

Evolución de la resistencia al deslizamiento transversal y de la regularidad del firme

en tramos de la zona de Madrid



Marta Alonso Anchuelo, Centro de Estudios de Carreteras del Cedex, y Juan Antonio López Aragón, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Resumen

En este artículo se presentan la metodología y las conclusiones de un estudio realizado sobre la evolución de la resistencia al deslizamiento transversal y de la regularidad del firme en tramos de las proximidades de Madrid.

El análisis de la evolución de la resistencia al deslizamiento transversal parece mostrar que, en los tramos de estudio, la pluviometría deja de influir en las oscilaciones a partir de un cierto umbral. Las oscilaciones que se producen cuando se supera dicho umbral podrían estar relacionadas con la temperatura. Las variaciones ob-

servadas difieren ligeramente según los tipos de mezcla bituminosa que se han estudiado.

En los tramos homogéneos en que se ha analizado la evolución del IRI se ha observado, como era de esperar, un comportamiento estable generalizado.

Palabras clave:

Rozamiento, CRT, Regularidad, IRI, Lluvia, Temperatura, Evolución, Deslizamiento.

Generalidades

Introducción

La experiencia acumulada en las campañas de auscultación, y los estudios realizados por numerosos autores han mostrado variaciones de la resistencia al deslizamiento durante la vida del firme desde el momento de su puesta en servicio. Esas varia-

ciones están asociadas, entre otras razones, a cambios estacionales y dependen de diversos factores.

Las pautas generales de evolución de la resistencia al deslizamiento son parecidas entre pavimentos, pero hay ciertas diferencias según varios factores. Como estos factores dependen de las condiciones locales, se hace necesario realizar un análisis de la evolución en diferentes escenarios. Su estudio es muy importante para la seguridad, ya que afecta a la interacción neumático-pavimento.

Otra de las principales características superficiales de los firmes es la regularidad longitudinal. Las irregularidades se describen en forma de ondas y, en general, son debidas a una inadecuada puesta en obra, a deformaciones del firme bajo tráfico o a deformaciones de la explanada.

Las irregularidades de los firmes

tienen gran influencia sobre el usuario pues, entre otros aspectos, afectan a la comodidad de la rodadura, aumentan el consumo de combustible e influyen en la estabilidad del vehículo. Por este motivo, también tiene interés realizar el estudio de la evolución de la regularidad de la carretera.

En este artículo se describen, siguiendo esas dos líneas de estudio, las tareas realizadas por un grupo de trabajo del Comité de Características Superficiales de Pavimentos (C1) de la Asociación Técnica de Carreteras de España, constituido para analizar la evolución de la resistencia al deslizamiento transversal y de la regularidad superficial de los firmes en unas condiciones reales de la zona centro peninsular (proximidades de Madrid).

Descripción general de los tramos de estudio

Las medidas se realizaron a partir del año 2001 en cuatro tramos de carreteras situadas en la zona de Madrid. Estos tramos se han denominado *tramos globales* para distinguirlos de las subdivisiones hechas en tramos homogéneos. Dos de los tramos globales tienen una longitud de 3 km, mientras que los dos restantes tienen una longitud de 4 km. Los tramos globales se subdividieron para su estudio en tramos homogéneos, como se describe detalladamente más adelante.

Inicialmente se comenzó con el estudio de tres tramos globales. A finales de 2002 se consideró interesante añadir un tramo adicional de nueva construcción (tramo global 4). La razón de esta incorporación fue que la nueva carretera iba a dar servicio a una grava cercana, y se esperaba que soportara un importante tráfico pesado que acelerase la evolución de los parámetros.

Todos los pavimentos objeto del estudio son mezclas bituminosas en caliente en capas de rodadura de nueva ejecución, del tipo S-20 y S-12, con categorías de tráfico pesado T2 y T1.

Evolución de la resistencia al deslizamiento transversal

Conceptos generales sobre la evolución del CRT

El Coeficiente de Rozamiento Transversal (CRT) es el parámetro que generalmente se utiliza en España para evaluar la adherencia de los firmes.

Los principales factores que influyen en el valor del CRT son:

- Equipo y condiciones de medida. Si se utilizan diferentes equipos, es necesario efectuar ensayos de comparación para aplicar constantes de calibración.
- Características del firme: tipo y textura. Los tipos y formulaciones de los firmes dan lugar a diferentes texturas, que afectan al coeficiente de rozamiento (fundamentalmente la microtextura).
- Condiciones ambientales:

- Temperatura. Su influencia en las medidas realizadas con el péndulo de fricción se establece en la propia norma del ensayo (NLT-175), pero no está claro cómo afecta a las medidas realizadas con el SCRIM (*Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine*): equipo de auscultación del CRT de alto rendimiento.

- Lluvia y humedad. La experiencia muestra valores del CRT más bajos en los periodos estivales. Esto se asocia a que, en periodos secos, el pulimento de los áridos es más elevado, al actuar sobre la superficie un mayor número de partículas de polvo mineral que se comportan como un abrasivo bajo la

acción de las cargas de los vehículos pesados.

- Variaciones estacionales e interanuales. Además de las variaciones debidas a la alternancia de estaciones secas y húmedas, se producen variaciones interanuales según los cambios de humedad-sequedad de un año para otro.

- Áridos utilizados. El tipo de árido y su resistencia al pulimento influyen en la adherencia neumático-pavimento. En igualdad de otros condicionantes, cuanto mayor es el coeficiente de pulimento acelerado, mayor es el CRT obtenido.

- Edad del firme. No está clara su influencia en los valores del CRT. Mientras que algunos autores defienden la estabilización del CRT con el paso del tiempo (aunque con fluctuaciones estacionales o interanuales), en algunos casos se ha observado cierta disminución de su valor.

- Tráfico pesado. El aumento del tráfico pesado produce una disminución en los valores del CRT. Sin embargo, el efecto parece que no es acumulable.

De esta forma, para un tramo fijo y homogéneo de carretera, medido con el mismo equipo y sin producirse variaciones en el tráfico pesado, la evolución esperada del CRT del firme desde su puesta en servicio sería la indicada en la *figura 7*. La subida inicial del valor del CRT se debe a la eliminación superficial de la película de ligante que envuelve los áridos, la cual se produce en un plazo que es mayor o menor según el tipo de ligante, dotación e intensidad y características del tráfico pesado.

