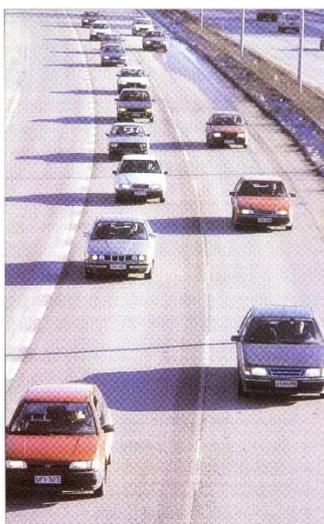


Influencia de las características superficiales de los firmes en la seguridad vial

POR EL COMITÉ TÉCNICO DE SEGURIDAD VIAL DE LA ATC REDACTADO POR:

JESÚS LEAL (CENTRO DE ESTUDIOS DE CARRETERAS CEDEX); JOSÉ DOMINGO PLAZA (DIPUTACIÓN FORAL DE VIZCAYA); IGNACIO PÉREZ (UNIVERSIDADE DA CORUÑA); ENRIQUE CASQUERO (GENERALITAT VALENCIANA).

PRÓLOGO POR ROBERTO LLAMAS RUBIO, PRESIDENTE DEL COMITÉ TÉCNICO DE SEGURIDAD VIAL DE ATC.



Prólogo

Dentro del Comité de Seguridad Vial de la Asociación Técnica de Carreteras, se creó un grupo de trabajo con el propósito de analizar la influencia o efectos de las características superficiales de los pavimentos en la seguridad vial.

La primera labor del grupo consistió en recabar y analizar el estado actual de conocimientos sobre el tema objeto de estudio, encontrándose numerosas investigaciones publicadas sobre las características superficiales de los firmes y su influencia en la rodadura de los vehículos (por ejemplo, la resistencia al deslizamiento), y sobre su caracterización y medición. Por el contrario, se comprobó que no existen muchos estudios o trabajos que relacionen los índices de peligrosidad o accidentes ocurridos en carreteras en servicio con los parámetros representativos del estado del firme y de las características superficiales de sus pavimentos.

Así mismo, se recopilaron y analizaron también los estudios referentes a ciertas características superficiales de los pavimentos que no son muy conocidas, o cuya influencia en la seguridad vial no se tiene en cuenta adecuadamente, como son las propiedades ópticas de los pavimentos o las características petrográficas de los áridos de las capas de rodadura. Partiendo de los conocimientos básicos existentes sobre todos estos estudios e investigaciones experimentales, se procedió a analizar la relación entre las características de los pavimentos con los accidentes, elaborándose monográficos sobre:

1. Relación entre textura y siniestralidad.
2. Relación entre la resistencia al deslizamiento y los accidentes.
3. Influencia de la regularidad superficial en la comodidad y seguridad de circulación.
4. Posibles medidas correctoras de los firmes existentes y elección del tipo de pavimento en zonas peligrosas.

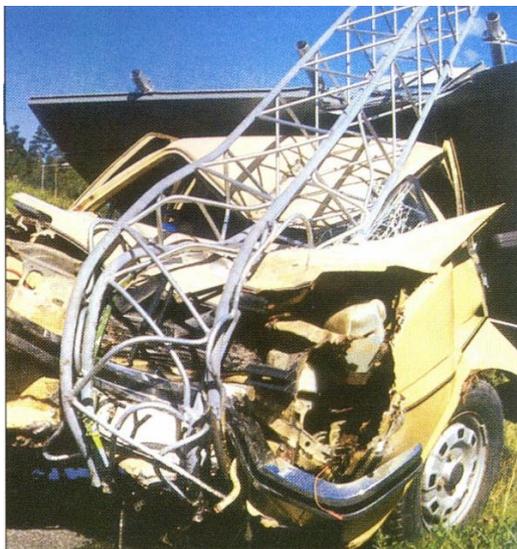
5. Influencia de las características ópticas de los pavimentos en la visibilidad de los obstáculos, el contraste de las marcas viales y el rendimiento de la iluminación.

En estos informes se recoge el estado actual del conocimiento sobre estos temas y se extraen una serie de recomendaciones que hay que tener en cuenta.

Como resultado final de la labor llevada a cabo por el grupo de trabajo, se muestra en el presente artículo un extracto resumido del contenido de los mencionados informes monográficos. Así, pues, en este artículo, tras una primera explicación de los mecanismos de adherencia entre el neumático y el pavimento y de las diversas magnitudes de influencia, se exponen los resultados de los principales estudios de siniestralidad relacionados con las características superficiales (deslizamiento, macrotextura, rozamiento y regularidad superficial) llevados a cabo en diferentes países, con objeto de esclarecer la influencia de estas características y las posibles medidas que se deben tomar, para finalmente plantear las principales conclusiones.

Cabe señalar que, en general, no puede afirmarse que unas características superficiales deficientes sean por sí mismas la causa directa de accidentes, sino que más bien suelen contribuir a empeorar las consecuencias en aquellas situaciones donde se ha producido un conflicto; por ejemplo, un frenazo repentino o un cambio brusco de la dirección del vehículo.

Por ello, las Administraciones de Carreteras tratan de proporcionar unas características superficiales adecuadas a los firmes de sus respectivas redes, con el fin de mejorar la seguridad y la comodidad de la circulación. No obstante, hay que tener presente que solamente podrá aumentar la seguridad vial al mejorar las características superficiales del pavimento cuando realmente sean las malas condiciones del firme las determinantes de la aparición de los accidentes; pues, en caso contrario, estas mejoras del firme conllevarán aumentos de la velocidad de circulación de los vehículos y, consiguientemente, un mayor riesgo de accidentes y de su gravedad.



En general, no puede afirmarse que unas características superficiales deficientes sean por sí mismas la causa directa de accidentes, sino que más bien suelen contribuir a empeorar las consecuencias en aquellas situaciones donde se ha producido un conflicto.

Es necesario reseñar que resulta recomendable y gratificante la lectura del presente artículo, pues refresca y amplía conocimientos, a la vez que documenta estudios experimentales que corroboraran algunas de las conclusiones o recomendaciones que deben tenerse en cuenta en los pavimentos desde el punto de vista de la seguridad de la circulación. Ya para finalizar, quisiera dejar constancia de mi agradecimiento a todos los miembros del Comité que, de alguna manera, han intervenido en la realización de este trabajo, por su esfuerzo y dedicación.

Roberto Llamas Rubio. Presidente del Comité Técnico de Seguridad Vial de la Asociación Técnica de Carreteras (ATC).

Resumen

En este artículo, primeramente, se expone el estado actual de conocimientos sobre la relación de las características superficiales de los pavimentos y las condiciones de rodadura de los vehículos, basados principalmente en estudios experimentales, para después pasar revista a diferentes estudios llevados a cabo en carreteras en servicio, dirigidos a tratar de verificar la influencia real de las diferentes características superficiales (macrotextura, microtextura, CRT, regularidad longitudinal y transversal) en los accidentes de circulación.

Palabras clave

Características superficiales, textura, resistencia al deslizamiento, regularidad longitudinal, regularidad transversal, hidroplaneo, índices de accidentes, seguridad vial.

1. Introducción

Las características superficiales de los pavimentos vienen siendo objeto preferente de estudio desde hace varias décadas, debido a su influencia directa sobre las condiciones de rodadura y maniobrabilidad de los vehículos cuando circulan sobre la carretera. De tal manera, se han llevado a cabo diversos experimentos de ámbito internacional, algunos bajo los auspicios de la AIPCR, para determinar las posibles relaciones entre estas características y las condiciones de rodadura de los vehículos. Por otro lado, las legislaciones de los diferentes países imponen consecuentemente unos niveles mínimos que deben cumplir las características superficiales de los pavimentos, ya sean de nueva construcción o en servicio, de sus redes de carreteras. Así, a modo de ejemplo, en las tablas 1 y 2 se muestran las especificaciones para la macrotextura, el coeficiente de resistencia al deslizamiento y la regularidad superficial que deben cumplir las capas de rodadura de los firmes, ya sean nuevos o rehabilitados, tal como viene indicado en la O. C. 5/2001 del Ministerio de Fomento, en la que se modificaron los artículos 540, 542, 543 y 550 del PG-3.

Sin embargo, surge la pregunta de si existen datos de siniestralidad en carreteras en servicio que corroboren la influencia efectiva de las características superficiales en la seguridad vial. En este artículo, tras una primera explicación de los mecanismos de adherencia entre el neumático y el pavimento y de las diversas magnitudes de influencia, se van a tratar de exponer los principales estudios de siniestralidad en relación con las características superficiales llevados a cabo en diferentes países, con objeto de esclarecer la influencia de estas características y las posibles medidas que se deben tomar.

Bajo el término características superficiales de los pavimentos, se hace referencia a una serie de cualidades y propiedades de las partes externas de los firmes viarios de muy distinta naturaleza, que se pueden clasificar en las relacionadas con la adherencia entre neumático y pavimento, la regularidad superficial, las propiedades sonoras y las características ópticas de los firmes.

En este artículo se hará referencia a las características relacionadas con el primero de los grupos citados, es decir, las que tienen que ver con la adherencia entre el neumático y el pavimento, por ser las que tienen una influencia más clara sobre la seguridad vial, que ha sido estudiada con más detenimiento desde hace varias décadas; y se dejará para otra ocasión la exposición de las otras propiedades citadas, como las sonoras y ópticas de los pavimentos, cuya influencia sobre la seguridad vial es menos directa, dependiendo además de otros factores.

TIPO DE PAVIMENTO		MACROTEXTURA SUPERFICIAL (mm)	RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO (CRT mínimo en %)
Mezcla bituminosa en caliente	PA 12	≥1,5	60
	Resto	≥0,7	65
Mezcla bituminosa discontinua en caliente	M	≥1,5	60
	F	≥1,1	65
TS mediante riegos con gravillas	Bicapa y Monocapa	-	65
Lechadas bituminosas	LB1	≥1,1	65
	LB2	≥0,9	65
	LB3	≥0,7	60
	LB4	≥0,5	55
Hormigón vibrado		0,6 a 0,9	-

Tabla1 Especificaciones de la macrotextura y resistencia al deslizamiento para capas de rodadura (O.C. 5/2001).

TIPO DE PAVIMENTO	% DE hm	FIRMES DE NUEVA CONSTRUCCIÓN		FIRMES REHABILITADOS ESTRUCTURALMENTE			
		AUTOPISTAS Y AUTOVÍAS	RESTO DE VÍAS	AUTOPISTAS Y AUTOVÍAS		RESTO DE VÍAS	
				ESPESOR DE RECRECIMIENTO (cm)			
				>10	≤10	>10	≤10
MB en caliente y MB discontinuas en caliente	50	<1,5	<1,5	≤1,5	≤1,5	≤1,5	≤2,0
	80	<1,8	<2,0	≤1,8	≤2,0	≤2,0	≤2,5
	100	<2,0	<2,5	≤2,0	≤2,5	≤2,5	≤3,0
Hormigón vibrado	50	<1,5	<1,5	≤1,5		≤1,5	
	80	<1,8	<2,0	≤1,8		≤2,0	
	100	<2,0	<2,5	≤2,0		≤2,5	

Tabla2 Especificaciones de regularidad para capas de rodadura (IRI en dm/hm) (O.C. 5/2001).

