

02-014 – Analysis of the influence of various variables for predicting the skid resistance in bituminous pavements – Análisis de la influencia de varias variables en la predicción de la resistencia al deslizamiento en firmes bituminosos

Pérez-Acebo, Heriberto¹; Isasa, Miren¹; Gurrutxaga, Itziar¹; Alonso-Solórzano, Ángela²

(1) Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea, (2) Universidad Francisco de Vitoria

 Spanish  Spanish

Pavement performance models are able to predict the progression of the road pavement indices in advance and, hence, they have become an essential element of the Pavement Management Systems (PMS) of any highway administration. Among the usually employed indices, we can find the pavement skid resistance (or friction) due to its close relationship with road safety and crash probability. The skid resistance depends on various factors, which are generally grouped in vehicle factors, tire properties, pavement surface characteristics and environmental factors. However, once a standardized test is selected, it only depends on the last two groups. This proceeding analyzes the relationship between bituminous pavements and various factors: Average Annual Daily Traffic (total and of heavy vehicles), material type on surface, pavement age, Polished Stone Value of the aggregates, lane of the carriageway and presence of tunnels. With this aim, skid resistance data from various highway administrations from Spain and Germany are employed. Results show the most significantly affecting factors, which are used for developing the pavement prediction models of the PMS.

Keywords: *Pavement management system; Skid resistance; Pavement performance model; Pavement prediction model; Friction; Bituminous pavement*

Los modelos de predicción de la evolución de los firmes de carretera permiten anticipar la progresión de los índices de estado de los pavimentos y, por tanto, se han convertido en elemento esencial de los Sistemas de Gestión de Firmes (SGF) de cualquier administración viaria. Entre los índices habitualmente empleados se encuentra la resistencia al deslizamiento (o fricción) del firme, debido a su estrecha relación con la seguridad vial y la probabilidad de accidente, que depende de varios factores, que se clasifican en factores relacionados con el vehículo, propiedades de la rueda, características de la superficie y factores ambientales. Sin embargo, una vez seleccionado el método de ensayo, solo depende de los dos últimos. Esta ponencia analiza la relación entre la fricción de firmes bituminosos y varios factores: Intensidad Media Diaria (total y de vehículos pesados), tipo de material en superficie, edad del firme, coeficiente de pulimento acelerado de los áridos, carril de la calzada y presencia de túneles. Se utilizan datos de fricción de varias administraciones viarias de España y Alemania. Los resultados muestran los factores que influyen de manera más significativa, los cuales son utilizados para desarrollar los modelos de predicción de los SGF.

Palabras claves: *Sistema de gestión de firme; Resistencia al deslizamiento; Modelo de predicción de firme; Modelo de rendimiento; Fricción; Firme bituminoso*

Acknowledgments:

Esta investigación ha estado financiada por la Diputación Foral de Gipuzkoa / Gipuzkoako Foru Aldundia mediante el programa Etorbizuna Eraikiz 2022, proyecto P9 "Gipuzkoan eraikuntza eta mugikortasuna adimentsu eta jasangarria / Construcción y movilidad inteligentes y sostenibles en Gipuzkoa", y el programa Etorbizuna Eraikiz 2024, proyecto P10 "MUGI JASS (MUGikortasuna Gipuzkoan: Interkonektatua, JASangarria eta Segurua / Movilidad en Gipuzkoa: interconectada, sostenible y segura".



©2025 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

En la actualidad, los Sistemas de Gestión de Firmes (SGF) (Pavement Management Systems, en inglés) se han convertido en una herramienta indispensable para las administraciones viarias. Según la definición de la AASHTO (2012), los SGF son un conjunto de herramientas o métodos que ayudan a los responsables de la toma de decisiones a encontrar las estrategias óptimas para proporcionar, evaluar y mantener los pavimentos en condiciones de servicio durante un período determinado. Son herramientas esenciales porque las agencias viarias pueden optimizar los limitados fondos asignados a las agencias de transporte. Como cualquier sistema organizado, los SGP se componen de unos elementos clave correspondientes a una red en particular: 1) información y evaluación del estado del pavimento, 2) modelos de deterioro o de rendimiento del pavimento para predecir su estado futuro, y 3) planes de mantenimiento y rehabilitación a nivel de red y de proyecto, tras considerar las condiciones locales, los materiales y el tráfico, así como la financiación disponible.

Existe una amplia variedad de características que pueden medirse en el pavimento de una carretera para evaluar su estado. Según la Pavement Management Guide (AASHTO, 2012), éstas se agrupan en los siguientes tipos: mediciones del deterioro del pavimento (fisuras, grietas, etc.), características superficiales (incluido el perfil longitudinal y la regularidad, la textura superficial y la fricción), características de la explanada y evaluación estructural. Entre las características superficiales del firme que se miden, la resistencia al deslizamiento es ampliamente estudiada (también denominada fricción), que es un factor vital en las evaluaciones funcionales de los firmes debido a su relación con la seguridad vial (Wang et al., 2013). La importancia de este parámetro radica en la resistencia a la fricción que se produce entre los neumáticos del vehículo y la capa superficial, un componente clave de la conducción, responsable de la capacidad de los conductores para maniobrar y guiar sus vehículos con seguridad, tanto longitudinal como transversalmente. Un valor de fricción más alto proporciona un mejor control del vehículo a los conductores. Generalmente, se afirma que los accidentes de tráfico son consecuencia de múltiples factores, que pueden agruparse en factores relacionados con el conductor, el vehículo y el estado de la infraestructura (Hall et al., 2009; Pérez-Acebo et al., 2020). A pesar de la naturaleza multifactorial de los accidentes viarios, la literatura científica ha demostrado ampliamente una correlación significativa entre fricción disponible en el firme y número de colisiones (Hall et al., 2009; Wallman and Astrom, 2011).

La resistencia al deslizamiento se define como la fuerza que resiste el giro relativo entre una rueda de un vehículo y el pavimento (Hall et al., 2009). Esta fuerza se genera cuando la rueda del vehículo gira o desliza sobre la superficie de la carretera y es el resultado de una compleja interacción de fenómenos, principalmente, la adhesión y la histéresis (Moaveni et al., 2014). La adhesión se debe a la unión molecular a pequeña escala entre el caucho del neumático y la superficie del pavimento cuando entran en contacto. Por otro lado, la histéresis, o distorsión de la superficie del neumático, se produce cuando esta pasa sobre las proyecciones y depresiones del pavimento, y es resultado de la pérdida de energía debido a la envoltura del neumático sobre la textura del pavimento. Dado que la adhesión aparece en la interfaz pavimento-neumático, se dice que está relacionada con las microasperezas de los áridos del pavimento, es decir, la microtextura. Por el contrario, la histéresis se debe a las macroasperezas de la superficie de la carretera, es decir, la macrotextura (Edmondson et al., 2019). Las escalas de la textura superficial se definieron en el XVII World Road Congress en Bruselas (Bélgica) (PIARC, 1987), en función de la longitud de onda (λ) y la Amplitud (Tabla 1).