			Cál. tráfico pesado	Evolución de la resistencia al deslizamiento											
				Longitud total (km)	Marzo 2001	Septiembre 2001	Febrero 2002	Abril 2002	Septiembre 2002	Noviembre 2002	Enero 2003	Febrero 2003	Marzo 2003 (día 6)	Marzo 2003 (día 20)	Abril 2003
Tramo Global 1	Nov. 2000	T1	3												
Tramo Global 2	Nov. 2000	T2	4												
Tramo Global 3	Nov. 2000	T2	3												
Tramo Global 4	Nov. 2002	T2	4												

Tabla 1

La disminución del valor del CRT que sigue a los primeros meses se debe al pulimento de los áridos. El tiempo en el que se llega a su valor de equilibrio fluctuante es menor donde el tráfico pesado es más intenso.

Medida del CRT

El equipo utilizado en este estudio para la medición del CRT es el SCRIM, concebido para realizar medidas de forma continua sin cortes de tráfico. Puesto que sólo se ha empleado un equipo y lo que se pretende estudiar es la evolución del CRT, no se hace necesario el empleo de constantes de calibración.

En la tabla 7 se muestran las fechas de toma de datos del CRT en cada tramo global. Las medidas se realizaron en los dos sentidos de recorrido de cada tramo, pues existía la posibilidad de que hubiera diferencias. También se indica la fecha de puesta en servicio y la categoría de tráfico pesado a la que está sometido cada carril del correspondiente tramo global.

Tratamiento de los datos

Los valores del CRT medidos por el SCRIM se encuentran distanciados entre sí 20 m. Aunque el principio y el final de los tramos globales de ensayo están referidos a sus correspondientes hitos kilométricos, es inevitable que se produzca algún error en el momento de comenzar y finalizar la medida.

Para disminuir el efecto de estos errores fue necesario desarrollar un programa informático que optimizara la posición relativa de las series de datos. El programa debía efectuar la comparación entre las series de valores obtenidos ligeramente desplazadas. Al no existir una serie de valores de referencia, se debían comparar todas las series originales con las series desplazadas entre sí, lo que aumentaba el número de operaciones que debían efectuarse.

El criterio que se adoptó para la

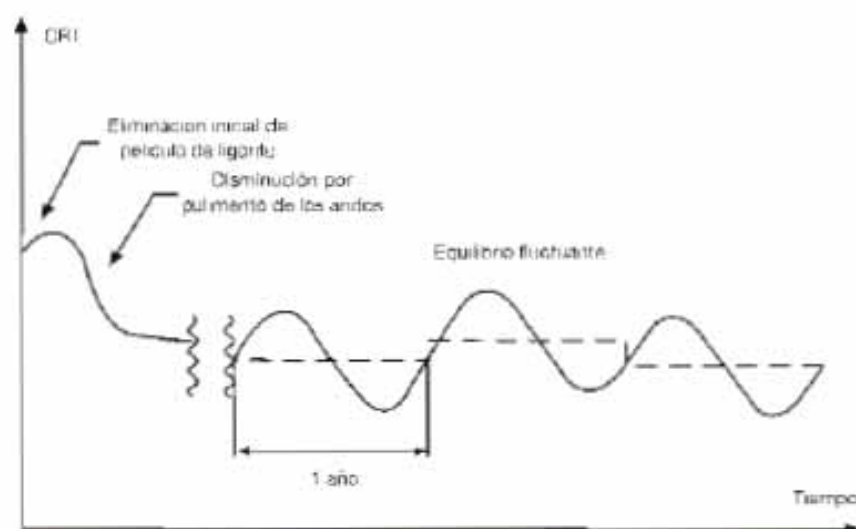


Figura 1

optimización del ajuste fue el de minimizar la suma de los valores absolutos de las diferencias entre los valores de las series de datos tomados dos a dos. La utilización de este indicador se considera suficientemente válida cuando los desplazamientos que se efectúan entre las series de valores no son excesivamente grandes.

Con las series ajustadas se comenzó la identificación de los tramos de comportamiento homogéneo, donde posteriormente se realizaría el estudio de la evolución.

Se comprobó que el CRT era diferente en las distintas mezclas; por

lo que en primer lugar se distinguieron, dentro de los tramos globales, los que tienen diferente capa de rodadura según la información proporcionada por la Administración competente. A continuación, se analizó la homogeneidad de cada uno de los tramos. Esto permitió el establecimiento de los subtramos homogéneos que se utilizaron en el análisis y las zonas de transición intermedias, que no son homogéneas en sus valores del CRT y que no se analizan.

En la figura 2 se muestra la trami-ficación resultante en los cuatro tramos globales. Los tramos homogé-

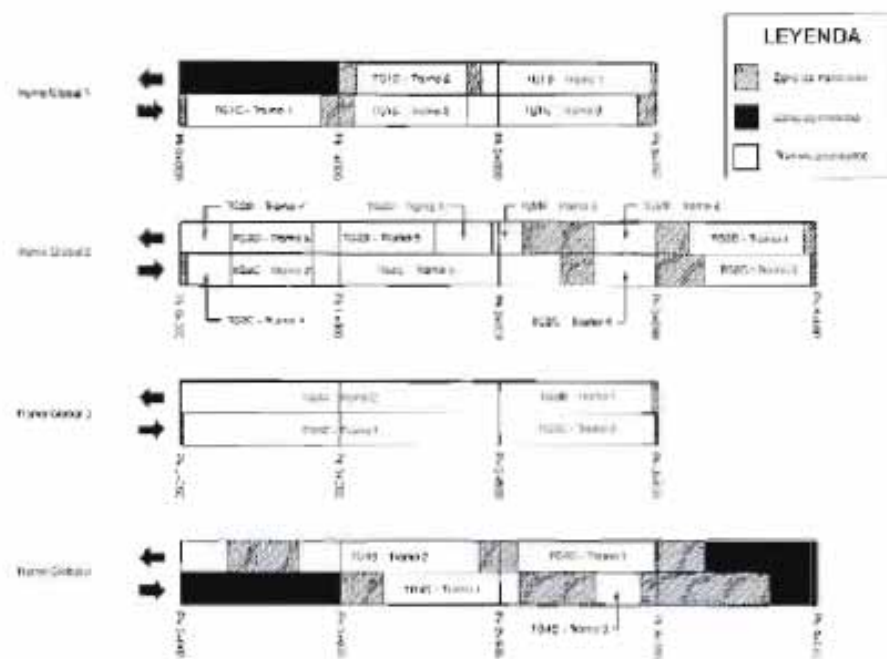


Figura 2

neos obtenidos se han numerado sucesivamente según el sentido de recorrido de la carretera. En la representación se indica el número del tramo global al que pertenecen (TG1, TG2, TG3 o TG4) y el sentido de recorrido de la carretera (Creciente o Decreciente). Por ejemplo, "TG3C-Tramo 2" es el segundo tramo homogéneo que se encuentra en el tramo global número 3 recorriendo la carretera en sentido creciente. En total se han establecido 25 tramos homogéneos.

