

Impacto de la resistencia al deslizamiento en la seguridad vial

Apellidos, nombre	Llopis Castelló, David (dallocas@upv.es)
Departamento	Ingeniería e Infraestructura de los Transportes
Centro	Universitat Politècnica de València

1 Resumen de las ideas clave

En este artículo se define el concepto de resistencia al deslizamiento en carreteras, se presentan los indicadores más utilizados para cuantificar esta característica del pavimento y se analiza la relación que existe entre estos parámetros y la siniestralidad.

2 Objetivos

Una vez que el estudiante haya leído con detenimiento este documento, será capaz de:

- Definir el concepto de resistencia al deslizamiento.
- Describir los factores que influyen en la resistencia al deslizamiento.
- Identificar el impacto que la resistencia al deslizamiento posee en la ocurrencia de accidentes.

3 Introducción

El número de muertes en las carreteras del mundo sigue siendo inaceptablemente alto, con 1,35 millones de personas que mueren cada año. Asimismo, los traumatismos causados por los accidentes de tráfico son la principal causa de muerte de niños y adultos jóvenes de entre 5 y 29 años (WHO, 2018). El precio que se paga por la movilidad es demasiado alto, especialmente porque existen medidas probadas que pueden reducir la siniestralidad significativamente.

Entre los diferentes factores que están presentes en la producción de un accidente de tráfico cabe destacar tres: el humano, el vehículo y la infraestructura (Figura 1). El factor humano es el factor más importante cuando la carretera y el vehículo se encuentran en condiciones óptimas. Asimismo, existe una parte importante de los accidentes que son ocasionados por fallos en los vehículos. Por último, la infraestructura también juega un papel esencial en la ocurrencia de accidentes, sobre todo en combinación con el factor humano. En este sentido, un deficiente trazado geométrico de la carretera o una pobre condición del pavimento están relacionados con altas tasas de siniestralidad.

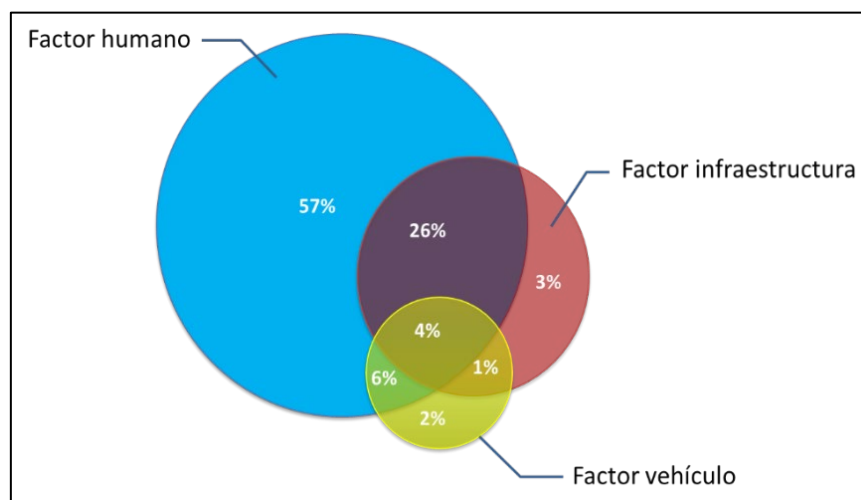


Figura 1. Interacción de los factores concurrentes en la siniestralidad.

A pesar de que la condición del pavimento incluye múltiples variables, esta se relaciona habitualmente con la resistencia al deslizamiento, la regularidad de la superficie o la presencia de daños en el pavimento. En este sentido, ejemplos de malas condiciones del pavimento son la presencia de daños (grietas, baches, desprendimiento, etc.), deformaciones (roderas) o una superficie pulida.

Mantener el pavimento en condiciones aceptables es primordial para asegurar una conducción cómoda y segura. Por ello, muchos estudios han sugerido que el impacto de la condición del pavimento en la seguridad vial debe incorporarse a los sistemas de gestión de firmes con el fin de priorizar las actuaciones de mantenimiento y rehabilitación.

Los métodos más comúnmente utilizados por las administraciones de carreteras para evaluar la condición del pavimento se centran en el análisis de la regularidad superficial, las deformaciones y la resistencia al deslizamiento. Concretamente, en este artículo docente nos centraremos en este último método, que se define a partir de la fricción que existe entre el pavimento y el neumático del vehículo.

