
CONFIABILIDAD EN EL DISEÑO GEOMETRICO DE CURVAS HORIZONTALES

Tomás Echaveguren N. (autor para correspondencia)
Dr. Cs. Ing, Profesor Asistente – Universidad de Concepción
Post-Doctorado – Pontificia Universidad Católica de Chile.
E-mail: techaveg@udec.cl

Sergio Vargas - Tejeda
Dr. Cs. Ing, Profesor Asistente – Universidad del Bío Bío.

Hernán de Solminihac T.
Ph.D., Profesor Titular – Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile

RESUMEN

El diseño geométrico de curvas horizontales utiliza un modelo de equilibrio entre demanda de fricción y fricción de diseño para estimar la velocidad específica, y las variables de diseño. Este método es determinista y no considera el comportamiento del conductor. Por tanto, es posible que para ciertas condiciones de diseño promueva inconsistencias. El análisis de confiabilidad permite combinar en un espacio n-dimensional variables aleatorias que definen “resistencias” y “solicitudes” para determinar el punto de diseño que maximiza la confiabilidad. En este trabajo se propone una expresión que permite determinar el punto de diseño considerando la variabilidad de la velocidad de operación y de la elección del radio de diseño. Se construyó una función de falla no lineal de variables aleatorias. Se aplicó el método de Hasofer-Lind para calcular el punto de diseño y se obtuvo una ecuación que determina el punto de diseño para un amplio rango de radios de curvatura, con un margen de seguridad respecto de la velocidad específica.

Palabras Clave: *Confiabilidad – Diseño Geométrico – Curvas Horizontales.*

ABSTRACT

Geometric design of horizontal curves uses an equilibrium model regarding friction demand and design friction, for obtaining specific speed and design variables. This method is deterministic and do not consider driver behavior. Therefore it is possible that the method might lead to inconsistent geometric designs. Reliability assessment is a tool that integrates in an n-dimensional space, random variables that describe “loads” and “resistances”, the design point that maximize reliability. This work proposes an equation that permits to estimate design point considering the variability of the operating speed and of the radius selection. It was developed a non-linear failure function of random variables. Reliability assessment was performed using Hasofer-Lind’s method. It was obtained an equation that estimates the design point for a broad range of radius, with a safety margin with respect to specific speed.

Key Words: *Reliability – Highways Geometric Design – Horizontal Curves.*

1. INTRODUCCIÓN

El diseño geométrico de curvas horizontales utiliza el radio de curvatura, peralte y velocidad de diseño como variables fundamentales. El diseñador selecciona valores únicos de radio y peralte considerando un comportamiento uniforme de los conductores, para una velocidad de diseño específica.

La velocidad de diseño se define como la máxima velocidad segura que pueden alcanzar los conductores y es la que determina las características geométricas de los trazados. Este concepto, es el que se ha utilizado en las recomendaciones de diseño geométrico de Chile hasta el año 2002, año en el cual se publicó una nueva versión del Manual de Carreteras.

Esta nueva versión del Manual, adoptó conceptos distintos relacionados con velocidad, tales como velocidad de proyecto y velocidad específica. De acuerdo a Ministerio (2008), la velocidad de proyecto sustituyó al concepto de velocidad de diseño, siendo la que actualmente se utiliza para definir las características mínimas de diseño y el estándar global de la vía. Por su parte, la velocidad específica para elementos curvos en planta, corresponde a la velocidad resultante del equilibrio entre fricción de diseño y demanda de fricción (Ministerio, 2008).

En este último caso, el diseñador asume que el conductor nunca excederá la velocidad específica, y que si lo hace, existe un remanente de fricción que proporciona un factor de seguridad. Este remanente se debe a que la fricción de diseño se obtiene bajo el principio de comodidad, valor que es muy inferior a la resistencia al deslizamiento del pavimento (Echaveguren et al, 2005).

Sin embargo, la evidencia empírica obtenida en Australia, Estados Unidos y Chile muestra que en curvas con velocidades de diseño o específicas inferiores a los 90 – 100 km./h la velocidad de operación tiende a superar la de diseño (Echaveguren y Sáez, 2001; Memon et al, 2008). En este caso los métodos de diseño no proporcionan herramientas para determinar cual es el factor de seguridad real que proporciona tanto el diseño como la superficie del pavimento. Ante esto, el diseñador no cuenta con medios para comprobar que tan confiable es el diseño dado que asume una hipótesis que no se cumple en la práctica. Este problema es relevante en particular cuando se realizan cambios de estándar al pasar de caminos no pavimentados a pavimentados y en el diseño de caminos con velocidades de proyecto entre 50 y 100 Km./h o en zonas de diseño restringido.