2. Adherencia entre neumático y pavimento

Pasando a hablar sobre las características que tienen que ver con la adherencia entre el neumático y el pavimento, éstas incluyen las diversas irregularidades de la superficie del firme, que se suelen clasificar atendiendo a su longitud de onda (véase la figura 1), desde la microtextura (del orden de micras), la macrotextura (desde décimas de milímetro hasta unos pocos centímetros) y la megatextura (hasta 50 cm) hasta las diversas ondas (cortas, medias y largas) de la regularidad superficial (de 50 cm hasta unos 50 m). Por último, también se debe considerar la irregularidad en sentido transversal del pavimento, constituida fundamentalmente por la presencia de roderas.

Una de las misiones más importantes del firme de una carretera es proporcionar a los usuarios una superficie de rodadura cómoda y segura. Para lograr esto último, se debe conseguir que exista una adherencia suficiente entre el neumático y el pavimento, con una doble finalidad:

1. que la distancia de parada sea la menor posible al frenar el vehículo.

- que el vehículo pueda conservar en todo momento la trayectoria deseada por el conductor.

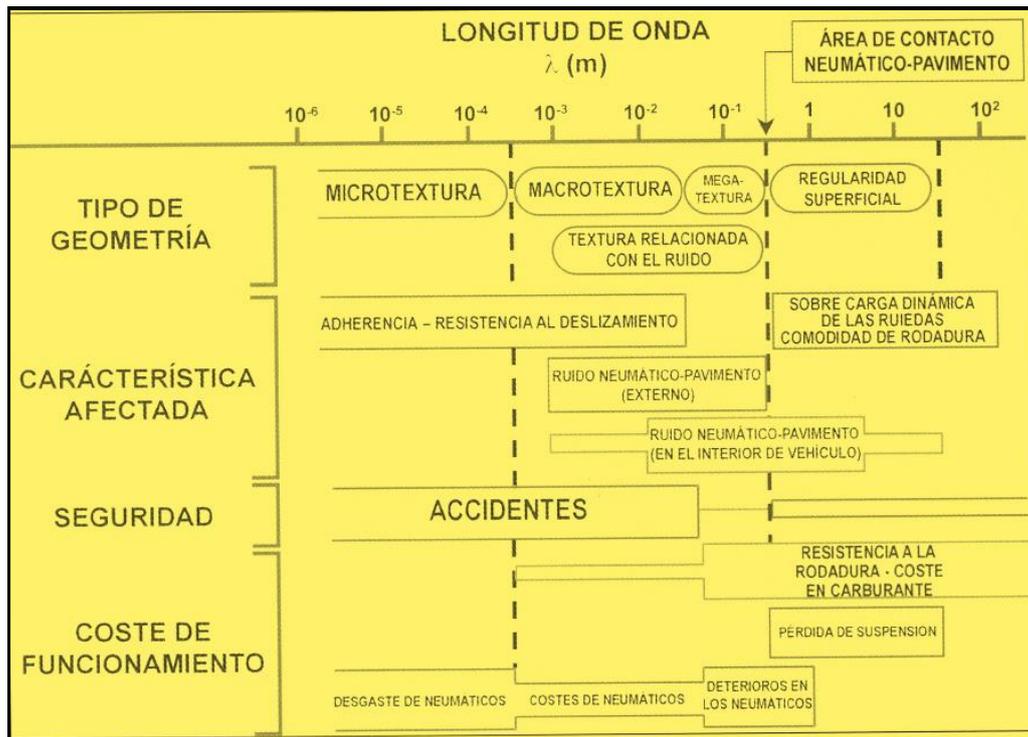


Figura 1. Irregularidades de las superficies de los firmes (AIPCR, Marrakech 1991)

Para conseguir el primero de los objetivos, deberá existir una buena adherencia longitudinal del pavimento, que viene caracterizada por el coeficiente de rozamiento longitudinal; mientras que para evitar que el vehículo se salga de la trayectoria deseada, especialmente en las curvas y otras maniobras, deberá existir una adherencia transversal, caracterizada por el coeficiente de rozamiento transversal.

Para tratar de conocer cómo responde el pavimento al grado de adherencia que se le solicita, se han realizado diversos estudios y experimentos en el ámbito internacional, muchos de ellos bajo la supervisión del Comité Técnico de Características Superficiales de la AIPCR, cuyos resultados definen el estado actual del conocimiento en esta materia y que en sus aspectos más importantes se describen a continuación.

Como se ha comentado, las distintas irregularidades del firme pueden ser agrupadas según su longitud de onda en microtextura, macrotextura, megatextura y las ondas cortas, medias y largas de la regularidad superficial. Pues bien, según se ha comprobado, para asegurar una adherencia entre neumático y pavimento se necesita siempre una cierta microtextura, que viene definida principalmente por la aspereza de los áridos de la superficie del firme.

Tal y como se observa en la figura 2, cuando los vehículos circulan a bajas velocidades, la existencia de una película de agua sobre el pavimento no tiene gran influencia sobre la adherencia del neumático al firme. Sin embargo, a velocidades altas y con pavimento mojado debe existir una macrotextura suficientemente gruesa, para que se pueda evacuar rápidamente el agua. La presencia de unas irregularidades del tamaño que proporciona la macrotextura juega el mismo papel que el dibujo del neumático: eliminar el agua al instante, aumentando la capacidad de evacuación de agua, y proporcionar una zona de contacto seco entre el neumático y el pavimento, de manera que las asperezas de la microtextura que proporciona el árido puedan contribuir a la resistencia al deslizamiento. Por tanto, estas dos

primeras irregularidades (microtextura y macrotextura) son deseables y buscadas por los ingenieros, por contribuir a la resistencia al deslizamiento y a la prevención de accidentes. En cuanto a las longitudes de onda mayores, se sabe que la megatextura contribuye sobre todo al ruido de la rodadura, y que los defectos de la regularidad superficial afectan a la comodidad de los usuarios y, en ciertos casos, a la seguridad de la circulación. Por ello, se puede concluir que estas longitudes de onda mayores no son deseables y deben evitarse en lo posible.

Además, es necesario que exista una buena regularidad superficial transversal (ausencia de roderas longitudinales, principalmente), con objeto de favorecer el drenaje transversal del agua de lluvia, para que no se formen charcos que puedan producir el hidroplaneo de los vehículos.

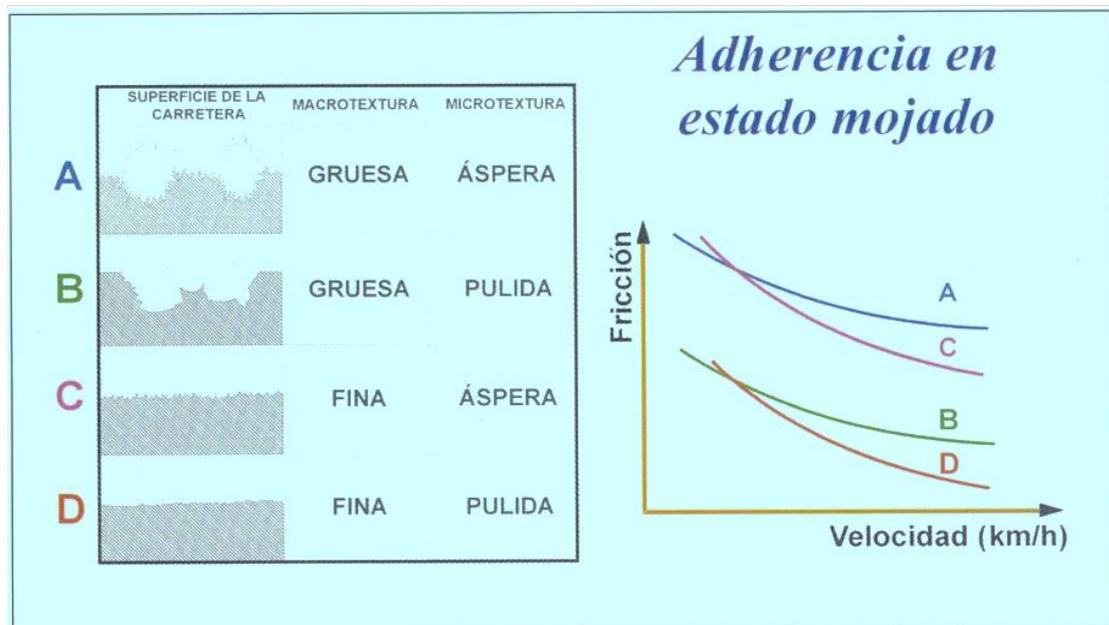


Figura 2. Influencia de la macrotextura y la microtextura en la adherencia del pavimento a distintas velocidades (AIPCR, Praga 1971)

3. Magnitudes de influencia en la adherencia neumático-pavimento

Para caracterizar la resistencia al deslizamiento de un firme existen distintas magnitudes de significado parecido, aunque no coincidente, que se explican a continuación.

La resistencia al deslizamiento es una fuerza horizontal que se opone al deslizamiento de las ruedas de los vehículos; y, matemáticamente, su valor es el producto entre el coeficiente de rozamiento y la fuerza normal que ejerce el vehículo sobre el pavimento (que no es constante, como a primera vista pudiera creerse, sino que depende de la regularidad superficial).

El coeficiente de rozamiento es una medida del rozamiento movilizado entre los neumáticos del vehículo y la superficie del firme, pudiéndose distinguir entre el coeficiente de rozamiento longitudinal y el transversal.

El coeficiente de rozamiento longitudinal es el movilizado en la dirección del movimiento del vehículo; y, como se ha comentado, es importante sobre todo en las maniobras de frenado. Su determinación puede hacerse mediante el ensayo realizado con el

péndulo del TRRL británico (norma NLT-175). Como la velocidad de deslizamiento al realizar las mediciones con este aparato es pequeña (unos 10 km/h), el resultado viene influido principalmente por la microtextura del pavimento, por lo que constituye una manera indirecta de caracterizarla. Este equipo tiene el inconveniente de que es estacionario, por lo que la obtención de datos resulta lenta. Por ello, si se quiere obtener un mayor rendimiento, se deben utilizar equipos acoplados a un vehículo o remolcados, en los cuales se registra la fuerza desarrollada sobre una rueda especial de ensayo montada en el vehículo, bajo una carga vertical constante y superficie mojada. La relación existente entre estas dos fuerzas da el coeficiente de resistencia al deslizamiento.

Cuando la rueda de medida es oblicua al sentido de la marcha, los equipos miden el coeficiente de rozamiento transversal (CRT) de un modo continuo, como ocurre con el llamado SCRIM (Sideway- force Coefficient Routine Investigation Machine), utilizado para la auscultación anual de la Red de Carreteras del Estado, en que el ángulo de deriva de la rueda de ensayo es de 20°. El valor del coeficiente de rozamiento transversal así obtenido varía de acuerdo con la velocidad del vehículo, por lo que los valores vienen corregidos para una velocidad de desplazamiento estándar de 50 km/h. En consecuencia, la velocidad del deslizamiento se obtiene multiplicando la velocidad de circulación del equipo por el seno del ángulo de deriva, resultando una velocidad de deslizamiento $S = V \text{ sen } \alpha = 50 \text{ sen } 20^\circ = 17,1 \text{ km/h}$, que es relativamente baja, por lo que está influenciada principalmente por la microtextura del pavimento.



De acuerdo con estudios llevados a cabo en Gran Bretaña sobre los accidentes por deslizamiento con el pavimento mojado, se puede decir que su índice de acaecimiento es dos o tres veces superior al de los accidentes con tiempo seco

En Estados Unidos se utiliza un equipo de rueda bloqueada para medir el deslizamiento a alta velocidad, aplicando los frenos para bloquear la rueda de ensayo, midiéndose el momento de torsión desarrollado. Este momento se convierte en el llamado Skid Number (SN), que se puede particularizar para la velocidad a la que se realiza el ensayo. Normalmente se utiliza el SN_{40} , o sea el Skid Number obtenido a una velocidad de ensayo de 40 millas/h (unos 64 km/h).

