

Modelación de la Demanda de Fricción Lateral en Curvas Horizontales, en Carreteras Chilenas

Hernán de Solminihac¹, Sergio Vargas Tejeda², Tomás Echaveguren²

¹Profesor Titular – Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción – Pontificia Universidad Católica de Chile

²Investigador - Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción – Pontificia Universidad Católica de Chile

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

RESUMEN

Para el diseño geométrico de curvas horizontales es esencial conocer la demanda de fricción lateral sobre la curva. En Chile los valores de fricción han sido adaptados de normativas extranjeras pero no han sido validados mediante observación de campo. En este trabajo se desarrollan 4 modelos de demanda de fricción en base a observaciones de curvas en carreteras chilenas. Para ello se seleccionó 55 curvas horizontales, se obtuvo la información geométrica, y se midió velocidades con pistola láser en tres puntos de cada curva. Se calibraron y validaron modelos de demanda de fricción en función de los percentiles de velocidad V_{85} y V_{99} , y del grado de curvatura (DC). Los modelos fueron aplicados en el cálculo de radios mínimos de curvatura. Los resultados mostraron que para velocidades menores o iguales a 90 km/h, los conductores nacionales aceptan radios menores a los propuestos por el Manual de Carreteras, y para velocidades mayores a 90 km/h requieren radios mayores. Esto indica que es recomendable revisar los actuales valores de fricción contenidos en el Manual de Carreteras.

Palabras Clave: Demanda de Fricción Lateral, Radio de Curvatura, Velocidad

ABSTRACT

For geometrical design of horizontal curves to know the side friction demand on curves is essential. In Chile, friction design factors have been adaptive from foreigner Standards but they have not been validated with field information. In this work, information of horizontal curves in Chilean roads was used to develop 4 side friction demand models. In doing so, 55 curves were chosen, geometrical information was obtained and speeds were measured in three point of each curve. In function of speeds percentiles (V_{85} and V_{99}), and degree of curvature (DC), friction demand models were calibrated and validated. To calculate minimum radius of curvature, the models were applied. The results showed that for speeds equal or lower than 90 kph, drivers admit radius lower than proposed radius in Chilean Standards, and for speeds higher than 90 kph drivers request radius higher them. Therefore a review of current friction factors in Chilean Standards is recommended.

Keywords: Side Friction Demand, Radius of Curvature, Speed

1. INTRODUCCIÓN

La demanda de fricción lateral en curvas horizontales se define como la fricción requerida por un sistema vehículo-conductor para mantener el equilibrio dinámico dentro de la curva sin pérdida de dirección y/o control. Usualmente se calcula en base a

la relación física existente entre la velocidad del vehículo, el radio de curvatura y el peralte de la curva.

La demanda de fricción lateral ha sido estudiada en el campo del diseño geométrico de carreteras, principalmente para definir valores de fricción de diseño para curvas horizontales. Estos valores han sido definidos en base a la tolerancia del conductor ante aceleraciones laterales y por tanto representan un límite de comodidad en la conducción, y no necesariamente un límite ante un eventual deslizamiento del vehículo (Lamm et al, 1991; Bonneson, 1999; AASHTO, 2004). La pregunta nace entonces: ¿El valor de fricción de diseño es el mismo para cualquier conductor en cualquier país? ¿Cuál es el margen de seguridad respecto del deslizamiento?

En Chile los factores de fricción de diseño han sido adaptados de la Normativa 3.1-IC de España. Estos valores no han sido verificados mediante estudios de campo en carreteras nacionales. Tampoco se han realizado estudios tendientes a definir cuales son las máximas demandas de fricción en curvas horizontales, que a su vez representan la mínima fricción que debe proporcionar el pavimento para mantener un cierto grado de seguridad.

