

Modelación de la Demanda de Fricción en el Frenado en Alineamientos Rectos

Sergio Vargas Tejeda

Dr. Cs. Ing, Profesor Asistente – Depto. de Ingeniería Civil - Universidad del Bío Bío
Avda Collao 1202, Concepción, E-mail: svargas@ubiobio.cl

Hernán de Solminihac T.

Ph.D., Profesor Titular – Depto. de Ingeniería y Gestión de la Construcción
Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile
Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, E-mail: hsolmini@ing.puc.cl

Tomás Echaveguren N.

Dr. Cs. Ing, Profesor Asistente – Depto. de Ingeniería Civil - Universidad de Concepción
Victor Lamas 1290, Concepción, E-mail: techaveg@udec.cl

RESUMEN

En una maniobra de frenado la distancia de parada depende de la fricción entre neumático y pavimento. La normativa nacional adopta valores de fricción de normas extranjeras, bajo la hipótesis de un frenado en condición de emergencia. Sin embargo la evidencia empírica muestra que los conductores regulan la presión sobre el pedal del freno de modo de mantener el control del vehículo. En este trabajo se modela la demanda de fricción en frenado, tanto en condición de emergencia como de control. Para ello se realizaron pruebas de campo considerando distintos conductores, vehículos, superficies de pavimento y velocidad. Los resultados muestran que en condición de emergencia las demandas de fricción son independientes de la velocidad y las máximas demandas tienden a la fricción del pavimento; mientras que en condición de control, las demandas de fricción se ajustan a un modelo logarítmico, creciente respecto de la velocidad. Finalmente, las distancias de frenado obtenidas bajo condición de control son más largas que las propuestas por el Manual de Carreteras, para velocidades menores a 80 km/h.

Palabras Clave: Fricción – Distancia de Frenado – Comportamiento del Conductor.

ABSTRACT

In braking condition the stopping distance depends of friction between tires and pavement. The national standard adopts friction factors from foreign standards, which suppose an emergency condition. However the empiric evidence shows that drivers brake in controlled condition. In this work, friction demand in emergency and controlled condition is modeled. Several braking test were carried out considering different drivers, cars, pavement surfaces and speeds. Results show that in emergency condition friction demands are independent of speeds and maximum demands are tending toward friction supply. In controlled condition friction demands depend on speeds and adjust to a increasing logarithmic model. Finally, braking distances calculated with calibrated model are longer than distances proposed by Highways Manual for speeds smaller than 80 km/h.

Key Words: Friction – Braking Distance – Driver Behavior.

1. INTRODUCCIÓN

La demanda de fricción se define como la fricción requerida por un sistema vehículo-conductor, en la interfase neumático-pavimento, para evitar la pérdida de dirección y/o control (Lamm et al, 1999). En el campo de la ingeniería de carreteras, el estudio de la demanda de fricción se ha orientado principalmente a la determinación de valores de fricción de diseño tanto para el cálculo de distancias de parada como para radios mínimos de curvatura.

Los valores de fricción longitudinal asociados al frenado consideran como hipótesis principal que los conductores frenan en condición de emergencia, bloqueando totalmente las ruedas del vehículo, de modo que el vehículo desliza sobre la superficie del pavimento (Olson, 1984). Este supuesto ha sido adoptado por la mayoría de las normativas de diseño del mundo, incluyendo el Manual de Carreteras de Chile (MOP, 2002), y puede definirse como un enfoque de oferta dado que en condición de emergencia, la fricción efectiva desarrollada en la interfase neumático-pavimento dependerá exclusivamente de la oferta de fricción provista por el pavimento.

Sin embargo, la mayoría de las maniobras de frenado en una carretera se realizan en condición de control, con porcentajes de bloqueo de las ruedas muy inferiores al 100 %. De esta forma la demanda de fricción queda definida por las desaceleraciones de los vehículos, las cuales dependen de la habilidad del conductor de frenar en forma controlada y de la capacidad de desaceleración del sistema vehículo-neumático-pavimento. La obtención de valores de fricción en base a desaceleraciones corresponde a un enfoque de demanda, toda vez que es el conductor el que decide la tasa de desaceleración requerida ante una detención esperada o inesperada.

