

# Análisis de modelos de comportamiento temporal de la resistencia al deslizamiento en pavimentos

## Assesment of time-dependant models of pavement skid resistance

Hernán de Solminihaç\*, Tomas Echaveguren\* y Marcelo Bustos\*\*

\* Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, CHILE

\*\*Universidad Nacional de San Juan, ARGENTINA  
tehaveguren@ing.puc.cl

Fecha de recepción: 13/ 07/ 2006  
Fecha de aceptación: 17/ 11/ 2006  
PAG. 157 - 168

### Resumen

La resistencia al deslizamiento es un indicador del grado de adherencia de un pavimento. Se ve afectada por las características del pavimento, condiciones ambientales, de tráfico y geométricas. Estos cambios se manifiestan con distinta intensidad en el tiempo dependiendo de la forma en que interactúen los factores antes mencionados. La evidencia empírica muestra que la resistencia al deslizamiento sigue una ley de decaimiento monótona decreciente y asintótica. Este comportamiento fue explicado conceptualmente por Diringer y Barros (1990). Ellos identificaron dos fases principales en la vida de un pavimento: una transiente dominada por una pérdida acelerada de la resistencia al deslizamiento y una permanente, marcada por una oscilación periódica de la resistencia al deslizamiento alrededor de una resistencia al deslizamiento de equilibrio. En este trabajo se analizan tres modelos de comportamiento de resistencia al deslizamiento, representativos de los existentes en la literatura. El objetivo del trabajo es identificar fortalezas y debilidades que orienten la formulación de modelos nuevos. Particularmente, se analizó el modelo absoluto de la Highway Research Board (HRB), el modelo incremental HDM-4 y el modelo estacional de Jayawickrama y Thomas (1998). Se concluyó que los tres modelos presentan debilidades. Los modelos HRB y HDM-4 no relacionan sus parámetros y tipo de variables con tipos de pavimento y sus características en forma explícita con lo cual ganan en generalidad pero pierden capacidad pronóstica. El modelo de Jayawickrama y Thomas depende fuertemente de las condiciones ambientales de medición. Esto dificulta el cálculo de la resistencia al deslizamiento de equilibrio y la calibración del modelo.

Palabras Clave: Pavimentos, modelo dependiente del tiempo, oscilación estacional, resistencia al deslizamiento, pulimiento

### Abstract

*Skid resistance is an indicator of the adherence provided by a pavement. It is affected by the physical characteristics of the pavement such as environmental conditions, traffic and road geometry. The effects of these variables over the skid resistance vary over time on how each of these interacts between one another. The empirical evidence shows that skid resistance decline monotonic and asymptotically over time. This behavior was conceptually developed by Diringer and Barros (1990). Two phases over the pavement life were defined by them: a transient phase presenting an accelerate loss of skid resistance over time and a permanent phase, where an equilibrium skid resistance level is reached and a periodical oscillation is observed near this value. Three representative models of skid resistance temporary behavior were studied in this paper. The objective of the present study is to analyze the strengths and weaknesses of the skid resistance time-dependant models, in order to formulate new predictive models based on them. This study considers the Highway Research Board (HRB) absolute model, the HDM-4 incremental model and the seasonal model developed by Jayawickrama and Thomas (1998). The study concluded that the three analyzed models present weaknesses that can be improved. Particularly, the HRB and HDM-4 models do not correlate explicitly their variables and parameters to the type and characteristics of the pavement. With this, models lose predictive capacity although they gain generality. The Jayawickrama and Thomas model is strongly dependant on the environmental measurement conditions. For this reason, is difficult to estimate accurately the tendency of skid resistance and to calibrate the model.*

*Keywords: Pavements, time dependant model, seasonal oscillation, skid resistance, polishing*

## 1. Introducción

La resistencia al deslizamiento (RD) es un indicador del grado de adherencia que ofrece un pavimento. Está influida por las características del pavimento, por condiciones ambientales, de tráfico y geométricas. Estos cambios se manifiestan con diversa

intensidad en el tiempo.

Resultados de diversos estudios empíricos muestran que la resistencia al deslizamiento sigue una ley de decaimiento monótona decreciente y asintótica. Autores tales como Hosking (1972) y Salt (1977),

identificaron además un comportamiento oscilatorio de la resistencia al deslizamiento en torno a una tendencia que sigue un patrón acorde con la oscilación climática. Diringer y Barros (1990) explican que tanto la tendencia como la oscilación de la resistencia al deslizamiento puede conceptualizarse según un modelo de dos etapas: una transiente propia de los primeros años de vida del pavimento y una permanente propia de edades superiores a los 5 años.

La modelación de la resistencia al deslizamiento puede realizarse mediante tres clases de modelos: estáticos, variacionales y dependientes del tiempo. Los modelos estáticos no dependen del tiempo y describen fenómenos asociados con la dinámica del automóvil, sus maniobras y la interacción neumático – pavimento<sup>1</sup>. Los modelos variacionales explican el efecto sobre la resistencia al deslizamiento de factores tales como la temperatura, presencia de polvo en la superficie del pavimento, profundidad y tipo del dibujo del neumático. Los modelos dependientes del tiempo o temporales, reúnen características de modelos variacionales y de modelación estática para explicar los cambios en el tiempo de la resistencia al deslizamiento.

Entre los modelos temporales destacan dos corrientes de modelación: una probabilística, en la cual se aplican conceptos de diseño estocástico al análisis. Y una determinística que utiliza el análisis de regresión para formular modelos incrementales, semi incrementales o absolutos. Una clasificación de modelos temporales representativos se presenta en la Tabla 1.

Existen diversos ejemplos de modelos estáticos y variacionales. En contraparte, son escasos los estudios que analizan el comportamiento temporal de la resistencia al deslizamiento. Estudios de la década del 80 como los de Burchet y Rizenbergs (1980), Hill y Henry (1981) y Collony (1985) han analizado el fenómeno oscilatorio superpuesto al comportamiento tendencial, básicamente con modelos absolutos en base a observaciones empíricas

y correlaciones agregadas.

McDonald et al. (2003) recientemente emplearon un modelo energético para explicar el comportamiento estacional de la resistencia al deslizamiento. Sin embargo, no llegaron a formular un modelo propiamente tal, sino que más bien a describir un comportamiento a partir de la observación de variables climáticas, de tráfico y tipo de pavimento. En todos estos casos, un factor común a los estudios analizados es que pocos de ellos estudian la capacidad predictiva de sus modelos, llegando únicamente hasta la etapa de calibración.

