


# **UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**Profesor patrocinante Dr. Sergio Vargas Tejeda**



## **PROCEDIMIENTO PARA LA INCORPORACIÓN DE LA CONFIABILIDAD EN EL DISEÑO GEOMÉTRICO DE CURVAS HORIZONTALES AISLADAS**

**Proyecto de título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el  
título de Ingeniero Civil**

**DIANA CAROLINA VARGAS RIQUELME**

**Concepción, Julio de 2013**

## PROCEDIMIENTO PARA LA INCORPORACIÓN DE LA CONFIABILIDAD EN EL DISEÑO GEOMÉTRICO DE CURVAS HORIZONTALES AISLADAS

**Diana Vargas Riquelme**

**Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío**  
**diavarga@alumnos.ubiobio.cl**

**Dr. Sergio Vargas Tejeda**

**Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío**  
**svargas@ubiobio.cl**

### RESUMEN

En Chile, el diseño geométrico de curvas horizontales incorpora la seguridad a través del equilibrio dinámico entre la demanda puntual de fricción, como función de la velocidad, el radio y el peralte, y la máxima aceleración lateral tolerada por el conductor. Este equilibrio está basado sobre una consideración de comodidad, en base a relaciones determinísticas, lo cual no permiten determinar a priori el margen de seguridad que tiene el diseño.

El objetivo de este trabajo, es proponer un procedimiento para incorporar la confiabilidad en el diseño geométrico de curvas horizontales, de modo de incorporar la naturaleza aleatoria de las variables de diseño. El procedimiento desarrollado permite calcular la probabilidad de falla en el diseño, considerando la diferencia entre la demanda y oferta de fricción en el pavimento para una cierta configuración de radio y peralte, y un cierto percentil de conductores. Para ello, se definen funciones de oferta de fricción ( $f_s$ ) respecto de distintos tipos de pavimentos, se modela la demanda de fricción ( $f_d$ ) en función del radio de curvatura, y percentil de velocidad, y se calculan las probabilidades de falla ( $P_f$ ) de los diseños aplicando técnicas de análisis de confiabilidad, tales como el método FORM (First Order Reliability Method).

Al aplicar el procedimiento al caso chileno, los resultados indican que la probabilidad de falla aumenta para radios menores a 300 metros, y para mayores percentiles de velocidad. También ocurre que para un mismo radio, las probabilidades de falla disminuyen respecto del tipo de pavimento, de manera que  $P_f(DTS) > P_f(Ho) > P_f(Asf)$ , y tienden a cero cuando las velocidades de diseño son mayores o iguales a 100 Km/h.

Palabras Clave: Diseño geométrico, Curva horizontal, Confiabilidad, Probabilidad de falla

8.201 Palabras + 9 Figuras / 1 Tabla \*250 = 10.701 Palabras Totales.

## **PROCEDURE TO INCORPORATING FOR THE RELIABILITY ON GEOMETRIC DESIGN OF ISOLATED HORIZONTAL CURVES**

**Diana Vargas Riquelme**

**Department of Civil and Environmental Engineering, University of the Bío-Bío**  
**diavarga@alumnos.ubiobio.cl**

**PhD Sergio Vargas Tejeda**

**Department of Civil and Environmental Engineering, University of the Bío-Bío**  
**svargas@ubiobio.cl**

### **ABSTRACT**

In Chile, the geometric design of horizontal curves incorporates safety by the dynamic balance between the single demand friction, as a function of the speed, the radio and the superelevation, and the maximum lateral acceleration tolerated by the driver. This balance is based on a comfort condition, considering a deterministic approach, which does not allow determining a priori the margin of safety of the designed curve.

The objective of this work is propose a procedure for incorporating the reliability in the geometric design of horizontal curves, so as to incorporate the random nature of the design variables. The developed procedure allows calculating the probability of failure in the design, considering the difference between friction demand and friction supply in the pavement for a radius and superelevation configuration, and a certain percentile of drivers. To do this, functions of friction supply ( $f_s$ ) for various types of pavements, and friction demand ( $f_d$ ) depending on the radius of curvature and percentile speed, were calibrated. Then, probabilities of failure ( $P_f$ ) of the designs were estimated by applying techniques of reliability analysis, such as the method FORM (First Order Reliability Method).

To apply the procedure to the Chilean case, the results indicate that the probability of failure increases for radius less than 300 meters, and for higher speed percentiles. It also happens that for the same radio, the failure probabilities decrease with respect to the type of pavement, so that  $P_f(\text{DTS}) > P_f(\text{Ho}) > P_f(\text{ASF})$ , and tend to zero when the design speed are equal to or greater than 100 km/h.