En este último aspecto, el estado del arte es escaso. A excepción del estudio realizado por la AASHTO, cuyos resultados fueron incluidos en la normativa AASHTO 2001, no existen estudios que modelen el frenado en condición controlada y que permitan determinar demandas asociadas al fenómeno real del frenado. Incluso el estudio AASHTO es limitado dado que solo evalúa dos niveles de velocidad, un solo vehículo de prueba y una única superficie de pavimento.

El objetivo de este trabajo es modelar la demanda de fricción longitudinal durante el proceso de frenado, en trazados geométricos rectos, tanto en condición de emergencia como en condición de control. Para ello se seleccionaron 5 tramos de prueba con distintas características superficiales de fricción: resistencia al deslizamiento y textura, y se registraron

desaceleraciones en maniobras de frenado para tres tipos de vehículos, 5 conductores y 4 niveles de velocidad. Con la información obtenida se calibraron y validaron 3 modelos de demanda de fricción para distintos niveles de confiabilidad. En base a los resultados obtenidos se proponen valores de fricción de diseño y de fricción máxima considerando el comportamiento del conductor nacional.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Mecanismos de Fricción en el Frenado

El proceso de frenado se define como la reducción de la velocidad de un vehículo, debido a la transformación de toda o parte de su energía cinética en calor, producto del rozamiento tanto interno como externo. Durante este proceso las fuerzas de fricción actúan por medio de dos mecanismos (Gillespie, 1992; Wong, 2001): un mecanismo interno dado por la fricción interna entre el mecanismo de frenado (disco o tambor) y la llanta de la rueda y un mecanismo externo definido por el coeficiente de fricción entre el neumático y pavimento, el cual a su vez depende del deslizamiento relativo entre ambas superficies. Cuando la rueda está parcialmente bloqueada y no desliza completamente actúan ambos mecanismos, generando una maniobra de frenado estable. Al contrario, cuando la rueda se bloquea completamente y desliza sobre el pavimento, actúa solo el segundo, generando una maniobra de frenado inestable, con pérdida de control del vehículo. De esta forma el valor del coeficiente de fricción entre el neumático-pavimento depende del porcentaje de deslizamiento del neumático respecto del pavimento, tal como se muestra en la Figura 1.

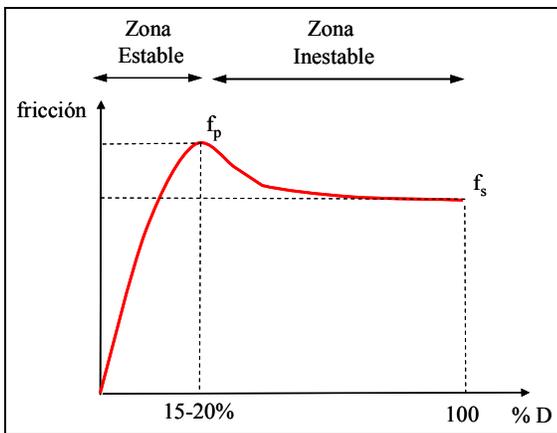


FIGURA 1: Relación entre el Coeficiente de Fricción y el Porcentaje de Deslizamiento

En la figura anterior, f_p corresponde a la máxima fricción y f_s a la fricción en condición de bloqueo.

2.2 Relación entre Desaceleración y Demanda de Fricción

Considerando un modelo de masa puntual la demanda de fricción en el frenado puede ser calculada asumiendo que las fuerzas de fricción se distribuyen de igual forma en todas las ruedas. Despreciando el efecto de la pendiente, es posible demostrar que la demanda de fricción longitudinal en una maniobra de frenado solo depende de la desaceleración del vehículo.

$$f_L = \frac{d_x}{g} \quad (1)$$

Donde f_L es la demanda de fricción longitudinal en el frenado, d_x es la desaceleración media espacial durante el frenado y g es la aceleración de gravedad.