Tabla 1: Clasificación de las irregularidades de un pavimento.

Nivel de textura	Longitud de onda, λ (mm)	Amplitud, A (mm)
Microtextura	$0 < \lambda < 0,5$	$0,001 < A < 0,5$
Macrotextura	$0,5 < \lambda < 50$	$0,1 < A < 20$
Megatextura	$50 < \lambda < 500$	$1 < A < 50$
Regularidad superficial	$\lambda > 500$	$1 < A < 200$

La microtextura depende principalmente de las características superficiales de los áridos (angularidad, textura superficial y forma del árido). La macrotextura depende de las propiedades de la mezcla asfáltica (forma, tamaño y gradación de los áridos) (Li et al., 2020). Si bien la microtextura y la macrotextura son propiedades esenciales para garantizar la fricción, la megatextura y la regularidad superficial deben evitarse en los pavimentos por motivos de seguridad y confort. Los factores que afectan a la resistencia al deslizamiento de los pavimentos se suelen agrupar en 4 categorías (Hall et al. 2019; PIARC, 1987; Wallman and Åmstrom, 2019; Edmonson et al., 2019), mostradas en la Tabla 2.

Tabla 2: Factores que afectan a la resistencia al deslizamiento de un firme.

Características superficiales del firme	Factores relacionados con el vehículo	Propiedades del neumático	Condiciones ambientales
1. Microtextura	Velocidad de deslizamiento, en función de:	1. Dibujo y condición	1. Temperatura
2. Macrotextura	1. Velocidad del vehículo	2. Presión de inflado	2. Agua
3. Propiedades del material	2. Porcentaje de deslizamiento	3. Composición del caucho y resistencia	3. Hielo y nieve
4. Megatextura / Reg. superficial	3. Maniobra de conducción	4. Huella	4. Contaminantes (sal, arena, polvo, barro)
5. Temperatura	3a. Girando	5. Carga	5. Viento
	3b. Adelantando	6. Temperatura	

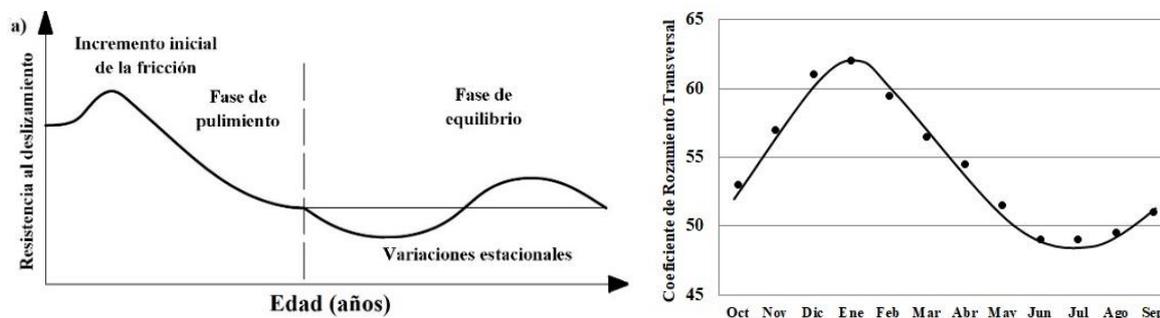
Por otra parte, existen numerosos aparatos y equipos de medición de la resistencia al deslizamiento, los cuales se suelen clasificar en función de tres principios de operación: coeficiente de rozamiento longitudinal, coeficiente de rozamiento transversal y zapatas deslizantes (estacionarias o de baja velocidad) (Kogbara et al., 2016). El SCRIM, desarrollado por el Transport and Road Research Laboratory (TRRL) de Reino Unido, consiste en un chasis de camión con una rueda estandarizada dispuesta de manera oblicua de manera fija a 20 grados del eje longitudinal del vehículo, y conectado a un suministro de agua constante. Éste es el aparato establecido en España para medir la resistencia al deslizamiento de un firme (MFOM, 2014) y que se indica a través del valor de *CRT* (Coeficiente de Rozamiento Transversal), que varía entre 0 y 100. Es preciso señalar que, una vez que una administración viaria ha establecido un procedimiento para obtener la fricción en la red que gestiona, las características superficiales del firme y los factores ambientales son las únicas variables que afectan, permaneciendo el resto de la Tabla 2 constantes (aproximadamente).

La macrotextura depende del tamaño máximo del árido, del tipo de árido grueso y fino, de la gradación de los áridos, del contenido de huecos de la mezcla y del ligante bituminoso, mientras que la microtextura dependen únicamente del tipo de árido grueso, en especial a

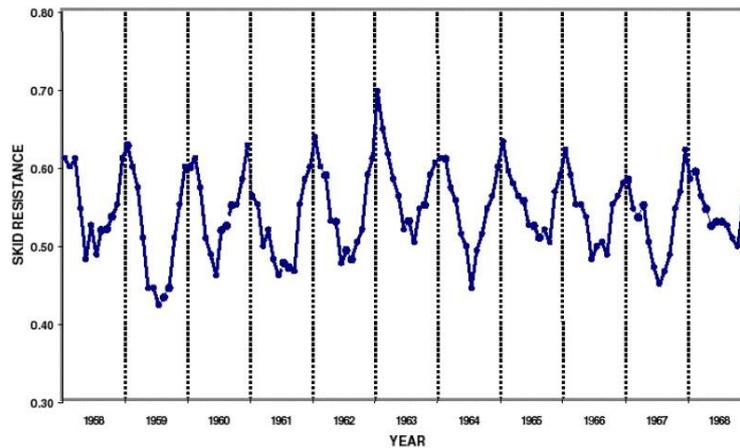
través del Coeficiente de Pulimiento Acelerado (*CPA*). Con respecto a los factores ambientales, el agua es un factor clave en la resistencia al deslizamiento. Con superficies secas y limpias se logran altos valores de fricción. Sin embargo, cuando el firme está ligeramente húmedo, se observa una importante reducción de la fricción disponible puesto que la película de agua sobre la superficie actúa como un lubricante entre la rueda y el pavimento y también reduce el área de contacto. Es por ello que la mayoría de los ensayos de fricción se realizan en mojado.

