



ING. AUTOMOTRIZ

Trabajo de Integración Curricular

Artículo de Investigación para la obtención del título de Ingeniería en Mecánica Automotriz

AUTORES:

HENRY VINICIO MORILLO AGUIRRE

JOSE XAVIER ESCOBAR TRÁVEZ

RODRIGO ISRAEL VIERA FLORES

TUTOR:

Msc. Gorky G. Reyes

**ANÁLISIS DE LA DISPERSIÓN DE AGUA SEGÚN EL
LABRADO Y PROCEDENCIA DEL NEUMÁTICO**

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **Henry Morillo, José Escobar e Israel viera** declaramos bajo juramento, que el trabajo aquí descrito es nuestra autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedo los derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, su reglamento y demás disposiciones legales.



Henry Vinicio Morillo Aguirre



José Xavier Escobar Trávez



Rodrigo Israel Viera Flores

APROBACIÓN DEL TUTOR

Yo, **Reyes Campaña Guillermo Gorky**, certifico que conozco al autor del presente trabajo, siendo el responsable exclusivo tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Reyes Campaña', written over a horizontal line. The signature is stylized and cursive.

Reyes Campaña Guillermo Gorky

DEDICATORIA

Este proyecto de investigación para mi titulación es dedicado para mis padres por el gran esfuerzo, paciencia, tiempo y recurso económicos que han empleado a lo largo de mi educación Universitaria con la finalidad de que pueda desarrollar mis habilidades como profesional y llegar a ser un buen ser humano con los valores impartidos desde casa, teniendo en claro el objetivo claro de poder lograr todos los objetivos trazados como un adulto y así conseguir un aporte significativo en mi vida y con toda la sociedad.

Henry Morillo.

AGRADECIMIENTO

De ante mano agradezco a la prestigiosa Universidad Internacional Del Ecuador por haberme permitido tener la oportunidad de formar parte de esta noble institución UIDE, así como a la mejor facultad de Ingeniería Automotriz que gracias a los conocimientos impartidos por parte de los ingenieros docentes y al personal que conforman la Universidad han podido dejar en mí una gran enseñanza, conocimiento y experiencias vividas, que me sirven como una herramienta para mi desempeño laboral y profesional con la sociedad. Agradezco a MSc. Gorky G. Reyes, por ser de mi gran ayuda como tutor de titulación por ser la guía para poder lograr este tema de investigación, ya que gracias a su punto de referencia y apoyo puedo cumplir con este requisito importante para poder alcanzar y culminar mi etapa universitaria.

¡¡¡Gracias a todos!!!

Henry Morillo

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación es dedicado a mis padres que actualmente ya no se encuentran a mi lado, pero gracias a su esfuerzo, tiempo, recursos económicos y apoyo incondicional que emplearon para que pueda culminar mi educación y logre continuar desarrollándome como un buen profesional, pero sobre todo un mejor ser humano.

Esta etapa culminada de mi vida no podría ser hoy realidad sin su inmenso amor y dedicación puestos en mí, es por eso que es de mucho valor y significado el poder dedicar la culminación y titulación de mi carrera a quien en vida fueron mis inmensamente amorosos y ejemplares Padres.

José E.

AGRADECIMIENTO

Agradezco primero a Dios quien día a día me permite seguir adelante con su bendición y que gracias a ello logro culminar mi carrera Universitaria. Agradezco infinitamente a mi hermana y mi cuñado por estar a mi lado en cada paso para lograr culminar mis estudios y por su valiosa compañía y amor. También quiero agradecer a la Universidad Internacional del Ecuador por permitirme ser parte de su linda comunidad que, en conjunto con los ingenieros, personal y mis compañeros han dejado en mí enseñanza, conocimiento y experiencias muy gratas en mi vida.

Mi agradecimiento especial al Msc. Gorky G. Reyes, quién fue tutor del presente artículo, por su valiosa guía y acompañamiento durante la realización del proyecto y así poder culminar satisfactoriamente el mismo.

José E.

DEDICATORIA

A mis padres, Rodrigo y Rosalba, por su amor y sacrificio, que me han permitido alcanzar mis metas y soñar en grande.

A mis hermanas Jessy, Majo y Gaby, por su apoyo incondicional y amor, que me han sido fuente de inspiración y motivación.

A mis amigos y colegas, que han acompañado en este camino y me han brindado su apoyo y sabiduría.

Y sobre todo a mis hijos que son mi fuente de inspiración y mis ganas de seguir adelante y no rendirme nunca.

Israel V.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a todas las personas que me han apoyado durante este proceso, especialmente a:

- Mi director de Tesis Msc. Gorky G. Reyes por su guía y orientación experta.
- Mis padres Rodrigo y Rosy por su amor y apoyo incondicional
- Mis amigos y familiares, por su motivación y aliento constante
- Mis amigos por su compartir de experiencias y conocimiento
- Los profesores y colegas de la UIDE, por el conocimiento compartido y su valiosa enseñanza.

Este logro no habría sido posible sin su ayuda y apoyo. ¡Gracias por estar conmigo en este camino!

Israel V.

INDICE DE CONTENIDO

.....	1
CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA	ii
APROBACIÓN DEL TUTOR	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
AGRADECIMIENTO	vii
RESUMEN	12
ABSTRACT.....	12
INTRODUCCIÓN	13
1. Marco Teórico.....	14
1.1. Neumático	15
1.1.1. Características técnicas de los neumáticos	15
1.1.2. La adherencia en los neumáticos	17
1.1.3. Resistencia a la rodadura	18
1.1.4. Comportamiento del neumático en lluvia	19
1.1.5. Adherencia: neumático – calzada.	19
2. Método	20
3. Materiales.....	21
3.1. Neumáticos	21
3.2. Profundidad del neumático.	22
4. Normativa	22
5. Equipos de medición.....	24
6. Resultados y Discusión.....	25
6.1. Análisis 8mm – 0Km	26

6.2.	Análisis 5mm – 5,5mm – 25000 Km a 30000 Km	27
6.3.	Análisis 1,8mm – 2,1mm – 55000 Km a 60000 Km	27
6.4.	Análisis disipación agua por huella de arrastre.....	28
6.5.	Análisis Neumático labrado HT.....	29
6.5.1.	Extremos Izquierdo y Derecho:	29
6.5.2.	Áreas Internas Izquierda y Derecha:	30
6.5.3.	Centro del Neumático:	30
6.5.4.	Sección A-B:.....	30
6.5.5.	Secciones C-D, E-F y G-H:	31
6.6.	Análisis Neumático labrado V.....	31
6.6.1.	Extremos Izquierdo y Derecho:	32
6.6.2.	Áreas Internas Izquierda y Derecha:	32
6.6.3.	Centro del Neumático:	33
6.6.4.	Sección A-B:.....	33
6.6.5.	Secciones C-D, E-F y G-H:	33
7.	CONCLUSIONES.....	35

ANÁLISIS DE LA DISPERSIÓN DE AGUA SEGÚN EL LABRADO Y PROCEDENCIA DEL NEUMÁTICO

Henry Morillo¹, Jose Escobar², Rodrigo Viera³, Guillermo Reyes⁴, ¹hemorilloag@uide.edu.ec,
²joescobartr@uide.edu.ec, ³rovierafl@uide.edu.ec,
⁴guryesca@uide.edu.ec. Universidad Internacional del Ecuador

RESUMEN

Actualmente, existe una amplia oferta de neumáticos de diversas calidades, tipos y procedencias. Esta investigación analiza el comportamiento de varios neumáticos en condiciones de lluvia extrema. Se evaluó la dispersión de agua mediante un método analítico-sintético, probando diferentes neumáticos a diversas velocidades y considerando su desgaste, manteniendo una presión constante. Se examinó cómo neumáticos regionales evacuan el agua según su origen, tipo y profundidad del labrado. El análisis de la disipación de agua en neumáticos con diferentes profundidades de labrado comparó tres modelos: NP-N3, NP-CH2 y NP-K1, en labrados HT (Highway Terrain) y en V. Los resultados muestran que, a mayor velocidad, aumenta la capacidad de evacuación de agua, con los labrados en V siendo más eficientes. A 40 km/h, el NP-K1 en V disipa 4,27 L/s, y a 120 km/h, 18,6 L/s, con una profundidad mínima de 1,8 mm, conforme al artículo 172 de la ANT. En todas las velocidades, el labrado en V supera al HT, especialmente a mayores velocidades, demostrando su mayor efectividad.

Palabras clave: dispersión de agua, acuaplaning, ensayo, profundidad del labrado

ABSTRACT

Currently, there is a wide range of tires of various qualities, types and origins. This research analyzes the behavior of various tires in extreme rain conditions. The dispersion of water was evaluated using an analytical-synthetic method, testing different tires at various speeds and considering their wear, maintaining a constant pressure. It was examined how regional tires evacuate water depending on their origin, type and tread depth. The analysis of water dissipation in tires with different tread depths compared three models: NP-N3, NP-CH2 and NP-K1, in HT (Highway Terrain) and V treads. The results show that, at higher speeds, it increases the water evacuation capacity, with the V-shaped ones being more efficient. At 40 km/h, the NP-K1 in V dissipates 4.27 L/s, and at 120 km/h, 18.6 L/s, with a minimum depth of 1.8 mm, in accordance with article 172 of the ANT. At all speeds, V-till outperforms HT, especially at higher speeds, demonstrating its greater effectiveness.

Keywords: water dispersion, aquaplaning, testing, tillage depth

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existe una amplia oferta de neumáticos de diferentes calidades, tipos y procedencias. Al momento de adquirir o cambiar los neumáticos del vehículo, se encuentra en el mercado con una gran variedad de opciones (Maya, 2009), en muchas ocasiones, por motivos financieros, se opta por la alternativa más económica, lo que puede resultar en un desempeño inferior y una vida útil reducida del neumático, además, es importante considerar las condiciones geográficas y climáticas del lugar donde vivimos; por ejemplo, la lluvia es un factor crítico que puede causar muchos accidentes si los neumáticos no tienen la adherencia adecuada a la calzada (Liesa, 2009), la falta de adherencia aumenta el riesgo de accidentes de tránsito (Nogueira, 2016). Tomando en cuenta lo anteriormente expuesto, la presente investigación busca analizar, cómo se comportan diferentes tipos de neumáticos en condiciones de lluvia extrema, se evaluó la dispersión de agua generada por los neumáticos en función del tipo de labrado, la presión del neumático y su grado de desgaste.

Tomando en cuenta los antecedentes expuestos, la presente investigación se divide en tres etapas. En la primera, se investigaron las características fisicoquímicas de los neumáticos y cómo se comportan en función del coeficiente de fricción de la calzada, el cual varía entre condiciones secas y mojadas. En la segunda etapa, se llevó a cabo una minuciosa investigación sobre los tipos de neumáticos que se utilizaron en el estudio, analizando las especificaciones proporcionadas por los fabricantes. Con estos datos, se realizaron pruebas de laboratorio para determinar las características que influyen en la capacidad de los neumáticos para disipar el agua y garantizar una adherencia adecuada, con el fin de evitar siniestros de tránsito.

Los neumáticos para vehículos están compuestos por una combinación de materiales cuidadosamente seleccionados para optimizar su rendimiento y durabilidad. El componente principal es el caucho, que puede ser natural o sintético, y proporciona la elasticidad y resistencia necesarias (Sánchez, Sierra, 2014). Además, se incorporan materiales de refuerzo como la fibra de aramida o el nailon, que aumentan la resistencia a la tracción y mejoran la estabilidad del neumático (Rodríguez, Loya, 2018). La estructura del neumático también incluye capas de acero, conocidas como cinturones de acero, que ayudan a mantener la forma del neumático y proporcionan resistencia a las perforaciones. Otros componentes incluyen

aditivos y compuestos químicos, como negro de carbón y sílice, que mejoran propiedades específicas como la tracción, la durabilidad y la eficiencia del combustible (Bernal, 2019). Estos materiales trabajan en sinergia para ofrecer un equilibrio entre rendimiento, seguridad y vida útil del neumático en diversas condiciones de conducción.

Una investigación reciente realizada por Bianchetto se centró en analizar los factores que contribuyen al fenómeno del aquaplaning en carreteras con diferentes tipos de pavimento (Bianchetto, Mora & Nosetti, 2012), sus resultados sugieren que la velocidad del vehículo, el estado de los neumáticos y la profundidad del agua en la calzada son variables cruciales que influyen en la probabilidad de aquaplaning. Por otro lado, Bescansa llevo a cabo un estudio experimental para evaluar la eficacia de diferentes tecnologías de neumáticos en la prevención del aquaplaning (Bescansa, 2016), descubrieron que los neumáticos con canales de drenaje más amplios y un diseño de labrado específico proporcionaban una mejor evacuación del agua, reduciendo así el riesgo de aquaplaning en condiciones de lluvia intensa. Además, una investigación realizada por Pérez y Urbina se centró en analizar las estrategias de conducción para minimizar el riesgo de aquaplaning (Pérez, Urbina, 2021), sus resultados indicaron que reducir la velocidad, mantener una distancia segura con otros vehículos y evitar maniobras bruscas son medidas efectivas para prevenir el aquaplaning y mejorar la seguridad vial en condiciones de lluvia.

Marco Teórico.

A lo largo de la historia, los neumáticos han experimentado una notable evolución en términos de diseño, materiales y tecnología para abordar diversos aspectos relacionados con la adherencia, los materiales y la interacción con la calzada. Desde los rudimentarios neumáticos de caucho natural hasta los compuestos sintéticos de alta tecnología utilizados en la actualidad, se ha producido un constante avance en la búsqueda de mejoras en el rendimiento y la seguridad (Jaramillo, Hoyos, 2014), los primeros diseños de neumáticos, aunque revolucionarios en su época, ofrecían una adherencia limitada en diversas condiciones de carretera, sin embargo, con el desarrollo de compuestos de caucho más avanzados y la introducción de tecnologías de labrados más eficientes, se ha logrado mejorar significativamente la adherencia de los neumáticos a la calzada, tanto en condiciones secas como mojadas. Además, Aleaga y Valle destaca que la utilización de materiales compuestos más duraderos y resistentes ha aumentado la durabilidad y la resistencia a la abrasión de los neumáticos, mejorando así su rendimiento a

lo largo del tiempo (Aleaga, Valle, 2023). La evolución de los neumáticos ha sido un proceso continuo y multidimensional, que ha abarcado aspectos clave como la adherencia, los materiales y la interacción con la calzada, con el objetivo de mejorar la seguridad y el rendimiento en la conducción.

Neumático

Los neumáticos son componentes esenciales de los vehículos que desempeñan un papel crucial en la seguridad, el rendimiento y la eficiencia del transporte (Galarza & Subauste, 2023). Están diseñados para proporcionar tracción, absorber los impactos de la carretera y soportar el peso del vehículo (Pulido, 2014). Los neumáticos están compuestos principalmente de caucho, tanto natural como sintético, y contienen varios componentes como la carcasa, la banda de rodadura, los flancos y el talón. La banda de rodadura es la parte que está en contacto directo con la carretera y su diseño, que incluye ranuras y surcos, está pensado para mejorar la tracción y evacuar el agua en condiciones de lluvia, reduciendo así el riesgo de hidropneumático (Sánchez, 2011).

Además de su estructura básica, los neumáticos modernos incorporan tecnologías avanzadas que mejoran su rendimiento en diferentes condiciones, existen neumáticos específicos para distintas estaciones, como los neumáticos de verano, que están diseñados para proporcionar una mayor adherencia y rendimiento en condiciones secas y cálidas, y los neumáticos de invierno, que cuentan con compuestos de goma más suaves y patrones de banda de rodadura que mejoran la tracción en nieve y hielo (Pinheiro, 2020). Asimismo, hay neumáticos todo terreno y de alto rendimiento, diseñados para satisfacer las necesidades específicas de conducción fuera de carretera y a altas velocidades, respectivamente (Goodyear, 2020). La correcta selección y mantenimiento de los neumáticos es fundamental para garantizar la seguridad, eficiencia de combustible y durabilidad del vehículo.

Características técnicas de los neumáticos

Los neumáticos poseen diversas características técnicas que son fundamentales para su rendimiento y seguridad. Están compuestos de una mezcla de caucho natural y sintético, reforzados con capas de tejidos de cables que conforman la carcasa, proporcionando resistencia y flexibilidad. La banda de rodadura, con su diseño de ranuras y surcos, mejora la tracción y

reduce el riesgo de hidroplaneo. Además, cada neumático tiene un índice de velocidad y un índice de carga que indican su capacidad máxima de operación segura en términos de velocidad y peso. La presión de inflado adecuada es crucial para mantener estas propiedades, al igual que la profundidad de la banda de rodadura, que debe ser suficiente para asegurar una buena adherencia. Tecnologías adicionales, como los neumáticos sin cámara y los run-flat, ofrecen ventajas específicas en términos de seguridad y eficiencia.

Tabla 1. *Características de los neumáticos*

Características Técnicas	Descripción
Composición del Material	Los neumáticos están hechos de una mezcla de caucho natural y sintético, que incluye compuestos químicos y materiales como el sílice para mejorar el rendimiento.
Estructura de la Carcasa	La carcasa es la estructura interna del neumático, compuesta por capas de tejidos de cables (generalmente de poliéster, acero o fibra de vidrio) que proporcionan resistencia y flexibilidad.
Banda de Rodadura	Parte del neumático en contacto con la carretera, diseñada con patrones de ranuras y surcos para mejorar la tracción y el desalojo de agua, reduciendo el riesgo de hidroplaneo.
Índice de Velocidad	Indica la velocidad máxima a la que un neumático puede operar de manera segura. Está representado por una letra (por ejemplo, S, T, H, V, Z) según la clasificación estándar.
Índice de Carga	Indica la capacidad máxima de carga que un neumático puede soportar. Representado por un número (por ejemplo, 91, 94, 98) según la clasificación estándar.
Presión de Inflado	La presión de aire recomendada para un neumático, medida en PSI (libras por pulgada cuadrada) o kPa (kilopascales), esencial para mantener el rendimiento y la seguridad.
Profundidad de la Banda de Rodadura	Mide la altura del patrón de la banda de rodadura, crucial para la tracción y la adherencia en diferentes condiciones climáticas. Se recomienda una profundidad mínima de 1.6 mm.
Tipo de Neumático	Existen diversos tipos como los neumáticos de verano, invierno, todo terreno, y de alto rendimiento, cada uno diseñado para condiciones específicas de conducción y clima.

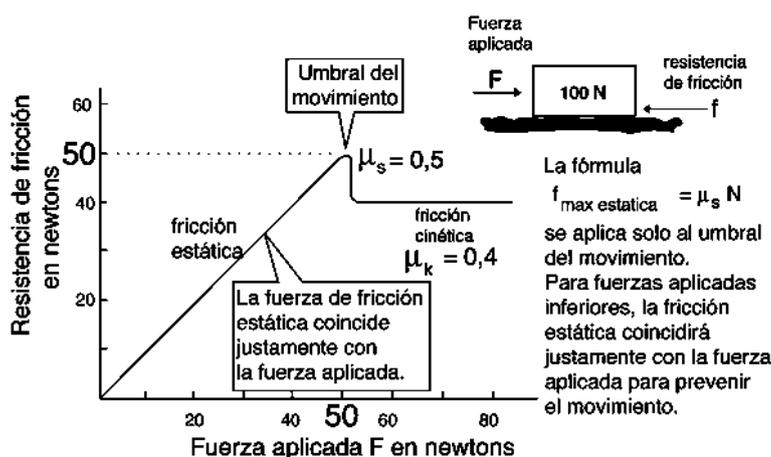
Características Técnicas	Descripción
Resistencia a la Rodadura	Determina la cantidad de energía que se pierde cuando el neumático rueda, afectando la eficiencia de combustible del vehículo. Neumáticos con baja resistencia a la rodadura mejoran el ahorro de combustible.
Tecnología de Construcción	Puede incluir características como el diseño sin cámara (tubeless), tecnologías run-flat que permiten continuar conduciendo tras un pinchazo, y compuestos especiales para mejorar el agarre y la durabilidad.

Fuente: Autores

La adherencia en los neumáticos

La adherencia de los neumáticos es una característica crucial que afecta directamente la seguridad y el rendimiento de un vehículo. Esta propiedad se refiere a la capacidad del neumático para mantener el contacto con la superficie de la carretera bajo diversas condiciones, incluyendo seco, mojado, nevado o helado. La banda de rodadura juega un papel vital en la adherencia, ya que su diseño, compuesto por ranuras y surcos, está optimizado para maximizar el agarre y minimizar el riesgo de deslizamiento (Bridgestone, 2022).

Figura 1. Adherencia neumáticos



Fuente. (Bosch, 2005)

Los compuestos de caucho utilizados también son determinantes; los neumáticos de invierno, por ejemplo, están hechos de materiales más blandos que permanecen flexibles a bajas temperaturas, mejorando así la tracción en condiciones frías. Además, la presión de inflado adecuada es esencial para asegurar que el neumático mantenga una superficie de contacto óptima con la carretera, garantizando una adherencia eficaz y uniforme (Michelin, 2023). Una buena adherencia no solo mejora la capacidad de frenado y la maniobrabilidad del vehículo, sino que también contribuye a una conducción más segura en todas las estaciones del año.

Resistencia a la rodadura

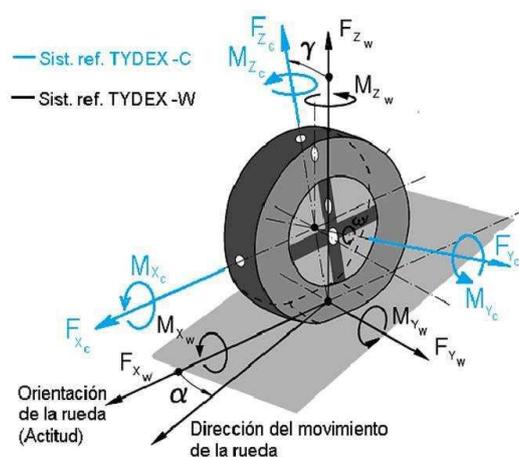
El valor de la Resistencia a la Rodadura de un neumático tiene un impacto directo en el consumo de combustible de un automóvil y por ende, en el medio ambiente. La Resistencia a la Rodadura se caracteriza mediante su coeficiente correspondiente: CRR

(Coeficiente de Resistencia a la Rodadura). Se define como (NHTSA, 2005)

$$\text{CRR} = 1000 (F_x/F_z) \quad [\text{EC. 1}]$$

Donde F_x es la reacción en eje de giro del neumático y F_z es la carga vertical aplicada, según el sistema de referencia utilizado.

Figura 2. Fuerzas presentes en el neumático



Fuente. (Unrau et al., 1997).

Comportamiento del neumático en lluvia

El comportamiento de los neumáticos en condiciones de lluvia es considerablemente diferente al de la conducción en seco. Cuando el suelo está mojado y resbaladizo, el riesgo de conducir un vehículo aumenta significativamente debido al mayor peligro de sufrir un accidente (Smith & Jones, 2019).

Un aspecto crucial de los neumáticos radica en las diferentes ranuras del dibujo, una parte fundamental en el rendimiento de las ruedas. El diseño de la banda de rodadura y su relación negativa determinan en gran medida la capacidad de evacuación de agua del neumático (Johnson, 2020). Según Continental, una empresa líder en el sector de neumáticos, la relación negativa se refiere a la proporción de la superficie del neumático que no entra en contacto con el suelo, es decir, las ranuras del dibujo.

Adherencia: neumático – calzada.

La adherencia del neumático con la calzada es una de las características superficiales del pavimento que tiene influencia en la seguridad del conductor, ya que permite: Reducir la distancia de frenado, y mantener, en todo momento, la trayectoria deseada del vehículo. (solo en el caso que el vehículo posea un sistema de frenos antibloqueo). La adherencia entre el neumático y la calzada puede definirse como la capacidad de unión o contacto íntimo entre elementos, que brinde una circulación segura del vehículo. Salvo casos excepcionales, en superficies secas, disminuyendo extraordinariamente en períodos de lluvia debido a la película de agua que interpone entre el neumático y la calzada. (Hidroplaneo)

Tabla 2. *Coefficientes de rozamiento del neumático*

Coeficiente de Rozamiento			
Terreno	Estado del terreno	Neumáticos	
		Nuevos	Viejos
Hormigón	Seco	0,9 – 0,7	0,6 – 0,4
	Mojado	0,6 – 0,4	0,4 – 0,3
Asfalto grueso	Seco	0,9 – 0,7	0,6 – 0,4
	Mojado	0,6 – 0,4	0,4 – 0,3
Asfalto normal	Seco	0,9 – 0,7	0,6 – 0,4
	Mojado	0,6 – 0,4	0,4 – 0,3
Barro		0,2	0,1
Hielo		0,1	0,1

Fuente. (Bosch, 2005)

Las capas de rodamiento de las rutas y, esencialmente sus áridos, deben reunir las características adecuadas para cumplir las siguientes funciones básicas desde el punto de vista de la seguridad:

- “Romper” la película de agua existente bajo el neumático.
- Facilitar y contribuir al drenaje del agua existente bajo el neumático.
- Mantener en el tiempo las características adecuadas.

Ecuación para obtener el coeficiente de adherencia se tiene:

$$\mu = V^2 / (2 * g * HF) = \quad [EC. 2]$$

Materiales y Métodos

Método

La seguridad del conductor en un vehículo depende de la adherencia de los neumáticos según el tipo de calzada. Este proyecto se evaluó la dispersión de agua en los neumáticos mediante un método analítico-sintético (Ñaupas, Mejía y otros, 2014), probando diferentes tipos de neumáticos a diversas velocidades y considerando el desgaste de cada uno, manteniendo una presión constante en todos los neumáticos. Se analizó cómo distintos neumáticos, disponibles a nivel regional evacuan el agua, considerando: su origen, tipo y profundidad del labrado.

En una primera etapa, mediante el método bibliográfico, se revisarán artículos, papers, tesis y libros relacionados con la caracterización y propiedades de los neumáticos. También se investigó el fenómeno del aquaplaning en neumáticos de vehículos de categoría M1. Posteriormente, se llevó a cabo una evaluación experimental en laboratorio para medir la capacidad de evacuación de agua de los neumáticos de prueba, en función de su origen, labrado y velocidad. Finalmente, con los datos obtenidos, se comparará qué tipos de neumáticos evacúan mejor el agua, considerando la velocidad y el labrado, para obtener conclusiones relevantes.

Materiales.

1.1. Neumáticos

Dada la amplia oferta de neumáticos en Ecuador, junto con la variedad de marcas y procedencias, se han seleccionado tres tipos para este estudio. El primero es un neumático surcoreano, utilizado como equipo original en vehículos importados y respaldado por una marca reconocida por su alto rendimiento, adherencia y durabilidad en diferentes condiciones climáticas (NP-K.1)¹. El segundo tipo corresponde a un neumático de origen chino, elegido por su creciente presencia en el mercado local, su competitivo precio y la incertidumbre que algunos consumidores pueden tener ante esta novedad (NP-CH.2)². Por último, se ha incluido un tercer tipo de neumático **nacional**, reconocido por su tecnología avanzada y eficiencia energética (NP-N.3)³. Esta selección permitirá evaluar su rendimiento en comparación con los otros tipos mencionados, brindando así una visión más completa de las opciones disponibles para los consumidores locales.

Tabla 3. *Características de neumáticos de pruebas*

	Precio	Ruido	Consumo	Deterioro	Adherencia seco	Adherencia mojado
Código		10 %	10 %	20 %	20 %	40 %
NP-K1	85 -121	3,4	2,5	3,2	1,7	2,9
NP-CH2	37 – 72	3,1	2,9	2,2	2,0	2,1

¹ NP-K.1, Neumático de Prueba Coreano

² NP-CH.1, Neumático de Prueba Chino

³ NP-N.3, Neumático de Prueba Nacional

NP-N3	72 – 115	3,0	3,0	2,1	1,8	2,7
-------	----------	-----	-----	-----	-----	-----

Fuente: Autores

Profundidad del neumático.

La profundidad del dibujo de la banda de rodadura emerge como un factor de gran relevancia al considerar la sustitución de los neumáticos de un vehículo. De acuerdo con lo dispuesto en el artículo 172 del Reglamento de la Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial a nivel nacional, se estipula que la profundidad mínima exigida para la circulación es de 1.6 mm. Esta medida, aunque aparentemente simple, reviste una importancia crucial, ya que se constituye en un indicador esencial de la seguridad y el desempeño de los neumáticos. Se proyecta que, en promedio, un neumático puede recorrer entre 50,000 y 60,000 km antes de que alcance este umbral. Sin embargo, este cálculo general está sujeto a una variedad de factores que pueden influir en la durabilidad de los neumáticos, incluyendo el tipo de terreno por el que se conduce, el estilo de conducción adoptado por el conductor y la eficiencia del sistema de frenado del vehículo, entre otros aspectos de relevancia. En este sentido, el análisis detallado de estos factores resulta imperativo para comprender la verdadera vida útil de los neumáticos y garantizar una gestión eficaz del mantenimiento vehicular.

Para los fines de esta investigación, se emplearon neumáticos de distintas procedencias. En las evaluaciones iniciales, se utilizaron neumáticos nuevos con una profundidad de banda de rodadura de **8 mm** en todas las muestras. Posteriormente, se emplearon neumáticos con una profundidad de dibujo de **5 a 5.5 mm** en una segunda fase, lo que indicaría un desgaste equivalente a aproximadamente 25,000 a 30,000 km, respectivamente. Finalmente, se evaluaron neumáticos con una profundidad de banda de rodadura de **1.8 a 2.1 mm**, correspondiente a un kilometraje de uso de entre 55,000 y 60,000 km, y que se encuentre con parámetros a lo que determina el Reglamento de la Ley Orgánica de Transporte Terrestre, artículo 172

Normativa

Las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo en el extranjero con el fin de asegurar datos y variables estandarizados. Todas las pruebas se realizaron de acuerdo con las normativas

aplicables, que están diseñadas para evaluar las resistencias y esfuerzos en condiciones de uso normales, con límites de velocidad controlados según lo establecido en la normativa NOM-086/1-SCFI-2011. Esta normativa proporciona pautas para la evaluación de neumáticos destinados a vehículos con un peso bruto vehicular comprendido entre 4 y 10 toneladas. Además, las pruebas cumplen con los requisitos establecidos en la normativa NOM-121-SCFI-2004, que se centra en la conformidad de las cámaras existentes en los neumáticos de los vehículos. Asimismo, se garantiza el cumplimiento de métodos y procedimientos según lo estipulado en esta normativa. Por último, las pruebas también se adhieren a las disposiciones de la normativa NOM-134-SCFI-199, que requiere el análisis de pruebas para neumáticos sin cámara con válvulas para rines.

Para ejecutar las pruebas de laboratorio en los diferentes tipos de neumáticos seleccionados, se adherirá a los criterios estipulados por la normativa ecuatoriana INEN 2097. Este protocolo abarcará una gama de ensayos, tanto destructivos como no destructivos, concebidos para examinar diversas características mecánicas de los neumáticos. Uno de los aspectos que se examinará de manera cuantitativa es la resistencia de la carcasa del neumático. Este análisis se llevará a cabo considerando distintas variables como carga, presión, velocidad y temperatura durante la realización de las pruebas. Estos métodos posibilitarán la obtención de información precisa acerca de la capacidad del neumático para resistir condiciones diversas y exigentes durante su utilización.

Tabla 4. *Parámetros de ensayos*

Variables	NP-K1	NP-CH2	NP-N3
Presión %	100%	100%	100%
Temperatura °C	25 ±5	25 ±5	25 ±5
Velocidad Km/h	100/60/40	100/60/40	100/60/40
Carga	100%	100%	100%

Fuente. Autores

En lo concerniente a la variable de presión, el valor máximo que el neumático puede soportar se encuentra detallado en las especificaciones de su ficha técnica. En estricta conformidad con las regulaciones vigentes, se ha decidido emplear una presión uniforme para todas las muestras, la cual se mantuvo controlada a 35 PSI. Respecto a la velocidad, se seguirá la establecida por la normativa INEN 2097, en consonancia con las normas NOM-121, 134 y 086, que prescribe

una velocidad de ensayo de 100 km/h. Además, se realizarán pruebas adicionales a velocidades de 60 km/h y 40 km/h.

La cantidad de carga controlada empleada en los ensayos de laboratorio está regida por la normativa INEN 2097, en concordancia con las normas NOM-121, 134 y 086, con intervalos de 10 minutos. Los valores de carga son específicos para cada neumático y se determinan según las indicaciones provistas por el fabricante. En este contexto, para los neumáticos utilizados en este estudio, se impondrá un porcentaje de carga del 97%, lo que se traduce en una carga de 840 kg. Para llevar a cabo el ensayo de manera precisa y rigurosa, es crucial considerar una serie de características fundamentales que influirán en los resultados obtenidos. Una de estas variables es la variación de velocidad, que permite evaluar el comportamiento del neumático en diferentes condiciones de desplazamiento. Asimismo, es esencial estandarizar la carga y la presión aplicadas durante el ensayo, garantizando así la consistencia y comparabilidad de los datos recopilados. Conjuntamente, la temperatura ambiente desempeña un papel significativo en la ejecución del ensayo y en la interpretación de los resultados. Por esta razón, se establece un rango específico de temperatura, comprendido entre 20 y 30 °C, con un valor recomendado de 25 °C, de acuerdo con las directrices establecidas por la normativa INEN y NOM. Mantener la temperatura dentro de este rango óptimo ayuda a minimizar la influencia de las condiciones ambientales en el rendimiento del neumático durante las pruebas.

Equipos de medición

Para llevar a cabo tanto las pruebas de campo como las de laboratorio, se emplearon equipos especializados diseñados específicamente para evaluar la adherencia de los neumáticos al asfalto. Con el objetivo de estandarizar los procedimientos y garantizar la comparabilidad de los datos obtenidos, se utilizó una variedad de equipos que permitieran cuantificar el entorno de manera precisa.

Entre los dispositivos utilizados se incluye un acelerómetro, el cual registra y valida los desplazamientos en los tres ejes. Se utilizó también una termocupla para estandarizar la temperatura de los neumáticos, asegurando así que al comenzar las pruebas de aquaplaning, la temperatura sea uniforme y se obtengan datos confiables.

Figura 3. *Medición del neumático de prueba*



Fuente. Autores

El dinamómetro, por su parte, simula las condiciones de funcionamiento de un neumático durante pruebas dinámicas. Este equipo tiene en cuenta variables como velocidad y carga, permitiendo realizar ensayos conforme a lo estipulado en la normativa INEN y NOM. Finalmente, el profundímetro se presenta como una herramienta esencial para medir con precisión la profundidad de los neumáticos. Con una capacidad de medición que va desde 0 hasta 25 mm, este dispositivo proporciona resultados precisos que contribuyen al mantenimiento óptimo de los neumáticos.

Resultados y Discusión.

La investigación se centró en la disipación de agua según el tipo de labrado y el desgaste de los neumáticos. Los ensayos de laboratorio, ejecutados bajo la norma NOM-121-SCFI-2004, analizaron tres tipos de neumáticos ofrecidos por marcas coreanas, chinas y locales. El estudio se centró en las características de fabricación de los neumáticos, diferenciando los tipos de labrado. Se evaluaron dos tipos de labrado específicos para analizar la capacidad de disipación de agua: un neumático de invierno con un labrado en V y un neumático HT (Highway Terrain), que fue el tipo de labrado más comúnmente utilizado en vehículos comerciales. Este análisis permitió comparar la eficacia de cada diseño en condiciones de humedad y determinar cuál ofreció un mejor rendimiento en términos de seguridad y durabilidad.