2.3 El Modelo de Distancia de Parada

La distancia de parada se define como la mínima distancia de visibilidad que permitirá a un vehículo viajando a una velocidad cercana a la de diseño, detenerse justo antes de alcanzar un objeto en su trayectoria (AASHTO, 2004). Se compone de una distancia de percepción y reacción y una distancia de frenado. La demanda de fricción longitudinal solo influye en la componente de frenado.

Si se considera a un vehículo bajo un modelo de masa puntual, la distancia de parada queda definida en función de la velocidad (V), el tiempo de percepción-reacción (t_{PR}) la fricción longitudinal (f_L) y la pendiente longitudinal (i):

$$D_p = \frac{V * t_{PR}}{3.6} + \frac{V^2}{254(f_L \pm i)} \quad (2)$$

En el año 2001, la AASHTO propuso un modelo alternativo basado en desaceleraciones, el cual solo corresponde a un modelo equivalente al anterior, considerando la relación entre las desaceleraciones y las demandas de fricción, y pendiente longitudinal nula:

$$D_p = \frac{V * t_{PR}}{3.6} + \frac{V^2}{25.4(a)} \quad (3)$$

El valor de desaceleración (a) propuesto por AASHTO es de 3.4 m/s^2 lo cual es equivalente a una demanda de fricción de 0.34. Según AASHTO este valor es independiente de la velocidad, lo cual puede ser discutible considerando que solo se estudiaron dos niveles (65 y 90 km/h).

2.4 Modelos de Demanda de Fricción Longitudinal Existentes

De acuerdo a la literatura las principales variables que influyen sobre la desaceleración de un vehículo en una maniobra de frenado son: la velocidad inicial, el tipo de conductor, el tipo de vehículo, la superficie de rodado, el tipo de maniobra y el sistema de frenos (Olson, 1984).

En la literatura no se encontraron modelos de demanda de fricción que incorporaran todas las variables anteriores. Los estudios disponibles solo se orientan a definir valores de distancia de frenado o de fricción de diseño respecto de un percentil característico de la población conductora, dada ciertas características fijas de experimentación (Olson, 1984; Fambro et al, 2000; Durth and Bernard, 2000; Greiber, 2008). Estos estudios no profundizan en el comportamiento de la demanda respecto de la velocidad inicial, la superficie o el tipo de vehículo.

3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1 Modelo Conceptual

El cálculo de valores de demanda de fricción requiere de la caracterización del comportamiento de los conductores respecto de las desaceleraciones requeridas. Una vez conocida la distribución de desaceleraciones, para distintos niveles de velocidad, vehículos y conductores es posible calcular valores de demanda de fricción según algún nivel de confiabilidad elegido (percentil). Esto permite la construcción de un modelo agregado de demanda de fricción que incorpore a todos los vehículos,

conductores, superficies y niveles de velocidad. La Figura 2 muestra el modelo conceptual desarrollado en este trabajo.

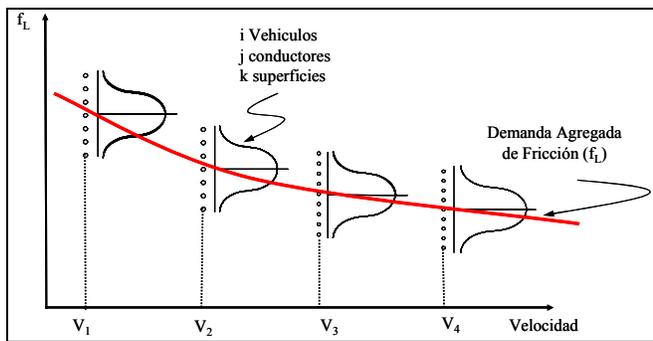


FIGURA 2: Modelo Agregado de Demanda de Fricción Longitudinal en Maniobra de Frenado

Dependiendo del percentil elegido se puede contar con modelos agregados de demanda que representen la “curva de diseño” y la “curva de demanda máxima”. Esta potencialidad de agrupar las demandas de fricción en una función agregada es de gran utilidad en la definición de valores de diseño y valores máximos para distintas rangos de velocidad inicial.

