

## **ESTUDIO DE FRICCIÓN EN PAVIMENTOS (AVANCE)**

**ROBINSON LUCERO CAMPOS, Ingeniero Civil,**

Laboratorio Nacional de Vialidad, [robinson.lucero@moptt.gov.cl](mailto:robinson.lucero@moptt.gov.cl)

**CARLOS WAHR DANIEL, Ingeniero Civil**

Universidad Técnica Federico Santa María, [carlos.wahr@ociv.utfsm.cl](mailto:carlos.wahr@ociv.utfsm.cl)

**CATALINA ARANCIBIA GALEA, Alumna Memorista, Ingeniería Civil.**

Universidad Técnica Federico Santa María, [catalina.arancibia@alumnos.utfsm.cl](mailto:catalina.arancibia@alumnos.utfsm.cl)

### **RESUMEN**

La Fricción en los pavimentos es un factor importante en la seguridad de la conducción y en el diseño de curvas horizontales, por esta razón se encuentra en ejecución un análisis de la estabilidad dinámica para las vías de nuestro país. Como primer paso se definió un conjunto de vías tipo en la región Metropolitana, las que presentan distintas condiciones de diseño y características del pavimento de manera que sirvan para elaborar los antecedentes de fricción. Las mediciones se realizaron con el equipo SCRIM, del Laboratorio Nacional de Vialidad, el que fue operado a sus tres velocidades (30, 50 y 70 [km./h]), esto permitió estimar nuestros antecedentes de fricción y velocidad, los cuales se compararon con los datos internacionales, determinando un diagnóstico de la situación actual.

### **1. INTRODUCCIÓN**

Una vía debe proporcionar al usuario seguridad y confort. No existe un sistema de medida que indique el grado de seguridad de una ruta, ya que los factores de seguridad de la calzada son numerosos y variados: velocidad de circulación, estado de los neumáticos del vehículo, características geométricas y textura de la carpeta de rodado, además de las condiciones climáticas y el propio conductor.

Últimamente se han analizado tres criterios: a) Consistencia en el diseño; b) consistencia en la velocidad de operación; y, c) estabilidad dinámica. Los dos primeros criterios se refieren al análisis de las diferencias entre la velocidad de operación y velocidad de diseño, el tercero, analiza la diferencia entre fricción demandada y ofrecida por el diseño.

Un margen de conducción dinámica segura es siempre requerido, sin embargo, es raramente verificable. La resistencia al patinaje es un componente esencial de seguridad en caminos. El coeficiente de fricción entre el neumático y el pavimento especifica una condición que consiste en adhesión, roce e interconexión.

El camino debe proveer un nivel de resistencia al patinaje para seguridad en frenado, maniobras y control del vehículo dentro de una zona curva. Estudios han demostrado claramente que los

niveles de fricción desarrollados por un pavimento en contacto con un neumático están dependiendo de dos características: macrotextura y microtextura.

La seguridad en la conducción presenta una importancia social y económica, debido a los costos de un accidente de tránsito por una mala adherencia en el pavimento.

Se debe aclarar que la fricción involucra dos elementos: neumático y pavimento. La fricción está relacionada directamente con la velocidad y las condiciones geométricas de la vía. Al variar la velocidad la adherencia entre neumático y superficie de rodado cambia, diversos estudios se han realizado en países como Alemania, Grecia y Estados Unidos.

## 2. CRITERIOS DE SEGURIDAD

Los criterios de seguridad están basados en la consistencia del diseño. Estudios sobre su aplicabilidad en indicadores cuantitativos para su evaluación han conducido a tres criterios fundamentales.

### 2.1. Criterio 1: Consistencia en el diseño

Este criterio compara en cada elemento de diseño la velocidad de diseño ( $V_d$ ) con la velocidad de operación ( $V_{85}$ ).

Niveles de Diseño:

BUENO	REGULAR	MALO
$ V_{85i} - V_d  \leq 10 \quad [km/h]$	$10 \leq  V_{85i} - V_d  \leq 20 \quad [km/h]$	$20 \quad [km/h] \leq  V_{85i} - V_d $

$V_d$ : velocidad de diseño [km./h].

$V_{85i}$ : percentil 85 de velocidad esperada para el elemento de diseño "i" [km./h].

### 2.2. Criterio II: Consistencia en la velocidad de operación

Se compara la velocidad de operación ( $V_{85}$ ) de dos elementos de diseño sucesivos.