En cuanto a la macrotextura, su medición se realiza según el método volumétrico, más conocido por el método de círculo de arena, que viene especificado en la norma NLT-335; aunque, normalmente, para la auscultación de una red de carreteras se utilizan unos aparatos de gran rendimiento llamados texturómetros, que, en general, utilizan técnicas láser. Los texturómetros miden el perfil a la escala de la macrotextura y suelen expresar su medida bien como el promedio de la profundidad de textura, medida en mm, obtenida para una cierta longitud de la carretera, obteniendo la magnitud conocida como MTD (Mean Texture Depth), bien como la raíz cuadrática media (RMS - Root Mean Square) de la profundidad de textura. Con el equipo inglés HSTM (High-Speed Texture Meter), del cual se hablará en apartados posteriores, se obtiene este último valor, dando lugar a la medida conocida por sus siglas en inglés SMTD (Sensor Measured Texture Depth), que corresponde aproximadamente a los 2/3 del valor de la textura en mm obtenida mediante el ensayo del círculo de arena.

En líneas generales, diversas investigaciones han demostrado que la resistencia al deslizamiento a bajas velocidades medida con el equipo SCRIM es independiente de la macrotextura del pavimento representada con el SMTD (TRRL, 1991).

Por ello, para aunar las medidas de adherencia entre rueda y neumático para las diferentes texturas (microtextura y macrotextura), tipos de contacto existentes y velocidades de deslizamiento, se creó el concepto del Índice de Fricción Internacional (IFI) que tienen en cuenta todas las variables mencionadas. El modelo que se utiliza actualmente para determinar la fricción de un pavimento es el obtenido en el "Experimento Internacional AIPCR de Comparación y Armonización de las Medidas de Textura y Resistencia al Deslizamiento"¹, en el que se obtuvo que, para la mayoría de los pavimentos, la curva que relaciona la fricción con la velocidad de deslizamiento tiene una forma exponencial del tipo:

$$F(S) = F60 \cdot \exp((60-S)/S_p)$$

donde:

S: velocidad de deslizamiento (km/h)

F(S): fricción a la velocidad de deslizamiento S

F60: fricción para S = 60 km/h

S_p: A + B T_x, siendo T_x la medida de la macrotextura, y A y B las constantes de calibración del equipo de medida.

A una velocidad S de deslizamiento baja, la fricción es tanto más elevada cuanto mayor es la microtextura. Por otra parte, S_p es una constante del pavimento, que es tanto más grande cuanto más gruesa es su macrotextura, lo que tiene como efecto el disminuir la pendiente de la curva de variación de la fricción con la velocidad.

4. Resultados de los estudios de accidentes y características superficiales

4.1. Accidentes por deslizamiento

Se admite generalmente que el tipo de accidentes que viene influenciado por la existencia de unas características superficiales deficientes en el pavimento es el de los accidentes en los que existe deslizamiento. Ello no quiere decir que sean estas condiciones por sí mismas las desencadenantes de un accidente por deslizamiento; sino que, más bien, suelen empeorar aquellas situaciones donde se ha producido un conflicto como, por ejemplo, un frenazo repentino o un cambio brusco de la dirección del vehículo. Estas situaciones suelen ocurrir con

¹ Comité Técnico AIPCR de Características Superficiales C.1., "Experimento Internacional AIPCR de Comparación y Armonización de las Medidas de Textura y Resistencia al Deslizamiento", AIPCR, 1995.

climatología lluviosa, principalmente, en los accesos de las intersecciones y en otros emplazamientos de una carretera, donde hay que realizar maniobras de frenado y de giro.

De acuerdo con estudios llevados a cabo en Gran Bretaña sobre los accidentes por deslizamiento con el pavimento mojado, se puede decir lo siguiente (Ogden, 1996):

- Su índice de acaecimiento es dos o tres veces superior al de los accidentes con tiempo seco.
- Representan alrededor de un 20-30 % del total de accidentes.
- La mejora de la resistencia al deslizamiento de un pavimento puede ser provechosa en un 70% de los casos en que se realiza.

Cabe decir que, de acuerdo con estadísticas registradas en la Gran Bretaña, el 15% de los vehículos implicados en accidentes con víctimas deslizan antes de producirse la colisión. Además, en estos accidentes se producen un 41 % de las víctimas mortales y un 30% de los heridos graves, lo cual da una idea de su importancia. Los tipos principales de accidentes en los que se produce el deslizamiento de los vehículos son los siguientes (Ogden, 1996):

- Colisión por alcance trasero.
- Colisión lateral de vehículos en marcha.
- Choque frontal de vehículos en marcha.
- Salida de la calzada.
- Atropello.

Por último, hay que decir que se han realizado una gran cantidad de estudios sobre los accidentes por deslizamiento con el fin de demostrar que existe una clara correlación entre el índice de accidentes en condiciones de lluvia y el coeficiente de rozamiento del pavimento, de tal forma que aquél decrece al aumentar dicho coeficiente (Gallaway et al, 1982). En este sentido, la mayor dificultad a la hora de poder establecer, entre estas dos variables, una relación que sea significativa consiste en que los accidentes, además de estar influenciados por la fricción del pavimento, también lo están por un gran número de factores, como por ejemplo: el trazado, el comportamiento de los conductores, el estado de los vehículos, etc. Sin embargo, no existe mucha información sobre la correlación entre la macrotextura y los accidentes en condiciones de lluvia. Quizás esto sea así porque, tradicionalmente, se ha medido con más asiduidad el coeficiente de rozamiento (la microtextura) que la macrotextura, lo que ha dificultado analizar la correlación de esta última con los accidentes. A continuación, se explican los estudios más importantes sobre ambas relaciones. Muchos de ellos son del tipo conocido como "comparación con lo normal", cuya metodología consiste en identificar emplazamientos donde han ocurrido accidentes por deslizamiento, y comparar la resistencia al deslizamiento (o en otros estudios, la macrotextura) en estos lugares con la resistencia al deslizamiento en un cierto número de emplazamientos de control seleccionados aleatoriamente, los cuales se considera que son representativos de la distribución de la resistencia al deslizamiento en la totalidad de la red viaria sometida al estudio. Si la resistencia al deslizamiento es un factor relevante en la ocurrencia de accidentes por deslizamiento, entonces sería de esperar que los valores de la resistencia al deslizamiento (o la macrotextura) fueran más bajos en los emplazamientos en que han tenido lugar accidentes que en los de control, lo que indicaría que en los lugares de la red con menor resistencia al deslizamiento (o macrotextura) existe una mayor probabilidad de que haya accidentes por deslizamiento.

4.2. Relación entre los accidentes y la macrotextura

El estudio más significativo sobre este tema es el realizado en 1991 por Roe, Webster y West, del Transport and Road Research Laboratory (TRRL) del Reino Unido, en el que, de entre todos los factores que potencialmente tienen influencia en la relación entre los accidentes de

circulación vial y el estado de la superficie del pavimento, se trató de relacionar la macrotextura, expresada mediante el SMTD, con los accidentes de circulación. Para ello, se estudiaron tres redes distintas de carreteras pertenecientes a tres condados diferentes, que denominaron A, B, Y C, con unas longitudes respectivas de 680, 430 Y 825 km, incluyendo en cada una de ellas unas proporciones de tramos de autopista que variaban entre el 5 y el 20% de su longitud, carreteras de la red primaria entre un 60% y un 80% y carreteras secundarias entre el 15% y el 20% de la longitud total, siendo los pavimentos asfálticos en su casi totalidad. En estas redes, se decidió obtener el porcentaje de accidentes producidos en las cuatro condiciones del pavimento que se citan a continuación dentro de los distintos rangos de los niveles de textura:

- Pavimento seco no deslizante.
- Pavimento seco deslizante.
- Pavimento húmedo no deslizante.
- Pavimento húmedo deslizante.

La metodología del estudio consistió, primeramente, en medir la macrotextura mediante el equipo inglés conocido como HSTM, que proporciona la magnitud SMTD, explicada en el apartado 3, por cada 10 m de longitud de la carretera, y el CRT, medido con SCRIM, de las carreteras de cada una de las redes, originando como resultado las distribuciones de los niveles de textura y CRT en el conjunto de kilómetros de cada una de las tres redes de carreteras.

Se pudo observar que los valores del CRT (medidos durante el verano, MSSC: Mean Summer Skid Coefficient) tomaban siempre valores medios, debido a la selección del tipo de árido para la capa de rodadura. Sin embargo, no ocurría así en cuanto al SMTD (macrotextura), lo que se explica si se tienen en cuenta las diferentes características de los materiales empleados en las diferentes capas de rodadura. Por otro lado, se observó que para cada valor de CRT se daban todos los valores posibles de macrotextura, lo que permitió llegar a una importante conclusión: El CRT (tal como se mide con el SCRIM) y la macrotextura son variables independientes (con la excepción de valores muy bajos de CRT, a los que sólo corresponden macrotexturas muy bajas).

Dada la homogeneidad de valores de CRT en las redes analizadas, se hacía difícil establecer relación entre este parámetro y la siniestralidad. Por ello, en el estudio se tomó como hipótesis que el factor preponderante en los accidentes era la macrotextura.

En segundo lugar, se realizó una asignación de los valores de micro y macrotextura a cada uno de los accidentes analizados. Para asociar a cada accidente los valores de CRT y textura, se tomó un tramo de 300 m, centrado en el punto del accidente, y dentro de este tramo se escogía el subtramo de 100 m que tuviera la textura media más baja. Para descartar que este método introdujese un sesgo significativo, se realizó un chequeo, comprobándose que en el 80% de los casos no había diferencias superiores a 0,15 mm.

Una vez realizada la asignación, se calcularon para cada una de las tres redes de carreteras las distribuciones de accidentes (de los emplazamientos) según unos determinados rangos de textura, subdividiéndolos en los cuatro estados antes especificados, es decir, se estudió la siniestralidad según el estado de la calzada (seca/mojada) y el tipo de accidente (con deslizamiento/sin deslizamiento). El resultado de esta operación se muestra en las gráficas de la figura 3 (a, b y c).