Otra corriente de investigación más centrada en análisis de laboratorio, sostiene que el comportamiento inicial de una superficie de pavimento se explica fundamentalmente por el pulimiento de los agregados. Dahir et al. (1976), Delalande (1992), Diringer y Barros (1990), Jellie (2003) y Liang (2003), han estudiado este comportamiento mediante ensayos de pulimiento acelerado. Con excepción de Roe (1999), no se ha contrastado con la evidencia empírica. Para ello, es necesario realizar seguimiento de largo plazo en tramos testigo, o bien recurrir a ensayos de desgaste para diversos diseños de superficies en forma controlada.

El objetivo de este artículo es realizar un análisis de los modelos de comportamiento temporal de la resistencia al deslizamiento tanto desde el punto de vista de su conceptualización como desde su formalización matemática. Para ello, se discute el modelo conceptual del comportamiento de la resistencia al deslizamiento y se analizan los factores que explican su variabilidad. Posteriormente se describen los diversos enfoques de modelación posibles de emplear y se analizan los tres modelos más representativos del estado del arte: El modelo absoluto de la Highway Research Board (Gaete et al., 1988), el modelo incremental de HDM – 4 (Cenek y Jamieson, 2005) y el modelo estacional de Jayawickrama y Thomas (1998).

Tabla 1. Clasificación de modelos de comportamiento de resistencia al deslizamiento según tipo de formulación

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Modelo
Temporal	Probabilísticos	Incremental		· Modelo Markoviano de Fülöp et al (2000)
		Semi Incremental		· Modelo de HDM – 4 (Cenek and Jamieson, 2005) (1)
	Absolutos	Tendencial		· Modelo de Hill y Henry (1978) · Hill y Henry (1978) · Colony (1985) · Roe (1999)
			Estacional	· Burchet y Razenbergs (1980) · Diringer y Barros (1990) · Jayawickrama y Thomas (1998) · McDonald et al (2003).
		Mixto		· Modelo HRB (Gaete et al., 1988) (2)

(1) HDM - 4: Highway Development and Management; (2) HRB: Highway Research Board

<sup>1</sup> Ejemplos de este tipo de modelos pueden verse en Golden (1981) y Delanne (1992)



## 2. El comportamiento en el largo plazo

El comportamiento en el tiempo de la RD puede idealizarse como un proceso aleatorio en el cual interactúan una componente tendencial y otra oscilatoria. La primera componente describe un proceso de largo plazo. En este proceso se produce un decaimiento del valor de la RD desde el momento mismo en que se habilita al tránsito un pavimento hasta estabilizarse (Diringer y Barros, 1990). En esta estabilización, denominada estado de equilibrio, la RD se ve solo afectada por la oscilación estacional.

La componente oscilatoria en cambio, permite describir las variaciones estacionales en el valor de RD producto de los cambios en la textura, que es un comportamiento de mediano y/o corto plazo. De este modo, la RD puede representarse a través de la superposición de las componentes tendencial y oscilatoria del proceso. Ambas etapas pueden considerarse como períodos transiente y permanente respectivamente. Skerrit (1994) las denomina fase de pulimiento y de equilibrio.

La Figura 1 ilustra el fenómeno. En la primera fase (pulimiento) se produce la degradación de la superficie del agregado; En la segunda fase (de equilibrio), el valor de RD está influido básicamente por la estacionalidad.

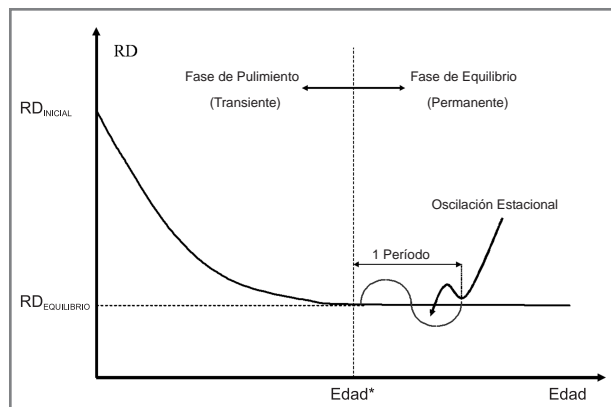


Figura 1. Comportamiento de la Resistencia al Deslizamiento según la edad del pavimento. (Yeh et al., 1981; Diringer y Barros, 1990; Skerrit, 1994; Kokkalis, 1998)

### 2.1 La Fase de Pulimiento

En los primeros años de puesta en servicio de un pavimento o de un tratamiento superficial, se produce un proceso de pulimiento de los agregados que tiene por consecuencia la pérdida de micro textura. Esta pérdida se produce por tres causas: pulimiento, abrasión e intemperización. En contraparte, las fuerzas horizontales

ejercidas por los neumáticos de los vehículos, pueden fracturar la superficie de los agregados con lo cual es posible que exista un rejuvenecimiento que se traduce en una ganancia de micro textura. Esto puede dar lugar a un comportamiento oscilatorio de ganancia / pérdida de micro o macro textura.

La pérdida de micro textura reduce los puntos de contacto entre el neumático y el pavimento con lo cual se reduce también la RD. Este comportamiento puede verse retardado o acelerado dependiendo de las características mineralógicas de los agregados, puesto que son éstas las que determinan su dureza y por tanto su resistencia a la abrasión (Dupont y Tourenq, 1993; Liang, 2003).

La fase de pulimiento ha sido estudiada fundamentalmente en laboratorio mediante ensayos de pulimiento acelerado y mediciones de RD. Estudios de laboratorio desarrollados con métodos de pulimiento mecánico y por proyección, muestran que el proceso de pulimiento sigue una ley de decaimiento exponencial respecto del tiempo (Dahir et al., 1976; Parcells et al., 1982; Diringer y Barros, 1990; Delalande, 1992; Hosking, 1992; Jellie, 2003; Liang, 2003).

Diringer y Barros (1990) calibraron un modelo que permite predecir el valor de RD medido con Péndulo Británico para diferentes grados de pulimiento. En el modelo, la fase de pulimiento termina cuando el valor de BPN alcanza el valor de pulimiento mínimo (PV). Este valor representa la RD de equilibrio.

Skerrit (1994) verificó empíricamente este comportamiento en un estudio desarrollado en carreteras de Nueva York mediante un seguimiento iniciado desde la apertura al tránsito. En los casos que analizó, verificó un descenso del valor de RD en un período de 24 meses. Sin embargo, no llegó a determinar el inicio de la fase de equilibrio. Anteriormente, en 1972 el TRRL había determinado que el Valor de Pulimiento de los Agregados (PSV: Polishing Stone Value en inglés) es función semilogarítmica y monótona creciente del tránsito acumulado por pista (Salt, 1977; Hosking, 1992; Jellie, 2003).

Liang (2003) por su parte, analizó en laboratorio el comportamiento de la RD respecto del pulimiento de los agregados en muestras diseñadas con agregados de diferentes características mineralógicas. Obtuvo similares resultados a los obtenidos por Diringer y Barros, a excepción de la formulación matemática de la ley de comportamiento.