Para analizar dicha situación, es necesario extender los métodos de diseño tradicionales considerando explícitamente la condición superficial del pavimento a través de la fricción proporcionada por el mismo y la demanda real de fricción del conductor para una geometría determinada.

De acuerdo a lo anterior, el objetivo de este trabajo es presentar una metodología de diseño complementaria a la existente en el Manual de Carreteras de Chile, fundamentada en el análisis de confiabilidad de primer orden (FORM, *First Order Reliability Method*).

2. EL MODELO DE FRICTION DE 3 ZONAS

El análisis de confiabilidad se fundamenta en la construcción de funciones de falla, a partir de la cual se determina el punto de diseño que maximiza el índice de confiabilidad de Hasofer – Lind (1974) para funciones de falla no-normales y no-lineales (Haldar and Mahadevan, 2000). Un aspecto esencial del método es el modelo conceptual bajo el cual se formulan las funciones de falla, denominado modelo de fricción de 3 zonas para curvas horizontales. Este modelo explica bajo un concepto unificado de relaciones fricción –velocidad – radio en el cual se superponen funciones de demanda agregada de fricción, de fricción de diseño, umbrales de fricción y oferta de fricción. Este concepto se muestra en Figura 1. Dicha Figura muestra en un sólo gráfico el comportamiento de diversos tipos de fricción respecto de la velocidad.

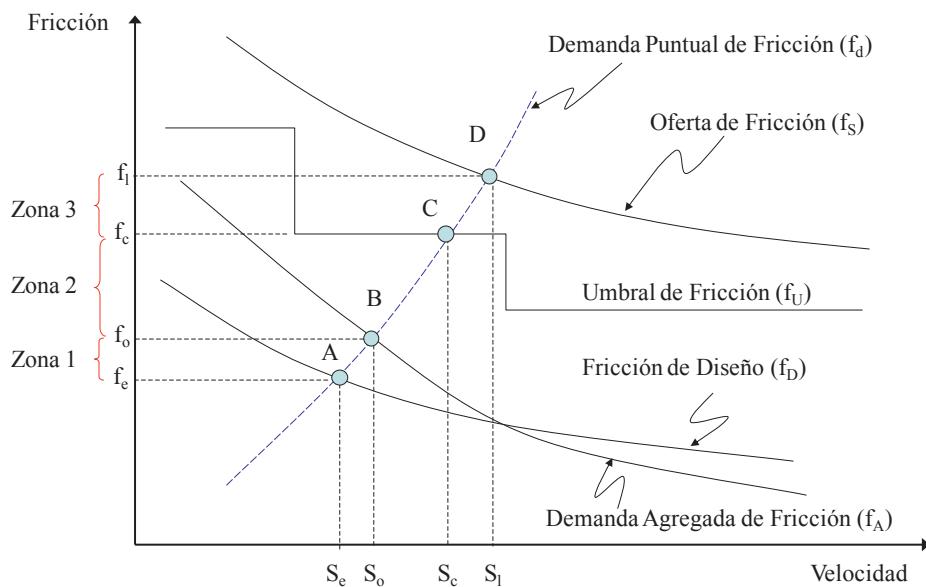


Figura 1. Modelo de 3 zonas en curvas horizontales (De Solminihac et al, 2007).

La demanda agregada de fricción corresponde a la demanda de fricción de todos los conductores. Refleja la relación de compensación de velocidad que aplican los conductores ante diferentes radios, peralte y valores de fricción en un sentido espacial en la red vial.

La fricción de diseño corresponde a valores de fricción lateral obtenidos mediante mediciones de terreno basadas en el equipo Ball Bank (AASHTO, 2001). Refleja el valor límite sobre el cual el conductor y los ocupantes de los vehículos sienten incomodidad producto de la aceleración lateral.

El umbral de fricción por su parte, corresponde a valores objetivo de fricción que dependen de la maniobra y del elemento geométrico, de modo tal que para diversos rangos de radio de curvatura, los valores reflejan una condición última dentro del rango de incomodidad del conductor, pero que es inferior a la máxima fricción que proporciona el pavimento. Esta máxima fricción corresponde a la oferta de fricción.