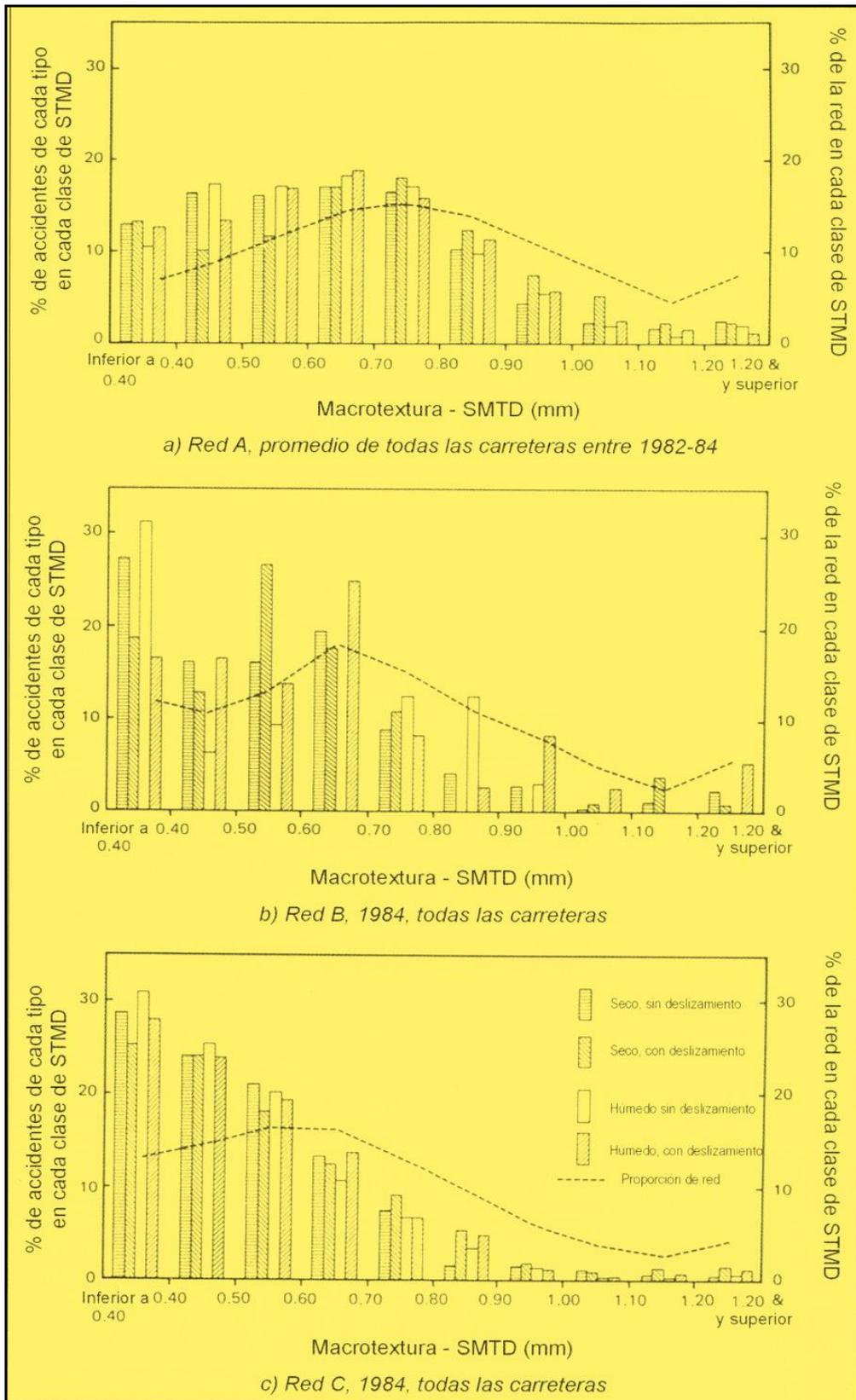


Figura 3. Distribución de los accidentes según tipo y textura en relación con las características de la red (Roe, Webster y West, TRRL, 1991)

Las figuras 3a, 3b y 3c recogen, por un lado, la distribución de cada uno de los cuatro tipos de accidentes (gráficos de barras) para cada intervalo de macrotextura y, por otro, la

distribución de los tramos de carreteras comprendidos en el estudio (curva de frecuencia) en función de la macrotextura, o sea, la proporción de cada una de las redes que está en cada intervalo de macrotextura.

A la vista de los gráficos de la figura 3 hay que resaltar que, si no existiera ninguna relación entre macrotextura y siniestralidad, ambas distribuciones (la de los histogramas de accidentes y la de la línea de puntos de la macrotextura de cada tramo) deberían tener la misma forma.

Sin embargo, analizando las figuras, se pudieron extraer las siguientes conclusiones:

- Era mayor el porcentaje de accidentes en los tramos de macrotexturas bajas (y menor en los de alta macrotextura).
- La circunstancia anterior tenía lugar para cada una de los cuatro tipos de accidentes estudiados.
- Existía relación entre macrotextura y siniestralidad, pues el diagrama de barras no tiene la misma forma que la curva de frecuencias (es decir, hay más proporción de accidentes en tramos de baja macrotextura que lo que sería de esperar según la distribución de la macrotextura en el conjunto de la red).

Se comprobó que el porcentaje de accidentes disminuye cuando la textura es elevada, sobre todo a partir de 1,1 mm, y aumenta de forma considerable cuando la textura es baja.

Además, se realizaron contrastes estadísticos (test de la Chi cuadrado) en los que la hipótesis nula consistía en que no había diferencia entre la distribución de los accidentes y la de la macrotextura, obteniéndose el rechazo de dicha hipótesis; es decir, que el porcentaje de accidentes, en los cuatro estados, tendía a ocurrir de una manera significativa en los emplazamientos con bajas texturas, disminuyendo en aquéllos con una textura elevada.

La principal objeción que se le podría poner a este estudio, como a muchos otros del mismo tipo, proviene de que no se dice nada del tráfico existente en las carreteras, entre otras variables, y además que el estudio se hace en función de los porcentajes de accidentes para cada nivel de macrotextura, cuando lo correcto habría sido hacerlo en función de los índices de peligrosidad, con lo cual podría resultar que hubiera más accidentes en emplazamientos con bajos niveles de macrotextura por tratarse de carreteras con un tráfico más elevado (cosa poco probable, por otra parte).



El porcentaje de accidentes es mayor en tramos de macrotexturas bajas. En la foto, extendido de árido grueso en tratamientos tipo "sandwich".

4.3 Determinación del nivel adecuado de macrotextura

Una vez comprobada la relación entre macrotextura y siniestralidad, con el fin de establecer los valores mínimos exigibles a una capa de rodadura, se realizó un estudio correlacionando accidentes y macrotextura, por medio de la siguiente variable: "Diferencia entre % de accidentes totales (incluyendo las cuatro categorías antes mencionadas) y % de red, para cada nivel de textura" (figura 4).

Si no hubiera existido ninguna relación entre siniestralidad y macrotextura, las líneas representativas de cada una de las redes habrían oscilado aleatoriamente alrededor del nivel 0. En la figura 4 se observa que los puntos de cruce de las curvas con el eje de abscisas varían entre un SMTD de 0,6 y 0,8 mm, por lo que, como conclusión, se pudo recomendar un valor mínimo de macrotextura (SMTD) de 0,7 mm.

Si, en cambio, en el gráfico anterior se representara en ordenadas el número de accidentes/año/kilómetro de red, se llegaría a la conclusión de que a mayor textura menor siniestralidad. Sin embargo, no se llegaría a 0 accidentes/año/km, lo que confirma que existen algunos tipos de accidentes que no dependen de la textura.

Por otro lado, puede decirse que, en aquellas carreteras con capas de rodadura de bajo CRT, se podría mejorar la situación dotándolas de mayor macrotextura.

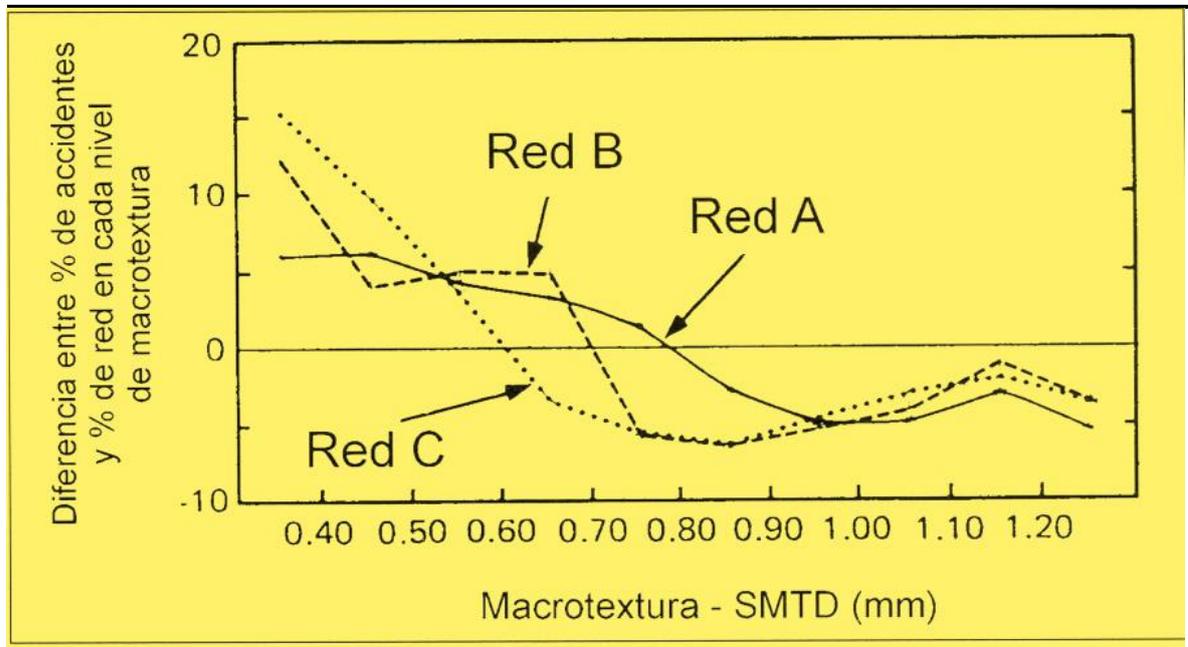


Figura 4. Diferencia entre las distribuciones de frecuencia de la macrotextura y la de los emplazamientos de accidentes en cada red de carreteras (Roe, Webster y West, 1991)

	Número			
	Accidentes con víctimas	Muertos	Heridos graves	Heridos leves
Bienio 1997/1998	169	15	67	209
Bienio 2000/2001	164	15	77	192

Tabla 3. Siniestralidad con calzada mojada (Generalitat Valenciana)

5. Relación entre los accidentes y el coeficiente de rozamiento

Como se ha mencionado anteriormente, existen una gran cantidad de estudios e investigaciones que analizan cómo decrece el índice de accidentes a medida que aumenta el coeficiente de rozamiento del pavimento. Un estudio bastante similar al explicado

anteriormente para la macrotextura es el llevado a cabo recientemente en España por la Generalitat Valenciana en las carreteras de su competencia, en el que se trató de relacionar el coeficiente de rozamiento (CRT) con la siniestralidad [8].

Del total de accidentes con víctimas que se registran cada año en las carreteras de la Generalitat Valenciana, el 10% se produce con calzada mojada, de acuerdo con la información que recogen los correspondientes cuestionarios estadísticos de accidentes de tráfico (en el total español, es el 18%).

Con el fin de conocer la importancia de las cifras de accidentes relacionados con deslizamiento o derrape en las carreteras de la Generalitat Valenciana, se analizaron los accidentes que se produjeron con calzada mojada. La tabla 3 recoge el número y consecuencias de los accidentes de este tipo que se produjeron, por un lado, entre los años 2000 y 2001 (se computan conjuntamente para aumentar el tamaño de la muestra estadística), y, por otro, en los años 1997 y 1998. Como se puede ver en la tabla, las cifras son del mismo orden de magnitud en ambos bienios.