Respecto a la edad del pavimento, el comportamiento de la fricción es distinto al de otras propiedades de los firmes, las cuales empeoran con el tiempo y el tráfico. Existe un modelo aceptado internacionalmente sobre la evolución de la resistencia al deslizamiento con el tiempo (Figura 1a). Para un nuevo pavimento bituminoso, se observa un incremento inicial en la fricción a medida que se va eliminando la película de betún que recubre los áridos. Este valor alcanza su máximo una vez ha desaparecido la película de betún y los áridos están expuestos al tráfico, proporcionando una gran fricción gracias a su microtextura. Entonces, una vez que los áridos están expuestos directamente al tráfico, sufren el proceso de pulido habitual debido al tráfico y su valor desciende, hasta que se alcanza una fase de equilibrio, donde el valor de la resistencia al deslizamiento tiende a un valor asintótico. Investigaciones previas han demostrado que, si se mantienen los volúmenes de tráfico, durante la fase de equilibrio las únicas fluctuaciones son las debidas a las variaciones estacionales y las de corta duración. Sin embargo, no existe consenso sobre la duración de estas fases. En España, el incremento inicial suele durar entre 2 y 3 meses, pero hay casos en los que debido a la resistencia del betún modificado con polímeros se ha llegado a necesitar 4 años (Woodward et al., 2005). Sobre la duración de la fase de pulimiento, también se han observado distintos valores, desde 4 o 5 años (Wilson, 2006) hasta un año (Kokkalis, 1998; Navarro et al., 2011).

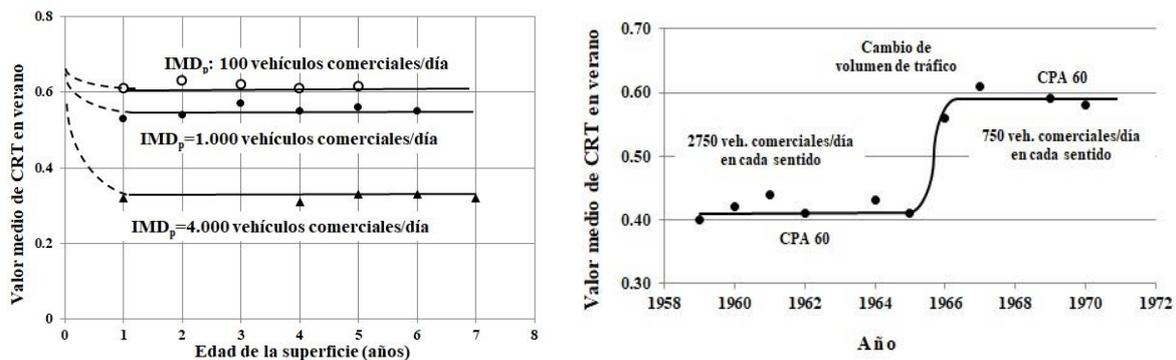
Figura 1: a) Evolución de la resistencia al deslizamiento con el tiempo; b) Variaciones estacionales de la resistencia al deslizamiento en fase de equilibrio durante el año.



En las variaciones estacionales de la resistencia al deslizamiento, que aparecen en la fase de equilibrio, se obtienen los valores más bajos durante el verano y los valores más altos en inviernos (Figura 1b). En carreteras en estado seco, principalmente en verano, la acción de pulimiento del tráfico es la dominante, pero cuando los pavimentos están mojados durante largo tiempo, generalmente en invierno, la superficie recupera parte de su textura y dureza previas (Roshan and Abdelrahman, 2024). La magnitud de estas variaciones depende principalmente de la historia geológica y la petrografía de los áridos empleados. El primer estudio fue llevado a cabo en el Reino Unido, con firmes en estado estacional, recopilando datos de fricción cada mes durante 11 años (1958-1968) (Figura 2) (Hosking and Woodford, 1976). Otros estudios en otros países certifican también estas variaciones estacionales.

Figura 2: Resistencia al deslizamiento medida en el Reino Unido (con SCRIM) durante 11 años.

La intensidad del pulido de los áridos en la fase de pulimiento está directamente relacionada con la intensidad del tráfico, y especialmente, con la intensidad del tráfico pesado. Kennedy et al. (1990) indicó que, si el resto de condiciones permanecía igual, una carretera con mayor volumen de tráfico pesado tendría un valor mínimo de resistencia al deslizamiento, puesto que es el responsable del pulido de la microtextura de los áridos. La Figura 3a muestra esta idea con datos de Reino Unido con áridos con CPA entre 58 y 60 (Kennedy et al., 1990). Como se observa, el descenso inicial es debido a la fase de pulido, pero no continua tras alcanzar la fase de equilibrio. Por lo tanto, el tráfico pesado no debe ser considerado año tras año, como un valor acumulado, pues solo depende de la intensidad anual del tráfico pesado. Incluso, cuando el tráfico de vehículos pesado ha bajado de manera drástica, debido a una circunvalación de ese tramo, se ha observado incrementos de la fricción, tanto en Reino Unido (Szatkowski and Hosking, 1972) (Figura 3b), como en España en la N-VI en León (España) (Achútegui Viada, 2005).

Figura 3: Valores medios de CRT en verano, a) con volumen de tráfico pesado constante; b) con cambio de volumen de tráfico pesado.

Teniendo en cuenta los distintos factores que afectan la resistencia al deslizamiento disponible, comentados en esta introducción, el objetivo de esta ponencia es analizar la correlación existente entre la fricción de firmes bituminosos y varios factores: Intensidad Media Diaria (total y de vehículos pesados), tipo de material empleado en la capa de rodadura, edad del firme, coeficiente de pulimiento acelerado de los áridos, carril de la calzada y presencia túneles, con datos de Bizkaia y Gipuzkoa (España) y de Baviera (Alemania). Este análisis es necesario realizarlo como paso previo al desarrollo de modelos de predicción de los SGF, que son una pieza clave de éstos.

2. Datos disponibles y método de investigación aplicado

2.1 Datos disponibles

Para poder llevar a cabo el análisis de la correlación entre varios factores y la resistencia al deslizamiento, se dispone de los datos de las siguientes administraciones viarias: Diputación Foral de Bizkaia (España), Diputación Foral de Gipuzkoa (España) y del Estado de Baviera (Alemania).