**Keywords:** Geometric design, Horizontal curve, Reliability, Probability of Failure

8.201 Words + 9 Figures / 1 Table \*250 = 10.701 Total Words.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>ÍNDICE TABLAS</b> .....	VII
<b>ÍNDICE FIGURAS</b> .....	VIII
<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1 Contexto</b> .....	1
<b>1.2 Objetivos</b> .....	2
1.2.1 Objetivo general .....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
<b>1.3 Metodología</b> .....	2
1.3.1 Etapa 1: Estudio de antecedentes.....	3
1.3.2 Etapa 2: Marco conceptual .....	3
1.3.3 Etapa 3: Procedimiento de diseño .....	3
1.3.4 Etapa 4: Aplicación procedimiento de diseño.....	4
1.3.5 Etapa 5: Conclusiones y recomendaciones .....	4
<b>CAPÍTULO II: ESTUDIO DE ANTECEDENTES</b> .....	5
<b>2.1 Enfoques de diseño geométrico</b> .....	5
<b>2.2 Diseño geométrico de curvas horizontales</b> .....	6
<b>2.3 Teoría de la confiabilidad</b> .....	8
2.3.1 Cálculo de la probabilidad de falla.....	8
2.3.2 Estudios previos de confiabilidad en el diseño geométrico .....	10
<b>CAPÍTULO III: MARCO CONCEPTUAL</b> .....	13
<b>3.1 Consideraciones de diseño para la selección de radio y peralte</b> .....	13
<b>3.2 Consideraciones de diseño para la determinación del despeje lateral</b> .....	15
<b>CAPÍTULO IV: PROCEDIMIENTO DE DISEÑO PROPUESTO</b> .....	17
<b>4.1 Procedimiento para diseño de radio y peralte</b> .....	17

4.1.1 Caracterización demanda puntual de fricción, $f_{dp}$ .....	19
4.1.2 Calibración modelo demanda agregada de fricción, $f_{da}$ .....	19
4.1.3 Función demanda de fricción, $f_d$ .....	19
4.1.4 Caracterización oferta de fricción del pavimento, $f_{sp}$ .....	19
4.1.5 Función de estado límite para radio y peralte .....	20
4.1.6 Análisis de confiabilidad para radio y peralte .....	20
<b>4.2 Procedimiento para diseño de despeje lateral</b> .....	<b>20</b>
4.2.1 Calibración modelo de velocidad para demanda despeje lateral, $v_{req}$ .....	21
4.2.2 Función de demanda despeje lateral, $a_{máx_{req}}$ .....	21
4.2.3 Caracterización oferta despeje lateral, $a_{máx_{sum}}$ .....	21
4.2.4 Función de estado límite para despeje lateral .....	21
4.2.5 Análisis de confiabilidad despeje lateral .....	22
<b>4.3 Síntesis de procedimiento</b> .....	<b>22</b>
<b>CAPÍTULO V: CASO DE ESTUDIO</b> .....	<b>23</b>
<b>5.1 Radios y peraltes según confiabilidad</b> .....	<b>23</b>
5.1.1 Caracterización demanda puntual de fricción, $f_{dp}$ .....	23
5.1.2 Calibración modelo demanda agregada de fricción, $f_{da}$ .....	23
5.1.3 Función de demanda de fricción, $f_d$ .....	24
5.1.4 Caracterización de la oferta de fricción del pavimento, $f_{sp}$ .....	24
5.1.5 Función de estado límite para cálculo de probabilidad de falla .....	25
5.1.6 Análisis de confiabilidad para diseño de radio y peralte .....	26
<b>5.2 Despeje lateral según confiabilidad</b> .....	<b>27</b>
5.2.1 Calibración modelo de velocidad para demanda de despeje lateral, $V_{req}$ .....	27
5.2.2 Función de demanda por despeje lateral, $a_{máx_{req}}$ .....	27
5.2.3 Caracterización oferta despeje lateral, $a_{máx_{sum}}$ .....	28
5.2.4 Función de estado límite para despeje lateral .....	28

5.2.5 Análisis de confiabilidad para diseño de despeje lateral.....	29
<b>CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>31</b>
<b>6.1 Conclusiones.....</b>	<b>31</b>
<b>6.2 Recomendaciones.....</b>	<b>33</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>34</b>
<b>ÍNDICE ANEXOS .....</b>	<b>37</b>

**ÍNDICE TABLAS**

Tabla 1. Enfoques de Diseño..... 5

**ÍNDICE FIGURAS**

Figura 1. Metodología de trabajo a desarrollar. ....	3
Figura 2. Despeje lateral, $a_{máx}$ .....	7
Figura 3. Integración de la probabilidad de falla en dos dimensiones. ....	9
Figura 4. Equilibrio de diseño M.C .....	13
Figura 5. Modelo conceptual para estimar radio y peralte según niveles de confiabilidad.....	14
Figura 6. Variabilidad modelo conceptual .....	17
Figura 7. Concepto de confiabilidad para estimar radio y peralte.....	18
Figura 8. Velocidad y probabilidad de falla para radios de curvatura en asfalto y para V50. ....	26
Figura 9. Velocidad y probabilidad de falla para $a_{máx}$ y V50.....	29



## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1 Contexto

El diseño geométrico de una curva horizontal considera que el comportamiento de los conductores es homogéneo, y que no superarán las velocidades de proyecto, manteniendo la estabilidad dinámica del vehículo en la curva, sin riesgo de deslizarse (Echaveguren et al., 2011).

El Manual de Carreteras, Volumen 3 (*M.C.V3*) define la velocidad de diseño como la única variable de entrada para obtener radios de curvatura, fricciones máximas y por consiguiente despejes laterales; es decir, selecciona un valor único de radio de curvatura y peralte a razón de una velocidad específica y una demanda de fricción transversal constante. Sin embargo, en la práctica el comportamiento de los conductores se sabe heterogéneo, y en el caso de velocidades de proyecto inferiores a 90-100 Km/h éstos tienden a sobrepasarlas, aumentando sus demandas de fricción incluso por sobre las del pavimento, pudiendo llegar al deslizamiento en la curva (Echaveguren et al., 2009).

