

Validación de resultados de ensayo con dispositivo de caracterización de superficie

Validation of test results with surface characterization device

I. Sánchez¹, J. Velasco¹, J. A. Cabrera¹, J. J. Castillo¹, M. Sánchez²

Resumen

La adherencia y la rugosidad son dos parámetros fundamentales en la ingeniería de vehículos y la seguridad vial, ya que influyen directamente en el comportamiento de los neumáticos sobre las superficies de rodadura, por lo que afectan a la maniobrabilidad y a la estabilidad de los vehículos. Con el fin de avanzar en la investigación y el desarrollo de tecnologías más eficaces para la mejora de la dinámica vehicular, se ha diseñado y se ha fabricado un sistema para la medición de la adherencia y rugosidad de superficies, el cual está orientado a emplearse como herramienta de referencia para la caracterización de superficie y optimización de los sistemas de control del automóvil.

El sistema diseñado combina métodos de medición para evaluar la capacidad de adherencia y la rugosidad superficial de manera simultánea. Este enfoque permite obtener resultados más precisos y rápidos en comparación con los métodos tradicionales, y proporciona una visión integral del estado de la superficie. La aplicación futura de este sistema no solo se prevé en el ámbito de la caracterización de superficies, sino también en el desarrollo de sistemas de control de vehículos, optimizando los sistemas de frenos, tracción y estabilidad, especialmente en condiciones de baja adherencia.

En este trabajo se muestran los resultados de ensayo realizados para validar la precisión y la fiabilidad del sistema en comparación con los métodos tradicionales de referencia, como son el péndulo británico y el método volumétrico. Para ello, se han realizado una serie de pruebas en diferentes tipos de superficies, y se ha evaluado su rendimiento bajo condiciones controladas. Los resultados obtenidos indican que el nuevo sistema ofrece mayor consistencia y repetibilidad en las mediciones de adherencia, así como mejor correlación con la rugosidad superficial. Gracias a todo esto, se espera lograr una caracterización de superficie más precisa y fiable.

Palabras clave

Adherencia, rugosidad, superficies, péndulo británico, clasificación, estimación y dinámica vehicular.

Abstract

Adhesion and roughness are two fundamental parameters in vehicle engineering and road safety, as they directly influence tire behaviour on road surfaces, affecting vehicle manoeuvrability and stability. To advance research and the development of more effective technologies for vehicle dynamics, a system has been designed and manufactured to measure surface adhesion and roughness, serving as a reference tool for surface characterization and optimization of automotive control systems.

The system integrates measurement methods to simultaneously evaluate both adhesion and surface roughness, enabling faster and more accurate results than traditional methods and providing a comprehensive view of surface conditions. Its application extends beyond surface characterization to the development of vehicle control systems, optimizing braking, traction, and stability, particularly under low-adhesion conditions.

This paper presents the results of tests conducted to validate the accuracy and reliability of the system in comparison with traditional reference methods, such as the British pendulum and the volumetric method. Experiments were performed on different surface types under controlled conditions. The results indicate that the system provides more consistent and repeatable adhesion measurements, with improved correlation to surface roughness, enabling more accurate and reliable surface characterization.

Recibido/received: 03/07/2025. Aceptado/accepted: 10/10/2025.

¹Dpto. de Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos. Universidad de Málaga.

²Dpto. de Ingeniería Mecánica y Energía. Universidad Miguel Hernández de Elche.

Autor para correspondencia: nsanchez@uma.es; msanchez@umh.es

Keywords

Adherence, roughness, surfaces, British pendulum, classification, estimation, vehicle, and dynamics.



Imagen cedida por los autores del artículo.

1. INTRODUCCIÓN

La estimación precisa de la adherencia entre el neumático y la superficie de la carretera desempeña un papel fundamental en la seguridad y el rendimiento de los vehículos. Al hablar de adherencia, se hace referencia a la capacidad de los neumáticos para transmitir a la superficie las fuerzas de tracción, frenado y estabilidad lateral necesarias para un correcto control, especialmente en situaciones adversas como puede ser con lluvia, nieve y superficies resbaladizas. Por el contrario, una situación con mala adherencia puede dar lugar a elevados deslizamientos, pérdida de control del vehículo y situaciones de peligro para los conductores como y otros usuarios de la vía. En este contexto, la correcta medición o estimación de la adherencia se vuelve aún más relevante para la mejora de los algoritmos de control.

Fabricantes de automóviles e investigadores se esfuerzan por mejorar día a día la capacidad de los sistemas de control y responder de manera óptima a las condiciones cambiantes de la carretera (Daghani & Pinar, 2019; Castillo *et al.*, 2015), trabajando con potentes simulaciones que emplean un amplio abanico de modelos de neumáticos. Entre los principales enfoques se encuentran los modelos numéricos y de simulación, que utilizan herramientas como el método de elementos finitos para analizar el contacto neumático-superficie en distintas condiciones. También destacan los modelos analíticos, que representan matemáticamente la adherencia en función de variables como la presión de contacto, la deformación del neumático y

la textura del pavimento. Finalmente, se presentan los modelos empíricos basados en la recopilación de grandes volúmenes de datos experimentales obtenidos mediante dispositivos de medición, con el fin de describir o modelar el comportamiento del neumático (Magic Formula, Pacejka).

Recorriendo la bibliografía actual, se observa una amplia variedad de algoritmos propuestos con el objetivo de estimar la superficie o el nivel de adherencia que esta presenta. Trabajos como el de Masino *et al.* (2017) abordan la clasificación de superficies mediante el análisis acústico de la rodadura del neumático. Por otro lado, Jin *et al.* (2020) emplean un enfoque basado en el análisis de imágenes para la estimación del coeficiente de rodadura de la superficie. Asimismo, Wang *et al.* (2017) y Mei *et al.* (2019) tratan el problema de la clasificación de superficies mediante el análisis de la aceleración experimentada por el neumático al rodar sobre distintas superficies. En el estudio de Weiwen y Qingrong (2009) se utilizan sensores propios del vehículo para realizar análisis de patrones que permiten inferir la superficie sobre la que se circula. Finalmente, trabajos como los de Park *et al.* (2018) y Šabanović *et al.* (2020) hacen uso de algoritmos basados en machine learning y deep learning para analizar la información aportada por los sensores del vehículo, con el objetivo de estimar parámetros que permitan clasificar la superficie, determinar la adherencia o evaluar distintos parámetros dinámicos, entre otros.

Por otro lado, también es importante para los ingenieros de infraestructuras y

las autoridades viales evaluar la calidad de las carreteras existentes y optimizar los métodos de construcción y los materiales utilizados para garantizar un agarre óptimo (Pérez-Acebo *et al.*, 2020; Sharma *et al.*, 2020). Los datos de adherencia son fundamentales para el diseño de carreteras más seguras y la implementación de medidas de mantenimiento adecuadas, además de para poder informar a los usuarios sobre las condiciones de la vía.