3.2 Variables Explicativas

La Tabla 1 muestra un resumen con las variables consideradas en la experimentación. Si bien se realizaron pruebas con y sin frenos antibloqueo, en este trabajo solo se describen los resultados obtenidos en la condición más desfavorable, es decir sin sistemas antibloqueo.

TABLA 1: Variables Explicativas en Proceso de Frenado

Variable	Tipo	Niveles	Rango
Desaceleraciones	Dependiente	---	0 – 10 m/s ²
Velocidad	Independiente	4	40 - 60 – 80 – 100 km/h
Conductor	Independiente	5	23 a 67 años
Tipo vehículo	Independiente	3	City Car, Sedán, SUV
Resistencia al deslizamiento	Independiente	2	Alta (RD > 0.5) y baja (RD < 0.5)
Macrotextura	Independiente	2	Alta (Tx > 0.6) y Baja (Tx < 0.6)
Condición de Maniobra	Independiente	2	Emergencia y Control

3.3 Selección de Tramos de Prueba

Los tramos de prueba fueron segmentos de pista que contaran con características homogéneas en toda su longitud, tales como tipo de superficie, geometría de la sección transversal; y que presentan condiciones de seguridad adecuadas en el entorno para la realización de las pruebas de frenado. Los criterios considerados en la selección de los tramos fueron los siguientes:

- Tramos de geometría recta
- Longitud mínima de prueba, 600 m.
- Pendiente longitudinal < 1%
- Berma pavimentada de ancho mayor o igual a 1 m.
- Bajo nivel de tránsito, TMDA < 2000 veh/día/pista
- Ausencia de accesos laterales.
- Disponibilidad de espacio para retornos.

La Tabla 2 presenta un resumen con los tramos seleccionados, con de resistencia al deslizamiento y macrotextura medidos con equipo SCRIM y perfilómetro láser, respectivamente.

TABLA 2: Tramos Seleccionados para Pruebas de Frenado

Tramo	Región	RD (SFC)	MTx (mm)	Condición de Prueba
1	RM	0.9	0.8	Control
2	RM	0.7	0.7	Control y Emergencia
3	6ª	0.4	0.5	Control
4	RM	0.7	0.5	Emergencia
5	6a	0.6	1.1	Emergencia

SFC: Side Force Coefficient

3.4 Tamaño Muestral

El tamaño muestral fue calculado aplicando un análisis de potencia estadística (Cohen, 1988) dando por resultado 5 unidades experimentales y 2 repeticiones en cada nivel de tratamiento, considerando un nivel de confianza entre el 90 y 95%, una potencia estadística mayor a 0.7, y un efecto tamaño medio de 0.25. Esto correspondió a una muestra de 5 conductores, con un total de 10 pruebas de frenado para cada nivel de velocidad, tipo de vehículo, tipo de superficie y tipo de maniobra. Esto dio un total de 480 pruebas de frenado.

3.5 Recolección de Datos

Las pruebas de frenado fueron desarrolladas en condición de pavimento húmedo, para lo cual se utilizó un camión cisterna que humedeció cada superficie en base a especificación de caudal predeterminedada. Se implementó en cada caso un plan de señalización y desvío de tránsito y se tomaron todas las medidas de seguridad necesarias para el desarrollo de las pruebas.

En cada vehículo utilizado se acopló un acelerómetro marca VERICOM, el cual permitió registrar todas las variables cinemáticas requeridas para el desarrollo del modelo, tales como distancias, velocidades y desaceleraciones, asociables a cada unidad experimental.

Como resultado del trabajo de campo se obtuvieron registros de desaceleración, velocidad y distancia recorrida en todas las maniobras, tanto en condición de control como de emergencia. La demanda de fricción fue determinada en base a las medias espaciales de los registros de desaceleración. La velocidad inicial y la distancia de frenado fueron obtenidas directamente de los registros del acelerómetro.

3.6 Análisis de Datos

3.6.1 Identificación de Outliers

Antes de calcular las demandas de fricción se identificaron los datos anómalos (outliers) para cada nivel de velocidad y tipo de maniobra. En este trabajo se aplicó el Método Leverage cuya ventaja es que la técnica de identificación de outliers es independiente del tamaño de la muestra.