Nivel de adherencia	Red básica				Red local				Total			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
CRT	0-35	35-50	50-65	>65	0-35	35-50	50-65	>65	0-35	35-50	50-65	>65
% sobre el total de la red	2,3	29	44,8	23,8	1,6	28,3	38,7	31,4	1,9	28,5	40,9	28,7

Tabla 4. Distribución del CRT en la red de la Generalitat Valenciana (2000+2001)

Nivel de adherencia	Red básica				Red local				Total			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
CRT	0-35	35-50	50-65	>65	0-35	35-50	50-65	>65	0-35	35-50	50-65	>65
N.º accidentes con víctimas	3	39	29	4	9	53	23	4	12	92	52	8
% de accidentes sobre el total	4	52	39	5	10	60	26	4	7	56	32	5

Tabla 5. Siniestralidad según CRT en 2000-2001

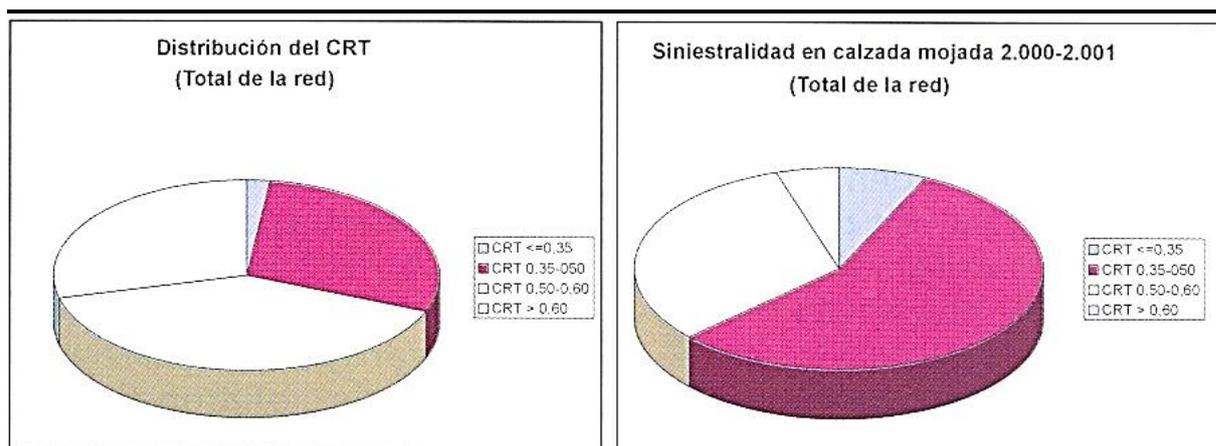


Figura 5. Comparación de las distribuciones de los niveles de CRT y de los accidentes producidos con calzada mojada en la Red de la Generalitat Valenciana

Para conocer las características superficiales de las carreteras en 2001, se midieron con SCRIM y Texturómetro Láser los valores de microtextura (CRT) y macrotextura en unos 2 100 km, el 75% de la red, complementando la campaña realizada en 1997.

De acuerdo con los resultados obtenidos, combinando ambos valores (CRT y círculo de arena) se clasificó la red de carreteras en cuatro niveles: desde nivel 1 (rodadura de urgente

repavimentación) a nivel 4 (rodadura en buen estado de adherencia). Los correspondientes valores del CRT definidos para cada nivel, desde el nivel 1 al nivel 4, fueron los siguientes: menor o igual a 35, de 35 a 50, de 50 a 65, y mayor de 65. Los resultados obtenidos, clasificados por tipo de red y nivel de CRT, vienen indicados en la tabla 4.

Analizados los accidentes que se produjeron con calzada mojada de acuerdo con el cuestionario estadístico de accidentes, se les asignó el valor del CRT correspondiente al tramo, agrupándose igualmente estos datos por tipo de red y nivel de CRT. Los resultados se recogen en la tabla 5 y en los gráficos de la figura 5, en los que se compara la distribución de la red de la Generalitat según el CRT medido, con la distribución de los accidentes producidos con calzada mojada.

Como comentario a los resultados y refiriéndonos, pues, al período 2000-2001, se observó que:

- En el global de la red de la Generalitat Valenciana, el 63% de los accidentes (y el 81 % de víctimas mortales) se produjeron en los tramos de CRT < 50, que correspondían al 31 % de la red.
- Por contra, en el 29% de la red cuyo CRT era superior a 65, sólo se produjeron el 5% de los accidentes con calzada mojada.

Por otro lado, es importante conocer la intensidad de tráfico en cada una de las redes, con objeto de comprobar si existían diferencias significativas en la siniestralidad entre las dos redes de carreteras que pudieran deberse al volumen de circulación. A falta de datos pormenorizados de intensidades según el nivel de CRT, que hubiera sido lo ideal, se disponía de los promedios en cada una de las redes de las intensidades medias diarias (IMD), que eran 7 963 vehículos para la red básica, 2 896 vehículos para la red local y 4 603 vehículos para el total de la red.

Como se puede ver, los resultados eran bastante similares en las redes básicas, que soporta mayor tráfico, y en la local. Por tanto, parece claro que existía una relación entre siniestralidad y resistencia al deslizamiento del pavimento, de manera que, independientemente del tráfico soportado, a mayor CRT se produce un menor número de accidentes y viceversa.

En el ámbito internacional, y por orden cronológico, es de destacar primeramente un trabajo realizado en Gran Bretaña, en el que se estudió la relación entre la resistencia al deslizamiento medida como SN_{40} y los accidentes de circulación vial (Giles y Sabey, 1959)². En el mismo, se comparó el SN_{40} de 120 emplazamientos donde habían ocurrido accidentes por deslizamiento con otros 100 emplazamientos de control, con características similares e intensidades de tráfico del mismo orden, pero escogidos al azar. En dicho trabajo, de acuerdo a diferentes categorías de resistencia al deslizamiento, se calculó la distribución de emplazamientos con accidentes por deslizamiento y la distribución de emplazamientos de control. A continuación, se calculó el riesgo de ser un emplazamiento con accidentes por deslizamiento. Para ello se dividió la proporción de emplazamientos con accidentes por deslizamiento entre la proporción de emplazamiento de control para cada categoría de la resistencia al deslizamiento.

En la figura 6 se muestran estos resultados. Como se puede observar, el riesgo de que existan accidentes por deslizamiento es extremadamente pequeño para valores de la resistencia al deslizamiento por encima de un SN_{40} igual a 65 y aumenta muy rápidamente para valores del SN_{40} por debajo de 50.

² GILES, C.G, and SABEY, B.E "Skidding as a factor in accidents on the roads of Great Britain". Proceedings of the 1st International Skid Prevention Conference, 1959, Virginia Council of Highway Investigation and Research, Part 1, pp. 27-44.

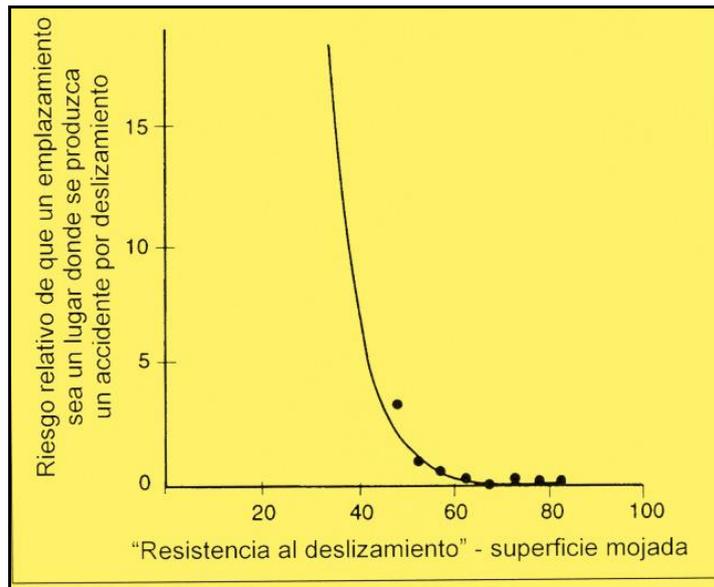


Figura 6. Riesgo relativo de accidentes por deslizamiento en función de la resistencia al deslizamiento (Giles y Sabey, 1959).

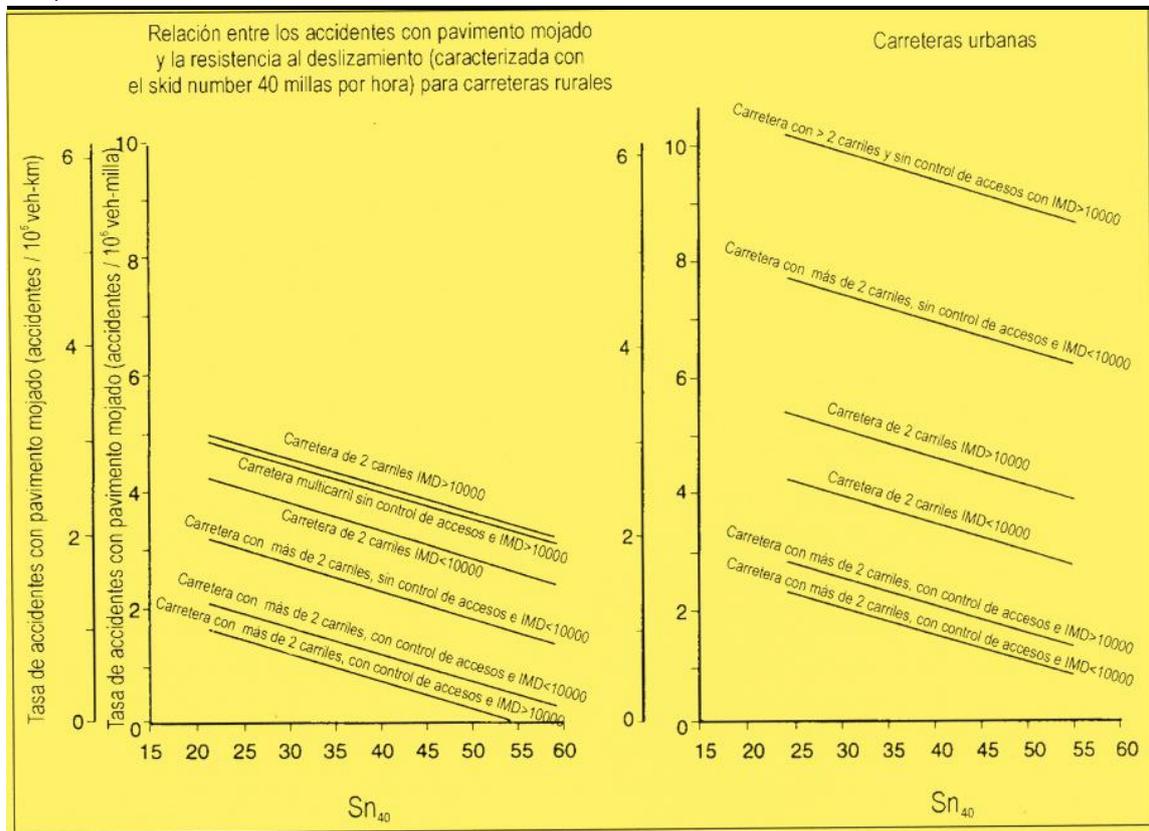


Figura 7. Índice de accidentes con pavimento mojado en función del SN_{40} (Blackburn et al, 1978)

En otro estudio realizado en Estados Unidos (Blackburn et al, 1978) se analizó la variación del índice de accidentes con pavimento mojado (número de accidentes con pavimento mojado/ 10^6 veh-km) en función del SN_{40} y, también, del tipo de carretera. En este sentido, se seleccionaron 6 tipos de carreteras: tres de ellos eran carreteras interurbanas y los otros tres urbanas. Tanto en las carreteras interurbanas como en las urbanas las tipologías eran las siguientes:

- Carreteras con dos carriles.

- Carreteras con más de dos carriles sin control de accesos.
- Carreteras con más de dos carriles con control de accesos.

No obstante, la mayoría de los tramos eran carreteras convencionales en campo abierto. Se realizó un análisis de regresión del índice de accidentes con tiempo húmedo en función del SN_{40} , para cada una de las categorías mencionadas anteriormente.