El contenido de este artículo se centra en tres secciones principales: (i) definición del concepto de resistencia al deslizamiento; (ii) análisis de la variación de la resistencia al deslizamiento a lo largo del tiempo y estaciones del año; y (iii) influencia de la resistencia al deslizamiento en la siniestralidad global y el tipo de accidente de tráfico.



Antes de conocer con mayor detalle qué es la resistencia al deslizamiento te propongo que realices una pequeña reflexión a través de la respuesta a las siguientes preguntas:

- *¿En qué tipo de elementos geométricos será más importante estudiar la resistencia al deslizamiento?*
- *¿Cómo crees que varía la resistencia al deslizamiento a lo largo de la vida útil de la carretera?*
- *¿Una mayor resistencia al deslizamiento siempre está asociada a una menor tasa de siniestralidad?*

Podrás responder correctamente a estas preguntas tras la revisión de este artículo.

4 Concepto

La resistencia al deslizamiento del pavimento es la fuerza que resiste el movimiento relativo entre el contacto del neumático y la superficie del pavimento. Esta fricción depende en gran medida de la microtextura y macrotextura del pavimento, aunque las propiedades del neumático, la velocidad del vehículo y las condiciones meteorológicas también influyen en el fenómeno (Tabla 1).

Característica del pavimento	Factores relacionados con el vehículo	Propiedades de los neumáticos	Factores climáticos
<ol style="list-style-type: none"> 1. Microtextura 2. Macrotextura 3. Propiedades de los materiales 4. Megatextura o regularidad superficial 5. Temperatura 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Velocidad 2. Ratio de deslizamiento 3. Maniobra de conducción: <ol style="list-style-type: none"> a. Giro b. Adelantamiento 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Diseño y estado de la banda de rodadura 2. Presión de hinchado 3. Composición y dureza 4. Pisada 5. Carga 6. Temperatura 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Temperatura 2. Agua (humedad, lluvia) 3. Nieve y hielo 4. Contaminante (sal, arena, tierra, barro) 5. Viento

Tabla 1. Factores influyentes en la fricción neumático-pavimento. Fuente: Hall et al. 2009.

La fricción entre el pavimento y el neumático se basa en los mecanismos de histéresis y adhesión que se producen en el contacto neumático-pavimento. Los dos mecanismos dependen en gran medida del área de superficie de contacto entre el neumático y el pavimento, que a su vez dependen de varios factores, incluida la textura del pavimento, la contaminación de la superficie (por ejemplo, mojada, seca, polvorienta) y la rigidez del caucho del neumático.

Mientras que la adhesión se asocia con la microtextura del pavimento, la histéresis es consecuencia de la pérdida de energía a causa de la deformación del neumático, por lo que se relaciona con la macrotextura (Figura 2).

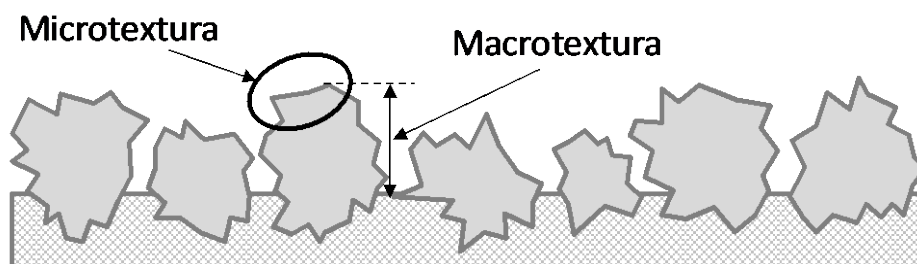


Figura 2. Microtextura y macrotextura.

Por un lado, la microtextura influye en la magnitud de la fricción del neumático, interactúa con él a escala molecular y proporciona adherencia. Principalmente, esta depende de las propiedades del árido grueso: mineralogía, composición de los áridos, estructuras, angulosidad, forma, textura y resistencia al pulimento. La microtextura tiene una influencia mayor en la fricción cuanto más baja es la velocidad de circulación. Asimismo, esta influencia aumenta cuando el pavimento está seco y juega un papel esencial en los procesos de frenado de los vehículos. La microtextura proporciona espacios para que los neumáticos entren en contacto con la superficie del pavimento, lo que produce un fuerte efecto de agarre cuando el vehículo está en movimiento.