En los tramos globales 1, 2 y 3 se aprecia la notable correspondencia de los tramos homogéneos en ambos sentidos de recorrido, así como el reducido número de zonas de transición. Se observa que las zonas de transición del tramo global 4 tienen mayor longitud que en el resto de los tramos, y que hay menos correspondencia entre los dos sentidos de recorrido. Quizás esto pueda ser debido al tráfico más agresivo de la carretera, que se comentó anteriormente. En la figura también se han indicado las zonas de los tramos globales 1 y 4 que no fueron medidas en todas las pasadas, y que no se consideró conveniente incluir en el estudio.

A modo de ejemplo, en la figura 3 se muestra una de las representaciones gráficas empleadas para la determinación de los tramos homogéneos. Se observa la correspondencia entre las posiciones de las series de datos correspondientes al tramo global 1 recorrido en sentido decreciente tras el proceso de optimización. En ese caso la tramificación responde principalmente al cambio de mezcla utilizada en la capa de rodadura.

Tras efectuar la tramificación, los resultados obtenidos se almacenaron en una base de datos. Además de los datos necesarios para caracterizar el tramo de medida, se introdujeron los datos de las condiciones ambientales siguientes: pluviometría acumulada en los 10, 20 y 30 días anteriores a la medida, y temperatura media del día de la medición. El

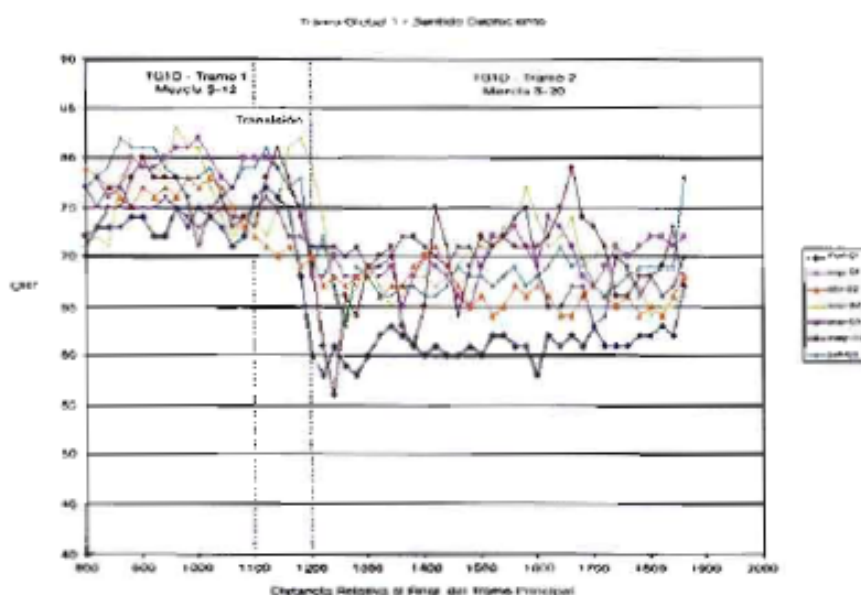


Figura 3

análisis de la evolución de los valores del CRT se realizó con esta base de datos.

Análisis de los datos

Para el análisis de los datos se estudian los tramos globales 1, 2 y 3 agrupados, y por separado del tramo global 4. Esto es debido a que, en los primeros, prácticamente coincide la fecha de puesta en servicio, se han empleado los mismos tipos de mezcla bituminosa y las medidas se realizaron durante un periodo de tiempo mayor (3 años) que en el caso del tramo global 4 (tabla 1).

Así, en la figura 4 se ha representado la media de los valores de CRT en los tramos homogéneos de los tramos globales 1, 2 y 3. Se ha realizado la distinción entre los tramos con pavimento S-12 y S-20. También se han representado los valores de las condiciones ambientales correspondientes.

De igual forma, en la figura 5 se muestra la media de los valores de CRT en los tramos homogéneos del tramo global 4, junto con los valores de pluviometría acumulada y de temperatura media del día de medida.