El objetivo de este trabajo es modelar la demanda de fricción lateral en curvas horizontales, en carreteras chilenas. En base a los resultados obtenidos se proponen valores de fricción de diseño y de fricción máxima considerando el comportamiento del conductor nacional. Para ello se seleccionó 55 curvas que cumplieran con ciertas características geométricas y operacionales, se realizó un levantamiento topográfico y se midió velocidades con pistola láser en tres puntos de cada curva, tanto en la pista interior como exterior. Con la información geométrica y las mediciones de velocidad se calculó la demanda de fricción para cada registro de velocidad, se analizaron las tendencias estadísticas y se calibraron y validaron 4 modelos de demanda de fricción. Posteriormente estos modelos se aplicaron en el diseño de radios mínimos de curvatura en carreteras.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 La demanda de Fricción

La demanda de fricción lateral en una curva horizontal se obtiene a partir de la ecuación de equilibrio dinámico de un vehículo que circula por una trayectoria curva. Si se considera al vehículo como una masa puntual concentrada en su centro de gravedad, la relación entre la fricción demandada (f), la velocidad del vehículo (V), el radio de curvatura (R) y el peralte de la curva (p) se expresa como:

$$f = \frac{V^2}{R} - p \quad (1)$$

Dada la heterogeneidad de conductores que circulan por la curva, las velocidades se comportan de manera aleatoria y por tanto la fricción demandada no es un valor constante sino que presenta una cierta distribución de probabilidades. Esta distribución está condicionada por la distribución de velocidades en la curva. De esta forma, la demanda de fricción puede caracterizarse en función del percentil 85 (f_{85}) o del percentil 99 (f_{99}), considerados comúnmente para el diseño o para estudios de seguridad, respectivamente.

2.2 La Fricción en el Diseño Geométrico de Curvas Horizontales

Para el diseño de curvas horizontales, las distintas normativas proponen valores de fricción que en conjunto con el peralte permiten determinar el radio de la curva para una cierta velocidad de diseño. La hipótesis básica es que los conductores presentan un comportamiento homogéneo respecto de un “conductor de diseño”, y demandan una cierta fricción de diseño.

$$t_{\max} = 0.265 - \frac{V}{602.5} \quad 30 \text{ km/h} < V \leq 80 \text{ km/h} \quad (2)$$

$$t_{\max} = 0.193 - \frac{V}{1134} \quad 80 \text{ km/h} \leq V \leq 120 \text{ km/h} \quad (3)$$

Estos valores de fricción han sido adoptados de la normativa 3.1-IC de España, los cuales, al igual que los propuestos por la normativa de Canadá (TAC, 1995) y Estados Unidos (AASHTO, 2004) provienen de los estudios desarrollados por la AASHTO. Estos valores hoy pueden ser cuestionables, debido a que los conductores actuales son más tolerantes a la aceleración lateral, básicamente por: cambios en el sistema de suspensión de los vehículos, cambios en las condiciones de comodidad de los asientos y cambios en la tecnología de fabricación de los neumáticos (Krammes, 2000). Por tanto, pueden estar dispuestos a aceptar valores de fricción más altos que los considerados en el diseño (Lamm et al, 1999; Bonneson, 2001; Gattis et al, 2005).

2.3 Modelos de Demanda de Fricción Existentes

Los modelos de demanda de fricción pueden clasificarse en modelos puntuales y modelos agregados. Los *modelos puntuales* describen la demanda de fricción (f_{85}) en función de la velocidad de operación (V_{85}) para un valor de radio (R) fijo (Morral y Talarico, 1993). Los *modelos agregados*, en cambio, reconocen que existe una correlación entre el radio de curvatura y la velocidad, por lo que la demanda de fricción puede ser representada en forma agregada en función de una única variable: el radio (R) o la velocidad de operación (V_{85}). Los principales modelos agregados existentes en la literatura se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1: Modelos Agregados de Demanda de Fricción (Lamm,1991; Bonneson, 1999; Gattis, 2005)