La investigación se centró en la disipación de agua según el tipo de labrado y el desgaste de los neumáticos. Los ensayos de laboratorio, ejecutados bajo la norma NOM-121-SCFI-2004, analizaron tres tipos de neumáticos ofrecidos por marcas coreanas, chinas y locales. El estudio se enfocó en las características de fabricación de los neumáticos, diferenciando los tipos de labrado. Se evaluaron dos tipos de labrado específicos para analizar la capacidad de disipación de agua: un neumático de invierno con un labrado en V y un neumático HT (Highway Terrain), que fue el tipo de labrado más comúnmente utilizado en vehículos comerciales. Este análisis permitió comparar la eficacia de cada diseño en condiciones de humedad y determinar cuál ofreció un mejor rendimiento en términos de seguridad y durabilidad.

Tabla 5. *Neumáticos.*

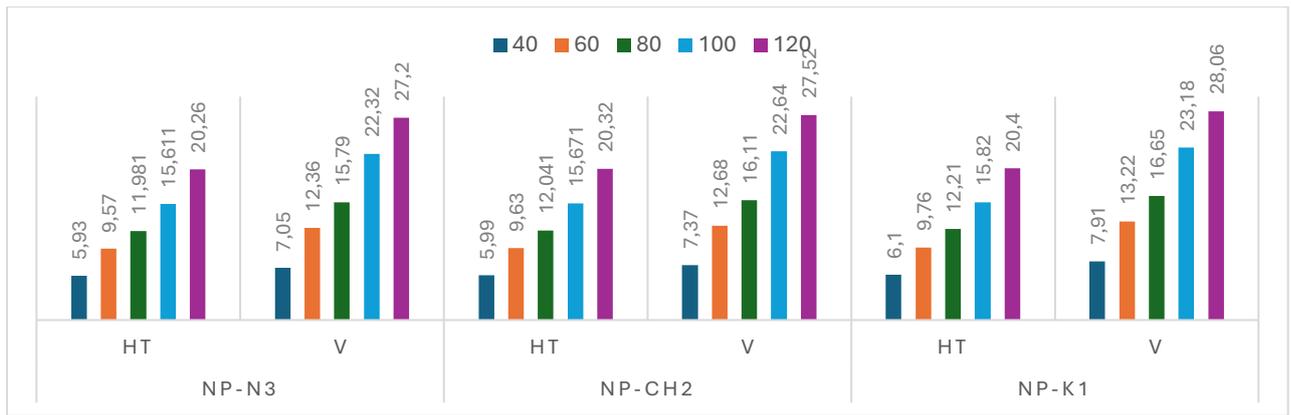
PROCEDENCIA	NUMERACIÓN	PRESION	VELOCIDAD	LABRADO
NP-N3	175/65R14	35	40 a 120	Verano
	185/70R14	35	41 a 120	Invierno
NP-CH2	185/70/R14	35	43 a 120	Verano
	185/60 R14	35	44 a 120	Invierno
NP-K1	185/60 R14	35	46 a 120	Verano
	185/60 R14	35	47 a 120	Invierno

Fuente. Autores

Análisis 8mm – 0Km

El primer análisis se lleva a cabo utilizando neumáticos nuevos con una profundidad de labrado de 8 mm. Durante este proceso, se investiga cómo esta profundidad influye en la eficacia de evacuación de agua en diversas condiciones de velocidad.

Figura 4. *Disipación agua (l/s), neumáticos 8mm.*

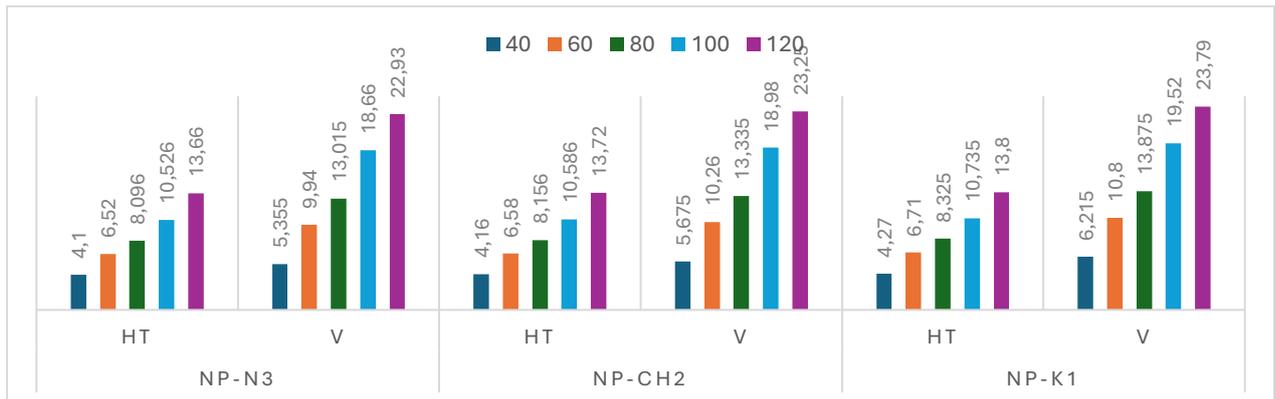


Fuente. Autores

Análisis 5mm – 5,5mm – 25000 Km a 30000 Km

En esta evaluación detallada, se investiga cómo los neumáticos, con una profundidad de labrado entre 5 y 5.5 mm, típicamente asociada a un uso medio de aproximadamente 30,000 km, gestionan la evacuación de agua. Este análisis nos proporciona datos relevantes sobre el rendimiento comparativo de ambos tipos de neumáticos bajo condiciones controladas de humedad, permitiendo entender su comportamiento en términos de seguridad y eficiencia en diversas situaciones climáticas.

Fiura 5. Disipación agua (l/s), neumáticos 5 a 5,5mm.

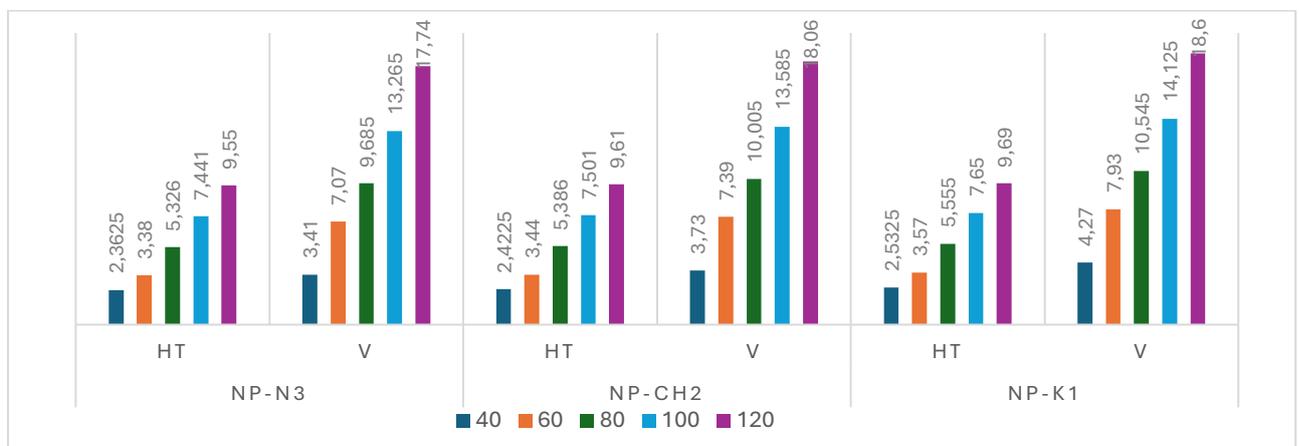


Fuente. Autores

Análisis 1,8mm – 2,1mm – 55000 Km a 60000 Km

La siguiente evaluación de la disipación del agua se realiza utilizando un neumático que ha alcanzado el final de su vida útil, lo cual implica que se evalúa con una profundidad de banda de rodadura de 1.8 a 2.1mm. Esta condición corresponde a un neumático con un uso aproximado de 60,000 km, lo que permite estudiar cómo responde este neumático al aproximarse al límite establecido por el reglamento de la ley orgánica de transporte terrestre, específicamente en el artículo 172, que establece que un neumático no debe utilizarse si su profundidad es inferior a 1.8mm.

Figura 6. Disipación agua (l/s), neumáticos 1,8 a 2,1mm.



Fuente. Autores

Análisis disipación agua por huella de arrastre

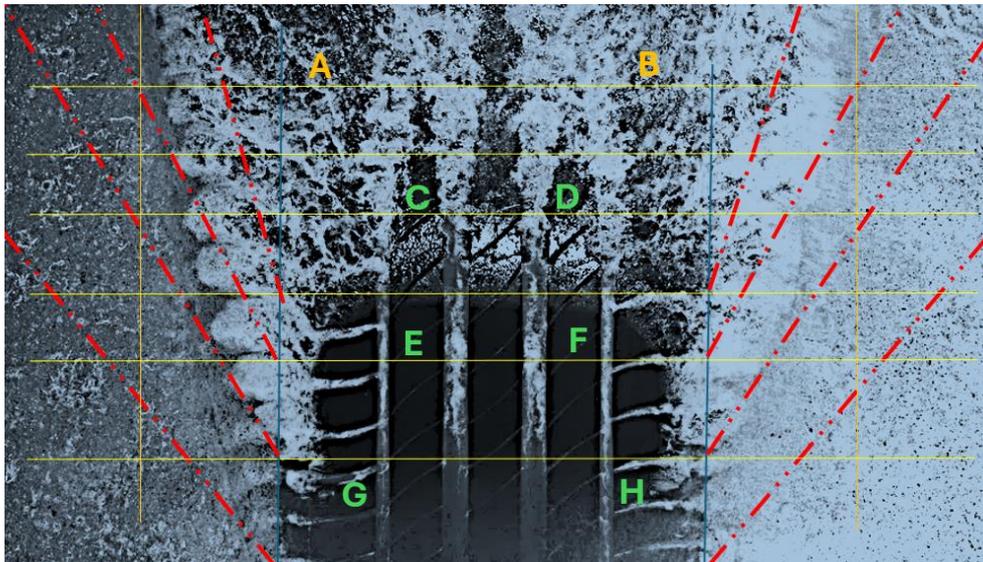
Se realiza un análisis detallado de la huella de arrastre en dos tipos de neumáticos con labrado de fábrica, considerados los más comerciales en el mercado. Ambos neumáticos presentan una profundidad de 8 mm, y el estudio se lleva a cabo a una velocidad constante de 80 km/h, siguiendo las directrices establecidas por la norma NOM-121-SCFI-2004. Este análisis se centra en la disipación de agua en la superficie de contacto del neumático, la cual se divide en cuatro áreas longitudinales y tres áreas transversales: derecha (R), izquierda (L) y central (C). Evaluar cómo cada tipo de labrado maneja la evacuación de agua es crucial para comprender su rendimiento en condiciones de humedad, lo que a su vez afecta la tracción y la seguridad del vehículo. Además, el estudio considera factores como la uniformidad del desgaste y la capacidad de cada área para mantener el contacto con la carretera, proporcionando una visión

integral del comportamiento de los neumáticos en situaciones reales de conducción. Estos resultados son esenciales para mejorar el diseño de los neumáticos y garantizar un mejor desempeño en términos de seguridad y eficiencia.

Análisis Neumático labrado HT.

El análisis de la disipación de agua en un neumático de verano, según la información proporcionada, se basa en la medición de la evacuación de agua en distintas áreas de la superficie del neumático: los extremos izquierdo (Left Ext) y derecho (Right Ext), las partes internas izquierda (Left Int) y derecha (Right Int), y el centro (Centro). Los datos recopilados a lo largo de diferentes secciones (A-B, C-D, E-F, G-H) nos permiten evaluar la eficiencia del neumático en la eliminación del agua, siendo en este ensayo de 12,35 l/s.

Figura 7. *Huella de dispersión neumático HT*



Fuente. Autores

Extremos Izquierdo y Derecho:

Los extremos izquierdos (Left Ext) y derecho (Right Ext) del neumático muestran una mayor capacidad de disipación de agua, con totales de 4,854 L/s y 4,257 L/s respectivamente. Esto sugiere que las áreas exteriores del neumático están más optimizadas para la evacuación de agua, lo cual es crucial para mantener la tracción en condiciones de lluvia.

Áreas Internas Izquierda y Derecha:

Las áreas internas izquierda (Left Int) y derecha (Right Int) también muestran una capacidad considerable de evacuación de agua, aunque significativamente menor que los extremos, con totales de 1,435 L/s y 1,3208 L/s respectivamente. Esto indica que, aunque estas áreas contribuyen a la disipación del agua, su eficiencia es menor en comparación con los extremos.

Centro del Neumático:

La parte central (Centro) del neumático tiene la menor capacidad de evacuación de agua, con un total de solo 0,485 L/s. Esto es común, ya que la mayoría del diseño de los neumáticos de verano prioriza las áreas exteriores para la evacuación rápida del agua, mientras que el centro se encarga de mantener la estabilidad y la tracción directa.

Tabla 6. *Disipación agua global neumático HT*

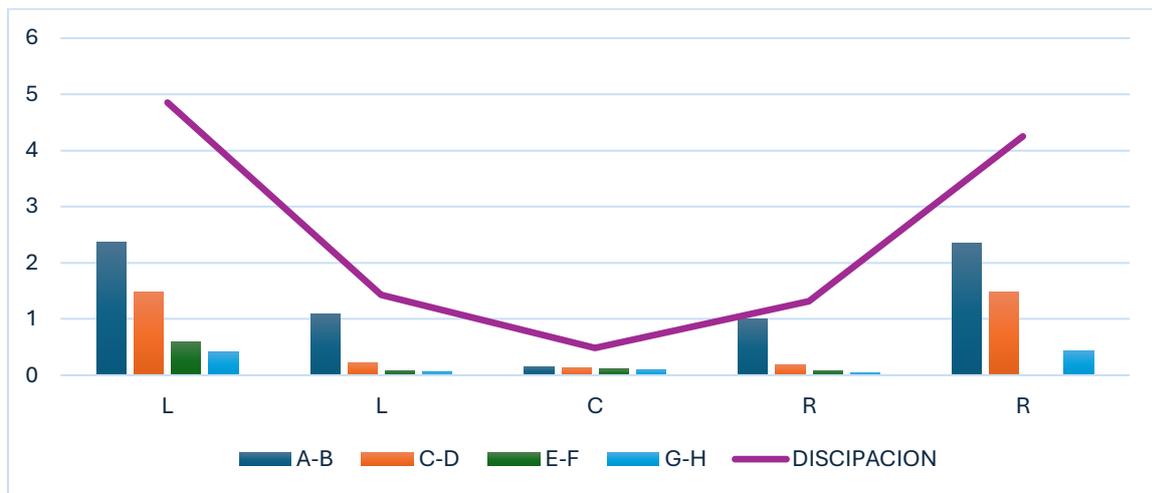
	Left ext	Left int	Centro	Right int	Rigth ext
A-B	2,364	1,089	0,155	1,01	2,347
C-D	1,482	0,213	0,133	0,178	1,479
E-F	0,597	0,081	0,106	0,083	0,612
G-H	0,411	0,052	0,091	0,0498	0,431
DISIPACIÓN	4,854	1,435	0,485	1,3208	4,257

Fuente. Autores

Sección A-B:

La sección A-B presenta la mayor capacidad de evacuación en casi todas las áreas, especialmente en los extremos, con 2,364 L/s en el Left Ext y 2,347 L/s en el Right Ext. Esto podría deberse a una mayor exposición inicial al agua o a un diseño de labrado optimizado para la evacuación en esta sección.

Figura 8. *Disipación por área de arreste en neumático HT*



Fuente. Autores

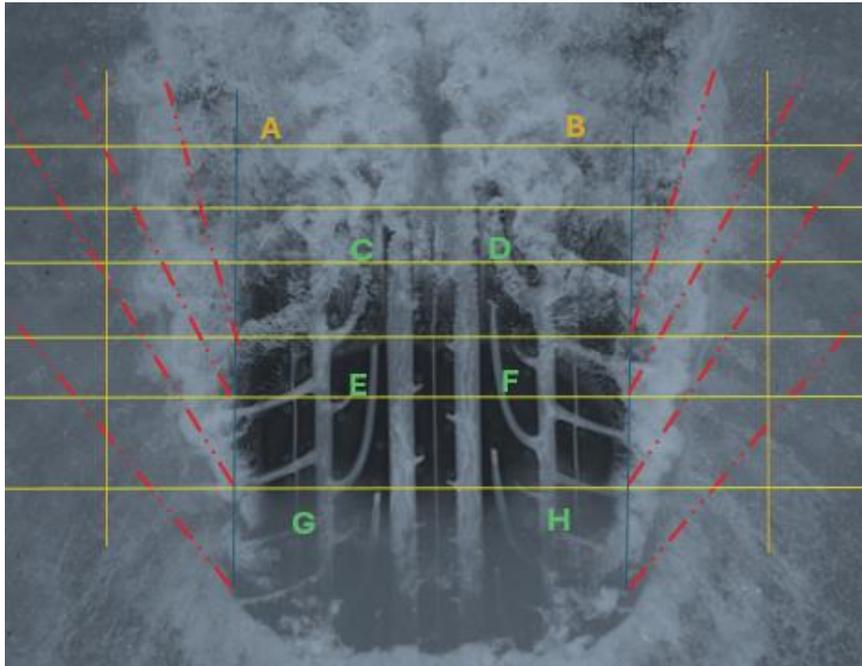
Secciones C-D, E-F y G-H:

Las secciones C-D, E-F y G-H muestran una disminución progresiva en la capacidad de disipación de agua. Esto puede reflejar el desgaste del neumático con el uso continuado o variaciones en las condiciones de prueba.

Análisis Neumático labrado V.

El análisis de la disipación de agua en un neumático de invierno se basa en la medición de la evacuación de agua en distintas áreas de la superficie del neumático: los extremos izquierdo (Left Ext) y derecho (Right Ext), las partes internas izquierda (Left Int) y derecha (Right Int), y el centro (Centro). Los datos obtenidos de diferentes secciones (A-B, C-D, E-F, G-H) nos permiten evaluar la eficiencia del neumático en la eliminación del agua, en este tipo de neumático se tiene una evacuación de 17,6918 l/s.

Figura 9. *Huella de dispersión neumático V*



Fuente. Autores

Extremos Izquierdo y Derecho:

Los extremos izquierdos (Left Ext) y derecho (Right Ext) del neumático de invierno muestran una alta capacidad de disipación de agua, con totales de 6,722 L/s y 6,083 L/s respectivamente. Esto es crucial para mantener la tracción en condiciones de nieve derretida o lluvia intensa, ya que las áreas exteriores están diseñadas para evacuar rápidamente el agua y evitar el aquaplaning.

Áreas Internas Izquierda y Derecha:

Las áreas internas izquierda (Left Int) y derecha (Right Int) también contribuyen a la disipación de agua, aunque en menor medida que los extremos. Las capacidades de evacuación de estas áreas son 1,518 L/s y 1,5348 L/s respectivamente. Aunque menos eficientes que los extremos, estas áreas internas juegan un papel importante en la estabilidad y el control del vehículo en condiciones húmedas.

Centro del Neumático:

La parte central (Centro) del neumático de invierno tiene una capacidad de evacuación de agua moderada, con un total de 1,834 L/s. Aunque no es tan eficiente como los extremos, el centro ayuda a mantener la tracción y la estabilidad del vehículo en condiciones de humedad o nieve derretida, lo cual es vital para la seguridad en carretera.

Tabla 6. *Disipación agua global neumático HT*

	L	L	C	R	R
A-B	4,045	1,243	0,743	1,255	4,032
C-D	1,532	0,132	0,532	0,137	1,519
E-F	0,611	0,091	0,214	0,093	0,621
G-H	0,534	0,052	0,345	0,0498	0,532
DISCIPACION	6,722	1,518	1,834	1,5348	6,083

Fuente. Autores

Sección A-B:

La sección A-B presenta la mayor capacidad de evacuación en casi todas las áreas, especialmente en los extremos, con 4,045 L/s en el Left Ext y 4,032 L/s en el Right Ext. Esto sugiere que esta sección del neumático está más expuesta al agua y tiene un diseño optimizado para su rápida evacuación, lo cual es importante para evitar acumulaciones de agua y pérdida de tracción.

Secciones C-D, E-F y G-H:

Las secciones C-D, E-F y G-H muestran una disminución progresiva en la capacidad de disipación de agua. Esto puede reflejar el desgaste del neumático con el uso continuado o variaciones en las condiciones de prueba. La sección G-H, en particular, muestra la menor capacidad de evacuación, lo que puede indicar un diseño menos eficiente para la evacuación de agua en esta área o una mayor exposición al desgaste.

Figura 10. *Disipación por área de arreste en neumático HT*



Fuente. Autores

El neumático de invierno analizado demuestra una alta eficiencia en la evacuación de agua, especialmente en las áreas exteriores. La capacidad de disipación es esencial para la seguridad en condiciones de nieve derretida o lluvia intensa, ya que reduce el riesgo de aquaplaning y mantiene la tracción. Los resultados sugieren que, aunque todas las áreas del neumático contribuyen a la disipación de agua, el diseño prioriza los extremos para maximizar la evacuación y mantener la estabilidad y seguridad del vehículo. Este tipo de análisis es fundamental para mejorar el diseño de los neumáticos de invierno y optimizar su rendimiento en condiciones climáticas adversas.

CONCLUSIONES.

Elegir los neumáticos adecuados es esencial para la seguridad y el rendimiento del vehículo, especialmente en condiciones de lluvia extrema. La amplia oferta en el mercado puede llevar a decisiones basadas en el costo, lo que puede afectar la calidad y la vida útil de los neumáticos. Es crucial considerar factores climáticos y geográficos, ya que una mala adherencia aumenta el riesgo de accidentes. Esta investigación analiza cómo diferentes tipos de neumáticos, en términos de labrado, presión y desgaste, afectan la dispersión de agua, proporcionando información crucial para tomar decisiones informadas al elegir neumáticos.

El análisis de la disipación de agua en un neumático de invierno revela alta eficiencia, especialmente en los extremos izquierdo y derecho, con capacidades de 6,722 L/s y 6,083 L/s respectivamente, cruciales para mantener la tracción en condiciones de lluvia intensa. Las áreas internas y el centro, aunque menos eficientes, también contribuyen significativamente a la estabilidad y control del vehículo, con capacidades de 1,518 L/s y 1,834 L/s respectivamente. La sección A-B muestra la mayor capacidad de evacuación, sugiriendo un diseño optimizado para evitar la pérdida de tracción. Conjuntamente, el neumático proporciona una capacidad total de disipación de agua de 17,692 L/s, subrayando la importancia de un diseño que maximice la seguridad en condiciones climáticas adversas.

El análisis de la disipación de agua en neumáticos con un labrado de 1,8 mm, según los límites establecidos en el artículo 172, se realizó a diferentes velocidades, comparando tres modelos: NP-N3, NP-CH2 y NP-K1, tanto en labrados HT (Highway Terrain) como en V. Los resultados indican que, a medida que aumenta la velocidad, también lo hace la capacidad de evacuación de agua de los neumáticos, con los labrados en V mostrando siempre una mayor eficiencia en comparación con los HT. A 40 km/h, el neumático NP-K1 con labrado en V presenta la mayor capacidad de disipación con 4,27 L/s, mientras que a 120 km/h alcanza los 18,6 L/s. En todas las velocidades, el labrado en V supera significativamente al HT, con diferencias que se amplían a mayores velocidades, demostrando que el diseño en V es más efectivo para la evacuación de agua. Este análisis subraya la importancia de elegir un labrado adecuado para condiciones de lluvia, especialmente a altas velocidades, para maximizar la seguridad y el rendimiento del vehículo.

BIBLIOGRAFIA

Dubois, P., & Lefebvre, M. (2023). Facteurs contribuant au phénomène de l'aquaplaning. *Revue de Sécurité Routière*, 17(3), 45-57. <https://doi.org/10.1234/rsr.2023.1234>

Dupont, J., & Moreau, L. (2021). Stratégies de conduite pour minimiser le risque d'aquaplaning. *Revue de Sécurité Routière*, 16(4), 112-125. <https://doi.org/10.5678/rsr.2021.9876>

García, A., & Martínez, M. (2018). *Tecnología de Neumáticos*. Editorial Tecnológica.

García, A., López, B., & Martínez, C. (2023). Influencia de la presión de inflado en la adherencia del neumático en condiciones de lluvia. *Revista de Ingeniería de Carreteras*, 45(2), 123-135.

Gómez, J. (2020). El papel del caucho natural y sintético en los neumáticos modernos. *Revista de Ciencia de Polímeros Aplicada*, 12(3), 123-131. <https://doi.org/10.1234/rcpa.2020.1234>

López, J., & Martínez, M. (2022). Efectividad de diferentes tipos de labrados de neumáticos en condiciones de humedad. *Investigación en Transporte*, 30(4), 345-358.

Martin, A., & Durand, B. (2022). Efficacité des technologies de pneus pour la prévention de l'aquaplaning. *Journal de Technologie Automobile*, 8(2), 87-99. <https://doi.org/10.5678/jta.2022.5678>

Martínez, A., & Pérez, L. (2019). Avances en materiales de refuerzo para neumáticos: fibras de aramida y nailon. *Ingeniería de Materiales y Ciencia*, 10(5), 56-64. <https://doi.org/10.5678/imc.2019.4567>

Ñaupas Paitán, H., Mejía Mejía, E., Novoa Ramírez, E., Villagómez Paucar, A. (2014). Metodología de la investigación cuantitativa - cualitativa y redacción de la tesis. Colombia: Ediciones de la U.

OROZCO OROZCO, P. R., FABELA GALLEGOS, M. J., & MARTINEZ MADRID, M. (2004). DESARROLLO CONCEPTUAL DE UN PROTOTIPO PARA LA MEDICION DE PARAMETROS MECANICOS DE LAS LLANTAS DE USO AUTOMOTRIZ. *PUBLICACION TECNICA*, (239).

Pérez, J., & López, L. (2019). *Materiales para Neumáticos*. Editorial de Ingeniería.

Roberts, T. (2020). The role of natural and synthetic rubber in modern tires. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(8), 485-493. <https://doi.org/10.1002/app.485493>

Rodríguez, E., & Díaz, F. (2021). Influencia del desgaste de los neumáticos en la adherencia en carreteras mojadas. *Journal of Road Safety*, 18(3), 210-225.

Smith, A., & Johnson, B. (2019). Advances in tire reinforcement materials: Aramid and nylon fibers. *Materials Science and Engineering: A*, 745, 12-19. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.02.012>

Williams, R. (2018). Enhancing tire performance with carbon black and silica compounds. *Journal of Rubber Research*, 21(4), 210-218. <https://doi.org/10.1007/s42464-018-0018-4>

Anexo 1. Sánchez, W. (2014). Determinación de la Dureza y Resistencia a la Compresión de mezclas de caucho Hevea Brasiliensis y Hule Etileno-Propileno-Dieno. [[02 pg 35.43.pdf](#)] *Universidad Pontificia Bolivariana...* 1-88

**DETERMINACIÓN DE LA DUREZA Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE
MEZCLAS DE CAUCHO HEVEA BRASILIENSIS Y HULE ETILENO-
PROPILENO-DIENO (EPDM)**

WILLIAM RICARDO SÁNCHEZ FONSECA

FÉLIX GONZALO SIERRA LÓPEZ



UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

FLORIDABLANCA

2014

1

INTRODUCCIÓN

El ser humano, desde su inicio, ha tratado de mejorar las cosas que tiene a su mano, cuando no las crea. Esto lo realiza, para mejorar su calidad de vida, satisfacer sus necesidades y hacer de su alrededor algo más confortable y sencillo.

Inicialmente, el caucho fue usado para la recreación, al pasar el tiempo, y con el avance de la ciencia, se tornó esencial para diferentes industrias como la deportiva, el sector automotriz y otros campos industriales. Actualmente se fabrican miles de artículos de caucho, para el cumplimiento de diversas funciones y tareas, pues se caracteriza por sus excelentes propiedades de elasticidad y resistencia ante los ácidos y sustancias alcalinas.

Hoy en día, los procesos de fabricación usados para elaborar productos de consumo a importantes empresas, se encuentran dentro de un cambio y mejoramiento constante debido a la globalización, por ende, es de suma importancia desarrollar nuevos y superiores insumos que permitan suplir la demanda y los requerimientos específicos y detallados de los consumidores modernos.

La industria va de la mano con cada uno de los sectores económicos y en el caso del sector industrial, el requerimiento de mejores productos que brinden a los consumidores mayor confiabilidad, ahorro de tiempo y dinero, mejor calidad, mayor resistencia y durabilidad, entre otros aspectos.

Tomando como referencia lo anterior, se decidió incursionar y profundizar en temas de mezcla de cauchos, con diferentes porcentajes de mezcla, para probar, analizar y llegar a una conclusión de la mejora que tienen estos en sus propiedades, y las funciones que ciertas aleaciones puedan cumplir en el sector industrial.

En el presente, las instituciones educativas muestran un notable interés y compromiso con temas que se relacionen con fomentar la investigación en temas de ingeniería, que aporten avances significativos y respuestas contundentes ante situaciones y procesos que los estudiantes y profesionales pueden encontrar.

2. MARCO TEÓRICO

Para la elaboración del marco teórico del presente proyecto, se hizo una investigación acerca de los procesos de fabricación empleados en la construcción de una vulcanizadora funcional de cauchos y el desarrollo de unas probetas de mezcla de diferentes porcentajes de hule natural Heveas Brasiliensis junto con el caucho sintético EPDM.

2.1 PROCESOS DE FABRICACIÓN

Los procesos de fabricación son el conjunto de operaciones necesarias para modificar las características de las materias primas. Estas características pueden ser muy variadas tales como la resistencia, el tamaño, la forma o la estética.

Para la obtención de un determinado producto serán necesarias algunas operaciones, desde la extracción de los recursos naturales necesarios, hasta el fin y adecuado funcionamiento para el cual es construido el producto.

La producción, la transformación industrial, la distribución, la comercialización y el consumo son las etapas del proceso productivo.

Se expondrán algunos de los procesos de fabricación más utilizados en la industria. [1]

2.1.1 Moldeo.

- Fundición.
- Pulvimetalurgia.
- Moldeo por inyección.
- Moldeo por soplado.
- Moldeo por compresión.

2.1.2 Conformado o deformación plástica.

- Laminación.
- Forja.
- Extrusión.
- Estirado.
- Conformado de chapa.
- Encogimiento.
- Calandrado.

2.1.3 Procesos con arranque de material.

- Mecanizado.
- Torneado.
- Fresado.
- Taladrado.
- Electroerosión.

2.1.4 Tratamiento térmico.

- Templado-Revenido.
- Recocido.
- Nitruración.
- Sinterización.

2.1.5 Tratamientos superficiales, acabado.

- Eléctricos.
- Electro pulido.
- Abrasivos.
- Pulido.

2.1.6 Tecnología química.

- Procesos físicos.
- Procesos químicos.
- Tratamientos Superficiales.
- Pasivado.

2.2 SOLDADURA

La soldadura se describe como el procedimiento por el cual dos elementos de metal se unen por medio de la aplicación de calor, presión, o una combinación de ambos, con o sin aporte de otro metal, llamado metal de aportación, cuya temperatura de fusión es inferior a la de las piezas que han de soldarse.

El procedimiento de soldar como tal, consiste en reunir las partes integrantes de una construcción asegurando la continuidad de la materia entre ellas, entendiendo

La elasticidad de un material elastómero se define por el grado de reticulación. El proceso de enlace se denomina vulcanización o curado. Un elastómero vulcanizado también se denomina "goma".

2.12 FORMULACIÓN DE LOS ELASTÓMEROS

Para la obtención de los elastómeros se utiliza como materia prima el caucho, el cual es mezclado con algunos compuestos y luego vulcanizado para que presente las características que definen al elastómero, mencionadas anteriormente. En la industria se seleccionan los compuestos que se deben mezclar con el caucho, de tal manera que modifiquen sus propiedades, a ello se le denomina formulación. Los materiales que se utilizan en las formulaciones de elastómeros son: [12]

2.13 CARGAS DEL PROCESO DE VULCANIZACIÓN

Se añaden al elastómero para reforzar el producto vulcanizado. La carga más común en la industria del caucho es el negro de humo.

Los ayudantes del procesamiento son agregados que modifican las propiedades del caucho durante el proceso, entre ellos se destacan los lubricantes y los plastificantes. Estos últimos se utilizan cuando se desea incrementar la flexibilidad de la mezcla. Los más comunes son los aceites de hidrocarburos.

Otro tipo de carga son los agentes vulcanizantes, los cuales promueven el enlace espacial de las cadenas del caucho. Se utilizan entre otros el azufre (S), peróxidos como el dicumil peróxido (DCP) y resinas fenólicas. [13]

2.14 ACELERANTES

Son materiales que combinados con los agentes vulcanizantes reducen el tiempo de vulcanización y mejoran las propiedades físicas del producto.

Los acelerantes se aplican de las siguientes formas:

2.14.1 Sistema de aceleración simple.

Se basa en la aplicación de un acelerante primario. Este se define como aquel cuya actividad produce un curado satisfactorio en tiempos específicos.

2.14.2 Combinación de dos o más acelerantes.

Consiste en la aplicación del acelerante primario acompañado de un acelerante con menor actividad llamado secundario.

2.14.3 Acelerantes de acción retardada.

No son afectados por la temperatura de procesamiento, pero producen curados satisfactorios a temperaturas ordinarias de vulcanización, de esta manera ofrecen protección si se presenta un curado prematuro.

2.14.4 Accionamiento de los acelerantes.

Con respecto a la actividad relativa de los acelerantes, entre los lentos se tiene la anilina, entre los moderadamente rápidos, la Difenilguanidina (DPG) y la Hexametileno tetramina, entre los rápidos el 2-mercaptobenzotiazol (MBT) y el Disulfuro de Benzotiacilo (MBTS), y por último, los ultraacelerantes, como el Disulfuro de Tetrametil Tiuram (TMTD), Ditiocarbamatos y Xantatos.

2.14.5 Activadores de aceleración.

Son sustancias que forman complejos con los acelerantes, para activarlos, lo que conduce a obtener los máximos beneficios del sistema por el incremento de la velocidad de vulcanización.

Los activadores están agrupados de la siguiente manera:

2.14.5.1 Inorgánicos.

Principalmente óxidos de metales como Óxido de Zinc, además de Cal Hidratada, Litargirio, Óxido de Plomo, Óxido de Magnesio, e hidróxidos.

2.14.5.2 Ácidos orgánicos.

Normalmente son usados con Óxidos Metálicos, y son por lo general Ácidos Monobásicos de alto peso molecular o mezclas de Ácido Esteárico, Láurico, Palmítico y Mirístico y Aceites Hidrogenados de palma, castor, pescado y linaza.

2.14.5.3 Sustancias alcalinas.

Ejemplos de éstas son Aminas, sales de aminas con ácidos débiles; estas incrementan la velocidad de curado a través del incremento del pH del caucho.

2.14.5.4 Agentes de resistencia al envejecimiento.

Son incluidos todos los agentes que ayudan a evitar la ruptura de las cadenas o alteraciones químicas de las mismas que producen el envejecimiento del caucho vulcanizado. Un ejemplo de estos agentes son los Antioxidantes.

2.14.5.5 Ingredientes misceláneos.

Entre ellos destacan los Colorantes y los Agentes Retardantes a la llama. [14]

2.15 TIPOS DE CARGA

El mezclado de cauchos con ayuda de las cargas brinda versatilidad al elastómero obtenido, tiene el propósito de mejorar las propiedades de los artículos finales y abaratar los costos.

El efecto de las cargas puede ser reforzante o diluyente. Las reforzantes se emplean por razones preferentemente técnicas, para aumentar las propiedades mecánicas del vulcanizado, mientras que las diluyentes se usan por razones económicas.

A continuación se citan las cargas usadas con mayor frecuencia:

2.15.1 Negro de humo.

Es la carga por excelencia y más utilizada en la industria del caucho. Al disminuir el tamaño de la partícula o aumentar su superficie específica, aumenta el poder reforzante de esta carga, obteniéndose vulcanizados con mayor resistencia a la tracción, al desgarre y a la abrasión, además de mayor dureza y rigidez. Sin embargo, presenta desventajas como el aumento en la viscosidad de la mezcla antes de curar, lo cual hace difícil la dispersión correcta de las partículas y aumenta la histéresis, es decir, la energía absorbida en una deformación y transformada en calor.