Niveles de Diseño:

BUENO	REGULAR	MALO
$ V_{85i+1} - V_{85i}  \leq 10 \quad [km/h]$	$10 \leq  V_{85i+1} - V_{85i}  \leq 20 \quad [km/h]$	$20 \quad [km/h] \leq  V_{85i+1} - V_{85i} $

$V_{85i}$ : percentil 85 de velocidad esperada para el elemento de diseño "i" [km./h].

$V_{85i+1}$ : percentil 85 de velocidad esperada para el elemento de diseño "i+1" [km./h].

### 2.3. Criterio III: Estabilidad dinámica

Se considera como el principal criterio de diseño de curvas horizontales, se relaciona directamente con la dinámica de la conducción, que es controlada por las leyes físicas del movimiento de un vehículo e involucra sus propiedades, las del trazado y del pavimento de la vía por la que circula. Este criterio se basa en la diferencia entre la fricción demandada y asumida por el diseño. Para una conducción segura el coeficiente de roce asumido debe ser mayor que el coeficiente de roce demandado.

- El roce demandado corresponde al roce que presenta el pavimento, el cual cambiará a lo largo del tiempo y según las condiciones climáticas y de circulación.
- El roce asumido es determinado a partir de las condiciones de diseño geométrico de las curvas.

$$f_a = f(V_d, R, e)$$

Donde:

$V_d$ : velocidad de diseño [km./hr].

$R$  : radio de curvatura [m].

$e$ : peralte [%/100].

$$f_a = \frac{V_d^2}{127 \cdot R} - e \quad (1)$$

Se puede observar que el roce asumido no hace diferencia al tipo de material empleado ni a las condiciones climáticas, lo cual sí afecta al roce demandado y, por consiguiente, la seguridad en la conducción. Una forma de obtener el coeficiente de fricción demandado en la dirección radial es medirlo directamente en terreno, se debe tener en cuenta que la máxima transmisión de la fuerza de roce depende de las características del neumático y pavimento y de la presencia de sustancias en el área de contacto. De aquí que se necesite un estudio de la micro y macrotextura que ayude a determinar el estado del pavimento. Además de las condiciones climáticas del lugar, toma gran importancia la humedad del pavimento, ya que la presencia de una película de agua sobre el pavimento disminuye el valor de la fricción.

Para determinar la fricción demandada se deben tener en cuenta diversos factores:

$$f_d = f(V, \text{características geométricas, tipo de superficie, condiciones climáticas})$$

Considerando las diferencias entre el coeficiente de fricción asumido y demandado es posible clasificar un pavimento en cuanto a su seguridad.

#### 2.3.1. Fricción y Parámetros geométricos

Existen distintos tipos de curvas, algunas son de transición, diferentes radios y longitudes, por lo que se hace necesario utilizar un parámetro que permita comparar la geometría con la fricción y no sólo curvas de condiciones similares.

Se ocupa como parámetro de diseño la razón de cambio de curvatura ( $CCR_s$ ), parámetro que relaciona los distintos elementos de la curva de análisis, teniendo en cuenta su longitud total, y las longitudes de las curvas de transición, además del radio de la curva circular.

$$CCR_S = \frac{63700}{L} \cdot \left( \frac{L_{CR}}{R} + \frac{L_{Cl1}}{2 \cdot R} + \frac{L_{Cl2}}{2 \cdot R} \right) \quad \left[ \frac{gon}{km} \right] \quad (2)$$

$$L = L_{CR} + L_{Cl1} + L_{Cl2} \quad (3)$$

L: longitud de la curva [km].

CCR<sub>S</sub>: [gon/km].

L<sub>cr</sub>: longitud curva circular [m].

R: radio de la curva circular [m].

L<sub>cl1</sub>, L<sub>cl2</sub>: longitud de clotoide (curva de transición) [m].

Si no existe curva de transición, se tiene la siguiente expresión:

$$CCR_S = \frac{63700}{R} \quad \left[ \frac{gon}{km} \right] \quad (4)$$

Para las condiciones de diseño, representadas por CCR<sub>S</sub>, se tiene tanto fricción demandada como asumida.