## 2.2 La Fase de Equilibrio

En la fase de equilibrio el pulimiento de los agregados se estabiliza, de modo tal que la RD resultante corresponde al mínimo valor que alcanza la superficie del pavimento. Este valor mínimo de RD se denomina Resistencia al Deslizamiento de Equilibrio (RDE) (Diringer y Barros, 1990). Si se analiza desde el punto de vista de un proceso estacionario y ergódico Un proceso es estacionario cuando sus propiedades estadísticas no cambian en un salto temporal. Un proceso es ergódico<sup>2</sup>, corresponde al valor esperado de RD en el tiempo, el cuál se ve afectado principalmente por variaciones estacionales de mediano y largo plazo (Diringer y Barros, 1990; Kennedy et al., 1990; Kokkalis, 1998).

## 3. Variabilidad de la resistencia al deslizamiento

Los factores causales de los comportamientos tendencial y oscilatorio de la resistencia al deslizamiento pueden agruparse en ambientales, del tráfico, del pavimento y geométricos (de Solminihaç y Echaveguren, 2002). A continuación se describen cada uno de ellos.

### 3.1 Factores Ambientales

Convergen en este factor tres efectos: el efecto térmico, el efecto de las precipitaciones y el efecto del intemperismo. Estos tres factores exhiben un patrón de comportamiento oscilatorio relacionado con la estacionalidad climática. Por lo tanto, el efecto sobre el pavimento también exhibe un patrón oscilatorio.

- Precipitaciones. Este efecto puede verse en una ventana de tiempo reducida y en el largo plazo. El primer caso está relacionado con el efecto inmediato de las precipitaciones sobre el pavimento que tiende a reducir bruscamente y durante corto tiempo la RD. En el segundo caso las precipitaciones siguen un comportamiento estacional por lo cual el pavimento se ve sometido a un ciclo oscilatorio de limpieza por precipitación que modifica la RD también en forma oscilatoria.
- Temperatura. La acción de la temperatura se manifiesta a través de la temperatura del aire, del pavimento y del neumático. Existe evidencia empírica que la variación térmica en el corto y en el largo plazo afecta directamente a los materiales que entran en contacto y deslizan lo

que se manifiesta en alternaciones al valor de RD. La temperatura del pavimento aumenta conforme aumenta la temperatura ambiental (En Chile en verano la diferencia es de alrededor de 20 °C), con lo cual los valores medidos de RD aumentan en magnitud. Esto se debe a que existe transferencia de calor hacia el neumático con lo cual se deforma y aumentan los puntos de contacto.

### 3.2 Efecto del Tráfico

El tráfico induce un efecto que en conjunto con los factores ambientales y las características superficiales del pavimento modifican físicamente el microperfil del pavimento. Estos efectos se traducen en pulimiento, fractura y desprendimiento de agregados. Mientras que los primeros afectan la micro textura, los segundos afectan la macro textura. El pavimento está expuesto durante toda su vida útil al tráfico, sin embargo es en los primeros años de su vida en donde estos efectos son más acentuados. Particularmente, en pavimentos asfálticos contribuye a la pérdida de RD por efecto del tráfico la relación de vacíos empleada en el diseño, la cual favorece la compactación del pavimento reduciendo progresivamente la macro textura hasta el momento de máxima compactación.

### 3.3 Factores asociados al pavimento

Estos factores conjugan las características de los materiales empleados, terminación de la superficie, condición de la superficie y geometría del trazado vial. En conjunto, determinan la susceptibilidad del pavimento a ser alterado por las condiciones ambientales y de tráfico.

- Materiales empleados. Los materiales empleados están asociados al tipo de pavimento. Un aspecto común a ellos es el material agregado que se utiliza en la superficie. Por un lado su composición mineralógica determinará su dureza por tanto su susceptibilidad al pulimiento y/o fractura lo cual afecta a la micro textura. Por otro, el tamaño máximo y la granulometría de los agregados determinarán la macro textura del pavimento.
- La terminación de la superficie depende de su diseño. En pavimentos de hormigón la tendencia es a utilizar superficies ricas en cemento y con tamaños máximos de agregados bajos llegando a pavimentos con una

<sup>2</sup> Un proceso es estacionario cuando sus propiedades estadísticas no cambian en un salto temporal. Un proceso es ergódico cuando una ventana del mismo es representativa de todo el proceso. Si un proceso es ergódico, también es estacionario (Newland, 1993).

## 4. Analisis de modelos

macro textura baja. En la práctica la macro textura es impuesta al pavimento de hormigón mediante peinado de la superficie o cepillado, lo cual puede actuar sinérgicamente con la susceptibilidad al pulimiento y fractura del agregado. En superficies asfálticas, la terminación de la superficie depende de la calidad constructiva, de las técnicas y tipo de solución empleados. Mezclas ricas en asfalto con agregados de tamaños máximos pequeños y lisos, producen micro y macro texturas bajas. Al aumentar el porcentaje y número de caras fracturadas de los agregados y su tamaño máximo aumenta inmediatamente la micro y macro textura.

- La condición de la superficie tiene relación con la presencia y/o ausencia de materiales contaminantes en la superficie del pavimento. Se entiende por material contaminante a cualquier material distinto de los constitutivos del pavimento depositado en su superficie en cantidad tal que modifica sustancialmente la micro y macro textura del pavimento. Por ejemplo, en caminos secundarios en donde su rol principal es de acceso a la propiedad adyacente, es común encontrar polvo y barro proveniente de empalmes a caminos de tierra o ripio, expandidos por el tráfico de vehículos y de maquinaria agrícola. Se ha observado que estos contaminantes reducen los puntos de contacto entre neumático y pavimento, resultando en un menor valor de RD.
- La condición geométrica refleja el impacto de la concentración de ciertos tipos de maniobras de los vehículos sobre la textura del pavimento. En zonas en donde la maniobra de frenado en recta es preponderante, es probable que exista un mayor pulimiento y/o fractura de los agregados por acción mecánica. En zonas curvas, puede que exista una tendencia al aumento del pulimiento desde el interior hacia el exterior de la curva. La presencia de puntos bajos o con baja pendiente transversal y longitudinal, en conjunto con baja micro y macro textura, también determinan una baja fricción.

Los factores antes mencionados afectan en forma conjunta el valor de la RD. Para calibrar un modelo de corte temporal, es necesario conocer la importancia relativa de cada uno de estos factores, la posibilidad real de medirlos y separar los factores que afectan positiva y negativamente el valor de RD.

De la Tabla 1 se seleccionaron tres modelos representativos del estado del arte. El modelo absoluto de la HRB, el modelo incremental de HDM - 4 y el modelo estacional de Jayawickramma y Thomas. Estos modelos reúnen conceptualmente la mayor parte de los aspectos tratados en las secciones 2 y 3 de este trabajo. Por tanto, el estudio de estos modelos permite obtener conclusiones importantes de considerar si se desea modelar el comportamiento de la RD en el tiempo.