Por otro lado, la macrotextura depende de la forma y el tamaño de los áridos en la superficie del pavimento y afecta el gradiente fricción-velocidad. Esta cobra especial importancia en condiciones húmedas. Concretamente, la macrotextura permite reducir las salpicaduras de agua y evitar el fenómeno de aquaplaning. Sin embargo, también es responsable de que se genere más o menos ruido en la interacción neumático-pavimento. Por ello, además de depender de las propiedades de la porción gruesa del árido, también depende de las características de la fracción fina, granulometría, tamaño máximo del árido, contenido de aire y ligante de la mezcla.

Cabe destacar que la resistencia al deslizamiento influye tanto de manera longitudinal como transversal, es decir, estará presente tanto al circular en rectas como curvas. No obstante, el fenómeno cobra especial importancia en curvas, donde están presentes ambas componentes. Mientras que en las rectas la resistencia al deslizamiento influirá principalmente en los procesos de aceleración y deceleración, en las curvas la componente transversal juega un papel esencial para evitar que el vehículo deslice por la superficie del pavimento y se produzca una salida de la vía.



¿Recuerdas la siguiente expresión presente en la Norma de Trazado 3.1 IC española?

$$V^2 = 127 \cdot R \cdot \left(f_t + \frac{p}{100} \right)$$

Esta nos permite determinar la velocidad específica de una curva a partir del radio, el peralte y el coeficiente de rozamiento transversal.

- *¿Cómo afecta el coeficiente de rozamiento a la velocidad?*
- *¿Qué harías para incrementar la velocidad en una curva sin modificar el radio y el peralte de la misma?*

5 Medición de la resistencia al deslizamiento

Existe una amplia gama de dispositivos para determinar la resistencia al deslizamiento de un pavimento. Por lo general, estos dispositivos se agrupan comúnmente de acuerdo a tres principios: fricción longitudinal, fricción transversal y deslizadores o principios de medición estacionarios o de movimiento lento.

Mientras que en EEUU se basan en el rozamiento longitudinal a partir del parámetro *Skid Number*, en España, Reino Unido, Australia y Nueva Zelanda, entre otros países, el indicador principal es el Coeficiente de Rozamiento Transversal (CRT).

El CRT puede ser expresado en tanto por uno o en tanto por ciento, de manera que cuanto mayor es su valor, mayor es la resistencia al deslizamiento. Concretamente, el CRT puede tomar valores entre 1 y 100, pero rara vez se encuentra un valor superior a 70, por lo que habitualmente se establece 35-40 como valor de referencia.

Las administraciones de carreteras habitualmente obtienen el valor del CRT a partir de un equipo de medida de rozamiento transversal (SCRIM) que, al mismo tiempo, determina la profundidad de textura de los pavimentos (*Mean Depth Profile*, MPD) mediante un dispositivo láser. Este equipo consta de un camión equipado con una cisterna de agua, provisto de una rueda lisa de ensayo, colocada en su lado derecho, de forma que la medida se lleva a cabo en la parte de la calzada más solicitada por el tráfico. La rueda está cargada con una masa que se puede deslizar verticalmente (con independencia de los movimientos del camión). Delante de esta rueda, que forma un ángulo de 20° con el eje del camión, se vierte agua, obteniéndose de este modo una película líquida de espesor constante (Figura 3). La velocidad de circulación durante la toma de datos es 50 km/h, obteniendo datos de CRT cada 20 metros.

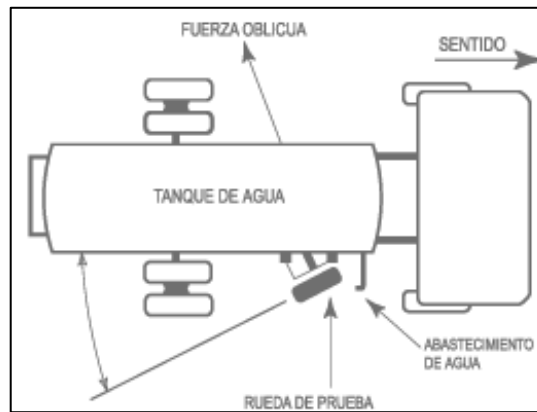


Figura 3. Esquema de equipo SCRIM.