Debido al estatus político especial de la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV), los gobiernos regionales de cada provincia (Bizkaia, Gipuzkoa y Álava), denominados Diputaciones Forales, tiene la competencia exclusiva de la gestión de toda la red de carreteras de la provincia, con excepción de las carreteras municipales, cuya gestión corresponde a los ayuntamientos. En el caso de Bizkaia, la Diputación Foral de Bizkaia (DFB) desarrolló su propio SGF, denominado Agenda de Estado, que incluye la información esencial en cualquier SGF: Inventario de la red, datos históricos de tráfico, datos medioambientales, datos de estado del firme y datos de la estructura del firme.

El historial de tráfico de toda la red se recopila y publica anualmente (DFB, 2024), proporcionando para cada tramo de carretera información sobre la Intensidad Media Diaria (*IMD*) (incluyendo ambos sentidos), el porcentaje de vehículos pesados y, en consecuencia, la Intensidad Media Diaria de vehículos pesados (*IMD_p*). Según la legislación española (MFOM, 2003), un vehículo se define como pesado cuando su peso superior es a 3500 kg. Además, la DFB incorpora a su SGF los datos de las obras de nueva construcción que va ejecutando, así como las obras rehabilitación y mantenimiento que acomete, incluyéndose datos de las capas de firme ejecutadas. Con respecto a los datos del estado del firme, se disponen de datos Coeficiente de Rozamiento Transversal (*CRT*) obtenidos mediante el SCRIM de varios años. Se utilizaron los datos de 2011 (medidos en invierno) y de 2016 (medidos en verano). Los datos del coeficiente SCRIM se proporcionan cada 20 m de la vía, indicando el punto de fricción inicial y final exacto. En carreteras de una sola calzada, los valores se toman de uno de los dos carriles. En carreteras de doble calzada, se registra el carril derecho de cada uno de los sentidos, que es el carril con mayor intensidad de tráfico.

La Diputación Foral de Gipuzkoa (DFG) también ha desarrollado su SGF y también cuenta con la siguiente información: inventario de carreteras, datos históricos de tráfico, indicadores de estado del firme (principalmente, International Roughness Index y *CRT*) y datos de estructura del firme en algunas secciones.

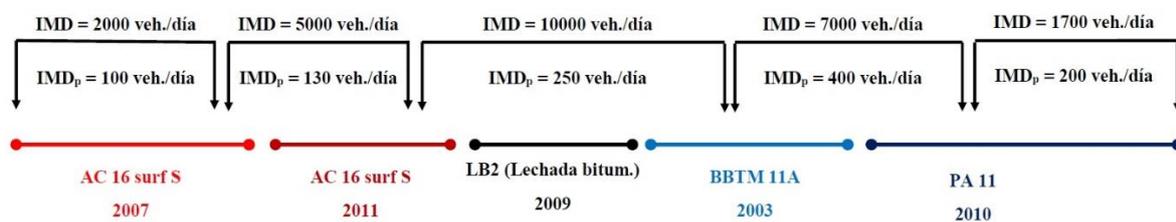
Al igual que en Bizkaia, se recopila y publica anualmente el tráfico de toda la red (DFG, 2024) con datos de *IMD*, porcentaje de pesados e *IMD_p*. Los proyectos más recientes son incorporados a la base de datos, estableciéndose las secciones de firme existente. Los datos de *CRT* se obtuvieron durante diversos años, midiéndose en diferentes estaciones del año.

En Alemania, debido a su sistema federal, cada estado federado gestiona, en nombre de la República Federal de Alemania, la totalidad de la red vial de su territorio, incluyendo carreteras y autopistas (excepto las carreteras locales). El Ministerio de Vivienda, Construcción y Transporte del Estado de Baviera (*Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr*) utiliza su propio SGF, que incluye la información habitual; inventario de carreteras, materiales del firme, historial de obras, datos del historial de tráfico, datos ambientales y datos sobre el estado del firme. Se obtuvieron datos de la red de autopistas de Baviera: identificación de los tramos de autopistas, con sus Puntos Kilométricos (PK) iniciales y finales, información sobre el material de la capa de rodadura (en una cuarta parte de los tramos), datos de tráfico de los años 2010 y 2015 (*IMD* e *IMD_p*), datos de resistencia al deslizamiento, cada 100 m, obtenidos mediante el SKM, que es un método de medición del rozamiento transversal, similar al SCRIM pero con algunas modificaciones relacionadas con su uso en Alemania. Su valor se expresa entre 0 y 1.

2.2 Método de investigación

Los datos de tráfico se utilizaron para dividir las carreteras de la red según la *IMD* (y, en consecuencia, la *IMD_p*) en ese segmento. Tras dividir el segmento de la carretera según el tráfico, los materiales de la capa de rodadura y su fecha de ejecución se utilizaron para realizar otra división, que no coincidía necesariamente con la división anterior. Las dos divisiones de la carretera se utilizaron para crear segmentos con las mismas características, tanto en términos de tráfico como de material en capa de rodadura y su edad, con longitud variable (y número de observaciones) (Figura 4). A continuación, se calculó el valor promedio del *CRT* para el segmento con las mismas características, debido a la posibilidad de una variabilidad sustancial en las observaciones del segmento. Este valor medio del segmento de características homogéneas es el que es analizado.

Figura 4: Ejemplo de división en tramos homogéneos en función del tráfico y del material de la superficie y su año de ejecución.



Para establecer la influencia de cada variable en la resistencia al deslizamiento se utilizó el coeficiente de Pearson, *R*, que mide la relación lineal entre dos variables, mediante la Ecuación (1):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Donde *R* es el coeficiente de Pearson, *n* es el número total de pares de datos, *x_i* e *y_i* son los valores individuales de las dos variables (*x*, *y*), y \bar{x} e \bar{y} son las medias de las variables *x* e *y*, respectivamente.