### 4.1 El Modelo de la HRB

La Highway Research Board de Estados Unidos, desarrolló un modelo que considera la fase de pulimiento y de equilibrio en una sola ecuación, incorporando desde la fase de pulimiento, la oscilación estacional (Gaete et al., 1988). Matemáticamente, el modelo suma la componente tendencial y la oscilatoria. La primera muestra el comportamiento de largo plazo en ausencia de singularidades, la segunda incorpora las oscilaciones estacionales. De este modo, el modelo muestra un comportamiento oscilatorio en torno a una línea de tendencia. Considerando conjuntamente las componentes tendencial y oscilatoria, resulta una curva de tipo senoidal, de tendencia decreciente en el tiempo.

$$RD(t) = (a \cdot b^t + c) + (d \cdot \text{sen}(\pi/2 + 2\pi t)) \quad (1)$$

La fase de pulimiento está descrita por el término "a\*b<sup>t</sup>" y la transición oscilatoria por el término "d\*sen(π/2 + 2πt)". El valor de RDE está representado por la constante "c". La constante "a" es un valor igual a la RD inicial menos "c". La constante "b" describe el grado de pulimiento y es menor que 1 para que exista convergencia del modelo. "t" representa el tiempo en años. La variable "d" es la amplitud de la variación estacional de RD alrededor del valor tendencial de RD, definida como el promedio de las diferencias de RD medidas en invierno y verano.

El modelo no proporciona antecedentes acerca de cómo estimar el valor de "c". Sin embargo, teniendo en cuenta los planteamientos de Diringer y Barros (1990), es posible determinarlo en función del valor del pulimiento de los agregados, de modo tal que represente la mínima RD que puede alcanzar un pavimento según el tipo de agregado empleado.

Las ecuaciones del modelo del HRB no incorporan el efecto del volumen de tránsito sobre la variación de la RD. La disminución inicial de la RD ocurre por efecto del paso del tiempo, pero es razonable suponer que distintos volúmenes de tránsito pueden

incidir significativamente en la pérdida de RD.

Por otra parte, el modelo no considera las posibles diferencias entre estaciones a lo largo del tiempo. En la práctica la variación estacional de invierno y verano no necesariamente presentan la misma amplitud todos los años. La amplitud de la RD puede ser mayor en los primeros años de servicio, ir disminuyendo paulatinamente hasta estabilizarse, para finalmente mantener una amplitud constante que coincide con la curva de la componente anual del modelo.

Este modelo se analizó sensibilizando tres

parámetros importantes: el valor de RD inicial, el valor de la RD de equilibrio (RDE) y la amplitud de la oscilación estacional. Primeramente se asumió un valor de RD de equilibrio de 0.5 y una constante de pulimiento igual a 0.8. Se analizaron dos valores de RD inicial: 0.7 y 1.2. El resultado del análisis se muestra en la Figura 2a. Posteriormente se sensibilizó la RDE con valores de 0.5 y 0.7. La gráfica correspondiente es la 2b. Finalmente, se sensibilizó la amplitud considerando valores de amplitud de onda de 0,1 y 0,2. La gráfica resultante es la 2c. A partir del análisis se obtuvo la siguiente conclusión:

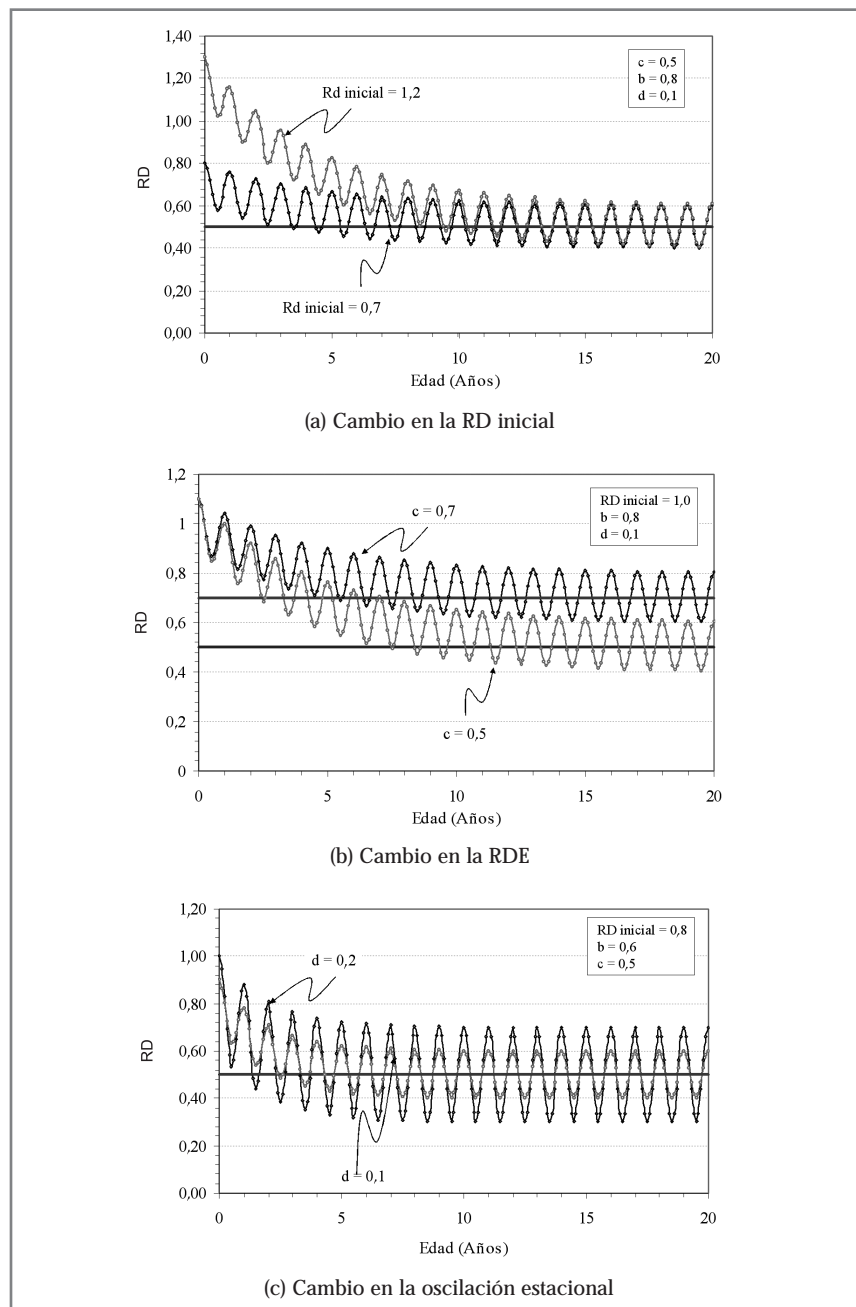


Figura 2. Sensibilización del modelo HRB respecto de la RD inicial, de la RDE y de la oscilación estacional



En presencia de valores altos de RD inicial se produce una mayor tasa de pérdida de RD. Esto se debe a que el modelo establece un valor de RDE constante correspondiente al parámetro “c”. Posteriormente existe una estabilización en torno al valor de RDE que se logra aproximadamente en el segundo año. Físicamente, esto cobra sentido en caso que para diferentes tipos de superficie de pavimentos, se utilicen agregados con igual susceptibilidad al pulimiento. Lo normal es que en cada caso además de valores de RD inicial distinto, cada pavimento posea una RDE distinta, según el tipo de agregado. En tal caso, la tasa de pérdida de fricción en los primeros años es propia de cada pavimento.