### 2.3.2. Criterio III Internacional

En países de Europa y en Estados Unidos se han realizado estudios en las distintas vías para el análisis de la estabilidad dinámica. Para evaluar el diseño se han establecido tres clases de razón de cambio de curvatura, CCR<sub>S</sub>:

Buen diseño:	$CCR_S < 180$	$\left[ \frac{gon}{km} \right]$
Diseño regular:	$180 < CCR_S < 360$	$\left[ \frac{gon}{km} \right]$
Mal diseño:	$360 < CCR_S$	$\left[ \frac{gon}{km} \right]$

Al comparar en los límites de cada clase definida la fricción asumida con la demandada, se pueden observar distintas condiciones que identifican a cada país. Considerando el diseño regular y aplicando el Criterio III de seguridad se obtienen las siguientes condiciones para tres países distintos:

Alemania:  $-0.045 \leq f_{RA} - f_{RD} < 0$

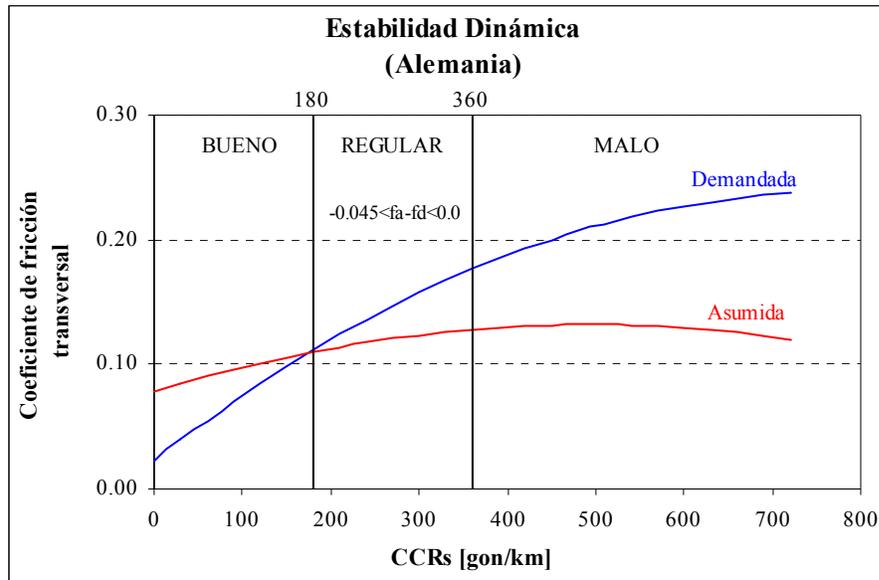
Estados Unidos:  $-0.030 \leq f_{RA} - f_{RD} < 0.015$

Grecia:  $-0.040 \leq f_{RA} - f_{RD} < 0$

Relación entre la fricción transversal asumida/demandada y la razón de cambio de curvatura para los países Alemania, Estados Unidos y Grecia (Ver figura 2.1).

Figura 2.1: Relación entre la fricción transversal asumida/demandada y la razón de cambio de curvatura para los países Alemania, Estados Unidos y Grecia.

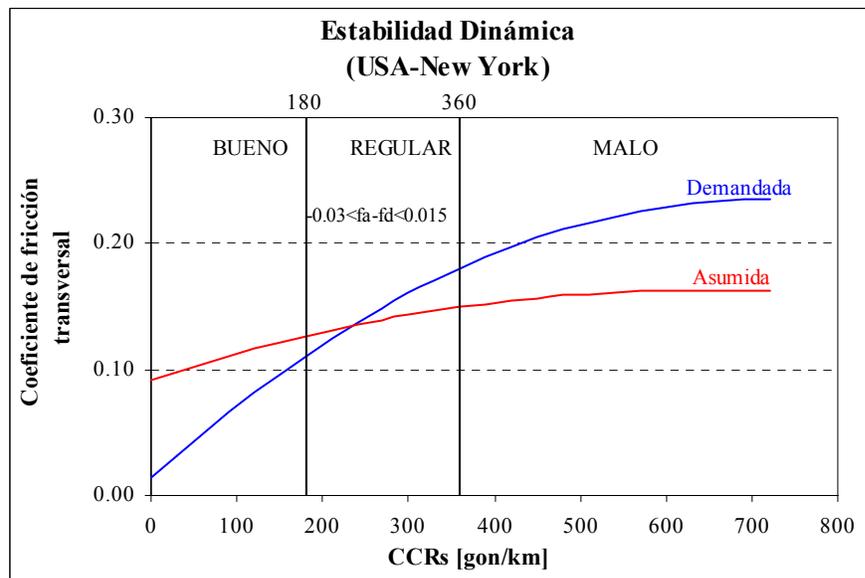
a) Alemania:



$$f_a = 0.078 + 2.18 \cdot 10^{-4} \cdot CCR_s - 2.21 \cdot 10^{-7} \cdot CCR_s^2$$

$$f_d = 0.023 + 5.55 \cdot 10^{-4} \cdot CCR_s - 3.58 \cdot 10^{-7} \cdot CCR_s^2$$