3.6.2 Análisis Exploratorio

El análisis exploratorio consistió en aplicar herramientas de estadística básica y de bondad de ajuste para caracterizar los datos de demanda de fricción. Para ello se aplicaron tres test de normalidad: Test de Anderson – Darling (A-D), Test de Shapiro-Wilk (S-W) y el Test de Kolmogorov–Smirnov (K-S). Se consideró un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ determinándose que las demandas de fricción tanto en condición de control como de emergencia se ajustaban a una distribución normal para cada nivel de velocidad.

3.6.3 Análisis de Varianza (ANOVA)

El análisis de varianza se realizó en dos partes. En la primera parte se analizó el efecto de las variables explicativas sobre la variable respuesta a través de gráficos de efectos principales. En la segunda parte se aplicó el análisis de varianza a través de un modelo lineal generalizado (MLG). Los principales resultados del análisis de varianza fueron los siguientes:

- En la condición de control no existe una relación explícita entre la demanda de fricción y el conjunto de factores considerados ($R^2 = 0.15$). El único factor relevante que condiciona la respuesta de la variable dependiente es la velocidad inicial del vehículo ($p < 0.001$).
- En la condición de emergencia se aprecia que la relación entre la demanda de fricción y los factores considerados es débil ($R^2 = 0.55$). Al analizar los efectos individuales, el valor de resistencia al deslizamiento es el factor principal que afecta la gran media de la variable dependiente ($p < 0.001$).

3.6.4 Resultados Obtenidos

Las Tablas 3 y 4 muestra los resultados de media y desviación estándar tanto para la condición controlada como de emergencia. También se presenta los percentiles 50 ($f_{L,50}$), 85 ($f_{L,85}$) y 99 ($f_{L,99}$) como percentiles característicos de cada distribución.

TABLA 3: Distribuciones de Demanda de Fricción en Condición de Control

Velocidad (km/h)	μ	σ	$f_{L,50}$	$f_{L,85}$	$f_{L,99}$
40	0,27	0,067	0,27	0,34	0,43
60	0,33	0,057	0,33	0,39	0,46
80	0,33	0,058	0,33	0,39	0,46
100	0,35	0,056	0,35	0,41	0,48

TABLA 4: Distribuciones de Demanda de Fricción en Condición de Emergencia

Resistencia al Deslizamiento (SFC)	μ	σ	$f_{L,50}$	$f_{L,85}$	$f_{L,99}$
0.6	0.56	0.019	0.56	0.58	0.61
0.7	0.62	0.038	0.62	0.66	0.72

4. MODELACIÓN DE LA DEMANDA DE FRICCIÓN

Considerando los resultados del ANOVA, solo se calibró y validó un modelo de demanda de fricción longitudinal para frenado en condición de control, el cual constituye la base para la definición de valores de fricción de diseño y de demandas máximas de fricción. Se verificó además la relación entre la demanda de fricción en condición de emergencia y la resistencia al deslizamiento del pavimento, de manera de generalizar los resultados obtenidos.

4.1 Calibración y Validación

Para la condición de control la calibración se realizó aplicando métodos robustos de regresión lineal y no lineal. Para calibrar se seleccionó el 70% de la base de datos, manteniendo el 30% restante para validación. Se analizaron 3 tipos de modelos: lineal, logarítmico y potencial siendo el modelo logarítmico el que presentó una mejor significancia estadística ($R^2 > 0.95$). Los modelos fueron calibrados para los tres percentiles calculados (50, 85 y 99). La Figura 3 presenta los modelos calibrados mientras que la Tabla 5 presenta los factores de calibración de cada modelo.