¿Te estás preguntando cómo se lleva a cabo la toma de datos del Coeficiente de Rozamiento Transversal? Haz click sobre la imagen para ver un vídeo sobre este tipo de ensayo.



Por otro lado, el *Skid Number* (SN) es obtenido normalmente a partir del ensayo *Lock Wheel Tester* (Figura 4). Básicamente, este método utiliza una rueda bloqueada que patina a lo largo de la superficie del pavimento para medir la resistencia a la fricción. Para tomar una medición, el vehículo (o remolque) debe alcanzar la velocidad de prueba deseada (40 mph) mientras que se rocía agua por delante del neumático para crear una superficie de pavimento mojada. A continuación, se activa el sistema de frenado para bloquear el neumático de prueba y el dispositivo mide la fuerza de fricción que actúa entre el neumático de prueba y el pavimento, reportando el resultado del *Skid Number* (SN).



Figura 4. Dispositivo de medida para el ensayo Lock Wheel Tester.

6 Evolución de la resistencia al deslizamiento

Debido a la eliminación de la película bituminosa que recubre los áridos, la máxima resistencia al deslizamiento se consigue pocas semanas después de la apertura de la vía al tráfico. Inmediatamente después de este pico, se produce la fase de pulimento dividida en dos etapas. Primero se produce una rápida pérdida de resistencia al deslizamiento debido a una alta tasa de pulimento del árido y, más tarde, esta tasa se reduce hasta que el pavimento alcanza un punto de equilibrio (Figura 5). Cabe destacar que este comportamiento es muy diferente al de otros indicadores relacionados con las características del pavimento, que empeoran a medida que este envejece (p. ej., Índice de Regularidad Superficial (IRI) o el Índice de Condición del Pavimento (PCI)).

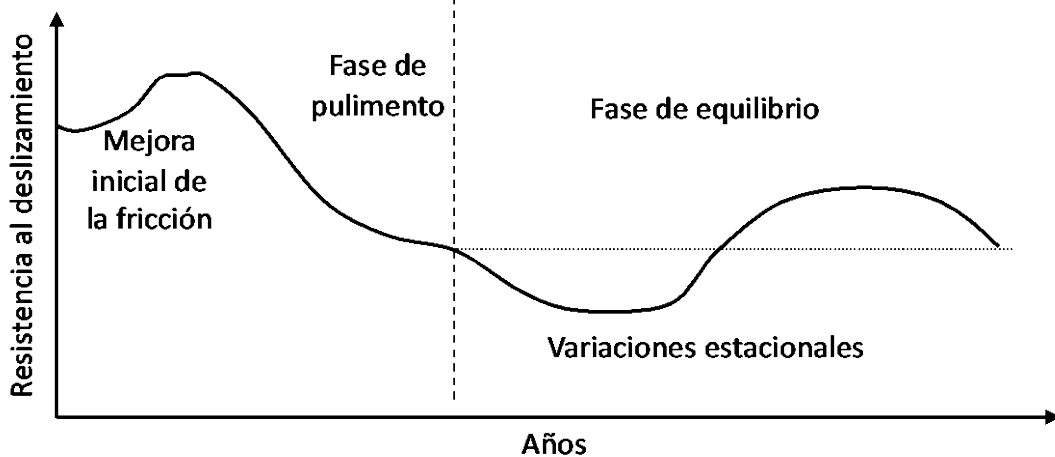


Figura 5. Evolución de la resistencia al deslizamiento con el tiempo.

No obstante, la resistencia al deslizamiento sí sufre variaciones estacionales importantes. Esta variación se ha documentado durante décadas, observando valores más altos en superficies de carreteras mojadas en invierno que en superficies secas en verano (Figura 6). Por tanto, es habitual tomar datos de CRT en verano, cuando se esperan los valores más bajos, lo cual es fundamental para evaluar la seguridad vial. Durante esta época la precipitación es mínima y el efecto de pulido del árido predomina sobre el de regeneración de la textura que se produce cuando llueve.