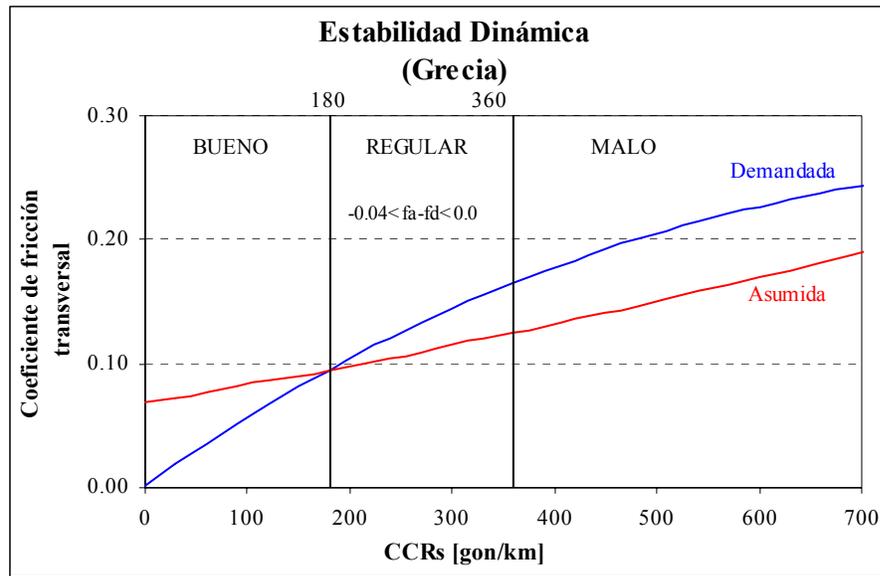
b) Estados Unidos:



$$f_a = 0.092 + 2.22 \cdot 10^{-4} \cdot CCR_s - 1.73 \cdot 10^{-7} \cdot CCR_s^2$$

$$f_d = 0.014 + 6.16 \cdot 10^{-4} \cdot CCR_s - 4.28 \cdot 10^{-7} \cdot CCR_s^2$$

c) Grecia:



$$f_a = 6.83 \cdot 10^{-2} + 1.41 \cdot 10^{-4} \cdot CCR_s + 4.66 \cdot 10^{-8} \cdot CCR_s^2$$

$$f_d = 1.95 \cdot 10^{-3} + 5.90 \cdot 10^{-4} \cdot CCR_s - 4.12 \cdot 10^{-7} \cdot CCR_s^2 + 8.82 \cdot 10^{-11} \cdot CCR_s^3$$

### 3. ESTUDIO DEL CRITERIO III

Para hacer un análisis de las vías basándose en la Consistencia Dinámica es necesario conocer los parámetros geométricos de las distintas curvas y la velocidad de diseño, con lo cual se puede obtener la fricción asumida (utilizando la ecuación 1).

Para obtener la fricción demandada se utiliza el SCRIM, equipo perteneciente al Laboratorio Nacional de Vialidad, el cual permite medir en terreno el coeficiente de roce dinámico con una rueda oblicua (desviada en 20° respecto a la dirección de avance del vehículo) y que puede circular a distintas velocidades para realizar las mediciones (30, 50 y 70 [km./hr]). Esto permite tener una relación entre las condiciones geométricas existentes y la fricción demandada. El valor entregado por el SCRIM es necesario relacionarlo con la fricción transversal, para poder comparar la fricción demandada con la asumida para los distintos niveles de diseño. La fricción demandada se determina a partir de correlaciones entre ésta y la velocidad de percentil 85.

En la elección de las vías y en la obtención y análisis de datos es necesario tener presente los factores que afectan el valor de la fricción del pavimento.

La evaluación de la resistencia al deslizamiento debe contener una muestra representativa de las superficies de diferente tiempo de uso, método de construcción y categorías de caminos.

Las condiciones climáticas y características del lugar influyen considerablemente. Al programar las mediciones se debe tener presente el período en que se realiza, ya que para un mismo tramo los resultados de mediciones en distintas estaciones serán diferentes y pueden alterar las conclusiones.

### 3.1. Factores que afectan el valor del coeficiente de rozamiento

Los principales responsables de la fricción de la goma neumática son la adhesión e histéresis. La adhesión corresponde al esfuerzo de corte de la superficie de contacto, en cambio, histéresis es causada por pérdida de amortiguamiento en la goma, cuando ésta es desgastada sobre y alrededor de las partículas minerales. Ver figura 3.1.1.

El deslizamiento en una carpeta de rodado está condicionado por: las características del pavimento (tipo, composición y adherencia), la densidad del tránsito, condiciones del lugar, contaminación en la superficie (aceite, polvo, goma, etc.), grado de humedad en la superficie y temperatura. En la tabla 3.1.1. se enumeran los principales factores que afectan la fricción suministrada y demandada.