3. Resultados

3.1 Influencia del tráfico

La Tabla 3 muestra la relación entre el *CRT* y la *IMD* y la *IMD_p* en el año de medición de la resistencia al deslizamiento (excepto en los datos de Baviera). Se observa claramente que la intensidad media anual es una variable que tiene una alta correlación con la fricción disponible. El valor negativo del coeficiente indica que cuanto mayor es la intensidad de vehículos, menor es la resistencia al deslizamiento, de acuerdo a lo comentado en la Fig. 3a. El valor mínimo de *R* de -0,322, aunque con una significación superior al 95% (p-valor < 0,05). Sin embargo, en el resto de casos, la significación es siempre superior al 99% (p-valor < 0,01). Generalmente, se obtiene una mayor correlación con la intensidad de vehículos pesados, aunque la correlación con la intensidad total es alta. Transformando la variable se obtienen relaciones todavía mayores, siendo las más habituales los logaritmos (naturales o neperianos) y las raíces cuadradas. En esencia, se trata de la variable más importante a incluir en los modelos de predicción; se incluyó en la primera ecuación formulada para predecir la resistencia al deslizamiento (Szatkowski and Hosking, 1972) y ha sido empleado en la inmensa mayoría de los modelos propuestos, donde se introduce como *IMD_p* (Rezaei and Masad, 2013; Wang and Liang, 2014; Li et al., 2017) o como cargas del eje simple equivalente

(Equivalent Single Axle Load, ESAL) (Omar et al., 2017; Wang and Wang, 2013). En el caso de estudios en laboratorio, el paso de vehículos es simulado por los ciclos de pulido y es la variable clave en estas investigaciones (Rezaei et al., 2009). En consecuencia, es la variable más determinante.

Tabla 3: Correlación entre la resistencia al deslizamiento y la IMD y la IMD_p en distintas bases de datos (Coeficiente de Pearson, R).

Área	Tipo de calzada	Características	Variable	Puntos (n)	C. Pearson (R)	Transformación de variable	C. Pearson (R)
Bizkaia	Única	Invierno	IMD	22	-0,66**	\sqrt{IMD}	-0,66**
			IMD_p	22	-0,75**	$\sqrt{IMD_p}$	-0,77**
	Única y separadas	Verano (sec. nuevas)	IMD	42	-0,493**	$\ln(IMD)$	-0,533**
			IMD_p	42	-0,322*	$\ln(IMD_p)$	-0,375*
	Única y separadas	Verano (rodadura conocida)	IMD	796	-0,343**	$\ln(IMD)$	-0,574**
			IMD_p	796	-0,307**	$\ln(IMD_p)$	-0,516**
Gipuzkoa	Única	Verano	IMD	65	-0,554**	$\log(IMD)$	-0,615**
			IMD_p	65	-0,560**	$\ln(IMD_p)$	-0,618**
Baviera	Separadas	Todas las secciones	IMD	6409	-0,427**	$\ln(IMD)$	-0,457**
			IMD_p	6409	-0,401**	$\ln(IMD_p)$	-0,418**
		Secciones con rodadura conocida	IMD	1777	-0,409**	$\ln(IMD)$	-0,420**
			IMD_p	1777	-0,429**	$\ln(IMD_p)$	-0,442**

* p-valor < 0,05; ** p-valor < 0,01

3.2 Material en la capa de rodadura

El tipo de material también influye en la fricción obtenida. Con los datos de Bizkaia, los tipos de rodadura que se definieron para el análisis fueron Hormigón bituminoso en caliente (AC) tipo semidenso (S) o denso (D), diferenciando según el tamaño máximo del árido, 16 o 22; mezclas bituminosas discontinuas, BBTM 11A y BBTM 11B, mezclas porosas, PA 11, y lechada bituminosa tipo 2 (LB2). El análisis ANOVA (Analysis of Variance) indicaba que existía una diferencia significativa entre los grupos (niveles) considerados (p-valor = 0,001). Analizando la diferencia de medias entre cada 2 grupos, se observa entre qué grupos existe una diferencia significativa (Tabla 4). En el caso de los datos de Baviera, los firmes se categorizaron en los siguientes grupos: Hormigón bituminoso en caliente de árido máximo 11 mm (AC 11), mezcla drenante (PA), lechada bituminosa (slurry), masilla bituminosa (Mastic Asphalt) y mezclas tipo SMA (Stone Mastic Asphalt). A pesar de que la media de las secciones con la lechada bituminosa son las que más difieren de las otras medias no tiene diferencia significativa con el resto de materiales. Esto es debido al pequeño número de datos con ese tipo de material ($n = 14$), lo que hace que las diferencias no sean significativas. Por el contrario, la diferencia entre las medias de Mastic Asphalt y Stone Mastic Asphalt no parece grande (solo 0,012), pero debido al alto número de datos en esos grupos (238 y 1291, respectivamente), la diferencia se convierte en significativa. No obstante, la introducción de una variable que tenga en cuenta el tipo de material en la rodadura hace que los modelos

obtengan una mayor precisión, como han demostrado varias publicaciones que lo incluyen como variable (Odoki and Kerali, 2013; Wang and Liang, 2014; Pérez-Acebo et al., 2020; 2023). De manera similar, las investigaciones realizadas en laboratorio mostraron que los distintos tipos de material bituminoso influían notablemente en la fricción disponible (Khasawneh, 2017, Xie et al. 2019)

Tabla 4: Diferencia de medias de resistencia al deslizamiento para distintos grupos de materiales en la capa de rodadura en distintas bases de datos (Coeficiente de Pearson, R).

Área	Material	Media	Diferencia significativa con otros materiales
Bizkaia	AC 16 (D o S)	49,16	BBTM 11A, PA 11, LB2
	AC 22 (D o S)	51,06	PA 11
	BBTM 11A	46,38	AC 16, PA 11, LB2
	BBTM 11B	47,80	LB2
	PA 11	43,77	AC 16, BBTM 11A
	LB2 (Slurry)	56,31	AC 16, AC 22, BBTM 11A, BBTM 11B. LB2
Baviera	AC 11	0,5596	Mastic Asphalt
	PA	0,5610	
	Slurry	0,5265	
	Mastic Asphalt	0,5466	AC 11, Stone Mastic Asphalt
	Stone Mastic Asphalt	0,5586	Mastic Asphalt

3.3 Edad del firme

A pesar de que la edad del firme es una variable clave en los modelos de predicción de otras características del firme (Pérez-Acebo et al., 2021), no se suele tener en consideración para valor la resistencia al deslizamiento. Una vez que el firme llega a la fase de equilibrio (Figura 1a), las únicas variaciones son las estacionarias (Figura 1b, Figura 2), por lo que el número de vehículos acumulado que ha discurrido por la sección, no representa una variable significativa (Figura 3). La Tabla 5 muestra el análisis para las bases de datos disponibles.

Tabla 5: Correlación entre la resistencia al deslizamiento y la edad del firme en distintas bases de datos (Coeficiente de Pearson, R).