A partir del análisis del modelo HRB se propone revisar en profundidad las hipótesis que lo sustentan, debido a dos razones:

- En el análisis numérico se determinó que el modelo requiere una mejor especificación de la RD de equilibrio (valor “c”) de manera que exista una relación explícita entre la RD inicial y RD de equilibrio de acuerdo al tipo de agregado presente en el pavimento.
- El modelo asume que la progresión de RD es un proceso estacionario y ergódico, lo cual permite asumir que el valor “c” es independiente del tiempo y por tanto permite construir la oscilación estacional en torno a ese valor como una superposición de efectos. Antecedentes de ensayos de laboratorio encontrados en la literatura muestran que tal hipótesis no es adecuada. Los experimentos de pulimiento acelerado desarrollados por Liang y Diringer y Barros, muestran que el valor de RD de equilibrio (valor “c”) representa el límite de la RD cuando el tiempo tiende a infinito. Según esto, lo adecuado es superponer la oscilación estacional al valor de equilibrio y no a la asíntota descrita por “d”.

#### 4.2 El modelo incremental de HDM – 4

En la literatura existen escasos antecedentes sobre modelos incrementales de progresión de RD. El modelo más recurrentemente estudiado es el desarrollado por Cenek y Griffith – Jones para el software de gestión HDM – 4 (Cenek y Jamieson, 2005). Dicho modelo fue construido a partir de un modelo absoluto. De ese modelo se dedujeron dos submodelos incrementales: uno de

progresión de textura y otro de progresión de RD. En esta sección se analiza únicamente el segundo.

El modelo que describe la variación de la RD considera que la RD está influenciada principalmente por la variación del flujo vehicular, por el tipo de superficie y por condiciones locales. Estas últimas, son consideradas a través del factor de calibración  $K_{sfc}$ . La ecuación que describe la variación de RD en el modelo es la siguiente:

$$\Delta SFC_{50} = K_{sfc} a_0 \max[0, \Delta QCV] \quad (2)$$

Donde  $\Delta SFC_{50}$  es la variación en el coeficiente de RD durante el año de análisis, medido con el equipo SCRIM a 50 Km./h.  $\Delta QCV$  es el incremento anual del flujo de vehículos de transporte comercial (veh/pista/día). La constante “ $a_0$ ” es un coeficiente empírico igual a  $-0,663 \cdot 10^{-4}$  adoptado de Salt (1977).

En el modelo se aprecia que cuando no existe variación en el tráfico vehicular, tampoco existe una variación en la RD. Esta condición es válida en la ventana de tiempo en que considera el incremento. No lo es en un horizonte de tiempo mayor, dado que existen efectos de intemperización que la ecuación 2 no considera. Por lo tanto, en el largo plazo esta expresión será válida únicamente cuando la intemperización no sea apreciable. El modelo establece además un valor mínimo de RD igual a 0,35 que corresponde al valor de equilibrio. En el caso en que la variación neta sea inferior a dicho valor, el modelo fuerza la estimación hacia la cota mínima a través del operador “max”. En cada período el valor final de RD se calcula a partir de la variación anual determinada con la ecuación 2, mediante la ecuación 3.

$$SFC_{50(n+1)} = \max[(SFC_{50(n)} + \Delta SFC_{50}), 0,35] \quad (3)$$

Donde  $SFC_{50(n+1)}$  es la RD medida con el equipo SCRIM a 50 Km./h, al inicio del período de análisis.  $SFC_{50(n)}$  es la RD medida con el equipo SCRIM a 50 Km./h, al finalizar el período de análisis.

Las ecuaciones 2 y 3 se muestran gráficamente en la Figura 3. En ella se aprecia dos puntos de cambio de pendiente. El primero corresponde a la fase de inicio de la condición de equilibrio (en el gráfico corresponde al año 2) y el segundo al valor de RD de equilibrio.

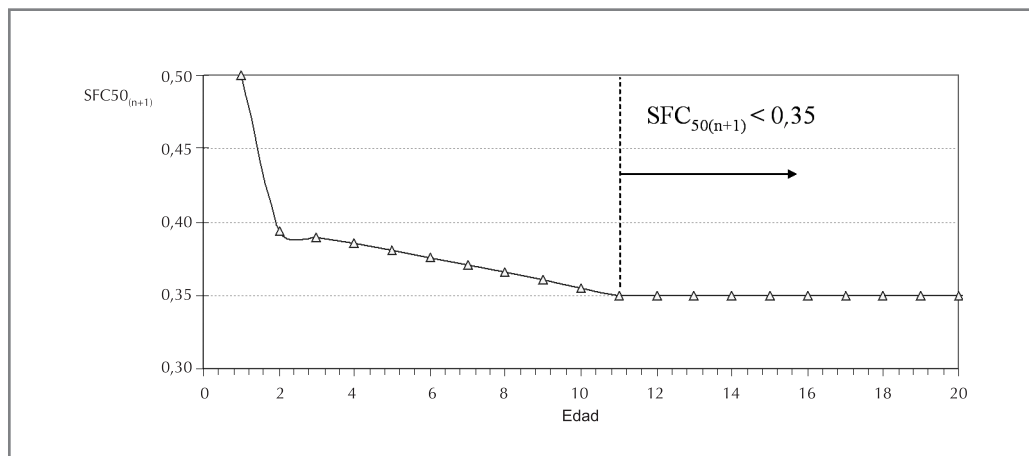


Figura 3. Modelo de progresión de RD de HDM - 4

En este modelo la única variable que incide sobre la variación de la RD es el tránsito. En consecuencia, en el análisis se consideró la sensibilización con respecto al volumen de tránsito de vehículos comerciales (camiones y buses). Para ellos, se consideró un TMDA de 100, 500 y 1000 veh/pista/día correspondiente a tránsito bajo, medio y alto respectivamente. Se emplearon tasas de crecimiento anual de 0%, 2,5%, 5,0% y 7,5% para cada uno de los valores de TMDA antes señalados. Se consideró asimismo, un valor de RD inicial de 0,5 (medido con equipo SCRIM a 50 Km./h). La Figura 4 muestra los resultados gráficos del análisis efectuado.

