

# **F**actores influyentes en la resistencia al deslizamiento en pavimentos flexibles: una revisión literaria

*Flor de María Yanira Zevallos Calle y Sócrates Pedro Muñoz Pérez*

Universidad Señor de Sipán. Chiclayo, Perú

## **Resumen**

Los pavimentos flexibles, al tener contacto directo con los vehículos, necesitan una caracterización específica de la capa superficial de modo que cuente con una suficiente resistencia al deslizamiento y así proporcionar seguridad a los usuarios en carreteras. El valor de resistencia al deslizamiento se obtiene en cada unidad de longitud de un pavimento, a partir de las condiciones de funcionamiento del pavimento, ambientales y del vehículo. El artículo presenta una revisión sistemática del problema de la fricción desarrollada por el neumático y el pavimento, que evoluciona con el transcurso del tiempo y vida útil de este último. De la misma manera y con el objetivo de presentar con bases teóricas expuestas durante los años, los distintos factores que influyen en esta evolución de la resistencia al deslizamiento: superficie del pavimento, tránsito, neumáticos y condiciones climáticas. Se revisaron 46 artículos indexados en la base de datos Scopus entre los años 2012 y 2020 sobre deterioro por fricción, resistencia al deslizamiento, microestructura y energía de fricción de contacto.

**Palabras clave:** Resistencia al deslizamiento; superficie del pavimento; tránsito; neumáticos; condiciones climáticas.

## **Abstract**

Flexible pavements when having direct contact with vehicles need a specific characterization of the surface layer so that it has a sufficient resistance to slipping and thus provide safety to road users. The slip resistance value is obtained in each unit length of a pavement, from the pavement, environmental and vehicle operating conditions. The article presents a systematic review of the problem of friction developed by the tire and the pavement, which evolves over time and the useful life of the latter, also with the aim of presenting, with theoretical bases exposed over the years, the different Factors that influence this evolution of slip resistance: pavement surface, traffic, tires and weather conditions. 46 articles indexed in the Scopus database between 2012 and 2020 on friction deterioration, slip resistance, microstructure and contact friction energy were reviewed.

**Keywords:** Skid resistance; pavement surface; traffic; tires; climatic conditions

## **1. Introducción**

(Kane *et al.*, 2019) La resistencia al deslizamiento es uno de los principales factores que contribuyen a la seguridad vial al igual que (Alacash & Parry, 2020) la velocidad límite, la geometría de la carretera y la profundidad de la textura, debido a que (Hofko *et al.*, 2019) varios estudios muestran correlaciones significativas con el número de accidentes de tráfico en distintas condiciones climáticas; al mismo tiempo (Serigos *et al.*, 2014) hay una demanda creciente de carreteras más seguras por lo que la capacidad ofrecida por las carreteras es decisiva tanto en la seguridad como el confort de los usuarios basándose en su nivel de calidad en función a qué tan confiable es el pavimento, es decir a la probabilidad de que resista los efectos de las cargas de tránsito y los factores climáticos durante el período de revisión (Bazhanov, 2019). En consecuencia, una de las principales causas de los accidentes de carretera es la baja fricción entre el neumático del vehículo y la superficie (Wu & Abadie, 2018), existiendo un aumento en el número de accidentes a medida que disminuye la resistencia al deslizamiento (Fwa T. F., 2017) por lo que esta última es uno de los requisitos básicos de seguridad para una carretera (Ariyapijati *et al.*, 2019).

La resistencia al deslizamiento es la fuerza de fricción producida por la rotación de las ruedas sobre la superficie (Lubis *et al.*, 2018) determinándose su valor único bajo un conjunto de pruebas identificando las características del pavimento en un momento dado (Fwa & Chu, 2019) puesto que evoluciona con el tiempo debido a los esfuerzos del tráfico, las condiciones climáticas (Do *et al.*, 2020) y en ocasiones a una mala gestión de pavimentos (Nicolosi *et al.*, 2020), en resumen, la fuerza de fricción se reduce considerablemente en pistas desgastadas (Zhu *et al.*, 2020). Debido a su importante efecto en la seguridad vial y para la toma de decisiones para el mantenimiento del pavimento (Yu *et al.*, 2020) es necesario un modelo predictivo de resistencia al deslizamiento (Hofko *et al.*, 2019) y de su evolución para así asegurar un buen diseño y construcción del pavimento (Kogbara *et al.*, 2016) desarrollándose una óptima interacción con los neumáticos por lo que (Ueckermann *et al.*, 2015) se presenta enfoques a partir de los datos de la superficie como los parámetros de textura que se correlacionan con la fricción del neumático.

