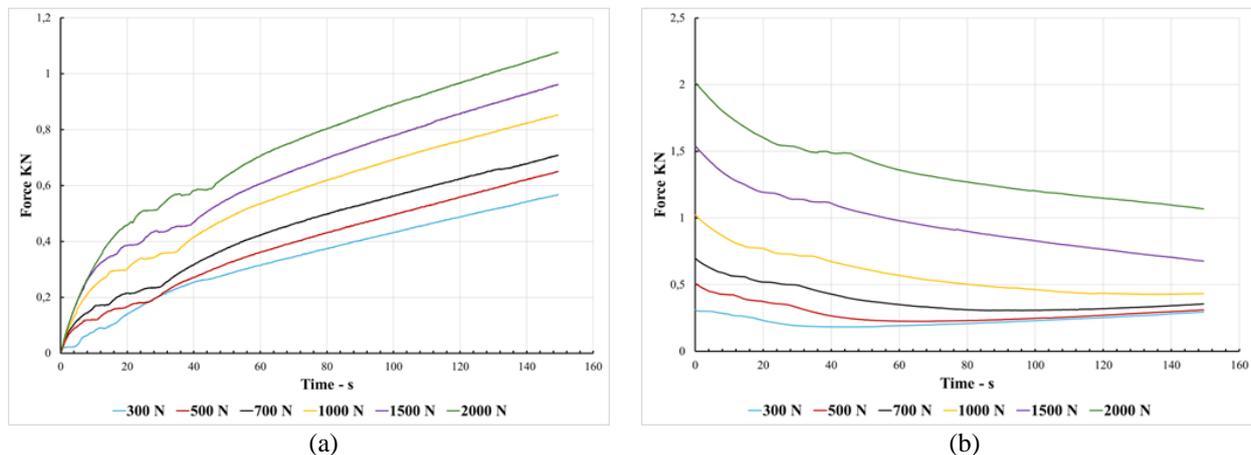


Figura 6: (a) Evolución de la fuerza longitudinal al imponer un desplazamiento en la misma dirección de 5 mm/min. (b) Evolución de la carga normal cuando se establecen diferentes valores de carga normal inicial y se aplica la fuerza longitudinal que se muestra en la figura (a) a lo largo del tiempo.

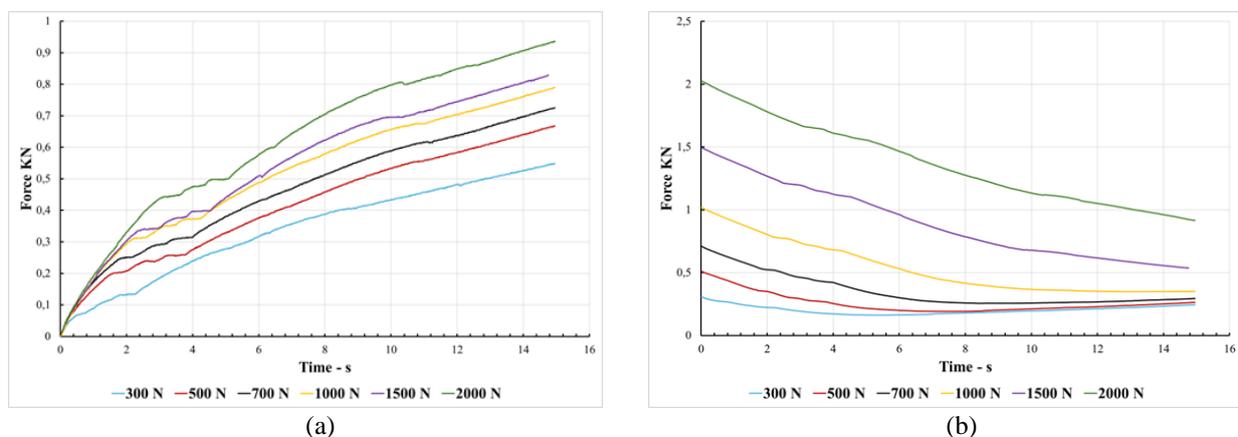


Figura 7: (a) Evolución de la fuerza lateral al imponer un desplazamiento en la misma dirección de 5 mm/min. (b) Evolución de la carga normal cuando se establecen diferentes valores de carga normal inicial y se aplica la fuerza lateral que se muestra en la figura (a) a lo largo del tiempo.