A partir de esto se hace crucial disponer de datos de ensayo de superficie precisos. Diversos tipos de ensayos miden la adherencia y la rugosidad de la superficie (Chen *et al.*, 2022; Zúñiga-García *et al.*, 2017; Mahboob Kanafi *et al.*, 2015; Wambold & Antle, 1995; Torbruegge & Wies, 2015). Se dividen principalmente en dos categorías: ensayos estáticos, aquellos que realizan mediciones esporádicas en una superficie fija y ensayos dinámicos, que registran datos en movimiento mediante vehículos sensorizados.

Entre las herramientas para realizar ensayos estáticos, destaca el péndulo británico, un dispositivo portátil ampliamente tratado en la bibliografía (Chu *et al.*, 2022; Guo *et al.*, 2021) y utilizado en normativas nacionales e internacionales (AENOR, 2012), como es el caso de España. Su popularidad radica en su facilidad de uso, portabilidad y capacidad de medir la adherencia tanto en seco como en mojado. No obstante, presenta limitaciones, como la falta de representación de condiciones de fricción real, su dependencia ante la manipulación del operador y la necesidad de correlacionar sus resultados con coeficientes



Figura 1. Ensayo de una superficie de asfalto mojado con péndulo británico.

de fricción reales, dado que no aporta una medida directa del coeficiente de fricción entendido como la relación entre la carga vertical y horizontal sufrida por el medidor (Fig. 1).

Por su parte, los ensayos dinámicos incluyen dispositivos montados en vehículos que simulan condiciones de conducción reales. Estos se pueden dividir en función del modo de operación sobre el neumático sensorizado. Ejemplos de estos sistemas son: dispositivos con rueda bloqueada (CHIRP, Estados Unidos), sistemas que imponen ángulo de giro del neumático sensorizado (SCRIM, Reino Unido) y, por otra parte, equipos con rueda parcialmente bloqueada de deslizamiento fijo (Grip Tester, Reino Unido) o deslizamiento variable (Norsemeter, Noruega) (Mataei *et al.*, 2016; Guo *et al.*, 2021).

Entre los equipos de medición disponibles, GripTester destaca como uno de los más utilizados (Fig. 2). Se trata de un remolque acoplado a un vehículo de prueba, dotado de un sistema de sensores que registran fuerza, velocidad y posición durante el avance. Con estos datos es posible evaluar en tiempo real la adherencia de amplias secciones de la superficie. Su principio de funcionamiento consiste en introducir una ligera diferencia de velocidad entre la rueda instrumentada y las demás ruedas del remolque, para generar así un deslizamiento controlado que permite calcular la fricción.

En un nivel de escala mayor, se pueden encontrar auténticos laboratorios rodantes (Fig. 3) en los que se dispone de la maquinaria necesaria para someter a un neumático de ensayo a las condiciones deseadas y obtener la información más realista posible del contacto neumático-carretera. Sin embargo, el desarrollo y el empleo de estos dispositivos está limitado a grandes corporaciones que cuentan con los recursos materiales y humanos suficientes para hacerlo. Este hecho hace poco viable optar por una solución de este calado.

Finalmente, como muestra la figura 4, desde una perspectiva industrial orientada a la producción y a los ensayos en serie, hay diversas máquinas diseñadas específicamente para reproducir distintas condiciones de funcionamiento del neu-



Figura 2. Dispositivo de ensayo de adherencia GripTester.

mático. Estos equipos permiten analizar su comportamiento de manera controlada sin necesidad de desplazarse fuera del laboratorio.

Otro aspecto clave en la caracterización de la superficie es la rugosidad, parámetro que no puede ser evaluado por la mayoría de los dispositivos descritos. La dimensión de la textura superficial con mayor impacto sobre la adherencia corresponde a la macrotextura (0,5-50 mm), directamente determinada por el tamaño de grano. Esta característica incide, además, de forma significativa en la capacidad de evacuación de agua en la zona de contacto del neumático con el pavimento.

Por otra parte, en el ámbito nacional, el ensayo de rugosidad establecido más empleado es la técnica de parche volumétrico (AENOR, 2010; AENOR, 2021; Ruiz & González, 2013). Esta metodología se basa en técnicas rudimentarias y simples. Así, en este caso, se aplica un volumen cono-



A) Vehículo para prueba de neumáticos Michelin PLR.



B) Vehículo de inspección de carreteras Scrim.



C) Vehículo de ensayos de neumáticos eléctrico Continental.

Figura 3. Vehículos de investigación de neumáticos.



A) Máquina de ensayo de neumáticos con rodillo UMH (Cuadrado & Sánchez, 2018).



B) Máquina de ensayos de neumáticos de tipología Flat-Trac UMA (Cabrera *et al.*, 2003).



C) Máquina desplazable sobre pista de asfalto Dufournier.

Figura 4. Maquinaria para ensayo de neumáticos.

cido de material de ensayo sobre la superficie y se extiende suavemente hasta que el material queda incrustado en la macrotextura superficial. De esta manera, se mide el diámetro del parche formado y, empleando la ecuación del volumen de un cilindro, se deduce la altura media de grano en todo el parche (Fig. 5).

En la actualidad, gracias al avance de la técnica y la tecnología, surgen nuevos dispositivos basados en tecnología láser que pueden realizar un perfil de superficie muy preciso (Fig. 6). Este tipo de aparatos emplea un cabezal láser que se desplaza grabando la profundidad de la textura de la superficie durante su recorrido con resoluciones de micras (μm) y procesan todo el perfil digitalmente.

Este trabajo presenta un dispositivo innovador diseñado para medir de forma directa y automática la adherencia y la rugosidad de las superficies y que supera las limitaciones de los métodos tradicionales. El equipo, denominado AFRmeter (Automatic Friction and Roughness meter), se caracteriza por ser económico, fácil de utilizar y por requerir una mínima intervención del operador, lo que incrementa la repetibilidad y la confiabilidad de los resultados.

Asimismo, se exponen los primeros resultados obtenidos con este nuevo dispositivo y se comparan con los registrados mediante el uso del péndulo británico y el método volumétrico. Las pruebas iniciales realizadas sobre distintas superficies indican que el AFRmeter proporciona mediciones consistentes y adecuadas, y se posiciona como una herramienta prometedora para investigaciones en seguridad vial y caracterización de pavimentos. Sus mediciones precisas ofrecen una base sólida para la validación de superficies y la calibración de algoritmos de control en dinámica vehicular.