Finalmente, la demanda puntual de fricción responde a la condición de estabilidad dinámica de un vehículo que se desplaza por una curva de radio y peralte determinado, a una velocidad determinada.

A partir de este modelo unificado, se definieron 3 zonas de diseño: una zona de consistencia operacional (Zona 1), una de consistencia constructiva (Zona 2) y otra de consistencia de umbrales de fricción (Zona 3). La primera permite construir funciones de falla relacionando velocidad específica con velocidad de operación (Puntos A y B), la segunda velocidad límite de construcción con velocidad de operación (Puntos B y C), y la tercera velocidad límite de construcción con velocidad máxima asociada a la relación entre umbrales de fricción y oferta de fricción (Puntos C y D).

3. MODELACION DE FUNCION DE ESTADO LÍMITE

3.1. Método de Cálculo de Confiabilidad

Lewis (1987) define la confiabilidad como la probabilidad de que un componente, mecanismo equipo o sistema opera bajo ciertas condiciones por un período de tiempo determinado. En términos matemáticos, corresponde a la función inversa de la probabilidad de falla. En el diseño geométrico, los elementos que intervienen para estimar esta probabilidad son las relaciones entre las velocidades límites descritas en sección 3.3, las cuales están en función principalmente del radio de curvatura.

Sean las funciones de falla G_1 y G_2 no lineales y aleatorias tales que: $G_1 = f_1(X)$ y $G_2 = f_2(X)$ siendo X el vector de variables aleatorias que describen las características geométricas. Sea la función de estado límite la función $g(X) = G_1 - G_2 = f_1(X) - f_2(X)$. La probabilidad de falla (P_f) se define con la probabilidad que $g(X)$ sea menor o igual a 0: $P(g(X) \leq 0)$. En este caso, el lugar geométrico de todos los puntos X que cumplen la condición límite $g(X)=0$ representa el estado límite que separa las zonas de falla y no-falla. Si $g(x)$ es una función lineal y las variables aleatorias siguen una distribución de probabilidades normal y no están correlacionadas, entonces la probabilidad de falla puede describirse según la expresión 1.

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f) ; \beta = \frac{\mu}{\sigma} = \frac{a_0 + \sum_i a_i \mu_{X_i}}{\sqrt{\sum a_i^2 \sigma_{X_i}^2}} \quad (1)$$

Donde β es el índice de confiabilidad, μ y σ son la media y desviación estándar de la función $g(X)$ a_i son constantes determinísticas, μ_{X_i} y σ_{X_i} son la media y la desviación estándar de X .

En el caso en estudio la función $g(X)$ es no lineal, y las distribuciones de probabilidad de las componentes de X son no normales. Por tal motivo, se debe utilizar un método alternativo al descrito por la ecuación 1. En este caso se seleccionó el método de Hasofer -Lind, el cual linealiza la función de estado límite en el punto de diseño, definiendo β como la mínima distancia entre el origen del sistema de coordenadas y el punto de diseño localizado sobre la función de

estado límite $g(X)=0$. De este modo, el índice de confiabilidad se estima en base a la ecuación 2 (Hasofer and Lind, 1974).

$$\beta_{HL} = \min_{\{x \in g(X) = 0\}} \sqrt{\sum_i x_i^2} \quad ; \quad u^* = -\beta_{HL} \alpha^* = \beta_{HL} \left(\frac{\frac{\partial g}{\partial x_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \right)^2}} \right) \quad (2)$$

En donde u_i es la variable x_i normalizada, α es el vector normalizado que describe la función $g(u) = 0$ en el punto de diseño u^* . La Figura 2 ilustra gráficamente el punto de diseño.