Año	Autor	Modelo	n	R ²
1991	Lamm et al	(1) $f_{85} = 0.253 + 2.330 \cdot 10^{-3} \cdot V_{85} - 9.0 \cdot 10^{-5} \cdot V_{85}^2$	197	0.56
		(2) $f_{85} = 0.014 + 2.248 \cdot 10^{-2} \cdot DC - 5.7 \cdot 10^{-4} \cdot (DC)^2$		
1999	Bonneson	$f_{85} = 0.256 - 0.0022V_{a,85} + 0.0133 \cdot (V_{a,85} - V_{c,85})$	55	0.96
2005	Gattis et al	$f_{90} = 0.424 - 0.0032V_{90}$	5	0.38

f_{85} : percentil 85 de la demanda de fricción lateral, f_{90} : percentil 90 de la demanda de fricción lateral, DC: grado de curvatura ($5729.6/R$, en $^\circ/\text{pie}$), V_{85} : percentil 85 de velocidades en la curva (km/h), V_{90} : percentil 90 de velocidades en la curva, V_a : velocidad de aproximación a la curva (km/h), V_c : velocidad en la curva (km/h).

El criterio básico para definir los valores de fricción de diseño ha sido la máxima tolerancia de los conductores a las aceleraciones laterales. Las primeras pruebas fueron desarrolladas por la AASHTO en la década del '40, donde se probó un panel de conductores circulando por curvas de radio conocido y a distintas velocidades. Los valores de diseño fueron definidos como las aceleraciones límites (en unidades G) a partir de las cuales los conductores comienzan a sentirse “incómodos” (Lamm et al, 1991; Bonneson, 1999; AASHTO, 2004). Estos valores representan una condición de comodidad en la conducción, y no representan un límite ante un eventual deslizamiento. Para verificar esto último se debe necesariamente incorporar la fricción proporcionada por el pavimento.

En Chile, El Manual de Carreteras Volumen 3 (MOP, 2002) indica las siguientes expresiones referidas a la fricción de diseño para el cálculo de radios mínimos:

Los modelos de Lamm et al (1991) (1), Bonneson (1999) y Gattis (2005) presentan una relación decreciente respecto de la velocidad. Esto se explica porque a medida que el radio de curvatura es mayor, aumentan las velocidades de operación pero a tasas decrecientes. Es decir, a mayores radios de curvatura, menor es el efecto del incremento de las velocidades sobre la demanda de fricción y mayor es el efecto del radio. Lo mismo sucede con el grado de curvatura en el modelo (2) de Lamm (1999). A medida que el radio aumenta, el grado de curvatura se reduce, y se reduce la demanda de fricción.

La utilidad de los modelos agregados, respecto de los puntuales, es que permiten encontrar una única función de demanda de fricción asociada a un cierto percentil de velocidad o al grado de curvatura. De esta forma, si se considera un percentil 85 de fricción (f_{85}) es posible encontrar un modelo de “fricción de diseño” asociado a la comodidad, mientras que si se considera un percentil 99 (f_{99}) es posible definir un “modelo de fricción máxima” asociado a la seguridad. La diferencia entre ambos modelos representa el margen de seguridad teórico para aquellos conductores que no son “conductores de diseño”.

3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1 Selección de Sitios de Medición

Para el desarrollo de los modelos se seleccionaron curvas horizontales ubicadas en carreteras bidireccionales, de calzada única, entre la V y la VII Región. Se realizó una selección preliminar de 135 curvas mediante información cartográfica. Posteriormente se verificó en terreno el cumplimiento de los siguientes requisitos geométricos:

- Pavimento en buen estado.
- Bermas pavimentadas y correctamente delineadas.
- Ancho de sección transversal constante.
- Ausencia de intersecciones y/o paraderos en la vecindad del sitio de medición.
- Ausencia de señalización reglamentaria de velocidad.

- Visibilidad suficiente respecto de la velocidad de diseño.
- Pendiente menor o igual al 5%.
- Tangente de entrada y salida mayor a 200 m.

Bajo estos requisitos, la muestra se redujo a 109 curvas. Posteriormente se realizó una selección definitiva de las curvas considerando los niveles de TMDA de vehículos livianos registrados en cada sitio. Se consideró aquellas curvas con TMDA entre 500 y 1500 veh/día, llegando a una muestra final de 55 curvas.