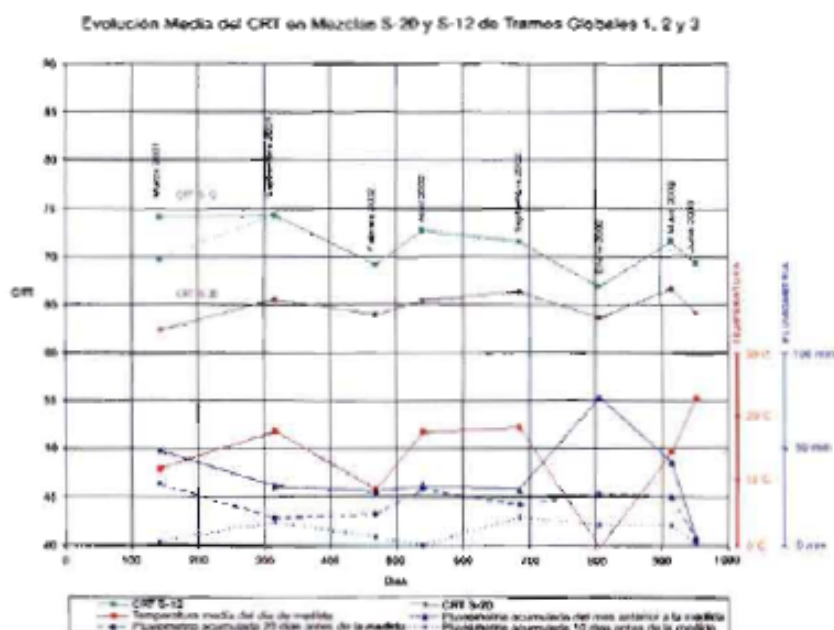


Figura 4

Evolución media del CRT en tramo global 4

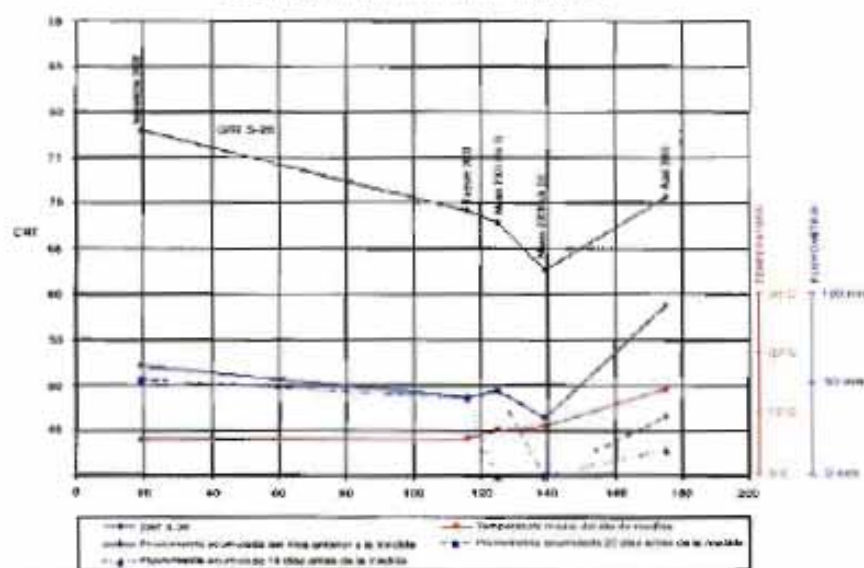


Figura 5

Relación entre la evolución del CRT y la edad del firme

Según se ha expuesto, el valor del CRT en un firme recién ejecutado es más elevado que el valor a largo plazo, y presenta una subida inicial que se debe a la eliminación de la película superficial de ligante que envuelve los áridos. A continuación se produce una disminución de su valor debida al pulimento de los áridos. Esta evolución se ha representado en la figura 1.

En el caso de los tramos globales 1, 2 y 3, en general, las medidas se han realizado transcurridos unos tres meses después de la puesta en servicio de la mezcla, lo que no ha permitido, en la mayoría de los casos, apreciar el repunte inicial del CRT. Una excepción son los tramos TG2C-Tramo 4 y TG2D-Tramo 2, que se ejecutaron con posterioridad al resto (mezcla S-12) para mejorar la regularidad del firme. En la figura 6 puede observarse este comportamiento inicial, donde en estos dos tramos se alcanzan valores de CRT superiores a 85.

En el caso del tramo global 4, la primera medida se realizó dentro del primer mes de la puesta en servicio del firme. En los cuatro tramos homogéneos pudo apreciarse el valor inicialmente más alto del CRT, en todo caso superior a las 75 unidades,

y cuya media se ha representado en la figura 5.

Del análisis anterior se deduce que, para las condiciones a que están sometidos los tramos analizados, el periodo de tiempo que transcurre entre la puesta en servicio de la mezcla bituminosa y el comienzo de las fluctuaciones del valor del CRT es inferior a tres meses. No ha sido posible apreciar ni el momento exacto en que se produce la subida inicial por la pérdida del ligante que envuelve a los áridos, ni cuándo deja de disminuir el valor del CRT por el pulimento de los áridos.

El periodo de tiempo durante el que se ha desarrollado la auscultación experimental (3 años) no permite obtener conclusiones sobre la influencia a largo plazo de la edad del firme en los valores del CRT.

Relación entre la evolución del CRT y la mezcla bituminosa

En este caso sólo es posible realizar la comparación entre los tramos globales 1, 2 y 3, que están ejecutados con mezclas bituminosas en la capa de rodadura S-20 y S-12, y poseen tráficos de características similares. En la figura 4 se observa que la evolución en el tiempo de los tramos con diferentes mezclas es prácticamente paralela, siendo los valores de CRT de los firmes con mezcla S-12 superiores en todo caso a los valores de los firmes con mezcla S-20, aunque estas diferencias parecen atenuarse con el paso del tiempo. No hay suficientes datos disponibles para poder atribuir la diferencia de comportamiento al tipo de mezcla bituminosa.

Relación entre la evolución del CRT y la pluviometría

La experiencia muestra que, en general, existe una relación entre el valor del CRT y las precipitaciones acumuladas en las fechas anteriores a

Evolución del CRT en mezcla S-12 (tramos globales 1, 2 y 3)

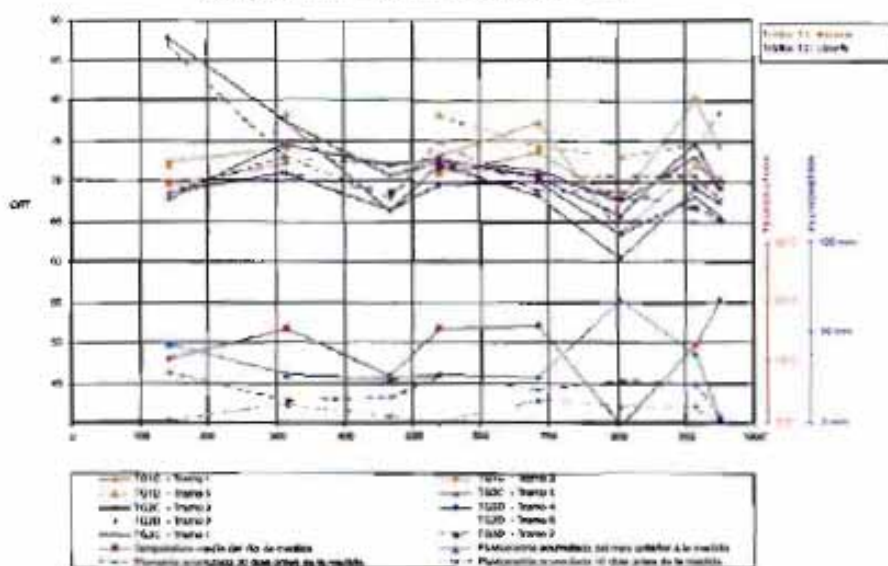


Figura 6

las mediciones. Esa correspondencia se manifiesta habitualmente por un coeficiente de correlación alto al realizar el análisis de regresión entre CRT y pluviometría acumulada. Este hecho se asocia a que, en los periodos secos, el pulimento de los áridos del firme es más elevado, al actuar sobre la superficie un mayor número de partículas finísimas de polvo que se comportan como un abrasivo bajo la acción de los vehículos pesados.

Sin embargo, algunos autores han indicado que este efecto puede no ser apreciable cuando se supere un cierto umbral de pluviometría. Esto se debe a que, una vez que se produzca la limpieza prácticamente total de la superficie, ya no se podrían eliminar más partículas abrasivas, por lo que la mejora en los valores del CRT debida exclusivamente al aumento de la pluviometría sería prácticamente inapreciable.