## **2. Factores influyentes**

Varios factores afectan el rendimiento de la resistencia al deslizamiento de la carretera (Wu & Abadie, 2018) entre ellos se menciona (Kogbara *et al.*, 2018) la textura de la superficie del pavimento, la geometría de la calzada, las propiedades de los neumáticos, los parámetros de funcionamiento del vehículo y los factores ambientales. Del mismo modo Zhu *et al.* (2020), menciona las propiedades del material de la superficie de la pista y películas de agua. Estos factores de riesgo tienen impactos variables en la seguridad vial debido a los niveles de gravedad del accidente y se caracterizan por sus complejas interacciones (Chen *et al.*, 2019), por lo que es esencial adquirir conocimiento sobre los factores influyentes tanto a la presencia y frecuencia de estos accidentes y sus consecuencias (Pokorny *et al.*, 2020).

### **2.1 Superficie del pavimento**

Representa el medio de contacto entre el neumático y el pavimento, rigiéndose por el mecanismo de fricción que está íntimamente relacionado con la condición de ésta y las propiedades del caucho del neumático (Vieira *et al.*, 2015), por lo que debe tener suficiente resistencia al deslizamiento para permitir que un vehículo que pasa sobre ella acelere y pare/frene de manera segura y cómoda (Ariyapijati *et al.*, 2019). En consecuencia, las agencias viales deben monitorear y controlar el nivel de

fricción proporcionado en sus caminos, mediante el diseño y mantenimiento de superficies adecuadas y tratamientos relacionados (Pérez-Acebo *et al.*, 2020).

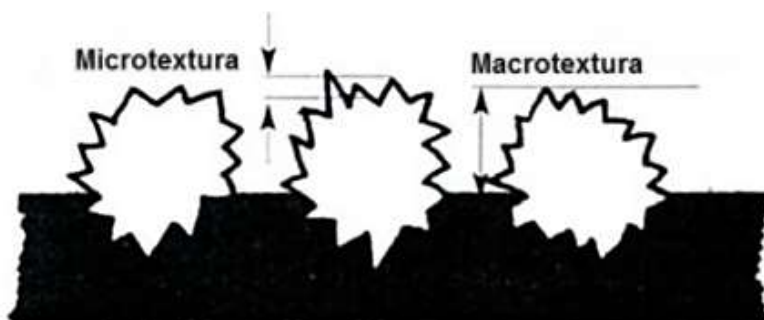
La resistencia al deslizamiento depende en gran medida de las características de la textura del pavimento (Afonso *et al.*, 2019) es decir, el tipo de agregado y el diseño de la mezcla (Meegoda *et al.*, 2013) , ya que puede minimizar el riesgo de coeficientes de fricción críticos al proporcionar un drenaje suficiente y un área de contacto adecuada (Kienle *et al.*, 2020) asegurando la interacción básica entre el neumático y el pavimento (Florková & Pepucha, 2017), no obstante se han realizado pocas investigaciones para examinar la relación entre las características de la superficie y la fricción a lo largo del tiempo (Islam *et al.*, 2019).

Según Ueckermann *et al.* (2015) se han llevado a cabo muchos estudios para predecir la resistencia al deslizamiento únicamente a partir de mediciones de textura; donde expresa (Florková & Pepucha, 2017) según las amplitudes y longitudes de onda de las irregularidades, la textura se divide en tres categorías: microtextura ( $\lambda < 0.5\text{mm}$ ), macrotextura ( $0.5\text{mm} < \lambda < 50\text{mm}$ ) y megatextura ( $50\text{mm} < \lambda < 500\text{mm}$ ), sin embargo Serigos *et al.* (2014) señala la aspereza ( $5\text{m} < \lambda < 50\text{m}$ ) como una categoría más (Islam *et al.*, 2019). Las determinantes para analizar la resistencia al deslizamiento son la microtextura y macrotextura puesto que, según Do *et al.* (2020), el desgaste de una superficie de la carretera afecta principalmente a la parte más alta de la macrotextura y, en esta parte, la pérdida de desgaste dependería de la microtextura local, siendo así (Torbruegge & Wies, 2015) el estudio de la textura superficial de la carretera es de gran importancia en la ingeniería de pavimentos.

La microtextura se relaciona estrechamente con las propiedades de las partículas agregadas en el asfalto (Florková & Pepucha, 2017) y las características de éstas influyen en la fricción (Pérez-Acebo *et al.*, 2020) por lo que tiene una importante influencia en la adherencia neumático-pavimento. Para el caso de pavimentos húmedos, una microtextura más rugosa contribuye a la resistencia al deslizamiento al romper la delgada capa de agua en la superficie (Serigos *et al.*, 2014).

La macrotextura explica la fricción superficial de los pavimentos flexibles, por lo que está muy relacionada con la resistencia al deslizamiento a velocidades que sobrepasan los 60 km/h y en pavimentos mojados, siendo el principal responsable de (Islam *et al.*, 2019) reducir el potencial de separación del neumático y del pavimento a causa del hidroneumático (Kienle *et al.*, 2020) cuando el neumático no tiene suficiente tiempo para eliminar el agua de la zona de contacto. Por

consiguiente, una macrotextura satisfactoria puede mejorar la seguridad de conducción en clima húmedo al mejorar la resistencia al deslizamiento de las carreteras (Srirangam *et al.*, 2014).