3.2 Recolección de Datos de Terreno

a) Geometría de Curvas

Se realizó un levantamiento topográfico en las 55 curvas elegidas, para determinar con exactitud el radio de curvatura, desarrollo de la curva, el peralte, los anchos de pistas, anchos de bermas, presencia de curvas de enlace, y pendiente longitudinal. También se identificó y replanteo los puntos característicos de cada curva, principio de curva (PC), punto medio de la curva (MC) y final de curva (FC). La Tabla 2 muestra un resumen con las características geométricas de la muestra elegida.

TABLA 2: Resumen de Características Geométricas de Sitios de Medición

Característica	Media	Desviación Standard	Mínimo	Máximo
Radio de Curvatura (m)	354	326	83	1850
Grado de Curvatura ($^{\circ}/100$ m)	26.4	16.9	3.1	69.0
Peralte (%)	5.7	1.7	2.6	8.1
Desarrollo de Curva Circular (m)	138	92	35	495
Ancho de pista (m)	3.39	0.25	2.85	3.80
Ancho de berma (m)	1.15	0.41	0.50	2.20
Pendiente Longitudinal (%)	0.02	1.46	0.11	+/-4.12

b) Mediciones de Velocidad de Operación

Se realizaron mediciones de velocidad en los tres puntos característicos de cada curva (PC, MC y FC), tanto para la pista

interna como externa. Éstas se realizaron con pistola láser, considerando un muestreo aleatorio de vehículos livianos. Se consideró un registro de al menos 35 mediciones por punto y se desechó cualquier medición en que el vehículo invadiera el eje de la pista o el borde de la berma.

La posición de medición se seleccionó minimizando el ángulo entre la velocidad del vehículo y el láser de medición, de manera de registrar la velocidad real del vehículo y no una componente de ésta. Esto se conoce como efecto coseno.

3.3 Análisis de Datos

a) Identificación de Outliers

Antes de calcular las demandas de fricción se identificaron los datos anómalos (outliers) en las mediciones de velocidad. Se identificaron outliers en cada punto de medición (PC, MC y FC) y para cada curva. 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.

En todos los casos el número de outliers identificados fue menor a 5, por lo que cada punto de medición quedó con un mínimo de 30 registros de velocidad.

b) Cálculo de Percentiles de Velocidad y Demanda de Fricción

Una vez depurada la base de datos de velocidades, y con la información geométrica de las curvas se procedió a calcular la demanda de fricción mediante la ecuación (1), para cada punto característico (PC, MC y FC) y en cada pista. De esta forma, se asoció a cada punto una distribución de velocidades $\phi(V)$ y una distribución de demandas de fricción $\phi(f)$.

Mediante un análisis exploratorio de los datos, se verificó que tanto la velocidad como la demanda de fricción se distribuyen en forma normal. Para ello se utilizó el test de Anderson-Darling con un 95% de confianza. Luego, se procedió al cálculo de los percentiles 85 y 99 de tanto de velocidad como de demanda de fricción. La Tabla 3 muestra un resumen con los resultados agregados (media y desviación) para cada punto de medición y para cada pista.

TABLA 3: Percentiles de Velocidad y de Demanda de Fricción (n = 55 curvas)

Pista	Percentil	PC		MC		FC	
		Media	Desviación	Media	Desviación	Media	Desviación
Interna	V ₈₅	85.1	10.3	82.8	11.4	83.7	9.9
	V ₉₉	94.7	12.6	91.9	13.1	93.4	11.5
	f ₈₅	0.18	0.08	0.16	0.07	0.18	0.09
	f ₉₉	0.24	0.11	0.21	0.09	0.24	0.11
Externa	V ₈₅	84.5	10.4	81.3	10.3	84.6	10.4
	V ₉₉	94.6	11.3	91.5	12.1	93.0	12.3
	f ₈₅	0.17	0.08	0.16	0.07	0.17	0.08
	f ₉₉	0.23	0.11	0.21	0.09	0.22	0.10

c) Análisis de Varianza entre puntos de medición y entre pistas

Se determinó si existían diferencias significativas entre las distribuciones obtenidos en los tres puntos de medición. Para ello se realizó un análisis de varianza (ANOVA), con 95% de confianza, considerando un análisis agregado de las curvas. Los resultados de este análisis se muestran en Tabla 4.