En la figura 4 se muestra la representación conjunta de la evolución del CRT en los dos tipos de mezcla, correspondientes a los tramos globales 1, 2 y 3 y de la pluviometría acumulada en los 10, 20 y 30 días anteriores a la medida. En este caso no se ha observado durante el periodo de auscultación una evolución del CRT dependiente de la pluviometría. Esta afirmación es consecuencia de que los coeficientes de correlación que se han obtenido en el análisis de regresión han sido muy bajos en general. No obstante, en algún caso estos coeficientes han mejorado al considerar los dos periodos de pluviometría acumulada inferiores a los 30 días.

Una posible explicación sería la de que, en los casos de estudio, a partir de unos 25 mm de lluvia acumulada en 30 días, no tuviera influencia la pluviometría acumulada en los valores del CRT. Esto indicaría que, en casi todas las medidas, se habría alcanzado ese umbral de pluviometría a partir del que las modificaciones en los valores del CRT son debidas a otros factores. Se exceptúa la última medida, de junio de 2003, en que se

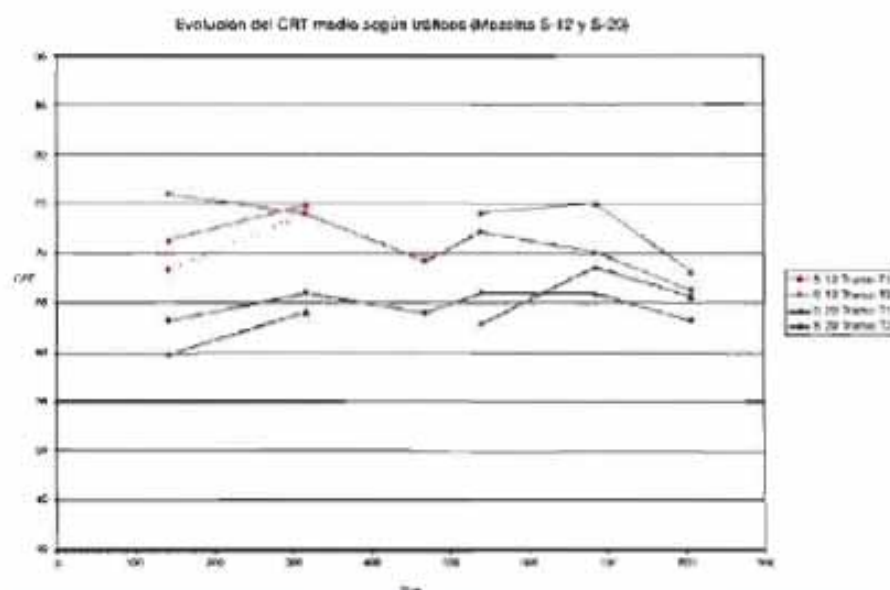


Figura 7

produce una fuerte disminución de la pluviometría acumulada y un descenso del CRT que concuerda con las teorías existentes.

En la figura 5, que muestra la misma representación para el tramo global 4, en principio parece que el comportamiento de las curvas de pluviometría y del CRT es más parecido que el caso anterior, con una coincidencia en valores máximos y mínimos en fechas próximas. Sin embargo, pueden hacerse los siguientes comentarios:

- En primer lugar, hay pocos datos disponibles para poder extraer conclusiones relevantes.

- En segundo lugar, el elevado valor inicial podría deberse exclusivamente a que el CRT se encuentra en la rama inicial máxima que se mostraba en la curva de evolución de la figura 1, pues la medida se ha realizado dentro del mes siguiente a la puesta en servicio, como se ha descrito anteriormente. De este modo, la correspondencia con el repunte de la pluviometría podría ser casual.

- En tercer lugar, las medidas efectuadas en febrero de 2003, y las otras dos medidas realizadas en marzo de 2003, presentan una fuerte tendencia decreciente, a pesar de la cercanía de las fechas de medición, mientras que los valores de la pluviometría acumulada en 30

días prácticamente no se han modificado. Al considerar la lluvia acumulada en 10 y 20 días se observa alguna mejora en el análisis de regresión aunque continúa siendo deficiente. En este caso se observa que la mejor correspondencia se manifiesta para una pluviometría acumulada de 20 días.

Relación entre la evolución del CRT y la temperatura

Como se mencionó con anterioridad, actualmente no existe un consenso sobre la dependencia de los valores del CRT medidos con el SCRIM y la temperatura. Algunos autores defienden que la dependencia de la temperatura de las medidas del Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento (CRD) del péndulo de fricción podría ser extrapolable a las medidas del CRT realizadas con el SCRIM.

De acuerdo con la corrección por temperatura propuesta en la norma de ensayo del péndulo de fricción (NLT-175/98), cuando aumenta la temperatura el valor medido del CRD es menor. Por tanto, existe una relación inversa entre la temperatura y el CRD. Sin embargo, la forma de ejecución diferente del ensayo del péndulo y del SCRIM (NLT-336/92) no garantiza que el comportamiento de las medidas de este último ante las

variaciones de temperatura sea semejante al del péndulo de fricción.

Según la hipótesis expuesta en el apartado anterior, si la pluviometría no condiciona las medidas de los tramos globales 1, 2 y 3 (excepto en la última medida), porque se habría superado un cierto umbral y el resto de condicionantes analizados no se ha modificado (características del tráfico...), debería observarse una relación entre los valores del CRT y la temperatura. En efecto, en la figura 4 se observa la similitud entre la evolución de las curvas del valor del CRT para las mezclas S-12 y S-20 de los tramos globales 1, 2 y 3, y la curva de temperatura media del día de medición. Sin embargo, los cambios que se han observado son opuestos a los que eran de esperar, porque los aumentos de temperatura se corresponden con los aumentos del valor del CRT.

En esa figura puede observarse que las oscilaciones del valor del CRT que se han asociado a los cambios de temperatura son muy parecidas, aunque ligeramente mayores en el caso de la mezcla S-12 (de unas 5 unidades) que en el caso de la mezcla S-20 (de unas 3 unidades).

También se observa que, en el caso de la mezcla S-12, el valor de la primera medida (marzo de 2001) es prácticamente igual al de la segunda (septiembre de 2001); mientras que, por coherencia con lo expuesto, dado que se produce un aumento de la temperatura, el valor de la primera medida debería ser inferior a la segunda. Esto puede justificarse por el hecho de que dos de los tramos con mezcla S-12 (TG2C-Tramo 4 y TG2D-Tramo 2) fueron ejecutados y puestos en servicio con posterioridad al resto de tramos. Por ello, en la fecha de la medida, se encontraban en la rama inicial que muestra la figura 1, y el valor de la media representada en la figura 4 aumenta. En la figura 6 se muestran la representación de todos los datos que se han utilizado para el cálculo de la media de la figura 4, y puede observarse co-

mo esos tramos no se comportan de igual modo en la primera fecha de medida. Se ha representado con línea discontinua la media sin considerar las dos primeras medidas de los tramos TG2C-Tramo 4 y TG2D-Tramo 2.