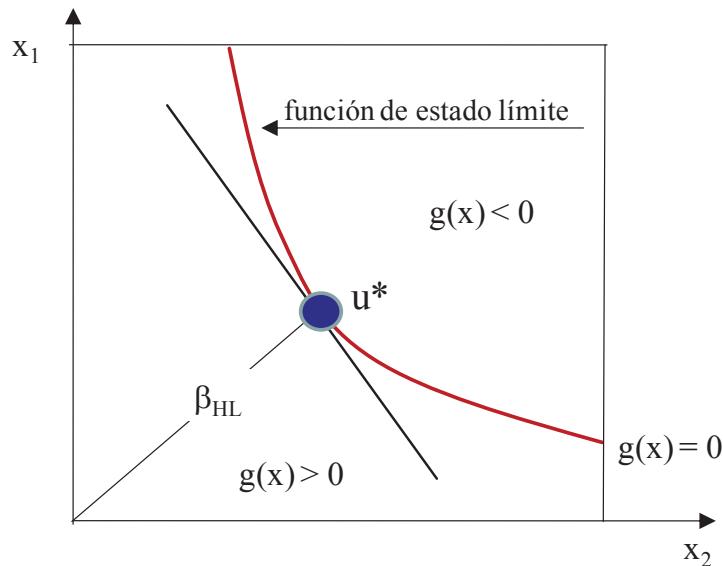


Figura 2. Esquema del punto de diseño (Adaptado de Haldar and Mahedavan, 2000).

3.2. Modelos de Fricción

Los modelos de fricción describen el comportamiento de la fricción respecto de la velocidad. Está compuesto por 3 sub-modelos: Umbrales de fricción, demanda de fricción agregada y fricción de diseño.

Los umbrales de fricción corresponden a valores fijos asociados a rangos de radios de curvatura, provenientes de las normativas chilena e inglesa. Para transformarlo a una función continua en todo el dominio se utilizó el modelo de Echaveguren et al (2005) y Vargas-Tejeda et al (2009). La expresión resultante es:

$$f_u = \left(1 - \frac{S}{140} \right) f_3^{l,l} \quad (3)$$

En donde S es la velocidad (km/h); f_3 es el umbral de fricción definido en Highways (2004) y Ministerio (2008) para curvas circulares y f_u es la función continua de variación media de umbrales de fricción respecto de la velocidad.

La demanda agregada de fricción (f_A) corresponde a la expresión de Bonneson (2000), calibrada para Chile con los datos de Echaveguren y Basualto (2003). La expresión es:

$$f_A = 0,141 - \left(\frac{S_{a,85}}{910} \right) \quad (4)$$

En donde $S_{a,85}$ es la velocidad de percentil 85 en km/h en la aproximación a la curva horizontal, calculada por Echaveguren y Sáez (2001).

La fricción de diseño por su parte corresponde a aquella definida en Ministerio (2008) para velocidades menores a 80 Km/h. Está representada por la Ec 5.

$$f_D = 0,265 - \left(\frac{S}{602,4} \right) \quad (5)$$

3.3. Función de Velocidad Límite

Las funciones de velocidad límite corresponden a la velocidad que resulta de interseccar la curva de demanda puntual de fricción con las curvas de fricción descritas en sección 2 (puntos A, B y C). La Ec. 6 muestra la velocidad límite en el punto B de la Figura 1.

$$S_o = 63,5R \left[-\frac{1}{b} + \sqrt{\frac{1}{b^2} + \frac{4(p(R) + a)}{127R}} \right] \quad (6)$$

En donde R es el radio de curvatura, en m, a y b son coeficientes de calibración y p es el peralte como función del radio de curvatura de acuerdo a la ecuación 7 (Ministerio, 2008).

$$p = \begin{cases} 7\% & ; \quad 25 \leq R \leq 350 \text{ m} \\ 7 - 6,08 \left(1 - \frac{350}{R} \right)^{1,3} & ; \quad 350 \leq R \leq 2500 \text{ m} \\ 2\% & ; \quad R \geq 2500 \text{ m} \end{cases} \quad (7)$$

La velocidad específica (S_e) (punto A de Figura 1), se obtiene de equilibrar la demanda de fricción puntual con la fricción de diseño. El resultado es la ecuación 8.

$$S_e = 63,5R \left[-\frac{1}{\delta} + \sqrt{\frac{1}{\delta^2} + \frac{4(p(R) + \theta)}{127R}} \right] \quad (8)$$

En dicha ecuación, $\theta = 0.265$ y $\delta = 602.4$. Ambos valores son válidos para velocidades inferiores a 80 Km./h.