Puede verse que el tránsito muestra una significativa incidencia en la variación de la RD, que es más notoria a medida que aumenta el volumen de tránsito.

El modelo muestra que el volumen de tránsito produce un descenso brusco de la RD en el primer año. Posteriormente la variación anual es menor pero se va incrementando en magnitud a medida que transcurre el tiempo. Dicho comportamiento puede asimilarse a la fase de pulimiento del pavimento, seguido de una etapa donde se aminora la reducción anual de la RD, dependiendo del crecimiento que experimente el tránsito. El modelo propuesto para HDM - 4, se estabiliza artificialmente en un valor mínimo predefinido, que no necesariamente corresponde al valor de equilibrio.

Otro aspecto discutible del modelo, es el hecho que después del primer año sólo experimenta variaciones de RD cuando el tránsito diario varía. Lo esperable es

que para tránsito alto exista una disminución paulatina de la RD aun cuando se mantenga constante. Esto se debe a que el modelo no incorpora explícitamente el efecto de cambio en la textura, haciéndolo indiferente al tipo de superficie. Esto queda reflejado en el hecho que el coeficiente  $a_0$  tiene un único valor constante.

A partir del análisis realizado se identificaron tres debilidades del modelo. Estas son:

- El modelo posee un punto de pendiente indefinida que determina el término de la fase de pulimiento siempre al final del segundo año. Esto es aproximadamente concordante con el comportamiento de pavimentos nuevos, pero en el caso de pavimentos en la fase de equilibrio no debiera manifestarse este tipo de comportamiento, dado el valor de RD debiera tender al valor de equilibrio. Según esto, el modelo es más adecuado para estudiar intervenciones en la superficie del pavimento más que su comportamiento mismo.
- El modelo no incluye como variable explicativa la textura. Debido a esto, no discrimina el tipo de superficie ni las características de los agregados.
- El modelo de progresión de la RD presenta discontinuidades al término del primer año de cálculo y en el caso en que la RD sea inferior a un umbral de referencia. Esta discontinuidad es más evidente cuando se consideran volúmenes de tránsito elevados.



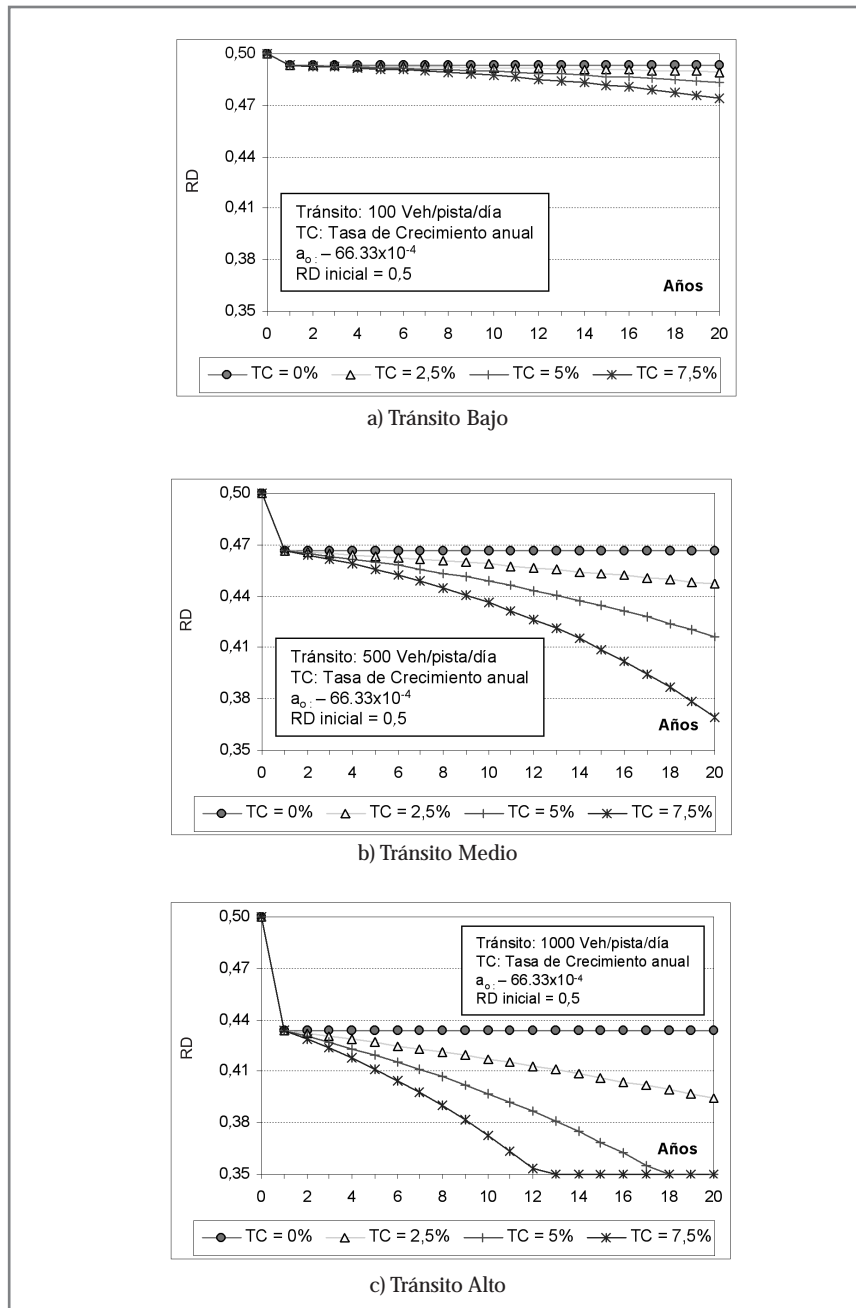


Figura 4. Efecto del tránsito bajo, medio y alto en la resistencia al deslizamiento

#### 4.3 El modelo estacional de J - T

El modelo de Jayawickrama y Thomas (1998) (J - T) fue desarrollado en el Estado de Texas, Estados Unidos, con el propósito de estudiar el comportamiento oscilatorio de la RD. Para ello identificaron 30 secciones de medición distribuidas equitativamente en cinco regiones climáticas. En esos 30 sitios desarrollaron un monitoreo durante 18 meses que incluyó mediciones de RD, de temperatura, precipitaciones y tráfico.

Los autores se basaron en los resultados de Hill y Henry (1978) y de Diringer y Barros (1990) para la formulación de su modelo. Este conjuga elementos de corto plazo, como las condiciones de temperatura y precipitaciones; de mediano plazo, como la oscilación estacional; y de largo plazo, como el valor tendencial de RD y el efecto del tráfico.