Los resultados indican que no existen diferencias significativas en los valores de velocidad o demanda de fricción, obtenidos en los puntos característicos de cada curva (PC, MC y FC).

TABLA 4: Resultados de ANOVA entre Puntos de Medición (PC, MC, FC)

Pista	Percentil	F	p
Interna	V ₈₅	0.62	0.54
	V ₉₉	0.66	0.52
	f ₈₅	1.18	0.31
	f ₉₉	1.24	0.29
Externa	V ₈₅	1.56	0.21
	V ₉₉	0.85	0.43
	f ₈₅	0.53	0.59
	f ₉₉	0.33	0.72

Mediante un test agregado de igualdad de medias (t-student) se verificó si existían diferencias significativas entre los valores de velocidad y demanda de fricción obtenidos en la pista interna y

externa de las curvas. El análisis demostró que para un 95% de confianza, no existen tales diferencias. Los resultados se pueden ver en la Tabla 5.

TABLA 5: Test t-student entre Pista Interna y Externa

Percentil	Valor t	p
V ₈₅	0.31	0.756
V ₉₉	0.27	0.785
f ₈₅	0.58	0.564
f ₉₉	0.77	0.441

Dado que no existen diferencias significativas entre puntos de medición y entre pistas, se consideró en cada curva una única distribución de velocidad y una única distribución de demanda de fricción, característica de toda la curva.

4. MODELOS PROPUESTOS

4.1 Identificación de Variables Explicativas

En base a un análisis de varianza con 95% de confianza, se identificó aquellas variables que presentaban un mayor aporte en la variabilidad de la demanda de fricción. Se analizó el radio de curvatura (R), el grado de curvatura (DC), el desarrollo de la curva (D), el peralte (p) y la velocidad (V).

Los resultados mostraron que las mejores correlaciones se logran con la velocidad (F=5.49, p < 0.001) o con el grado de curvatura (F=38.35, p<0.001), lo que concuerda con la estructura de los modelos existentes en la literatura. Las tendencias encontradas se pueden ver en las Figuras 1a y 1b.

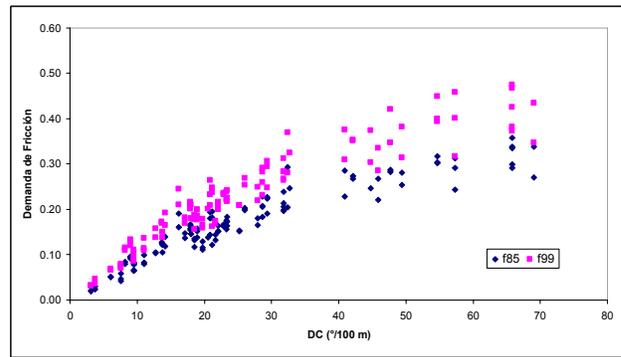


FIGURA 1b: Demanda Fricción v/s Grado Curvatura (DC)

Al igual que los Modelos de Lamm (1991) (1), Bonneson (1999) y Gattis (2005) la demanda de fricción presenta una relación decreciente respecto de la velocidad. Esto se explica porque se trata de un modelo agregado y no puntual. A medida que aumenta el radio, aumenta la velocidad pero a tasas decrecientes, por tanto el efecto de la velocidad sobre la demanda de fricción se hace cada vez menor, respecto del efecto del radio.

En el caso del grado de curvatura, la tendencia es la misma presentada por Lamm (1991) (2) y la explicación es similar a la anterior. A medida que el radio aumenta, se reduce el grado de curvatura y las velocidades aumentan. Pero el efecto de la velocidad sobre la demanda de fricción se hace cada vez menor respecto al efecto del radio, por lo que a menor grado de curvatura (mayor radio) la demanda de fricción se reduce.

El peralte resultó no tener una incidencia significativa en la modelación de la demanda de fricción. Esto puede explicarse porque en la operación real de una carretera, para un radio fijo, a mayor peralte el conductor también adopta mayores velocidades, y viceversa. Es decir, tiende a haber un balance entre velocidad y peralte, por lo que la variabilidad aportada por el peralte no afecta significativamente la variabilidad de las demandas de fricción. La demanda de fricción queda definida principalmente por el radio de curvatura.