Este artículo se estructura de la siguiente manera: primero, se presenta el diseño y desarrollo del prototipo pro-

puesto. A continuación, se examinan los dispositivos tradicionales utilizados como referencia para la validación comparativa, mientras que la siguiente sección describe las superficies seleccionadas como objeto de estudio. A continuación se detallan los experimentos realizados y los resultados obtenidos, seguidos por una discusión crítica de estos hallazgos. La siguiente sección resume las principales conclusiones del trabajo. Finalmente, el último apartado aborda las posibles aplicaciones del dispositivo y propone líneas de investigación y desarrollo futuras.

2. DISEÑO Y DESARROLLO DEL PROTOTIPO

Los métodos tradicionales, aunque estandarizados, presentan limitaciones en precisión debido a la influencia del operador y a la naturaleza indirecta de sus mediciones, lo que dificulta la correlación de resultados. El dispositivo de ensayo de adherencia y rugosidad propuesto en este trabajo se desarrolla como una solución técnica para obtener mediciones objetivas y cuantitativas de las propiedades superficiales.

Su aplicación proporciona a los ingenieros de dinámica vehicular una referencia precisa para la calibración de algoritmos de control y, en ingeniería civil, mejora la fiabilidad en la toma de decisiones sobre mantenimiento y la optimización de vías.

2.1 Requisitos de diseño

El proceso de desarrollo del prototipo se llevó a cabo mediante la recopilación exhaustiva de información relacionada con las necesidades y desafíos existentes en este campo de aplicación. Se realizaron estudios de mercado, análisis de tecnologías disponibles y consultas con expertos en el área para comprender a fondo sus demandas y expectativas. Este esfuerzo tiene como objetivo garantizar que los ensayos se realicen en las mismas condiciones en todo momento y que puedan ser reproducibles por otro equipo en el futuro.

Los principales requisitos de diseño son:

- Medición directa del coeficiente de adherencia.
- Medición directa de la rugosidad de superficie.
- Disponer de la automatización necesaria para realizar y grabar el ensayo.
- Capacidad para registrar la temperatura ambiente y de superficie.
- Incluir geolocalización del dispositivo.
- Garantizar la repetibilidad de ensayos a través de la rigurosidad y trazabilidad de las condiciones en las que se realizan las mediciones.
- Dispositivo portátil y manejable.
- Dispositivo económico viable.

El prototipo desarrollado se plantea como un conjunto sensorizado montado sobre un marco o guía que permite su desplazamiento sobre la superficie en la que se va a ensayar (Fig. 7).

El dispositivo está equipado con un palpador de caucho montado sobre una célula de carga que permite monitorizar de forma continua las fuerzas vertical y horizontal en el punto de contacto. Gracias a este sistema, no es necesario cumplir condiciones de puesta en marcha tan estrictas como en el ensayo con péndulo. Además de la medición de adherencia, el equipo incorpora un láser para capturar el perfil de rugosidad de la superficie analizada.

2.2 Componentes y materiales requeridos

El mecanismo de movimiento elegido para propulsar el carrete se basa en el uso de un husillo con poleas y guías lineales. El carrete descansa sobre un marco de aluminio con dos guías lineales y un sistema de patines; esto permite 900 mm de carrera efectiva de ensayo.

Para este montaje, se ha elegido un motor brushless trifásico de pequeñas dimensiones, concretamente un modelo del tipo C4250 Outrunner. Se trata de un motor síncrono de imanes permanentes (siete pares de polos) que puede aportar una potencia de 1,7 kW y 0,81 Nm de par nominal.

El sistema de gestión de potencia emplea un inversor que convierte la corriente continua de la batería en corriente trifásica para alimentar el motor síncrono. Este inversor aplica un control vectorial que regula el par y el flujo magnético controlando en todo momento la posición del rotor. Para ello, se empleará un controlador de la marca oDrive, que puede realizar control por posición, lo que permitirá ajustar con precisión la posición del carrete y así



Figura 5. Ensayo de rugosidad en asfalto mediante técnica de parche volumétrico.



Figura 6. Ensayo de rugosidad en asfalto mediante dispositivo láser Dufournier.

controlar de forma exacta la velocidad de avance del efecto final.

El dispositivo proporciona dos tipos de resultados: por un lado, el coeficiente de fricción dinámico (μ), obtenido cuando ambas superficies presentan movimiento relativo, y, por otro, la rugosidad en forma de perfil de superficie (mm), a partir del cual es posible derivar las métricas más comunes establecidas en la normativa, como la profundidad media del perfil.

El AFRmeter funciona a velocidades comprendidas en un rango de 0 a 300 mm/s. El patín sensorizado, dispuesto sobre una mesa deslizante que le permite ajustar la fuerza sobre la superficie, instala una célula de carga triaxial, modelo T501 marca Right, capaz de soportar hasta 300 N con una resolución de 0,1 N.

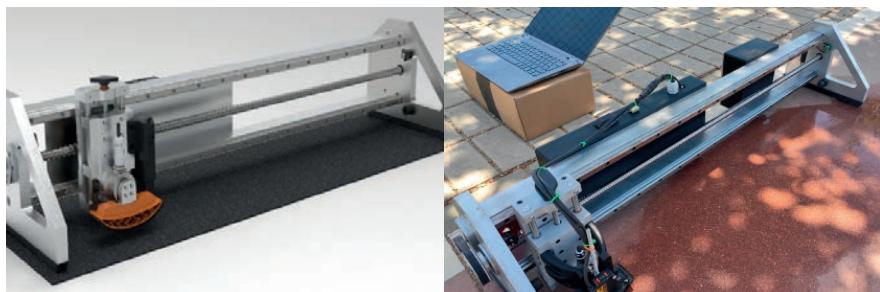
Este montaje permite la medida simultánea de la carga vertical ejercida sobre la superficie y la fuerza longitudinal generada por el desplazamiento del patín (Fig. 8). Ambas fuerzas dan lugar a la definición del coeficiente de adherencia longitudinal (μ):

$$\mu = \frac{F_x}{F_z} \quad (1)$$

Para la producción del patín se ha optado por un diseño de tipo flexible para dar mayor progresividad al contacto con la calzada, basado en plástico impreso en 3D. Como recubrimiento de contacto sobre el patín, se dispondrá una pieza de caucho 57 o 96 (grado internacional de dureza del caucho [IRHD]).

En paralelo con este sistema, se ubicará un láser de alta precisión para la captura de la rugosidad de superficie. El dispositivo es de la marca OMRON modelo Z4M-S40 y dispone de una distancia de medida de 40 \pm 10 mm con una resolución de 20 μ m. El rango de alcance y de resolución del láser permite analizar una zona de trabajo que abarca la parte final de la macrotextura (de 50 a 0,5 mm) y parte de la microtextura (< 0,5 mm) superficial. No obstante, esta última no se considera objeto de medición, ya que el láser operará a una velocidad de avance de 12,5 mm/s, y las posibles imperfecciones de la superficie podrían afectar la calidad del resultado. El sistema de adquisición junto con el láser establece una resolución en el avance de 0,05 mm, suficientes para captar adecuadamente la macrotextura.