La velocidad límite de construcción (S_c) corresponde al punto de equilibrio C de la Figura 1. La ecuación 9 muestra la expresión analítica.

$$S_c = 63,5R \left[-\frac{f_3^{1,1}}{140} + \sqrt{\left[\frac{f_3^{1,1}}{140} \right]^2 + \frac{4(p(R) + f_3^{1,1})}{127R}} \right] \quad (9)$$

3.4. Funciones de Falla y Estado Límite

La función de falla es una variable aleatoria que expresa la falla de un sistema de acuerdo al comportamiento de las variables explicativas, que también son aleatorias. En particular, la función de estado límite corresponde a la frontera que delimita las zonas de falla de la de no-falla, por lo cual corresponde a una función implícita del tipo $G(X) = 0$, siendo X un vector de variables aleatorias.

En el caso de análisis, la función de estado límite corresponde a la superficie límite en la cual las diferencias de pares de velocidades límite se anulan. Para efectos de diseño, se definen 2 funciones de estado límite G_1 y G_2 según:

$$G_1 = S_0 - S_e = 63,5R \left\{ \left[-\frac{1}{b} + \sqrt{\frac{1}{b^2} + \frac{4(p(R) + a)}{127R}} \right] - \left[-\frac{1}{\delta} + \sqrt{\frac{1}{\delta^2} + \frac{4(p(R) + \theta)}{127R}} \right] \right\} \quad (10)$$

$$G_2 = S_c - S_0 = 63,5R \left\{ \left[-\frac{f_3^{1,1}}{140} + \sqrt{\left[\frac{f_3^{1,1}}{140} \right]^2 + \frac{4(p(R) + f_3^{1,1})}{127R}} \right] - \left[-\frac{1}{b} + \sqrt{\frac{1}{b^2} + \frac{4(p(R) + a)}{127R}} \right] \right\} \quad (11)$$

Estas expresiones representan, para cualquier radio de curvatura R , la diferencia de velocidad entre los puntos (A, f_e) y (B, f_o) y entre los puntos (B, f_o) y (B, f_c) respectivamente.

3.5. Cálculo de Estado Límite

Para calcular el estado límite se generó mediante simulación de Montecarlo, funciones de distribución del radio de curvatura asociadas a dos velocidades de diseño: 50 y 70 Km/h. Estas velocidades de diseño obedecen al concepto AASHTO de diseño de curvas horizontales, el cual difiere del actualmente utilizado en la norma chilena, que se aboca al diseño en base a radios mínimos obtenidos a partir de la estimación de velocidad específica. Por tanto, los radios

utilizados en la Tabla 1 no son radios mínimos. El objetivo del análisis fue recrear las decisiones del diseñador al seleccionar el radio de curvatura, para lo cual se asumió que selecciona un valor para luego aplicar pequeños cambios hasta establecer una velocidad específica. La Tabla 1 muestra las distribuciones de probabilidades.

Tabla 1. Configuración de diseños geométricos analizados

Velocidad de Diseño (Km/h)		Valor Medio de Radio (m)		Desviación Estándar del Radio (m)		
				Baja	Media	Alta
Baja	50	Bajo	180	30	50	80
		Medio	225	35	65	95
		Alto	300	45	85	125
Media	70	Bajo	425	50	120	210
		Medio	550	70	150	270
		Alto	650	80	180	320

En base a los datos de la Tabla 1 y las ecuaciones 4, 5, 6 y 7, se calcularon distribuciones de probabilidad para las velocidades límite. Posteriormente fueron normalizadas aplicando la transformación de Rosenblat. Estos se muestran en las Tablas 2 y 3.

Tabla 2. Distribuciones de Probabilidad para Velocidades Límites en punto A y B.

Radio (m)		Velocidad Límite en A (Km/h)			Velocidad Límite en B (Km/h)		
Bajo	180	N(58,4)	N(58,7)	N(58,13)	N(71,5)	N(71,9)	N(71,15)
Medio	225	N(64,4)	N(64,8)	N(64,13)	N(77,5)	N(77,10)	N(77,15)
Alto	300	N(71,4)	N(71,9)	N(71,14)	N(86,5)	N(86,10)	N(86,16)
Bajo	425	N(80,3)	N(80,8)	N(80,17)	N(96,3)	N(96,10)	N(96,20)
Medio	550	N(84,3)	N(84,6)	N(84,15)	N(102,3)	N(102,8)	N(102,19)
Alto	650	N(87,2)	N(87,6)	N(87,14)	N(106,3)	N(106,8)	N(106,17)