Las Figuras 6 (b) y 7 (b) muestran la comparación entre la evolución de diferentes fuerzas normales en condiciones de tracción tanto longitudinales como laterales. Se puede observar que, con el aumento de la fuerza normal inicial, la progresión de dicha fuerza normal presenta una pendiente negativa que tiende a cero, convergiendo a un valor constante. Para valores iniciales pequeños de la carga normal (por debajo de 1kN para la geometría ensayada), lo que se puede observar es que la pendiente no tiende a cero y se vuelve positiva a partir de un determinado instante, indicando la separación de ambas superficies. Es decir, para las condiciones ensayadas, la presión mínima de inflado que daría estabilidad al neumático estaría en torno a 1 bar, valor significativamente menor (aproximadamente la mitad) que la presión de inflado nominal recomendada en neumáticos convencionales.

El análisis de estos resultados y la información que proporcionan es de gran utilidad para realizar modelos de simulación representativos y enfocar los análisis en los que se introduzcan nuevos materiales, combinación de materiales en carcasa y banda de rodadura, así como modificaciones en la geometría de unión propuesta, incluyendo ya la curvatura del neumático.

4. Conclusiones

Este artículo presenta nuevos avances en la unión mecánica del futuro neumático, ECOTIRE. Esto permite seguir avanzando en un concepto de neumático sostenible con estructura removible destinado a integrar nuevos materiales y tecnología de sensores para reducir el impacto ambiental y al mismo tiempo mejorar la funcionalidad del neumático.

El diseño de la conexión entre ambas partes se basa en estudios dinámicos previos de un vehículo sometido a maniobras severas y las fuerzas que debe soportar y transmitir el neumático. Este estudio ha dado lugar a una geometría de pirámide truncada como geometría de conexión inicial. Siendo esta la base del estudio experimental que se aborda en este artículo. A partir de dichas pruebas dinámicas se propone una altura y ángulos para esta pirámide truncada. Es decir, una configuración básica que ha sido fabricada y ensayada para evaluar su comportamiento. Este paso es necesario para proponer un proceso de optimización mediante simulación y evaluación experimental a realizar en etapas posteriores.

Los ensayos experimentales basados en huellas de contacto virtuales (modelos experimentales representativos) permiten consolidar la viabilidad de este concepto de conexión mecánica bajo cargas normales variables, proporcionando resultados prometedores tanto en capacidad de agarre como en transmisión de fuerza.

La investigación identifica desafíos y soluciones clave en el diseño de un prototipo funcional que pueda transmitir fuerzas al pavimento de manera efectiva y al mismo tiempo minimizar el impacto ambiental. Además, el análisis de las curvas experimentales de fuerza frente a desplazamiento ilustra la relación entre las fuerzas normales y tangenciales, mostrando que valores de fuerza normal relativamente bajos (presiones de inflado habituales en neumáticos convencionales) son suficientes para obtener una unión estable y efectiva en la transmisión de fuerzas tangenciales. Las pruebas realizadas con fuerzas normales iniciales variables de 300 N a 2000 N muestran un comportamiento prometedor de la geometría propuesta a partir de 1000 N, valor a partir del cual la pendiente de las curvas de fuerza normal se mantiene negativa, lo que indica un contacto adecuado y un comportamiento solidario del material de ambas partes de la unión, sin tendencia a la separación. Como este valor equivale a aplicar una presión interna de alrededor de 1 bar (teniendo en cuenta la geometría de la zona de contacto virtual ensayada), esto confirma que la geometría propuesta para el enlace mecánico se comporta adecuadamente, al menos en la huella de contacto virtual.

A partir de estos resultados, se han fabricado probetas con otros materiales elastómeros, incluyendo diversas mezclas de caucho con menores cargas de negro de humo, así como siliconas, con el fin evaluar su posible utilización en la carcasa o en la banda de rodadura. Este modelo de “huellas de contacto virtuales” permitirá valorar el comportamiento de los diferentes materiales “candidatos” para la fabricación del primer prototipo ECOTIRE completo. Asimismo, a partir de estos resultados, se han identificado posibles mejoras geométricas en la unión mecánica, que también serán evaluadas en dichas probetas, ampliando y mejorando el presente estudio experimental.

Mientras continúa el diseño de un prototipo completamente funcional, los hallazgos subrayan el potencial de ECOTIRE para revolucionar la tecnología de neumáticos, integrando la sostenibilidad con una funcionalidad avanzada. Este enfoque holístico no sólo aborda los desafíos medioambientales actuales, sino que también allana el camino para futuras innovaciones en el diseño y la fabricación de neumáticos.