En el análisis de la dependencia de la temperatura del tramo global 4 (figura 5) se observa una brusca disminución inicial del CRT entre las medidas de noviembre de 2002 y febrero de 2003. Esa fuerte variación se ha atribuido anteriormente al proceso inicial de pulimento de los áridos, por lo que no tendría por qué estar relacionada con las condiciones ambientales. De hecho, aunque se produce una ligera disminución en la pluviometría acumulada que podría ser casual, la temperatura media del día de medición en ambos casos es igual.

La dependencia de la temperatura que se ha descrito es coherente con la hipótesis de que, al superarse el umbral mínimo de pluviometría, no se manifieste la dependencia entre los valores del CRT y la pluviometría acumulada.

de los tramos con tráfico T2 son superiores a los del tráfico T1. Sin embargo, este comportamiento puede ser casual en el caso de la mezcla S-12, porque puede deberse a los elevados valores iniciales del CRT de los tramos TG2C-Tramo 4 y TG2D-Tramo 2; ya que, si no se consideran esos dos tramos, la gráfica del tráfico T2 quedaría por debajo de la del tráfico T1 (representación con línea discontinua). A pesar de esto, en las últimas fechas de medición parece que los tramos con mayor categoría de tráfico pesado (T1) presentan mayores valores de CRT que los tramos de tráfico T2.

De acuerdo con los estudios realizados por el *Transport and Road Research Laboratory (TRRL)* y otros autores, para un firme determinado el valor del CRT aumenta conforme disminuye la intensidad de los vehículos pesados. Sin embargo, en los ensayos realizados en los tramos globales 1, 2 y 3 no se ha observado una relación clara. Esto puede ser debido a los siguientes factores:

- La IMD_p del tramo global 1 es

Tramo	Valor medio del CRT Medida 1	Valor medio del CRT Medida 2	Diferencia porcentual
TG4C-Tramo 1	76,63	75,70	- 1,23%
TG4C-Tramo 2	79,88	79,38	- 0,63%
TG4D-Tramo 1	78,89	78,66	- 0,29%
TG4D-Tramo 2	77,29	76,83	- 0,60%

Tabla 2

Relación entre la evolución del CRT y el tráfico pesado

En este apartado se analiza la relación entre la evolución del CRT y el tráfico pesado sólo en los tramos globales 1, 2 y 3, porque presentan firmes de características semejantes, pero sometidos a diferente tráfico de vehículos pesados.

Así, en la figura 7 se ha representado en cada fecha de medición el valor medio del CRT de los tramos homogéneos que tienen igual categoría de tráfico pesado y tipo de mezcla bituminosa de los tramos globales 1, 2 y 3. Se observa que en las primeras fechas los valores del CRT

de 1010 vp/día por carril; la del tramo global 2 es de 323 vp/día por carril; y la del tramo global 3 es de 402 vp/día por carril. Esto hace que el tramo global 1 tenga la categoría de tráfico pesado T1, mientras que los otros tramos globales tengan la categoría T2, aunque quizá esta diferencia no sea suficiente para que se manifieste este comportamiento.

- Existe la posibilidad que el efecto del tráfico pesado en la disminución del CRT no sea notable en los primeros años de vida del firme, que es cuando se ha realizado esta experimentación.

Efecto de la limpieza en las medidas realizadas con el SCRIM

Como se ha indicado con anterioridad, el tramo global 4 da servicio a una gravera cercana, por lo que sufre un tráfico de vehículos pesados en condiciones de especial agresividad. Así, cuando se decidió incorporarlo a los tramos globales de la experimentación se pensó que podría tener interés realizar alguna medida pasando el equipo dos o más veces, y estudiar el efecto de la limpieza de la primera pasada.

De esta forma, en la primera medida que se realizó en el tramo global 4, en noviembre de 2002, el vehículo realizó dos pasadas consecutivas. Sin embargo, no puede esperarse una correspondencia total entre las medidas puntuales cada 20 m, porque es prácticamente imposible que la medición se vuelva a realizar exactamente en el mismo punto, y que no se produzcan modificaciones de las condiciones locales de medición. A pesar de ello, si la carretera estuviera limpia, debería observarse un comportamiento semejante en las dos pasadas de los tramos homogéneos determinados. Así, al analizar la regresión lineal entre los valores obtenidos en ambas pasadas forzando a que la recta pase por el origen, se obtendría un coeficiente de determinación de valor $R^2 = 0,60$, con una pendiente de la recta muy cercana a la unidad, 0,9931.

En efecto, si se consideran los valores medios del CRT en los cuatro tramos homogéneos del tramo global 4, se observa que la diferencia porcentual entre las medidas, calculadas con las dos primeras cifras decimales, se encuentra comprendida entre el 0,29% y el 1,23%. Estas diferencias porcentuales pueden considerarse despreciables. En la *tabla 2* se muestran los valores medios del CRT y las diferencias porcentuales obtenidas para los tramos homogéneos del tramo global 4.

En el estudio realizado se ha apreciado una notable coincidencia de los valores obtenidos en ambas pasadas,

	Puesta en servicio	Cat. tráfico pesado	Longitud total (km)	Marzo 2001	Junio 2001	Septiembre 2001	Septiembre 2002	Enero 2003	Abril 2003	Mayo 2003
Tramo Global 1	Nov. 2000	T1	3							
Tramo Global 2	Nov. 2000	T2	4							
Tramo Global 3	Nov. 2000	T2	3							
Tramo Global 4	Nov. 2002	T2	4							

Tabla 3

lo que parece indicar que las medidas se han realizado adecuadamente y que las condiciones de limpieza no se han modificado sustancialmente entre las dos pasadas.

Evolución del índice de regularidad internacional

Conceptos generales sobre la evolución del IRI

Para el cálculo del IRI se emplea un modelo matemático que simula la suspensión y las masas de la cuarta parte de un vehículo tipificado que circula a 80 km/h por el tramo de carretera que se pretende evaluar (NLT-330/98). Los datos de entrada del modelo se obtienen del perfil longitudinal de la carretera, medido con un perfilómetro. Como, en general, el perfil no sufre importantes variaciones, a menos que se produzca un brusco aumento del tráfico para el que el firme no estuviera dimensionado o una importante deformación en la explanada, no se espera que en los primeros años de vida de un firme adecuadamente ejecutado se produzca un empeoramiento de su regularidad superficial.