Los criterios de diseño usados tanto en Chile como en el extranjero, hacen del diseño un proceso determinista, en el que a partir de una cierta velocidad, peralte, demanda de fricción transversal y longitudinal, se encuentra un único radio de curvatura y despeje lateral asociado a la curva circular (Agudelo, 2002). De este modo, la seguridad no se incorpora explícitamente dado que el diseño está basado en la comodidad de los conductores, lo que significa limitar la fricción máxima a la máxima aceleración lateral.

La seguridad, según el Manual de Carreteras Volumen 6 (*M.C.V6*), se debe incorporar formalmente en las soluciones de diseño, aplicando el concepto de velocidad específica a los elementos curvos del trazado. Se calcula asumiendo un equilibrio entre la fricción demandada y la fricción ofrecida por el pavimento en la curva horizontal, mediante la adopción de leyes de variación de peralte, que conserva valores altos (7 y 8%) para un amplio rango de radios, confiriendo mayor seguridad ante velocidades de circulación superiores que las de proyecto. No obstante, las variables involucradas en el diseño, y en especial la demanda y oferta de fricción, no son de naturaleza determinística, sino que presentan un comportamiento aleatorio.

Así, un modo de integrar la variabilidad al proceso de diseño es utilizar las técnicas de confiabilidad, que ampliamente usadas en ingeniería, determinan la probabilidad de que un

sistema cumpla la tarea para la que fue diseñado. La confiabilidad permite estimar márgenes de seguridad y nuevos valores de diseño enfocados en la capacidad y demanda del sistema, que para el caso de la curva circular está referida a la oferta y demanda de fricción.

Aún no existe una caracterización del conductor que permita integrarlo a los modelos de diseño, por lo que continúa siendo un proceso determinista. El modo en que se tratan las variables de diseño, es considerándolas como un valor constante, de modo que atiendan estándares de seguridad y comodidad en todo tipo de vías. Este problema, sumado a las diferentes categorías de caminos no diferenciadas en los procesos de diseño, resulta en la necesidad de crear un procedimiento que incorpore la aleatoriedad de las variables y el nivel de seguridad asociado a cada diseño.

## **1.2 Objetivos**

### *1.2.1 Objetivo general*

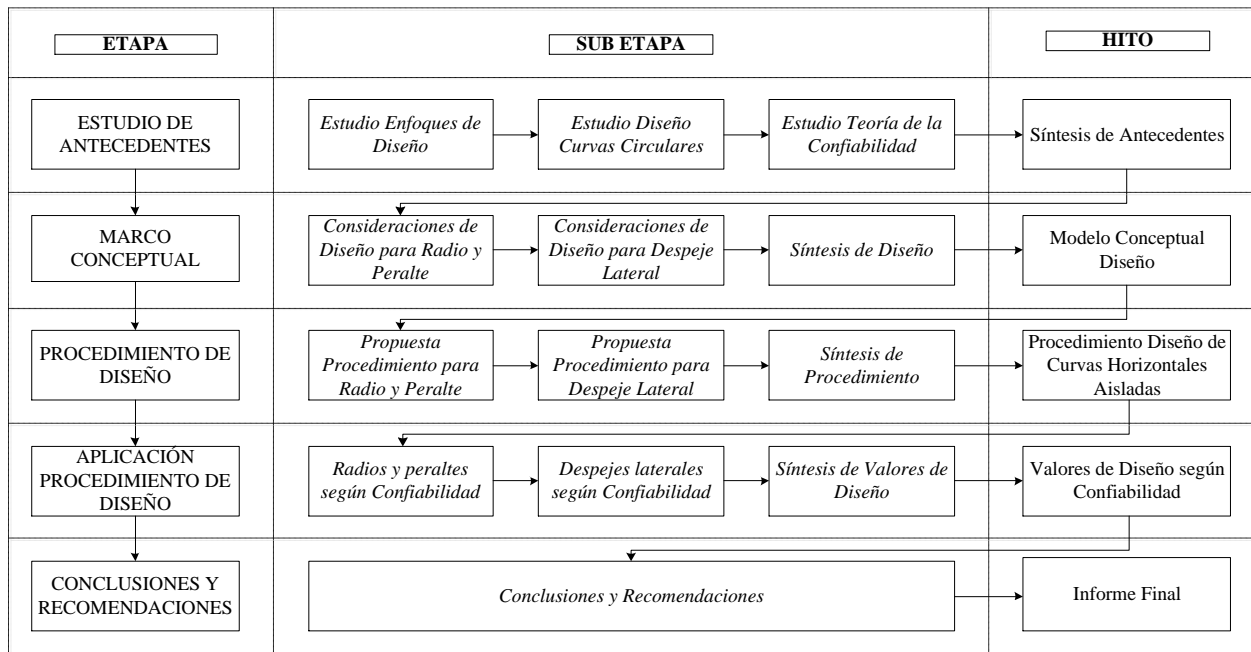
Proponer un procedimiento de diseño para la incorporación de la confiabilidad en el diseño geométrico de curvas horizontales aisladas.