Estos investigadores encontraron grandes diferencias entre el índice de accidentes según el tipo de carretera. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre las pendientes de cada una de las relaciones que aparecen en la figura 7. Finalmente, los investigadores estimaron una pendiente común y, según los mismos, el índice de cambio de los accidentes con tiempo húmedo en función de la modificación del SN_{40} era igual a $-0,0286$ unidades de accidentes con pavimento húmedo por 10^6 veh-km. De esta manera, según estos investigadores, en cualquier tipo de carretera, de una renovación del pavimento que incrementase en 10 unidades el SN_{40} , se esperaría una reducción de 0,3 accidentes por cada 10^6 veh-km, o lo que es lo mismo, un accidente por kilómetro por año sobre una carretera que soportara 10000 vehículos por día.

Otro estudio destacable en el ámbito de relacionar el coeficiente de resistencia al deslizamiento con la disminución de accidentes es el llevado a cabo en las autopistas alemanas (Kamplade, 1989)³. El estudio fue llevado a cabo sobre 464 tramos de 1 km de las autopistas de Alemania, y consistió en hallar la relación entre los índices de accidentes con pavimento seco y mojado y la resistencia al deslizamiento medida con SCRIM (por tanto con pavimento mojado) de cada uno de los tramos. Los resultados mostraron, como se puede ver en la figura 8, que la tasa de accidentes en seco no depende del CRT; pero, en cambio, sí depende la tasa de accidentes con calzada mojada.

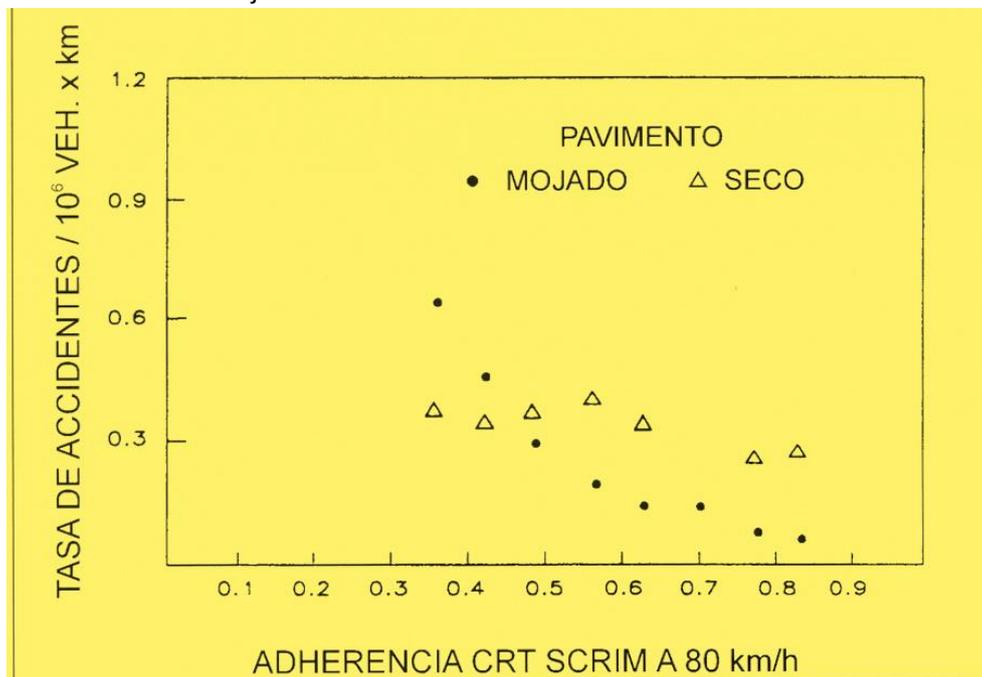


Figura 8. Relación entre las tasas de accidentes en seco y en mojado y la resistencia al deslizamiento medida con SCRIM en las autopistas alemanas (Kamplade, 1989)

³ KAMPLADE, J. "Effects of wear and deformation of road surfaces on traffic safety", Roads and Traffic 2000, volumen 2/B, International Road and Traffic Conference, Berlin, Germany, 1989.

Un estudio llevado a cabo en Francia (Yerpez y Ferrández, 1986)⁴ demostró que los accidentes ligados a la falta de resistencia al deslizamiento sobre pavimentos mojados no siempre se acumulan en los puntos en los que la resistencia al deslizamiento es menor, sino que tienden a agruparse en puntos específicos en los que las solicitaciones son muy elevadas. La investigación concluía que una relación muy importante es la diferencia entre la resistencia al deslizamiento en mojado existente y la resistencia al deslizamiento demandada por las características geométricas del emplazamiento en cuestión. Con todo, un estudio francés (Gothié, 1990)⁵ realizado sobre cuatro tramos homogéneos de 150 km, permitió obtener una estrecha relación entre la resistencia al deslizamiento en mojado (medida con SCRIM) y los accidentes (véase figura 9).

Por otro lado, en la investigación realizada por el TRRL mencionada en el apartado 4.2 al hablar de la macrotextura, se encontró que, en cada una de las tres redes, la mayoría de los accidentes estaban concentrados en un rango del MSSC (coeficiente de resistencia al deslizamiento medio medido en verano) comprendido entre 0,40 y 0,50 (Roe et al, 1991). No obstante, contrariamente a lo que cabría esperar, esta vez, al realizar contrastes estadísticos, se vio que el coeficiente de rozamiento no tenía un efecto tan predominante sobre los accidentes como la macrotextura. Como se puede ver en la figura 10, no existen diferencias significativas entre el histograma (proporción de accidentes) y la poligonal (proporción de la red de carreteras que estaba entre unos determinados niveles de CRT). No obstante, estos investigadores concluyeron que el nivel absoluto del coeficiente de rozamiento no era lo más importante, sino más bien el riesgo relativo de que se produzca un accidente por deslizamiento en un emplazamiento en particular. Según los autores, lo anterior no quería decir que la resistencia al deslizamiento (microtextura) no fuera importante, ya que está demostrado que es de gran importancia en puntos de alto riesgo para condiciones de calzada mojada. Por lo tanto, hay que vigilar la microtextura, que proporciona adherencia en todas las situaciones.

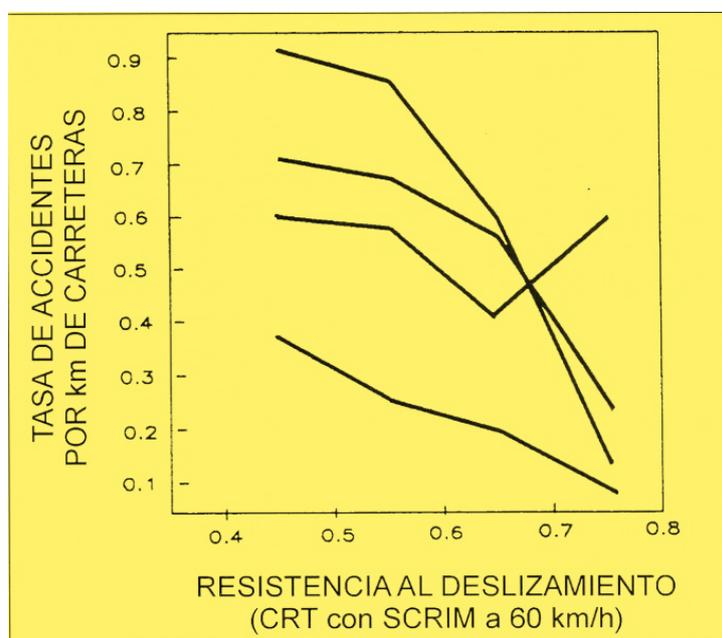


Figura 9. Relación entre el índice de accidentes y la resistencia al deslizamiento medida con SCRIM (Gothié, 1990)

⁴ YERPEX, J. y FERRÁNDEZ, F. "Road characteristic and safety: Identification of the part played by road factors in accident generation", INRETS Synthesis Nº 2, Paris, France, April 1986.

⁵ GOTHÍÉ, M. "Relations entre accidents et adherence CFT/SCRIM", compte rendu de recherches nº 102230 (juin 1980), nº 102325 (fev. 1986), nº 102249 (fev. 1990), Lyon, France, 1990.

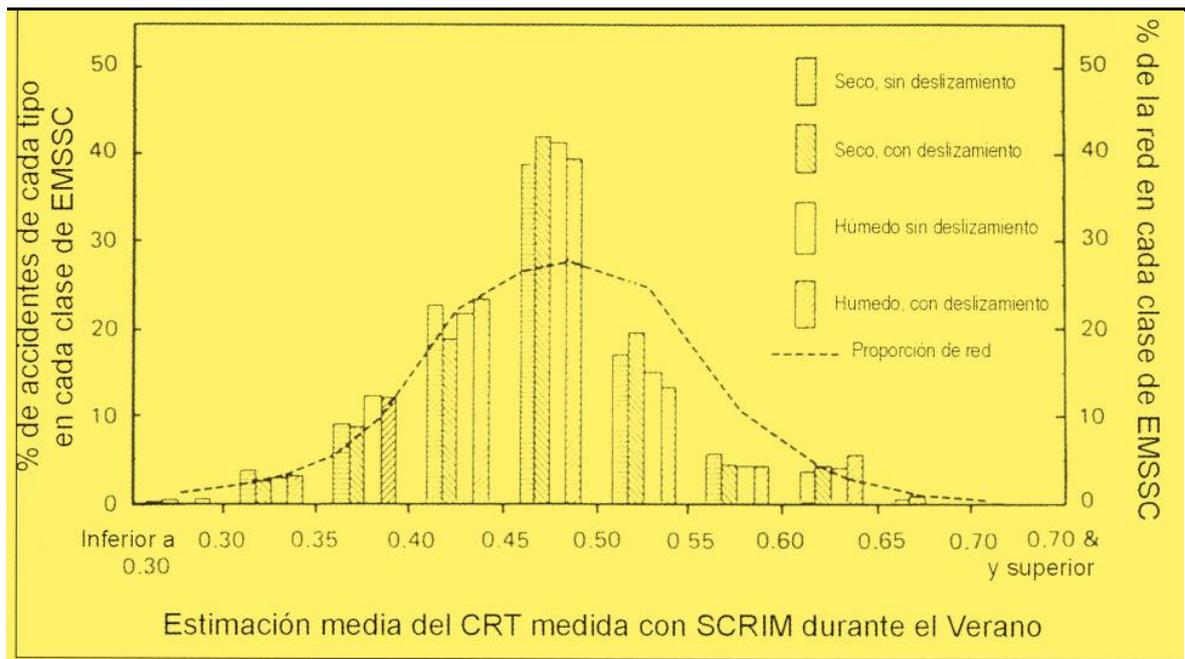


Figura 10 Distribución de los accidentes según tipo y nivel de microtextura (CRT medido con SCRIM) en la red C (Roe, Webster y West, TRR, 1991)

6. Influencia de la regularidad superficial

5.1. Influencia de las irregularidades del firme sobre la vibración de los vehículos

El estudio físico de las características de vibración propia de los vehículos y su interacción con las condiciones de regularidad superficial de la carretera se han venido utilizando en análisis teóricos de los efectos de esta regularidad sobre la seguridad vial y sobre la comodidad de los usuarios, lo que ha sido comprobado también experimentalmente en el TRRL británico (Cooper, 1973⁶; Cooper y Young, 1978⁷; Jordan, 1984⁸).