4.2 Calibración y Validación de Modelos

Se procedió a calibrar los modelos considerando un 70% de la base de datos disponible. Se probaron distintos modelos de acuerdo a las tendencias presentadas en los gráficos anteriores: modelos lineales, polinomiales, potenciales y recíprocos. Finalmente los modelos en los que se obtuvo una mejor significancia estadística se muestran en la Tabla 6.

En todos los casos, el alto valor del coeficiente de determinación y el bajo error estándar promedio 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. Esto se aprecia en las figuras 2a, 2b, 2c y 2d.

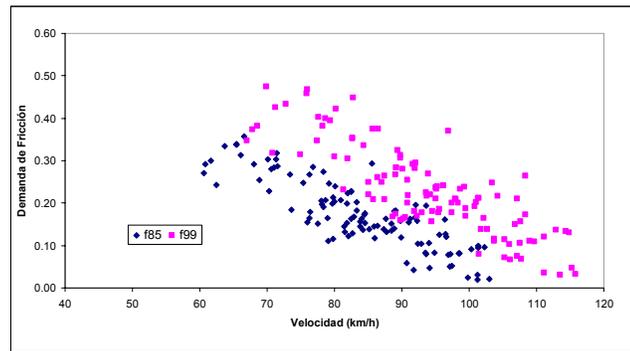


FIGURA 1a: Demanda Fricción v/s Velocidad

TABLA 6: Modelos de Demanda de Fricción en Curvas Horizontales

Modelo	Estructura del Modelo	Rango de Validez	R ²	SEE
(I)	$f_{85} = 0.717 - \frac{V_{85}}{154.3}$	60 ≤ V ₈₅ ≤ 103	0.73	0.04
(II)	$f_{99} = 0.933 - \frac{V_{99}}{133.5}$	67 ≤ V ₉₉ ≤ 116	0.71	0.04
(III)	$f_{85} = 0.0047 + 0.0086 * DC - 5.9 * 10^{-5} * DC^2$	3 ≤ DC ≤ 69	0.92	0.02
(IV)	$f_{99} = 0.0126 + 0.0111 * DC - 7.6 * 10^{-5} * DC^2$	3 ≤ DC ≤ 69	0.92	0.03

R² es el coeficiente de determinación y SEE es el error estándar promedio de la regresión.

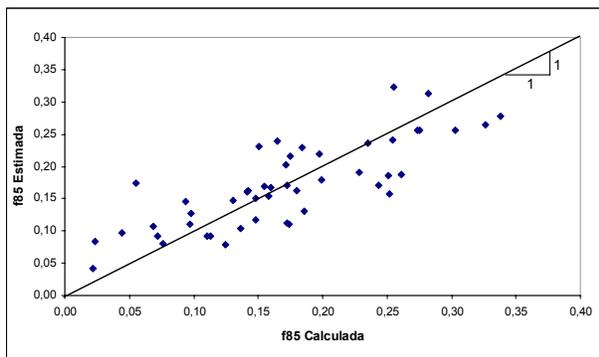


FIGURA 2a: Calidad de Ajuste Modelo (I)

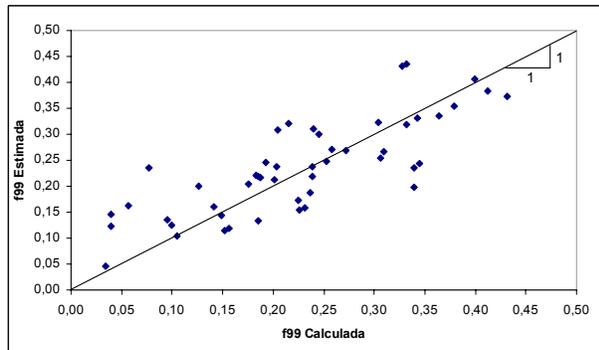


FIGURA 2b: Calidad de Ajuste Modelo (II)