### *1.2.2 Objetivos específicos*

- Revisar y sintetizar los distintos enfoques de diseño y las técnicas de análisis de confiabilidad disponibles en la literatura.
- Establecer un marco conceptual para incorporar el análisis de confiabilidad en el proceso de diseño geométrico de curvas horizontales aisladas.
- Proponer un procedimiento de diseño de curvas horizontales aisladas, para evaluar la confiabilidad en el diseño de curvas horizontales aisladas.
- Aplicar el procedimiento de diseño propuesto en el diseño de radios de curvatura y despejes laterales.

## **1.3 Metodología**

La Figura 1 presenta la metodología de trabajo diseñada para el cumplimiento de los objetivos propuestos. Se compone de 5 etapas con sus respectivas sub etapas, cuyos hitos describen y sintetizan cada una de ellas.



**Figura 1. Metodología de trabajo a desarrollar.**

### 1.3.1 Etapa 1: Estudio de antecedentes

Esta etapa corresponde a la recolección y revisión íntegra de la información existente respecto de los distintos enfoques de diseño y técnicas de análisis de confiabilidad. Se procesó y sintetizó dicha información, identificando las variables y aspectos relevantes del problema a resolver, finalizando la etapa con la síntesis de antecedentes.

### 1.3.2 Etapa 2: Marco conceptual

Esta segunda etapa definió el marco conceptual que incorpora la confiabilidad en el proceso de diseño de curvas horizontales aisladas. Se analizaron aspectos tanto estadísticos como conceptuales en la incorporación de la confiabilidad en la selección del radio de curvatura y despeje lateral. Se establecieron las técnicas de análisis de confiabilidad, así como los supuestos y requerimientos necesarios para ser aplicadas.

Al final de esta sección se formuló un modelo conceptual de evaluación e incorporación de la confiabilidad en el diseño de curvas horizontales aisladas.

### 1.3.3 Etapa 3: Procedimiento de diseño

En esta etapa se procedió a desarrollar un procedimiento de diseño para cálculo de radio y peralte, y despeje lateral. Se establecieron las funciones y modelos necesarios para incorporar la

confiabilidad al diseño, analizándose las bases de datos de distribuciones de probabilidad de ofertas y demandas de fricción. Además, se definió la ecuación de estado límite a analizar.

#### *1.3.4 Etapa 4: Aplicación procedimiento de diseño*

En esta sección se aplicó el procedimiento de diseño de la etapa 3, para el cálculo de radios de curvatura y despeje lateral según niveles de confiabilidad, con el apoyo del software Vap 1.6. Se analizó y resumió en tablas y gráficas los resultados obtenidos, con el fin de observar el comportamiento de las variables involucradas.

En esta etapa se abordó el objetivo principal de este estudio.

#### *1.3.5 Etapa 5: Conclusiones y recomendaciones*

Finalmente se respondió a los objetivos propuestos en esta investigación, cuyo resultado es un procedimiento de diseño que incorpora la confiabilidad en el proceso de diseño geométrico de curvas horizontales aisladas.

## CAPÍTULO II: ESTUDIO DE ANTECEDENTES

En este capítulo se presenta un resumen de los distintos enfoques de diseño, y cómo éstos han evolucionado a través de la historia. Además, se incluyen antecedentes del diseño geométrico de curvas horizontales y de la teoría de la confiabilidad.

### 2.1 Enfoques de diseño geométrico

Actualmente, considerar el conjunto conductor-vehículo como una masa puntual que se desplaza a lo largo de una cierta trayectoria, es lo más común a nivel mundial para enfrentar el diseño geométrico de un camino (Echaveguren et al., 2009). Asimismo, existen factores de distinta naturaleza; funcionales, físicos, económicos, humanos y ambientales, que influyen en diversos grados el diseño de una carretera, no siendo siempre posible considerarlos en una instrucción o recomendación de diseño en su justa medida (MOP, 2012).

A lo largo de la historia, diversas han sido las corrientes de diseño que abordan la seguridad desde distintas perspectivas. Según Echaveguren y Sáez (2001), las filosofías de diseño se pueden resumir como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1. Enfoques de Diseño**

<b>Enfoque de Diseño</b>	<b>Definición</b>
<b>Tradicional</b>	La velocidad máxima adoptada por los conductores será la máxima definida para la carretera (Barnett, 1938).
<b>Neo tradicional</b>	Se integra el concepto de velocidad de diseño, donde la uniformidad en la tasa de cambio de curvatura horizontal determinará la homogeneidad del trazado.
<b>Diseño que perdona o Diseño indulgente</b>	Se reconoce la heterogeneidad de los conductores, incorporando elementos en la vía que permitan reducir la severidad de los accidentes en caso que ocurran (Powers, et al. 1998).
<b>Sensitivo al contexto</b>	Refleja la adaptación del diseño a las condiciones particulares del área de localización y la satisfacción de los usuarios (Kaufman, M., 2002).
<b>Consistente</b>	Condición bajo la cual la geometría de un camino, se encuentra en armonía con las expectativas de los conductores (Echaveguren, 2012).