Diversos estudios realizados tanto con camiones instrumentados (con acelerómetros, medidores de desplazamientos verticales, etc.) como de tipo teórico (modelo del cuarto de vehículo) muestran que los vehículos tienen dos gamas de frecuencias o modos principales de vibración propia:

- En general, las masas suspendidas del vehículo (chasis, carrocería, asientos, motor) tienen unas frecuencias de vibración propia de entre 1 y 4 Hz, que coinciden con el modo de vibración de la suspensión del vehículo (así, cuando ésta es de tipo neumático suele presentar una frecuencia de vibración propia más próxima a 1-1,5 Hz; y, si es de tipo metálico, como la suspensión de ballestas, la frecuencia está entre 3-4 Hz).
- Las masas no suspendidas (ruedas, ejes) tienden a oscilar con unas frecuencias de 10 a 15 Hz.

Las irregularidades de la superficie del firme que posean unas longitudes de onda tales que a la velocidad de recorrido del vehículo induzcan una vibración en el mismo que coincida con alguno de los períodos de vibración propia antes mencionados tenderán a provocar un efecto de resonancia y serán las que ocasionarán unas consecuencias mayores.

⁶ COOPER, D.R.C. "Vertical accelerations measured in several types of car travelling over surface discontinuities". TRRL Supplementary Report SR 12UC, Crowthorne, England, 1973.

⁷ COOPER, D.R.C., YOUNG, J.C. "Road Surface irregularity and vehicle ride. Part 2 – Riding confort in cars driven by the public, TRRL Supplementary Report 400, Crowthorne, England, 1978.

⁸ JORDAN, P.G "Measurement and assessment of unevenness on major roads". TRRL Supplementary Report LR 1125, Crowthorne, England, 1984.

Concretamente, las irregularidades con una longitud de onda tal que provoquen vibraciones dentro de la gama de frecuencias del primer modo de vibración (1 a 4 Hz) provocarán una mayor oscilación de las masas suspendidas, entre las que se encuentran los asientos y los propios ocupantes, por lo que tendrán un efecto adverso sobre la comodidad de éstos, pudiendo aumentar su cansancio.

Dada la conocida ecuación $f = v / A$, donde f (Hz) es la frecuencia de vibración, v (mis) es la velocidad del vehículo y A (m) la longitud de onda, despejando tendríamos que: $A = v / f$, por lo que para una carretera donde se prevean unas velocidades de 80 a 120 km/h, entrando con el valor $f = 1 - 4$ Hz, se tendría que las longitudes de onda de la regularidad superficial que podrían afectar a la comodidad de los ocupantes y a su cansancio estarían entre unos 5,5 y 33 m.

Por otro lado, las irregularidades con longitud de onda tal que induzcan vibraciones con una frecuencia tal que coincida con la frecuencia de vibración propia de las ruedas (10 a 15 Hz) podrían provocar un mayor rebote de éstas al circular por la carretera, pudiendo llegar a ocasionar un despegue con pérdida de contacto entre rueda y pavimento, lo que puede afectar negativamente a la seguridad de la circulación. Entrando en la anterior ecuación con los valores mencionados y para el mismo rango de velocidades, se tendría que las longitudes de onda "peligrosas" de las irregularidades superficiales, que habría que evitar para que no se produzca la falta de contacto entre rueda y pavimento, se encontrarían entre 1,5 y 3,3 metros.

5.2. Relaciones obtenidas entre datos reales de accidentes y regularidad superficial

En lo referente a datos extraídos de carreteras en servicio que relacionen la regularidad superficial con la aparición de accidentes, se puede citar el estudio llevado a cabo por Yerpez y Fernández⁹ para el caso de Francia, que en su análisis de las bases de datos disponibles en el momento del estudio (1986), llegaron a la conclusión de que la falta de regularidad superficial longitudinal que traía consigo un mal contacto entre las ruedas y la superficie del pavimento (lo que podía ocasionar una mala respuesta del vehículo en frenadas y maniobras de cambio de dirección) había sido la causa de un 6% de los accidentes de la red principal francesa.

No obstante, a pesar de que el análisis físico de la interacción rueda-pavimento en función de la regularidad superficial apunta, al igual que los datos estadísticos presentados anteriormente, a la influencia de ésta en la aparición de accidentes, conviene señalar que existen autores que matizan esta situación. Así, la dificultad añadida para la conducción que supone la irregularidad longitudinal puede significar un cambio de actitud del conductor, que, como consecuencia de percibir un mayor nivel de peligro, disminuirá la velocidad hasta situarse en el mismo umbral de riesgo que en el caso de regularidad perfecta. Este comportamiento suele causar un descenso en el número de accidentes y su gravedad.

Así, se pueden citar los recientes estudios llevados a cabo por Al-Masaeid¹⁰, sobre los impactos de la regularidad superficial y los deterioros de los pavimentos sobre los accidentes en carreteras interurbanas. En este estudio se utilizó una base de datos de 1130 km de carreteras de dos carriles de primer orden en Jordania para investigar los efectos de las variables anteriores en las tasas de accidentes con un solo vehículo implicado, o con varios vehículos, y de accidentes totales, por medio de un análisis de regresión, en el que se utilizó el IRI (Índice de Regularidad Internacional) y el PSR (índice Present Serviceability Rating) para

⁹ Yerpez, I. y Ferrández, F, "Road characteristics and safety: Identification of the part played by road factors in accident generation", INRETS Synthesis Nº 2. París, Francia. 1986.

¹⁰ AL-MASAEID, H. R. Impact of Pavement Condition on Rural Road Accidents, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 24, No. 4, 1997, pp. 523-532.

representar el estado del firme. Los resultados del análisis estadístico han llegado a la conclusión de que las condiciones de los pavimentos tienen sus efectos también en el tipo de accidente, desde el punto de vista del número de vehículos implicados, lo que coincide con los resultados de una investigación previa sobre la relación entre la regularidad superficial y la velocidad llevada a cabo por Karan et al¹¹, en 1976.

Tal como se puede ver en la figura 11, los datos muestran que el índice de accidentes en los que sólo existe un vehículo implicado decrece con aumentos del índice IRI (es decir, con peor regularidad superficial), mientras que aumenta el índice de accidentes múltiples. Es decir, las carreteras con problemas de regularidad superficial suelen presentar un menor índice de accidentes con vehículo único y un mayor índice de accidentes con varios vehículos implicados. También se observa que más allá de un nivel del IRI = 5 m/km la reducción de la tasa de accidentes es muy pequeña. Una de las causas de esta disminución de accidentes con vehículo único, en gran parte debidos a salidas de calzada por exceso de velocidad, puede estar en que la percepción de la irregularidad por parte de los conductores supone un mayor aumento de la vigilancia y precaución, con el consecuente descenso de la velocidad. Por el contrario, el aumento de accidentes múltiples podría justificarse con dos ideas: en primer lugar, se ha comprobado que el aumento de regularidad y capacidad de adherencia viene asociado con mayores movimientos laterales de los conductores en carreteras de dos carriles, lo que podría repercutir en la disminución de la distancia entre los vehículos con el consecuente aumento de peligrosidad; en segundo término, el hecho de que las carreteras con alta irregularidad suelen tener más defectos puntuales (baches, posibles grietas ...) forzaría a los conductores a cambios bruscos de velocidad, que pueden causar alcances entre vehículos que no esperan dichas maniobras repentinas.

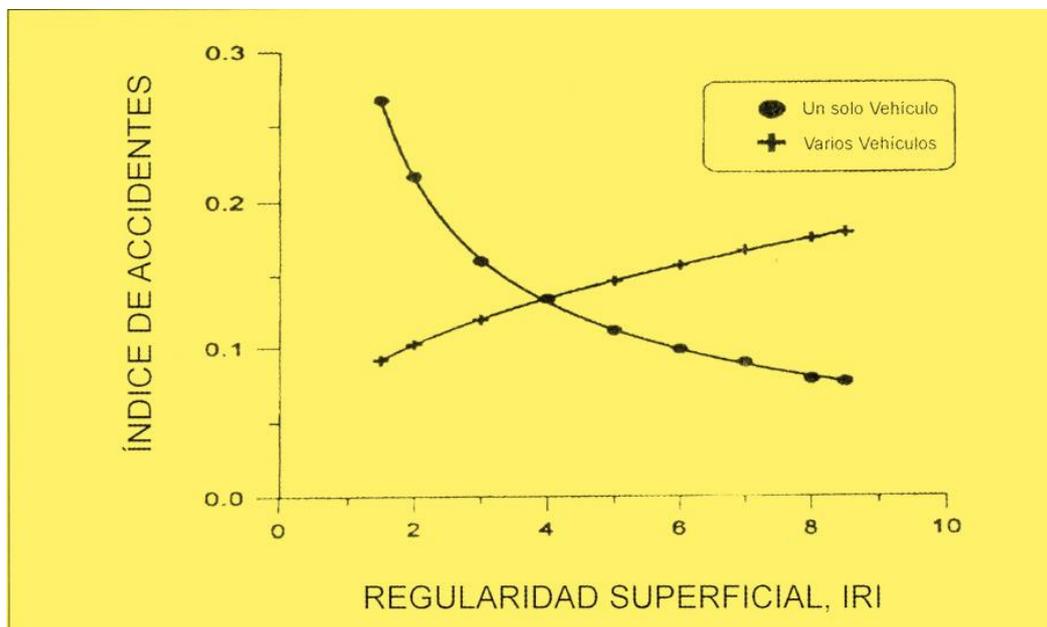


Figura 11. Relación entre los índices de accidentes (con un solo vehículo y con varios vehículos implicados) y la regularidad superficial (Al-Masaed, 1997)

Debido a los fenómenos que se acaban de apuntar, no deben causar extrañeza las conclusiones presentadas por el Comité Técnico de Características Superficiales de la AIPCR en

¹¹ KARAN, M. A., HAAS, R. and KHER, R. "Effects of Pavement Roughness on Vehicle Speeds": In Transportation Research Record 602, TRB, National Research Council, Washington D.C., 1976, pp. 122-127.

el XIX Congreso Mundial de Carreteras [2], celebrado en 1991 en Marrakech, según el cual debería prestarse atención al hecho de que solamente cuando la presencia de irregularidades longitudinales haya sido constatada como causa de aparición de accidentes, las inversiones en la mejora de la regularidad del pavimento supondrán un descenso de las tasas de accidentes. Por el contrario, cuando la irregularidad no ha supuesto un aumento de accidentes, la mejora del firme suele traer asociada un aumento de la velocidad de recorrido con sus correspondientes riesgos. Este hecho fue también probado por Ignacio Pérez (1996) en las carreteras de la Comunidad de Madrid. En la tesis doctoral [9] realizada por él, se demostró que el índice de peligrosidad aumentaba por término medio alrededor de un 10% en los refuerzos de firmes (realizados solamente para conservar la capacidad estructural del firme), si bien este resultado no era significativo desde un punto de vista estadístico con un nivel de confianza del 95%. Sin embargo, en los acondicionamientos y mejoras de trazado se reducía el índice un 55%, disminución que en este caso sí que era estadísticamente significativa.

7. Regularidad superficial transversal

Las irregularidades superficiales transversales son debidas frecuentemente a la aparición de roderas, deformaciones permanentes en sentido longitudinal causadas por el paso de las ruedas de los vehículos. Otras irregularidades transversales que es posible que puedan producir problemas serían las debidas al estriado longitudinal de los pavimentos de hormigón.

Para la medición de la regularidad transversal suelen emplearse reglas fijas de 3 metros o los modernos transversoperfilógrafos de función múltiple, equipos dotados de varios láseres montados sobre una barra transversal a la dirección del vehículo, los cuales tienen un alto rendimiento.