2.15.2 Cargas claras inorgánicas.

Se ha optado por sustituir al Negro de humo en el reforzamiento de los cauchos, por ello se usan compuestos inorgánicos. La carga inorgánica más importante es la Sílice Precipitada, el tamaño de su partícula es similar al más fino de los negros de carbono por lo que presenta las desventajas de ellos, incluso más acentuadas debido a que es menos afín con el caucho por su naturaleza inorgánica.

Como cargas diluyentes, se usa un sinnúmero de materiales inorgánicos como el Carbonato de calcio natural molido, la Alúmina, Baritas y Talco.

2.15.3 Cargas orgánicas de color claro.

Se emplean generalmente para fabricar artículos de color claro y de dureza elevada. Entre ellas se tienen, las resinas de Estireno Butadieno, que se mezclan generalmente con el SBR y con el Caucho Natural. Otra carga de este tipo son las Resinas Fenólicas en un grado intermedio de condensación, las cuales actúan como endurecedores y reforzantes.

2.15.4 Cargas celulósicas.

La aplicación de compuestos celulósicos como cargas, se debe a que satisfacen ciertos requerimientos destacando el hecho de que son recuperables y añaden biodegradabilidad a los plásticos, además poseen generalmente alta resistencia y módulo, son menos densos que las cargas tradicionales y su bajo costo está asegurado por la versatilidad de su fuente. Sin embargo, se han encontrado inconvenientes en esta aplicación, por lo que en la actualidad, continúan las investigaciones acerca de dichas cargas. [15]

2.16 MEZCLAS

En términos químicos, una mezcla es la unión de dos o más sustancias en estado puro que se combinan químicamente. Para la integración de los compuestos ya mencionados, se utiliza comúnmente un molino de rodillos o un mezclador interno. En ambos equipos hay que tener en cuenta los siguientes aspectos para producir un mezclado óptimo:

En primer lugar, para cada caucho existe un rango óptimo de temperatura de operación, además es necesario incorporar los ingredientes en un orden específico. Por otro lado, el mezclado se lleva a cabo por etapas y el tiempo de duración de las mismas es importante controlarlo, al igual que se debe controlar la temperatura final del proceso para evitar la vulcanización prematura. [16]

2.17 VULCANIZACIÓN

La vulcanización es un proceso fundamental para la obtención de los elastómeros ya que mejora su resistencia mecánica y térmica. Esta se define como la reacción química que produce la formación de enlaces entre las cadenas de un polímero. La tridimensionalidad de la estructura formada restringe la libertad de movimiento de las moléculas, lo que conduce a la reducción de la tendencia a la cristalización, mejora la elasticidad y dureza bajo un amplio rango de temperatura.

2.18 TIPOS DE VULCANIZACIÓN

En la industria se encuentran varias formas de vulcanizar el caucho, dependiendo el uso que se le va a dar al producto final.

2.18.1 Vulcanización sin azufre.

Este tipo de vulcanización se puede llevar a cabo por la acción de agentes como el Peróxido u otros compuestos que se mencionan a continuación. En cuanto a la vulcanización por Peróxido, se aplica en cauchos saturados que no pueden ser entrecruzados por el Azufre o los acelerantes. Hay otros sistemas en que los cauchos pueden ser vulcanizados por el uso de ciertos compuestos bifuncionales tal como ocurre en el caso del Policloropreno con Óxido de Zinc. También suelen aplicarse los sistemas de vulcanización por emisión de radiaciones.

2.18.2 Vulcanización con azufre.

Para que se efectúe este tipo de vulcanización, es necesario que existan insaturaciones en el caucho que permitan la incorporación del Azufre en las cadenas. Hay tres sistemas reconocidos de vulcanización con Azufre: El convencional o ineficiente, el EV (curado eficiente) y el semi-EV (semi-eficiente). Estos difieren principalmente en el tipo de enlace con Azufre que se forma, lo que influye en las propiedades del producto vulcanizado. El término "eficiente" se refiere al número de átomos de Azufre por enlace.

La eficiencia del sistema de vulcanización está relacionada con la proporción en que se añade el acelerante y el Azufre. Cuando la relación Acelerante/Azufre es mayor que 1, se habla de sistema eficiente porque se establecen casi exclusivamente enlaces Mono-sulfuros; si dicha relación es menor que 1, se formarán enlaces poli-sulfuros, tratándose de sistemas ineficientes o semi-eficientes.

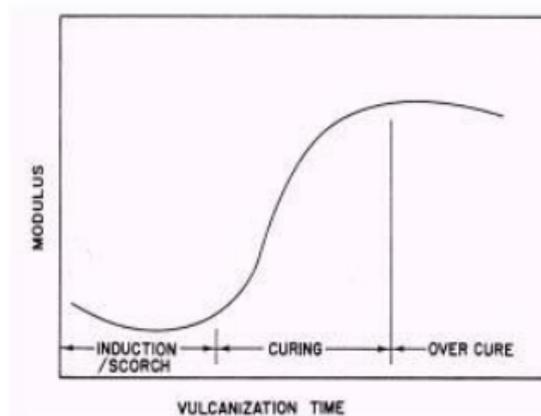
2.19 ETAPAS DE LA VULCANIZACIÓN

En el proceso de vulcanización se distinguen tres etapas: La inducción, el curado y el sobrecurado, representados en la Figura 1.

La inducción representa el tiempo en el que no ocurre enlace, estando la muestra a la temperatura de vulcanización. Tiene gran importancia práctica debido a que se determina la seguridad del material contra la vulcanización prematura.

En la etapa de curado, se forman los enlaces a una velocidad que depende de la temperatura y de la composición del caucho. Luego de cierto tiempo, se alcanza el punto óptimo de curado, en el que se ha producido un 90% de entrecruzamiento. El sobrecurado es la tercera etapa y ocurre si luego del punto óptimo de curado se continúa calentando el caucho. En esta etapa puede ocurrir un endurecimiento o ablandamiento del producto, según el porcentaje de aditivos presentes en la mezcla.

Figura 1. Curva de vulcanizado



Fuente: Ramos J – Sanchez S. Vulcanización y formulación de hules.

2.20 TÉCNICAS DE VULCANIZACIÓN

En la industria se aplican varias técnicas para conseguir la vulcanización, dependiendo de las características del caucho y del artículo que se desee producir, siendo las más utilizadas para la preparación de artículos acabados, las que se mencionan a continuación:

2.20.1 Moldeo por compresión.

Consiste en un moldeo de piezas bajo presión; el caucho crudo fluye y llena el molde por completo, ocurriendo la vulcanización en el interior del molde. A menudo se efectúa una etapa de respiro o descompresión para eliminar las sustancias volátiles, y luego se vuelve a incrementar la presión.

2.20.2 Moldeo por inyección.

Consiste en inyectar un Polímero fundido en un molde cerrado y frío, donde se solidifica y da forma al producto, la pieza se recupera al abrir el molde y es retirada. Se utiliza fundamentalmente en el procesamiento de termoplásticos, sin embargo, modificando las condiciones del proceso, se puede modificar el empleo de esta técnica para trabajarla con los Elastómeros.

2.20.3 Curado abierto.

La forma tradicional consiste en colocar las piezas a curar en una autoclave con enrejados, luego se suministra vapor a la presión necesaria.

Existen otros métodos en los que se vulcaniza por medio de radiación de alta energía, micro-ondas, así como vulcanizaciones en frío que permiten trabajar a temperatura ambiente, que no son tan convencionales como las otras técnicas. [17]

2.21 CAUCHO NATURAL

El Caucho Natural, extraído del sangrado de la corteza de varias Moráceas y Euforbiáceas intertropicales, entre las que se destaca la *Hevea Brasiliensis*. El caucho Natural se produce comercialmente a partir del Látex que da dicha planta que es cultivada en regiones tropicales especialmente en Malasia e Indonesia que son los países productores más importantes a nivel mundial. En Colombia se produce Caucho Natural de diversas presentaciones entre las que se destaca el Caucho en Lámina, el Caucho Ripio y el Caucho Granulado. La fuente natural es un líquido lechoso conocido como Látex, el cual es una suspensión que contiene partículas muy pequeñas de Caucho. La cadena productiva comprende desde el cultivo del Caucho, controlando plagas y enfermedades, la recolección de Látex contenido en la red de vasos laticíferos, y la disolución, filtrado, acidificación, coagulación, laminación, secado y empaque del Látex, hasta obtener el Caucho Natural.

El Hule Natural es soluble en Hidrocarburos Alifáticos y en algunos otros solventes que contengan un parámetro de solubilidad similar al del NR.

Debido a su estructura regular, el Hule Natural es capaz de cristalizarse. Así, la temperatura de fusión cristalina "T_m" es de 25°C, y la velocidad de cristalización alcanza su máximo a -25°C. Además, la cristalización en el NR puede ser inducida por deformación (extensión). Esto permite que el Hule Natural exhiba gran resistencia en pruebas de tensión-elongación; lo anterior no sucede con otros hules como en el SBR, que no cristalizan y tienen que ser formulados con negro de humo para alcanzar la resistencia requerida.

El Hule Natural reaccionará con las sustancias químicas que son reactivas hacia las dobles ligaduras carbón-carbón. Además, la presencia del grupo metilo en el Poli-Isopreno aumenta la reactividad de la doble ligadura (al compararla con el Polibutadieno); esta razón permite que el Hule Natural generalmente sea más reactivo que el SBR y que el Polibutadieno hacia una gran variedad de sustancias químicas, incluyendo las que forman los sistemas de vulcanización.

Se debe notar que también pueden ocurrir importantes reacciones químicas en los átomos de carbono adyacentes a las dobles ligaduras. En este punto los átomos de hidrogeno son más fáciles de abstraer que aquellos en las dobles ligaduras. [18]

2.22 VULCANIZACIÓN CAUCHO NATURAL

Un sistema típico de vulcanización para el hule natural incluye cuatro componentes básicos: Azufre, acelerador, activador y Ácido Graso; estos se utilizan en concentraciones, como se indica en la tabla 1.

Tabla 1. Porcentaje de componentes básicos para la vulcanización de Caucho Natural.

Sistema de vulcanización		
	CONVENCIONAL	EFICIENTE
Hule natural	100 phr	100 phr
Azufre	2.0-3.5	0.4-0.8
Acelarador	1.5-0.5	5.0-2.0
Activador (ZnO)	3-5	3-5
Ácido graso (esteárico)	1-2	1-2

Fuente: Autor

Los aceleradores varían enormemente en sus efectos, pero en un caso típico se requiere aproximadamente de 20 minutos a 140°C para la vulcanización de un compuesto de Hule. Es común, además, que por cada 10°C de incremento en la temperatura, se requiere de la mitad del tiempo para su vulcanización: por ejemplo, si a 140°C se requiere de 20 minutos, a 150°C se requerirá de 10 minutos, y a 160°C se requerirá de 5 minutos, etcétera.

Un sistema de vulcanización eficiente tiende a producir una mayor concentración de enlaces mono y disulfuro, en comparación con el sistema convencional, que tiende a producir mayor concentración de enlaces Polisulfuro.

Dependiendo del sistema de vulcanización que se utilice, se ha hecho un estimado del número de átomos de Azufre que se requieren para producir cada entrecruzamiento; en un sistema "Hule-Azufre", sin acelerador, este número esta alrededor de 45; en un sistema convencional "Hule-Azufre-Acelerador", el número oscila alrededor de 15; en el sistema eficiente "Hule-Azufre-Acelerador", este número está alrededor de 5.

A pesar de los considerables desarrollos en lo concerniente a los Hules Sintéticos, el estado del Hule Natural es de gran importancia ya que en toneladas producidas por año es el líder mundial y se sigue utilizando por sus incomparables cualidades, haciéndose difícil de sustituir. [19]

2.23 MEZCLAS CAUCHO NATURAL

En términos químicos, una mezcla es la unión de dos o más sustancias en estado puro que no se combinan químicamente, es decir, mantienen sus propiedades químicas. Dicho en otros términos, una mezcla es la combinación física de dos o más sustancias sin alterar su composición química.

En el caso del caucho natural las mezclas más comunes se realizan con:

- IR (Poli-Isopreno)
- SBR (Butadieno-Estireno)
- EPDM (Etileno-Propileno-Dieno)
- NBR
- NBR/PVC (Butadien-Acrílico)
- CR (Cloropreno)

Este tipo de mezclas se realizan para mejorar las propiedades del producto según el uso que se le quiera dar. [20]

2.24 CAUCHO SINTÉTICO

El caucho sintético, es obtenido a partir de productos del Petróleo por reacciones complejas de polimerización. La cadena productiva hasta obtener el Caucho Sintético comienza con la refinación petroquímica y la correspondiente generación de Olefinas y Aromáticos, que sirven como base para obtener el Etil-Benceno, el

Estireno y el Acrilonitrilo. Éstos a su vez, son insumos para la producción de diversos Cauchos Sintéticos: el Estireno-Butadieno (SBR), el Poli-Butadieno (PBR), el Butilo, el Clorobutadieno, el Aquilonitrilo butadieno, el Isopreno y el Etil-Propileno-Dieno (EPDM), entre otros. El Caucho Natural, el Caucho Sintético y las mezclas entre estos dos, así como con otros aditivos (por ejemplo, con el Negro de Humo o con el Sílice), se utilizan como materia prima para la elaboración de semi-productos o formas básicas (caucho sin vulcanizar; hilos y cuerdas de caucho vulcanizado; placas, hojas, tiras, varillas y perfiles de caucho sin endurecer; y tubos de caucho vulcanizado sin endurecer) y otros productos y artículos de diversos usos.

Los primeros Cauchos Sintéticos a partir de derivados del Petróleo se fabrican en escala industrial a partir de 1937 en Alemania, pero el más espectacular desarrollo de estos cauchos se tuvo en Estados Unidos de Norteamérica, durante la Segunda Guerra Mundial, pues al ser esta materia prima de alto valor estratégico en este tiempo, aportó grandes innovaciones en la industria del caucho y sus aplicaciones.

Día a día son descubiertos nuevos elastómeros para usos específicos en el sector industrial de todo el mundo. [13]

2.25 HULE ETILENO-PROPILENO-DIENO (EPDM)

Consiste en uno de los hules que están tomando mayor importancia en la industria, ya que, en el mundo occidental tiene una producción de 5'000.000 de toneladas anuales, ubicándose en un segundo lugar, después de los Hules Dienes, utilizados en la industria llantera.

Debido a la ausencia de doble ligadura, es un material susceptible a la vulcanización, con un sistema Azufre-Acelerador y los agentes que se utilizan para su vulcanización, son los Peróxidos a una escala baja. Posteriormente, surgieron los Terpolímeros (Etileno-Propileno-Dieno) que incluyen doble ligadura, facilitando de esta manera, la vulcanización con el Azufre-Acelerador.

En la actualidad, 90% de los Hules derivados del Etileno-Propileno, son Terpolímeros (EPDM). El 10% restantes, son Copolímeros (EPM). [2]

2.25.1 Propiedades EPDM.

- Excelente resistencia química al oxígeno y al ozono.
- Muy buena resistencia al envejecimiento por calor.

- Excelentes características de aislamiento eléctrico.
- Buena resistencia química a los álcalis y a los ácidos.

Además de éstas, tienen buenas propiedades mecánicas, especialmente, cuando son reforzados con Negro de Humo, así la resistencia a la tensión es buena, la resistencia a la abrasión está entre buena y excelente y la resistencia al desgarre es buena.

Cabe mencionar que la densidad de los Hules EP (Ca. 0.86gr/ cm³) es de las más bajas entre todos los Polímeros comerciales por ello sigue siendo uno de los más utilizados en la industria. [9]

2.26 VULCANIZACIÓN DEL HULE ETILENO-PROPILENO-DIENO (EPDM)

Comúnmente, se utilizan sistemas con azufre, aunque también se puede realizar la vulcanización con Peróxido que es más recomendado para los Hules EP, la cual le da al Hule mayor resistencia al calor, menor deformación permanente, mayor aislamiento eléctrico, y menores problemas de migración.

Los EPDM tienen un cierto nivel de instauración y pueden ser vulcanizados con Azufre. Sin embargo, como este nivel de instauración es muy bajo, se deben utilizar combinaciones de acelerantes altamente poderosos. No obstante, el sistema utilizado dependerá mayormente del tipo y concentración del tercer monómero, es decir, (el Dieno), en el caso del EPDM.

Por el hecho que el EPDM representa actualmente el 10% del consumo mundial de Caucho Sintético, tiene una gran importancia ya que es un Hule que no es utilizado en la industria llantera sino en otros campos por su excelente resistencia al Oxígeno, al Ozono, al calor y en general una buena resistencia química así como sus propiedades de aislamiento eléctrico. Como negativo se puede decir que son poco resistentes a los Aceites de Hidrocarburos y por su alto costo en comparación de otros Hules Sintéticos.

Su mayor campo de uso se centra en la industria automotriz que no implica contacto con aceites ni combustibles. También se le utiliza como recubrimiento de cables eléctricos de media y baja tensión. También es utilizado para fabricar todo tipo de empaques y mangueras para aparatos de línea blanca como lavadoras y secadoras. [11]

Figura 2. Durómetro



Fuente: Autor.

2.29 ENSAYO A LA COMPRESIÓN PARA CAUCHOS

Especifica las condiciones de ensayo para determinar las características de deformación por compresión de los Cauchos, basada en los principios generales.

Esta prueba se realiza con la máquina Universal para pruebas de Resistencia de Materiales

La máquina sirve para realizar los ensayos de mayor importancia en la Resistencia de Materiales mediante el uso de probetas, los cuales son:

- Zona de Tensión: Ensayo a la resistencia de la Tracción.
- Zona de Compresión: Ensayos de Compresión, Flexión y de Corte.

El movimiento necesario para las pruebas se realiza solamente en la estructura superior. La viga inferior sirve de base para la estructura y alojar el gato hidráulico. La carga generada al accionar el gato hidráulico mediante la palanca de accionamiento hace mover solidariamente la placa inferior y superior de la estructura mientras que la placa intermedia permanece quieta durante la operación. Esto hace que el espacio en la zona de tensión disminuya y en la zona de compresión aumente.

La operación de la máquina siempre es la misma. En un ensayo típico, los aditamentos y accesorios son colocados en la zona que se requiera para la prueba

Anexo 2. Rodríguez Millán, M., Rubio Díaz, I., Loya Lorenza, J., Moure, M. y Miguélez Garrido, H. (2018). Análisis experimental y numérico del material compuesto de aramida frente a impacto balístico. *Manuales de Ingeniería Mecánica (Revista de la Asociación Española de Ingeniería Mecánica)*. [[03 pg todo.pdf](#)] *Universidad Carlos III de Madrid...* 1-9



Este documento es una versión postprint de:

Rodríguez Millán, M., Rubio Díaz, I., Loya Lorenzo, J.A., Moure, M.M. y Miguélez Garrido, H. (2018). Análisis experimental y numérico del material compuesto de aramida frente a impacto balístico. *Anales de Ingeniería Mecánica (Revista de la Asociación Española de Ingeniería Mecánica): Actas del XXII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica (CNIM 2018)*. UNED y AEIM, año 21, v. 1, pp. 1111-1118.

© 2018 Los autores.



Financiación: Ministerio de Economía y Competitividad de España y programa FEDER, Proyecto RTC-2015-3887-8 y proyecto DPI2017-88166-R

Análisis experimental y numérico del material compuesto de aramida frente a impacto balístico

¹ M. Rodríguez Millán¹, I. Rubio Díaz¹, J.A Loya Lorenzo², M.M. Moure¹, H. Miguélez Garrido¹
Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid. mrmillan@ing.uc3m.es, mmmoure@pa.uc3m.es,
igrubiod@pa.uc3m.es, mhmiguel@ing.uc3m.es

² Dpto. de Ingeniería Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Universidad Carlos III de Madrid.
jloya@ing.uc3m.es

En este trabajo se ha realizado un estudio experimental y numérico del comportamiento mecánico un casco de combate frente a impacto balístico de proyectiles esféricos de 1.7 gramos. Se ha desarrollado un modelo numérico que ha sido calibrado y validado mediante ensayos experimentales en placas de diferente espesor. Un vez validado el modelo, se han desarrollado los ensayos experimentales en el casco de combate. Entre las conclusiones de este trabajo destaca que localización del impacto en el casco influye notablemente en el límite balístico. Cabe destacar que el modelo numérico es capaz de reproducir cada capa del casco de combate lo cual puede ser beneficioso para llevar a cabo futuras investigaciones sobre el casco con aramida u otro material.

1. Introducción

Debido a la creciente amenaza del terrorismo y participación de las FFCCSS en conflictos nacionales e internacionales, el número de personas con lesiones cerebrales relacionado con amenazas balísticas se ha incrementado. Para minimizar la mortalidad o posibles daños cerebrales irreversibles, resultado de las lesiones en la cabeza por impacto balístico, es de vital importancia asegurar que las protecciones personales, especialmente los cascos de combate, estén diseñadas y fabricadas de la manera más efectiva posible desde el punto de vista de la protección frente a dicho impacto.

La fabricación de los cascos de combate conlleva realizar esfuerzos para reducir su peso sin perder prestaciones de resistencia ante impacto. Este es el principal objetivo de la industria militar. Para el desarrollo de un casco de combate se necesita realizar una gran campaña de ensayos de impacto que conlleva un alto precio de recursos económicos y humanos. La complejidad de los ensayos experimentales justifica el uso de modelos matemáticos que puedan predecir el comportamiento mecánico de los sistemas de protección personal ante impacto balístico. Con estas herramientas numéricas se puede optimizar el diseño de casco ante diferentes amenazas balísticas.

El desarrollo de un casco de combate conlleva cumplir una serie de normas militares en el aspecto balístico. Mediante estas normas se evalúa el casco de combate para determinar tanto la velocidad V50 -velocidad límite a partir de la cual se produce perforación como deformación o trauma en la parte interior del casco. Cabe destacar la norma STANAG 2920 [1] que insta a emplear proyectiles que simulan fragmentos de metralla (FSP o proyectiles esféricos) para obtener la velocidad V50. La norma ampliamente empleada es la NIJ STANDARD 0106.01 [2] que evalúa el trauma producido por un proyectil deformable *Full Metal Jacketed* (FMJ) en una cabeza simulante humana con partes de plastilina balística.

En este trabajo nos hemos centrado en el análisis de la velocidad V50 empleando pequeños proyectiles de geometría esférica. Se realiza una metodología combinada experimental y numérica para alcanzar este objetivo. Son pocos los estudios en la literatura que han combinado ensayos experimentales y simulaciones numéricas [3–5]. Tham y colaboradores [3] llevaron a cabo ensayos experimentales y simulaciones numéricas de impacto balístico en un casco de Kevlar empleando proyectiles esféricos de 11.9 g a 205 m/s. Completaron el estudio analizando numéricamente el comportamiento mecánico del casco frente a proyectiles FSP y FMJ. Tan y colaboradores [4] realizaron ensayos experimentales y simulaciones numéricas de impacto frontal y lateral con un proyectil esférico de 11.9 g a 220 m/s. Recientemente, Rodríguez-Millán y colaboradores [5] analizaron

experimental y numéricamente el comportamiento mecánico del casco de combate desarrollado por una empresa española según las normativas NIJ 0106.01 y STANAG 2920 obteniendo unas buenas predicciones.

Otros investigadores se han centrado en el análisis numérico del casco de combate sin ensayos experimentales debido a la dificultad de realizarlos [6–9]. Van Hoof y colaboradores [6] evaluaron numéricamente la respuesta mecánica frente a impacto balístico de cascos y placas de aramida. Observaron que se producía mayor deformación en el casco que en la placa. Las simulaciones del casco indicaron que el daño producido por el impacto es muy localizado y sus efectos se limitan al área impactada. El movimiento global del casco es despreciable comparado con el de la placa. Lee y Gong [7] desarrollaron simulaciones numéricas para evaluar la eficacia del casco de combate considerando diferentes sistemas de amortiguación interior. Recientemente, Li y colaboradores [8] desarrollaron un modelo numérico para simular el comportamiento balístico del Casco de Combate Avanzado (ACH) para analizar diferentes variables: tamaño del casco, ángulo de impacto, localización del impacto. Concluyeron que a la misma velocidad de impacto de bala, el casco de tamaño pequeño tiene una deformación más significativa y la peor localización para el impacto era frontal. Palta y colaboradores [9] llevaron a cabo simulaciones numéricas sobre el Casco de Combate Avanzado (ACH) empleando proyectiles FSP de 1.1g, FMJ de 9 g y de rifle.223. Encontraron que, aunque el ACH es válido contra impactos de bala de 9 mm, es inadecuado para el impacto de munición de rifle .223.

En este trabajo se han elegido proyectiles esféricos debido a que alrededor de 20 % de las heridas encontradas en los soldados por un explosivo improvisado (IED) es con forma de fragmento esférica y, además, un 70% en el caso de minas o RPGs [10].

El objetivo de este trabajo es el análisis de parámetros como la geometría del objetivo (casco y placa) y la velocidad de impacto que tienen sobre los mecanismos de penetración. Como segunda contribución, se desarrolla un modelo numérico de elementos finitos para predecir la respuesta de un casco de combate sometido a impacto balístico. Una novedad en el modelo numérico del casco de combate es que cada capa de aramida ha sido discretizado con un elemento a través del espesor. El casco de combate consta de más de veinte capas a lo largo de todo el grosor. Generalmente, ha sido modelado sin considerar un elemento por lamina debido al alto coste computacional [4,5,9,11–13].

Para cumplir este objetivo, el documento se ha organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se definirán el material y el equipo experimental empleado. El desarrollo del modelo numérico en placa, que será calibrado y validado con ensayos experimentales con placas planas, se describe en la sección 3. Una vez validado las características fundamentales del modelo numérico en placa, se desarrolla el modelo numérico de impacto en casco de combate que es comparado con ensayos experimentales, sección 4. Además, se realiza un análisis de la influencia de la zona de impacto. Por último, las principales conclusiones del trabajo son expuestas.

2. Metodología experimental

En esta sección se describe la metodología llevada a cabo en los ensayos experimentales para la calibración del modelo numérico.

2.1. Material

El material de las placas utilizadas y del casco de combate está formado por laminas de aramida preimpregnadas de resina y termoconformadas para adquirir rigidez. Las principales características de la aramida compuesta son su resistencia, su excelente capacidad de absorción de energía y su buena relación entre resistencia y peso lo que le hace ser un material muy atractivo para los sectores de defensa y transporte.

Para los ensayos de impacto balístico en placas se han realizado con dos densidades areal distintas 4.43 kg/m² y 8.86 kg/m² en placas de dimensiones de 100×100 mm². Los ensayos en el casco de combate han sido con densidad areal de 8.86 kg/m².

2.2. Dispositivo experimental

Los ensayos experimentales se realizaron con un lazador neumático de calibre 7.62 que es capaz de lanzar proyectiles hasta 6 bares de presión y con una longitud de cañón de 1.5 m. El proyectil utilizado han sido esferas de acero de 1.7 g y 7.5 mm de diámetro. El rango de velocidades de impacto utilizado ha sido 350 m/s < V₀ < 850 m/s. En todos los ensayos, los proyectiles después del impacto no han sufrido ninguna deformación, daño o erosión. En la Figura 1, se muestra un esquema con la disposición de los ensayos para el caso de impacto en placa e impacto en casco de combate. En el caso de los ensayos en placa, las probetas fueron apoyadas en su contorno y en dos puntos evitando el deslizamiento durante el impacto. Sin embargo, el casco de combate está sujeto por su zona lateral con un útil orientable que permite realizar impactos en 5 localizaciones diferentes (frontal, laterales, trasera y superior).

Anexo 3. Bernal, P., Bernal, M., Navarro, R., López, J. (2019). Nanotubos de carbono, el futuro en los compuestos de caucho. [04 pg todo.pdf] Revista de Plásticos Modernos Vol. 117... 1-7

Nanotubos de carbono, el futuro en los compuestos de caucho

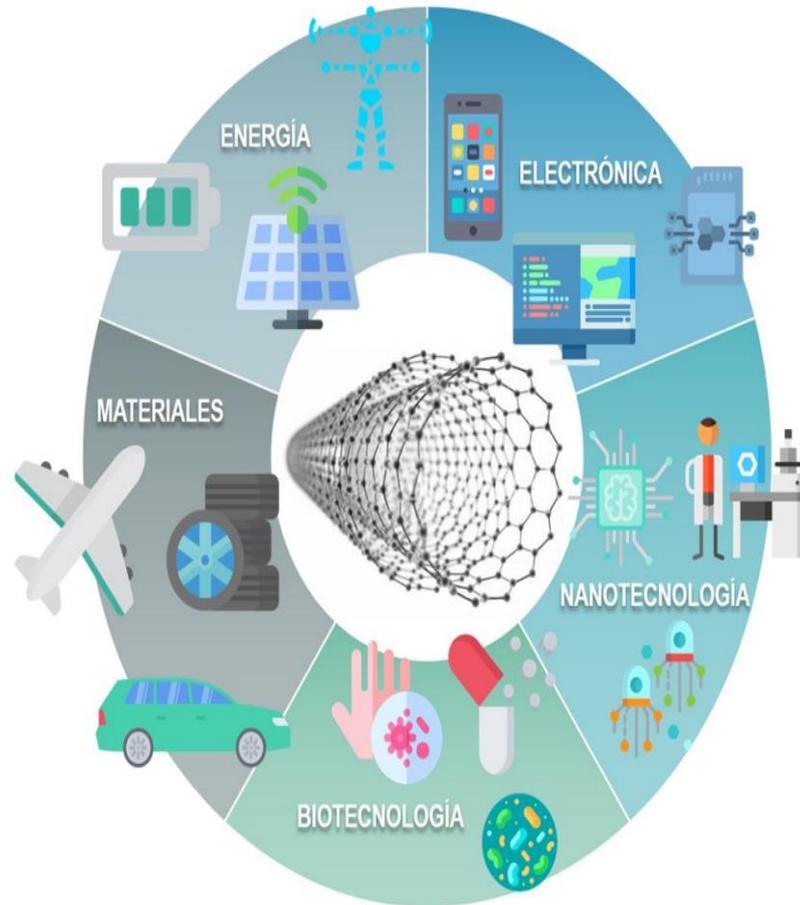
Autores: Pilar Bernal-Ortega*, M. Mar Bernal, Rodrigo Navarro, Juan López Valentín

Grupo de Elastómeros. Departamento de Física de Polímeros, Elastómeros y Aplicaciones Energéticas

Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros (CSIC)

C/ Juan de la Cierva, 3. 28006 Madrid, España

* piberor@ictp.csic.es



Resumen

Los nanotubos de carbono son nanopartículas con propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas excepcionales que tienen aplicaciones reales como cargas reforzantes en los materiales elastoméricos, dando lugar a una nueva

generación de materiales compuestos. En los compuestos de caucho, el uso de nanotubos de carbono en vez de las cargas tradicionales, como el negro de carbono y la sílice, presenta ventajas importantes ya que con relativamente pequeñas cantidades de estas nanopartículas las características de los com-

puestos de caucho se mejoran significativamente. Además, su superficie se puede fácilmente modificar para facilitar la formación de la red carga-polímero, no sólo para mejorar las conocidas propiedades de los compuestos de caucho sino también para conferirle otras nuevas. Por tanto, el uso de nanotubos de

carbono en los compuestos de caucho abre nuevas oportunidades en las aplicaciones actuales e incluso en otras aún sin explorar.

Palabras clave: nanotubos de carbono, caucho, compuestos, reforzamiento.

Abstract

Carbon nanotubes are nanoparticles with exceptional mechanical, electrical and thermal properties that find real applications as reinforcing fillers in elastomeric materials, leading to a new generation of composite materials. In rubber compounds, the use of carbon nanotubes instead of traditional fillers, such as carbon black or silica, presents important advantages since with relatively low loading of these nanoparticles the performance of rubber composites is greatly enhanced. Furthermore, their surface can be easily modified to facilitate the formation of a filler-polymer network, not only to improve the well-known properties of rubber compounds but also to confer new ones. Hence, the use of carbon nanotubes in rubber compounds opens new opportunities in actual applications and even in unexplored ones.

Keywords: carbon nanotubes, rubber, composites, reinforcement.

Introducción

Los materiales elastómeros son fundamentales para el desarrollo industrial y tecnológico de nuestra sociedad. En concreto, los elastómeros como el caucho natural y sintético son de indiscutible importancia, a pesar de que su uso no sea perceptible a simple vista. Los cauchos son materiales tan versátiles que encuentran múltiples aplicaciones en diversos ámbitos, desde mangueras a cables eléctricos e incluso materiales deportivos, siendo la más importante en la fabricación de los neumáticos, donde han revolucionado la industria del transporte. En la **Figura 1** se puede observar claramente como la demanda global de neumáticos, en este caso para turismos y vehículos comerciales, presenta un aumento progresivo, confirmado la importancia de los cauchos, en este caso el caucho natural (NR, *natural rubber*) y de los cauchos sintéticos estireno butadieno (SBR, *styrene butadiene rubber*), butadieno (BR, *butadiene rubber*) e isobuteno isopreno (IIR, *isobutyl isoprene rubber*).

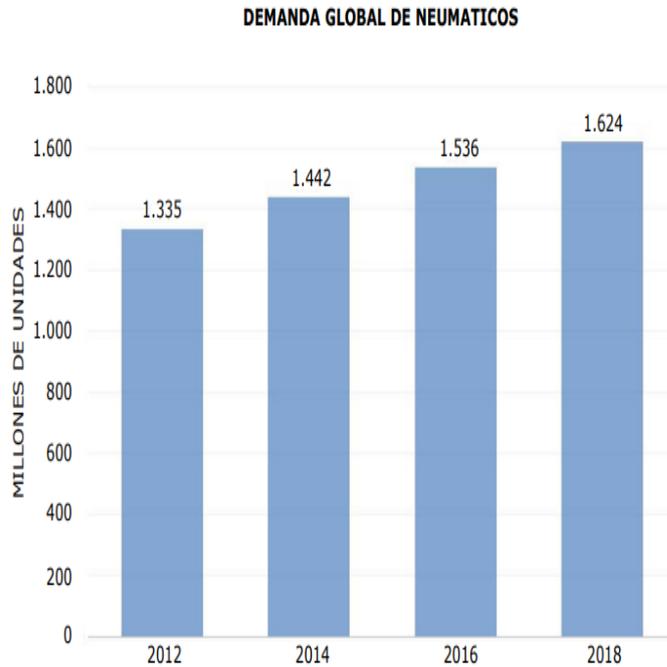


Figura 1. Demanda global de neumáticos para coches y vehículos comerciales ligeros de 2012 a 2018 (en millones de unidades).

En general, los cauchos son materiales elastómeros, es decir, polímeros amorfos de naturaleza viscoelástica que se caracterizan por su bajo módulo elástico, resistencia al agua, así como a los compuestos alcalinos y ácidos débiles, siendo además buenos aislantes eléctricos. Para conseguir todas estas óptimas propiedades los cauchos deben vulcanizarse, es decir, se deben crear enlaces químicos y físicos entre las moléculas de caucho, que darán lugar a una red tridimensional confiriendo a estos materiales unas características únicas. Sin embargo, no todas las propiedades de los cauchos provienen solo de los entrecruzamientos entre moléculas. En el caso de los compuestos de cauchos sintéticos, al contrario de los compuestos con caucho natural, las propiedades mecánicas son muy pobres

no teniendo prácticamente ningún uso comercial [1-2].