Durante el proceso de diseño, es necesario anticipar la interacción de los elementos de la carretera, con las condiciones probables de operación vehicular y con el entorno, con la finalidad de lograr un diseño consistente que cumpla con las expectativas del conductor en la ruta. Sin embargo, en las últimas décadas se han documentado estudios en Australia (McLean, 1981), Estados Unidos (Krames, 1995), Chile (Echaveguren y Sáez, 2001) y otros, que demuestran que los conductores superan las velocidades de diseño cuando estas están bajo los 90 y 100 km/h.

A pesar de la consolidación del concepto de consistencia en el diseño durante la década del 90, aún no se incorpora formalmente la aleatoriedad de las variables que intervienen en el diseño, y tampoco es posible conocer a priori el margen de seguridad asociado al diseño de la curva horizontal.

## 2.2 Diseño geométrico de curvas horizontales

Las curvas horizontales están definidas geoméricamente, como arcos de circunferencia de radio constante o variable dependiendo de las características del diseño (Cárdenas, 2002). Sus variables de decisión son el peralte, la velocidad de diseño y el radio de curvatura.

Dichas variables de decisión se combinan a partir del análisis de estabilidad dinámica del vehículo, donde se consigue estimar el radio de curvatura por medio de la Ecuación 1 (MOP, 2012)

$$R = \frac{V^2}{127*(f+p)} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde el radio es función de la velocidad ( $V$ ) de diseño, la fricción lateral ( $f$ ) y el peralte ( $p$ ).

Las distintas normativas de diseño coinciden en la fijación de un peralte y fricción máxima, que determine un radio mínimo de curvatura respecto de la velocidad de diseño (DG, 2001; INVIAS, 2008; MOP 2012). Sin embargo, en el caso de utilizar radios mayores al mínimo, se debe fijar una ley de variación de curvatura-peralte para el diseño de la curva.

Del mismo modo, ha de estudiarse el efecto de obstáculos como taludes, vegetación, muros de contención y barreras de seguridad en la visibilidad de la curva. Por lo que, así como se ha de cumplir con las distancias de visibilidad de parada y/o adelantamiento en rectas, debe de contemplarse una mínima distancia entre el eje de la pista interior y un obstáculo lateral en la curva, a fin de proporcionar la distancia de visibilidad de parada ( $Dp$ ) en toda la sección.

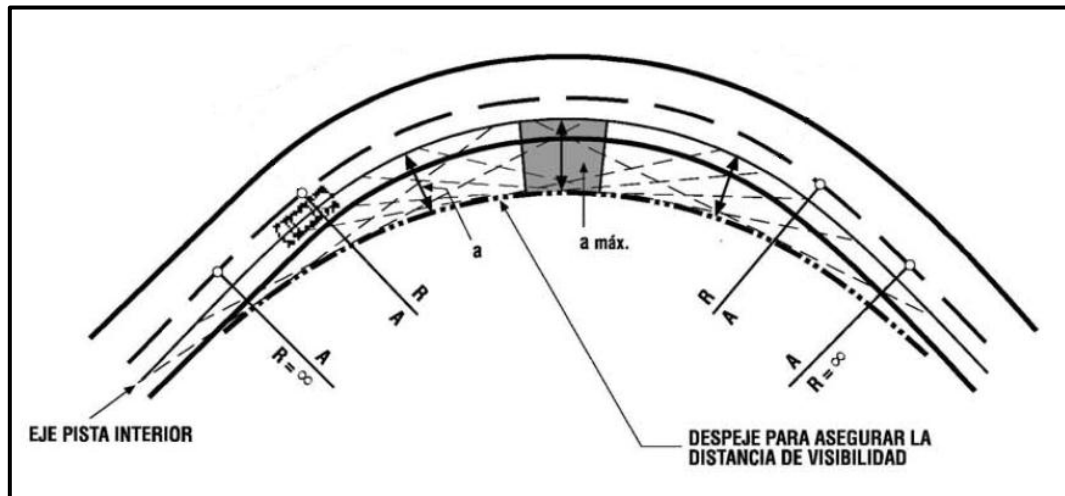
La distancia mínima de la que se hace mención, llamada también despeje lateral, se calcula según la Ecuación 2 (MOP, 2012).

$$a_{\text{máx}} = R \left[ 1 - \cos\left(\frac{100 \cdot D_p}{\pi \cdot R}\right) \right] \quad \text{Ec. (2)}$$

Esta expresión también puede aproximarse a la Ecuación 3 (MOP, 2012)

$$a_{\text{máx}} = \frac{D_p^2}{8R} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde  $a_{\text{máx}}$  es el despeje lateral máximo,  $D_p$  es la distancia de visibilidad de parada y  $R$  el radio de curvatura, tal como se muestra en la Figura 2.



**Figura 2. Despeje lateral,  $a_{\text{máx}}$**

Fuente: (MOP, 2012)

La distancia de visibilidad de parada está intrínsecamente relacionada a las características de los conductores, las condiciones del pavimento, el estado y tipo de vehículo y la velocidad a la que se desplaza (MOP, 2012), quedando definida como:

$$D_p = \frac{V \cdot t_p}{3,6} + \frac{V^2}{254 \cdot (r \pm i)} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde la  $D_p$ , mediante un enfoque de oferta, queda en función de las condiciones provistas por el pavimento: velocidad de diseño ( $V$ ), fricción longitudinal ( $r$ ) y pendiente longitudinal ( $i$ ). Dichas condiciones corresponden a factores únicos, que determinan la distancia de parada requerida por un vehículo ante algún objeto inesperado en la ruta.