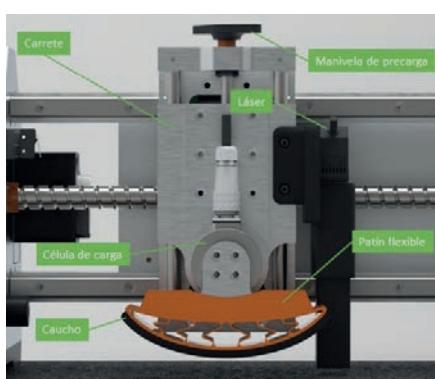
El análisis a escala microscópica se reserva para dispositivos más avanzados, diseñados para realizar mediciones con mayor tiempo de exposición (de horas incluso) y una precisión mayor capaz de captar ese rango de la superficie.



A) Modelo renderizado del prototipo completo.

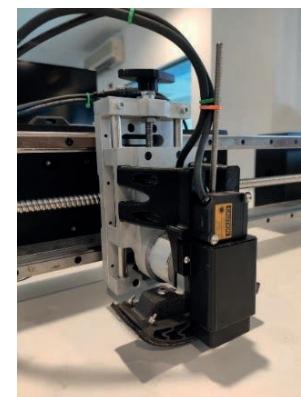
Figura 7. Vistas del prototipo.

B) Prototipo durante un ensayo de superficie.



A) Modelo renderizado del patín.

Figura 8. Vistas del patín deslizante.



B) Primer prototipo completado

En tercer lugar, se instalará un sensor infrarrojo para la medición de la temperatura de superficie. Se ha elegido para este fin un sensor de la marca MELEXIS modelo MLX90614, con el que poder realizar una medición de la temperatura de superficie sin contacto.

Estos tres sensores formarán el conjunto principal de adquisición, cubriendo los objetivos por los cuales se propone el diseño y fabricación de este prototipo. Adicionalmente, se incluirá un sensor para registrar la temperatura y la humedad ambiente. El modelo elegido es el sensor BME280 de la marca BOSCH. En último lugar, se incorporará un sensor GPS al sistema para geoposicionar las ubicaciones ensayadas. Esta información será captada mediante un sensor modelo M6N de la marca uBlox.

Por encima de todo lo descrito y de la electrónica auxiliar, se dispondrá de un ordenador en tiempo real que irá embarcado sobre la bancada. Se trata de un dispositivo MyRIO de la marca National Instruments, el cual se encargará de gestionar la entrega de potencia y el movimiento del efecto y, por otro lado, de cubrir la adquisición de todas las señales de los sensores y almacenar los ensayos realizados.

El software elegido como base de todo el sistema será Labview. La decisión es

obligada, dado que se emplea un dispositivo MyRIO de National Instruments, pero también se elige por su versatilidad de programación a la hora de adaptarse a distintos tipos de proyectos y por la gestión de datos en el momento de registrar todos los sensores.

Aunque técnicamente más complejo, el dispositivo se caracteriza por su fácil manejo y portabilidad, gracias a la posibilidad de interactuar con el equipo y de gestionar los ensayos realizados a través de un ordenador o una tableta en el mismo momento (Fig. 9). La frecuencia de adquisición de los sensores por parte del ordenador principal está establecida de 250 Hz, rango apto para el desarrollo de los ensayos.

Finalmente, el dispositivo cuenta con una batería integrada que permite su uso en ensayos de campo.

Este sistema logra eliminar la variabilidad y la interpretación de resultados que adolecen sistemas como el péndulo británico. Por otra parte, su portabilidad le permitirá realizar ensayos en cualquier tipo de superficie, hecho fuera del alcance de maquinaria de ensayo industrial estática y laboratorios rodantes de grandes dimensiones. Además, la medida de rugosidad aporta un refuerzo más para la completa caracterización de superficie, parámetro que quedaba fuera del alcance de la mayo-

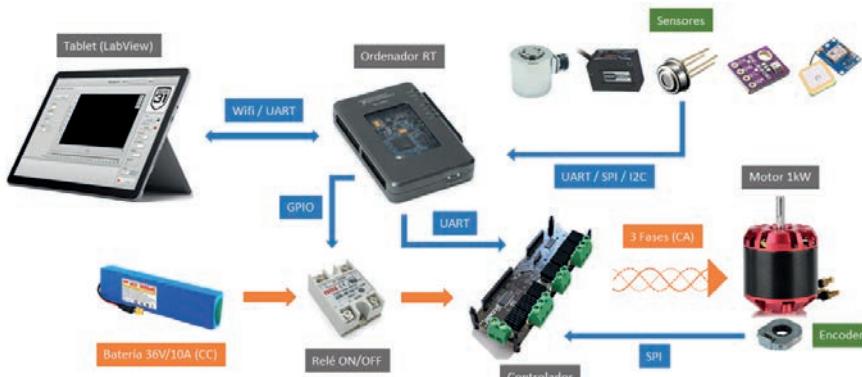


Figura 9. Diagrama de componentes del sistema.

ría de los dispositivos mencionados anteriormente.

Una vez situado el dispositivo sobre la superficie que ensayar, se realizará la puesta en servicio de todos los sensores y se aplicará la carga vertical deseada para el ensayo. El sistema está pensado para trabajar con una carga vertical constante durante todo el ensayo. Esta podrá ajustarse manualmente al inicio mediante la manivela de precarga situada en la parte superior. Hecho esto, el ordenador comenzará a lanzar las instrucciones de ensayo. La secuencia para ejecutar los ensayos debe estandarizarse, con la idea de garantizar la trazabilidad y la repetibilidad en los ensayos a lo largo del tiempo.

3. DISPOSITIVOS TRADICIONALES DE MEDIDA

Para llevar a cabo los ensayos, se utilizan dos dispositivos de medición: por un lado, el péndulo británico del Laboratorio de Demarcación de Carreteras del Estado en Andalucía Oriental (MITMA) y, por otro, el AFRmeter desarrollado en este trabajo para medir el coeficiente de adherencia y la rugosidad de la superficie, perteneciente al Área de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Málaga (IMMA).

El péndulo británico (Fig. 10) es un dispositivo mecánico sencillo que cuenta con un brazo oscilante equipado con un

patín de caucho como elemento rozador. Su funcionamiento se basa en medir la energía disipada por fricción cuando el patín cae y entra en contacto con la superficie. Durante este proceso, el patín arrastra una aguja indicadora, que queda fija en el punto final del recorrido antes de que el péndulo regrese a su posición inicial. La posición alcanzada por la aguja y la distancia recorrida por el péndulo tras el contacto, se utilizan para calcular el valor de resistencia al deslizamiento. El tamaño y la geometría del péndulo están definidos por normativa para garantizar la calidad y trazabilidad de los resultados.