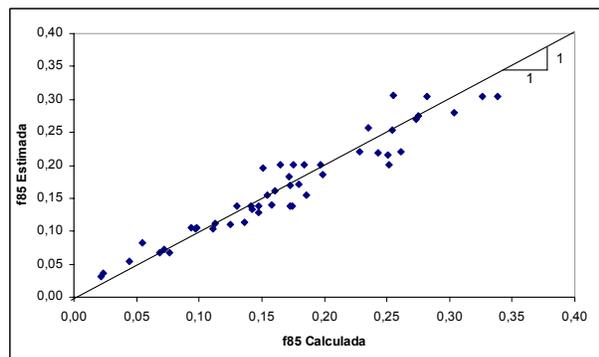


FIGURA 2c: Calidad de Ajuste Modelo (III)

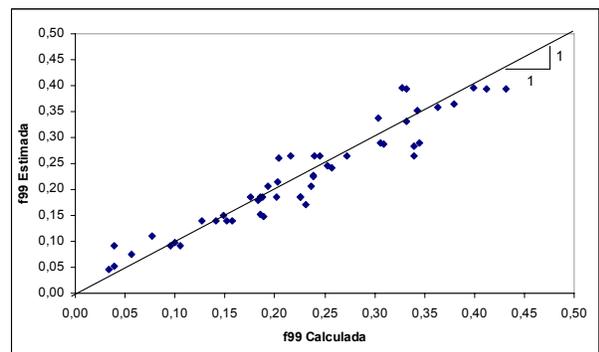


FIGURA 2d: Calidad de Ajuste Modelo (IV)

En todos los 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 6 sugiere que los modelos propuestos son robustos.

5. APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE RADIOS MÍNIMOS

Los modelos (I) y (III) representan las curvas de fricción de diseño y los modelos (II) y (IV) son las curvas de fricción máxima. Para una cierta velocidad de diseño (V_{85}) se calcula f_{85} en (I) y considerando peralte máximo en la Ecuación (1) se calcula el radio mínimo de curvatura. Cualquier radio superior al mínimo tendrá una demanda de fricción menor y por ello una mayor comodidad para el conductor

Conociendo el radio mínimo de curvatura (R_{min}) se calcula el grado de curvatura asociado $DC_{min} = 5729.6/R_{min}$ y en base al modelo (IV) se calcula la fricción máxima en la curva (f_{99}). Este valor de fricción corresponde al mínimo que debería proveer el pavimento para proporcionar seguridad al deslizamiento a aquellos conductores “no de diseño”

La diferencia entre f_{85} y f_{99} representa el mínimo margen de seguridad en dicha curva ya que éste dependerá finalmente del valor de fricción que proporcione el pavimento.

La Tabla 7 muestra un resumen con los resultados obtenidos. Se ha incluido una columna con los radios mínimos propuestos por el Manual de Carreteras, Volumen 3.

TABLA 7: Fricción de Diseño, Radios Mínimos y Fricción Máxima en Curvas Horizontales

V85 (km/h)	f_{85}	Peralte Máximo	Rmin propuesto (m)	f_{99}	Rmin MCV3 (m)
60	0.33	0.07	71	0.41	120
70	0.26	0.07	116	0.38	180
80	0.20	0.07	188	0.28	250
90	0.13	0.08	298	0.20	330
100	0.07	0.08	529	0.12	425

Para velocidades de diseño, menores o iguales a 90 km/h, los radios mínimos calculados en base a los modelos son menores a los propuestos por el Manual de Carreteras. Esto se explica porque para ese rango de velocidades los conductores nacionales son capaces de tolerar aceleraciones laterales mayores a las de diseño, por tanto, aceptan radios de curvatura menores. Si se diseñan radios mayores, como los propuestos por el Manual de Carreteras, los conductores seleccionarán velocidades mayores pero demandando una menor fricción (modelo III).

A la inversa, para velocidades mayores a 90 km/h, la tolerancia de los conductores a la aceleración lateral es menor a las consideradas en el diseño, por tanto aceptan radios de curvatura mayores. Si se diseñan radios mínimos menores, como los propuestos por el Manual de Carreteras, los conductores seleccionarán velocidades menores pero con mayores demandas de fricción (modelo III).