El reforzamiento del caucho es, por tanto, fundamental para conseguir todas las características técnicas requeridas en función del uso final, siendo las más importantes las relacionadas con la fuerza y la durabilidad de estos materiales. Por este motivo, el uso de cargas reforzantes tradicionales, como el negro de carbono, las inorgánicas (sílice, carbonato de calcio, alúmina...) o las de origen natural (celulosa, madera...), juegan un papel importante en la obtención de compuestos de caucho altamente reforzados [2]. El efecto reforzante de estas cargas dentro de la matriz elastomérica se atribuye a dos efectos: i) la formación de una red física debido a las interacciones carga-carga y ii) las fuertes interac-

ciones carga-polímero [3]. En cualquier caso, el tipo de carga reforzante para cada aplicación específica debe seleccionarse en función de los requisitos del uso final del compuesto.

El negro de carbono, o negro de humo, ha sido la carga reforzante más importante en la industria del caucho desde que fue descubierta como carga activa por Mote en 1904. La mayoría de los productos de caucho que se producen contienen negro de carbono, siendo generalmente la cantidad introducida de al menos 50 partes de negro de carbono por cien partes de caucho (50 phr) [4]. El reforzamiento del caucho con negro de humo implica un aumento en el polímero de la resistencia a la abrasión, a rotura y a otros tipos de esfuerzos, además de un aumento de la dureza, del módulo elástico, así como de otras propiedades viscoelásticas. Cabe destacar que el área superficial y la estructura, del negro de carbono juega un papel importante en el reforzamiento del caucho. El grado de interacción de la superficie del negro de carbono con el polímero depende principalmente de la orientación de las capas grafiticas en la superficie de la carga. Por tanto, mayor interacción de la carga con el elastómero se traduce, en la mayoría de los casos, en un aumento de la fuerza y un mayor módulo a bajas deformaciones. En el caso particular de la industria del neumático, la elección del negro de carbono que se utiliza en los diferentes compuestos depende de la función final de los mismos. Por ejemplo, en los compuestos de caucho que se emplean en la banda de rodadura (**Figura 2**), se añade negro de carbono con una elevada área superficial ya que implica una mejora notable en la resistencia a la abrasión. Sin embargo, en los compuestos que forman parte de la carcasa se usan los de baja área superficial, con menor estructura, para conseguir una mejor resistencia a la fatiga, debido a que los agregados de negro de carbono no se orientan en la dirección de estiramiento (**Figura 2**) [2, 4].

La sílice es, dentro de las cargas inorgánicas, la más usada debido a su elevada capacidad de reforzamiento del caucho. Las sílices altamente activas se usaban en los años 40 para complementar al negro de carbono. Sin



Índice

Noticias

REVISTA DE PLÁSTICOS MODERNOS Vol. 117 Número 744 Abril 2019 26

embargo, durante mucho tiempo esta carga inorgánica cayó en desuso debido a razones tecnológicas. Esto es debido a que, a pesar de poseer un área superficial y una estructura similar a la del negro de carbono, la interacción polímero-sílice es menor debido a su alta polaridad lo que le confiere una mayor tendencia a formar aglomerados. El resultado es una difícil procesabilidad del material que, junto con la baja conductividad eléctrica de la sílice y su coste como materia prima, frenaron la evolución de esta carga en la industria del caucho. No fue hasta principios de la década de los 90, cuando Michelin introdujo las cargas de sílice en combinación con un silano como agente de acoplamiento. Por tanto, el proceso de silanización de la sílice (**Figura 3**) revolucionó las propiedades reforzantes de esta carga en los materiales de caucho sin consecuencias negativas en las propiedades mecánicas de estos elastómeros. Además, en algunos casos, cuando la sílice se combina con este agente de acoplamiento posee características superiores a las del negro de carbono ya que confiere un efecto reforzante más fuerte con un menor contenido de carga en el caucho, sin afectar negativamente las propiedades mecánicas. Además, los enlaces químicos entre la sílice y el caucho dan lugar a una red sílice-caucho más estable y, por tanto, durante deformaciones cíclicas da lugar a un menor grado de rotura y la reformación de la red sílice-elastómero.

En los últimos años, se ha observado que existe un tercer factor que influye en el grado de refuerzo de las cargas y que depende fuertemente de la forma y dimensión de las partículas. Menor tamaño de partícula, entre 10 - 100 nm, implica una mayor área superficial lo que significa un aumento de los puntos de contacto entre las cargas y el polímero y, por tanto, incrementando la interacción carga-polímero [1]. Esto conduce a una gran ventaja de las nanopartículas respecto a las microcargas, la posibilidad de obtener propiedades similares e incluso mejores con una cantidad de carga en el caucho muy inferior. Por ejemplo, las cantidades de negro de carbono y sílice en los neumáticos para obtener las propiedades reforzantes deseadas llegan

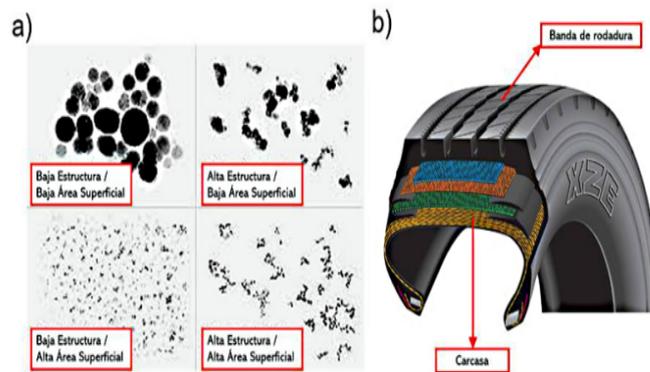


Figura 2. a) Morfología de las diferentes estructuras/áreas superficiales del negro de carbono. b) Sección de un neumático.

a valores del 80 - 90 % en peso, mientras que con algunas nanopartículas se pueden conseguir con sólo 10 - 20 % o incluso menos. Esto mejora de una manera muy significativa la procesabilidad de los compuestos de caucho, lo que se traduce en un ahorro de energía y costes.

Nanotubos de Carbono

En 1991, durante el estudio de la síntesis de fullerenos mediante el método de descarga de arco en fase vapor, Iijima identificó la estructura de los nanotubos de carbono (CNT, del inglés *Carbon Nanotubes*) en el extremo ne-

gativo del electrodo. Desde entonces, el descubrimiento de estas nuevas estructuras ha generado un gran interés, tanto a nivel científico como industrial, que se ha visto reflejado en muchos estudios centrados en la síntesis, estructura, propiedades y aplicaciones de estas partículas [5-7]. Esto queda reflejado en el gran incremento de publicaciones científicas desde su descubrimiento hasta la actualidad (**Figura 4**).

Los CNT son alótropos de carbono con una estructura única que consiste en átomos de carbono unidos covalentemente formando cilindros de diferentes diámetros. Su estructura es equivalente a si se enrollara sobre sí misma una lámina de grafeno. Dependiendo del número de cilindros se pueden clasificar en dos tipos principalmente: nanotubos de carbono de pared simple (SWCNT, del inglés *Single Wall Carbon Nanotubes*) formados por una única lámina de grafeno; y nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT, *Multi Wall Carbon Nanotubes*) que consisten en varios cilindros concéntricos que se mantienen unidos por fuerzas de van der Waals (**Figura 5**) [5-7].

Los SWCNT asimismo pueden clasificarse dependiendo de la geometría de los enlaces de carbono alrededor de la circunferencia del tubo. Siendo n y m el número de vectores a lo largo de las dos direcciones de la lámina cristalina de grafeno, los nanotubos se clasifican en nanotubos con estructura de zigzag cuando $m=0$, nanotubos con estructura de silla cuando $n=m$ y en todas las demás posibilidades se denominan nanotubos quirales. Dependiendo de estos vectores, los nanotubos de pared simple muestran diferencias en sus propiedades ópticas, eléctricas y mecánicas [5-7].

De entre los MWCNT, destaca el caso de los nanotubos de pared doble (DWCNT, "Double Wall Carbon Nanotubes"), ya que poseen propiedades similares a los SWCNT debido a su morfología, pero con una mayor resistencia a productos químicos. Los nanotubos de carbono de pared múltiple son los más empleados e investigados debido a su alta estabilidad y su facilidad de preparación en masa en com-

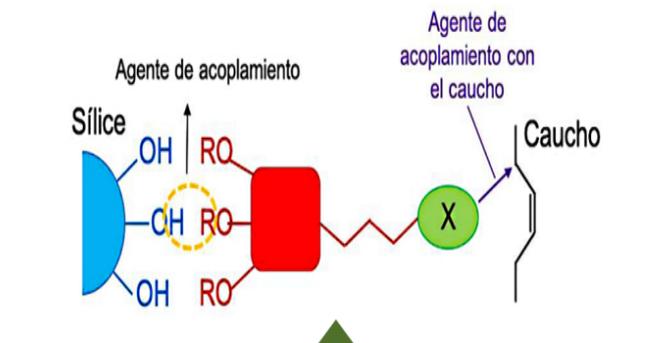


Figura 3. Reforzamiento del caucho mediante silanización de la sílice.

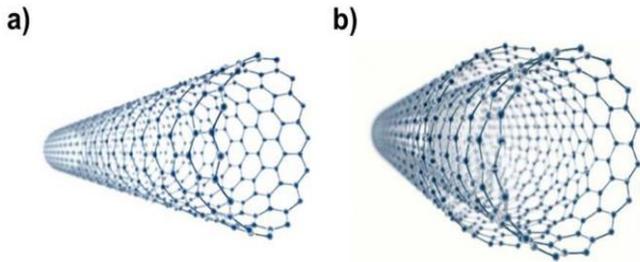


Figura 5. Ilustración de la estructura de a) SWCNT y b) MWCNT.

los nanotubos están principalmente debidas a las fuerzas inherentes de la estructura molecular de los CNT, es decir, las fuertes uniones entre capas carbono-carbono (enteramente uniones sp^2) donde están presentes uniones σ e uniones π . Sin embargo, uno de los mayores problemas que presentan estas nanopartículas es su dificultad de dispersión, ya que debido a fuerzas de van der Waals y su elevada relación de aspecto, los CNT tienden a aglomerarse, como se observa en la **Figura 7**, en las imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) de MWCNT. En la primera imagen podemos ver la estructura de los tubos, y en la segunda se observa como estos tienden a unirse unos a otros, formando aglomerados. Por este motivo, es muy habitual que los nanotubos se modifiquen químicamente antes de añadirse a una matriz polimérica [5,10].

Compuestos de caucho basados en nanotubos de carbono. Propiedades

Como se ha comentado previamente, en el campo de los elastómeros con el fin de alcanzar los requisitos de la aplicación final del compuesto, se incorporan diferentes cargas a la matriz. Estas cargas pueden utilizarse para mejorar el procesado, reforzar la matriz o in-

cluso para abaratar los costes de producción. Los elastómeros se han reforzado durante muchos años con cargas como negro de carbono o sílice. El principal problema de estas cargas, es que, para alcanzar las propiedades reforzantes deseadas, es necesario añadir grandes cantidades de las mismas, generando así un aumento de peso del producto final. Por este motivo, en la actualidad han ganado un gran interés las denominadas nanopartículas, como por ejemplo el grafeno, nanoarcillas o las nanofibras de carbono, debido a su reducido tamaño y su correspondiente aumento en el área superficial. El objetivo de usar estas nanopartículas es crear nuevos materiales con propiedades superiores. En comparación con las cargas convencionales, las nanocargas reforzantes presentan una serie de ventajas:

- Los nanomateriales proporcionan un efecto reforzante más eficiente porque una fracción muy pequeña de estas partículas causa una mejora significativa en las propiedades de la matriz, llevando a la obtención de compuestos de bajo peso, más económicos y más fáciles de procesar.
- La transferencia de las propiedades de la carga a la matriz es más eficiente debido

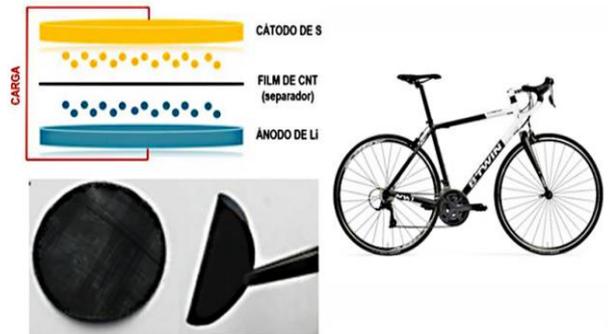


Figura 6. Aplicaciones de los nanotubos de carbono.

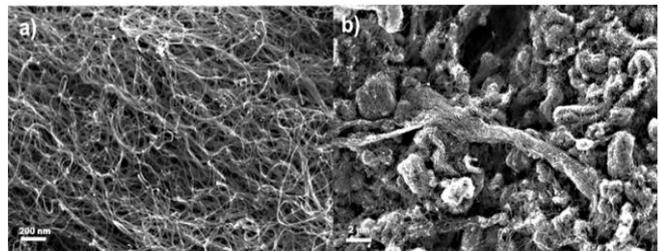


Figura 7. Imágenes SEM de a) estructura de los CNT y b) aglomerados de CNT.

a su mayor área superficial, generando mejores interacciones con la matriz.

De entre estas nanocargas destacan especialmente los CNT. Sus excelentes propiedades mecánicas combinadas con su baja densidad, hacen de los nanotubos de carbono una carga

ideal en el campo de los compuestos de caucho, especialmente en aplicaciones donde se requieren excelentes propiedades mecánicas y bajo peso, como el desarrollo de neumáticos. La incorporación de nanotubos de carbono en una matriz polimérica tiene un gran impacto en las propiedades de la misma. Se



Índice

Noticias

producen grandes cambios en propiedades como el esfuerzo a tracción, la elongación a rotura, las propiedades eléctricas, la dureza o las propiedades dinámicas del material [1,11].

Propiedades mecánicas

El refuerzo de materiales elastoméricos por adición de cargas minerales representa uno de los aspectos más importantes en el campo de la ciencia y la tecnología del caucho. Habitualmente, para obtener un gran reforzamiento con las cargas convencionales, es necesario que estén presentes en la matriz en una elevada concentración. El reforzamiento de las matrices elastoméricas por adición de cargas es causado por diferentes contribuciones: el efecto hidrodinámico que se tiene de la introducción de partículas rígidas en una matriz blanda, la anisometría de las partículas y de los agregados y por el denominado "caucho ocluido", que son fracciones de caucho que quedan atrapadas entre agregados de partículas de carga y por la red de carga que se forma cuando se añade una gran cantidad de partículas a la matriz. Las cargas convencionales como el negro de carbono o la sílice, cuando son introducidas en matrices elastoméricas causan un incremento del módulo, causado por todos estos efectos. Debido al elevado módulo que presentan los nanotubos de carbono, se espera que tengan un efecto reforzante mucho mayor que las cargas convencionales. Se han reportado mejoras significativas en las propiedades mecánicas de matrices elastoméricas por adición de CNT [12-17]. En la **Tabla 1** se muestran las propiedades mecánicas de diferentes compuestos de caucho SBR (caucho empleado para la fabricación de neumáticos) cargados con CNT y con cargas convencionales (CB y Si). En los resultados mostrados se observa como con solo 10 partes por cien de caucho (pcc) de nanotubos, se alcanzan valores similares en el módulo al 100% y al 300% de esfuerzo que los alcanzados empleando 55 pcc de negro de carbono y 80 pcc de sílice. En el caso del esfuerzo a rotura se observa de igual modo como aumenta con la adición de nanotubos, aunque no se llegan a alcanzar los

Tabla 1. Propiedades mecánicas de compuestos de caucho SBR.

Propiedades mecánicas de SBR y de compuestos de SBR				
Concentración de carga (pcc*)	Módulo al 100% (MPa)	Módulo al 300% (MPa)	Esfuerzo a rotura (MPa)	Deformación máxima (%)
0	0.736	1.354	2.052	420.520
5 CNT	2.411	5.265	5.723	335.149
10 CNT	3.826	8.198	8.474	308.494
55 CB	4.136	-	12.831	276.507
80 Si	2.512	12.679	16.359	308.490
*pcc= partes por cien de caucho				

valores obtenidos con las cargas convencionales, quizá por la pobre interacción entre los CNT y la matriz. En el caso de la deformación máxima alcanzada puede observarse como los compuestos cargados con CNT alcanzan valores superiores.

Las mejoras en las propiedades mecánicas de los compuestos se observan también mediante la medida de las propiedades dinámicas de los mismos con incrementos de los módulos de pérdida y de almacenamiento [12-17].

Propiedades eléctricas

Además de mejorar las propiedades mecánicas de los cauchos, estos también tienen un impacto en las propiedades eléctricas de los mismos. La mayoría de los elastómeros son materiales aislantes. Con la adición de cargas de carbono, como por ejemplo el negro de humo, grafeno o nanotubos de carbono, que son eléctricamente conductoras, la matriz experimenta un aumento en conductividad. Del mismo modo que con las propiedades mecánicas, la conductividad eléctrica está fuertemente influenciada por la cantidad de partículas, su morfología y su dispersión en la matriz. En muchas de las aplicaciones como por ejemplo los neumáticos, la conductividad eléctrica es necesaria para disipar cargas electrostáticas. Existe una fracción volumétrica crítica, denominada límite de percolación

a partir de la cual las partículas conductoras forman una red de carga interconectada (**Figura 8**) [18-21].

En el caso de los CNT, esta red de carga se forma a concentraciones muy bajas de carga añadida en comparación al negro de carbono. Esto se debe a la mayor relación de aspecto de los CNT, lo que incrementa la probabilidad de contacto entre partículas. Este comportamiento ha sido reflejado en la literatura por diversos autores. La alta conductividad eléctrica que proporcionan los CNT a bajas concentraciones de carga es una de las mayores atractivos de estas partículas, ya que esto contribuye a las excelentes propiedades mecánicas que imparten a la matriz elastomérica. Por ejemplo, en el caso del negro de carbono, las elevadas concentraciones de carga necesarias para proporcionar el mismo nivel de conductividad, a menudo tienen como consecuencia un incremento en la viscosidad del compuesto lo que dificulta el procesado de los mismos y puede asociarse con una reducción en las propiedades mecánicas [18-21].

Modificación de CNT

A pesar de las prometedoras propiedades de los CNT, estos materiales presentan algunas limitaciones en aplicaciones de alto rendimiento de productos de caucho, por su dificultad de dispersión en las matrices elastoméricas.

Como se ha comentado anteriormente, su tendencia a aglomerarse reduce las mejoras esperadas en las propiedades de los compuestos. Asimismo, los CNT tienen una reactividad química baja debido a las fuertes uniones covalentes C-C y su estructura de tubo, como consecuencia es difícil lograr una buena interacción con la matriz. En este sentido, los nanotubos de carbono pueden modificarse químicamente para mejorar tanto su dispersión como su interacción con la matriz. [5,10]

Generalmente las modificaciones químicas que se realizan a los CNT son aquellas con uniones covalentes de diferentes grupos. Estos grupos se insertan en los defectos presentes en las paredes de los tubos. Las modificaciones químicas más comunes que se realizan a los CNT para introducirlos posteriormente en cauchos son la oxidación y la silanización [5,10,22].

El principal objetivo del método de **oxidación** es la introducción de grupos carboxílicos, carbonilos e hidroxilos en la superficie de los nanotubos. Este método es usado frecuentemente como el primer paso de una serie de modificaciones. La principal limitación de la oxidación es que este proceso puede dañar la estructura de las partículas, por ese motivo es importante alcanzar un equilibrio entre la densidad de grupos funcionales in-



Índice

Noticias

Anexo 4. Flintsch, G. (2012). Modelos de Comportamiento de Adherencia Neumático Calzada. [[05 pg 96.120 \(1\).pdf](#)] *Universidad Nacional de Rosario Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras....* 1-194

Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras



Tesis Doctoral

MODELOS DE COMPORTAMIENTO DE ADHERENCIA NEUMÁTICO CALZADA

Magister Ing. Marta Beatriz Pagola

Director de tesis: Dr. Gerardo Flintsch

Miembros del Jurado: Dr. Hugo Bianchetto
Dr. Francisco Morea
Dr. Adrián Nosetti

Tesis presentada en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de

Doctor en Ingeniería

Rosario, 2012



RESUMEN

La adherencia neumático calzada es un parámetro característico de la superficie del pavimento, que se encuentra fuertemente relacionado a la seguridad de circulación que tienen los usuarios que circulan por la ruta. La misma no es constante, sino que partiendo de un valor inicial va decreciendo hasta alcanzar un valor mínimo, el cual es función del nivel de tránsito, el tipo de superficie de rodamiento, el tipo de agregados pétreos, la configuración del tránsito, etc.

En el presente proyecto se realizaron mediciones de coeficiente de fricción y macrotextura en distintos tramos de ruta, con distintos tipos de equipos durante determinados períodos de tiempo. Las situaciones analizadas y las principales conclusiones obtenidas en cada una son:

- Mediciones en tramos de las Pista de Ensayos de la Universidad de Virginia, Blacksburg, Estados Unidos. Son 14 tramos ubicados en la pista, los mismos no están sometidos a tránsito y son utilizados para investigación. Se utilizaron dos equipos para medir el coeficiente de fricción: trailer de rueda bloqueada y Dynamic Friction tester, mientras que la macrotextura fue medida con Circular Texture meter.

Los tramos se midieron en forma periódica durante más de un año. A partir de los resultados se valoró la influencia que la temperatura tiene sobre los resultados de coeficiente de fricción y se comparó la misma con influencia presente en los factores de corrección actualmente utilizados en el Estado de Virginia para corregir los resultados.

- Mediciones en tramos ubicados en pista de aeropuerto. Se midieron 3 tramos en repetidas ocasiones, el coeficiente de fricción se midió con Péndulo de Fricción tipo TRRL, y la macrotextura con Círculo de Arena. Estos tramos están ubicados cercanos al borde de la pista, y no tienen ningún tipo de tránsito.



En esta situación se analizó la influencia de la temperatura en las mediciones realizadas con Péndulo de Fricción y se comprobó la validez de la corrección por temperatura indicada en la norma de ensayo utilizada para este equipo.

- Mediciones en tramos ubicados en autopista con tránsito elevado. Fueron medidos 16 tramos de 300 metros en forma periódica (anual) durante 11 años. Las mediciones de coeficiente de fricción se realizaron con Péndulo de Fricción tipo TRRL, y la macrotextura con Círculo de Arena. Durante este período los tramos estuvieron sometidos al tránsito normal circulante en la autopista (autos, camiones, colectivos).

El seguimiento sistemático de los mismos permitió valorar la evolución en servicio de la mezcla asfáltica utilizada como rodamiento, desde el punto de vista de la adherencia neumático calzada. Estas mediciones permitieron el desarrollo de modelos de evolución, para predecir el comportamiento del coeficiente de fricción y la macrotextura para mezclas asfálticas tipo F10, elaboradas con agregados pétreos de Argentina y sometidas a las condiciones de servicio (tránsito, clima y limpieza) de una autopista con tránsito elevado.

Se realizó un análisis bibliográfico acerca de la adherencia neumático calzada y los modelos de predicción disponibles en otros países. El análisis de los resultados de mediciones periódicas disponibles permitió confirmar que la temperatura tiene influencia en los resultados de coeficiente de fricción medido con equipos. Además, el disponer de mediciones periódicas durante un período de 11 años, permitió el desarrollo de modelos de predicción de mezclas asfálticas tipo F10 en autopista, los cuales podrán ser utilizados en experiencias futuras para predecir la calidad que la carpeta de rodamiento brinda a la seguridad de los usuarios.



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La adherencia neumático calzada es un parámetro característico de la superficie del pavimento, que se encuentra fuertemente relacionado a la seguridad de circulación que tienen los usuarios que circulan por la ruta. La misma no es constante, sino que partiendo de un valor inicial va decreciendo hasta alcanzar un valor mínimo, el cual es función del nivel de tránsito, el tipo de superficie de rodamiento, el tipo de agregados pétreos, la configuración del tránsito, etc.

La adherencia que brinda una superficie de rodamiento al usuario no se mantiene constante a lo largo de la vida en servicio. Su magnitud depende de la variación de dos parámetros: la macrotextura de la superficie y el coeficiente de fricción.

La variación del coeficiente de fricción parecería seguir un patrón teórico formado por dos etapas, como el mostrado en la Figura 1.1. Durante la primera etapa, aproximadamente el primer año de servicio, el valor del coeficiente de fricción decrece rápidamente, es decir, sufre una pérdida inicial. Luego de ese período, en la segunda etapa, los valores se mantienen relativamente constantes, oscilando en torno a un "valor de equilibrio". (LCPC, 1993) [1] (Del Val, 2010) [2]

El valor de equilibrio y el tiempo que se tarde en alcanzarlo dependerá del tránsito, el tipo de mezcla, los agregados y el clima. Durante ambas etapas existen variaciones reversibles asociadas a las estaciones del año, indicando mayores valores en invierno y menores en verano.

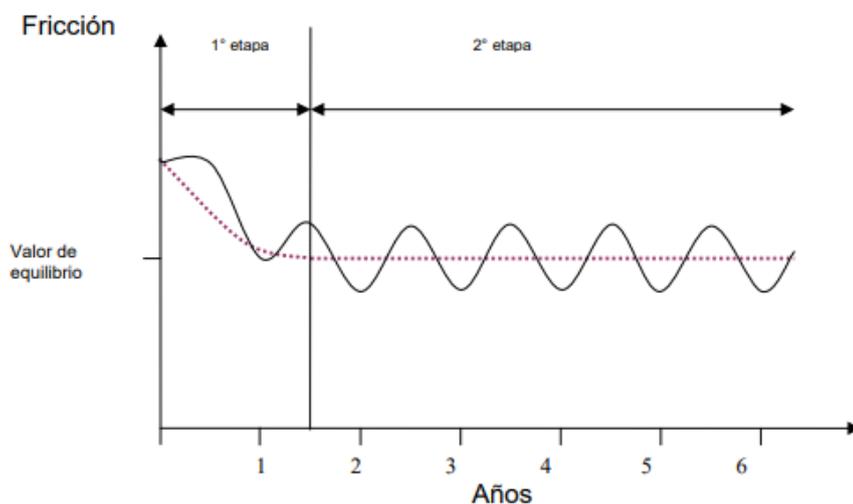


Figura 1.1. Comportamiento teórico del coeficiente de fricción

La macrotextura también modifica su valor inicial. Transversalmente al sentido de avance y luego de un tiempo bajo tránsito, empieza a diferenciarse la zona de rodada de la del centro del carril. Longitudinalmente, la macrotextura decrece hasta un valor mínimo que corresponde al máximo amasado de la mezcla de la carpeta de rodamiento. Los valores alcanzados por la macrotextura dependerán del tipo de carpeta, de los agregados empleados en la mezcla y del nivel de tránsito solicitante. (Hosking, 1992) [3]

Estos cambios de macrotextura también introducen variaciones en el resultado del coeficiente de fricción medido con equipos. La influencia será de distinta magnitud según sea el diseño mecánico del equipo, fundamentalmente del tipo de neumático y del caudal de agua de riego que utilice.

Existen en la bibliografía extranjera algunos modelos aislados para predecir esta evolución. Ellos se desarrollaron para ciertos equipos y para las condiciones particulares de regiones, climas y tránsito, valorando ambos parámetros: coeficiente de fricción y macrotextura, en forma independiente. No



existiendo ningún modelo que analice el IFI (índice de fricción internacional), sino que analizan por separado los dos parámetros que lo forman, fricción y textura, particularizados para distintos equipos de medición.

1.1 Descripción del problema a analizar

Si bien el tema adherencia neumático calzada tiene amplia difusión en el mundo, y existen muchos equipos para su valoración, en Argentina no se le ha dado hasta hace unos años la debida consideración.

Las carpetas de rodamiento, fundamentalmente las carpetas asfálticas, eran diseñadas con mezclas asfálticas pensadas para satisfacer criterios estructurales, sin tener en cuenta al usuario y por consiguiente a la seguridad.

Recién a partir de la década del 90, cuando se implementó un Sistema de Concesión de rutas donde el Concesionario debía brindar un determinada calidad de servicio a los usuarios, controlada por indicadores de deterioro, comenzaron a incorporarse carpetas de rodamiento “especiales”, las cuales pasaron a ser diseñadas para satisfacer las necesidades de los usuarios, fundamentalmente en autopistas y carreteras rápidas con elevado tránsito. A partir de entonces los parámetros relacionados con la adherencia neumático calzada comenzaron a ser considerados.

Respecto a los equipamientos, la pionera ha sido la Dirección Nacional de Vialidad allá por los años 80, cuando incorporó a la repartición equipos Mu Meter, y empezó a utilizarlos en auscultaciones de su red. Luego, en el año 2004, la misma repartición adquirió un equipo Scrim con medidor de textura incorporado. A nivel de las Vialidades Provinciales no se ha realizado la incorporación de equipamiento, y a nivel empresas privadas solo dos equipos de alto rendimiento están incorporándose, mientras que si se han incorporado equipos Péndulo tipo TRRL de medición del coeficiente de fricción en forma puntual .



CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos de la superficie del pavimento involucrados

La adherencia neumático calzada es una de las características superficiales del pavimento que tiene influencia en la seguridad del conductor, ya que permite:

- * Reducir la distancia de frenado
- * Mantener en todo momento la trayectoria deseada del vehículo

La adherencia neumático-calzada puede definirse como la capacidad de unión o contacto íntimo entre dichos elementos, de forma que de origen a una circulación segura del vehículo. En general el conductor es muy sensible a la ausencia o disminución de la adherencia que se produce cuando la superficie está mojada, con hielo, etc., existiendo deslizamiento del vehículo.

Como se expondrá con más detalle, la adherencia neumático calzada es suficiente, salvo casos excepcionales, sobre superficie seca, disminuyendo extraordinariamente en períodos de lluvia debido a la película de agua que se interpone entre el neumático y la calzada.

Las capas de rodamiento de las carreteras y, esencialmente los agregados, deben reunir las características adecuadas para cumplir las siguientes funciones básicas desde el punto de vista de la seguridad, (LCPC, 1993) [1]:

- * Romper la película de agua procedente de la lluvia, con el objeto de asegurar el contacto íntimo entre el neumático y la calzada.
- * Facilitar y contribuir al drenaje del agua existente bajo el neumático.
- * Mantener en el tiempo las características adecuadas.



La primera de estas funciones depende, básicamente, de las características intrínsecas del árido: asperezas superficiales, así como de su permanencia en el tiempo bajo la acción del tránsito.

La segunda función citada depende fundamentalmente de la composición granulométrica de la capa de rodadura, así como a los posibles tratamientos que sobre ella se realicen, de los que puede ser un ejemplo el estriado o ranurado que se efectúa sobre pavimentos de hormigón.

Durante el Congreso Mundial de la AIPCR celebrado en Bruselas en 1987 se definieron tres bandas de textura: megatextura, macrotextura y microtextura. Figura 2.1. (AIPCR, 1987) [4]

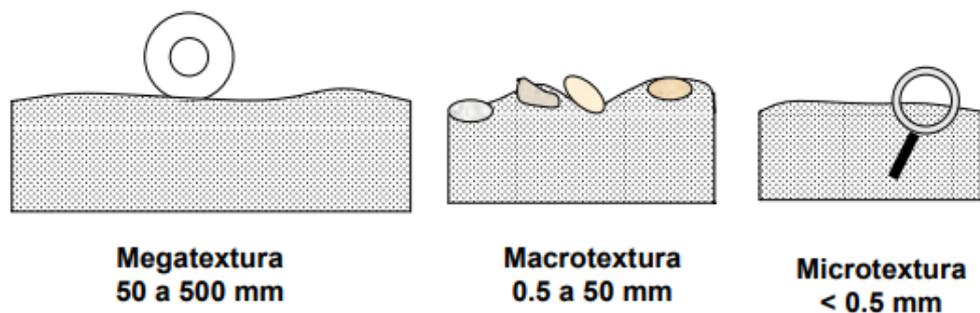


Figura 2.1. Megatextura, macrotextura, microtextura

La megatextura de un pavimento es la desviación que presenta su superficie con respecto a una superficie plana de dimensiones características en sentido longitudinal entre 50 y 500 mm, del mismo orden que el neumático en contacto con el pavimento (a menudo originadas por bacheos y ondulaciones).

La macrotextura de un pavimento es la desviación que presenta su superficie en relación con una superficie plana de dimensiones características en sentido longitudinal comprendidas entre 0.5 y 50 mm, o sea, en una escala del orden que los dibujos del neumático. Tiene como función contribuir al drenaje del agua en el área de contacto neumático pavimento, evitando así los riesgos de



hidroplaneo (pérdida de control del vehículo con la presencia de agua sobre la calzada).

La microtextura de un pavimento es la desviación que presenta su superficie con respecto a una superficie plana de dimensiones características en sentido longitudinal inferiores a 0.5 mm. Este tipo de textura es la que hace al pavimento más o menos áspero, pero normalmente es tan pequeña que no puede observarse a simple vista.

Tras las consideraciones anteriores, es evidente que el empleo de áridos más o menos pulimentables o de diferentes composiciones mineralógicas, así como el diseño de granulometrías más o menos abiertas o cerradas, o con mayor o menor tamaño máximo de árido, etc., son factores que influyen sensiblemente en la textura superficial y, por consiguiente, en la capacidad de adherencia neumático calzada y, en definitiva, en la seguridad vial.

Es muy importante destacar que bajo la acción del tránsito, las características iniciales disminuyen con el transcurso del tiempo. Así, por ejemplo, se va produciendo el pulimento de los áridos, modificándose sensiblemente la microtextura superficial.

También, por lo general, la macrotextura disminuye paulatinamente, dificultando la evacuación de la película de agua procedente de lluvia hasta que, por debajo de un determinado umbral, el drenaje está limitado casi exclusivamente a los canales (dibujo) que constituyen la escultura del neumático.

Si la velocidad de circulación es elevada la capacidad de drenaje de agua es insuficiente, elevándose sensiblemente el riesgo de que la rueda patine o deslice al producirse la pérdida de contacto entre el neumático y la calzada. Obviamente, el riesgo de accidentalidad es aún mayor si en las anteriores



circunstancias se añaden nuevos factores negativos, como pueden ser circular con neumáticos desgastados, incrementar la velocidad, etc.

La adherencia neumático calzada se explica entonces por un conjunto de fenómenos complejos e interactivos que deben ser analizados tanto a nivel vehículo como a nivel pavimento.

2.2 Medición de la adherencia neumático calzada

La adherencia neumático calzada se valora en forma indirecta a través de la medición de dos indicadores de la superficie del pavimento: el coeficiente de fricción y la macrotextura.

2.2.1. Medición del coeficiente de la fricción

La resistencia al deslizamiento del pavimento es un valor crítico en la seguridad vial cuando el pavimento está mojado. La misma se determina midiendo el coeficiente de rozamiento entre el pavimento artificialmente mojado y una rueda de goma especial. También se puede considerar que es una forma indirecta de medir la parte más fina de la textura es decir, la microtextura, aunque la macrotextura también tiene un papel importante en el resultado por ser la que permite la evacuación del agua de la interfaz neumático pavimento.

El valor del coeficiente de rozamiento depende de una serie de factores, algunos inherentes a la carretera mientras que otros son responsabilidad del usuario (como la velocidad y el estado de los neumáticos del vehículo) o de la naturaleza (lluvia, nieve o hielo sobre la calzada, etc.). La demanda de rozamiento es función de la velocidad y de la cantidad de agua sobre la carretera. A su vez la capacidad de responder a esa demanda es función del tipo y del estado del pavimento.



Los equipos que evalúan el coeficiente de rozamiento realizan los ensayos sobre el pavimento mojado (el equipo vierte agua de forma controlada) y a una velocidad constante. Las condiciones en que cada equipo realiza sus mediciones se encuentran perfectamente definidas (velocidad, tipo de neumático, espesor de película de agua, etc.). Cada equipo tiene fijadas distintas condiciones, es por eso que el resultado depende del tipo de equipo utilizado.

Los equipos de evaluación pueden medir coeficiente de fricción longitudinal (CFL) o coeficiente de fricción transversal (CFT).