Figura 3.1.1: Fricción Goma del Neumático (adhesión e histéresis).

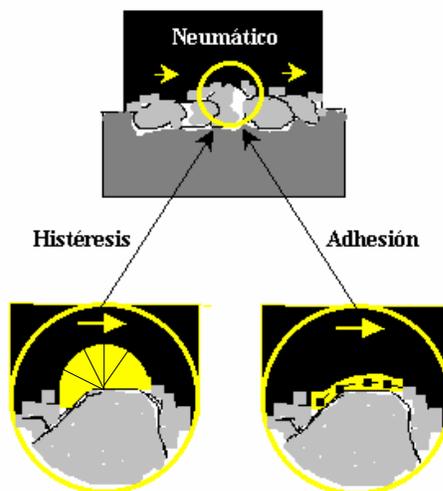


Tabla 3.1.1: Factores que afectan la fricción demandada y suministrada.

Fricción Demandada	Fricción Suministrada
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad</li> <li>• Aceleración y frenado</li> <li>• Características del vehículo</li> <li>• Condiciones climáticas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad</li> <li>• Neumático</li> <li>• Pavimento superficial microtextura</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>viento</li> <li>rocío</li> <li>visibilidad</li> <li>• Geometría del camino</li> <li>curvatura</li> <li>peralte</li> <li>arrastre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>macrotextura</li> <li>drenaje</li> <li>pendiente transversal</li> <li>• Condiciones climáticas</li> <li>precipitación</li> <li>temperatura</li> <li>efectos cíclicos</li> </ul>
--	--

Al comparar y sacar conclusiones se deben tener presente los factores que influyen en el valor del coeficiente de fricción.

a) Adherencia

Se relaciona con la estructura geométrica de la superficie de rodado formada por áridos y ligante de unión. Las propiedades de la mezcla dependen de la naturaleza y granulometría de los áridos, del ligante utilizado y de su composición. La adherencia que presenta un pavimento (micro y macrotextura) expresa la buena o mala fricción y el grado de drenaje que posee. Ver figura 3.1.2.

- **Macrotextura:** Corresponde a los intersticios generados debido a la distribución de áridos en la superficie. Afecta en la capacidad de drenaje que tiene la superficie del pavimento para despejar el agua de la superficie, lo cual permite un mejor contacto entre el neumático y la superficie de rodado.
- **Microtextura:** Influye en la fricción entre el neumático y la superficie de rodado. Es la característica propia del árido expuesto.

Figura 3.1.2: Escala de textura.

	Superficie	Clases de Textura	
		Macro	Micro
A		Gruesa	Áspera
B		Gruesa	Pulida
C		Fina	Áspera
D		Fina	Pulida

b) Presencia de agua en la superficie

El espesor de la película de agua sobre la calzada en ocasiones produce pérdida de control, lo cual es conocido como hidroplaneo.

El hidroplaneo se produce cuando el espesor de la película es apreciable y el vehículo viaja a alta velocidad y en texturas muy finas que no dan tiempo de evacuar el agua entre el neumático y el pavimento. Los neumáticos pierden contacto con la superficie del pavimento.

c) Naturaleza del árido que constituye la naturaleza de la calzada

Condiciones de desgaste y pulimento, que afectan directamente a la adherencia entre neumático y superficie de rodado, dependen de la naturaleza y forma del árido. Esto da las propiedades a la calzada, influye en su vida útil y en la seguridad de la conducción.

d) Naturaleza del ligante utilizado. (cemento, betún, alquitrán)

Exceso del ligante es nocivo y disminuye el roce.

e) Estacionalidad

El coeficiente de fricción para una misma vía cambia dependiendo del período en que se realice la medición, verano-invierno.

f) Presión de inflado del neumático

Mientras mayor sea la presión de inflado del neumático, menor será el área de contacto neumático-pavimento, por lo tanto, la fricción entre ambas superficies disminuye.

g) Velocidad del vehículo

A medida que la velocidad aumenta existe la tendencia a la disminución del rozamiento.

h) Importancia del tráfico

Esto va unido con la categoría de la vía. El volumen y tipo de tráfico que circule influirá en el desgaste del pavimento.

### **3.2. Situación actual**

La pérdida de la capacidad de adherencia del pavimento constituye un factor de riesgo que afecta la seguridad del tránsito. La resistencia al deslizamiento está directamente relacionada con el coeficiente de rozamiento del pavimento, ya que esa resistencia es producto del coeficiente de rozamiento por la fuerza normal que actúa sobre el pavimento.