**Figura 1.** Microtextura y Macrotextura  
Fuente: Suhaimi & Baharuddin, 2019

Para que la superficie tenga una fricción adecuada durante su vida implica identificar una combinación adecuada de micro y macro texturas (Wu & Abadie, 2018), sin embargo, se debe tener en cuenta la cantidad de asfalto ya que su exceso ocasiona exudación y así disminuye el contacto del neumático con la superficie. Del mismo modo ocurre con la presencia de contaminantes como el polvo o el caucho, puesto que obstruyen la porosidad del pavimento. Por tanto, se requiere una comprensión equilibrada entre las compensaciones económicas y de ingeniería asociadas para la selección de diferentes mezclas y tipos de materiales agregados.

## **2.2 Tránsito**

Según Alonso *et al.* (2018) los límites de seguridad de los vehículos se definen como límites de estabilidad que se basan en la configuración de la carga, la velocidad de movimiento y el coeficiente de fricción del neumático, asimismo (Nicolosi *et al.*, 2020) la velocidad a la que viajan los vehículos se ve afectada por la alineación de la carretera por lo que es seguro que el trazado geométrico y los patrones de velocidad de los vehículos influyan en el deterioro de resistencia al deslizamiento. Debido a esto (Evtiukov *et al.*, 2018) el diseño de vehículos de carretera desarrolla e implementa sistemas de seguridad en relación al accidente (antes, durante y después) elevando la característica de seguridad a un nuevo nivel cualitativo, asimismo, (Arricale *et al.*, 2019) el tener el conocimiento del coeficiente de fricción máximo actual de un pavimento permitiría que un controlador del sistema de frenos antibloqueo obtenga una presión de frenado óptima, siendo así indispensable el

aumento de disponibilidad de tecnologías seleccionadas para la seguridad de vehículos (Bhalla & Gleason, 2020).

La clasificación de una carretera influye en la resistencia al deslizamiento tanto su geometría que tiene diferentes demandas de fricción (Nicolosi *et al.*, 2020), como el volumen de las cargas de tráfico (Mahanpoor *et al.*, 2020) siendo éstas últimas directamente relacionadas con el proceso de pulido (Kogbara *et al.*, 2018) de manera que los agregados del pavimento sufren dicho proceso y su nivel de fricción se reduce hasta lograr una fase de equilibrio donde la resistencia al deslizamiento tiende a seguir un valor constante (Pérez-Acebo *et al.*, 2020), sin embargo esto depende de que se mantengan los flujos de tráfico, puesto que (Meegoda *et al.*, 2013) influyen en la reducción del deslizamiento de resistencia del pavimento (Ariyapijati *et al.*, 2019) debido a la microtextura de los agregados debajo de la película de aglomerante en las rehabilitaciones de pavimentos envejecidos. En resumen, (Li, *et al.*, 2019) mientras mayor sea la carga, mayor será el desgaste del pavimento y, por ende, las características adecuadas para una textura superficial correcta disminuirán.



**Figura 2.** Comportamiento de la fricción del pavimento frente a la velocidad de deslizamiento  
Fuente: Iván *et al.*, 2012

Por otro lado (Bellini *et al.*, 2020), la velocidad del vehículo y sus límites aplicados establecidos legalmente para una vía según su clasificación funcional, son relevantes para la gestión de carreteras ya que (Kane *et al.*, 2019) en condiciones

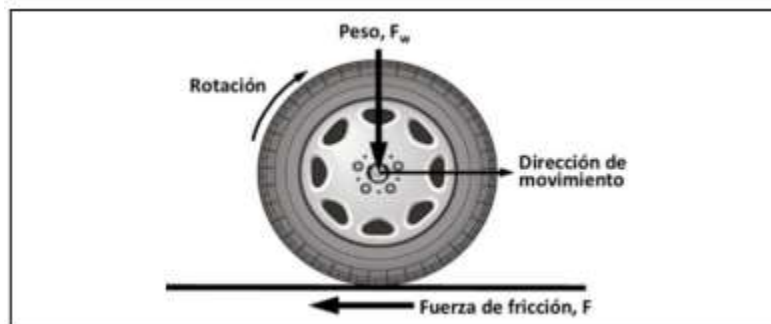
operativas las altas velocidades en climas húmedos provocan los deslizamientos en la superficie. Asimismo, para una evaluación del tramo con respecto a su condición de resistencia al deslizamiento (Rajapakshe *et al.*, 2012), las mediciones de fricción del pavimento se observan a diferentes velocidades de desplazamiento, ya que la fricción dinámica de las interfaces neumático/pavimento depende de la velocidad de desplazamiento del vehículo. A continuación, se observa una fricción máxima a cierta velocidad crítica de deslizamiento, de manera que, a medida que la velocidad aumenta existe la tendencia a una disminución del rozamiento debido a que disminuye el área de contacto entre el neumático y el pavimento (Iván *et al.*, 2012).