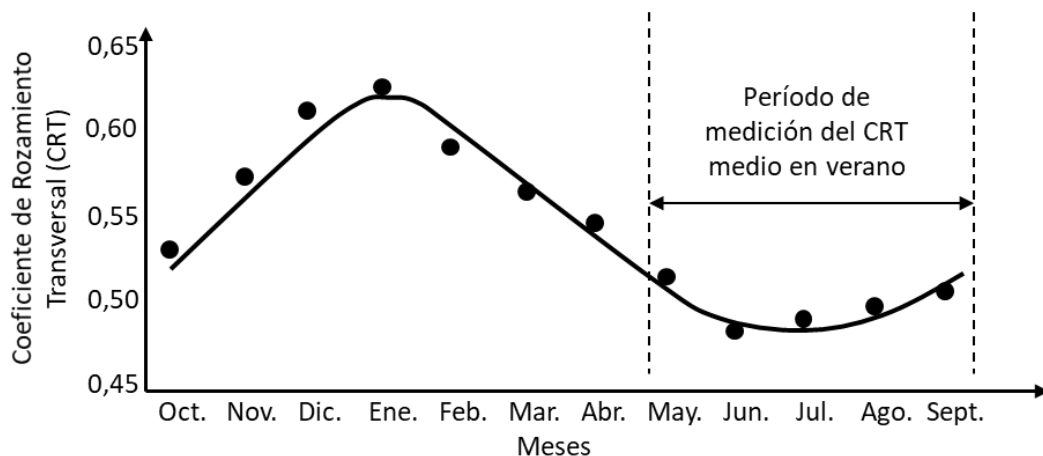


Figura 6. Evolución estacional de la resistencia al deslizamiento.

En este sentido, la Agencia Británica de Carreteras propuso el empleo del coeficiente de rozamiento transversal medio de los meses de verano (*MSSC*), que se obtiene como la media de tres valores registrados durante ese período.

Concretamente en España, Pérez-Acebo et al. (2019) propusieron estimar este parámetro a partir de la siguiente expresión:

$$MSSC = 30,19 - 0,82 \cdot \sqrt{IMD_p} + 0,76 \cdot CPA$$

donde IMD_p es el volumen de vehículos pesados (veh/día/carril) y CPA es el Coeficiente de Pulimento Acelerado, expresado en una escala de 0 a 100. El parámetro *MSSC* puede tomar valores entre 0 y 100.



Observa el modelo propuesto por Pérez-Acebo et al. (2019) e intenta responder a las siguientes preguntas:

- *¿Cómo afecta la edad del pavimento a la resistencia al deslizamiento?*
- *¿Qué ocurre si aumenta considerablemente el tráfico pesado?*

Como se puede observar, esta expresión no considera la edad del pavimento, pues los mismos autores identificaron que tras dos años de puesta en servicio, la edad no influye en el fenómeno. Asimismo, el espesor de la capa de firme y el tipo de sección de firme (flexible, semiflexible, semirígido o rígido) tampoco resultaron ser significativos.

A pesar de que esta expresión no incluye el impacto del tipo de capa de rodadura (porosa, discontinua, densa, semidensa o lechada bituminosa), en una investigación posterior los mismos autores identificaron que este factor sí influye en la resistencia al deslizamiento (Pérez-Acebo et al., 2020).

7 Impacto en la seguridad vial

Diversas investigaciones han concluido que tanto en condiciones secas como húmedas la frecuencia de accidentes disminuye a medida que aumenta la resistencia al deslizamiento. Asimismo, otros estudios han destacado que la severidad o gravedad de los accidentes disminuye a medida que la resistencia al deslizamiento incrementa.

Concretamente, la variable que ha sido relacionada con la frecuencia de accidentes o la tasa de siniestralidad es el *Skid Number* (SN). Este indicador cuantifica la resistencia al deslizamiento longitudinal y puede variar entre 1 (mínima resistencia) y 100 (máxima resistencia). A medida que aumenta el valor de este parámetro, se ha observado que la frecuencia de accidentes es menor.

En este contexto, Geedipally et al. (2019) calibraron diferentes *Crash Modification Factors* con el fin de estimar los beneficios de incrementar el valor del coeficiente de rozamiento longitudinal. Para ello, evaluaron la reducción de la siniestralidad después de aplicar ciertos tratamientos superficiales para la mejorar el SN en distintos tipos de carretera. La Figura 7 muestra los CMF para los distintos tipos de accidentes considerados en carreteras convencionales. De esta forma, se observa cómo en climas húmedos la reducción de la siniestralidad es mucho más notable.