Todas las carpetas de hormigón, asfalto u otras, que se construyan o reparen, en vías urbanas, deberán presentar un coeficiente de rozamiento mínimo cuyo valor se detalla en la Tabla 3.2.1.

Tabla 3.2.1: Valores mínimos de Coeficiente de Rozamiento.

Tipo de Sitio	Coef. de Roce
1 Rotondas 2 Curvas con radios menores a 150 [m] 3 Pendientes 1/20 o mayores y pendientes de largos mayores a 100[m] 4 Aproximaciones a cruces semaforizados en vías no restringidas	0.55
Vías interurbanas de categoría autopista primaria y colectora.  Vías urbanas con tráfico con flujos mayores que 2000 veh/día.	0.5
Todas las demás vías	0.4

### 3.3. Medición del coeficiente de fricción demandado

SCRIM: Sideway force coefficient routine investigation machine.

Maquina para la investigación rutinaria del coeficiente del esfuerzo lateral. Presenta un método rutinario y continuo de medida de la resistencia al deslizamiento en superficies de pavimentos húmedos. El objetivo de este aparato es medir el coeficiente de roce dinámico en una condición desfavorable combinando las componentes de roce longitudinal y transversal.

Es un equipo de rueda, con neumático liso, montada en un sistema que la lleva oblicua en 20° de convergencia con respecto a la dirección de avance, instrumentada con una celda de carga axial que mide la reacción del roce del pavimento sobre la rueda. Está provisto de un sistema de riego autónomo capaz de proporcionar una lámina de agua de 1 [mm] nominal.

#### 3.3.1. Mediciones

Se utiliza una rueda con neumático liso para eliminar cualquier efecto debido al desgaste del dibujo de la huella. La relación entre la fuerza desarrollada normal al plano de la rueda de ensayo (fuerza tangencial), y la carga sobre la misma, es el coeficiente de roce transversal, SFC (Side friction coefficient).

La ventaja primordial del método radica en la posibilidad de registrar de manera continua la resistencia al deslizamiento de la superficie en cuestión, así como en la razonablemente larga vida del neumático estándar de ensayo. Las determinaciones se realizan a velocidades de 50 [km./h], pero se pueden efectuar además medidas a velocidades de 70 [km./h] o [30 km./h].

#### 3.3.2. Material necesario

a) Vehículo y rueda de ensayo:

El aparato de ensayo está acoplado al chasis de un vehículo que tiene además un depósito para agua. El aparato estándar tiene una rueda de ensayo normalizada situada en el lado derecho del

vehículo, que permite realizar las mediciones en la zona de rodada derecha del carril, perturbando lo menos posible el tránsito de otros vehículos en la calzada.

b) Sistema de medida y registro:

El sistema estará diseñado para poder medir y registrar las fuerzas normales originadas y la velocidad del vehículo durante el ensayo. El sistema de adquisición, registro y tratamiento de datos del coeficiente de roce, así como de la velocidad del vehículo, será adecuado al fin que se propone con pasos, de medida con longitudes del 5, 10 ó 20 [m]. La información a registrar y su posterior elaboración dependerá y variará de acuerdo con las necesidades del usuario; la información mínima consistirá en los valores del SFC y de la velocidad, de la longitud de los subtramos ensayados y su ubicación en la carretera.

c) Suministro de agua:

El suministro de agua se realizará, desde el estanque integrado en el vehículo, a través de la salida tubular que haga incidir el chorro de agua sobre la superficie del pavimento, justamente delante de la rueda de ensayo, mojándolo en un ancho de 300 [mm]. La salida del agua es por gravedad o generada por una bomba, por lo que el gasto o flujo varía con el nivel del agua en el depósito. La llave de salida se podrá calibrar para suministrar agua que produzca una lámina de 1 [mm] de espesor sobre la superficie de un pavimento liso. La capacidad del estanque permite una medición de 60 [km.] continuos aproximadamente (varía dependiendo de la velocidad de operación).

### 3.3.3. Operación

Al comienzo de cada tramo a examinar se introduce en el sistema las condiciones prefijadas de ensayo. También se efectúan lecturas y registro de la temperatura ambiente y de la superficie del pavimento.

El equipo registra 16 lecturas del SFC por metro de recorrido y se graba automáticamente en el sistema de registro el valor medio de estas lecturas. Durante la ejecución del ensayo, se introducen manualmente, para su registro, referencias (kilometrajes, vías para vehículos lentos, trabajos en la vía, cruces, puentes, cambio de pista, etc.), lo cual otorga una mayor información del registro.