J - T determinaron que la expresión 5 mostraba la mejor correlación, por lo cual en el modelo final no

consideraron el efecto del tráfico acumulado y el número de días secos previos a la medición. Este nuevo modelo considera valores promedio de temperatura y precipitaciones en los cinco días previos a ejecutar mediciones, capturando así el efecto de corto plazo inducido por estas variables.

$$RD = (32,28 - 0,14 TEMP_5 + 0,031 RF_5) - 0,66sen[(2\pi/365)JD] + \sum B_r I_r \quad (5)$$

Siendo:

- RD: RD medida con el Trailer ASTM E – 274 a 64 Km./h
- TEMP<sub>5</sub>: Temperatura ambiente promedio durante los cinco días previos a las mediciones
- RF<sub>5</sub>: Precipitaciones diarias acumuladas durante los 5 días previos a las mediciones
- JD: día del calendario Juliano, correspondiente al día de las mediciones
- I<sub>r</sub>: Sección de pavimento bajo medición (r = 1 a 5)
- B<sub>r</sub>: Parámetros de regresión del modelo asociado a cada sección de medición.

El modelo de J – T es adecuado para describir efectos locales que modifican las mediciones de RD como la temperatura y las precipitaciones acumuladas en los días precios a la ejecución de mediciones. Esto es útil para balancear las medidas de RD. De este modo, el valor

de equilibrio de RD quedará determinado por los 3 primeros miembros de la Ec 5.

En la Figura 5 se grafican dos condiciones extremas de medición, una condición seca con alta temperatura y ausencia de precipitaciones, y una condición húmeda con temperaturas moderadas y altas precipitaciones.

Se aprecia que el modelo posee una alta dependencia de las condiciones de medición al momento de definir la condición tendencial sobre la cual se produce la oscilación. Por tanto la generalización del modelo impone la necesidad de realizar mediciones para la calibración en exactamente las mismas condiciones, a fin de definir un nivel basal consistente para la tendencia.

La problemática práctica que surge en este aspecto es cómo separar las componentes estacionales y tendenciales a partir de las mediciones que se realicen para calibrar el modelo y definir adecuadamente el valor tendencial de RD.

El modelo J – T trata la estacionalidad de manera distinta del modelo HRB. El modelo de J – T no incluye el efecto de desfase en el término oscilatorio, lo cual sí está considerado en el modelo HRB. Por otro lado asume un rango de variación pequeño y constante para la oscilación estacional, lo cual no lo hace generalizable. Dependiendo de la magnitud del valor de RD de equilibrio puede llegar a no ser estadísticamente significativa la variación estacional.

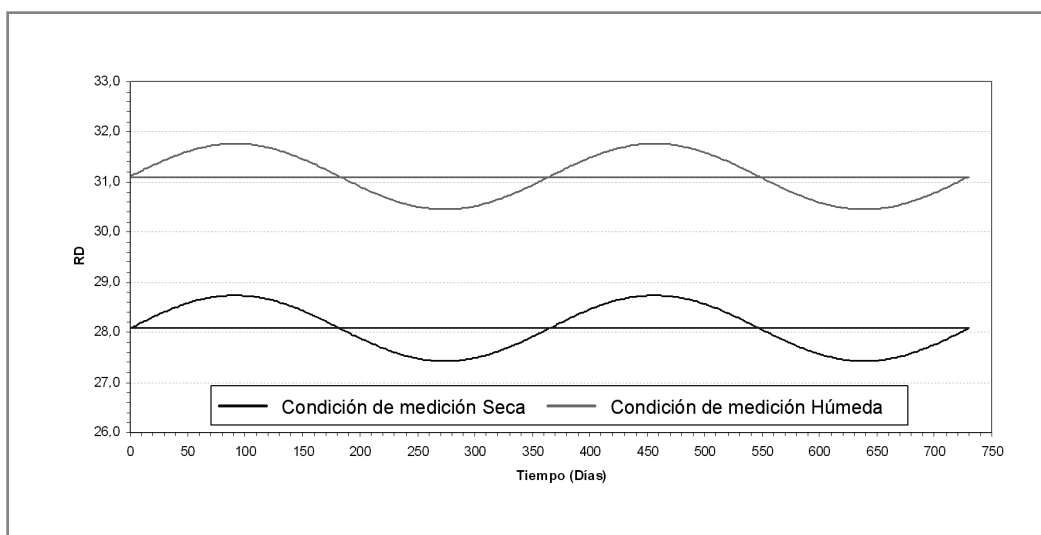


Figura 5. Efecto de las condiciones de medición en el modelo estacional de J – T

## 5. Conclusiones y recomendaciones

El estudio presentado en este artículo permitió identificar fortalezas y debilidades de los modelos así como la consistencia entre las hipótesis que los sustentan, el fenómeno físico que describen y su formalización matemática. Esto contribuye a proporcionar elementos que permitan mejorar la formulación matemática de modelos de comportamiento de resistencia al deslizamiento.

La resistencia al deslizamiento presenta una variabilidad en el tiempo que puede describirse en base a dos comportamientos. Uno tendencial y otro oscilatorio. El comportamiento tendencial está dominado por la susceptibilidad al pulimiento de los agregados expuestos a la superficie del pavimento. El comportamiento oscilatorio, por factores ambientales, por el tráfico, características de diseño de la superficie del pavimento.

En los modelos absolutos las componentes tendencial y oscilatoria del comportamiento de la RD se ensamblan mediante suma simple. En los modelos incrementales en cambio, es necesario previamente definir en qué parte de la oscilación se sitúan los puntos inicial y final del incremento. Habitualmente este problema se simplifica, asumiendo que todos los cortes temporales sobre los cuales se calcula el incremental de RD se encuentran sobre la curva tendencial de comportamiento.

En la mayoría de los estudios revisados se analiza esencialmente el comportamiento de los pavimentos asfálticos existiendo escasa información respecto del comportamiento de la textura en pavimentos de hormigón.