A partir de las Tablas 4 y 5 se obtuvieron pares de valores (S^* , f^*) que representan el punto de diseño que maximiza la confiabilidad. A partir de esos valores se realizó un análisis de regresión no lineal, para obtener las ecuaciones 12. Dichas ecuaciones las cuales describen la evolución de la velocidad que maximiza la confiabilidad del diseño para diferentes niveles de radio de curvatura.

$$\begin{aligned}
 \text{Zona 1: } & S^* = 25.3\ln(R) - 67.5; R^2 = 0.99 \\
 \text{Zona 2: } f_3 = 0.45: & S^* = 21.3\ln(R) - 42.4; R^2 = 0.98 \\
 f_3 = 0.50: & S^* = 23.6\ln(R) - 49.6; R^2 = 0.99 \\
 f_3 = 0.55: & S^* = 27.9\ln(R) - 70.4; R^2 = 0.97
 \end{aligned} \tag{12}$$

Tabla 3. Distribuciones de Probabilidad para Velocidad Límite en y diferentes niveles de umbrales de fricción

Radio (m)		Velocidad en A (Km/h)	Umbrales de Fricción (*)		Velocidad en C (Km/h)
Bajo	N(180, 50)	N(58,7)	Bajo	N(0.45,0.05)	N(71,4)
			Medio	N(0.50,0.05)	N(76,4)
			Alto	N(0.55,0.05)	N(81,5)
Medio	N(225,65)	N(64,8)	Bajo	N(0.45,0.05)	N(76,4)
			Medio	N(0.50,0.05)	N(82,4)
			Alto	N(0.55,0.05)	N(87,5)
Alto	N(300,85)	N(71,9)	Bajo	N(0.45,0.05)	N(83,4)
			Medio	N(0.50,0.05)	N(89,4)
			Alto	N(0.55,0.05)	N(95,4)
Bajo	N(425,120)	N(80,8)	Bajo	N(0.45,0.05)	N(89,2)
			Medio	N(0.50,0.05)	N(97,2)
			Alto	N(0.55,0.05)	N(104,3)
Medio	N(550,150)	N(84,6)	Bajo	N(0.45,0.05)	N(93,2)
			Medio	N(0.50,0.05)	N(101,2)
			Alto	N(0.55,0.05)	N(109,3)
Alto	N(650,180)	N(87,6)	Bajo	N(0.45,0.05)	N(95,2)
			Medio	N(0.50,0.05)	N(104,2)
			Alto	N(0.55,0.05)	N(112,2)

El análisis de confiabilidad se desarrolló resolviendo las ecuaciones 10 y 11. En Tablas 4 y 5 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 4. Resultados del Análisis de Confiabilidad en Zona 1

Velocidad de Diseño (Km/h)	Radio (m)			G_1 (Km/h)	β	P($G_1 < 0$)	S^* (Km./h)	f^*
	Nivel	Media	Desv. Est.					
50	Bajo	180	30	13.2	2.03	0.021	63	0.034
		180	50	13.1	1.14	0.127	63	0.034
		180	80	12.8	0.66	0.256	64	0.038
	Medio	225	35	12.8	2.03	0.021	69	0.055
		225	65	12.5	1.02	0.155	69	0.055
		225	95	12.8	0.66	0.256	70	0.059
	Alto	300	45	14.9	2.34	0.010	77	0.086
		300	85	14.9	1.11	0.132	78	0.090
		300	125	16.0	0.71	0.240	78	0.090
70	Bajo	425	50	16.1	3.77	0.000	88	0.133
		425	120	16.7	1.25	0.106	86	0.124
		425	210	14.9	0.61	0.271	87	0.129
	Medio	550	70	18.0	4.24	0.000	93	0.157
		550	150	18.7	1.80	0.036	90	0.143
		550	270	18.8	0.74	0.229	91	0.147
	Alto	650	80	18.8	5.27	0.000	93	0.157
		650	180	19.2	1.90	0.029	94	0.162
		650	320	19.8	0.86	0.194	95	0.167