Cuando el péndulo roza la superficie, lo hace aproximadamente sobre un recorrido de 126 mm. El caucho empleado en el ensayo está normalizado y debe presentar un borde de arista limpia de no más de 1 mm. También está definida la carga vertical que el patín debe imprimir sobre la superficie, gracias a un muelle dispuesto para tal fin. El valor de esta fuerza está establecido en 22 N aproximadamente cuando la deflexión del muelle alcanza 4,5 mm. La dureza del patín se establece en un valor de 57 o 96, según el grado de dureza del caucho.

De manera paralela, el método de parche volumétrico empleado para medir la rugosidad superficial consiste en extender un volumen conocido de arena o esferas de vidrio sobre la superficie con el uso de

un pisón de caucho plano normalizado. Una vez que el material se ha distribuido de manera uniforme, se procede a medir en repetidos puntos el diámetro del parche generado. Con el resultado de la media aritmética de los valores medidos se estima la profundidad media de la textura superficial.

4. SUPERFICIES DE ENSAYO

Para las pruebas de campo se han seleccionado seis tipos de superficie, con el objetivo de abarcar amplias variaciones en el material constructivo, tamaño de grano, irregularidad de la superficie y porosidad (Fig. 11). Estos factores son esenciales para evaluar cómo cada tipo de superficie se comporta en condiciones reales de uso. Se han incluido materiales como hormigón, asfalto y resina, cada uno con características que influyen en aspectos como la adherencia, el drenaje de agua y la resistencia al desgaste. Además, se ha considerado la textura y la rugosidad de las superficies, que afectan la fricción y la acumulación de suciedad o agua.

Las pruebas se realizarán en dos condiciones diferentes (seco y mojado), para recopilar información sobre el agarre en diferentes circunstancias climatológicas. El objetivo es obtener una evaluación completa de cómo responden estas superficies bajo condiciones de uso cotidiano.

Las características principales de cada superficie se evaluarán ordenándolas de menor a mayor en función del estado observado de las superficies (Tabla 1). Esta comparación previa a los ensayos aportará información relativa del desempeño de cada superficie, lo que facilitará la toma de decisiones a la hora de planificar los ensayos y la posterior validación de los resultados.

5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Para este trabajo se han sometido a ensayo seis superficies diferentes en condiciones de seco y mojado. Cada superficie ha sido ensayada empleando dos equipos de trabajo: el péndulo británico y el AFRmeter, propuesto en este trabajo para el análisis de adherencia y rugosidad de superficie.

En primer lugar, se presentan los resultados obtenidos con el péndulo británico. Este dispositivo proporciona una única medida que resume los resultados de las diferentes pasadas del péndulo sobre la superficie. Según normativa, se deben realizar al menos cinco pasadas. Si las diferencias entre estas pasadas no superan las tres unidades, se registra el valor; de lo



A) Péndulo británico.

B) Método del parche volumétrico.

Figura 10. Métodos de caracterización de superficie clásicos.

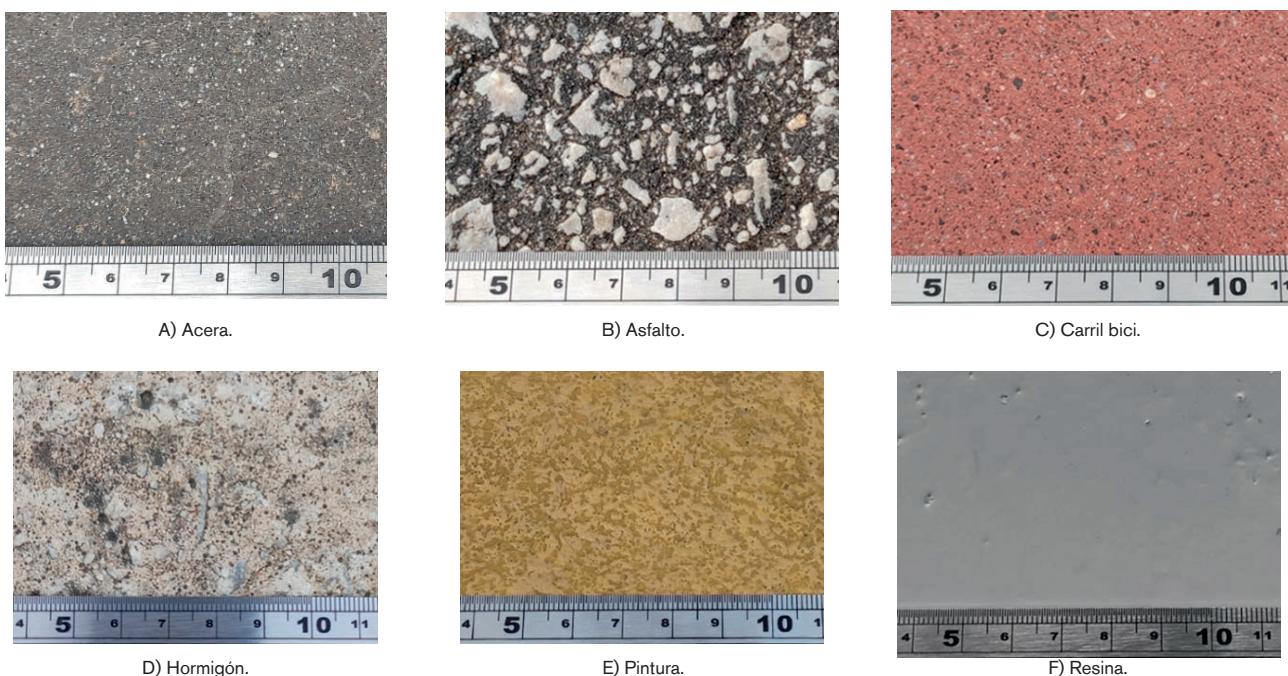


Figura 11. Superficies de ensayo.

Superficie	Tamaño de grano	Irregularidad	Porosidad
Acera	3	2	3
Asfalto	5	5	5
Carril bici	3	2	4
Hormigón	4	4	6
Pintura	2	3	2
Resina	1	1	1

Tabla 1. Propiedades de superficie.

contrario, se repite el proceso hasta obtener tres lecturas constantes. La superficie de trabajo tiene una longitud normalizada de, aproximadamente, 126 mm y el péndulo se desplaza sobre ella a una velocidad máxima próxima a los 3 m/s (Fig. 12).

Los valores mostrados en la figura 12 son el resultado del ensayo de las distintas superficies ofrecido por el equipo de trabajo del péndulo británico. Los resultados están corregidos frente a la influencia de la temperatura como está recogido en la norma. Además, se muestra la ratio de agarre seco sobre mojado entre las dos condiciones de superficie con el mismo sistema de medición.