Antes del inicio de cada jornada se calibra el equipo, contrastando la célula de presión con otra idéntica previamente calibrada.

### 3.4. Fricción Radial

Los valores obtenidos por el SCRIM deben ser transformados para obtener la fricción demandada en la dirección longitudinal; de esta forma es posible utilizar la relación elíptica de Krempel, la cual relaciona la fricción en la dirección radial con la fricción en la dirección longitudinal.

$$f_r = 0.925 \cdot n \cdot f_T \quad (5)$$

$f_r$ : coeficiente de fricción en la dirección radial.

$f_T$ : coeficiente de fricción en la dirección tangencial (longitudinal).

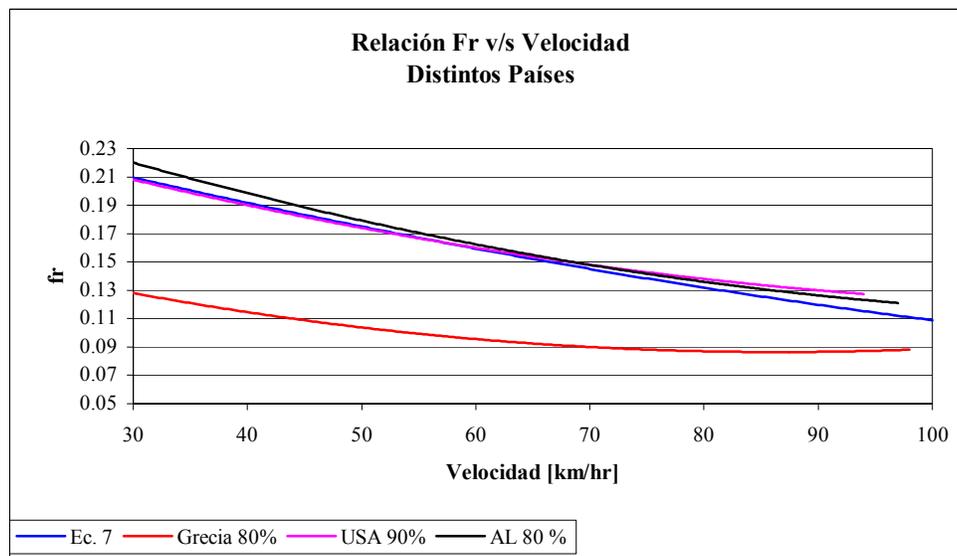
n: razón que varía entre 40 – 50 % (depende del porcentaje de fricción radial útil).

Al realizar las mediciones a las tres velocidades de operación del SCRIM para cada vía, se tienen 3 valores, los que relacionan la fricción con la velocidad. Del total de mediciones es posible construir las curvas fricción velocidad para los distintos percentiles (asociados a la cantidad de vías). De esta manera los valores se comparan con los resultados internacionales. Mediante estudios se ha obtenido la siguiente relación entre el factor de fricción transversal ( $f_r$ ) y la velocidad de diseño ( $V_d$ ):

$$f_r = 0.27 - 2.19 \cdot 10^{-3} \cdot V_d + 5.79 \cdot 10^{-6} \cdot V_d^2 \quad (7)$$

La relación (7) se puede comparar en los distintos países, obteniendo el comportamiento del diseño según el percentil que se aproxime a esta relación, ver Figura 3.4.1.

Figura 3.4.1:



La fricción demandada se obtiene del percentil 85 de velocidad, para esto es necesario conocer la velocidad de operación ( $V_{85}$ ) en función de las características geométricas. Luego se determina la fricción demandada, la cual es comparada con la fricción asumida.