Los equipos que determinan el coeficiente de fricción longitudinal CFL se componen básicamente de una rueda que gira a una velocidad angular reducida y se traslada con velocidad constante V . Lo que se mide es la fuerza de contacto F que se genera en la interface de contacto neumático calzada y que tiende a limitar el desplazamiento. El CFL simula una situación de "frenado de urgencia". Figura 2.2.

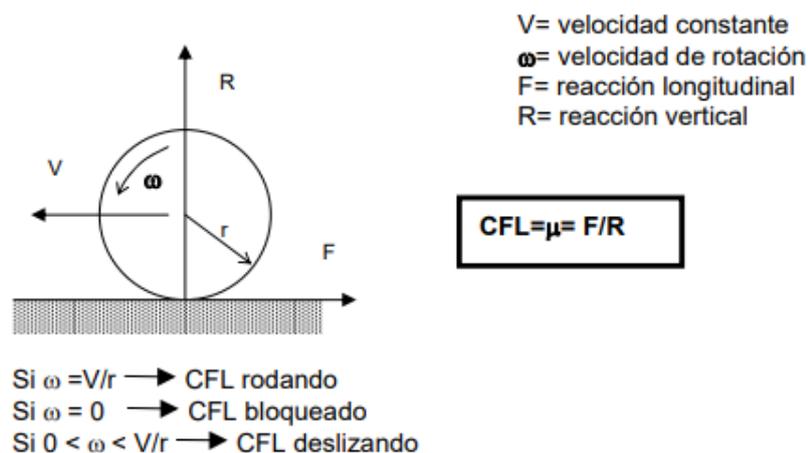


Figura 2.2. Coeficiente de fricción longitudinal

El CFL varía según el porcentaje de bloqueo de la rueda, llegando a su valor máximo cuando el porcentaje de rueda bloqueada se encuentra entre un 15% y



20%. Figura 2.3. Este comportamiento dio origen a la creación de los sistemas antibloqueo en la industria automotriz. (LCPC, 2005) [5].

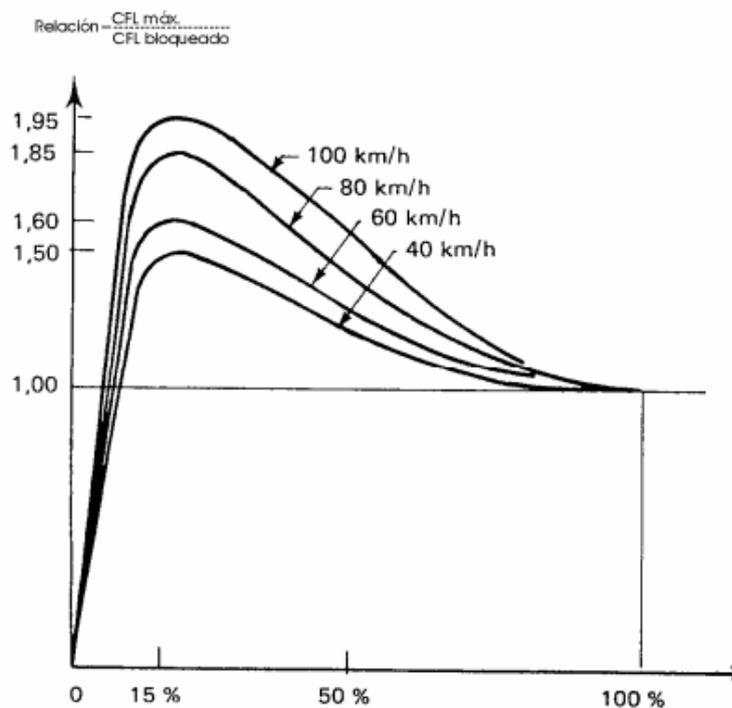


Figura 2.3. Coeficiente de fricción longitudinal vs. % de rueda bloqueada

Los equipos que determinan el coeficiente de fricción transversal CFT se componen básicamente de una rueda que posee un ángulo de deriva respecto al sentido de circulación, por lo tanto la rueda ejerce una fuerza para acomodarse paralela al sentido de avance. El CFT es la relación entre la fuerza N , perpendicular al plano de rotación de la rueda y la reacción R , normal al plano de apoyo debido al peso de la rueda. El coeficiente de fricción transversal CFT simula una situación de derrape del vehículo en curva. Figura 2.4.



2.2.2. Medición de la macrotextura

La macrotextura del pavimento es un parámetro crítico en la seguridad de los usuarios. La misma influye directamente en la capacidad del pavimento para evacuar el agua de la interfase neumático pavimento y, de forma indirecta en el valor del coeficiente de rozamiento del pavimento, que tiene gran importancia para la adecuada adherencia entre neumático y pavimento. Además, la macrotextura es la característica determinante en el nivel de ruido del tráfico, tanto del que perciben los ocupantes de los vehículos como el ruido de entorno que condiciona la calidad de vida de las zonas colindantes. En el aspecto económico, la textura del pavimento influye en el consumo de gasolina, en el deterioro de los vehículos y sobre todo en el desgaste de los neumáticos.

- Método del Círculo de arena

El método de ensayo conocido con el nombre de círculo ó parche de arena se viene empleando desde hace muchos años en la medida de textura de pavimentos. Se realiza esparciendo un volumen conocido de arena o esferas de vidrio sobre el pavimento en forma de círculo y midiendo su diámetro. Dividiendo luego el volumen de arena por la superficie del círculo obtenido se obtiene la profundidad media de arena, equivalente a la profundidad media de textura. El valor que representa la profundidad media de arena se define como la macrotextura MTD (mean texture depth). Figura 2.10.

En vista de que realmente se trata de un método basado en la medida de un volumen de material, el nombre apropiado es el de "método volumétrico". A pesar de que este ensayo es lento y puntual, es un método muy utilizado para medir la macrotextura. Se debe llevar a cabo con el pavimento seco y limpio, y en días sin viento. Cuando se trata de determinar el nivel de cumplimiento de la especificación de textura de un pavimento nuevo, el ensayo se debe realizar antes de la apertura al tráfico.



2.2.3. Índice de Fricción Internacional

Tradicionalmente, se ha venido caracterizando el pavimento por el valor de un coeficiente de fricción, determinado mediante equipos y ensayos más o menos modernos, y mejor o peor adaptados a las condiciones actuales de circulación y de los pavimentos. Hay diferentes formas de medir este coeficiente y las unidades en que se expresan son muy variadas, lo que hace que sus resultados sean difícilmente comparables y se dificulte el intercambio de experiencias.

Esta situación, es la que ha inducido a considerar necesario armonizar la práctica internacional en este tema. Por este motivo, se realizó un experimento internacional organizado por la AIPCR (Asociación Internacional Permanente de los Congresos de la Ruta), con el objetivo de establecer un único índice que represente características relacionadas con la adherencia neumático pavimento que tanta influencia tiene en la seguridad vial. La finalidad del Experimento fue la comparación y armonización de los numerosos métodos que se utilizan para evaluar la textura y la resistencia al deslizamiento en diferentes países, cuyas conclusiones fueron publicadas en 1995. (AIPCR, 1995) [6]. Los objetivos planteados para cumplir ese fin fueron:

- Desarrollar y valorar relaciones entre las medidas de la fricción y la textura tomadas con distintos equipos, variando las condiciones físicas de ensayo: textura, velocidad, ángulo de deriva, neumático de ensayo, materiales, clima, etc.
- Cuantificar la relación entre las medidas de la fricción y la textura tomadas con equipos distintos en condiciones específicas, para facilitar el intercambio y la armonización de la información técnica.
- Determinar la repetibilidad y los errores de medidas propios de los equipos. Evaluar el número de muestras y la frecuencia de muestreo



que requieren los distintos métodos para alcanzar una exactitud adecuada.

- Establecer una escala internacional de fricción a la que puedan referirse todos los equipos y evaluar su aptitud para determinar valores en esta escala.

En este Experimento Internacional se consiguió representar en un solo índice, el "Índice Internacional de Fricción" (IFI), las características relacionadas con la seguridad vial en condiciones de frenado. El IFI consta de dos números procedentes de dos medidas, una de fricción y otra de textura. Este par de números que define el IFI debería utilizarse en cualquier situación relativa a la adherencia neumático-calzada, como estudios de accidentes, inspecciones para la gestión de la conservación, explotación aeroportuaria, etc.

Se han establecido también las constantes con las cuales cada uno de los equipos participantes puede estimar los valores de referencia del IFI. Como consecuencia de esto, cualquier equipo de medida de la fricción de los participantes en el Experimento, o los que se sometan a un proceso de correlación con alguno de los que participaron, podrá estimar valores de la fricción en escala IFI, mediante sus propias medidas de la fricción y una medida de la textura.

El IFI puede describirse como una escala de referencia, de aplicación universal, de la fricción y de la macrotextura de un pavimento (ASTM E 1960) [7].

El IFI viene entonces indicado por dos números expresados entre paréntesis separados por una coma:

IFI (F60, Sp)

donde: F60 depende de la fricción y de la macrotextura

Sp depende únicamente de las características de la macrotextura de la superficie



Las ecuaciones que relacionan estos parámetros F60 y Sp con las mediciones de los distintos equipos son:

$$Sp = a + b * T$$

$$F60 = A + B * FR60 + C * T$$

$$FR60 = F * e^{((S-60)/Sp)}$$

donde: T medición de la macrotextura
F medición de fricción
S velocidad de deslizamiento de la rueda
Las constantes "a y b" dependen del equipo con que se determina la macrotextura
Las constantes "A, B y C" del equipo con que se mide la fricción, la constante C es la que valora el tipo de neumático que utiliza el equipo, la misma vale cero para neumáticos lisos.

En la publicación de la AIPCR se indican las constantes halladas para todos los equipos participantes del Experimento, con las que puede calcularse el IFI. Como consecuencia de esto, cualquier equipo de medida de la fricción de los participantes en el Experimento, o los que se sometan a un proceso de correlación con alguno de los que participaron, podrá estimar valores de la fricción en escala IFI, mediante sus propias medidas de la fricción y una medida de la textura.

Según está indicado en la publicación de la AIPCR todo equipo que no participó del Experimento debe ser calibrado para poder ser luego utilizado para determinar el IFI. El procedimiento de calibración debe ser realizado con alguno de los equipos que participaron del Experimento.

Los pasos a seguir para determinar el IFI de una sección de camino son los siguientes:



1. realizar la medición de macrotextura "T" y de coeficiente de fricción "F", con algunos de los equipos participantes del Experimento o correlacionados.
2. tomar las constantes a y b del equipo de macrotextura (de la publicación de la AIPCR, y calcular Sp
3. en función del equipo de fricción empleado, de la velocidad de medición y del ángulo de deriva del neumático, calcular S. Donde S es:

- la velocidad del equipo durante el ensayo, para equipos con rueda bloqueada,
- la velocidad del equipo durante el ensayo multiplicada por el porcentaje de deslizamiento, para equipos con rueda parcialmente bloqueada, y
- la velocidad del equipo durante el ensayo multiplicada por el seno del ángulo de deriva, para equipos con rueda oblicua.

4. calcular FR60

$$FR60 = F * e^{((S-60)/Sp)}$$

tomar las constantes A, B y C del equipo de fricción, y calcular F60

$$F60 = A + B * FR 60 + C * T$$

5. expresar el IFI obtenido en (F60 , Sp)



2.3 Variaciones en el tiempo

La adherencia del pavimento varía con el transcurso del tiempo. Es posible distinguir variaciones permanentes o irreversibles, ligadas al pulimento de los áridos por acción de la circulación de los vehículos y al amasado o compactación de la mezcla por acción de las cargas, y variaciones estacionales o reversibles atribuidas a cambios reversibles de la microtextura con las condiciones climáticas (efectos de la lluvia y la temperatura). Siendo el análisis de estas variaciones el objeto del presente trabajo.

La adherencia neumático calzada, como se dijo anteriormente, no se mantiene constante. Figura 2.14. Su valor depende de las variaciones del coeficiente de fricción y de la macrotextura. (Echaveguren, 2008) [8] (Gimenez Guspi, 2002) [9].

El coeficiente de fricción varía con el tiempo. Según la experiencia de otros países, dicha variación parecería seguir el siguiente modelo teórico:

- Al inicio de su vida en servicio, recién finalizada la obra, el valor es bajo debido a que los agregados se encuentran recubiertos con una delgada película de asfalto.
- Una vez que esa película se desgasta el valor del coeficiente de fricción tiene un incremento llegando al valor máximo que puede brindar esa superficie.
- Durante aproximadamente el primer año de servicio, el valor del coeficiente de fricción decrece rápidamente, es decir, sufre una pérdida inicial.
- Luego de ese período, en la segunda etapa, los valores se mantienen relativamente constantes, oscilando en torno a un "valor de equilibrio". El valor de equilibrio y el tiempo que se tarde en alcanzarlo dependerá del tránsito, el tipo de mezcla, los agregados y el clima.
- Durante ambas etapas existen variaciones reversibles asociadas a las estaciones del año, dando mayores valores en invierno y menores en



verano (LCPC n° 185) [1] (Brillet y Gothié, 1983) [10] (AASHTO, 2008) [11] (Highway Agency HD 28/04, 2004) [13] (TYROSAFE Proyect, 2010) [14].

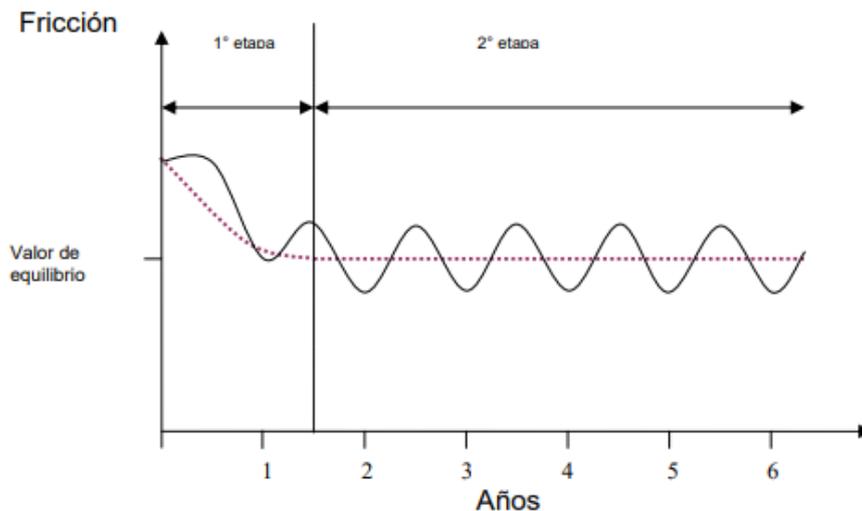


Figura 2.14. Variación teórica del coeficiente de fricción a lo largo de la vida de servicio

La macrotextura también modifica su valor inicial con el paso del tiempo y fundamentalmente del tránsito:

- Transversalmente al sentido de avance, luego de un tiempo empieza a diferenciarse la zona de rodada de la del centro del carril.
- Longitudinalmente, la macrotextura decrece hasta un valor mínimo que corresponde al máximo amasado de la superficie. Los valores alcanzados por la macrotextura dependerán del tipo de carpeta, de los áridos empleados en la mezcla y del nivel de tránsito solicitante.

2.3.1. Variación permanente del coeficiente de fricción

La variación del coeficiente de fricción depende de la variación de la macrotextura y de la pérdida de la microtextura superficial de los agregados



(pulimento). Estos procesos se asocian a la acción del tránsito y al clima.

Es sabido que los agregados de la superficie del pavimento son pulidos por la acción del tránsito, particularmente por los vehículos comerciales. Cuando se usan agregados muy susceptibles al pulimento puede producirse una caída del valor de la resistencia al deslizamiento hasta un punto donde se torne necesaria la repavimentación, antes de que la superficie haya agotado todo su potencial estructural. Consecuentemente, los agregados usados en superficies nuevas son elegidos basándose en su habilidad para resistir el pulimento, determinando su Coeficiente de Pulimento Acelerado a través del ensayo del mismo nombre, CPA.

La habilidad de los agregados para resistir al pulimento se debe a los siguientes factores, (Hosking, 1992) [3]:

- Composición y dureza individual de los granos: estos proveen la resistencia al desgaste necesaria para que un agregado sea durable.
- Granos de distinta dureza: cuando hay dos o más minerales, se forman planos o superficies de falla preferenciales, creando de este modo microtextura.
- Porosidad: la microtextura es generada por huecos en la superficie del agregado.
- Distribución y vinculación de granos: si los granos que están débilmente cementados por una matriz más blanda que ellos se pulen, pueden ser removidos por la acción del tránsito, renovando así la microtextura.

El coeficiente de fricción va variando su valor desde el momento de la puesta en servicio del pavimento, este deterioro será más o menos acelerado dependiendo del tipo de mezcla, del clima y del tránsito que lo solicita. Luego de un cierto período estos parámetros alcanzan un cierto "equilibrio", cuyo valor depende del clima, el tránsito y el tipo de agregados.



Se presentan aquí distintos modelos de distintos orígenes, obtenidos de la bibliografía: utilizado en el Programa HDM 4, desarrollados en el Transport Research Laboratory, y desarrollado en el Laboratorio Central de Puentes y Caminos.

2.3.1.1. Modelo HDM 4

El modelo propuesto para valorar la pérdida de la resistencia al deslizamiento propone: una pérdida anual calculada en función al tránsito, y un valor mínimo del coeficiente de fricción en el período de análisis limitado a un valor fijo. (HDM 4, 2000) [15]

Para el cálculo de la pérdida anual se utiliza la siguiente expresión:

$$\Delta SFC_{50} = K_{sfc} a_0 \text{ MAX}[0, \Delta CVD]$$

Donde:

ΔSFC_{50} = variación del coeficiente de fricción transversal durante el período de análisis anual, medidos a 50 km/h, con el equipo Scrim.

ΔCVD = incremento anual en la flota de vehículos pesados (veh/linea/día)

K_{sfc} = factor de calibración para la resistencia al deslizamiento, modificable por el usuario.

a_0 = coeficiente que depende del tipo de capa de superficie, por defecto los valores indicados en el HDM 4 son todos iguales a: $- 0.663 \times 10^{-4}$.

El valor mínimo del coeficiente de fricción al final del análisis anual se calcula como el valor anterior menos la variación anual, pero limitado a un valor mínimo de coeficiente de fricción de 0.35, como se muestra en la siguiente expresión:



$$SFC_{50b} = \text{MAX}[(SFC_{50a} + \Delta SFC_{50}), 0.35]$$

Donde:

SFC_{50b} = Coeficiente de rozamiento transversal, medido a 50 km/h, al final del análisis anual

SFC_{50a} = Coeficiente de rozamiento transversal, medido a 50 km/h, al comienzo del análisis anual.

ΔSFC_{50} = Cambios incrementales en el coeficiente de rozamiento transversal, medido a 50 km/h, durante el análisis anual.

0.35 = Valor adoptado como mínimo en el modelo HDM 4

2.3.1.2. Modelos Transport Research Laboratory

A continuación se exponen dos modelos del Transport Research Laboratory (TRL) para predecir el valor mínimo de fricción que tendrá la superficie del camino (valor que el modelo del HDM 4 fue elegido como fijo e igual 0.35). (Roe-SA Hartshorne, 1994) [16]

A principios de 1970, se estableció una relación para predecir la resistencia al deslizamiento (medida como coeficiente de rozamiento transversal de verano) a partir del Coeficiente de Pulimento Acelerado (CPA) o Polish Stone Value (PSV) de los agregados y el nivel de tráfico esperado en términos de Número de Vehículos Pesados por carril por día (CVD). Esto fue usado como base para definir las especificaciones en la construcción de nuevas rutas. (Szatkowski and Hosking, 1972) [17]

Por comodidad se designará al Coeficiente de Pulimento Acelerado con las siglas CPA y al Número de Vehículos pesados por carril por día como CVD por analogía con el modelo del HDM 4.



En este modelo denominado "lineal", se considera que el valor de equilibrio está representado por el del "coeficiente medio Scrim de verano" (MSSC) que es el promedio de tres o más mediciones hechas con el equipo Scrim, realizadas en el mismo tramo, durante el período de verano. Es conocido como "coeficiente Scrim de equilibrio".

La relación es la siguiente, graficada en la Figura 2.15:

$$\text{MSSC} = 0.98 \times 10^{-2} \times \text{CPA} - 0.664 \times 10^{-4} \times \text{CVD} + \text{K}$$

Donde:

MSSC= coeficiente Scrim de verano

CPA= coeficiente de pulimento acelerado del agregado

CVD= vehículos pesados por carril por día (se define como vehículo comercial a todo aquel que supere las 1.5 toneladas descargado).

K= coeficientes de ajuste. Según Szatkowski and Hosking, 1972, K=0.033, obtenido en base a experiencias de mediciones sobre tramos reales.

Se observó que, en ciertas circunstancias, la resistencia al deslizamiento calculada en la práctica no concordaba con la establecida sobre la base de las relaciones CPA-CVD planteadas, sobre todo para tránsitos elevados. Algunos agregados se comportaban mejor que lo esperado y otros presentaban un mayor pulimento. Esto no es extraño, dado que ninguna relación derivada de datos físicos es un modelo ideal y no se puede adaptar exactamente a todas las situaciones. Sin embargo las discrepancias son motivo de preocupación.

Anexo 5. Fichtinger, A., Bardos, A., Szalay, Z., Edelmann, J., Plochl, M. (2022). Pneumatic Tyre Aquaplaning: an Experimental Investigation on Manifestations and Influences of ppearance. [06 pg todo \(1\).pdf](#)] *Institute of Mechanics and Mechatronics, TU Wien...* 1-22

Pneumatic Tyre Aquaplaning: an Experimental Investigation on Manifestations and Influences of Appearance

**Andreas Fichtinger¹, Ádám Bárdos², Zsolt Szalay²,
Johannes Edelmann¹, Manfred Plöchl¹**

¹ Institute of Mechanics and Mechatronics, TU Wien, Getreidemarkt 9, 1060 Vienna, Austria, e-mail: andreas.fichtinger@tuwien.ac.at, johannes.edelmann@tuwien.ac.at, manfred.ploechl@tuwien.ac.at

² Department of Automotive Technologies, Budapest University of Technology and Economics, Stoczek utca 6, 1111 Budapest, Hungary, e-mail: bardos.adam@kjk.bme.hu, szalay.zsolt@kjk.bme.hu

Abstract: Aquaplaning at wet road conditions and high speeds can be a source of dangerous driving situations and accidents. The proper understanding of characteristic effects can be crucial in early aquaplaning detection and accident avoidance, essential for driver and driver assistance systems and trajectory planning for self-driving cars. Four test vehicles were equipped with a basic measurement system, and measurements were performed to evaluate characteristics of aquaplaning, such as wheel spin-up and wheel spin-down, change of rolling resistance, tyre slip slope, and tie rod force. Driveline configuration, type, wear and inflation pressure of the tyre(s), water level height next to chosen speed and performed manoeuvre significantly affect vehicle behaviour and thus the possibility to detect aquaplaning conditions. The results and main findings may allow and help establish corresponding methods to early detect aquaplaning and dangerous driving conditions.

Keywords: Aquaplaning; Hydroplaning; Vehicle Dynamics; Advanced Driver Assistance Systems, Active Safety Systems; Identification and Estimation

1 Introduction

Rain and wet road conditions frequently cause critical driving situations and may result in accidents. While damp roads with thin water level heights are the cause of only a minor reduction of the maximum tyre forces, larger water level heights at higher speeds may lead to aquaplaning. The latter situation may become critical when aquaplaning appears suddenly and unexpectedly, and the longitudinal and lateral friction coefficients will drop to a level close to zero. Loss of vehicle control

and, in the worst case, loss of stability may be the consequence. Wet road conditions contribute considerably to road accidents, [1]. [2] indicates that approximately 20% of accidents occur at wet road conditions. However, the evaluation of the exact share of aquaplaning is difficult, [3], [4]. Also, questions on liability at aquaplaning related accidents are challenging [5], in particular referring to influences from tyre conditions, road maintenance, and vehicle speed.

This paper addresses a comprehensive experimental investigation on pneumatic tyre aquaplaning considering a variety of realistic driving and environmental conditions. Characteristic effects that may indicate the appearance and intensity of aquaplaning, such as wheel spin-up and wheel spin-down, change of rolling resistance, tyre slip slope, and tie rod force, will be analysed in more detail. None of these effects is unique to aquaplaning, but can also be observed for other tyre–road conditions, as for snow covered roads, to give just an example. In addition, and in particular studied here, several other actual facts show a strong influence, these include: vehicle speed and performed manoeuvre, water level height, type, wear and inflation pressure of the tyre(s), and last but not least, the driveline concept, i.e. front-wheel (FWD), rear-wheel (RWD) and all-wheel drive (AWD). The revealed findings may promote the development of an on-board algorithm that combines presented characteristic effects and may allow to detect early aquaplaning, and therefore prevent serious driving situations such as loss of stability.

The extensive investigation of pneumatic tyre hydroplaning has started as early as in the 1950s by NASA, mainly with the aim to prevent hydroplaning of aircraft tyres on wet runways. At the hydroplaning speed the hydrodynamic lift developed under the tyre equals the partial weight of the vehicle acting on the tyre and any further increase in speed beyond this critical speed must force the tyre to lift completely off the runway surface, which is termed total aquaplaning, from [6]. Subsequently, the tyre is defined to be partially/total aquaplaning at speeds below/above the aquaplaning speed. As the hydrodynamic pressure is a function of vehicle speed, and by ignoring tread design and surface texture and assuming the fluid depth on the surface to be greater than tyre tread groove depths, a simple relation for the hydroplaning speed V_p is giving in [6],

$$V_p = k_1 \sqrt{\frac{F_V}{A_G}} \sim k_2 \sqrt{p} \quad , \quad (1)$$

with parameters k_1, k_2 , vertical tyre load F_V , gross tyre contact area A_G , and inflation pressure p of the tyre. Already this simple formula reveals key influences that will be considered in the following chapters. A similar empirical formula for automobile tyres is given in [7], which incorporates the water level height as well.

At speeds below the hydroplaning speed, the contact area may be considered to comprise three zones, which is illustrated in Figure 1 [8]. In zone A, the tyre contacts the water film and the bulk of the surface water is displaced away from the path of the tyre or into the grooves. Zone B is a transition, a thin-film zone, where partial hydroplaning occurs. In zone C, the water film has been totally or

substantially removed, the tread rubber and road surface are in intimate dry contact and dry road friction conditions prevail, [8].

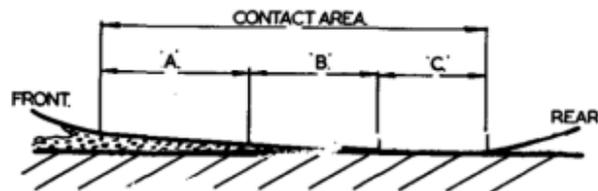


Figure 1

Illustration of three zone contact area modelling [8]

The dimensions of the individual zones will typically not be constant when driving on a wet road with varying conditions and speeds. With increasing speed, the bulk zone penetrates towards the rear edge of the contact area. While the dry road contact section is narrowing, the effective friction coefficient of the tyre decreases progressively. Finally, at total hydroplaning, the bulk zone fully dominates the “contact area” and the effective coefficient of friction is substantially zero. Hence, the control of vehicle dynamics by the tyres forces cease. The progression of aquaplaning with increasing speed is graphically portrayed in Figure 2, confirming the findings presented in [6]. A comprehensive study about the contact patch deformation and tyre carcass deflections during aquaplaning is published in [9] and [10], utilizing accelerometers and optical sensors installed at the inner layer of the tyre.

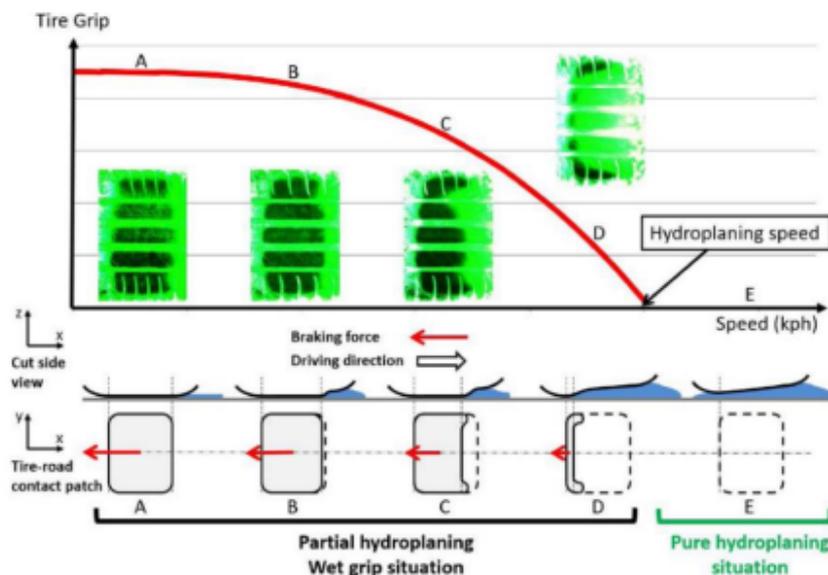


Figure 2

Diminishing of tyre grip during the evolution of aquaplaning [3]

Many different characteristic effects of hydroplaning were examined in relation to investigations of aircraft tyres. Aquaplaning behaviour of free rolling aircraft wheels, represented as a single wheel in combination with a bogie, is presented in [11], where wheel spin-down and various influences thereon are described. [12] focuses on the influence of tyre inflation pressure, tread depth, and tread width, together with the macro texture of the pavement on the wheel spin-down effect. [13] lists eight types of characteristic effects of hydroplaning and presents measurement results with specifically instrumented tyres and wheel fixtures on different runways. Hydrodynamic pressure measurements and glass plate photographs provide essential information for the understanding of the tyre-ground contact shape and the pressure variations. [14] investigates wheel spin-down besides tyre parameters. Very comprehensive observations of the hydroplaning effects are given in [6]. In this study, eight characteristic effects are analysed: the detachment of the tyre footprint, the hydrodynamic ground pressure variation, the wheel spin-down, the suppression of tyre bow wave, the scouring action of escaping fluid, the peaking of the fluid displacement drag, the loss in braking traction, and the loss of directional stability. [15] gives an overview of the hydroplaning phenomenon.

In addition to the above investigations, other aquaplaning effects can be sensed, in particular on vehicle level, and are also of practical relevance. For example, the driver can usually feel aquaplaning as a decrease in steering wheel torque and responsiveness to steering input, and for cars with front-wheel drive, as an increase of engine speed during acceleration. Irregular water films under the right and left wheels may cause permanent or a series of short pulse drags at the individual wheels owing the increased rolling resistance at varying aquaplaning conditions.

The paper is organized as follows: Chapter 2 briefly introduces the applied measurement setup. Chapter 3 analyses the measured individual characteristic effects of aquaplaning, organized into five sub-chapters to address wheel spin-down, wheel spin-up, rolling resistance, tyre slip slope, and steering tie rod force change, respectively. Influences of different driveline configurations (FWD, RWD, and AWD), tyre types (including summer and winter tyres), inflation pressures, and water level heights will be discussed for different driving manoeuvres and vehicle speeds. In Chapter 4, main conclusions are drawn and possible utilization of the findings briefly addressed.

2 Measurement Setup

Four different vehicles were used to represent different driveline configurations, one front-wheel (FWD), two rear-wheel (RWD), and one all-wheel drive (AWD) vehicle. All of the cars were equipped with a dual antenna differential GNSS system to monitor the vehicle's motion accurately. With direct access to the vehicle data BUS communication provided by an Inventure Automotive FMS Gateway, the

following signals were recorded during each of the test runs: individual wheel speeds, actual engine torque and speed, current gear, driveline engagement, steering wheel position, accelerator pedal position, brake pressure, and 3-axis accelerations/angular velocities from an inertial measurement unit (IMU). At the AWD vehicle also the tie rod forces were measured. The actual water level heights were continuously recorded by an optical Lufft MARWIS sensor [16], see corner of Figure 3.

For the FWD vehicle tests (vehicle A), a front-engine car was used, equipped with one year old medium worn summer tyres of dimension 205/55 R16V (~ 5 mm tread depth), Figure 3. The nominal tyre inflation pressure was 2.3 bar at the front tyres and 2 bar in the rear tyres. The mass of the vehicle was about 1450 kg during the tests.

For the RWD vehicle tests a rear-engine (vehicle B) and a front-engine (vehicle C) car were used. Vehicle B was equipped with three years old (very) worn summer tyres of dimension 245/35R20 at the front axle (~5 mm tread depth) and dimension 305/30R21 at the rear axle (~2 mm tread depth). The lowest recommended and called here the low or nominal tyre inflation pressure, was 2.2 bar at the front tyres and 2.3 bar at the rear tyres. The actual mass of the vehicle was about 1750 kg during the tests. Vehicle C was equipped with almost new slightly worn summer tyres of dimension 245/35R19 at the front axle (~7 mm tread depth) and dimension 265/35R19 at the rear axle (~ 7 mm tread depth). The nominal tyre inflation pressure was 3 bar at all tyres. The mass of the vehicle was about 1800 kg during the tests.

For the AWD vehicle tests, a rear-engine vehicle was used. Vehicle D was equipped with three years old medium worn summer tyres of dimension 245/35R20 at the front axle (~ 4.5 mm tread depth) and dimension 305/30R20 at the rear axle (~ 4.5 mm tread depth). The nominal tyre inflation pressure was 2.4 bar at the front tyres and 2.7 bar in the rear tyres. The actual mass of the vehicle was about 1910 kg during the tests.



Figure 3

FWD Vehicle A on wet lane, watered with sprinklers; MARWIS sensor, [16], to measure water level heights

The measurements were carried out on two separate lanes of the ZalaZONE Automotive Proving Ground [17] braking platform. For tests performed with deeper (more than 2 mm) water levels an aquaplaning basin was used, where a calm and

constant water level height can be adjusted. For water level heights less than 2 mm, an asphalt lane without lateral grade was chosen with adjustable water sprinklers on the lane's left-hand side, see Figure 3, to set a defined water level height from 0.6-2 mm.

3 Experimental Study of Different Characteristic Effects of Pneumatic Tyre Aquaplaning

3.1. Wheel Spin-Down

Probably the most easily observable characteristic effect of partial or total aquaplaning is the slowdown of free-rolling (undriven and unbraked) vehicle wheels and corresponding drop of rotational wheel speeds. The wheel-spin down effect can be explained on a physical basis. With increasing vehicle speed, a growing water wedge develops progressively at the front area of the tyre ground contact area, see Figure 2 (tyre footprints A to E), back to the rear, reducing the size of the dry zone, where the tyre adheres to the ground (zone C in Figure 1). Finally, the tyre footprint will disappear, which marks the aquaplaning speed resulting in total tyre aquaplaning. Then, the vertical force developed by the water hydrodynamic pressure is in balance with the vertical tyre load. At (partial) aquaplaning, the centre of the hydrodynamic lifting force is located forward of the wheel centre which causes a moment opposing the drag forces on the tyre; as this moment increases, the spin-down of the wheel begins, [18].

Measurement results for RWD vehicle C clearly reveal the wheel-spin down effect of the free-rolling front wheels as shown in Figure 4(a). The output rate of the water sprinkler was set to provide a constant water level height of 1.1 mm. The speed of the test runs was incremented by 10 km/h steps from 70 km/h to 110 km/h to cover the relevant region of possible aquaplaning for the medium worn summer tyre. After accelerating to the target speed on a flat dry road, the wet area was entered at 10 s. Then, the driver holds the target speed, usually by a moderate increase of the accelerator pedal position due to the increased rolling resistance on the watered area. At the end of the watered lane the vehicle was stopped.

At 70 km/h target speed, there appears no sign of partial aquaplaning from wheel spin-down, the speeds of front wheels coincide with the measured GPS velocity v_x of the vehicle. At 80 km/h target speed, the first very minor signs of the spin-down events appear at the front right wheel from the hardly noticeable mismatch with the vehicle velocity. With increasing speed, continuous and minor as well as individual and pronounced spin-down events, show up. Roughly speaking, total aquaplaning at the front right tyre could be attributed close to 100 km/h.