### **2.3 Neumáticos**

La rigidez del neumático juega un papel importante en el control del balanceo e inclinación del automóvil (Swamy *et al.*, 2020), es decir, la carga normal del neumático tiene un efecto directo sobre la rigidez en las curvas y longitudinal (Zhang & Gohlich, 2017). No obstante, su rendimiento es muy impredecible incluso si el motor suministra suficiente potencia. Siempre existe la posibilidad de deslizamiento principalmente por hidroplaneo que (Nazari *et al.*, 2020) ocurre cuando una capa de agua entre el neumático y el pavimento empuja el neumático hacia arriba haciendo que éste se desprenda de la superficie impidiendo que proporcione suficientes fuerzas y momentos para que el vehículo responda a las entradas de control del conductor por lo que (Zhao *et al.*, 2017) la fuerza del neumático es un importante influyente en la precisión del manejo; asimismo, esta posibilidad de deslizamiento se incrementa en superficies mojadas, según Mao *et al.* (2019), la resistencia al deslizamiento húmedo es un indicador importante de la seguridad de los neumáticos, especialmente en días lluviosos y para automóviles que circulan a mayor velocidad, además cabe mencionar (Pérez-Acebo *et al.*, 2020) que la temperatura de los neumáticos es normalmente proporcional a la temperatura del aire.

Las fuerzas de rozamiento entre las ruedas y la superficie se desarrollan cuando el vehículo acelera, frena o cambia de dirección, de modo que existe un cambio en el área de contacto generando una variante en la resistencia al deslizamiento causado por las texturas superficiales (Wu & Abadie, 2018), específicamente la macrotextura (Serigos *et al.*, 2014) y por las características del neumático como su geometría, presión de inflado, tipo de caucho (Kane *et al.*, 2019) y sus propiedades viscoelásticas (Torbruegge & Wies, 2015), por consiguiente se puede afirmar que los neumáticos son la conexión entre la carretera y el automóvil a través de la cual se transmiten las fuerzas y los momentos necesarios. En teoría la carga normal de

cada neumático se altera constantemente, lo cual es causado por la transferencia de carga lateral y longitudinal del vehículo durante la dirección, aceleración y desaceleración (Zhang & Gohlich, 2017), por lo que el modelo del neumático debe reflejar el efecto de la fuerza vertical del neumático sobre las fuerzas longitudinales y laterales y la interacción de las fuerzas longitudinales y laterales (Zhao *et al.*, 2017).

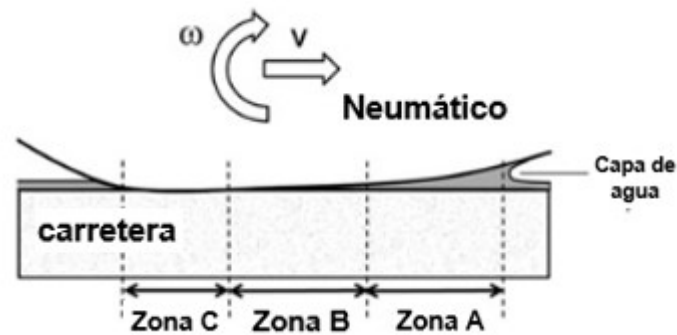


**Figura 3.** Diagrama de fuerzas actuando sobre el neumático  
Fuente: Lubis et al., 2018

Se explica un modelo de tres zonas ilustrando las condiciones de contacto del neumático-superficie durante el deslizamiento en condiciones mojadas con relación a la fricción (Ueckermann et al., 2015). Las longitudes de las zonas dependen de la velocidad del vehículo y de la cantidad de agua que debe ser expulsada de la interfaz. Debido en parte al lubricante y a la velocidad de deslizamiento utilizada en las mediciones de resistencia al deslizamiento (Torbruegge & Wies, 2015), la adhesión se inhibe en gran medida y la fricción por histéresis puede verse como el principal mecanismo de fricción que contribuye al agarre en mojado.

Debido a que la resistencia al deslizamiento y la profundidad de la textura influyen mucho sobre el mecanismo de fricción y las operaciones vehiculares seguras (Suhaimi & Baharuddin, 2019), para lograr una mejor seguridad, durabilidad y economía de los neumáticos se debe mejorar las propiedades de resistencia al deslizamiento, al desgaste y a la rodadura, siendo importante mantenerlas equilibradas en la fabricación de los compuestos para neumáticos (Mao *et al.*, 2019), al mismo tiempo el ingeniero de diseño utiliza la información que revela el comportamiento del neumático sobre las características de manejo para aprovechar al máximo los neumáticos y mejorar la conducción (Swamy *et al.*, 2020).