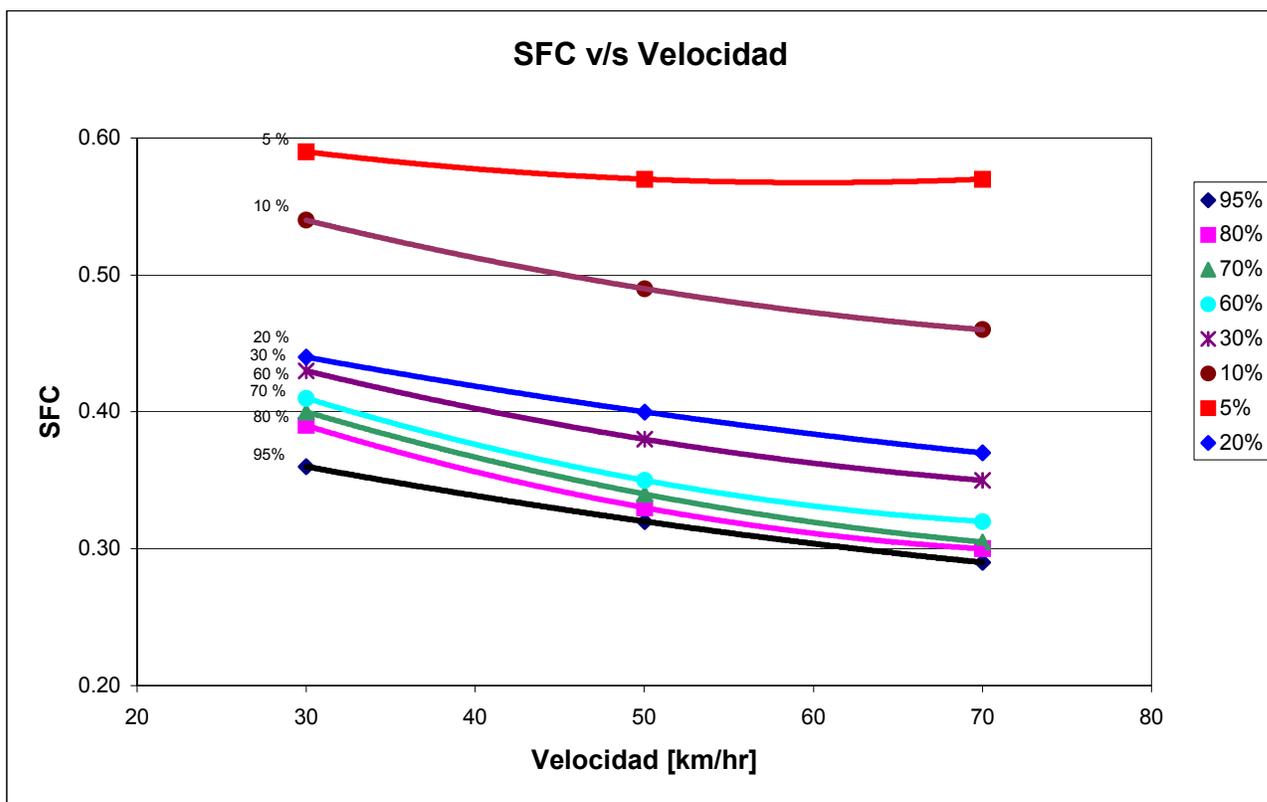
En este trabajo se han tomado mediciones con el SCRIM, lo cual permite tener las curvas fricción-velocidad para los distintos percentiles, el problema está en determinar  $V_{85}$  en términos de los parámetros geométricos que caracterizan a cada vía, ya que la velocidad de operación no es un término utilizado en nuestro país. No es posible utilizar expresiones de otros países, porque representan realidades y condiciones de diseño diferentes.

#### 4. Resultados preliminares

Las mediciones se han considerado en vías de la región Metropolitana, separando los resultados de zonas curvas y rectas. Los caminos son de dos pistas de asfalto, por lo que se deben distinguir los resultados para cada pista ya que las condiciones de acceso a la curva cambian. El SCRIM registra los valores cada 10 metros, identificando el kilometraje de las curvas, es posible obtener el valor del coeficiente de fricción (SFC) para rectas y curvas en las distintas velocidades de medición. Estos valores se grafican, de este universo de curvas se obtienen los percentiles de fricción, lo cual nos dice el porcentaje de caminos que se encuentra sobre ese valor de fricción para una cierta velocidad. Ver figura 4.1.

Para relacionar los resultados con los criterios internacionales es necesario tener una mayor cantidad de datos, de manera de representar mejor la realidad nacional.

Figura 4.1: Medidas de SCRIM & Velocidad.



## 6. REFERENCIAS

1. Echaveguren, T. “Análisis empírico del criterio  $f=2e$  de distribución de peralte para el diseño de alineamientos horizontales”. Memorias del Primer Congreso de Ingeniería Vial: La Importancia de los Estudios de Preinversión en el Diseño Vial. (DIVIAL 2001)
2. Lamm, R; Mailaender, T; Psarianos,B. Highway design and traffic safety engineering handbook. Capítulo 10: “Driving dynamics and safety criterion III”.
3. Choveiri, E; Lamm, R; Psarianos,B; Soilemezoglov, G. “A practical safety approach to highway geometric design international. Case studies: Germany, Greece, Lebanon and The United States”.
4. Heger, R; Lamm, R; Schoch, M; Steger, R. Influence of vehicle dynamics on road geometrics.