Por su parte, los ensayos realizados con el AFRmeter ofrecen una medida basada en la adquisición continua de información. El dispositivo ensaya cada superficie de manera continua. Durante este tiempo, el sistema de adquisición recaba los datos de todos los sensores con una frecuencia de adquisición de 250 Hz. Por cada ensayo se realizan 10 pasadas sobre el total de la superficie.

La carga vertical inicial se impone mediante un sistema que trata de mantener estable la presión que el caucho ejerce sobre la superficie. Se establece una carga inicial de 40 N sobre el carrete sensorizado. Los ensayos son realizados a una velocidad de 125 mm/s durante todo el recorrido.

En la figura 13 se muestra el resultado final alcanzado por el AFRmeter para el coeficiente de fricción (μ) de cada una de las superficies, bajo las dos condiciones de ensayo. De igual manera que con el sistema anterior, se refleja la ratio de agarre seco sobre mojado para este sistema.

La figura 14 concentra toda la información de los ensayos del coeficiente de fricción (μ) para cada superficie con la dispersión típica (σ) asociada a cada ensayo. En este caso, son resultado del tratamiento de miles de datos recabados durante la duración del ensayo gracias al sistema de adquisición del dispositivo. Los resultados presentan un rango de dispersión contenido, y estos son de un orden de magnitud inferior al propio valor del coeficiente resultante.

Para estos resultados no se contempla corrección de temperatura, dado que no se dispone de la base de conocimiento y de pruebas suficientes para tal fin. Para actuar contra la posible dispersión debida a la temperatura, todos los ensayos se han realizado a temperatura controlada en un rango de $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

La segunda parte del ensayo contempla el estudio de la rugosidad para realizar un perfil de superficie completo de la zona de ensayo (Fig. 15). Para el desarrollo de estos ensayos, se ha establecido una velocidad de avance reducida de 12,5 mm/s y se ha hecho trabajar únicamente el dispositivo láser; el palpador de caucho ha permanecido en una posición elevada. Las superficies han sido ensayadas un total de seis veces.

La evaluación de la superficie se ha basado en la determinación de la profundidad media del perfil (MPD). En la norma se definen los distintos rangos representativos de la superficie, así como la metodología de ensayo y parámetros representativos. También se obtendrá la profundidad estimada de la textura (ETD), que es una estimación del resultado que se obtendría mediante el método volumétrico. Según recoge la norma, este parámetro tiene dos posibles definiciones y se aportan los resultados recogidos en la tabla 2.

6. DISCUSIÓN

A la vista de los resultados preliminares, extraídos de los ensayos de superficie, se revelan un par de hechos interesantes. En primer lugar, cabe destacar el comporta-

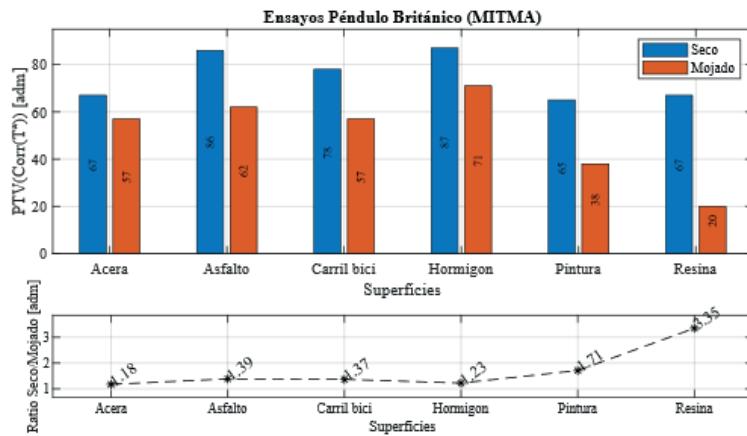
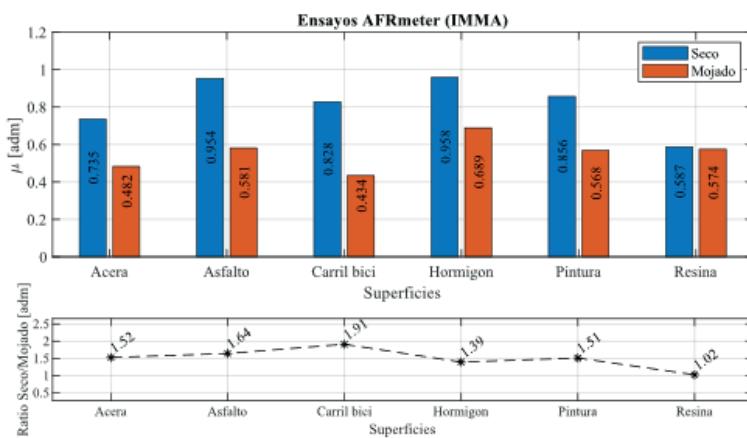
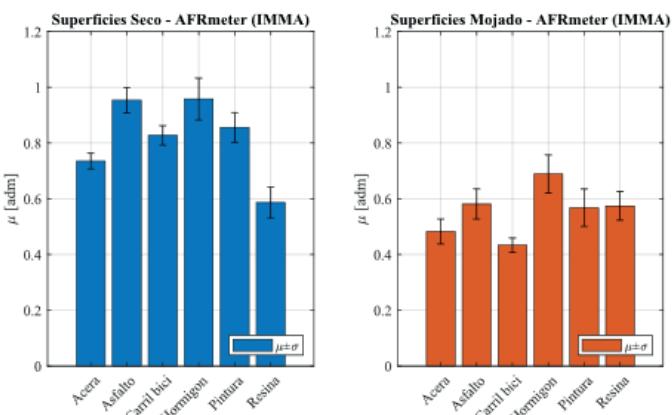


Figura 12. Resultados obtenidos del péndulo británico y ratio entre condiciones de ensayo.

Figura 13. Valores de coeficiente de fricción (μ) obtenidos por el dispositivo AFRmeter.Figura 14. Estadística de los valores de coeficiente de fricción (μ) obtenidos con AFRmeter.

miento repetible y estable de las medidas realizadas con el nuevo dispositivo. Este hecho se podía observar en el análisis estadístico de las medidas de ensayo en el que la dispersión de los datos se muestra contenida (v. Fig. 14), lo cual denota su buen funcionamiento e independencia del operador, por lo que se logra con ello uno de los objetivos de este trabajo.

En segundo lugar, el cruce de los resultados obtenidos por cada uno de los

sistemas parece reflejar una correlación adecuada para cierto tipo de superficies. En algunos trabajos se menciona la existencia de dicho vínculo, lo cual parece denotar que los resultados del dispositivo AFRmeter son adecuados. Dicha relación no responde a una correlación universal entre el coeficiente de fricción y el valor del péndulo, pues depende de la interacción entre materiales (patín y superficie). Además, se sabe que la calidad de medida

del péndulo se ve comprometida con materiales con macrotextura grande y materiales con comportamiento no lineal (p. ej., resina epoxi o polímeros). Por este motivo se recomienda recalibrar este ajuste para cada familia de materiales.