Corresponding to Figure 4(a), the longitudinal slip s_x for the front tyres are derived and plotted as function of target speed in Figure 4(b). The required effective rolling radius has been adopted from the dry asphalt lane. It turns out that the longitudinal slip of the front right tyre decreases with speed in an exponential manner for these constant speed manoeuvres. The front left tyre shows only minor slip events. The reason is that the water sprinklers are located on left-hand side in driving direction with slightly more water on the right-hand side of the lane and therefore reducing aquaplaning speed.

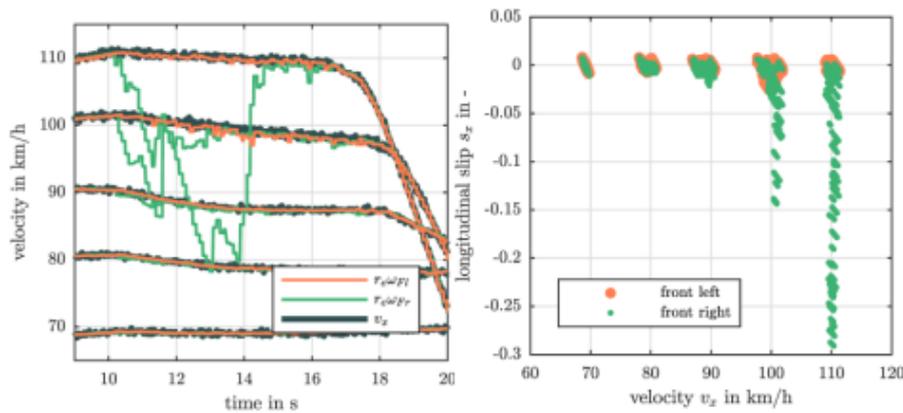


Figure 4

(a) Wheel spin-down events at the front non-driven wheels of RWD vehicle C;

(b) Longitudinal slip of the front tyres of RWD vehicle C corresponding to (a);

1.1 mm water level height; medium worn summer tyres; nominal inflation pressure

Figure 5(a) shows all wheel speeds of FWD vehicle A for the constant speed test runs. The watered lane starts again at 10 seconds. No total aquaplaning appears at any tyre, and first signs of partial aquaplaning with continuous light spin-down events of the rear right wheel turn up at 105 km/h target speed. The extent of spin-downs of the FWD vehicle is much smaller compared to the RWD vehicles for two main reasons: first, at the FWD vehicle, the rear wheels are free-rolling in the cleared path of the front wheels with a smaller height of the remaining water film. Secondly, tyre type, size, and load is different for the two test vehicles. At the driven front wheels, continuous slight spin-ups appear at higher speeds.

After increasing the water level height from 0.8 mm to 1.8 mm, Figure 5(b), spin-down events at the rear right wheel show up more clearly. At the same time, 10-14 s, obvious and pronounced spin-up events at the front right wheel indicate that although the driver intends to balance the increased rolling resistance and to keep the vehicle speed constant by pushing the accelerator pedal, the vehicle slightly slows down in this period from loss of traction.

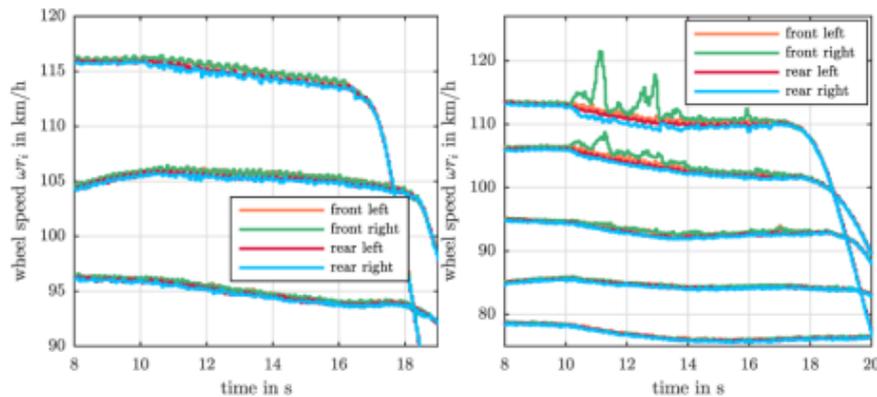


Figure 5

Wheel spin-down and spin-up events at FWD vehicle A; (a) 0.8 mm water level height; (b) 1.8 mm water level height; medium worn summer tyres; nominal inflation pressure

3.2. Wheel Spin-Up

Drivers usually do not sense spin-down events of the free-rolling wheels on wet surfaces, but often detect the loss of traction from the sudden increase of the engine speed, especially when accelerating, due to partial or total aquaplaning of the driven wheels. This is experienced more likely at an FWD vehicle, where the driven wheels are exposed to a thicker water film compared to the rear wheels, where some water may have already been removed from the road by the front wheels.

In Figure 6 an acceleration manoeuvre with FWD vehicle A on the wet lane with 1.2 mm water level height is presented. The driver started to accelerate at 24 s with full throttle. Small spin-up events appear immediately and considerable wheel and vehicle speed differences can be observed at 25 s and 27 s. To better understand these two peaks, the traction coefficients for both front tyres were calculated and plotted based on the estimated engine torque. At 25 s, the traction coefficient dropped to 0.15, which indicates partial aquaplaning. At 27 s, the traction coefficient is below 0.05, which indicates total aquaplaning of the front right tyre. Although wheel spin-up with a low traction coefficient is a good indicator of aquaplaning, additional information is required to distinguish from similar effects at other low friction surfaces, such as ice- or snow-covered roads.

Next, the driver accelerates multiple times moderately with RWD vehicle B, releases the accelerator pedal, with two further repetitions on the wet lane with 1.1 mm water level height. The effect of the vehicle speed on the traction coefficients, derived during the emerging and pronounced wheel spin-up events, is outlined in Figure 7. The traction coefficient, which equals the coefficient of friction at the wheel spin-up events, declines with speed from about 0.55, for wet road conditions with partial aquaplaning, to about 0.05, for total aquaplaning conditions at the rear right tyre.

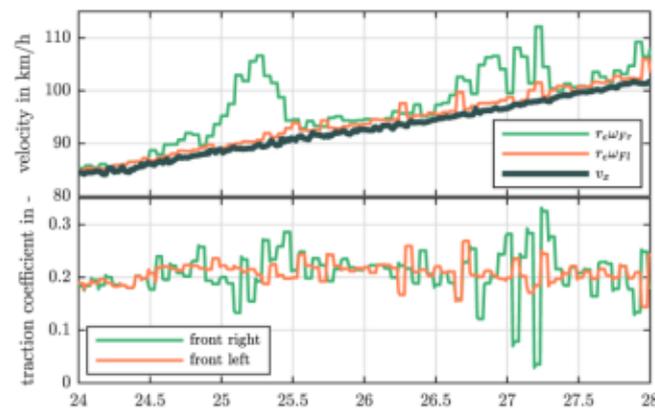


Figure 6

Wheel spin-up events and traction coefficient at FWD vehicle A; 1.2 mm water level height; medium worn summer tyres; nominal inflation pressure

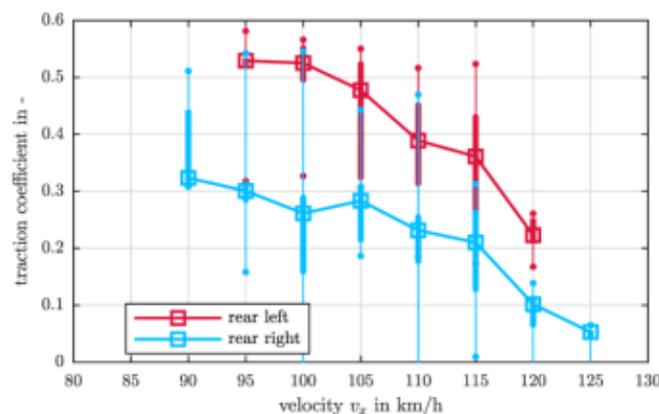


Figure 7

Traction coefficients from wheel spin-up events at RWD vehicle B; 1.1 mm water level height; very worn summer tyres; nominal inflation pressure

Combined wheel spin-up and wheel spin-down events appear when driving with RWD vehicle C at a constant speed above the total aquaplaning speed on the wet lane with 1.1 mm water level height, Figure 8. Immediately after entering the wet lane with 130 km/h, the front right wheels show a strong spin-down, while at the rear wheels only slight spin-up events can be observed. The driver held the steering wheel in centre position and applied about 40 % throttle to maintain velocity. After 13 seconds both rear wheels start to spin-up considerably, destabilizing the vehicle motion. An immediate, but initially very moderate growth of the yaw rate is noticeable. In reaction, the driver released the accelerator pedal and tried to stabilize the vehicle by steering, which was not successful, and the vehicle dangerously slid uncontrolled and turned around its vertical axis. After full braking on the dry road, the vehicle came to a complete stop some meters laterally

deviated from the straight wet lane. The addressed phenomena highlight a main difference between the behaviour of FWD and RWD vehicles at possible aquaplaning situations: a spin-up of the front wheels of an FWD vehicle, generally observed together with degraded acceleration potential and less responsiveness of the vehicle to steering input, typically indicates partial or total aquaplaning in general at lower speeds compared to an RWD vehicle, where the rear wheels face less water at the same speed. If the spin-down events of the front wheels of an RWD vehicle are ignored and speed is increased further, subsequent loss of stability can hardly be handled by the driver. Advanced autonomous driving motion control functions could offer solutions for handling such accidental situations in the future similarly as presented in [19].

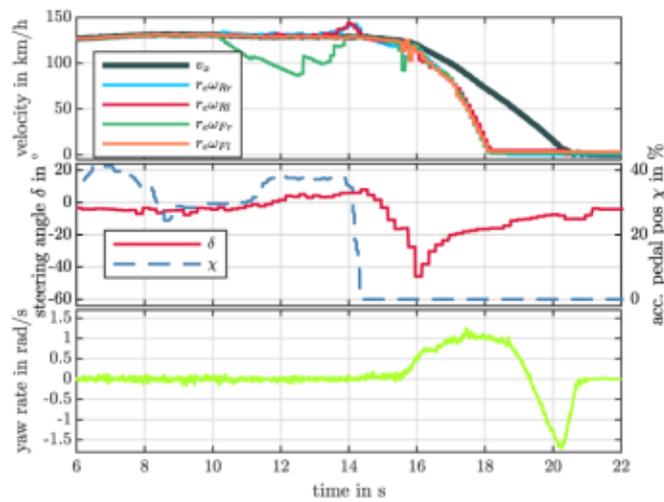


Figure 8

Loss of stability of RWD vehicle C at 130 km/h after wheel spin-up at the rear wheels; 1.1 mm water level height; medium worn summer tyres; nominal inflation pressure

3.3. Change of the Rolling Resistance

A tyre, rolling on a wet surface with a significant layer of water, will displace water from its contact patch depending on tread pattern (condition) and road surface, speed, water level height, etc. A water wedge develops at the leading edge and rolling resistance is increased, e.g. [7].

The estimation of the additional rolling resistance Δa_{res} from a wet road, which is derived from the difference of the nominal acceleration a_{nom} and the actually measured acceleration a_{meas} from the ESC sensor, including a given a_{offset} ,

$$a_{\text{nom}} = \left(\sum_{i=1}^4 \left(\frac{T_{i,l}}{r_{l,i}} - \frac{I_{w,i} \dot{\omega}_i}{r_{l,i}} - r_{w,i} F_{z,i} \right) - c_w v_x^2 \right) / m \quad (2)$$

$$\Delta a_{\text{res}} = a_{\text{nom}} - a_{\text{meas}} + a_{\text{offset}}, \quad (3)$$

is a good indicator of the water level height, with vehicle mass m , aerodynamic drag coefficient c_{ws} , vehicle velocity v_x , dry road rolling coefficient $r_{w,i}$, loaded radius $r_{l,i}$, wheel torque T_i and vertical tyre force $F_{z,i}$ of each wheel i .

Figure 9 shows the acceleration difference Δa_{res} for the transition from the dry asphalt lane to the wet lane with 108 km/h (constant) speed. The distinctive change of the rolling resistance indicator signal, which correlates to water level height and to speed, clearly marks the transition to the wet road where partial aquaplaning appears. The small delay of 0.3 s from signal processing of the water level sensor has not been removed.

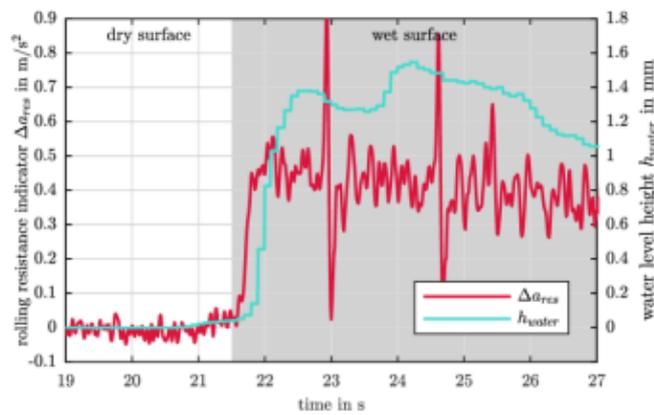


Figure 9

Rolling resistance indicator for transition with RWD vehicle B from dry asphalt to the wet lane with measured water level height; very worn summer tyres; nominal inflation pressure

In Figure 10(a) the influence of the water level height on the rolling resistance indicator for various manoeuvres is presented for RWD vehicle B with very worn summer tyres and nominal, i.e. low, inflation pressure. For all water level heights, the rolling resistance signal increases with speed. For (the three) lower water level heights, the rolling resistance indicators change in a similar way with speed. For 2 mm water level height, which represents a considerable amount of water on the road, both rolling resistance level and gradient increase with speed. For all water levels and speeds the minimum acceleration difference Δa_{res} is about 0.2 m/s².

Increased rolling resistance on the wet lane, with small water level heights as presented in this study, dominates changes in rolling resistance from tyre inflation pressure changes between low/medium/high on the dry lane. No clear influence of low/medium/high inflation pressures at RWD vehicle B on the rolling resistance indicator can be noticed in Figure 10(b), except for speeds close to total aquaplaning. The inflation pressure is 2.4/2.8 bar at the front and 2.7/3.3 bar at the rear tyres for medium/high nominal inflation pressure. The dry road rolling coefficient has not been adapted to the different tyre inflation pressures.

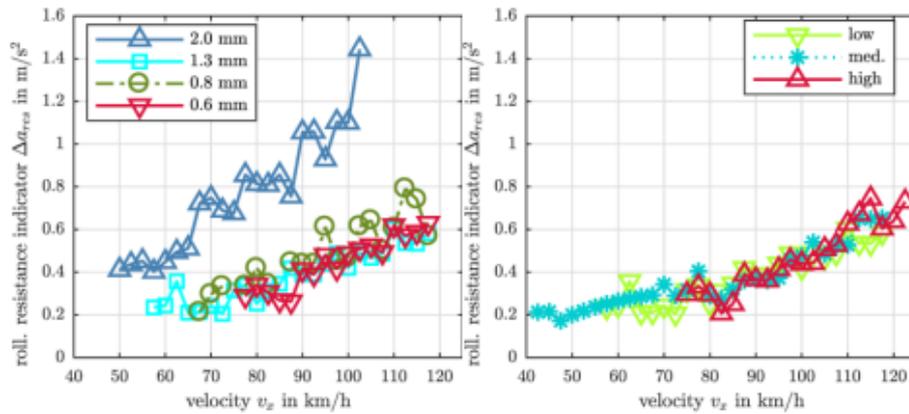


Figure 10

Rolling resistance indicator for RWD vehicle B; (a) for different speeds and water level heights; (b) for different speeds and tyre inflation pressures; very worn summer tyres; nominal inflation pressure

The influence of worn summer tyres and new winter tyres on the rolling resistance indicator is depicted in Figure 11 for two water level heights, 1.3 mm and 2 mm. The lines for the higher water level height are above the lines for the lower water level height. The lines for the worn summer tyres show a larger gradient and are above the lines for the new winter tyres, which may be attributed to the better lateral drainage capability of the winter tyres.

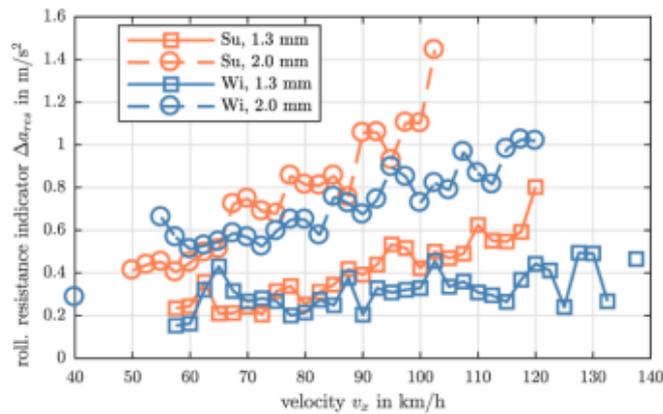


Figure 11

Rolling resistance indicator for RWD vehicle B with very worn summer tyres and new winter tyres; 1.3 mm and 2 mm water level heights; nominal inflation pressure

3.4. Change of the Slip Slope

Also, the gradient of the traction coefficient with respect to the longitudinal slip has been analysed. It has been reported that the measured slip slope changes on low friction surfaces, [20], so a change of slip slope might be expected at aquaplaning

conditions as well, which will be addressed now in more detail. Although basic tyre modelling theory gives no reason to expect a dependency of the slip slope from the friction coefficient, [21], the additional intermediate layer between tyre and road, such as snow or ice, and other possible effects are proposed as possible reasons for the observations, e.g. [22]. At partial aquaplaning, the wet contact area will not contribute to the horizontal shear stresses, so the reduction of the contact patch length is the main cause for the lower slip slopes. The reduction of the contact patch length, depending on speed and tyre inflation pressure, is characterized in [6], [9].

Figure 12 includes the calculated traction coefficients and longitudinal slips on dry and wet asphalt from Figure 9. The normalized slip slopes \bar{C}_{sx} for the dry and the wet lane are included and reveal that the measured slip slope considerably decreased at partial aquaplaning.

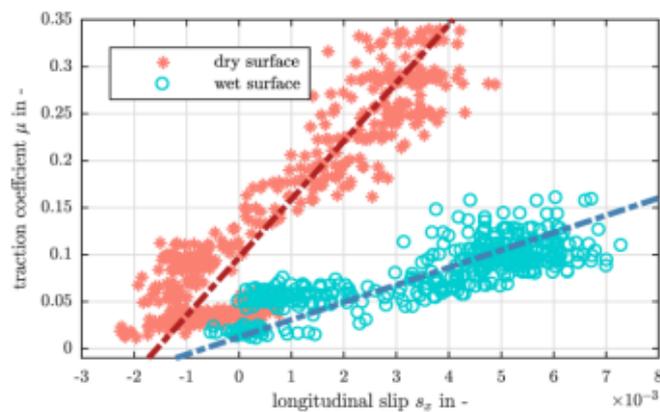


Figure 12

Traction coefficient and longitudinal slip data points with fitted slip slope for the dry and the wet asphalt lane corresponding to Figure 9

Figure 13(a) shows the slip slope change of the driven wheels of RWD vehicle B as a function of speed for the worn summer tyres with nominal inflation pressure. The resulting curves clearly outline the expected decrease of the derived slip slopes for higher speeds with increasing partial aquaplaning. Slip slopes for the left hand-side are higher than for the right-hand side as one would expect from the discussion in context with Figure 4(b). The slip slope of these tyres and inflation pressure on dry asphalt is approximately 100. Interestingly, the change of the water level height from 0.6 mm to 2.0 mm in four steps does not show a clear influence on the slip slope curves. A possible explanation is that the residual water film at the rear wheels, which the front tyres did not displace, does not change in the amount as for the front tyres. Nevertheless, the observed difference for the left and right tyres from the inhomogeneity of conditions at both sides remains, and both effects may contribute in some way to the presented characteristics.

In Figure 13(b) the tyre inflation pressure is varied for the worn summer tyres at the RWD vehicle B and a nominal water layer height of 1.3 mm.

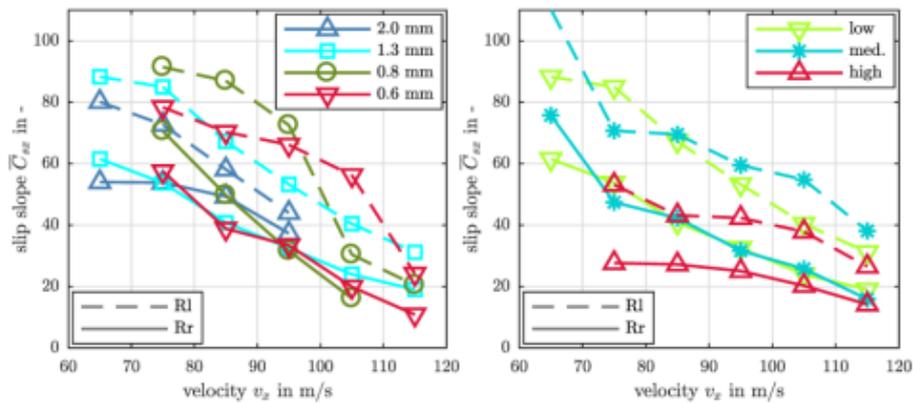


Figure 13

Slip slope at rear tyres (very worn summer tyres, nominal inflation pressure) of RWD vehicle B (a) for different speeds and water level heights; (b) for different speeds and inflation pressures; 1.3 mm water level height

All slip slope curves have a negative gradient at partial aquaplaning and again a difference between left and right wheels appears. While the slip slope curves for the low and medium inflation pressure show a similar level, the level for the high inflation pressure is clearly lower. For low speeds between 60 to 80 km/h only few valid data points were available, which leaves some uncertainties in this range.

In contrast to summer tyres, tests with new winter tyres on RWD vehicle B show that over the whole considered speed range from 60 to 130 km/h, the estimated slip slope remains at low levels with no significant gradient, Figure 14. Obviously, the winter tyres do not experience any significant partial aquaplaning for both water level heights and all speeds.

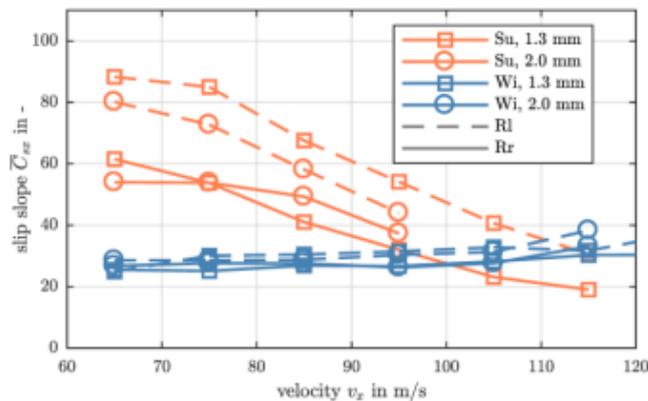


Figure 14

Slip slope at rear tyres of RWD vehicle with medium worn summer tyres and new winter tyres; 1.3 mm and 2 mm water level heights; nominal inflation pressure

3.5. Change of the Tie Rod Forces

An indication for total aquaplaning at the front tyres is a light steering torque experienced by the driver. In this case, almost no lateral tyre forces are developed and also no aligning moments appear. Experience from several manoeuvres during this study shows, that even for small required corrections to keep the intended path, drivers tend to increase the steering angle as long they do not see the expected vehicle reaction (yaw rate). This is in particular critical, if, for example, full aquaplaning ends at one front tire and lateral forces are developed suddenly, which may result in a spinning vehicle.

Tie rod forces, which include components of lateral/longitudinal/vertical tyre forces and aligning moment, depend on coefficient of friction between tyres and road. Therefore, they have been suggested to estimate the friction coefficient, e.g. in [23] and [24], but could be relevant to detect effects of partial and total aquaplaning as well.

Modelling and reliably estimating the aligning moment in the remaining contact patch at partial aquaplaning condition, including areas of adhesion and sliding, appears to have little prospect of success due to many influences, which are difficult to quantify themselves. CFD and FEM simulation [25] will help in this respect and support better understanding, but is beyond the scope of this publication and will not suit for real time aquaplaning detection methods.

Instead, a comparison of calculated tie rod forces, on the assumed dry lane, with measured forces, on the actual wet lane, is proposed, that could indicate partial aquaplaning, similar to the rolling resistance indicator in Chapter 3.3. Based on a quasi-static vehicle model, vertical tyre forces are determined from vehicle mass, geometry and measured longitudinal and lateral accelerations. The front lateral tyre forces are calculated from a simple 2-wheel vehicle model and distributed between left and right proportional to the vertical tyre forces. Basic parameters for the front suspension geometry like, e.g. individual tyre steering angles, tie rod lever arms, kinematic trails, etc., are derived from MBD simulations and are included as polynomials over steering wheel angle. There results the tie rod forces $F_{tr,i} = F_{tr,i}(\delta_i, F_{x,i}, F_{y,i}, F_{z,i})$ for each front wheel i .

A (almost) constant speed, without longitudinal tyre forces at the front wheels, acceleration manoeuvre with longitudinal traction forces, and a constant speed slalom manoeuvre with AWD vehicle D running over the aquaplaning basin will be discussed subsequently.

For the constant speed, straight-line driving manoeuvre in Figure 15(a), typical spin-down aquaplaning events appear at the front right wheel. The right wheels were running in the aquaplaning basin with a water level height of about 2 mm, whereas the left wheels were running on damp asphalt. Both front wheels can be considered free rolling since no traction torque was distributed to the front axle.

Total aquaplaning causes a significant change of the measured tie rod forces, which change to a much higher level in comparison to the calculated nominal values. Obviously, the changing of conditions in the tyre contact patch, such as contact length, friction coefficient, pressure distribution, due to partial or total aquaplaning condition will lead to changes in the wheel force balance and therefore in the steering torque, felt by the driver or recorded by tie rod force transducers. Even during very short spin-downs, e.g. at 12.6 s and 18.7 s, measured tie rod forces at the front right wheel differ significantly from the calculated forces. At the end of the spin-downs, the measured tie rod forces immediately decrease to the level of the calculated forces. The measured left tie rod force is similar to the calculated forces, but shows small differences during larger spin-downs of the right wheel.

In Figure 15(b) a rather extreme manoeuvre is presented with repetitions of accelerating with $1-1.5 \text{ m/s}^2$ in the aquaplaning basin with 7 mm water level height, similar to filled wheel ruts on a road. The entry speed at 17 s is already close to the aquaplaning speed and a minor decrease of the wheel speed occurs at the front left wheel immediately. In contrast, to the spin-downs from total aquaplaning at the previous manoeuvre, Figure 15(a), a small amount of traction torque was distributed to the front wheels at the beginning of the acceleration period at 17 s, which prevented the development of a large spin-down. With increased speed and acceleration, the left wheel speed increases again and even shows a short spin-up event at 19 s. Despite aquaplaning causes only small deviations of the wheel speeds here, the corresponding tie rod forces change dramatically. At the end of the second acceleration period between 22.8 s to 24.5 s, the front left wheel shows a large spin-up followed by a short spin-down at 25 s. The measured tie rod forces again differ significantly from their nominal values and increase in both cases for spin-up and spin-down.

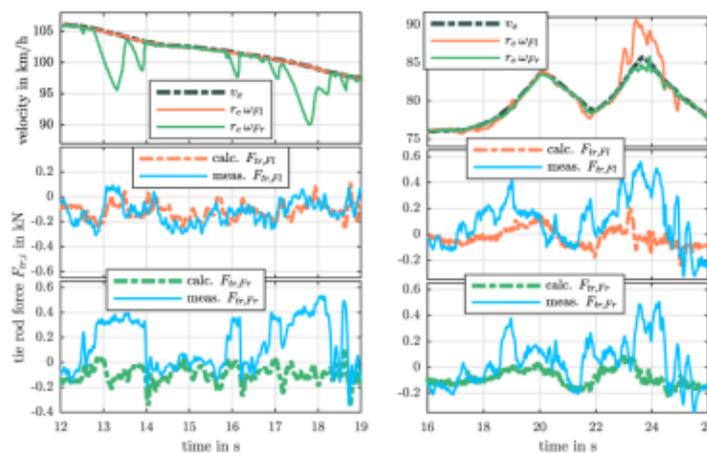


Figure 15

(a) Tie rod force indicator of AWD vehicle D for a constant speed, straight-line driving manoeuvre; medium worn summer tyres; nominal inflation pressure; 2 mm water level height; (b) Tie rod force indicator of AWD vehicle D for an acceleration, straight-line driving manoeuvre; medium worn summer tyres; nominal inflation pressure; 7 mm water level height

The final manoeuvre, Figure 16, is a moderate slalom at almost constant speed and lateral accelerations of 1-2 m/s². Wheel speeds show a series of short spin-down events at both tyres. A mismatch between steering angle (driver input) and lateral acceleration (vehicle reaction) becomes obvious when total aquaplaning at both front tyres occurs at 23.2 s, 25.4 s and from 27.3 s to 27.7 s.

Although changes of tie rod forces can give a good indication of aquaplaning at a tyre, their measurement requires additional sensors that are not common in production cars. An alternative is the utilization of an available total steering rack force, which can give limited information on a change in individual tie rod forces. In case of aquaplaning at both front wheels, the steering rack force does not change, but in case of one-sided aquaplaning, a clear difference to nominal values can be detected. Alternatively, in case of full aquaplaning at both wheels, steering angle, lateral acceleration and yaw rate in combination with the steering rack force may serve as a good indicator instead.

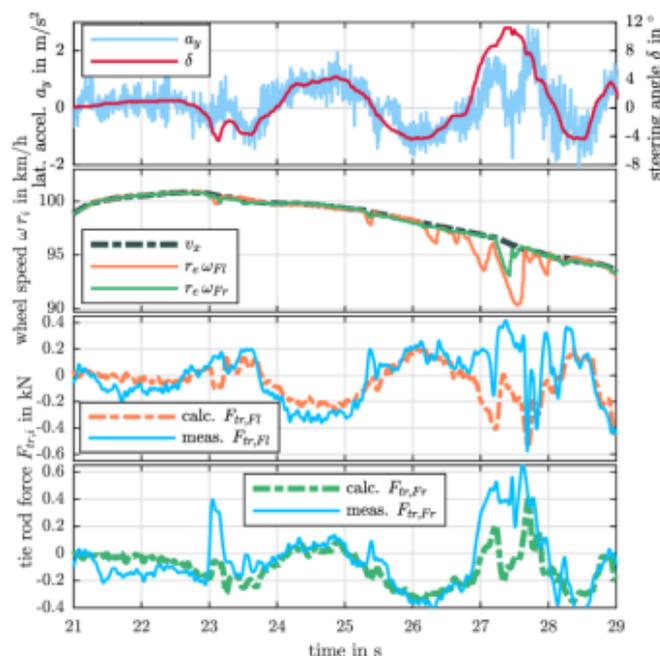


Figure 16

Tie rod force indicator of AWD vehicle D for a constant speed slalom manoeuvre; medium worn summer tyres; nominal inflation pressure; 7 mm water level height

Conclusions

Early warning, avoidance or reduction of risk of aquaplaning requires a reliable detection and interpretation of typical aquaplaning effects at the tyres. The aim of this paper is to show different manifestations of aquaplaning based on measurements with standard sensors. In particular, wheel spin-up and wheel spin-down, change of rolling resistance, tyre slip slope, and tie rod force have been

considered manifestations of partial or total aquaplaning. Based on this, a mathematical evaluation of these effects and their combination could be realized and an aquaplaning detector/predictor developed. An example thereof has already been introduced in [26].

Although the addressed manifestations indicate aquaplaning conditions in a quite obvious manner, a lot of influences need to be accounted for a reliable detection method of partial aquaplaning and for separation from other low friction surfaces. Driveline configuration, type, wear and inflation pressure of the tyre(s), water level height next to chosen speed and performed manoeuvre significantly affect these manifestations. A selection of results is presented here, both to encourage the development of a possible detection method and to point out the difficulties involved. A focus has been set to road conditions with low water level heights between 0.6 and 2.0 mm that the driver may not identify as critical and therefore end up in more dangerous aquaplaning situations at higher velocities. While scientific literature on aquaplaning is most frequently related to tyre development, aquaplaning is addressed here from a vehicle dynamics application point of view.

For the driver it was easier to detect (partial) aquaplaning with the FWD vehicle due to wheel spin-up events and increased rolling resistance at the front wheels, affecting acceleration and noise, the sensed changes in steering torque and lateral responsiveness of the vehicle. The characteristic spin-down effect at the front wheels is especially useful to be sensed and evaluated at RWD vehicles, as (partial) aquaplaning might be noticed only at higher speeds, as rear wheels run in the track of the front wheels and need to displace less water. The AWD vehicle showed characteristics of both FWD and RWD vehicles. Consequently, a detection method should include knowledge on the drive torque distribution control.

As a good indicator of a critical water level height at a given speed is the increased rolling resistance. Another good indicator of partial aquaplaning is the drop of the measured slip slope due to the reduced contact length of the tyre. However, sufficient amount of longitudinal force/slip excitation is required and additional effects/sensors need to be evaluated to separate wet from other low friction road surfaces. As an example for an additional sensor, tie rod forces, or alternatively the steering rack force, give similar indication of possible aquaplaning that also the driver could feel next to degraded responsiveness of the vehicle.

On-board information on tyre type, wear condition from mileage and average workload, and inflation pressure are essential for robust prediction of aquaplaning conditions. Further benefits are to be expected from other on-board sensors to map or estimate water level and/or vehicle states, next to sensor systems for automated driving that are able to sense road conditions ahead of the vehicle.

Acknowledgement

The measurement was carried out for R&D purposes at the ZalaZONE Automotive Proving Ground within the framework of scientific cooperation.

Anexo 4. Zamora, G. (2009). Plan de Mercadotecnia para Empresa Comercializadora de Neumáticos, Orientado al Mercado Provincial. [[o1 pg 7-26.pdf](#)] *Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ambato...* 1-145



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL ECUADOR
SEDE AMBATO
SERÉIS MIS TESTIGOS**

ESCUELA DE ADMINISTRACIÓN DE EMPRESAS

CARRERA DE INGENIERÍA COMERCIAL

Tema:

**PLAN DE MERCADOTECNIA PARA EMPRESA COMERCIALIZADORA
DE NEUMÁTICOS, ORIENTADO AL MERCADO PROVINCIAL.**

**Disertación de grado previo a la obtención del título de Ingeniera
Comercial con mención en Marketing.**

Autor:

SANDRA PAULINA MAYA LIZANO

Director:

ING. GINO FERNANDO ZAMORA ACOSTA

Ambato – Ecuador

Junio 2009

2.2. Mercado del neumático

2.2.1. Origen

Los neumáticos están compuestos de caucho (mayoritariamente natural) el cual es una sustancia que se extrae de árboles de zonas tropicales. Este material se extrae al producir cortes en su tronco, de los cuales sale un líquido lechoso llamado látex que en parte está compuesto por partículas de goma pura. Este material es desecado y mezclado con proporciones variables de azufre y otros productos como son negro de humo que añade consistencia y dureza, el azufre sirve para vulcanizar y convertirlo en un producto útil, cementos y pinturas utilizado para la construcción y el acabado, fibras de rayón y acero para fortalecer la llanta, caucho sintético natural que es un material principal en la fabricación, antioxidantes y antiozonantes para resistir los efectos dañinos de la luz solar y del ozono para hacer que la llanta tenga mayor durabilidad, aceites y grasas para hacer más maleable la mezcla y para ayudar en el mezclado de todos los ingredientes . Estos insumos son mezclados según una fórmula o receta científica, después de haber pasado por muchas y diversas pruebas de laboratorio...¹

¹Fuente www.sisbib.unmsm.edu.pe

De esta manera se obtiene caucho vulcanizado en diversos grados de dureza, desde el blando usado para las cámaras hasta la ebonita que es el compuesto rígido utilizado para aisladores.