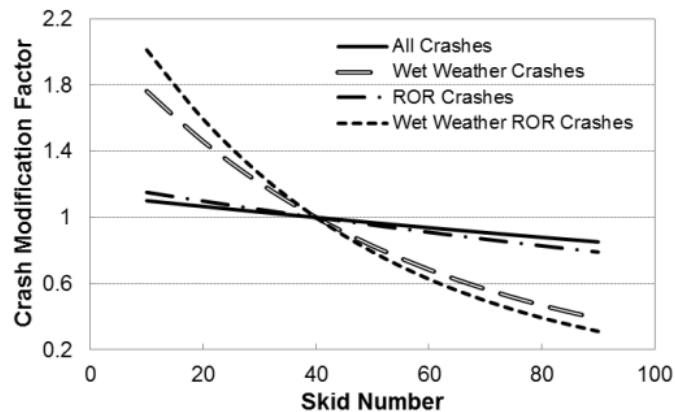


Figura 7. Crash Modification Factors en funci3n del valor de SN.

Específicamente, las curvas de la Figura 6 responden a la siguiente forma funcional:

$$CMF = e^{\beta \cdot (SN - 40)}$$

donde el coeficiente β depende del tipo de accidente (Tabla 2) y SN es el Skid Number en tanto por ciento.

	Todos los accidentes	Accidentes bajo clima húmedo	Salida de vía	Salida de vía en clima húmedo
β	-0,0032	-0,0189	-0,0047	-0,0233

Tabla 2. Valores de β según tipo de accidente.



Con el fin de comprender mejor cómo influye la resistencia al deslizamiento en la siniestralidad, te invito a que visites el sitio web que sirve de repositorio de Crash Modification Factors (<http://www.cmfclearinghouse.org/index.cfm>) y realices alguna búsqueda al respecto. Por ejemplo, puedes comenzar la búsqueda introduciendo las siguientes palabras clave "skid resistance".

- ¿Qué tipo de accidentes se ven reducidos al incrementar el valor de la resistencia al deslizamiento?
- ¿Cuánto se reducen?

Recuerda que la velocidad que se desarrolla en una curva está relacionada con el radio, el peralte y el coeficiente de rozamiento transversal. En caso de que los accidentes se concentrasen en una determinada curva, se podría variar uno o varios de estos parámetros para asegurar una mayor comodidad y seguridad a los usuarios de la vía. Sin embargo, modificar el radio o el peralte de una curva supone un alto coste para incrementar la seguridad vial de un determinado elemento viario si lo comparamos con el simple hecho de modificar la superficie del pavimento mediante la aplicación de tratamientos superficiales de alta fricción con el fin de incrementar la resistencia al deslizamiento. Por tanto, el empleo de tratamiento superficiales nos permite incrementar la seguridad vial a bajo costo y con un menor impacto en el entorno.

8 Conclusión

En este documento hemos estudiado el concepto de resistencia al deslizamiento junto a los factores que influyen en las características de la microtextura y macrotextura del pavimento. Asimismo, se han definido el Coeficiente de Rozamiento Transversal (CRT) y el *Skid Number* (SN), que son los indicadores más extendidos para cuantificar la resistencia al deslizamiento de un tramo de carretera. Finalmente, se ha analizado la evolución de la resistencia al deslizamiento a lo largo del tiempo y la relación que existe entre SN y la siniestralidad. Una mejora de la resistencia al deslizamiento de la vía está asociada con una reducción de la siniestralidad, siendo mucho más efectiva en climas húmedos.

9 Bibliografía

- Geedipally, S. R., Pratt, M. P., & Lord, D. (2019). Effects of geometry and pavement friction on horizontal curve crash frequency. *Journal of Transportation Safety & Security*, 11(2), 167-188.
- 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, 1*, 43.
- Pérez-Acebo, H., Gonzalo-Orden, H., & Rojí, E. (2019). Skid resistance prediction for new two-lane roads. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*, Vol. 172, No. 5, pp. 264-273.
- 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.
- WHO (2018). Global status report on road safety 2018: summary. Geneva: World Health Organization; 2018 (WHO/NMH/NVI/18.20). Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.