Como puede apreciarse en la figura 16, cuatro de las superficies estudiadas responden al comportamiento mencionado, y se alinean en una correlación clara. Estas superficies tienen en común que presentan una textura árida, con un tamaño de grano fino o medio y una gran porosidad. Ambos sistemas han captado de manera similar la capacidad de agarre de las superficies referidas para las dos condiciones de ensayo. Por otro lado, las dos superficies restantes (y divergentes a esta relación) son superficies sintéticas con cobertura de pintura o resina que eliminan su porosidad y presentan un acabado muy liso. Este hecho puede provocar un comportamiento extraño en los resultados obtenidos por el péndulo británico y, de igual manera, puede afectar el AFRmeter y desvirtuar el resultado obtenido. Este tipo de casos los recoge la literatura especializada como conflictivos a la hora de realizar mediciones con péndulo, por lo que se recomienda el uso de otro tipo de sistemas tribológicos.

En el caso de la resina, se presentan las mayores discrepancias entre sistemas. Por su parte, el péndulo predice un gran descenso de la adherencia en mojado para esta superficie, hecho que puede deberse a que la microtextura es muy lisa y homogénea, por lo que el patín puede deslizarse sobre el agua sin agarre. En contraposición, con el AFRmeter el resultado obtenido en ambos casos es prácticamente igual. Este hecho puede ser explicado debido a la menor velocidad de avance del carrete y que, al tratarse de una superficie no porosa, el agua es apartada sin infiltrarse en la superficie, por lo que se genera la misma situación de contacto que en seco. Es similar a como sucedería con el agua evacuada en las acanaladuras de un neumático.

Los resultados del ajuste de la correlación entre los valores obtenidos del péndulo británico y el AFRmeter pueden verse en la tabla 3. El ajuste ha sido realizado excluyendo las dos superficies conflictivas descritas anteriormente.

En lo que a medidas de rugosidad se refiere, las capacidades del láser instalado en el equipo demuestran una amplia solvencia para capturar la macrotextura superficial (v. Tabla 2), incluso algunos detalles de la microtextura, los cuales también tienen influencia en la adherencia con el caucho.



Figura 15. Muestra del perfil de superficie generado por el medidor láser.

Parámetro	Acera	Asfalto	Carril bici	Hormigón	Pintura	Resina
MPD	0,217	1,050	0,274	0,964	0,299	0,184
ETD_1	0,374	1,040	0,417	0,971	0,439	0,347
ETD_2	0,239	1,155	0,298	1,060	0,328	0,202

ETD: profundidad estimada de la textura; MPD: profundidad media del perfil.

Tabla 2. Resumen de medidas del perfil de superficie obtenidos con AFRmeter.

El análisis del perfil obtenido, basado en el promedio de una nube de puntos generada en sucesivas pasadas sobre la superficie, tiene suficiente entidad como para poder descartar el uso de sistemas tradicionales como el método volumétrico. Se ha evaluado la superficie con los criterios recogidos en la normativa vigente y se han obtenido resultados coherentes, pero sin la profundidad de un trabajo específico o más extenso sobre el tema. Los resultados muestran una ordenación correcta del perfil de superficie basándose en las primeras observaciones y las medidas obtenidas.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un prototipo innovador que aúna en una herramienta las capacidades de diferentes aparatos de medida ya existentes en el mercado empleados en la investigación de neumáticos y superficies. Se ha diseñado un dispositivo que muestra una potencial mejora en la precisión y confiabilidad de los resultados de ensayo de superficie frente a dispositivos precedentes. Se trata de una herramienta manejable, portátil y de construcción asequible, sin que esto último repercuta en la calidad de sus resultados.

En la actualidad, los ensayos cuyos objetivos son la predicción de superficie y la estimación del nivel de adherencia no cuentan con información precisa o con-

creta de la zona donde se ha realizado el ensayo. Si se persigue la optimización de estas estimaciones, se debe disponer de un sistema que sea capaz de caracterizar adecuadamente la superficie testeada y, con ello, poder validar la predicción realizada.

De igual manera, en este trabajo se han presentado los primeros resultados obtenidos con el dispositivo desarrollado, que ha demostrado un rendimiento adecuado y ha proporcionado datos de adherencia y rugosidad estables y consistentes. Aunque se encuentra en el ámbito de los dispositivos de medición estáticos, es un equipo portátil con un sistema de adquisición integrado y un proceso completa-

mente automatizado.

Se ha logrado realizar la validación de las medidas obtenidas comprobando la correlación con los sistemas de referencia empleados. De este modo, se ha logrado una herramienta valiosa y útil para futuras investigaciones en caracterización de superficie y seguridad vial. Este nuevo dispositivo tiene el potencial de convertirse en un referente para evaluar la adherencia de las superficies, contribuyendo así a mejorar la seguridad del automóvil y el diseño de infraestructuras viales.

8. APPLICACIONES Y POSIBILIDADES FUTURAS

El dispositivo propuesto integra en una única herramienta las mediciones necesarias para caracterizar la superficie ensayada, y se constituye como un recurso de apoyo en diversas disciplinas, incluyendo la investigación en dinámica vehicular, el estudio de neumáticos y la gestión del mantenimiento de infraestructuras viales.

El prototipo destaca por una serie de cualidades que lo hacen muy prometedor, pues proporciona resultados confiables y consistentes. Su diseño ligero y de manejo sencillo lo hace accesible incluso para usuarios no especializados, y su versatilidad permite adaptarlo a una amplia gama de ensayos y aplicaciones.

Respecto a posibles mejoras futuras, se identifican varias líneas de evolución. Actualmente, el diseño contempla un efecto fijo que genera un deslizamiento completo sobre la superficie. Una mejora consistiría en incorporar un dispositivo final capaz de ajustar el grado de deslizamiento mediante un rozador en forma de disco o rueda, accionado por un segundo motor eléctrico. Ajustando la velocidad del carrete y la rotación de la rueda, sería

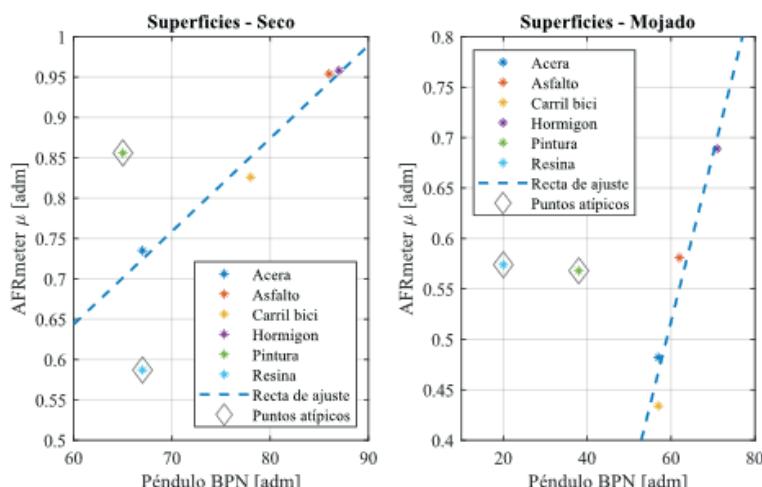


Figura 16. Correlación de resultados entre el péndulo británico y el AFRmeter.