De acuerdo a los resultados de este estudio, se identificaron los siguientes aspectos a considerar para especificar y calibrar un modelo de comportamiento de la RD:

- Definir un sistema de muestreo que permita considerar pavimentos en las distintas etapas de las fases de pulimiento y de equilibrio: al inicio, mitad y término de cada una de las fases. Para ello es necesario aplicar criterios preliminares que permitan discriminar estas fases en la práctica. Se recomienda en este caso, para pavimentos chilenos, usar rango de edades de pavimento entre 0 y 4 para la fase de pulimiento, de 4 a 10 para la estabilización del equilibrio y de 10 a 20 para la fase de equilibrio.
- Es necesario vincular los modelos de progresión de Textura y RD de HDM - 4 en una sola especificación funcional, ya que la evidencia empírica muestra una relación directa entre ambas variables.
- Debido a la escasez de estudios de comportamiento de RD en superficies de hormigón, es necesario caracterizar el comportamiento de este tipo de pavimento previo al diseño de modelos temporales.
- Si se opta por diseñar un modelo incremental, es necesario determinar mecanismos para incluir la variabilidad estacional y adicionalmente, el contextualizar el modelo dentro de la fase en que se encuentra el pavimento respecto de textura y RD. Es decir, dotar al modelo de "memoria".
- Para incorporar la variabilidad en la modelación, es necesario separar la variabilidad de corto y largo plazo en forma explícita, o bien utilizar funciones "alias" que repliquen en forma más agregada ambos comportamientos. Para ello es necesario levantar el supuesto de periodicidad, caso en el cual es posible emplear series de Fourier o Wavelets para explicar la variabilidad.
- Se recomienda analizar el grado de estacionariedad y ergodicidad de la serie de tiempo que describe la progresión de RD, ya que esto permite en el caso de pavimentos en la fase de equilibrio reconstruir el proceso de cambio de RD a partir de fragmentos del mismo sin perder representatividad del fenómeno.

## 6. Referencias

- Burchet J. A. y Rizenbergs R. L. (1980)*, "Seasonal Variations in the Skid Resistance of Pavements in Kentucky". *Transportation Research Record* 788. pp. 6 - 14.
- Cenek P. y Jamieson N. J. (2005)*, "Sensitivity of In-service Skid Resistance Performance of Chipseal Surfaces to Aggregate and Texture Characteristics", 1st International Conference Surface Friction. 1- 4 May, Christchurch, New Zealand.
- Colony D. (1985)*, "Overview of Skid Resistance on Ohio Pavements". *ASCE Journal of Transportation Engineering*. Vol 111(5), pp. 546 - 560.
- Dahir S. H., Meyer W. E. y Hegmon R. R. (1976)*, "Laboratory and field Investigation of Bituminous Pavement and Aggregate Polishing". *Transportation Research Record* 584. pp. 1 - 14.
- Delalande G. (1992)*, "Résistance des granulats au polissage Méthode d'essai par projection". *Bill. Liaison Labo. P. et Ch* 177, pp. 73 - 80.

- Delanne Y. (1993)*, "Modélisation de la relation adhérence/texture en fonction de la vitesse". Bill. Liaison Labo. P. et Ch 185, pp. 93 – 98.
- de Solminihac H. y Echaveguren T. (2002)*, "Antecedentes para la inspección y diseño de especificaciones de textura, resistencia al deslizamiento y fricción en pavimentos". Actas de VI Congreso PROVIAL. Termas de Chillán 5 – 8 de Noviembre, pp. 363 – 380.
- Diringer K. T. y Barros R. T. (1990)*, "Predicting the Skid Resistance of Bituminous Pavements Through Accelerated Laboratory Testing of Aggregates". Meyer, W. E. and Reichert, J. (Eds.). Surface Characteristics for Roadways: International Research and Technologies, ASTM STP 1031. pp. 61 – 76. Estados Unidos.
- Dupont P. y Tourenq C. (1993)*, "Granulats et microrugosité". Bill. Liaison Labo. P. et Ch 185, pp. 145 – 151.
- Fülöp I. A., Bogárdi I. Gulyás A. y Csicsely – Tarpay M. (2000)*, "Use of Friction and Texture Pavement Performance Modelling". ASCE Journal of Transportation Engineering, Vol 126(3), pp. 243 – 248.
- Gaete R., de Solminihac H. y Echeverría G. (1988)*, "Estudio de la Resistencia al Deslizamiento en Pavimentos Asfálticos en Chile", Revista de Ingeniería de Construcción, Vol 4, pp. 41 – 63.
- Golden J. M. (1981)*, "A theory of wet road – tyre interaction". Wear Vol 71, pp. 307 – 31
- Hill B. J. y Henry J. J. (1981)*, "Short – Term, Weather – Related Skid Resistance Variations". Transportation Research Record 836. pp. 76 – 81.
- Hosking R. (1992)*, "Road Aggregates and Skidding". State of Art Review N°4. Transportation Research Laboratory, U.K.
- Jayawickrama P. W. y Thomas B. (1998)*, "Correction of Field Skid Measurements for Seasonal Variations in Texas". Transportation Research Record 1639, pp. 147 – 154.
- Jellie J. (2003)*, "A Study of Factors Affecting Skid Resistance Characteristics". Ph.D. Thesis. Chairs: David Woodward and Alan Woodside. Faculty of Engineering. University of Ulster. UK.
- Kennedy C. K., Young A. E., y Butler I.C. (1990)*, "Measurements of Skidding Resistance and Surface Texture and the Use of Results on the United Kingdom". Meyer, W. E. and Reichert, J. (Eds.). Surface Characteristics for Roadways: International Research and Technologies, ASTM STP 1031. pp. 87 – 102. Estados Unidos.
- Kokkalis A. G. (1998)*, "Prediction of skid resistance from texture measurements". Proc. Instn. Civ. Engrs. Transp. Vol 129, pp. 85 – 93.
- Liang R. Y. (2003)*, "Blending Proportions of High Skid and Low Skid Aggregate". FHWA Report FHWA/OH – 2003/014. University of Akron and Ohio DoT. United States.
- McDonald, M. Turochy, R. y Crowley L. (2003)*, "Investigation of Seasonal Variations in Pavement Friction using the DATAPAVE 3.0 Database". IS 22444 New Paper. 2003 International Contest on LTPP Data Analysis, FHWA, Unites States.
- Newland D. E. (1993)*, "A introduction to random vibrations, spectral and wavelet analysis". 3th Edition. Pearson Education – Prentice Hall. England.
- Parcells W., Metheny T. M. y Maag R. M. (1982)*, "Predicting Surface Friction from Laboratory Test". Transportation Research Record 843. pp. 33 – 40.
- Roe P. (1999)*, "Research on Road Surface Skidding resistance in the UK", Proceedings of 2nd European Road Research Conference. Brussels, 7 – 9 June, 1999. pp. 195 - 202.
- Salt G. F. (1977)*, "Research on skid – resistance at the Transport and Road Research Laboratory (1927 – 1977)". TRRL Supplementary Report 340. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, UK.
- Skerritt W. (1994)*, "Aggregate Type and Traffic Volume as Controlling Factors in Bituminous Pavement Friction". Transportation Research Record 1418. pp. 22 – 29.
- Yeh E. C., Henry J. J. y Wambold J. C. (1981)*, "Methodology for Analyzing Texture and Skid Resistance Data for Use in Pavement Management Systems". Transportation Research Record 893, pp. 47 – 50.