La normativa ASSHTO (2004), a diferencia de M.O.P (2012), utiliza un enfoque de demanda para el cálculo de distancias de parada, mediante la utilización de valores de desaceleración ( $a$ ) aplicada por los conductores en la maniobra de frenado. Específicamente, el modelo reemplaza la fricción longitudinal ( $r$ ) por las desaceleraciones de los conductores  $\left(\frac{a}{g}\right)$ , a fin de que el conductor pueda mantener el vehículo en la pista y que pueda controlarlo en la maniobra de frenado en superficies mojadas.

### 2.3 Teoría de la confiabilidad

Una definición para este concepto diría que *“la teoría de la confiabilidad se ocupa principalmente de las fallas de los sistemas. Sin embargo, no indaga tanto en los fenómenos que las causan sino en la frecuencia con que ocurren. Por lo tanto, no es una teoría física de las fallas, sino una teoría estadística, una teoría de probabilidades”* (Felizia, 1996).

#### 2.3.1 Cálculo de la probabilidad de falla

Para definir matemáticamente la confiabilidad y/o la probabilidad de falla se precisa la función de estado límite. Un evento predefinido y cuya ocurrencia debe evitarse para asegurar el sistema (Felizia, 1996), representado a través de un modelo matemático y al que posteriormente se le calculará su probabilidad de ocurrencia.

Técnicamente, si  $S(x)$  representa la oferta de diseño y  $D(x)$  la condición demandada por el conductor, siendo ambas funciones aleatorias y lineales y  $x$  el vector de variables aleatorias que describen las características del diseño, la función de estado límite se representa como se indica en la Ecuación 5 (Haldar et al., 2000).

$$G(x) = S(x) - D(x) \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde el límite entre la condición de falla y no falla ocurre cuando  $G(x)=0$ , es decir, la oferta y demanda se igualan. Cabe mencionar que para valores positivos de  $G(x)$  existe una condición segura, mientras que para negativos representa una situación de falla. La probabilidad de que la demanda supere la oferta, es decir, la probabilidad de falla se puede expresar como:

$$F = \{G(x) < 0\} \quad \text{Ec. (6)}$$

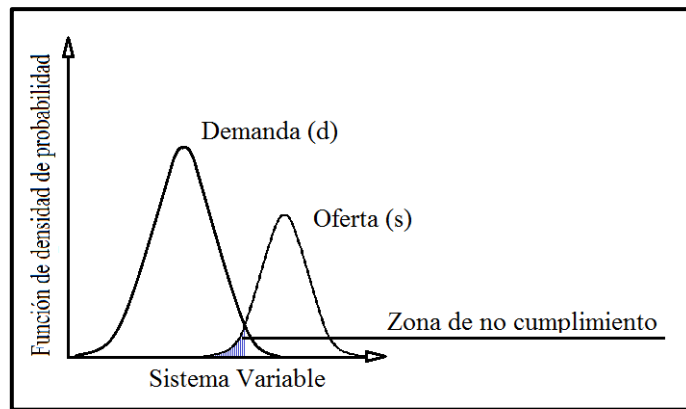


La Figura 3 representa gráficamente el concepto anterior siendo la zona achurada aquella donde la demanda supera la oferta del sistema, y cuya probabilidad puede ser estimada por medio de la integración de las funciones de oferta y demanda.

Lo que significa:

$$P_f = P(\text{falla}) = P(S < D) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(S < x) * P(x < D < x + dx) * dx = \int_{-\infty}^{+\infty} f(D) * g(S) dx$$

Ec. (7)



**Figura 3. Integración de la probabilidad de falla en dos dimensiones.**

Para resolver la integral anterior, se han desarrollado métodos aproximados de resolución conocidos como procedimientos *FORM/SORM*, *First Order* o *Second Order Reliability Methods* (Método de Confiabilidad de Primer o Segundo Orden). Estos, basados en el cálculo de un índice de confiabilidad  $\beta$ , determinan la probabilidad de falla  $P_f$  por medio de la función de densidad de probabilidad normal  $\Phi$ .

El cálculo de  $P_f$  será exacto si todas las variables involucradas son normalmente distribuidas y si la función  $G$  es lineal, pero como por lo general esto no ocurre, los procedimientos *FORM/SORM* introducen transformaciones para convertir todas las variables en normalmente distribuidas (Felizia, 1996) por lo que la no exactitud del cálculo está influenciado solo por la no linealidad de  $G$ .

Por lo tanto, si  $G$  es una función lineal, de variables aleatorias normalmente distribuidas y no correlacionadas, el valor del índice  $\beta$ , que corresponde a la mínima distancia entre el origen y la superficie de estado límite  $G(x)=0$  quedará definido como:

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} = \frac{\mu_0 - \mu_D}{\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_D^2}} \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde  $\beta$  es el índice de confiabilidad,  $\mu_G$  es la media y  $\sigma_G$  es la desviación estándar de la función de estado límite  $G(x)$ .