Área	Tipo de calzadas	Características	Puntos (n)	C. Pearson (R)	Transformación de variable	C. Pearson (R)
Bizkaia	Única	Invierno	22	-0,06	Lineal	-0,06
	Única y separadas	Verano (sec. nuevas)	42	-0,152	Lineal	-0,152
		Verano (rodadura conocida)	796	-0,118**	Lineal	-0,118**
Baviera	Separada	Todas las secciones	6409	-0,103**	Lineal	-0,102**
		Capa rodadura conocida	1777	-0,102**	Lineal	-0,102**

* p-valor < 0,05; ** p-valor < 0,01

Se observa que para firmes de una edad superior a 2 años (valor habitual para llegar a la fase de equilibrio en esas regiones), la correlación entre la fricción y la edad del firme es débil, con valores de R no superiores a 0,152. Además, una transformación de las variables no mejora esta correlación, lo que provoca que esta variable que no se introduce en los modelos (Pérez-Acebo et al., 2020; 2023).

3.4 Coeficiente de Pulimiento Acelerado (CPA)

El CPA es el valor obtenido en un test que da una idea aproximada de la resistencia de los áridos a ser pulidos, indicando, por tanto, la mayor o menor dificultad del árido para mantener su microtextura. Dada la importancia de la microtextura en la fricción (Tabla 2), el CPA de los áridos utilizados en la rodadura fue la otra variable, junto con la IMD_p , que se introdujo en la primera ecuación propuesta para predecir la resistencia al deslizamiento en el Reino Unido (Szatkowski and Hosking, 1972). De las bases de datos analizadas, el dato del CPA solo estaba disponible en los datos de Bizkaia. Sin embargo, dado que se desconocía el valor exacto de los áridos empleados en cada tramo, se introdujo el valor mínimo requerido en la ejecución de cada tramo según la categoría del tráfico. Para los datos de verano de 2016 (Tabla 6), se observa una alta correlación, y por lo tanto resultó una variable incluida en los modelos (Pérez-Acebo et al., 2020). Para los datos de 2011, la correlación es muy baja, solo de 0,02, pero finalmente esa variable se introdujo en el modelo presentado, y era significativa con un p-valor = 0,013 (Pérez-Acebo et al., 2019). Tras las ecuaciones propuestas por Szatkowski and Hosking (1972), la modificación de la misma presentada por Roe and Hartshome (1998) para el mismo país (Reino Unido) también la incluía. De igual manera, en investigaciones llevadas a cabo en Nueva Zelanda también fue incluida (WDM Ltd., 1998; Cenek et al., 2003). Otras investigaciones también utilizaban el CPA como parámetro (Wang and Liang, 2014; Crisman et al., 2019) Por tanto, en caso de disponerse, es recomendable introducir esta variable.

Tabla 6: Correlación entre la resistencia al deslizamiento y el Coeficiente de Pulimiento Acelerado requerido del árido de rodadura en Bizkaia (Coeficiente de Pearson, R).

Área	Tipo de calzadas	Características	Puntos (n)	C. Pearson (R)	Transf. de variable	C. Pearson (R)
	Única	Invierno	22	0,02	Lineal	0,02
Bizkaia	Única y separadas	Verano (sec. nuevas)	42	-0,491**	Lineal	-0,491**
		Verano (rodadura conocida)	796	-0,35**	Lineal	-0,35**

* p-valor < 0,05; ** p-valor < 0,01

3.5 Carriles

Dado que en las carreteras de calzadas separadas (autopistas, autovías y carreteras multicarril) no circula una intensidad de vehículos similar por cada uno de los carriles disponibles, el carril considerado y el número total de carriles deben ser tenidos en cuenta a la hora de predecir la resistencia al deslizamiento. Habitualmente, los vehículos pesados circulan por el carril derecho. Dado que la IMD_p resulta clave en la predicción de la fricción. Así, con los datos de Bizkaia, comparando carreteras convencionales con el carril exterior de calzadas de 2 y 3 carriles, solo se observó diferencia con las carreteras convencionales (Tabla 7). No existían datos de carriles distinto al exterior en calzadas separadas. En cambio, en los datos de Baviera (Tabla 7), sí que existían datos de CRT en todos los carriles y se observa

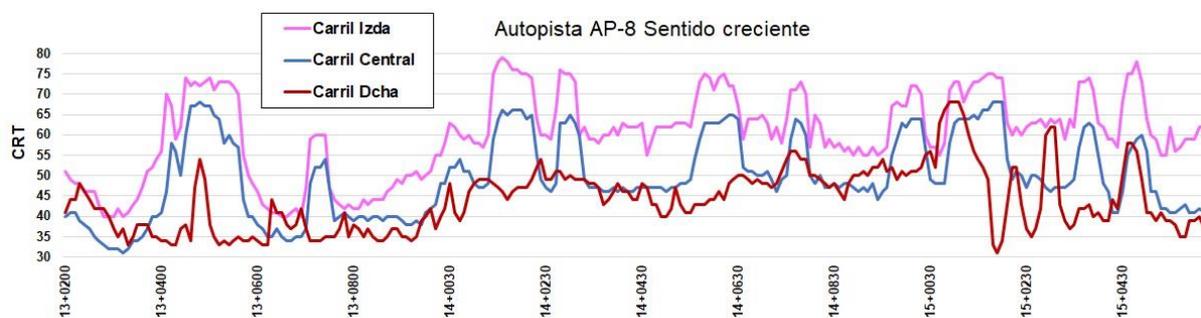
que entre casi todos los carriles existe diferencia significativa, subrayando la importancia de este factor en la modelización.

En los datos de Gipuzkoa es posible comparar carriles de calzadas de 2 y 3 carriles en el mismo sentido con el mismo material y el aspecto habitual es el mostrado en la Figura 5. Salvo en PKs concretos, la resistencia al deslizamiento en el carril derecho es menor que en el central que, a su vez, es menor que en el izquierdo. Comparándose el *CRT* en la misma sección entre los carriles, se ha observado que, aproximadamente, en el 70% de las secciones de 10 m, el valor en el carril derecho es inferior que en el carril adyacente. Algunos documentos muestran esta variable como necesaria a la hora de estudiar la fricción disponible (Pérez-Acebo et al. 2020; 2023). En consecuencia, el carril analizado tiene que ser tenido en cuenta.

Tabla 7: Diferencia de medias de resistencia al deslizamiento para distintos grupos de materiales en la capa de rodadura en distintas bases de datos (Coeficiente de Pearson, *R*).