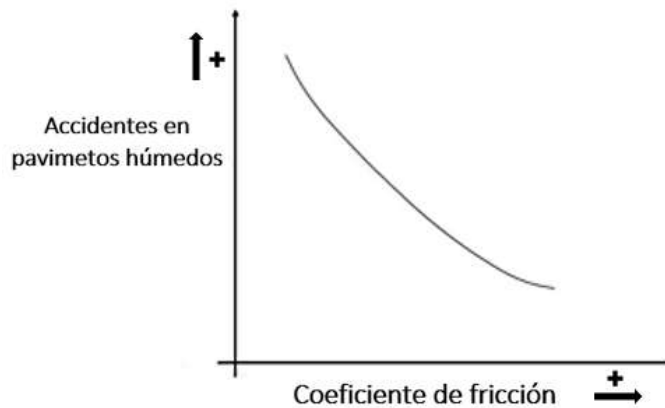
**Figura 4.** Modelo de las tres zonas  
Fuente: Ueckermann et al., 2015

## 2.4 Condiciones climáticas

Son importantes en el desempeño de los pavimentos flexibles por su compleja interacción con los materiales de la superficie y las cargas de tránsito, concretamente la precipitación donde (Meegoda *et al.*, 2013) la microtextura puede disminuir o perderse debido al agua superficial en periodos de fuertes lluvias; la temperatura, siendo (Kogbara *et al.*, 2018) el factor ambiental más importante para las carreteras con clima cálido; los ciclos hielo-deshielo donde (Tan *et al.*, 2019) los coeficientes de fricción disminuyen con el aumento de la rugosidad de la superficie del hielo; tormentas de polvo, entre otros, que afectan su resistencia al deslizamiento interfiriendo con la (Zhu *et al.*, 2020) fricción de los neumáticos reduciendo su valor en un 75% en comparación con las carreteras secas y con una superficie limpia.

La resistencia al deslizamiento varía según las condiciones ambientales (Do et al., 2020), siendo normalmente más baja al final del verano y más alta durante el invierno debido a que (Khasawneh & Liang, 2012) las temperaturas reducen la rigidez tanto del asfalto como del caucho y la viscosidad del agua; asimismo, (Zhu *et al.*, 2020) varios estudios afirman que la resistencia al deslizamiento de las pistas disminuye considerablemente en condiciones de clima húmedo de manera que (Pérez-Acebo *et al.*, 2020) los análisis de colisiones viales han demostrado que la tasa de accidentes en pavimentos mojados aumenta cuando los valores de fricción son bajos, (Meegoda *et al.*, 2013) por consiguiente existe una gran influencia en la ocurrencia de accidentes referidos al deslizamiento en climas húmedos. De manera que (Chen *et al.*, 2013) los pavimentos generalmente están diseñados y construidos

para proporcionar la textura suficiente para permitir una fricción adecuada cuando la superficie está húmeda y (Fwa T. F., 2017) monitorean regularmente su condición activándose medidas preventivas o correctivas cuando es necesario para mantenerlos seguros en la conducción de diversas condiciones climáticas, de modo que los ingenieros puedan abordar los problemas de seguridad vial de forma más efectiva.



**Figura 5.** Relación entre la tasa de accidentes con condiciones de clima húmedo y fricción superficial del pavimento  
Fuente: Suhaimi & Baharuddin, 2019

### 3. Discusión de la revisión literaria

Debido a que la resistencia al deslizamiento es un elemento crítico en la seguridad vial, existen diversos estudios acerca de la fricción superficial con relación a los factores mencionados en el capítulo 2:

- Según Afonso *et al.* (2019), la superficie del pavimento según la macrotextura y resistencia al deslizamiento, del mismo modo (Suhaimi & Baharuddin, 2019) determinando valores apropiados de fricción específicamente para superficie mojadas, en otras palabras: en condiciones climáticas húmedas; sin embargo (Serigos *et al.*, 2014) incluye además la microtextura para una mejora en la predicción de los valores mencionados.
- En su estudio, Fwa T. F. (2017) presentó una representación de la resistencia al deslizamiento en función del espesor de película de agua y la velocidad del vehículo, así como también (Vieira *et al.*, 2015) nos habla

sobre el desgaste del neumático debido a la fricción superficial validando la existencia y relevancia de la adhesión.

Por otro lado, se han desarrollado estudios para predecir la fricción superficial, es decir, (Wu & Abadie, 2018) modelos que se puedan usar durante el diseño de mezcla de la capa de rodadura, así como también se han desarrollado procedimientos de pruebas que sea capaz de obtener valores pronosticados a priori de la resistencia al deslizamiento en el laboratorio. Siendo el método de Ueckermann *et al.* (2015) el más novedoso al presentar un estudio de predicción de medida sin contacto basándose en la textura óptica.