El primer efecto de las deformaciones longitudinales sobre la circulación es que obligan a una conducción forzada de los vehículos, que reduce la comodidad e incluso puede afectar a la seguridad, especialmente en el caso de las motos y bicicletas¹². Además, las diferencias en la deformación de las roderas pueden causar balanceo en los vehículos, con la consecuente incomodidad de los pasajeros, y la transferencia de la carga entre ruedas, con el riesgo de pérdida de control del vehículo.

Por otro lado, la aparición de lluvia en zonas de roderas supone la acumulación de agua en estas deformaciones, existiendo el riesgo de que se produzca hidroplaneo. La negligencia del conductor en estos casos, normalmente traducida en una velocidad excesiva, suele combinarse con la propia peligrosidad de la rodera llena de agua, según indican los estudios publicados por Mounce y Bartoskewitz (1993)¹³ en referencia a los factores de influencia en los accidentes.

El hidroplaneo total o parcial, en función de que sea la totalidad del neumático o simplemente parte de éste el que pierda contacto con la superficie del pavimento, suele ser clasificado en dos tipos, en función de la causa de su aparición:

- El hidroplaneo viscoso, asociado a las bajas velocidades típicas de las carreteras urbanas. Este tipo de hidroplaneo se produce porque la microtextura del pavimento no es la adecuada, junto con la existencia de unos altos grados de viscosidad del fluido acumulado en la rodera y, además, con el dibujo del neumático prácticamente

¹² Mateos, Manuel, "El pavimento de las carreteras y los accidentes de tráfico", Cimbra, mayo 1990.

¹³ John M. Mounce and Richard T. Bartoskewitz, "Hydroplaning and Roadway Tort Liability", Transport Research Record n° J 401, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., 1993.

borrado, originándose el deslizamiento del vehículo. En este caso no es necesaria una profundidad excesiva del fluido acumulado para producirse el deslizamiento.

- El hidroplaneo dinámico, que se produce sólo cuando el espesor del líquido es elevado, normalmente mayor de 10 mm, con altas velocidades de circulación (en el entorno de los 100 km/h), sobrepasando la capacidad de drenaje de la rueda, sobre todo si ésta es baja debido al desgaste y, además, el pavimento presenta una textura inadecuada.



Según un estudio realizado en los EE.UU., si el espesor de la lámina de agua era de 2,5 mm, la velocidad máxima del vehículo no debía sobrepasar los 80 km/h.

Diversos estudios llevados a cabo en Estados Unidos muestran que, en condiciones normales, la disminución de la velocidad hasta unos 90 km/h reduce la posibilidad de que se produzca hidroplaneo. El Instituto del Transporte de Texas (TT1)¹⁴ realizó una investigación en la que se consideraban las variables asociadas al deslizamiento y al hidroplaneo, obteniendo como conclusión más importante que, si el espesor de la lámina de agua era de 2,5 mm, la velocidad máxima del vehículo no debía sobrepasar los 80 km/h.

Entre los estudios realizados para cuantificar la relación entre el riesgo de accidentes y la regularidad transversal, cabe citar el realizado en 1988 sobre 600 km de autopistas federales alemanas (Kamplade, 1990)¹⁵. El resultado del estudio mostró que, aunque la presencia de roderas constituía un riesgo para la conducción, la acumulación de agua en ellas tenía menos efecto que una baja resistencia al deslizamiento. Solamente en las zonas de transición, en las que varía la pendiente transversal, donde los conductores podían ser sorprendidos por un aumento imprevisto de la profundidad del agua en las roderas, suponían un incremento real de riesgo.

¹⁴ NCHRP. Synthesis of Highway Practice 104. "Criteria for Use of Asphalt Friction Surfaces"; Transportation Research Board, Washington D.C., July 1990.

¹⁵ Kamplade.T, "Analysis of transverse unevenness with respect to traffic safety", First International Symposium on Surface Characteristics, ASTM STP report /031, Philadelphia, PA-USA, June 1990.



Solamente se obtendrán aumentos en la seguridad vial al mejorar las características superficiales de un pavimento cuando se haya comprobado que sean precisamente las malas condiciones del firme las determinantes en la aparición de accidentes.

8. Conclusiones

Basándose en los resultados de diversos estudios y experimentos internacionales sobre la influencia de las características superficiales en la maniobrabilidad de los vehículos, las Administraciones de carreteras tratan de proporcionar unas características superficiales adecuadas a los firmes de sus respectivas redes con el fin de mejorar la seguridad y la comodidad de la circulación.

Con objeto de comprobar la relación entre la siniestralidad y las características superficiales existentes en carreteras en servicio, se han realizado un gran número de estudios, que muestran una gran dispersión en los resultados. Aun así, respecto de tales estudios se pueden aventurar las siguientes conclusiones:

- Existe una clara evidencia de que, cuanto menor es la resistencia al deslizamiento en una carretera, mayor número de accidentes con pavimento mojado se producen. Sin embargo, esto no está tan claro cuando se trata de accidentes con el pavimento seco. El nivel mínimo del CRT medido con SCRIM que habría que proporcionar en lugares donde se prevea que van a darse problemas de deslizamiento es de 0,5.
- También parece seguro que, cuando la macrotextura del firme es rugosa, se producen menos accidentes, tanto en seco como en mojado, que cuando la macrotextura es fina, para cualquier nivel del coeficiente de resistencia al deslizamiento. El nivel mínimo de macrotextura, expresada como STMD, por debajo del cual el riesgo de accidente comienza a aumentar es de 0,7 mm, equivalente a 1,05 mm del valor en el ensayo del círculo de arena.
- En cuanto a la regularidad superficial, estudios teóricos y experimentales muestran que pueden ser peligrosas para la seguridad las irregularidades con una longitud de onda que induzcan vibraciones en el vehículo con la misma frecuencia que la de la vibración de las ruedas y ejes (10 -15 Hz), pues pueden producir el despeque de éstas del pavimento. Esto significa que, para las velocidades usuales de los vehículos, se deberían evitar las ondas con una longitud entre 1,5 y 3,3 m. En la práctica, varios estudios llevados a cabo en carreteras en servicio para tratar de determinar la relación entre las malas condiciones de regularidad superficial y la ocurrencia de accidentes no muestran una clara correlación positiva entre ambos, llegando algunos autores a

afirmar que, cuando las condiciones del firme son peores, los conductores adaptan su velocidad consecuentemente, disminuyendo el riesgo de accidente, especialmente en los que existe un solo vehículo implicado.

- En general no puede afirmarse que unas características superficiales deficientes sean por sí mismas la causa directa de accidentes, sino que más bien suelen empeorar aquellas situaciones donde se ha producido un conflicto, como, por ejemplo, un frenazo repentino o un cambio brusco de la dirección del vehículo. Estas situaciones suelen ocurrir con el pavimento húmedo en los emplazamientos de la carretera donde hay que realizar maniobras de frenado y giro (intersecciones, curvas, etc.). Por ello, sería de gran utilidad y rentabilidad actuar en estos lugares, proporcionando una resistencia al deslizamiento adecuada a la demandada por los vehículos en las condiciones normales de circulación. En cambio, normalmente no resulta necesario ni rentable proporcionar un alto CRT en toda la red. De todas maneras, hay que decir que los beneficios de conseguir altos CRT han sido infravalorados, debido al bajo coste de los accidentes considerado en los estudios coste- beneficio. En este sentido, en un estudio llevado a cabo por la Dirección General de Carreteras en el que se analizaba la relación coste-eficacia de las medidas ingenieriles de bajo coste para la reducción de accidentes en las carreteras de su competencia [13], se pudo comprobar que los tratamientos de seguridad vial en firmes (pavimentos antideslizantes: microaglomerados, lechadas bituminosas antideslizantes, pavimentos porosos ...), que tuvieron un coste medio de 4 millones de pesetas por kilómetro, se amortizaron en tan sólo ocho meses, aunque hay que decir que estas actuaciones se circunscribían a tramos peligrosos.
- Establecidos los puntos o zonas peligrosas de la carretera (en función del número de accidentes, de la gravedad de los mismos o del riesgo de que ocurran), a la hora de adoptar las medidas adecuadas para evitarlos se deberán analizar cuidadosamente los factores motivantes, puesto que muchos achacados al estado del pavimento pueden tener otro origen, como unas malas condiciones geométricas de trazado (radios, peraltes, pendientes ...), señalización incorrecta, etc., cuya solución no sólo no es la mejora de las condiciones superficiales del pavimento, sino que esto puede agravar el problema, pues puede suponer un aumento de la velocidad de circulación, con el consiguiente incremento del riesgo y gravedad de los accidentes.

Por ello, se apunta como conclusión que solamente se obtendrán aumentos en la seguridad vial al mejorar las características superficiales de un pavimento cuando se haya comprobado que sean precisamente las malas condiciones del firme las determinantes en la aparición de accidentes, pues en otro caso normalmente se producirán aumentos de la velocidad de los vehículos. En estos casos, si se desea evitar un aumento de la siniestralidad, es preciso acompañar la renovación superficial con otras actuaciones relacionadas con la seguridad, tales como aumentos del radio de las curvas, su balizamiento, instalación de barreras de seguridad, aumento de los despejes, etc.

Bibliografía

1. Achútegui, F. "*Influencia del firme en la seguridad vial. Pavimentos especiales en zonas peligrosas*", IV Jornadas Nacionales de Seguridad Vial, Asociación Técnica de Carreteras, Santander. 1998.

2. "Road surface characteristics: their effect on safety and their role in road management", Report of the Technical Committee on Surface Characteristics, XIXth World Road Congress of PIARC/ AIPCR, Marrakech, 1991.
3. Roe, PG; Webster DC and West, G. "The relation between the surface texture of roads and accidents", TRRL Research Report 296 (1991).
4. Cairney, P. "Skid resistance and crashes a review of the literature", ARRB "Research Report ARR 311 (1997).
5. Blackburn, R.R. et al (1978). "Effectiveness of Alternative Skid Reduction Measures", Vols I-IV, Reports NQ FHWA-RD-79-22, 23, 24, 25. Federal Highway Administration.
6. Gallaway, B.M. et al (1982). "Synthesis of Safety Research Related to Traffic Control and Roadway Elements", Volume 1, Federal Highway Administration.
7. Ogden, K. W. (1996). "Safer Roads: A Guide to Road Safety Engineering", Avebury Technical, Cambridge, England.
8. Plan de seguridad vial de la Generalitat Valenciana, 2003.
9. Tighe, S. et al. "Incorporating Road Safety into Pavement Management", Transportation Research Record nº 1699, TRB, Washington D.C., 2000, pp 1-10.
10. Pérez Pérez, I. "Evaluación de la efectividad de las actuaciones en carreteras sobre la accidentalidad. Aplicación al caso de la Comunidad de Madrid", Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 1996.
11. Kraemer, C., Sánchez, v., Rocci, S. y Gardeta, J. Carreteras I: tráfico y trazado, Capítulo 3, "Interacción entre rueda y pavimento", ETSI Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 1997.
12. Alonso, M. "Las características superficiales de los firmes y la seguridad vial", Trabajo de Doctorado para la asignatura de Seguridad Vial, ETSI Caminos, Canales y Puertos, Madrid, curso 2001- 02.
13. Viguera, J. F. et al. "Pavimento y Seguridad Vial", ESPAS (Asociación Española de refinerías de petróleo- Productores de asfalto), 1991.
14. Hernández Alastuey, F., Sánchez Vicente, A. y Llamas Rubio, R. "Coste-Eficacia de las medidas ingenieriles de bajo coste en la reducción de accidentes. Experiencia española", XIV Congreso Mundial de la Carretera de la IRF, París, 2001