Tabla 5. Resultados del Análisis de Confiabilidad en Zona 2

Velocidad de Diseño (Km/h)	Radio (m)		Umbral de Fricción	G_2 (Km/h)	β	$P(G_2 < 0)$	S^* (Km./h)	f^*
	Nivel	Media						
50	Bajo	180	Bajo	13	2.00	0.021	66	0.044
		180	Medio	18	2.20	0.013	72	0.066
		180	Alto	23	2.70	0.004	73	0.070
	Medio	225	Bajo	12	1.30	0.090	74	0.074
		225	Medio	18	2.00	0.022	78	0.090
		225	Alto	23	2.40	0.007	81	0.102
	Alto	300	Bajo	13	1.22	0.112	81	0.102
		300	Medio	18	1.83	0.034	86	0.124
		300	Alto	24	2.44	0.007	91	0.147
70	Bajo	425	Bajo	8	1.09	0.138	88	0.133
		425	Medio	17	1.99	0.023	95	0.167
		425	Alto	24	2.81	0.002	101	0.198
	Medio	550	Bajo	9	1.42	0.077	92	0.152
		550	Medio	17	2.69	0.036	99	0.187
		550	Alto	25	3.73	0.000	104	0.214
	Alto	650	Bajo	8	1.26	0.103	94	0.162
		650	Medio	17	2.69	0.004	102	0.203
		650	Alto	25	3.95	0.000	110	0.248

La Figura 3 ilustra un ejemplo de aplicación. En ella se grafican dos curvas de demanda puntual para radios de 180 y 300 m asociados a velocidades de diseño de 50 y 70 km/h., versus la demanda de fricción agregada. Mediante la ecuación 12 se estimó el punto de diseño en términos de velocidad para los dos radios de curvatura el cual está representado por S^* .

Se puede ver que en ambos casos la velocidad S^* , que maximiza la confiabilidad es inferior a la velocidad específica (S_e), variando entre 6,7 y 8,9 km/h. Esto se debe a que para estimar la velocidad S^* se considera también la demanda de fricción agregada real de los conductores, por lo cual este valor es una indicador aproximado de la velocidad real de los conductores para cada uno de los radios. Este resultado muestra que para los radios utilizados, y la velocidad S^* obtenida mediante el modelo existe un margen de seguridad en cuanto a fricción a favor del conductor puesto que la demanda de fricción es inferior a la fricción de diseño.

Puesto que esta es inferior a la fricción de diseño, siempre el punto de diseño se ubicará a la izquierda de la velocidad específica, resultando una velocidad menor. Puede notarse además que la fricción de diseño, que define el límite de comodidad, se encuentra por sobre el punto de diseño, por lo cual esta forma de cálculo además otorga una mayor comodidad.

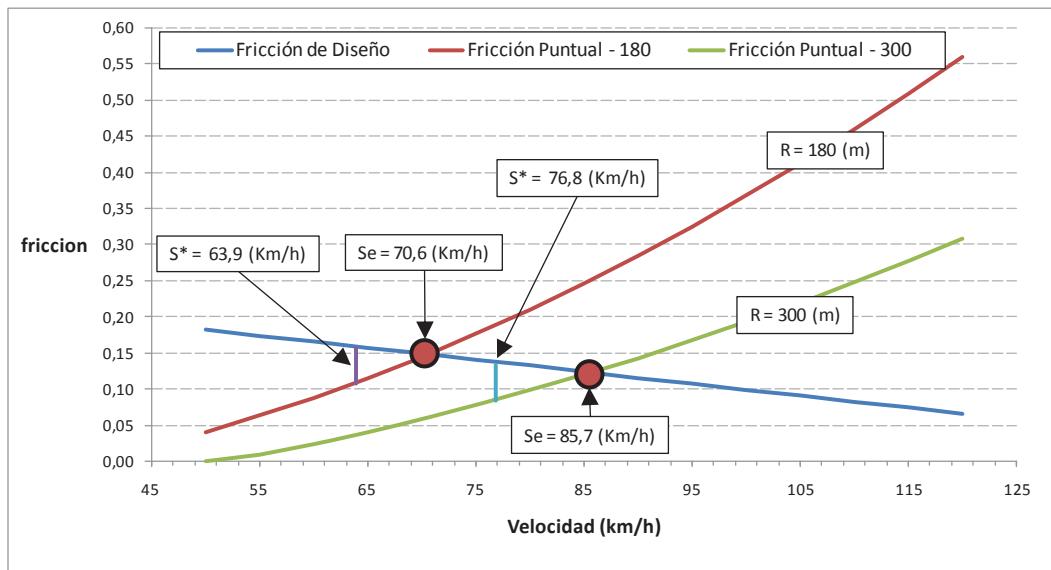


Figura 3. Ejemplo de diseño para radios de 180 y 300 m

4. CONCLUSIONES

El modelo de 3 zonas propuesto permite consolidar en un solo concepto los elementos necesarios tanto para el diseño como para el rediseño de curvas horizontales. Particularmente, da cuenta de la diferencia entre la fricción de diseño y la demanda real de fricción, lo cual impone una potencial condición de inconsistencia del diseño.