El presente artículo de tipo revisión, pretende mencionar y explicar de manera cualitativa a partir de bases científicas los factores que tienen mayor influencia y determinan la condición de un pavimento flexible en relación con la fricción ocurrida entre la superficie con los neumáticos, es decir, qué tan confiable es la capacidad de resistencia al deslizamiento en diferentes condiciones.

Limitaciones de la investigación:

- Contribuciones científicas en el directorio Scopus, tanto artículos y revisiones.
- Publicaciones en inglés
- Información generada entre el año 2012 al 2020

## **4. Resultados**

El presente artículo sólo se verá enfocado en un análisis cualitativo a partir de los estudios de muchos especialistas en el transcurso de los años, dependiendo de sus diferentes resultados en cuestión de qué es lo que afecta la condición de un pavimento flexible y qué tanto influye en la varianza de su resistencia al deslizamiento.

De acuerdo con los artículos científicos que se han citado, podemos dar por hecho que cuatro factores son los principales determinantes en la seguridad vial de un pavimento con respecto a la fricción establecida: la superficie del pavimento, el tránsito, los neumáticos y las condiciones climáticas.

## 5. Conclusiones

- La representación de la evolución de la resistencia al deslizamiento de las carreteras a lo largo del tiempo en su vida útil es considerada una medida estratégica para perfeccionar las normativas del mantenimiento de acuerdo con la gestión de los pavimentos orientadas a la seguridad vial. Teniendo en cuenta que el deterioro de la superficie se presenta tanto a corto como a largo plazo, influyendo principalmente las condiciones climáticas y el tráfico vehicular respectivamente, por lo que se espera una evaluación de la fricción en la interfaz de neumático–superficie enfocado en condiciones reales.
- La microtextura y macrotextura tienen un papel vital en la resistencia al deslizamiento ya que influyen en la adherencia de superficie–neumático y la evacuación de agua en la zona de contacto, respectivamente, por lo que cuanto mayor sean los valores de estas texturas, mejor será la fricción del pavimento. Sin embargo, en condiciones húmedas y bajas velocidades, el comportamiento de la fricción para todas las superficies es similar al de las condiciones secas. Sin embargo, cuando la velocidad aumenta, cuanto menor es la macrotextura, mayor es la caída de fricción.
- El factor más relevante en cuestión de cantidad de reducción de resistencia al deslizamiento es el volumen de tráfico y el proceso de pulido, siendo mucho mayor en condiciones de clima húmedo. Por lo tanto, no es necesario conocer el historial de trabajo de la carretera siempre que se pueda identificar el material de la superficie y se cuenten los volúmenes de tráfico.
- Las condiciones climáticas extremas son los puntos críticos para un desgaste radical de la resistencia al deslizamiento, en caso de las estaciones que, sin distinción de la clasificación ni vida útil, presenta menor fricción en temporada de verano que en temporada de invierno a pesar que la superficie sufrió el proceso de pulido del tráfico a través del tiempo; o en un cambio repentino de la fricción cuando la superficie del pavimento se moja levemente al inicio de un evento de lluvia, observándose una reducción importante en la fricción debido a que la película de agua sobre la superficie actúa como lubricante entre el neumático y el pavimento y también reduce el área de contacto entre los dos. Por lo tanto, la mayoría

de las pruebas de resistencia al deslizamiento se realizan en condiciones húmedas.

- Se sabe que el rendimiento de la resistencia al deslizamiento varía con respecto a su tiempo inicial, sin embargo, es importante para garantizar las características superficiales necesarias en la seguridad vial, igualmente para gestionar y evaluar los contratos basados en indicadores de rendimiento, siendo este último caso, la fiabilidad de las mediciones de la resistencia al deslizamiento es aún más importante, ya que influyen directamente en los ingresos del contratista.

## **6. Referencias**

- Afonso, M. L., Dinis-Almeida, M., & Fael, C. S. (2019). Characterization of the Skid Resistance and Mean Texture Depth in a Permeable Asphalt Pavement. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 471(2). doi:10.1088/1757-899X/471/2/022029
- Alacash, H., & Parry, T. (2020). Applying random parameters model to evaluate the impact of traffic, geometric and pavement condition characteristics on accident frequencies occurred at a-roads networks in the UK. Advances in Intelligent Systems and Computing, 1083 AISC, 3-19. doi:10.1007/978-3-030-34069-8\_1
- Alonso, M., Mántaras, D. A., & Luque, P. (2018). Methodology for determining real time safety margin in a road vehicle. Transportation Research Procedia, 33, 331-338. doi:10.1016/j.trpro.2018.10.110
- Ariyapijati, R. H., Hadiwardoyo, S. P., & Sumabrata, R. J. (2019). Skid resistance of gap graded hot-mix asphalt with added crumb rubber. Journal of Physics: Conference Series, 1376(012010). doi:10.1088/1742-6596/1376/1/012010
- Arricale, V., Carputo, F., Farroni, F., Sakhnevych, A., & Timpone, F. (2019). Experimental investigations on tire/road friction dependence from thermal conditions carried out with real tread compounds in sliding contact with asphalt specimens. Key Engineering Materials, 813 KEM, 261-266. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.813.261
- Bazhanov, A. P. (2019). General issues of assessing the reliability of roads. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 632(1). doi:10.1088/1757-899X/632/1/012012