Medida del IRI

Para la medición del IRI se ha empleado un perfilómetro láser tipo K. J. Law T-6500. Se trata de un vehículo lleva instalado en su frontal una barra con sensores láser para medir la regularidad en ambas rodadas.

En la *tabla 3* se muestran las fechas de medida del IRI en cada tramo global. Las medidas se realizaron en los dos sentidos de cada tramo.

También se indica la fecha de puesta en servicio y la categoría de tráfico pesado a que está sometido cada carril del correspondiente tramo global.

No ha sido posible estudiar la evolución del IRI en el tramo global 4 porque, debido a su reciente puesta en servicio, sólo se ha tomado una medida. Por tanto, el análisis de la evolución del IRI sólo se ha realizado para los tramos globales 1, 2 y 3.

Tratamiento de los datos

Se ha calculado el valor del IRI de cada hectómetro. Al igual que sucedía con el CRT, es inevitable que se produzca algún error al referenciar las medidas. Sin embargo, debido a la mayor longitud de cálculo, no se ha considerado necesario realizar un ajuste previo de las series de datos. Además, en general hay una buena correspondencia entre las series obtenidas en las diferentes mediciones, como puede observarse en la *figura 8*.

Para el tratamiento de los datos ha sido necesario establecer tramos homogéneos en los tramos globales. En un caso general, el tipo de mezcla bituminosa empleada no debería ser un condicionante para efectuar la tramificación, que se ha basado en la homogeneidad de las series de valores del IRI, sin considerar inicialmente el tipo de mezcla bituminosa de la capa de rodadura. No obstante, la ejecución de tramos con mezcla bituminosa S-12 en los tramos globales 1, 2 y 3 tuvo por objeto la corrección de las irregularidades de la carretera ya ejecutada con mezcla

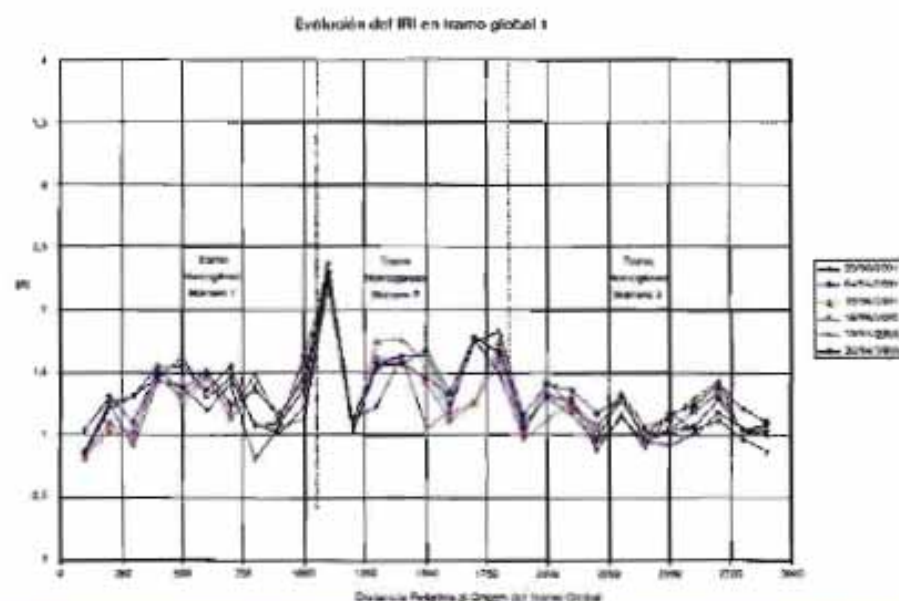


Figura 8

S-20. Por este motivo, existía la posibilidad de que los tramos realizados con mezcla S-12 presentaran valores del IRI diferentes de los del resto de la carretera.

El proceso de tramificación dio lugar al establecimiento de 18 tramos homogéneos, y sus correspondientes transiciones dentro de los tramos globales 1, 2 y 3. Como ejemplo, en la figura 8 se muestra la tramificación realizada en el tramo global 1. Los tramos homogéneos números 1 y 3 aproximadamente coinciden con zonas ejecutadas con mezcla S-12, teniendo mayor regularidad que el tramo homogéneo número 2.

Análisis de los datos

El análisis de la evolución de los valores del IRI en los tramos homogéneos establecidos ha mostrado, como era de esperar, un comportamiento estable de manera generalizada. No se han observado variaciones dependientes de las condiciones ambientales.

Los cambios que se han observado en las medidas pueden considerarse despreciables. Posiblemente se han debido a ligeras modificaciones en la posición de las medidas del perfilómetro. Además, tales cambios fluctúan alrededor de un valor intermedio, lo que es una muestra adicional de su estabilidad.

También se ha observado que, en general, en los tramos ejecutados con mezcla S-12 la regularidad superficial es mejor que en los de mezcla S-20. Este hecho, según se ha mencionado en el apartado anterior, se debe a que las mezclas S-12 se pusieron en obra para mejorar la regularidad de determinados tramos de carretera. No sería correcto deducir que, en general y en iguales condiciones de ejecución, unos tipos de mezcla bituminosa presentan mayor regularidad superficial que otros.

Como ejemplo, en la figura 9 se ha representado la evolución del IRI

en el tramo global 1, utilizando los valores y la tramificación de la figura 8. El comportamiento de este tramo global puede considerarse representativo de los restantes.

La figura 8 y la figura 9 también permiten hacer una reflexión sobre la necesidad de que los tramos en los que se estudie la regularidad superficial sean homogéneos. Esto es debido a que, en general, las exigencias sobre regularidad superficial de los pliegos de prescripciones dan el porcentaje máximo de hectómetros del tramo ensayado que pueden tener valores del IRI superiores a un determinado límite. Así, si el tramo de ensayo no es homogéneo, dependiendo de si se incluyen o no ciertos hectómetros, podría forzarse la aceptación o el rechazo de la unidad de obra.

Conclusiones

El análisis de los datos que se ha realizado sobre la evolución del CRT y del IRI ha permitido deducir las conclusiones que se resumen a continuación.