Ensayos	p1		p2	R
	-	%		
Seco	0,012	1,150	-0,047	0,975
Mojado	0,017	1,660	-0,477	0,938

Tabla 3. Coeficientes de ajuste lineal ($f(x) = p1*x+p2$).

posible mantener un deslizamiento controlado y analizar la evolución del coeficiente de adherencia, simulando situaciones como una frenada de emergencia con un sistema antibloqueo progresivo.

Adicionalmente, podría incorporarse un sistema para registrar la vibración del patín causada por el grano de la superficie, lo que permitiría clasificarla mediante modelos predictivos entrenados con este tipo de fenómenos.

Por último, resultaría relevante estudiar la influencia de parámetros como la carga aplicada, la temperatura y la velocidad de avance del dispositivo, así como elaborar una base de datos amplia que permita parametrizar estos factores. Asimismo, convendría analizar la rugosidad de la superficie y evaluar cómo la microtextura y la macrotextura afectan los resultados de adherencia.

BIBLIOGRAFÍA

- AENOR. (2010). UNE-EN 13036-1: Características de las superficies de carreteras y aeródromos. Métodos de ensayo. Parte 1: Medición de la profundidad de la macrotextura de la superficie del pavimento utilizando una técnica de parche volumétrico. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- AENOR. (2012). UNE-EN 13036-4: Características de las superficies de carreteras y aeródromos. Métodos de ensayo. Parte 4: Método para la medición de la resistencia al deslizamiento o deslizamiento de una superficie: ensayo del péndulo. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- AENOR. (2021). UNE-EN ISO 13473-1: Caracterización de la textura de los pavimentos mediante el uso de perfiles de superficie. Parte 1: Determinación de la profundidad media del perfil. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- Cabrera, J. A., Ortiz, A., Simón, A., García, F., & La Blanca, A. P. (2003). A versatile flat track tire testing machine. *Vehicle System Dynamics*, 40(4), 271-284.
- Castillo, J. J., Cabrera, J. A., Guerra, A. J., & Carabias, E. (2015). Robust road condition detection system using in-vehicle standard sensors. *Sensors*, 15, 32056-32078.
- Chen, S., Liu, X., Luo, H., et al. (2022). A state-of-the-art review of asphalt pavement surface texture and its measurement techniques. *Journal of Road Engineering*, 2(2), 156-180.
- Chu, L., Guo, W., & Fwa, T. F. (2022). Theoretical and practical engineering significance of British pendulum test. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(1), 1-8.
- Cuadrado, O., & Sánchez, M. (2018). Ensayo de resistencia a la rodadura de neumáticos en banco de ensayo tipo tambor rotatorio. *XXII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, Madrid.
- Daghan, D., & Pinar, B. (2019). Smart traction control systems for electric vehicles using acoustic road-type estimation. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*.
- Guo, F., Pei, J., Zhang, J., Li, R., Zhou, B., & Chen, Z. (2021). Study on the skid resistance of asphalt pavement: A state-of-the-art review and future prospective. *Construction and Building Materials*, 303, 124411.
- Guo, W., Chu, L., & Fwa, T. F. (2021). Mechanistic harmonization of British pendulum test measurements. *Measurement*, 182, 109618.
- Jin, D., Leng, B., Yang, X., Xiong, L., & Yu, Z. (2020). Road friction estimation method based on fusion of machine vision and vehicle dynamics. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* (pp. 1771-1776). Las Vegas, NV.
- Mahboob Kanafi, M., Kuosmanen, A., Pellinen, T. K., & Tuononen, A. J. (2015). Macro- and micro-texture evolution of road pavements and correlation with friction. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(2), 168-179.
- Masino, J., Foitzik, M. J., Frey, M., & Gauterin, F. (2017). Pavement type and wear condition classification from tire cavity acoustic measurements with artificial neural networks. *Journal of the Acoustical Society of America*, 141, 4220-4229.
- Mataei, B., Zakeri, H., Zahedi, M., & Nejad, F. M. (2016). Pavement friction and skid resistance measurement methods: A literature review. *Open Journal of Civil Engineering*, 6(4), 537.
- Mei, M., Chang, J., Li, Y., Li, Z., Li, X., & Lv, W. (2019). Comparative study of different methods in vibration-based terrain classification for wheeled robots with shock absorbers. *Sensors*, 19.
- Park, J., Min, K., Kim, H., Lee, W., Cho, G., & Huh, K. (2018). Road surface classification using a deep ensemble network with sensor feature selection. *Sensors*, 18, 1-16.
- Pérez-Acebo, H., Gonzalo-Orden, H., Findley, D. J., & Rojí, E. (2020). A skid resistance prediction model for an entire road network. *Construction and Building Materials*, 262, 120041.
- Ruiz, L. P., & González, S. J. Y. (2013). Correlación de medidas de macrotextura tomadas con el método volumétrico y con diferentes texturómetros láser. *ingeniería Civil*, (169), 23-40.
- Sharma, S., Phan, H., & Lee, J. (2020). An application study on road surface monitoring using DTW-based image processing and ultrasonic sensors. *Applied Sciences*, 10.
- Šabanović, E., Žuraulis, V., Prentkovskis, O., & Skrnickij, V. (2020). Identification of road-surface type using deep neural networks for friction coefficient estimation. *Sensors*.
- Torbruegge, S., & Wies, B. (2015). Characterization of pavement texture by means of height difference correlation and relation to wet skid resistance. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2(2), 59-67.
- Wambold, J. C., & Antle, C. E. (1995). International PIARC experiment to compare and harmonize texture and skid resistance measurements. Permanent International Association of Road Congresses (PIARC), París, Francia.
- Wang, S., Kodagoda, S., Shi, L., & Wang, H. (2017). Road-terrain classification for land vehicles: Employing an acceleration-based approach. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 12, 34-41.
- Weiwen, D., & Qingrong, Z. (2009). Road surface condition identification based on statistical pattern recognition method. *12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems* (pp. 1-6). St. Louis, MO.
- Zúñiga-García, N., Smit, A., & Prozzi, J. (2017). Cuantificación de la macro y microtextura del pavimento para la estimación de fricción.