- Bellini, D., Laconis, M., & Traettino, E. (2020). Speed limits and road warning signs as aid for driving behavior. *Transportation Research Procedia*, 45, 135-142. doi:10.1016/j.trpro.2020.02.100
- Bhalla, K., & Gleason, K. (2020). Effects of vehicle safety design on road traffic deaths, injuries, and public health burden in the Latin American region: a modelling study. *The Lancet Global Health*, 8(6), e819-e828. doi:10.1016/S2214-109X(20)30102-9
- Chen, J.-S., Chen, S.-F., & Liao, M.-C. (2013). Macroscopic and microscopic evaluation of surface friction of airport pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 6(5), 558-594. doi:10.6135/ijprt.org.tw/2013.6(5).588
- Chen, S., Saeed, T. U., Alinizzi, M., Lavrenz, S., & Labi, S. (2019). Safety sensitivity to roadway characteristics: A comparison across highway classes. *Accident Analysis and Prevention*, 123, 39-50. doi:10.1016/j.aap.2018.10.020
- Do, M. -T., Cerezo, V., & Ropert, C. (2020). Questioning the approach to predict the evolution of tire/road friction with traffic from road surface texture. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 8(2). doi:10.1088/2051-672X/ab8ba9
- Evtiukov, S., Karelina, M., & Terentyev, A. (2018). A method for multi-criteria evaluation of the complex safety characteristic of a road vehicle. *Transportation Research Procedia*, 36, 149-156. doi:10.1016/j.trpro.2018.12.057
- Florková, Z., & Pepucha, L. (2017). Microtexture diagnostics of asphalt pavement surfaces. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 236(1). doi:10.1088/1757-899X/236/1/012025
- Fwa, T. F. (2017). Skid resistance determination for pavement management and wet-weather road safety. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 6(3), 217-227. doi:10.1016/j.ijtst.2017.08.001
- Fwa, T., & Chu, L. (2019). The concept of pavement skid resistance state. *Road Materials and Pavement Design*. doi:10.1080/14680629.2019.1618366
- Hofko, B., Kugler, H., Chankov, G., & Spielhofer, R. (2019). A laboratory procedure for predicting skid and polishing resistance of road surfaces. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(4), 439-447. doi:10.1080/10298436.2017.1309191
- Islam, S., Hossain, M., & Miller, R. (2019). Evaluation of pavement surface texture at the network level. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 34(1), 87-98. doi:10.1080/10589759.2018.1554067

- Iván, J., Ravishanker, N., Jackson, E., Aronov, B., & Guo, S. (2012). A Statistical Analysis of the Effect of Wet-Pavement Friction on Highway Traffic Safety. *Journal of Transportation Safety and Security*, 4(2), 116-136. doi:10.1080/19439962.2011.620218
- Kane, M., Do, M.-T., Cerezo, V., Rado, Z., & Khelifi, C. (2019). Contribution to pavement friction modelling: an introduction of the wetting effect. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(8), 965-976. doi:10.1080/10298436.2017.1369776
- Khasawneh, M., & Liang, R. (2012). Temperature effect on frictional properties of HMA at different polishing stages. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 6(1), 39-53. Obtenido de [www.scopus.com](http://www.scopus.com)
- Kienle, R., Ressel, W., Götz, T., & Weise, M. (2020). The influence of road surface texture on the skid resistance under wet conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 234(3), 313-319. doi:10.1177/1350650117753995
- Kogbara, R., Masad, E., Kassem, E., & Scarpas, A. (2018). Skid resistance characteristics of asphalt pavements in hot climates. *Journal of Transportation Engineering Part B: Pavements*, 144(2). doi:10.1061/JPEODX.0000046
- Kogbara, R., Masad, E., Kassem, E., Scarpas, A., & Anupam, K. (2016). A state of the art review of parameters influencing measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 114, 602-617. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.04.002
- Li, J., Yu, J., Xie, J., & Ye, Q. (2019). Performance degradation of large-sized asphalt mixture specimen under heavy load and its affecting factors using multifunctional pavement material tester. *Materials*, 12(3814). doi:10.3390/ma12233814
- Lubis, A. S., Muis, Z. A., & Gultom, E. M. (2018). The effect of contaminant on skid resistance of pavement surface. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 126(1). doi:10.1088/1755-1315/126/1/012040
- Mahanpoor, M., Monajjem, S., & Balali, V. (2020). An optimization model for synchronous road geometric and pavement enhancements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. doi:10.1016/j.jtte.2019.03.008
- Mao, C., Ma, Y., Wu, S., Wei, Y., & Li, J. (2019). Wear resistance and wet skid resistance of composite bionic tire tread compounds with pit structure. *Materials Research Express*, 6(8). doi:10.1088/2053-1591/ab249a