Área	Características	Carril (Nº carriles)	Media	Diferencia significativa con otros carriles
Bizkaia	Rodadura conocida	Convencional	52,40	Derecho de 2 y de 3 carriles
		Derecho en 2 carriles	45,65	Convencionales
		Derecho en 3 carriles	46,27	Convencionales
Baviera	Todas las secciones	Derecho en 2 carriles	0,5307	Con todos
		Derecho en 3 carriles	0,4666	Con todos
		Izquierdo en 2 carriles	0,6007	Con todos
		Central en 3 carriles	0,5676	No con izquierdo en 3 carriles
		Izquierdo en 3 carriles	0,5651	No con central en 3 carriles
Baviera	Secciones de rodadura conocida	Derecho en 2 carriles	0,5437	No con central en 3 carriles
		Derecho en 3 carriles	0,4918	Con todos
		Izquierdo en 2 carriles	0,6036	Con todos
		Central en 3 carriles	0,5528	No con derecho en 2 carriles
		Izquierdo en 3 carriles	0,5724	Con todos

Figura 5: CRT en cada uno de los carriles de la AP-8 en Gipuzkoa.



3.6 Presencia de túnel

Un análisis entre los valores medios de resistencia al deslizamiento dentro de los túneles y el valor medio 500 m antes y después del túnel en autopistas de Gipuzkoa reveló que en el interior de los túneles el *CRT* estaba más de 5 puntos por debajo del valor en el exterior, lo que supone una reducción de entorno al 10% (Pérez-Acebo et al., 2024). Esto es debido a que en el interior del túnel no se producen las variaciones estacionales que existen en el exterior (Fang et al. 2020), con lo que dentro del túnel se reproducen condiciones de verano, obteniéndose valores más bajos (Maurer et al. 2008). Además, se comprobó que en los túneles más largos (de más de 500 m) tenían una mayor diferencia, superior al 12% que los cortos (de menos de 100 m), en los que solo se registraba una diferencia entorno al 7%. Esto es debido a que los vehículos introducen agua en la parte inicial del túnel. Sin embargo, existe escasa literatura sobre la fricción en túneles de pavimentos bituminosos, donde conviene una mayor investigación debido a la mayor accidentabilidad detectada dentro los túneles (Wang et al., 2024).

4. Conclusiones

En esta ponencia se han estudiado los factores que afectan a la resistencia al deslizamiento en firmes bituminosos, los cuales es necesario conocer, observando su correlación mediante el coeficiente de Pearson (*R*). Este análisis ha permitido determinar las principales variables a considerar a la hora de desarrollar un modelo de predicción de fricción. La intensidad media diaria (*IMD*) de vehículos ha sido identificada como el principal factor, el cual se incluye en la inmensa mayoría de modelos. Es preferible la *IMD* de vehículos pesados, pues se correlaciona mejor que la *IMD* total. Sin embargo, al contrario que otros índices de estado de los firmes de carretera, la edad no resulta un factor influyente para los firmes de más de 2 años de antigüedad, dado que el pavimento se encuentra en la fase de equilibrio. El tipo de mezcla bituminosa también afecta a la fricción, siendo aconsejable conocerla para mejorar los modelos de rendimiento. Además, si se conoce el Coeficiente de Pulimiento Acelerado (*CPA*) de los áridos, o al menos el requerido en el proyecto, también se mejora la precisión del modelo. Otro factor clave es el carril considerado, en especial en carreteras de calzadas separadas, dado que la distribución del tráfico, en especial el de vehículos pesados, no es uniforme entre los carriles. También debe tenerse en cuenta la presencia de túneles en la carretera dado que se ha medido un 10% menos que en el exterior para el mismo tráfico y tipo de firme.

Por otra parte, hay que indicar que, para desarrollar modelos de predicción de la resistencia al deslizamiento más precisos, es necesario conocer la mayor cantidad de información posible, por lo que el Sistema de Gestión de Firmes (*SGF*) de la administración viaria responsable de la red debe incluir todos los datos a su disposición en la base de datos.

5. Referencias

- AASHTO (2012). *Pavement Management Guide, 2nd ed.* American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA.
- Achútegi Viada, F. (2005). *Características superficiales de los firmes de carreteras.* Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX, Ministerio de Fomento, Madrid, Spain.
- Cenek, P. D., Carpenter, P., Jamieson, N., & Stewart, P. (2004). *Prediction of skid resistance performance of chipseal roads. Research Report No. 256.* Wellington, NZ: Transfund New Zealand.
- Crisman, B., Ossich, G., Bevilacqua, P., & Roberti, R. (2019). Degradation prediction model

- for friction of road pavements with natural aggregates and steel slags. *Applied Sciences*, 10(1), 32. <https://doi.org/10.3390/app10010032>
- DFB (Diputación Foral de Bizkaia) (2024). *Evolución del tráfico en las carreteras de Bizkaia-Trafikoaren bilakaera Bizkaiko errepideetan 2023*. Dpto de Infraestructuras y Desarrollo Territorial, Bilbao, Spain.
- DFG (Diputación Foral de Gipuzkoa) (2024). *Información de aforos en las carreteras de Gjpuzkoa. Recopilación hasta 2023*. Dpto. de Infraestructuras Viarias y Estrategia Territorial. Donostia-San Sebastián, Spain.
- Edmondson, V., Woodward, J., Lim, M., Kane, M., Martin, J., & Shyha, I. (2019). Improved non-contact 3D field and processing techniques to achieve macrotexture characterisation of pavements. *Construction and Building Materials*, 227, 116693. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116693>
- Fang, J., Tu, J, Wu, K. (2020). Analysis of skid resistance and noise characteristics for varieties of concrete pavement. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020(1), 7437314. <https://doi.org/10.1155/2020/7427314>
- Hall, J. W., Smith, K. L., Titus-Glover, L., Wambold, J. C., Yager, T. J., & Rado, Z. (2009). Guide for pavement friction. Final Report for NCHRP Project 01-43. Transportation Research Board. Washington, DC, USA.
- Hosking, J. R., & Woodford, G. C. (1976). Measurement of skidding resistance part II. Factors affecting the slipperiness of a road surface (No. TRRL Lab Report 738). Transport and Road Research Laboratory: Crowthorne, UK.
- Kennedy, C. K., Young, A. E., & Butler, I. C. (1990). Measurement of skidding resistance and surface texture and the use of results in the United Kingdom. In *Surface characteristics of Roadways: International research and Technologies*. ASTM International.
- Khasawneh, M. A. (2017). Laboratory study on the frictional properties of HMA specimens using a newly developed asphalt polisher. *International Journal of Civil Engineering*, 15, 1007-1017. <https://doi.org/10.1007/s40999-017-0186-7>
- Kogbara, R. B., Masad, E. A., Kassem, E., Scarpas, A. T., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.002>
- Kokkalis, A. G. (1998). Prediction of skid resistance from texture measurements. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*, 129(2), 85-93. <https://doi.org/10.1680/itrans.1998.30491>
- Li, L., Guler, S. I., & Donnell, E. T. (2017). Pavement friction degradation based on Pennsylvania field test data. *Transportation Research Record*, 2639(1), 11-19. <https://doi.org/10.3141/2639-02>
- Li, Q. J., Zhan, Y., Yang, G., & Wang, K. C. (2020). Pavement skid resistance as a function of pavement surface and aggregate texture properties. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(10), 1159-1169. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1525489>
- Maurer, P., Gruber, J., & Steigenberger, J. (2008). Skid resistance evaluation of Austrian tunnels. Proceedings of the managing road and runway surfaces to improve safety, Cheltenham, UK.
- MFOM (Ministerio de Fomento) (2003). *Orden FOM/3460/2003, de 28 de noviembre, por la que se aprueba la Norma 6.1 IC Secciones de Firme, de la instrucción de carreteras*,