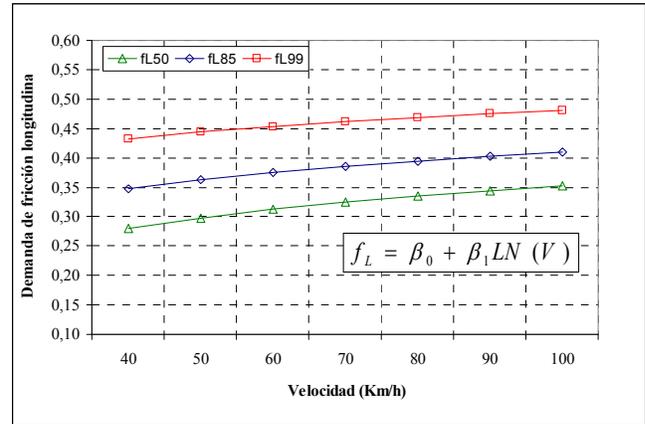


FIGURA 3: Modelos de demanda de fricción en frenado bajo condición de control

TABLA 5: Resultados de la calibración, en condición de control

Percentil	Coeficientes de Calibración		S	R_a
	β_0	β_1		
$f_{L,50}$	-0.024	0.082	0.01	0.94
$f_{L,85}$	0.084	0.071	0.01	0.94
$f_{L,99}$	0.249	0.050	< 0.01	0.96

En todos los casos, el bajo error estándar promedio y el alto valor del coeficiente de determinación sugieren que los modelos propuestos son adecuados. Para validar los modelos se verificó la calidad del ajuste respecto del 30% restante de la base de datos. Las Figuras 4 y 5 presentan, a modo de ejemplo, la validación para los modelos del percentil 50 ($f_{L,50}$) y 99 ($f_{L,99}$).

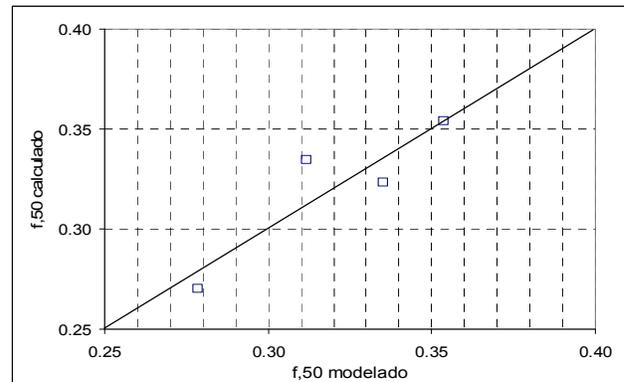


FIGURA 4: Calidad de Ajuste Modelo $f_{L,50}$

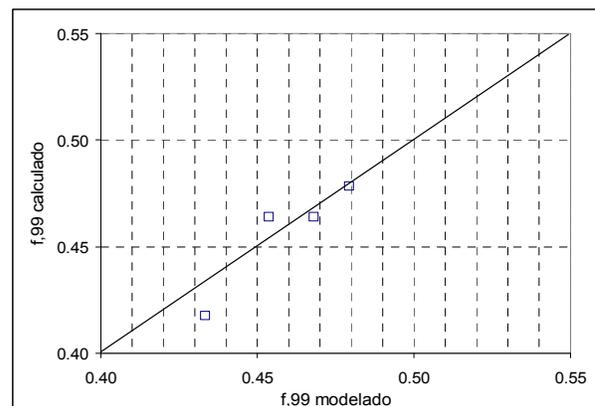


FIGURA 5: Calidad de Ajuste Modelo $f_{L,99}$

En ambos casos se aprecia una buena correlación entre los valores calculados de acuerdo a datos de terreno y los estimados de acuerdo a los modelos propuestos. Esto, sumado a los valores de R^2 y SEE presentados en Tabla 5 sugiere que los modelos propuestos son robustos.

En el caso de la condición de emergencia, solo se calcularon los percentiles de demanda y se compararon con la resistencia al deslizamiento. Los resultados muestran que en términos prácticos es posible afirmar que en condición de emergencia las máximas demandas tienden a la oferta de fricción del pavimento:

$$f_{L,99} = K * RD \quad \text{con } K \approx 1.0 \quad (4)$$

Donde RD es la resistencia al deslizamiento en el pavimento, medida con equipo SCRIM a 50 km/h. Para los percentiles 50 y 85 el valor de K tiende a 0.9 y 0.95 respectivamente.