Esto último no representa necesariamente una situación de riesgo debido a que el riesgo de deslizamiento dependerá de la fricción que proporcione el pavimento. La fricción mínima del pavimento debe ser mayor o igual a f_{99} de modo de proporcionar un margen de seguridad adecuado al diseño. Estos valores de f_{99} son siempre mayores a los valores de diseño propuestos por el Manual de Carreteras.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se han desarrollado cuatro modelos agregados de demanda de fricción en curvas horizontales, para carreteras chilenas. Estos modelos se refieren a los percentiles f_{85} y f_{99} , y que pueden ser asociados a los valores de fricción de diseño y fricción máxima en curvas horizontales, respectivamente.

Se determinó que la velocidad en la curva (V_{85} y V_{99}) y el grado de curvatura (DC), son las variables que mejor definen el comportamiento de la demanda agregada de fricción. Por el contrario, el valor del peralte en la curva resultó no ser

significativo en la modelación, debido a que para un cierto radio, a mayor peralte el conductor también adopta mayores velocidades, y viceversa. Tiende a haber un balance entre velocidad y peralte, por lo que la variabilidad aportada por el peralte no afecta significativamente la variabilidad de las demandas de fricción.

Los modelos propuestos fueron aplicados en el cálculo de radios mínimos de curvatura. Los resultados mostraron que para velocidades menores o iguales a 90 km/h los conductores aceptan radios menores a los propuestos por el Manual de Carreteras y para velocidades mayores a 90 km/h los conductores requieren radios mayores. Esto refuerza la idea que los valores de diseño deben ser calibrados y verificados para los conductores locales y que no siempre es conveniente adoptar valores externos.

La ventaja de los modelos desarrollados, tanto para definir valores de fricción de diseño como de fricciones máximas es que permiten incorporar el comportamiento real del conductor nacional tanto en el proceso de diseño geométrico, en la operación y en el mantenimiento de carreteras. Esto representa una oportunidad de obtener diseños más integrados, consistentes y seguros acordes con el tipo de conductor considerado.

Se recomienda extender la presente investigación a otras zonas del país para verificar si el comportamiento de los conductores nacionales es homogéneo respecto de otras zonas con distintas características tanto culturales como climáticas.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido apoyada por el Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDEF) dentro del marco del proyecto FONDEF D031 1042.

REFERENCIAS

AASHTO (2004) **A Policy on Geometric Design of Highways and Streets**. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC, USA.

Bonneson J. (1999) Side Friction and Speed as Control for Horizontal Curve Design. **Journal of Transportation Engineering**, Vol 125, 473 – 480.

Bonneson J. (2001) Controls for Horizontal Curve Design. **Transportation Research Record**, N° 1751, 82 – 89.

Gattis J.L., F. Vinson y L. Duncan (2005) Low-Speed Horizontal Curve Friction Factors. **Journal of Transportation Engineering**, Vol 131, 112 – 119.

Krammes R. (2000) Design Speed and Operating Speed in Rural Highway Alignment Design. **Transportation Research Record**, N° 1701, 68 – 75.

Lamm R., E. Choueiri y T. Mailaender (1991) Side Friction Demand Versus Side Friction Assumed for Curve Design in Two-Lane Rural Highways. **Transportation Research Record**, N° 1303, 11 – 21.

Lamm R., B. Psarianos y T. Mailaender (1999) **Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook**. Mc Graw Hill, Alemania.

MOP (2002) **Manual de Carreteras, Volumen 3: Instrucciones y Criterios de Diseño**. Ministerio de Obras Públicas, Chile.

MOPTMA (1999) Instrucción de Carreteras, Norma 3.1- IC Trazado. Dirección General de carreteras. España.

Morrall J. y R. Talarico (1993). Side Friction Demanded and Margins of Safety on Horizontal Curves. **Transportation Research Record**, N° 1435, 145 - 152

TAC (1999) Highway geometric design guide. Alberta Transportation and Utilities.
http://www.infratrans.gov.ab.ca/INFTRA_Content/docType233/Productio n/rds007.html, Sitio visitado en Diciembre de 2006.