Conclusiones sobre la evolución del CRT

Parece corroborarse que el valor del CRT de un firme recién ejecutado es más elevado y que se produ-

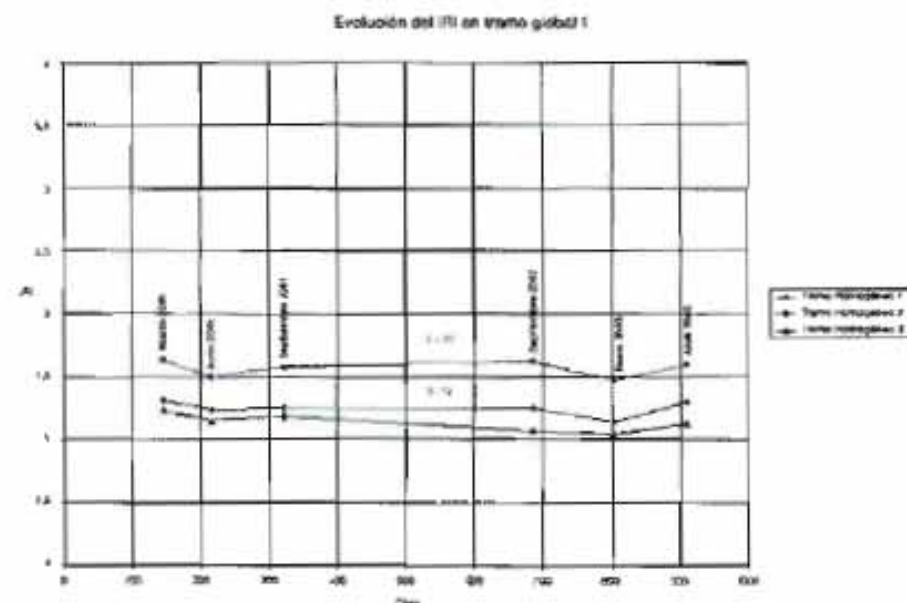


Figura 9

ce una disminución de su valor inicial dentro de los tres primeros meses desde la puesta en servicio. Este comportamiento se ha observado en los tramos analizados independientemente del tipo de mezcla bituminosa.

El análisis realizado parece indicar que la pluviometría deja de influir en las oscilaciones del CRT cuando se supera un cierto umbral. Se cree que puede deberse a que sería despreciable la eliminación del polvo mineral que se tendría a partir de dicho umbral, pues no se lograría mejorar las condiciones de limpieza. El umbral se situaría, para los casos estudiados (tramos globales 1, 2 y 3), en unos 25 mm de pluviometría acumulada los 30 días anteriores a la medida. Este umbral puede variar en función del periodo de tiempo considerado para calcular la precipitación acumulada.

Como consecuencia de lo anterior, y a igualdad de tráfico, las oscilaciones del CRT que se producen en los firmes en condiciones de limpieza suficiente deberían estar influenciadas fundamentalmente por variaciones ambientales, de las que la más importante podría ser la temperatura. Esto se ha observado en los tramos ensayados, donde parece existir cierta relación entre las variaciones de la temperatura media del día de medida y el valor del CRT de los tramos homogéneos. Las variaciones observadas son muy parecidas, aunque ligeramente mayores en el caso de la mezcla S-12 (de unas 5 unidades) que en el caso de la mezcla S-20 (de unas 3 unidades).

Conclusiones sobre la evolución del IRI

En los tramos homogéneos en que se ha analizado la evolución del IRI se ha observado un comportamiento estable generalizado, de manera que los datos sólo han fluctuado ligeramente. Los cambios observados, que se pueden considerar despreciables, posiblemente son debidos a ligeras modificaciones en la

posición de comienzo y transversal del perfilómetro.

Futuras líneas de investigación

Tras realizar el estudio sobre la evolución de la fricción y la regularidad de los firmes en condiciones reales en la zona de Madrid, quedan abiertas las líneas de trabajo e investigación que se mencionan a continuación.

Coeficiente de Rozamiento Transversal

- El número de mediciones realizadas con el SCRIM no ha sido suficiente para apreciar el momento exacto de la subida inicial del CRT motivado por la pérdida del ligante que envuelve a los áridos, ni cuándo deja de disminuir su valor por el pulimento de los áridos. Deberían programarse una serie de ensayos específicos en tramos recién ejecutados para apreciar cuándo se producen estos fenómenos, y si dependen de otros factores.

- El periodo de tiempo durante el que se ha desarrollado la auscultación experimental no ha permitido obtener conclusiones sobre la influencia a largo plazo de la edad del firme en los valores del CRT. Se debería continuar tomando datos en los cuatro tramos globales para poder realizar un estudio de esas características.

- La experiencia constata que, en general, existe cierta dependencia entre la evolución del CRT y la pluviometría. Sin embargo, con los datos utilizados en esta experimentación, no se ha podido apreciar claramente. Se ha indicado que esto ha podido estar motivado por valores relativamente elevados de la lluvia acumulada en diferentes periodos de tiempo anteriores a las fechas de medida, de manera que se ha superado un cierto umbral a partir del que la pluviometría no parece influir en el CRT. Debe estudiarse con detalle este hecho, realizando una campaña de medidas suficientemente amplia para contrastar diversos casos, e intentar cuantificar ese umbral, así co-

mo analizar su dependencia de otros factores.

- El análisis de los tramos homogéneos en condiciones de limpieza suficiente parece indicar cierta relación entre los valores del CRT y la temperatura. Tendría interés continuar las investigaciones para confirmar estas observaciones, así como estudiar esta relación en otras mezclas bituminosas y bajo otras condiciones de tráfico.

- Las condiciones de realización del ensayo no han permitido ver el grado de influencia del tráfico pesado en los valores del CRT. Este hecho se ha estudiado en otros países, pero las diferencias en las cargas de los vehículos y en los tipos de firme que se emplean hace que las conclusiones no sean claramente extrapolables. Sería interesante realizar un estudio de mayor detalle en nuestro país.

Índice de Regularidad Internacional

- Durante el periodo de estudio, superior a los dos años, no se ha observado una disminución de la regularidad superficial de los tramos globales. Para observar este hecho se debería prolongar la campaña de auscultación. No obstante, considerando la estabilidad de las medidas de los dos primeros años, parece que sería suficiente realizar una pasada anual, a menos que se apreciase una brusca reducción de la regularidad superficial.

Agradecimientos

Los autores quieren mostrar su agradecimiento a Francisco Achútegui Viada, Presidente del Comité de Características Superficiales de Pavimentos (C1) de la Asociación Técnica de Carreteras de España, dentro de cuyas actividades se ha desarrollado este trabajo; así como a Juan Antonio de la Riva Francos, de la Comunidad de Madrid, por su colaboración y la información proporcionada, y a Luis Ortega Recio, de GEOCISA, empresa que se ha encargado de la toma de datos. ■