- Meegoda, J., Gao, S., Liu, S., & Gephart, N. (2013). Pavement texture from high-speed laser for pavement management system. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(8), 697-705. doi:10.1080/10298436.2012.655246
- Nazari, A., Chen, L., Battaglia, F., Ferris, J., Flintsch, G., & Taheri, S. (2020). Prediction of Hydroplaning Potential Using Fully Coupled Finite Element-Computational Fluid Dynamics Tire Models. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 142(101202). doi:10.1115/1.4047393
- Nicolosi, V., D'Apuzzo, M., & Evangelisti, A. (2020). Cumulated frictional dissipated energy and pavement skid deterioration: Evaluation and correlation. *Construction and Building Materials*, 263(120020). doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120020
- Pérez-Acebo, H., Gonzalo-Orden, H., Findley, D., & Rojí, E. (2020). A skid resistance prediction model for an entire road network. *Construction and Building Materials*, 262(120041). doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120041
- Pokorny, P., Jensen, J. K., Gross, F., & Pitera, K. (2020). Safety effects of traffic lane and shoulder widths on two-lane undivided rural roads: A matched case-control study from Norway. *Accident Analysis & Prevention*, 144. doi:10.1016/j.aap.2020.105614
- Rajapakshe, M., Fuentes, L., & Gunaratne, M. (2012). Using the astm e 274 skid trailer data to characterize pavement friction behavior with respect to the traveling speed and the wheel slip ratio. *DYNA*, 79(176), 130-138.
- Serigos, P. A., De Fortier Smit, A., & Prozzi, J. A. (2014). Incorporating Surface Microtexture in the Prediction of Skid Resistance of Flexible Pavements. *Transportation Research Record*, 2457, 105-113. doi:10.3141/2457-11
- Srirangam, S., Anupam, K., Scarpas, A., Kasbergen, C., & Kane, M. (2014). Safety aspects of wet asphalt pavement surfaces through field and numerical modeling investigations. *Transportation Research Record*, 2446, 37-51. doi:10.3141/2446-05
- Suhaimi, A., & Baharuddin, A. R. (2019). Threshold value of skid resistance and texture depth for Malaysia road. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 512(1). doi:10.1088/1757-899X/512/1/012035
- Swamy, V. S., Shivayogi, H. G., & Mathivanan, N. R. (2020). Selection of Optimal Tire and Design Optimisation of Steering System for a Formula Student Race Car through Tire Data Treatment. *Journal of Physics: Conference Series*, 1478(1). doi:10.1088/1742-6596/1478/1/012032



- Tan, T., Xing, C., Tan, Y., & Gong, X. (2019). Safety aspects on icy asphalt pavement in cold region through field investigations. *Cold Regions Science and Technology*, 161, 21-31. doi:10.1016/j.coldregions.2019.02.010
- 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. doi:10.1016/j.jtte.2015.02.001
- Ueckermann, A., Wang, D., Oeser, M., & Steinauer, B. (2015). A contribution to non-contact skid resistance measurement. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(7), 646 - 659. doi:10.1080/10298436.2014.943216
- Vieira, T., Ferreira, R. P., Kuchiishi, A. K., Bernucci, L. L., & Sinatora, A. (2015). Evaluation of friction mechanisms and wear rates on rubber tire materials by low-cost laboratory tests. *Wear*, 328-329, 556-562. doi:10.1016/j.wear.2015.04.001
- Wu, Z., & Abadie, C. (2018). Laboratory and field evaluation of asphalt pavement surface friction resistance. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 12(3), 372-381. doi:10.1007/s11709-017-0463-1
- Yu, M., You, Z., Wu, G., Kong, L., Liu, C., & Gao, J. (2020). Measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavement: A review. *Construction and Building Materials*, 260(119878). doi:10.1016 / j.conbuildmat.2020.119878
- Zhang, X., & Gohlich, D. (2017). A hierarchical estimator development for estimation of tire-road friction coefficient. *PLOS ONE*, 12(2). doi:10.1371/journal.pone.0171085
- Zhao, Y.-Q., Li, H.-Q., Lin, F., Wang, J., & Ji, X.-W. (2017). Estimation of Road Friction Coefficient in Different Road Conditions Based on Vehicle Braking Dynamics. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 30(4), 982-990. doi: 10.1007/s10033-017-0143-z
- Zhu, X., Yang, Y., Zhao, H., Jelagin, D., Chen, F., Gilabert, F., & Guarin, A. (2020). Effects of surface texture deterioration and wet surface conditions on asphalt runway skid resistance. *Tribology International*, 153(106589). doi:10.1016/j.triboint.2020.106589