4.2 Análisis de Resultados

Los modelos desarrollados, para la condición de control, permiten calcular distintos niveles demanda de fricción según sea la naturaleza del estudio que se esté realizando. El modelo $f_{L,50}$ que representa el comportamiento promedio de los conductores, es de utilidad en el campo del diseño geométrico para la definición de distancias de visibilidad de parada. Por otra parte, los modelos $f_{L,85}$ y $f_{L,99}$, que representan las máximas exigencias del usuario sobre el pavimento, son de utilidad en la determinación de valores mínimos de resistencia al deslizamiento en pavimentos.

En el caso de la demanda en condición de emergencia los resultados muestran que las demandas de fricción son iguales o inferiores a la oferta de fricción del pavimento. En virtud de los datos, una regla sencilla de aplicación práctica sería:

- $f_{LE,50}$: igual al 90% de la resistencia al deslizamiento del pavimento.
- $f_{LE,85}$: igual al 95% de la resistencia al deslizamiento del pavimento.
- $f_{LE,99}$: igual a la resistencia al deslizamiento del pavimento.

5. APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE DISTANCIAS DE FRENADO

La demanda de fricción asociada a un conductor promedio ($f_{L,50}$) puede considerarse como la fricción de diseño con la cual se debe calcular la mínima distancia de visibilidad de parada. El modelo asociado a las máximas demandas ($f_{L,99}$) representa la mínima fricción que debería ofrecer el pavimento a aquellos conductores “no de diseño”, para que no pierdan el control del vehículo en la maniobra de frenado. La diferencia entre $f_{L,50}$ y $f_{L,99}$ representa el mínimo margen de seguridad ante una maniobra de frenado en condición de control, el cual dependerá finalmente del valor de fricción que proporcione el pavimento.

La Tabla 6 muestra una comparación entre la distancia de frenado (D_f) calculada con el modelo $f_{L,50}$, los valores propuestos por el Manual de Carreteras Volumen 3 y los valores propuestos por AASHTO 2004. También se muestra los valores de demanda de fricción máxima ($f_{L,99}$) que corresponde a la fricción mínima requerida en la superficie del pavimento para evitar el deslizamiento.

TABLA 6: Comparación de D_f respecto de Manual de Carreteras y Normativa AASHTO

V (km/h)	Propuesta		Manual de Carreteras		AASHTO 2004	
	$f_{L,50}$	Df (m)	f_L	Df (m)	Desaceleración (m/s ²)	Df 4 (m)
40	0,29	21	0.415	15,2	3.4	18,2
50	0,31	32	0.41	24	3.4	28,4
60	0,33	43	0.40	35,5	3.4	40,8
70	0,34	57	0.38	50,8	3.4	55,6
80	0,35	72	0.36	70	3.4	72,6
90	0,36	89	0.34	93,9	3.4	91,9
100	0,37	107	0.33	119,4	3.4	113,5
110	0,37 (*)	127	0.32	149	3.4	137,3
120	0,38 (*)	149	0.31	183	3.4	163,4

(*) Valores extrapolados del modelo $f_{L,50}$. Son solo referenciales

Para velocidades de diseño mayor o igual a 80 km/h, el promedio de conductores nacionales demanda mayor fricción longitudinal en comparación a los factores de fricción propuestos por el Manual de Carreteras, por tanto las distancias de frenado requeridas son más cortas que las propuestas por el Manual. La máxima diferencia se tiene a 120 km/h donde las distancias de frenado propuestas en este trabajo son un 19% más cortas. Por otro lado, al comparar los valores propuestos con la normativa AASHTO, se observa que éstos también son menores, sin embargo dichas diferencias no son significativas, siendo menores al 8%.

Para velocidades de diseño menores a 80 km/h, las demandas de fricción de los conductores nacionales son menores a los factores de fricción propuesto por el Manual, por lo que requieren distancias de frenado más largas respecto de las propuestas por el Manual de Carreteras. Las diferencias son mayores a medida que la velocidad se reduce, alcanzando una diferencia máxima de 41% para 40 km/h. Esta situación cobra especial relevancia en caminos de bajo tránsito donde las velocidades de diseño no superan los 80 km/h. Sin embargo, dado que en dichos caminos los niveles tránsito son bajos y las velocidades menores, se requeriría evaluar en forma alternativa la distancia de visibilidad de maniobra.