Así, la probabilidad de falla  $P_f$  se determina como lo describe la Ecuación 9.

$$P_f = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad \text{Ec. (9)}$$

Donde  $\Phi$  corresponde a la distribución normal estándar.

Cuando la función de estado  $G$  es no lineal y sus variables normalmente distribuidas, existe un método alternativo a los procedimientos *FORM/SORM* llamado *AFOSM*, método *Hasofer-Lind (H-L)*. Este es el encargado de linealizar la función de estado límite en el punto de diseño, definiendo  $\beta$  como la mínima distancia desde el origen del plano cartesiano al punto de diseño, en la función de estado límite.

Matemáticamente, el índice Hasofer-Lind  $\beta_{HL}$  se representa por la Ecuación 10 ((Haldar et al., 2000)).

$$\beta_{HL} = \min_{\{u \in G(x)=0\}} \sqrt{\sum_i u_i^2} \quad ; \quad u^* = \beta \alpha \quad \text{Ec. (10)}$$

Donde  $u_i$  es la variable  $X$  normalizada y  $\alpha$  es el vector normal para  $G(u)=0$  en el punto de diseño  $u^*$ . Luego,  $P_f$  se define de igual manera que para los procedimientos *FORM/SORM*.

$$P_f = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta)$$

### 2.3.2 Estudios previos de confiabilidad en el diseño geométrico

En lo que concierne al diseño vial, se encuentran estudios como el de Zheng (1997), que aplica la teoría de la confiabilidad al diseño geométrico de carreteras, construyendo un modelo alternativo llamado *MCSD, Moving Coordinate System Design*. Este, evalúa las carreteras existentes en términos de accidentabilidad y confiabilidad, armonizando los enfoques de diseño, y permitiendo un control y retroalimentación de la carretera en la etapa operacional, que incluye un seguimiento fotográfico de la zona. La cantidad de accidentes producidos en un elemento en particular de la ruta, influirá en la probabilidad de falla que presente dicho elemento, y frente a ello, los diseñadores podrán realizar las intervenciones necesarias para disminuirlos.

A diferencia de Zheng, Richl (2003) no incluye tasas de accidentabilidad que influyan en la probabilidad de falla de los elementos de análisis. Introduce la confiabilidad directamente en el diseño del cálculo de la distancia de parada, evaluando principalmente la capacidad de detención de los vehículos, ante obstáculos en la vía en curvas horizontales y verticales, utilizando los valores mínimos entregados por la Asociación de Transporte de Canadá (TAC). Una de sus principales conclusiones dice que, un pequeño cambio en un parámetro que recae en la pendiente longitudinal positiva de una curva, puede modificar considerablemente la probabilidad de falla para la distancia de parada en ese punto. Sin embargo, si dicho parámetro está en una zona de pendiente cero, no alterará significativamente la probabilidad de falla de la distancia de parada.

Sayed (2006; 2008; 2011) por su parte, utiliza en sus investigaciones los conceptos de confiabilidad para evaluar el riesgo en medianas estrechas, para calibrar modelos de diseño geométrico y para desarrollar funciones de comportamiento de la seguridad. Propone marcos teóricos y desarrolla metodologías que invitan a integrarlas a los procesos de diseño; sin embargo, el uso de bases de datos que incluyen tasas de accidentabilidad, costos por colisiones y construcción, limitan la incorporación de su análisis a zonas donde no se cuente con dicha información.

Los estudios mencionados, integran la confiabilidad al diseño geométrico, de modo de verificar y evaluar la seguridad, respecto de parámetros de diseño de normativas vigentes. Utilizan ecuaciones de oferta y demanda para distintos parámetros, pero además integran factores de desempeño respecto de accidentes y permiten calibrar los modelos de diseño. Sin embargo, Chile no cuenta con una base de datos lo suficientemente completa, para incorporar las metodologías presentadas.

De esta manera, el proceso de diseño continúa siendo determinista, no incorporando la aleatoriedad de las variables involucradas en el diseño, fundadas en el comportamiento heterogéneo de los conductores.

En Chile, estudios de Echaveguren et al., (2005), De Solminihac et al., (2007) y Echaveguren et al., (2009) y han explorado la aplicación de la confiabilidad en el diseño geométrico de curvas horizontales. El primero de ellos se enfoca en el diseño de curvas horizontales, buscando maximizar la confiabilidad para un determinado radio; el segundo, calcula márgenes de seguridad en base a velocidades límite obtenidas de la interacción de demandas y ofertas de fricción; y el

tercero aplica el análisis de confiabilidad en curvas horizontales, en caminos de bajo volumen de tránsito, con velocidades de diseño de entre 50 y 90 km/h.

No obstante el avance conseguido con los estudios anteriores, aún no existe un procedimiento de diseño aplicable en el país, que permita determinar el nivel de confiabilidad deseado y el margen de seguridad incorporado, para la selección de radio-peralte y despeje lateral de curvas horizontales aisladas.