BOE de 12 de diciembre de 2003, Madrid, Spain.

- MFOM (Ministerio de Fomento) (2014). *Orden FOM/2523/2014, de 12 de diciembre, por la que se actualizan determinados artículos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes, relativos a materiales básicos, a firmes y pavimentos, y a señalización, balizamiento y sistemas de contención de vehículos*. BOE de 3 de enero de 201. Ministerio de Fomento, Madrid, Spain.
- Moaveni, M., Mahmoud, E., Ortiz, E. M., Tutumluer, E., & Beshears, S. (2014). Use of advanced aggregate imaging systems to evaluate aggregate resistance to breakage, abrasion, and polishing. *Transportation Research Record*, 2401(1), 1-10. <https://doi.org/10.3141/2401-01>
- Navarro, J. A., Luzuriaga, S., Arnáiz, J., & Ruiz, A. (2011). Bitumen wearing course and resistance to sliding. *Carreteras*, 180, 37-51.
- Odoki, J. B. & Kerali, H. R. (2013). *HDM-4 Volume 4: Analytical framework and model descriptions*. World Road Association (PIARC), Paris, France.
- Omar, L. G., El Halim, A. O., & Ismail, K. (2017). *Investigating predictability of pavement friction on rural roads in Ontario, Canada* (No. 17-02502).
- Pérez-Acebo, H., Gonzalo-Orden, H., & Rojí, E. (2019). Skid resistance prediction for new two-lane roads. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*, 172(5), 264-273. <https://doi.org/10.1680/jtran.17.00045>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120041>
- Pérez-Acebo, H., Gonzalo-Orden, H., Findley, D. J., & Rojí, E. (2021). Modeling the international roughness index performance on semi-rigid pavements in single carriageway roads. *Construction and Building Materials*, 272, 121665. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121665>
- Pérez-Acebo, H., Montes-Redondo, M., Appelt, A., & Findley, D. J. (2023). A simplified skid resistance predicting model for a freeway network to be used in a pavement management system. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(2), 2020266. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.2020266>
- Pérez-Acebo, H., Isasa, M., Gurrutxaga, I., & Alonso-Solórzano, Á. (2024). Analysis of the Skid Resistance Decrease in Bituminous Pavements in Dual-Carriageway Tunnels. *Buildings*, 14(12), 3963. <https://doi.org/10.3390/buildings14123963>
- PIARC (Permanent International Association of Road Congress) (1987). Report of the Committee on Surface Characteristics. *Proceedings of the XVIII World Road Association*, Brussels, Belgium
- Rezaei, A., Masad, E., Chowdhury, A., & Harris, P. (2009). Predicting asphalt mixture skid resistance by aggregate characteristics and gradation. *Transportation Research Record*, 2104(1), 24-33. <https://doi.org/10.3141/2104-03>
- Rezaei, A., & Masad, E. (2013). Experimental-based model for predicting the skid resistance of asphalt pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(1), 24-35. <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.643793>
- Roshan, A., & Abdelrahman, M. (2024). Influence of Aggregate Properties on Skid Resistance of Pavement Surface Treatments. *Coatings*, 14(8), 1037. <https://doi.org/10.3390/coatings14081037>
- Szatkowski, W. S., & Hosking, J. R. (1972). *The effect of traffic and aggregate on the skidding*

resistance of bituminous surfacing TRRL report LR 504. Transport and Road Research Laboratory: Crowthorne, UK.

Wallman, C. G., & Astrom, H. (2001). *Friction measurement methods and the correlation between road friction and traffic safety*. VTI meddelande, 911.

Wang, X., Azati, Y., Quddus, M., Cai, B., & Zhang, X. (2024). Statistical analysis of traffic crashes on mountainous freeway tunnel sections. *Transportation Research Record*, 2678, 1-10. <https://doi.org/10.1177/03611981231172751>

Wang, D., Chen, X., Yin, C., Oeser, M., & Steinauer, B. (2013). Influence of different polishing conditions on the skid resistance development of asphalt surface. *Wear*, 308(1-2), 71-78. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.09.013>

Wang, H., & Liang, R. Y. (2014). Predicting field performance of skid resistance of asphalt concrete pavement. In *Pavement Materials, Structures, and Performance* (pp. 296-305). <https://doi.org/10.1061/9780784413418.03>

Wang, H., & Wang, Z. (2013). Evaluation of pavement surface friction subject to various pavement preservation treatments. *Construction and Building Materials*, 48, 194-202. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.048>

WDM Ltd. (1998). *Investigation into the relationship between aggregate Polished Stone Value and wet skid resistance*. Project PR3-0154. Wellington, New Zealand: Transit New Zealand.

Wilson, D. J. (2006). An analysis of the seasonal and short-term variation of road pavement skid resistance. Doctoral PhD Thesis. University of Auckland

Woodward, W. D. H., Woodside, A. R., & Jellie, J. H. (2005, May). Early and mid life SMA skid resistance. In Proceedings of Int. Conference on Surface Friction, Christchurch, NZ.

Xie, X., Wang, C., Wang, D., Fan, Q., & Oeser, M. (2019). Evaluation of polishing behavior of fine aggregates using an accelerated polishing machine with real tires. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 145(2), 04019015. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000116>

Utilización de inteligencia artificial generativa

Para la elaboración de este trabajo no ha sido utilizada la inteligencia artificial generativa.

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