Al comparar los valores propuestos con los valores AASHTO, para velocidades menores a 80 km/h, se aprecia que las distancias de frenado requeridas por los conductores nacionales son mayores a las recomendadas por AASHTO, sin embargo, las diferencias no son significativas, siendo menores al 15%.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se calibraron modelos de demanda de fricción en maniobras de frenado, tanto en condición de emergencia como de control. En el primer caso se determinó que las demandas de fricción son independientes de la velocidad inicial y tienden a la oferta de fricción del pavimento, en la condición última de deslizamiento. En el segundo caso, las demandas de fricción presentan una relación logarítmica creciente respecto de la velocidad, y son independientes de la oferta de fricción del pavimento.

El modelo logarítmico para el percentil 50 fue aplicado en el cálculo de distancias de frenado en condición controlada. Los resultados mostraron que para velocidades menores a 80 km/h los conductores nacionales requieren distancias de frenado mayores a las propuestas en el Manual de Carreteras, mientras que para velocidades mayores o iguales a 80 km/h las distancias requeridas son menores. Las máximas diferencias alcanzan un 41% para 40/km/h y un 19% para 120 km/h.

Al comparar los valores calculados con la normativa AASHTO los resultados indican el mismo quiebre en la velocidad de 80 Km/h pero las diferencias son poco significativas, no superando el 10%.

La ventaja de los modelos desarrollados en condición de control, radica en que permiten incorporar el comportamiento real del conductor nacional bajo la hipótesis de mantener el control del vehículo durante la maniobra de frenado, tanto para definir valores de fricción de diseño como valores de fricción máxima (o mínima del pavimento). Esto permite lograr diseños más integrados, consistentes y seguros, considerando la integración de la fase de diseño con la fase de operación, específicamente con el mantenimiento del pavimento.

Considerando que este trabajo generó una base de información de terreno amplia, y que este tipo de experimentación solo había sido realizada en Estados Unidos para la actualización de la norma de diseño geométrico AASHTO 2004, es posible afirmar que los modelos desarrollados son un aporte al estado del conocimiento, y sustentar la opción de utilizar estos modelos para la actualización de la normativa nacional de diseño geométrico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDEF) por el financiamiento otorgado para el desarrollo de este trabajo, en el marco del proyecto FONDEF D03I 1042.

REFERENCIAS

- AASHTO (2001). **A Policy on Geometric Design of Highways and Streets**. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, Estados Unidos.
- Cohen, J. (1988). **Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences**. 2nd Edition. New York: Academic Press.
- Durth, W. y Bernhard, M. (2000). Revised Design Parameters for Stopping Sight Distance. **2nd International Symposium on Highway Geometric Design**. (pp. 410 – 421), Maine, Germany.
- Fambro, D., Fitzpatrick, K. y Koppa, R. (2000). New Stopping Sight Distance Model for Use in Highway Geometric Design. **Transportation Research Record**, 1701, 1 – 8.
- Gillespie, T. (1992). **Fundamental of Vehicle Dynamics**. 1st Edition. United States: Society of Automotive Engineers Press.
- Greibe, P. (2008). Determination of Braking Distance and Driver Behaviour Based on Braking Trials. **87th Transportation Research Board Annual Meeting**, Washington D.C., USA.
- Lamm, R., Psarianos, B. y Mailander, T. (1999). **Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook**. 1st Edition. USA: McGraw Hill.
- Ministerio de Obras Públicas (2008) **Instrucciones de Diseño**. En Manual de Carreteras Vol. 3, Santiago, Chile.
- Olson, P. (1984). **Parameters Affecting Stopping Sight Distance**. NCHRP Report 270. USA: Transportation Research Board.
- Wong, J. Y. (2001). **Theory of Ground Vehicles**. 3rd Edition. New York: Wiley – Interscience.