5. Agradecimientos

Esta publicación forma parte del proyecto de I+D+i: **TED2021-129604B-100**, financiado por **MCIU/AEI/10.13039/501100011033** y por la Unión Europea **NextGeneration EU PRTR**. Adicionalmente, los autores quieren agradecer a la empresa Advantaria y a su director, Ignacio Requena Rodríguez, por los aportes conceptuales y el apoyo técnico e industrial brindado.

6. Referencias

- [1] Garcia-Pozuelo D., Olatunbosun O., Palli G., Strano S., et al. “Estimation of tire-road contact forces through a model-based approach employing strain measurements”. *Meccanica* 57:1801–1829 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11012-022-01548-y>
- [2] Garcia-Pozuelo D., Olatunbosun O., Yunta J., et al. “A Novel Strain-Based Method to Estimate Tire Conditions Using Fuzzy Logic for Intelligent Tires”. *Sensors* 17(2),350 (2017)
- [3] Garcia-Pozuelo D., Olatunbosun O., Yunta J., et al. “A Strain-Based Method to Estimate Slip Angle and Tire Working Conditions for Intelligent Tires Using Fuzzy Logic”. *Sensors* 17(4),874 (2017)
- [4] Yunta J., García-Pozuelo D., Diaz V., et al. “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* 18(2),490 (2018)
- [5] Yunta J, García-Pozuelo D, Diaz V, et al. “Influence of camber angle on tire tread behavior by an onboard strain-based system for intelligent tires”. *Measurement* 145,631-639 (2019)
- [6] Mendoza-Petit M, García-Pozuelo D, Díaz V, et al. “A Strain-Based Intelligent Tire to Detect Contact Patch Features for Complex Maneuvers”. *Sensors* 20(6).1750 (2020)
- [7] Mendoza-Petit M, García-Pozuelo D, Díaz V, et al. “Characterization of the loss of grip condition in the Strain-Based Intelligent Tire at severe maneuvers”. *Mechanical Systems and Signal Processing* 168 (2022)
- [8] Khan FR, Rødland ES, Kole PJ, Van Belleghem FG, Jaén-Gil A, Hansen SF, Gomiero A. “An overview of the key topics related to the study of tire particles and their chemical leachates: From problems to solutions”. *TrAC Trends Anal. Chem.* 2024, 172, 117563. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117563> (2024)
- [9] B.A.R. Environmental Inc. “Evaluation of the Potential Toxicity of Automobile Tires in the Aquatic Environment”; Report to Environment Canada; National Water Institute: Burlington, ON, Canada, p. 15 (1992)
- [10] Bin-Shafique S, Benson CH, Edil TB, Hwang K. “Leachate concentrations from water leach and column leach tests on flyash stabilized soil”. *Environ. Eng. Sci.* 2006, 23, 51–65. <https://doi.org/10.1089/ees.2006.23.53> (2006)
- [11] Tik Root. “Tires: The Plastic Polluter You Never Thought About. Environment. The Story of Plastic”; National Geographic: Washington, DC (2019)
- [12] Dabic-Miletic S, Simic V. “Smart and sustainable waste tire management: Decision-making challenges and future directions”. *Decis. Mak. Adv.* 2023, 1, 10–16. <https://doi.org/10.31181/v120232> (2023)
- [13] Abenojar J., Martinez M., Butenegro J., et al. “Plasma treatment effects on the wettability and adhesion of commercial rubber”. 7th International Conference on Structural Adhesive Bonding AB2023, Oporto, Portugal (2023)
- [14] Abenojar J., Martinez M., Butenegro J., et al. “Preliminary studies of adhesion and durability of coatings on rubber for tires / Estudios previos de adhesión y durabilidad de recubrimientos sobre caucho para neumáticos”. XXII Congreso Internacional de Adhesión y Adhesivos, Malaga, España (2023)
- [15] Martínez M.A., Abenojar J., García-Pozuelo D. “Effect of Plasma Treatment on Coating Adhesion and Tensile Strength in Uncoated and Coated Rubber Under Aging”. *Materials* 18, 427 (2025)
- [16] García-Pozuelo D. et al., “Primeras fases de diseño de un neumático mixto-desmontable: ECOTIRE”. XXIV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, 25-27 octubre (2023)
- [17] García-Pozuelo D., Afshari F., Martínez M.A., Viadero F. et al. “Designing a new sustainable and instrumented tire: ECOTIRE”. *EuCoMeS 2024, MMS* 165, pp. 1–9 (2024)
- [18] GABAUER W. “The Determination of Uncertainties in Tensile Testing”. *Manual of Codes of Practice for the Determination of Uncertainties in Mechanical Tests on Metallic Materials Code of Practice 07(1)* (2000)