El caucho es resistente al agua y a los ácidos, pero lo atacan el aceite mineral y la gasolina; y bajo la acción de la luz y en el transcurso del tiempo se oxida, haciéndose quebradizo.

Existe otro tipo de material para construir neumáticos el cual es el caucho artificial que se obtiene en su mayoría del petróleo bruto. Hasta ahora él mas empleado es la base de estireno y butadieno (SBR o "Bruna S") a. El SBR es el que más se ha vendido empleándose para la banda de rodadura de los neumáticos, con un 30% más de duración que el caucho natural. La mitad aproximadamente del consumo actual de caucho procede de fuentes sintéticas...²

2.2.2. Características de los neumáticos

El neumático es el único contacto del piso con el vehículo por lo tanto su función es vital para el buen funcionamiento del auto. En la composición de un neumático intervienen más de doscientos materiales distintos. La energía que estos últimos contienen "suma de la energía de sus materiales constituyentes de base y de la energía necesaria para su transformación (pasar del látex al caucho, por ejemplo)" supone las tres cuartas partes del

²Fuente www.sisbib.unmsm.edu.pe

contenido energético total del neumático. La cuarta parte restante representa la energía para su fabricación.

Partiendo de esta base, reducir el peso del neumático, o simplificar sustancialmente su proceso de fabricación, implica un ahorro directo de energía. Ya en 1946, la invención por parte de Michelin del neumático radial, permitió un ahorro del 30% de materias primas en relación con un neumático convencional.

Por otra parte, el neumático posee una resistencia al rodamiento intrínseca, por lo que interviene directamente en el consumo de combustible del vehículo. Para reducirlo y limitar así las emisiones contaminantes de los motores, Michelin ha explorado nuevos caminos, tanto en el campo de la estructura de los neumáticos como en el de los materiales. El resultado ha sido la tecnología Green X, la que permite disminuir la resistencia al rodamiento del neumático en más de un 20% y reducir así el consumo de combustible de los vehículos.

Se debe tener en cuenta que un neumático a velocidades normales de operación, es el responsable de un 20%, del consumo de combustible. Asimismo, cuando rueda, especialmente en la frenada, la banda de rodamiento se deforma en un rango elevado que corresponde a su deformación sobre las rugosidades del suelo. Esta deformación genera una pérdida de energía "útil", puesto que sirve para procurar adherencia a la calzada, garantizando la seguridad del usuario.

2.2.2.1. Estructura del neumático convencional

El neumático convencional es aquel cuya carcasa está constituida por telas y cuerdas dispuestas diagonalmente y alternadas formando ángulos menores de 90° respecto a la línea central de rodamiento.

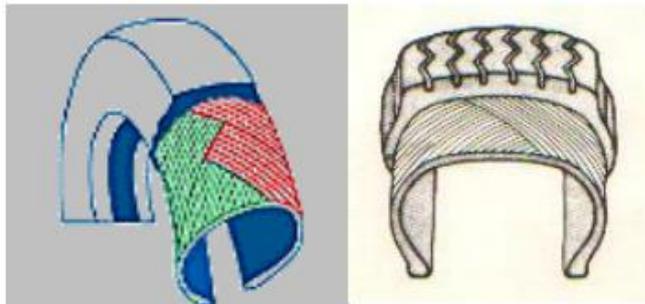


Gráfico 2.1: Estructura del neumático convencional

2.2.2.2. Estructura del neumático radial

El neumático radial es aquel cuya carcasa está constituida por telas de cuerdas dispuestas perpendicularmente respecto de la línea central de la banda de rodamiento. Además posee un cinturón circunferencial para dar propiedades de mayor adherencia, estabilidad, duración, comodidad y suavidad de conducción; y un menor consumo de carburante y calentamiento de los neumáticos.

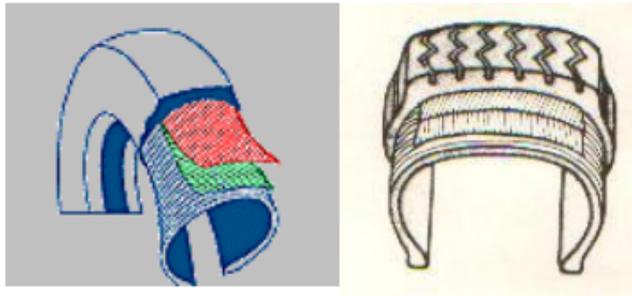


Gráfico 2.2: Estructura del neumático radial

2.2.3. Elementos de un neumático

Pestaña: Conjunto de alambres de acero recubiertos con caucho, que permiten al neumático adherirse al aro del vehículo formando un solo cuerpo. Evitando que se desmonten.

Carcasa: es un conjunto de telas formadas por cuerdas recubiertas con caucho, que le dan al neumático su resistencia a la carga y a la deformación, manteniendo su forma y tamaño.

Lateral: Es la zona del neumático entre la pestaña y la banda de rodamiento.

Lateral de goma: Capa de goma en la zona lateral del neumático sobre la carcasa. Puede incluir ribetes decorativos o de protección y líneas de montaje.

Banda de rodamiento: Es la zona externa del neumático que va en contacto con la superficie de rodado (camino). Es resistente al desgaste y le proporciona al neumático, a través de su diseño sus características de tracción, frenado y adherencia.

Cuerda: Hebras textiles o no textiles usadas en varios componentes de los neumáticos, como telas, carcasa, breaker, etc.

Telas: Conjunto de cuerdas, recubiertas de goma.

Breaker (Neumático convencional): Tela intermedia entre la carcasa y la banda de rodamiento.

Cinturón (Neumático radial): Conjunto de telas entre la carcasa y la banda de rodamiento, colocada en la dirección de giro del neumático, que restringe la deformación de la carcasa en una dirección circunferencial.

Códigos De Velocidad			
Código de Velocidad	Velocidad Km/H	Código de Velocidad	Velocidad Km/H
J	100	Q	160
K	110	R	170
L	120	S	180
M	130	T	190
N	140	H	210
P	150	V	>210

Fuente: www.sisbib.unmsm.edu.pe

Cuadro 2.1: Códigos de velocidad

2.2.4. Nomenclaturas del neumático

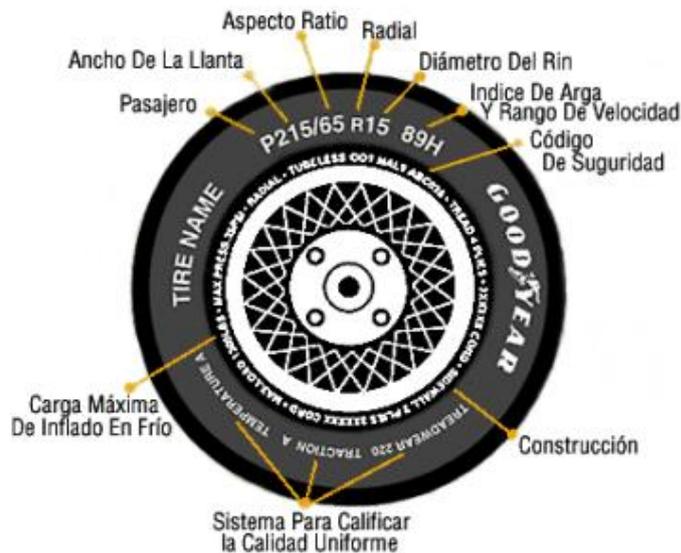


Gráfico 2.3: Nomenclaturas de un neumático

La leyenda P215/65R15 89H se interpreta:

P" es la inicial de pasajero (automóvil).

"215" representa el ancho del neumático en milímetros. Esta medida acaba de 10 en 10 mm y siempre acaba en 5.

"65" es la proporción dimensional; la proporción de altura y ancho; la altura de esta llanta es 65% de su ancho o sea 139.75 m m. El valor de este parámetro aumenta de 5 en 5.

La "R" significa radial.

La "B" en lugar de la "R" significa que el neumático está construido con capas de cinturones colocados en direcciones opuestas.

La "D" en lugar de la "R" quiere decir que la construcción es diagonal.

"15" es el diámetro de la rueda en pulgadas. (1 pulgada = 25.4mm). El diámetro aumenta de pulgada en pulgada.

Este neumático contiene una descripción de servicio con relación a las clasificaciones de carga y velocidad.

El número "89" corresponde a la carga estándar máxima de 1,279 libras. . El peso del coche está repartido más o menos entre las cuatro ruedas. Hay 60 medidas que van desde el 62, que corresponde a 265 Kg. por neumático, al 121 que corresponde a 1450 Kg.

La "H" corresponde al servicio de velocidad estándar máximo de la industria de 210 kilómetros por hora. Para los neumáticos VR (obsoletos) y ZR no existe realmente una velocidad máxima de uso. Dependerá de la carga, de la variabilidad de la presión y de las características mecánicas del automóvil.

Los neumáticos que usen un sistema europeo antiguo tienen el nivel de velocidad en la descripción de tamaño: 215/65HR15.

Índice de Carga en Kilogramos									
Índice de Carga	Carga por Neumático Kg	Índice de Carga	Carga por Neumático Kg	Índice de Carga	Carga por Neumático Kg	Índice de Carga	Carga por Neumático Kg	Índice de Carga	Carga por Neumático Kg
62	265	75	387	88	560	101	825	114	1180
63	272	76	400	89	580	102	850	115	1215
64	280	77	412	90	800	103	875	116	1250
65	290	78	425	91	815	104	900	117	1285
66	300	79	437	92	830	105	925	118	1320
67	307	80	450	93	860	106	950	119	1360
68	315	81	462	94	870	107	975	120	1400
69	325	82	475	95	890	108	1000	121	1450
70	335	83	487	96	710	109	1030		
71	345	84	500	97	730	110	1060		
72	355	85	515	98	750	111	1090		
73	365	86	530	99	775	112	1120		
74	375	87	545	100	800	113	1150		

Fuente: www.sisbib.unmsm.edu.pe

Cuadro 2.2: Índice de carga en kilogramos

Dimensiones más usuales			
SERIE 80	SERIE 70	SERIE 65	SERIE 60
145 R 13 145/80 R 13	165/70 R 13		
155 R 13 155/80 R 13	175/70 R 13	175/65 R 14	185/60 R 14
165 R 13 165/80 R 13	185/70 R 13	185/65 R 14	195/60 R 14
	185/70 R 14		195/60 R 15
175/80 R 14	195/70 R 14	195/65 R 15	205/60 R 15

Fuente: www.sisbib.unmsm.edu.pe

Cuadro 2.3: Dimensiones más usuales

Los estándares de seguridad aplicables establecidos por el Departamento de Transporte de los Estados Unidos (DOT) certifican el cumplimiento con todos. Adyacente a éste hay una identificación del neumático o número de serie; una combinación de números y letras con hasta 11 dígitos.

La pared lateral externa también muestra el tipo de cuerda y número de capas en la pared lateral externa y bajo el ribete.

La carga máxima se muestra en Libras (lbs.) y en kilogramos (Kgs.) y la presión máxima en libras por pulgada cuadrada (PSI) y en kilopascales (kPa.) Los kilogramos y los kilopascales son unidades de medida métricas, del Sistema Internacional de Unidades (SI). El neumático soporta el vehículo cuando está parado, pero también en movimiento, y tiene que resistir a las transferencias de cargas en la aceleración y el frenado. Un neumático de coche soporta más de 50 veces su peso.

2.2.5. Indicador de Desgaste

Entre 1,5mm y 2,0mm para diferentes marcas de neumáticos, pero generalmente en neumáticos livianos es 1,6mm.

Presión

Debe tenerse en cuenta la correcta presión de inflado que recomienda el fabricante del coche: Una presión baja aumenta el rozamiento con el suelo y por tanto el consumo de combustible además de comprometer seriamente la seguridad de automóvil. Una presión alta, en cambio reduce la vida de los amortiguadores.

El respeto de las diferencias de presión entre la parte delantera y la trasera garantiza una estabilidad de trayectoria ideal.

Enllantaje

Proceso mediante el cual la maquina enllantadora une un aro a un neumático o saca los tubos para parcharlos,

Alineación

Proceso de posicionamiento de los neumáticos en concordancia con las otras.

Alineación de suspensión

Se dice que las cuatro suspensiones del automóvil están alineadas cuando los vértices de sus cuatro neumáticos coinciden con los valores fijados previamente por el constructor, que a su vez los ha determinado basándose en el tipo de vía para el que se lo fabricó.

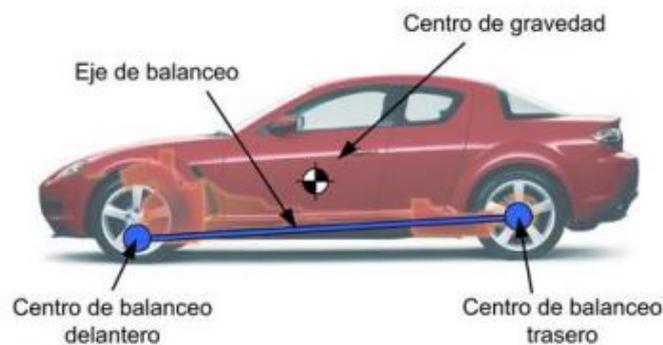
Cuando un automóvil sufre un accidente la suspensión y los ángulos de las ruedas se alteran a causa del golpe. Sin embargo, a veces la simple caída en un bache puede ocasionar un desequilibrio de estas partes. Si ninguno de los dos es su caso recuerde de todas maneras es recomendable alinear la suspensión de un automóvil cada 20.000 km.

Para saber si su automóvil necesita una alineación de suspensión observe si sus neumáticos tienen un desgaste irregular, si la dirección tiende a jalar hacia un lado o si la dirección vibra.

Balanceo de neumáticos

Los neumáticos y los aros se descentran por la diferencia de pesos en los elementos que los componen. Este desequilibrio se arregla añadiendo pesas en las pestañas de la llanta, en las partes internas y externas del aro, equilibrando así la superficie de la llanta. La combinación exacta de dos equilibrios, uno estático y otro dinámico, dan como resultado una llanta bien balanceada.

El primer paso es determinar el grado de descentramiento radial y lateral de los neumáticos y aros. Se mide primero la llanta, cuyos descentramientos máximos permitidos están en 0.035" para el radial y 0.045" para el lateral. Estas mediciones se hacen en el punto donde se fija la pestaña de la llanta. Cuando la llanta no cumple con estas especificaciones debe cambiarse esta por una nueva. Cuando la llanta esta dentro de los límites el equilibrio dinámico y estático de la misma es posible.



Fuente: www.sisbib.unmsm.edu.pe

Gráfico 2.4: Balanceo de neumáticos

Vulcanizado de neumáticos

Se llama vulcanización al proceso reparar una llanta agujereada con parches adecuados para el tipo de llanta. En llanta baja utilizamos parches fríos Rubber Patch, de fabricación estadounidense. Los parches que se aplican al frío son más flexibles y resisten mayores temperaturas.

Anexo 5. Mercados potenciales de caucho natural en el exterior y potencial exportador en Colombia

INTRODUCCIÓN

El problema actual de la producción cauchera desigual en el mundo entero radica en la alta concentración que representa la producción de caucho en algunos países industrializados del Asia insular, siendo así que el 65% del total del tonelaje producido anualmente en el mundo lo acaparan solo 3 países como lo son Tailandia, Indonesia y Malasia.

Sin embargo, la industria del caucho con el trascurso de los años ha adquirido nuevos matices y los países latinoamericanos han ocupado una posición importante en la configuración de un bloque de países productores haciendo alarde de su posición estratégica al abarcar dentro de sus respectivos territorios la zona con mayor propensión a comercializar y explotar los recursos existentes en la región amazónica donde en otrora se vivió la denominada "*fiebre del caucho*", acontecimiento que representó o marcó un hito importante en la historia económica y social de los países en cuestión, disparando el proceso colonizador, propendiendo por la riqueza y facilitando la instauración de nuevas ciudades con connotaciones fluviales y mercantiles importantes como lo son Iquitos en Perú, Manaus y Belem do Pará en el Brasil.

El descubrimiento a posteriori de procesos como la vulcanización y la cámara neumática dio paso a un importante incremento en la extracción del caucho, derivándose de esta explotación, el tratamiento de diversas gomas que constituyen la materia prima del caucho. Unas de ellas son el jebe⁶, la balata⁷ y la gutapercha⁸.

Ya remitiéndonos al contexto nacional, la producción nacional se puede calcular en valores que se acercan a las 4.000 Toneladas, cantidad que resulta insuficiente para satisfacer la demanda nacional, y paralelamente la industria del caucho se ha visto forzada a importar cerca de 22.000 toneladas aproximadamente. Para contrarrestar estos impases el Gobierno Nacional ha impulsado los cultivos de caucho cobijando este producto como uno de los focos del Plan Nacional de Desarrollo Alternativo, y proporcionando una alternativa económica a las comunidades rurales menos favorecidas, incluyendo comunidades indígenas, campesinos y colonos de diversos departamentos, ofreciendo a estos múltiples beneficios si se acogen a las leyes que estipulan la erradicación de cultivos ilícitos.

3.1 OBJETIVO 1: IDENTIFICAR LAS VENTAJAS Y LIMITACIONES DE COLOMBIA EN TODAS LAS ETAPAS INHERENTES AL PROCESO DE PRODUCCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DE CAUCHO.

Para desarrollar el primer objetivo específico, es preciso identificar las etapas de producción y comercialización del caucho. Identificamos cinco etapas fundamentales que comprenden todo el proceso del caucho, comenzando por el establecimiento y mantenimiento del cultivo, siguiendo por el aprovechamiento del cultivo, los procesos de transformación o beneficio del látex, la manufactura de productos, y por último, la comercialización.

ETAPAS	<ol style="list-style-type: none">1- Establecimiento y Mantenimiento del Cultivo2- Aprovechamiento del Cultivo3- Transformación del Látex (Beneficio)4- Comercialización5- Manufactura de Productos
---------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

3.1.1 Establecimiento y Mantenimiento del Cultivo

La primera etapa inherente al proceso de producción de caucho natural consiste en establecer un cultivo que pueda ser bien aprovechado en el futuro. El establecimiento y mantenimiento del cultivo comprende periodo de desde año 0 hasta el año 6 de edad, y para establecer un cultivo productivo, se debe tener en cuenta varios aspectos como: que el terreno cumpla con las condiciones ecológicas necesarias para el desarrollo del árbol de caucho, la adquisición de excelente materia prima que en este caso serían las semillas o plántulas⁹ de *Hevea Brasiliensis*, y el mantenimiento necesario durante el primer y el sexto año, entre otros factores.

Tabla 1: Condiciones Agroecológicas para el Cultivo de Hevea Brasiliensis

Zona Ecológica	Trópico Húmedo
Altura (MSNM)	De 0 a 1.300
Temperatura	De 23 a 36°C
Precipitación	De 1.500 a 2.500 mm al año
Luminosidad	1.500 horas de sol anuales
Humedad Relativa	60%-80%
Vientos	Inferiores a 50 Km/H
Textura	Suelos francos, franco arenosos o franco arcillosos, que sean suaves y porosos
Color	Suelos oscuros que contengan buena materia orgánica, evitando suelos grises y pardos, que indican mal drenaje interno
Profundidad Efectiva	El caucho para su buen desarrollo radicular necesita una profundidad efectiva de mínimo 1.50 m, donde no encuentre obstáculos (capas endurecidas, nivel freático alto), para que la raíz pivotante o principal no sufra daños y pueda anclarse firmemente
Topografía	Pendientes mayores al 10% requieren de más trabajo , y evitar pendientes mayores al 50%, esto debido al incremento de los costos al momento del establecimiento, pues se debe sembrar en curvas de nivel y en lo posible hacer terrazas, para facilitar las labores de aprovechamiento
Acidez	Soporta suelos ácidos con pH entre 4.1 y 6, hasta suelos básicos con pH 7.5

Anexo 6. Administración de neumáticos al final de su ciclo

INTRODUCCIÓN

En todo el planeta la proporción de productos poliméricos utilizados aumenta todos los años, la mayor parte de ellos son neumáticos usados de carros. Según informes de asociaciones importantes de fabricantes de neumáticos y productos de caucho, la fabricación a nivel mundial anual de neumáticos es de unos 1400 millones de unidades, lo correspondiente a un estimado de 17 millones de toneladas de neumáticos utilizados cada año [1]. El incremento dinámico del número de llantas utilizadas incrementó de 2,1 millones de toneladas en 1994 a 3,3 millones de toneladas en 2010 [1]. El tamaño del problema se ve magnificado por los vertederos ya existentes los cuales son peligrosos para el medio ambiente, donde se almacenan inútilmente unos 4.000 millones de llantas [1].

En la actualidad, el procedimiento común para la administración de llantas de desecho es la recuperación de energía, donde se trituran mecánicamente para usarse como combustible alternativo en hornos de cemento, fábricas de papel o plantas de producción de energía [2]. El último informe estadístico sobre la administración de neumáticos al final de su ciclo, publicado por ETRMA [2], demostró que en 2018 el 91% de los neumáticos de desecho en la Unión Europea, así como Noruega, Serbia, Suiza y Turquía fueron recogidos y gestionados correctamente por medio de reciclaje de material y valorización energética [2].

Otros métodos están ganando reconocimiento en la trituración de residuos de caucho, como la trituración con ayuda de ultrasonidos, el corte con agua a presión (water-jet), la pulverización en presencia de dióxido de carbono supercrítico, por ejemplo las hermanas Dobrotă [3], investigaron

presencia de dióxido de carbono supercrítico, por ejemplo las hermanas Dobrotă [3], investigaron la tecnología de trituración de residuos de caucho activada con ultrasonidos, este enfoque posibilita la preparación de caucho molido con una repartición de tamaño de partícula bastante buena y tamaños de partícula promedio en el rango de 100 a 150 μm , que puede suplir la demanda de caucho recuperado usado en la industria. Además, los resultados mostraron que la aplicación de ultrasonidos a lo largo de la trituración de residuos de caucho disminuye el consumo de energía y simultáneamente se incrementa la eficiencia de la producción por medio de una mayor rapidez de trituración [3].

En Colombia la mayor parte de las llantas luego de haber sido utilizadas se almacenan en depósitos, techos, patios de casas, calles, ríos y lagos, con un efecto negativo para el medio ambiente y para la salud pública, ya que las llantas se convierten en un sitio ideal para ratas y mosquitos que pueden transmitir el dengue, la fiebre amarilla y la encefalitis equina, tornándose en un grave problema para la sociedad [4].

Incendio en Seseña



Nota. Figura 1. Labores de extinción del incendio en el cementerio de neumáticos de Seseña. Tomado de: F. Javier Barroso y P. León, “Un gran incendio en Seseña arrasa el mayor cementerio de neumáticos de España,” Ediciones EL PAÍS S.L, 14-May-2016. [Online]. Available: https://elpais.com/ccaa/2016/05/13/madrid/1463120336_194139.html.

Anexo 7. Categorías de materiales de llantas

Tabla 1.

Las categorías de los materiales de la llanta

CATEGORÍA	Cantidad en la llanta (%)		DESCRIPCIÓN
Caucho natural y sintético	40-48		Proporción de caucho natural a sintético: 2-1 llanta de camión de camión; 4-3 llanta de automóvil. Se utilizan diferentes polímeros y aditivos en cada parte de la llanta.
Negro de humo	22-27		Una gama de negros de humo de diferentes tamaños, estructuras y características en diferentes partes de un neumático. Se utilizan tamaños más grandes en el revestimiento interior, partes más pequeñas en la carcasa y en la banda de rodadura.
Materiales de refuerzo	Metales	15-25	En los talones, correas y carcasas de una llanta de camión.
	Textiles	11-13	Los textiles se utilizan en la banda de rodadura de las llantas. El rayón natural y el nylon en la UE, en los Estados Unidos y Asia se utilizan para los cordones de las carcasas.
Otros	0-8		Los sistemas de curado pueden incluir azufre, óxido de zinc, ácido esteárico, peróxido y agentes aceleradores, antioxidantes, antiozonantes, etc., que protegen el compuesto.

Nota. Esta tabla muestra las categorías de los materiales que componen las llantas. Tomado de: Researchgate.net. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/49591485_Mechanical_Properties_of_Industrial_Tyre_Rubber_Compounds.

Para comprender los cuatro procesos principales para el tratamiento de las llantas usadas las máquinas que deben realizar estas tareas, inicialmente se deben entender las zonas y secciones que componen la llanta, en la Figura 2 se muestran las secciones de una llanta.

Figura 2.
Zonas y secciones de las llantas

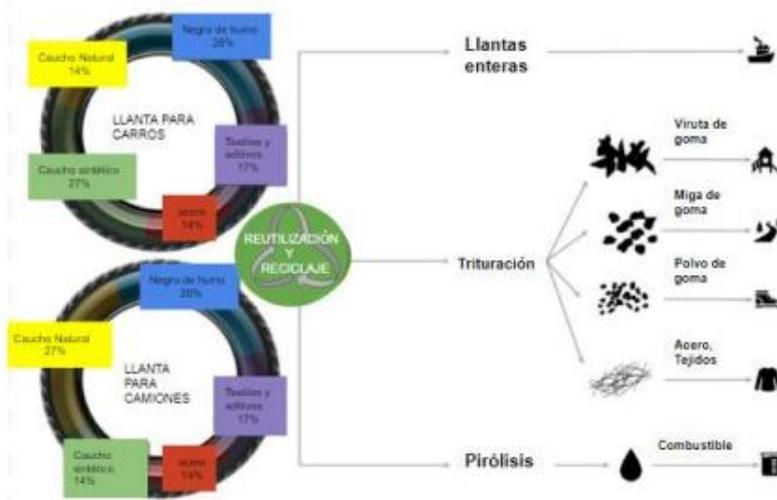


Nota. La figura muestra las secciones y zonas que componen una llanta. Tomado de: J. L. Gómez, "¿Cuáles son los diferentes elementos que conforman un neumático? Descubre todos sus secretos." *Diariomotor*, 17-Mar-2020. [Online]. Available: <https://www.diariomotor.com/que-es/mecanica/neumatico-elementos/>.

La figura muestra que la llanta se divide en dos secciones pero las zonas como el hombro, el flanco y el talón hacen parte de la sección de la banda lateral o pared lateral lo cual cada una se describe más adelante en la Tabla 2 y la otra sección es la banda de rodadura que es la que hace contacto con el suelo, esta sección es la más resistente ya que tiene que soportar altas cargas y desgastes [17].

Anexo 8. Ciclo de reutilización y reciclamiento de llantas

Figura 14.
Ciclo de la reutilización y el reciclado de llantas.



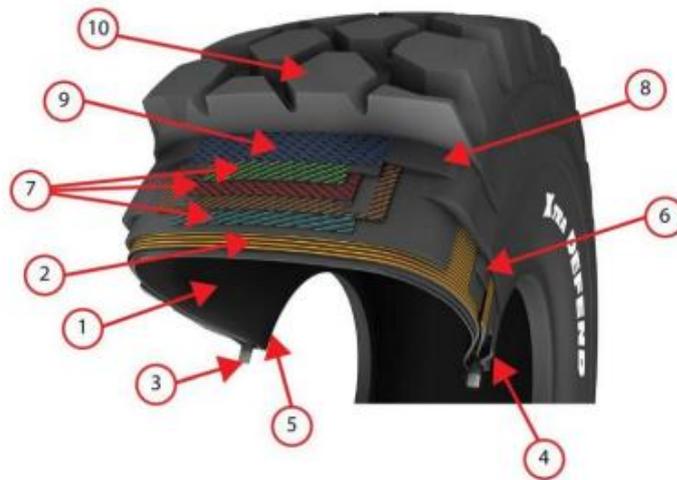
Nota. La figura muestra el ciclo del reciclado y reutilización que puede tener la llanta en fuera de uso. Tomando de: B. A. Monge and R. Páquina, Upv.es. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/149591/Monge%20-%20Dise%C3%B1o%20de%20proceso%20de%20reciclaje%20y%20reutilizaci%C3%B3n%20de%20neum%C3%A1ticos%20introducci%C3%B3n%20en%20la%20econom%C3%AD...pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Anexo 9. Partes de una llanta

2.2. Partes de las llantas

La llanta es un objeto de goma con forma de anillo circular sólido o hueco, fabricado de caucho y reforzada habitualmente con materiales textiles y acero, la cual es montada en un rin [22]. En la Figura 15 y en la Tabla 2 se muestran y describen los componentes que conforman una llanta.

Figura 15.
Componentes de una llanta.



Nota. La figura muestra los diferentes componentes que conforman o hacen parte de la llanta. Tomado de: J. L. Gómez, “¿Cuáles son los diferentes elementos que conforman un neumático? Descubre todos sus secretos,” Diariomotor, 17-Mar-2020. [Online]. Available: <https://www.diariomotor.com/que-es/mecanica/neumatico-elementos/>.

Partes de una llanta.

No	NOMBRE DE LA PARTE	DESCRIPCIÓN
1	Alma interna	Es una capa de caucho bastante fina, que se halla en el centro de la llanta, de talón a talón, y cuya funcionalidad es garantizar su agarre del mismo.
2	Lona de carcasa	Es una capa conformada de cables cubiertos de caucho, dispuestos al mismo tiempo entre sí. En las llantas radiales, tiene por objeto estabilizar el neumático.
3	Talón	Es un anillo con alta resistencia y rigidez compuesto por un cable de acero trenzado. Se ubica en el área del talón, de manera que garantiza la fijación de la llanta.
4	Banda de protección de talón	Es una banda de caucho sobre la que se secundan los alambres de talón, y que salvaguarda la llanta de probables rozaduras.
5	Relleno de talón	Es un relleno de caucho que se sitúa en el área entre los alambres de talón y la lona de carcasa. Su funcionalidad es la de mejorar la estanquidad de la llanta.
6	Relleno lateral	Es una banda de caucho situada en los flancos de la llanta, su funcionalidad es defender las lonas de carcasa contra impactos, abrasión e incrementar su resistencia a fatiga.
7	Cinturón	Son unas lonas iguales a las lonas de carcasa ubicadas entre los hombros del neumático.
8	Cuñas el cinturón	Son unas láminas de caucho resistentes a la fatiga que se ubican en los extremos del cinturón. Su funcionalidad es prevenir que los hilos del cinturón se rompan.
9	Capa de recubrimiento	Es una lona de fibras textiles que cubre el cinturón y que va más allá de los extremos del mismo.
10	Banda de rodadura	Es una capa de caucho de alta cohesión y resistencia al desgaste, se sitúa en la parte externa del neumático, entre los hombros.

Anexo 10. Tipos de llantas que existen en el mercado.

2.3. Tipos de llantas en el mercado

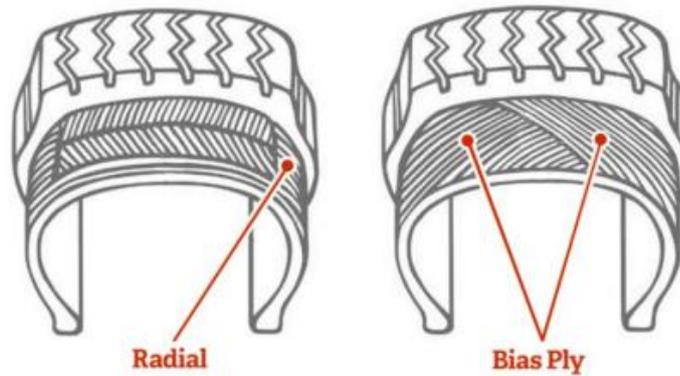
Existen diferentes tipos de llantas que se venden en el mercado y este tipo de llantas se caracterizan conforme a sus características constructivas, el tipo de grabado de la banda de rodadura, el modo de uso y la temporada o estación del año (para países con estaciones), dependiendo de estas características mencionadas se sabe que función va a cumplir cada llanta a la hora de su fabricación [23].

2.3.1. Tipo de llanta por su construcción

En la construcción de llantas son utilizados dos tipos de configuraciones de refuerzo, radiales y diagonales (la llanta convencional) en la Figura 16 se muestran los dos tipos de construcción.

Figura 16.

Tipos de llantas.



Nota. La figura muestra los dos tipos de construcción de llantas radiales y convencionales. Tomado de: "Neumáticos radiales contra convencionales," Importadora Guillén, 11-Apr-2019. [Online]. Available: <https://importadoraguillen.com/neumaticos-radiales-contra-convencionales/>.

El diseño y construcción de llantas radiales muestra una banda lateral (flanco y hombro) y una banda de rodadura que funcionan independientemente, usan correas de acero que ofrecen como consecuencia menos capas, lo cual posibilita que la llanta sea más flexible, estas correas de acero además resisten cortes y pinchazos [24]. La más grande flexibilidad y resistencia supone que el neumático absorbe mejor los golpes y los impactos, lo cual resulta en una marcha muchísimo más dócil y más cómoda para los pasajeros. La obra radial además transfiere más grande adhesión entre la llanta y el suelo [24].

Las llantas diagonales siguen construidas con diversas capas de goma que se superponen una con otra [24]. Cada una de las capas se prolongan entre los muros laterales y conforman una capa gruesa que es menos flexible y más sensible al sobrecalentamiento. Las llantas de creación diagonal permanecen compuestas de tejido interno y cruzado dispuesto en forma diagonal en la carcasa, conformando ángulos entre 40 y 45 grados [24]. La superposición de las capas que van de lado se hallan con los flancos y en la parte preeminente de la llanta aportando una rigidez mayor, aunque su punto más débil es la estabilidad lateral [24].

2.3.2. Tipo de llanta con cámara y Tubless (sellomatic)

Existen dos tipos de neumáticos: con cámara y sin cámara, o tubeless o sellomatic . Con cámara es un tipo de bomba de tubo o cámara colocada en el interior de la llanta, como se muestra en la Figura 17 [23]. Aunque todavía se utilizan en neumáticos de camiones y algunas motocicletas, pocos vehículos todavía utilizan este tipo de neumáticos y tienden a ser reemplazados por tubeless o sellomatic [23].

Anexo 11. Diseño y Contrucción de una llanta.

Figura 17.

Llanta con cámara.



Nota. La figura muestra el tipo de llanta con cámara en el interior. Tomado de: "¿Cuántos tipos de neumáticos para coche existen?" Auto10.com | Expertos en coches. [Online]. Available:

<https://www.auto10.com/reportajes/cuantos-tipos-de-neumaticos-para-coche-existen/5412>.

Una llanta sin cámara (tubeless) es una llanta que no requiere cámara de aire y tiene una capa aislante hecha de una goma especial en el interior que sella el neumático a la llanta [23]. La cubierta funciona como una cámara además de su función propia y tiene una construcción convencional con la particularidad de estar diseñada y fabricada para que pueda instalarse sin necesidad de usar una cámara, como se muestra en la Figura 18. [23].

Figura 18.

Llanta Tubeless.



Nota. La figura muestra el tipo de llanta en el mercado llamado Tubeless. Tomado de: "¿Cuántos tipos de neumáticos para coche existen?," Auto10.com | Expertos en coches. [Online]. Available: <https://www.auto10.com/reportajes/cuantos-tipos-de-neumaticos-para-coche-existen/5412>.

2.3.3. Tipo de llanta de temporada

Las llantas según su diseño y fabricación sirven para cierta estación del año, existen llantas de verano, llantas de invierno y las denominadas All season o todo tiempo [23].

Las llantas de verano se pueden utilizar en cualquier época del año, a menos que haya nieve. Porque sus características de diseño y construcción están optimizadas para mejorar el agarre, reducir la resistencia a la rodadura y permitir una conducción más suave y precisa en comparación con los neumáticos de invierno (Figura 19) [23].

El neumático de invierno está fabricado con un compuesto especial para mejorar el agarre a bajas temperaturas y está diseñado con un dibujo especial de la banda de rodadura que se agarra a la nieve [23]. No es un neumático que solo deba usarse en carreteras nevadas, ya que se comporta mejor que cualquier otro tipo de neumático con lluvia y temperaturas exteriores por debajo de los 7 grados centígrados [23].