El análisis de confiabilidad es una técnica que permite incluir la variabilidad en el diseño. Si bien es un concepto ampliamente usado en la ingeniería estructural, es escasamente utilizado en el diseño geométrico. En este sentido, permite incluir la variabilidad del conductor en las etapas de diseño, así como la variabilidad de la elección de parámetros de diseño que enfrenta el proyectista.

A partir del análisis de confiabilidad se propusieron expresiones que permiten determinar para cada radio de curvatura seleccionado por el diseñador, el punto de diseño representado por el par velocidad – fricción (S^* , f^*). Estos valores de velocidad y fricción, son los que maximizan la confiabilidad y no necesariamente corresponden a la velocidad específica puesto que esta última determina radios mínimos que no necesariamente maximizan la confiabilidad.

Por lo tanto, el valor de radio asociado a S^* otorga un margen de seguridad al definir una distancia determinada entre el valor S^* y la velocidad específica, (Se) considerando la variabilidad en la velocidad de operación y en la elección del radio de curvatura. Asimismo, otorga un margen de seguridad en cuanto a fricción a favor del conductor dado que la fricción demandada es inferior a la fricción provista por el diseño.

Por otro lado, se propuso una expresión de análisis que permite además verificar la distancia entre la demanda de fricción o entre la fricción de diseño y el umbral de fricción, que es un indicador de calidad de la condición superficial del pavimento.

Con excepción del modelo de fricción de diseño, los modelos de demanda agregada de fricción y de umbral de fricción fueron calibrados para las condiciones chilenas. Por tanto, para potenciar este trabajo, es necesario calibrar para condiciones chilenas la fricción de diseño.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el financiamiento otorgado por la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile a través del programa de post-doctorado 2008 – 2009, dentro del cual se encuentra enmarcado el desarrollo de este artículo.

REFERENCIAS

- AASHTO (2001) **A Policy on Geometric Design of Highways and Streets**. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, Estados Unidos.
- Bonesson, J. (2000) **Superelevation Distribution Methods and Transition Designs**. NCHRP Report 439, Transportation Research Board, , Washington D. C.
- De Solminihac, H. Echaveguren, T. y Vargas, S. (2007) Friction Reliability Criteria Applied to Horizontal Curve Design of Low Volume Roads. **Transportation Research Record**, 1989, 138 – 147.
- Echaveguren, T. y Sáez, J. (2001) Estudio de Relaciones Velocidad – Geometría en caminos de la VIII Región. **Actas del X Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**, 9 al 12 de Octubre 2001, Concepción, 315 – 328.
- Echaveguren, T. Bustos, M. y De Solminihac, H. (2005) Assessment of Horizontal Curves of an Existing Road Using Reliability Concepts. **Canadian Journal of Civil Engineering**, 32(6), 1030 – 1038.
- Hasofer, A.M. and Lind, N.C. (1974) An Exact and Invariant First Order Reliability Format. **Journal of Engineering Mechanics**, 100, 111 – 121.
- Haldar, A. and Mahadevan, S. (2000) **Probability Reliability and Statistical Methods in Engineering Design**. 1st Ed. Wiley, New York.
- Highways Agency (2004) **Skidding Resistance**. En Design Manual for Roads and Bridges, Volume 7, HD 28/04, London, UK.
- Memon, R. Khaskheli G.B. and Qureshi, A.S. (2008) Operating Speed models for two-lane rural roads in Pakistan. **Canadian Journal of Civil Engineering**, 35(5), 443 – 453.
- Lewis, E.E. (1987) **Introduction to Reliability Engineering**. 1st Edition. Wiley, New York.

Ministerio de Obras Públicas (2008) **Instrucciones de Diseño**. En Manual de Carreteras Vol. 3, Santiago, Chile.

Vargas-Tejeda, S. De Solminihac, H. y Echaveguren, T. (2009) Procedure to estimate skid resistance and macrotexture thresholds. **Proceedings of ICE – Transport**, 162(2), 79 – 85.