42

Figura 19.

Llanta de verano y de invierno.



Nota. La figura muestra el tipo de llanta para verano y de invierno. Tomado de: “¿Cuántos tipos de neumáticos para coche existen?,” Auto10.com | Expertos en coches. [Online]. Available: <https://www.auto10.com/reportajes/cuantos-tipos-de-neumaticos-para->

Anexo 12. Tipos de llantas

2.3.4. Tipo de llantas simétricas, asimétricas y direccionales

La llanta con diseño simétrico es el tipo de llanta más corriente en los coches compactos o urbanos, su diseño en la banda de rodadura es simple y básica siendo una línea recta, garantizando una buena adherencia, confort y larga vida útil, este tipo de llanta no tiene sentido de montaje por lo que es fácil de montar y de rotar sin riesgo de cometer errores [23].

Las llantas con diseño asimétrico tienen un grabado diferente en la parte interna y la parte externa de la llanta, donde una parte es optimizada para drenar el agua y la otra para mejorar más el agarre en seco. Esta llanta tiene un solo sentido de montaje y los flancos marcan el sentido de cómo se debe montar [23].

Las llantas direccionales tienen un grabado en forma de V o flecha, conocidos como espina de pez siendo perfectas para la evacuación del agua, tienen un solo sentido de rotación lo que hace que este tipo de llanta sea importante respetar la dirección de montaje, un montaje incorrecto conduce a una menor tracción direccional en la humedad y menos estabilidad de frenado y también suelen ser utilizadas para invierno [23]. En la Figura 21 se permite detallar más el diseño de la banda de rodadura.

Figura 21.
Llanta simétrica, asimétrica y direccional.



Nota. La figura muestra el tipo de llanta con una banda de rodadura simétrica, asimétrica y direccional. Tomado de: "¿Cuántos tipos de neumáticos para coche existen?," Auto10.com | Expertos en coches. [Online]. Available: <https://www.auto10.com/reportajes/cuantos-tipos-de-neumaticos-para-coche-existen/5412>.

Anexo 13. Tipos de llantas

Tabla 3.

Tamaño y peso de las llantas implementadas

Tamaño de Rin (Pulg)	Peso (kg)	Implementación de la llanta en su uso
13	2 - 4	Se utiliza en todos los taxis de Colombia, lo que quiere decir que hay una alta demanda de uso de este tamaño.
14	5 - 7	Es utilizada en muchos vehículos de pequeño tamaño.
15	22	Esta medida es la más común usada en los automóviles de las ciudades.
17	33	
18	35	Esta medida es utilizada en autos un poco más grandes como las camionetas.
19	40	
20	41	
22.5	47	Vehículos de carga pesada, camiones de gran tamaño
24.5	60-70	Vehículos de trabajo industrial de un gran tamaño

Nota. La tabla muestra los tamaños más comunes de llantas y su peso. Tomado de: [14] "Buscador llantas," Com.co. [Online]. Available: <https://www.michelin.com.co/auto/llantas-para-autos-suv-y-camionetas>. [Accessed: 23-Jul-2022].

Anexo 14. Construcción de neumáticos para equipo pesado



DISEÑO PENSANDO EN LA DURABILIDAD

Gracias a la capa superior no metálica del cinturón, los cinturones de acero y la estructura de la carcasa están protegidos de los daños y la corrosión causados por la humedad. Esto aumenta la durabilidad del neumático a lo largo de su vida y ofrece las condiciones ideales para un recauchutado de alta calidad.



Gran durabilidad y recauchutado

gracias a nuestra innovadora tecnología DuraShield

Excelente tracción

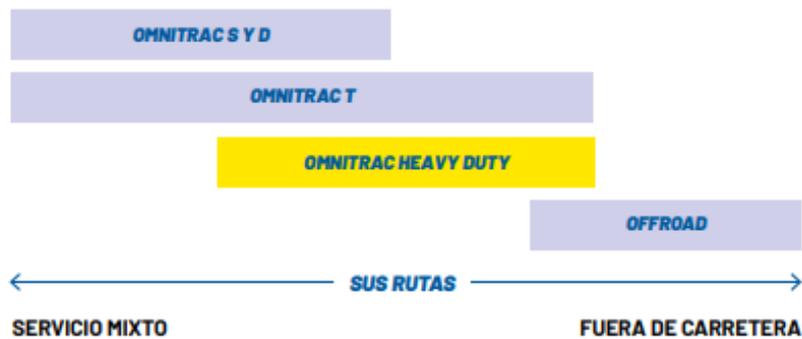
Para usos dentro y fuera de la carretera y un mayor rendimiento en invierno con el marcaje 3PMSF

Mayor vida útil del neumático

Alta resistencia a desprendimientos de la banda de rodadura

¿CUÁL ES EL MEJOR NEUMÁTICO PARA USTED?

Cuando su flota opera en condiciones adversas dentro y fuera de carretera, debe asegurar el rendimiento de los neumáticos en cualquier terreno. Goodyear ofrece una amplia gama de neumáticos que le proporcionan el equilibrio perfecto entre la resistencia fuera de la carretera y la capacidad de funcionar eficazmente en superficies pavimentadas. Los neumáticos **OMNITRAC HEAVY DUTY** están específicamente diseñados para ayudarle a enfrentarse de forma fiable a una conducción con condiciones adversas tanto en la carretera como fuera de ella, sin perjudicar a la tracción o el rendimiento en ninguna de las dos superficies.



OMNITRAC HEAVY DUTY ES LA OPCIÓN IDEAL PARA FLOTAS QUE:



NECESITAN UNA GRAN RESISTENCIA A LOS DESPRENDIMIENTOS DE LA BANDA DE RODADURA



REQUIERAN UN ALTO NIVEL DE KILOMETRAJE EN SUPERFICIES ÁRIDAS



OPERAN EN CONDICIONES ADVERSAS EN CARRETERA Y FUERA DE ELLA

OMNITRAC

RENDIMIENTO TODOTERRENO

EN EL QUE PUEDE CONFIAR

DIRECCIÓN



22,5 PULGADAS 24 PULGADAS

OMNITRAC S HEAVY DUTY

UN NEUMÁTICO DE EJE DIRECCIONAL DISEÑADO
PARA FUNCIONAR EFICAZMENTE
EN APLICACIONES DE SERVICIO MIXTO

1. DISEÑO DE 4 NERVADURAS

Banda de rodadura con nervaduras de grandes dimensiones en el hombro resistente a cualquier aplicación, que permite un **alto kilometraje** y un **rendimiento de desgaste uniforme**

2. RANURAS DE LIBERACIÓN RÁPIDA QUE PERMITEN EXPULSAR LAS PIEDRAS DE LA NERVADURA CENTRAL

Los movimientos de la banda de rodadura hacen que las piedras atrapadas se liberen rápidamente impidiendo que lleguen al fondo de la ranura. Lo que se traduce en **menos pinchazos**, mayor durabilidad de la carcasa y una mejor autoimpieza, **todo esto, proporciona una buena tracción en cualquier terreno**

3. COMPUESTO CON ALTA RESISTENCIA A DESPRENDIMIENTOS

Gracias al nuevo diseño de la banda de rodadura y a un mayor calibre de la goma, **los neumáticos consiguen una alta resistencia a desprendimientos** durante toda su vida útil. Esto proporciona un **alto kilometraje** y una **mejor capacidad de recauchutado** gracias a una mayor protección de la carcasa



TRACCIÓN

OMNITRAC D HEAVY DUTY

UN NEUMÁTICO DE EJE MOTRIZ AUTOLIMPIABLE
DISEÑADO PARA SOPORTAR CONDICIONES SEVERAS
DENTRO Y FUERA DE CARRETERA



22,5 PULGADAS

24 PULGADAS



1. DISEÑO DIRECCIONAL DE LA BANDA DE RODADURA CON LAMINILLAS

El diseño de la banda de rodadura hace que el neumático mantenga sus características **de autolimpieza** durante toda su vida útil y proporciona **tracción en cualquier superficie** o condición meteorológica

2. DISEÑO COMPACTO DE LAS NERVADURAS CENTRALES

Proporciona tracción y protege la zona central del neumático, lo que da como resultado un desgaste uniforme y **un alto potencial de kilometraje**

3. RANURAS DE HOMBRO AMPLIAMENTE ABIERTAS Y DISEÑO EN BLOQUE

Cuenta con más bordes y permite expulsar rápidamente las piedras y el barro, de forma que se mantiene **una alta tracción durante toda la vida del neumático** en condiciones fuera de carretera y una fuerte resistencia a los daños por piedras bajo par

4. COMPUESTO DE LA BANDA DE RODADURA DE ALTA RESISTENCIA A DESPRENDIMIENTOS

Proporciona un alto kilometraje y **mejora la capacidad de recauchutado** gracias a un nuevo compuesto de rosca que presenta una mayor cantidad de goma para el recauchutado



REMOLOQUE



OMNITRAC T

UN NEUMÁTICO DE REMOLQUE
MUY ESTABLE QUE OFRECE UN ALTO
POTENCIAL DE KILOMETRAJE Y UN DESGASTE
UNIFORME DE LA BANDA DE RODADURA

1. PISADA ANCHA CON CAVIDAD MULTI RADIO

Un alto volumen de caucho desgastable y una distribución uniforme de la presión **reducen el desgaste de la banda de rodadura y aumentan el potencial de kilometraje**

2. NERVADURAS CENTRALES DE GRANDES DIMENSIONES

Los bloques centrales soportan un alto par de torsión y superficies irregulares, lo que significa **una excelente resistencia a los daños y una gran estabilidad**

3. RANURA DE LA LÍNEA CENTRAL EN ZIG-ZAG Y DISEÑO DEL BORDE DEL BLOQUE DE DESPLAZAMIENTO

La mayor longitud del surco y el 3PMSF proporcionan bordes de agarre adicionales para mejorar la **tracción en carretera y fuera de ella, el rendimiento de la frenada y el agarre en mojado**

4. EXPULSORES DE PIEDRA COMBINADOS CON ÁNGULOS DE RANURA DOBLES

Reducción de la retención de piedras y de la perforación gracias a una mayor capacidad de autolimpieza para **durabilidad superior y recauchutado**



OMNITRAC HEAVY DUTY

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

RECOMENDACIONES DE REESCULTURADO

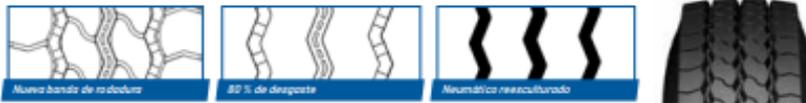
Los neumáticos OMNITRAC HEAVY DUTY de Goodyear son recauchutables y reesculturables, y se han desarrollado para ofrecer una óptima sostenibilidad y permitir a las flotas de autobuses aprovechar al máximo su parque de neumáticos, con lo que se reduce sustancialmente el coste por kilómetro y el impacto medioambiental.

OMNITRAC S HEAVY DUTY 22,5 PULGADAS



Profundidad máxima de reesculturado de 3 mm, anchura de reesculturado de 9-10 mm.

24 PULGADAS



Profundidad máxima de reesculturado de 3 mm, anchura de reesculturado de 9-10 mm.

OMNITRAC D HEAVY DUTY

22,5 PULGADAS



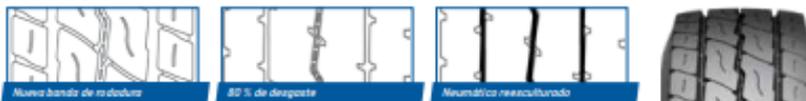
Máxima profundidad de reesculturado 3 mm, ancho de reesculturado 9 mm.

24 PULGADAS



Máxima profundidad de reesculturado 3 mm, ancho de reesculturado 9 mm.

OMNITRAC T



NOMBRE DE DISEÑO DEL NEUMÁTICO	TAMAÑO	ÍNDICE DE CARGA/VELOCIDAD 1	ÍNDICE DE CARGA/VELOCIDAD 2	AHORRO DE COMBUSTIBLE	AGARRE EN MOJADO	EMISIONES DE RUIDO (CLASE/dB)	AGARRE SOBRE NIEVE 3PM8F	M+S	RFID
OMNITRAC S HEAVY DUTY	12 R 22.5	152/148 K		C	A	A 71	✓	✓	✓
OMNITRAC D HEAVY DUTY	12 R 22.5	152/148 K		D	B	B 74	✓	✓	✓
OMNITRAC S HEAVY DUTY	13 R 22.5	156/150 K		C	B	B 72	✓	✓	✓
OMNITRAC D HEAVY DUTY	13 R 22.5	156/150 K		D	B	B 75	✓	✓	✓
OMNITRAC S HEAVY DUTY	315/80 R 22.5	156/150 K		C	B	B 73	✓	✓	✓
OMNITRAC D HEAVY DUTY	315/80 R 22.5	156/150 K		D	B	B 75	✓	✓	✓
OMNITRAC S HEAVY DUTY	325/95 R 24	162/160 K		C	B	A 71	✓	✓	✓
OMNITRAC D HEAVY DUTY	325/95 R 24	162/160 K		D	B	B 76	✓	✓	✓
OMNITRAC T HL	385/65 R 22.5	164 K	158 L	C	B	B 72	✓	✓	✓
OMNITRAC MST II*	445/65 R 22.5	169 K		B	B	B 71	✓	✓	✓

* Diseño OMNITRAC T



Análisis de materiales compuestos para la mejora de la durabilidad de neumáticos.

Pinheiro Vidal, Arthur

Trabajo Final de Grado de Ingeniería Mecánica,
Departamento de Resistencia de Materiales Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Vilanova i la Geltrú (UPC)

Resumen

Este trabajo constituye un análisis exhaustivo que tiene como objetivo principal mejorar la durabilidad de los neumáticos. En concreto, enfocándose en los materiales. Un propósito cada vez más buscado debido a los problemas medioambientales actuales, y a una demanda de mercado muy competitivo. Esto implica maximizar el rendimiento del movimiento de rodadura generado por el vehículo, durante la rodadura se pierde gran parte de la energía a través del calor generado, este calor es llamado resistencia a la rodadura. Una de las maneras de solventarlo es mejorando el material de la banda de rodadura. Con un mejor refuerzo en una base de caucho se consigue una gran mejora de la resistencia a la rodadura, sustituir el típico refuerzo de negro de carbón por sílice parece ser una gran aproximación a la mejora que buscamos. Para caracterizar un material una de las pruebas más extendidas y con un carácter comparativo es el ensayo de tracción, en este trabajo se ha realizado simulaciones con el objetivo de analizar el comportamiento de sílice como refuerzos. Los resultados que hemos obtenido en las simulaciones de ensayos de tracción no han sido del todo satisfactorias, los valores son menores a los teóricos, pero existe una correlación con el aumento del refuerzo de sílice, lo que indica que podemos dar por válida la comparativa entre las diferentes soluciones. Se observa que existe un aumento del módulo entre ellas y sin generar una zona plástica o una rotura prematura. Esto implica que la hipótesis está bien formulada, los refuerzos de sílice respecto a uno con negro de carbón nos podrán permitir tener un mayor rendimiento trabajando elásticamente, podrá suponer un aumento sustancial de las propiedades mecánicas que buscamos, y en consecuencia una reducción de la resistencia a la rodadura.

1. Introducción

En la actualidad el sector de la automoción y del transporte por carretera supone un pilar fundamental para nuestra economía y para el avance de nuestra sociedad. En concreto, el sector de la automoción en España supuso una participación del 8,6% del PIB total del 2018, asimismo el transporte terrestre supone un 3,9% del PIB del total del mismo año, e indirectamente contribuye a aumentar el valor monetario de otros sectores.¹ Debido a su importancia existe una feroz competición en el sector de la automoción con tal de mejorar el rendimiento de los vehículos actuales, a su vez debido a los problemas actuales de contaminación los gobiernos presionan más la reducción de las emisiones de gases contaminantes y la generación de residuos. El

correcto uso de neumáticos supone un factor determinante en el ahorro de energía, el departamento de Energía de los Estados Unidos estima que aproximadamente 4,2% de la energía total disponible en el combustible almacenado en el tanque se pierde por la resistencia a la rodadura provocada durante el uso del vehículo. En consecuencia, existen varios estudios con tal de mejorar la eficiencia y durabilidad del neumático, varios factores son determinantes para su mejora. A lo largo de este trabajo analizaremos como conseguir esta mejora de la durabilidad con el uso de materiales nuevos, actuales procesadores de textos generalmente disponibles.

2. Análisis del movimiento de rodadura.

Con tal de analizar diferentes soluciones de materiales para mejorar las propiedades mecánicas estableceremos una base teórica, esfuerzos sometidos y energía perdida en el neumático a base de aproximaciones basadas en ensayos de laboratorio previamente hechos en diferentes estudios, en él se busca encontrar una respuesta a las propiedades que más interesantes para el material. Posteriormente se procede a analizar.

Al ponerse en marcha un vehículo convencional el movimiento lineal generado por el motor es transformado en movimiento rotatorio y posteriormente transmitido a través del sistema de transmisión a las ruedas traccionadas. El movimiento transmitido a la rueda es una velocidad angular ω , como todo cuerpo ante un movimiento circular genera un perfil de velocidades lineales, donde el módulo depende de la distancia del centro de rotación, en nuestro caso es el centro de la rueda y en ese punto nuestra velocidad lineal será igual a 0. A la misma vez que la rueda va girando también tiene una velocidad lineal que corresponde al movimiento del vehículo, La conjugación de ambos movimientos es el conocido como **movimiento de rodadura**, es el principal movimiento que analizaremos en los demás apartados.



Fig 1. Movimiento de rodadura.

Es importante cuantificar energéticamente la influencia de los neumáticos sobre el vehículo para ver cómo mejorar su rendimiento e influencia en el medio ambiente. La energía no se crea ni se destruye, se transforma, cuantificar energéticamente implica ver por qué no se aprovecha y dónde se pierde esta energía. Por ello, este análisis señala dónde hay mayor número de tensiones en el neumático, y dónde es la zona más crítica al trabajar.

Se define como energía la capacidad de producir movimiento o generar algún tipo de transformación en el medio donde se observa, y se mide en Joules (J). Hay diversas formas de energía, y externamente en los neumáticos en funcionamiento tenemos:

Energía cinética de rotación provocada durante el movimiento de rodadura, la energía de entrada viene dada por el tren de rodaje, donde la rueda gira solidariamente a los palieres con el contacto con el cubo de la rueda.

Energía cinética de traslación debido al contacto del neumático con el asfalto provoca un movimiento de traslación de nuestro vehículo, es la energía que deseamos maximizar respecto a la de entrada, consiguiendo reducir las pérdidas de energía.

Energía calorífica debido al fricte las partículas de los materiales en contacto, donde se excitan, generan una energía cinética a nivel microscópico que produce una energía disipada en forma de calor, puede ser tanto del contacto entre las diferentes partes móviles, y sobre todo del contacto con el asfalto. (2)



Fig 2 Esquema energético.

La energía calorífica mencionada anteriormente en función de la distancia recorrida, se define como la resistencia a la rodadura teniendo como unidad de J/m. Tradicionalmente, esto se ha asociado con una fuerza de fricte medida en N opuesta a la dirección del movimiento, este concepto se explicará con más detalle en el siguiente apartado.

La mayoría de las pérdidas sucesivas se pueden atribuir a las características del material. Durante la rodadura, el neumático el material se deforma periódicamente. Debido a las propiedades viscoelásticas del compuesto de caucho y que adelantamos posteriormente, en cada ciclo no se puede recuperar toda la energía elástica almacenada, sino que una parte se disipa. Estas las perturbaciones se propagan dentro de la estructura del neumático como ondas en una variedad de formas y

órdenes de modos diferentes, conduciendo a la disipación. La mayor parte de la disipación ocurre en la banda de rodadura, que generalmente está hecha de un compuesto de caucho que consiste en polímeros naturales y/o sintéticos, rellenos de refuerzo y algunos aditivos. Esto se debe al alto factor de pérdida de caucho, lo que permite grandes deformaciones y, por lo tanto, una energía potencial elástica. Basándonos en ensayos hechos por simulaciones como físicamente en 2018 por la Universidad de Tecnología Química de Pekín (figura 3), demuestran que la energía calorífica se concentra en la parte central (Punto B) aproximándose más a la banda de rodadura que a las llantas, además, las temperaturas más bajas se encuentran en la zona de la llanta, por el que será la zona menos problemática. (1)

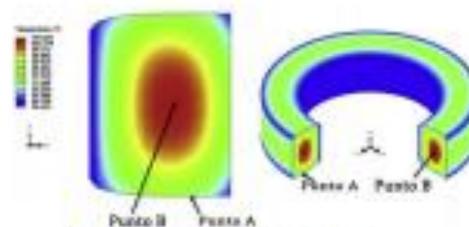


Fig 3 Concentración de temperatura.

A su vez una falta de presión en el neumático generaría una mayor área de contacto con el suelo, y las diferentes partículas se excitarían generando una mayor resistencia a la rodadura como se ve en la figura 4.



Fig 4 Área de contacto neumático.

A su vez un exceso de presión también sería contraproducente, habría una menor área de contacto con el asfalto, no tendríamos el agarre para generar el impulso durante la rodadura y generaría como consecuencia una abrasión anormal.

El neumático está sometido a varias fuerzas a la vez, de forma simplificada la resultante de las fuerzas verticales genera una tensión axial, a su vez el momento motor en el punto A de la figura 5 generará una tensión cortante. En un análisis real otras fuerzas contribuyen al aumento de estas tensiones, pero destacamos estas ya que son las más desfavorables.

Anexo 16. Analisis de materiales



Fig 5 Esquema dinámico simplificado

El estudio de *Journal of Testing and Evaluation* (4), nos confirma la correlación entre las fuerzas verticales y la tensión normal del neumático, en este estudio se hace un análisis sistemático a diferentes presiones y cargas que debe soportar el neumático. En este estudio se usó de análisis elementos finito de un total de 330 elementos y 400 nodos en una malla hexagonal. Como podemos observar en la figura 6 a una presión correcta en los casos a,b y c, al someter el neumático a una mayor carga obtendremos una mayor distribución de tensiones normales en nuestra banda de rodadura, siguiendo el trazo de la textura.

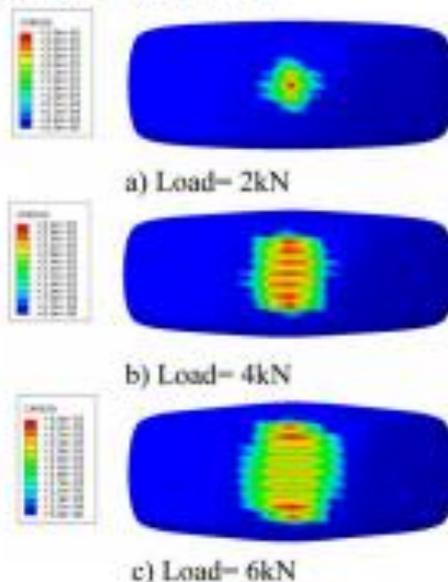


Fig 6 Análisis de tensiones normales por carga.

En lo que respecta las tensiones cortantes, vemos como en el eje del movimiento tenemos unas tensiones simétricas con sentido opuesto, esto es debido al movimiento del caucho de la banda de rodadura donde la parte delantera se adhiere mientras la trasera resbala según la carga soportada. En este trabajo hemos establecido una simplificación de cargas con tal de explicar acorde a un nivel introductorio, sin embargo, en este estudio se tiene en cuenta las propiedades viscoelásticas, las diferentes partes del neumático y los esfuerzos generados por las diferentes tensiones que omitimos en nuestra simplificación.

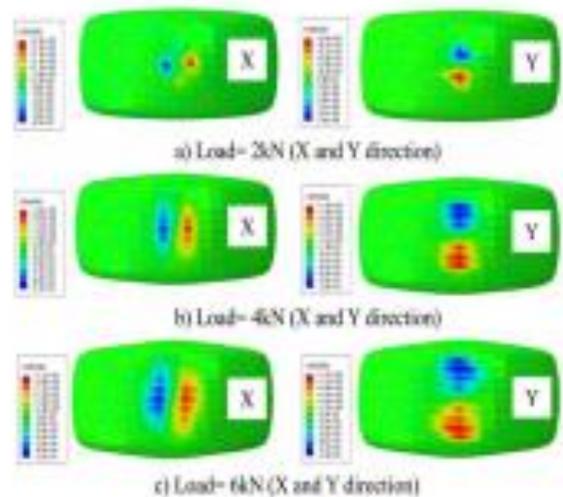


Fig 7 Análisis de tensiones cortantes por carga.

3. Análisis de materiales.

El caucho es un material con grandes características, y puede tener muchas utilidades en el mundo de los materiales. El caucho tiene un bajo módulo de elasticidad y es capaz de soportar una deformación de hasta 1000%. Después de tal deformación, se retrae rápidamente adquiriendo la fuerza y sus dimensiones originales. Es resistente y, sin embargo, presenta amortiguación interna. Caucho se puede procesar en una variedad de formas y se puede adherir a inserciones de metal o a placas de montaje. Se puede combinar para tener propiedades muy variadas. La curva de deflexión de carga se puede alterar cambiando su forma, además el caucho no se corroe y normalmente no requiere lubricación.

El comportamiento de un elastómero como el caucho depende su relación esfuerzo-deformación está compuesta de solo de una zona elástica, y después de dicha zona rompe. Esta curva no presenta un crecimiento lineal y no puede ser medida con la ley de Hooke, lo que conlleva a mencionarlo en puntos concretos de la elongación. Esto es debido al comportamiento viscoelástico que tiene el material, donde el caucho aparte de tener propiedades elásticas tiene propiedades de absorción de energía como las de un líquido viscoso.

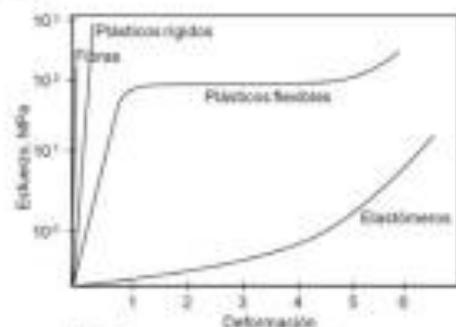


Fig 8 Comportamiento elastómeros.

Estas propiedades permiten que el caucho mantenga una forma constante después de la deformación, mientras que simultáneamente absorbe energía mecánica. La viscosidad (que varía con diferentes elastómeros) aumenta con una temperatura reducida. La elasticidad sigue la ley de Hooke y aumenta con el aumento de la tensión, mientras que la viscosidad sigue la ley de Newton y aumenta con aumento de la tasa de deformación, como resultante la tensión sometida y la elongación presentan un valor sinusoidal.

El caucho por sí solo es un entodo de macromoléculas de cadenas de hidrocarburos, en consecuencia, por sí solo fluye y no retiene su forma. Para su utilidad se tiene que conseguir enlaces entrecruzados en su estructura que garanticen su forma, con tal de lograrlo existe un proceso llamado vulcanización, calentándolo juntamente con azufre.

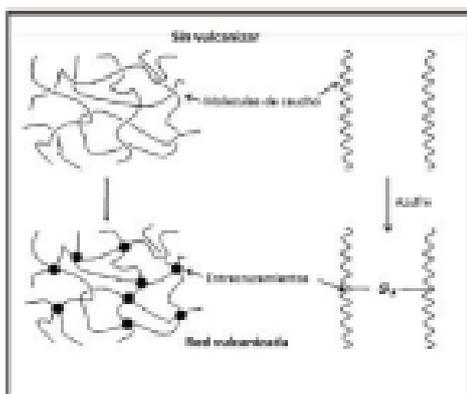


Fig 9 Proceso de vulcanización

La longitud de los enlaces entrecruzados también afecta a las propiedades físicas, unos enlaces más largos aumentan propiedades como la resistencia a la tracción, resistencia a la rotura y fatiga, unos enlaces cortos por el contrario aumentan las propiedades térmicas, estabilizadores oxidativos y mejora la resistencia a compresión. El azufre, los peróxidos, las resinas y los óxidos metálicos se usan típicamente como agentes vulcanizantes. El uso de azufre solo conduce a una reacción lenta, por lo que se agregan aceleradores para aumentar la velocidad de curado, afectando a la tasa de vulcanización, la estructura de enlaces cruzados y las propiedades finales.

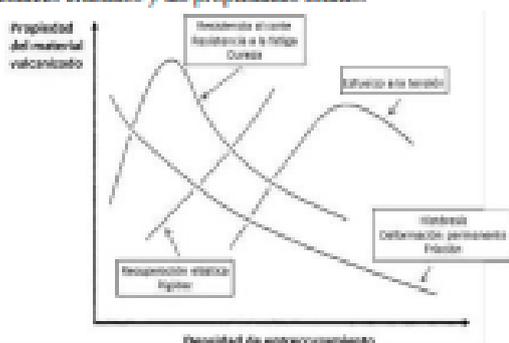


Fig 10 Propiedades según entrecruzamiento.

Una vez tenemos nuestra base de caucho, como elastómero no consigue un aumento de tensión por cristalización, por lo que necesitara para aumentar su capacidad con un refuerzo.

El más usado en la industria del neumático es el negro de carbón, sus propiedades principales son superficiales y estructurales, es el que dota del color negro del neumático. Un tamaño de partícula más pequeño de los refuerzos repartido en una mayor área de la matriz da un efecto mayor de refuerzo. Aumentado el área de superficie aumenta la tensión, la dureza, la resistencia a la abrasión, la resistencia al desgaste, la conductividad eléctrica y la vida a fatiga. Estos efectos con negro de carbón aumentan considerablemente, pero los valores máximos se producen en diferentes niveles. Para la mejora de la estructura durante la fabricación se somete los diferentes agregados a altas temperaturas hasta llevar a la fusión de partículas.

4. Refuerzo de Sílice con alta dispersión.

Rubber Technology Centre of Indian Institute of Technology [10] en su artículo estudia el comportamiento de un compuesto con base de caucho SMR 20 según se va añadiendo sílice, en este se analiza con 0,30,38 y 45 phr de sílice. El sílice actúa como refuerzo, en este caso se trata de nanopartículas agregadas a la mezcla con tal de tener una mayor dispersión, en otros estudios el problema que había era la baja capacidad de procesamiento y un deterioramiento del comportamiento mecánico. En el caso 50 el refuerzo es con negro de carbón en vez de sílice, en las demás composiciones también se añade un poco de silano como segundo refuerzo a la mezcla. También destacar que se añade en todas las soluciones sin excepción 1,8 phr de sulfuro para la vulcanización.

Ingredientes (phr)	50	500	550	580
SMR 20	100	100	100	100
DIO	0	0	0	0
Ácido esteárico	2	2	2	2
Sílice	-	80	38	05
S-SiO ₂	-	0	2,0	0
NEED	0	-	-	-
Acetato (Bajo PCA)	0	0	0	0
OPPO	1	1	1	1
OPPO	1	1	1	1
MC-Cure	2	2	2	2
CSB	1,8	1,8	1,8	1,8
Sulfuro	1,8	1,8	1,8	1,8

Tabla 1 Tabla ingredientes

En los resultados de ensayos de tracción vemos que hay una enorme diferencia entre un refuerzo de negro de carbón y de sílice, todas sus propiedades se ven mejoradas sustancialmente con un refuerzo de sílice respecto a negro de carbón, en varias propiedades tener un refuerzo de más de 38phr parece que se vuelve contraproducente, así que podría ser la mejor solución ante un desarrollo de un neumático, y la que replicaremos el ensayo mediante simulaciones.

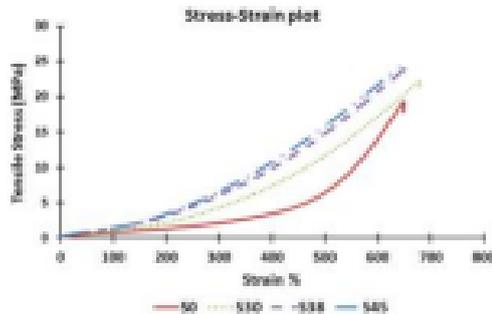


Fig 11 Resultados ensayo de tracción.

5. Condiciones de simulación de ensayo

Para el análisis de las diferentes composiciones de materiales con base caucho, simulamos un ensayo de tracción, que viene definida por la norma *ISO 37:2013*.

En ella se estipula dos tipos diferentes de probetas, las de anillo y las de halterín, en nuestro caso utilizaremos diferentes probetas de halterín normalizadas para el ensayo de tracción debido que nos dan un resultado más preciso según la misma normativa, en concreto de tipo 1 y de tipo 2. Según la normativa, la velocidad de la mordaza superior será constante y de 8,33 mm/s.

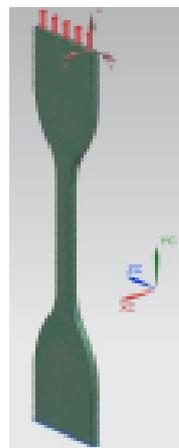


Fig 12 Simulación ensayo probeta típica.

Esta simulación está hecha con el programa *Siemens NX*, esto es debido a su fácil implementación, y por utilizar el solver *Nastran* que nos permite extraer datos a *Femap* para su postprocesado. La simulación usa un malla hexagonal con 20 nodos, nos proporciona una buena sensibilidad a la vez que el malla se adapta a nuestra pieza. Para la configuración del material hemos tenido que coger propiedades de la base de caucho vulcanizado extraído de la base de datos *AbaqWeb*.

6. Resultados

El alargamiento a rotura encaja con los datos extraídos, como contrapartida tenemos la tensión máxima y el módulo de Young nos ha variado en función de la densidad implementada a partir de la base de datos de *AbaqWeb*, el coeficiente de poisson y la sensibilidad de la probeta.

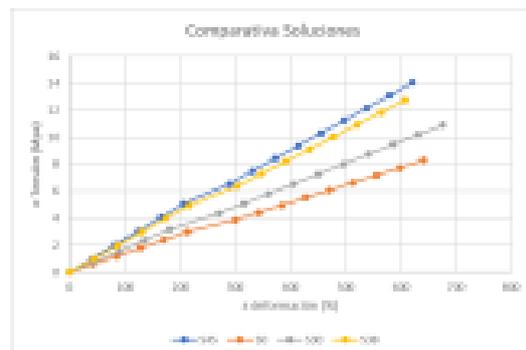


Fig 13 Resultados simulación.

Observando la comparativa entre diferentes soluciones vemos que existe un aumento de propiedades mecánicas según se va aumentando la proporción de sílice. A pesar de que los resultados no sean favorables respecto a los valores en que se basa este estudio, la relación entre el aumento de sílice de los valores obtenidos respecto a los valores del estudio del que se basa presenten la misma proporción.

7. Conclusiones

Un neumático durante su uso común está sometido a varios esfuerzos a la vez, estos condicionan una pérdida de energía muy grande en forma de calor, llamado resistencia a la rodadura. Una de las maneras de solventarlo es mejorando el material de la banda de rodadura. Con un mejor refuerzo en una base de caucho se consigue una gran mejora de la resistencia a la rodadura, sustituir el típico refuerzo de negro de carbón por sílice parece ser una gran aproximación a esa mejora que buscamos. Esto conllevará, mejor rendimiento del vehículo, menor contaminación y un producto más atractivo comercialmente.

Para caracterizar un material una de las pruebas más extendidas y con un carácter comparativo es el ensayo de tracción, en este trabajo se ha realizado unas simulaciones con el objetivo de analizar el comportamiento de sílice como refuerzo, en los resultados que hemos obtenido en las simulaciones de ensayos de tracción no han sido del todo satisfactorias, solo podemos dar por válido la comparativa entre las diferentes soluciones, vemos que existe un aumento del módulo de elástico entre ellas y sin generar una zona plástica o una rotura prematura, lo que nos podrá permitir tener un mayor rendimiento trabajando elásticamente. Esto concuerda con varios de los estudios vistos anteriormente, un aumento de sílice aporta una