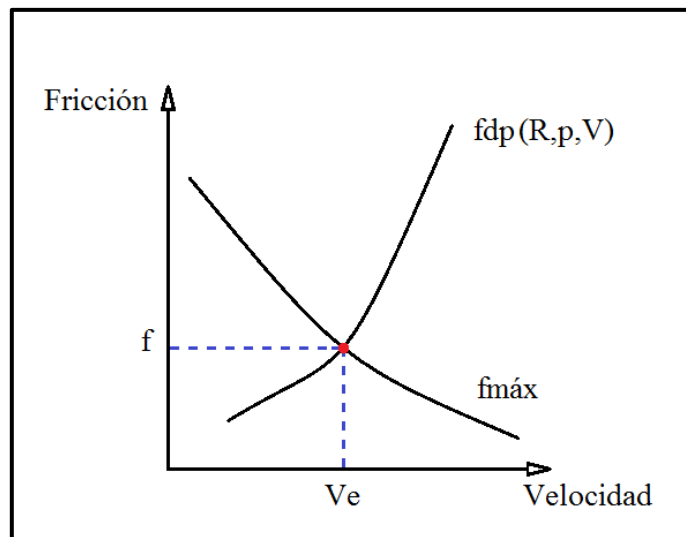
### CAPÍTULO III: MARCO CONCEPTUAL

El diseño de una curva horizontal, comprende la selección de un radio y peralte asociados a la velocidad de proyecto definida, a partir de lo cual se verifica la distancia de visibilidad de parada, calculando el despeje lateral de la curva. De esta manera, el presente capítulo divide el análisis de diseño de una curva horizontal, en las consideraciones de diseño para la selección de radio-peralte y de despeje lateral.

#### 3.1 Consideraciones de diseño para la selección de radio y peralte

Según el MCV3 el diseño de una curva horizontal aislada, se basa en la ecuación de equilibrio dinámico de un vehículo que circula por una trayectoria curva, lo que determina la relación entre la fricción, el peralte y el radio de curvatura mediante la Ecuación 1.

Para este tipo de elemento, la *Velocidad específica* ( $V_e$ ) es la máxima velocidad a la cual se puede circular, conocido el radio y peralte y haciendo uso del máximo roce transversal especificado para dicha velocidad, en condiciones de pavimento húmedo, neumáticos en razonable buen estado y condiciones de flujo libre (MOP, 2012).



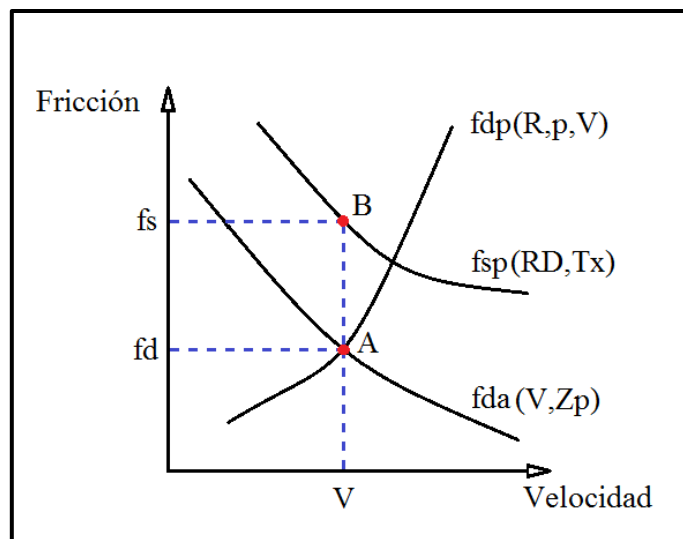
**Figura 4. Equilibrio de diseño Manual de carreteras, M.C**

Como lo muestra la Figura 4, la  $V_e$  se obtiene del equilibrio entre la máxima aceleración lateral o fricción máxima demandada por comodidad ( $f_{máx}$ ) y la demanda puntual de fricción ( $f_{dp}$ ). La primera corresponde a los valores de la Tabla A1 del Anexo A especificados por el M.C.V3, y la segunda queda determinada por la Ecuación 11.

$$fdp = \frac{v^2}{127 \cdot R} - p \quad \text{Ec. (11)}$$

En el concepto de diseño aplicado por el M.C.V3, existen únicos valores de fricción y velocidad para distintas combinaciones radio-peralte, aunque es ampliamente reconocido en la práctica, que dichos valores son de naturaleza aleatoria, y están determinados por el comportamiento heterogéneo de los conductores.

Si se integra al análisis indicado por el M.C.V3 la función de oferta de fricción del pavimento ( $f_{sp}$ ) y se reemplaza la fricción máxima teórica por la demanda agregada de fricción ( $f_{da}$ ) para un percentil de conductores determinado, se consiguen dos valores de fricción para una misma velocidad específica. Uno demandado por el conductor en una curva de radio y peralte conocido ( $f_d$ ), y uno ofrecido por el pavimento para las mismas condiciones ( $f_s$ ). Lo que se muestra en detalle en la Figura 5.



**Figura 5. Modelo conceptual para estimar radio y peralte según niveles de confiabilidad**

La descripción de las variables involucradas sería la siguiente:

Oferta de fricción del pavimento ( $f_{sp}$ )

La oferta de fricción del pavimento corresponde a la resistencia al deslizamiento (RD) que proporciona el pavimento bajo ciertas condiciones de velocidad y temperatura, pudiendo cambiar en el tiempo y el espacio, producto de condiciones climáticas, geométricas y del propio pavimento.

a) Demanda puntual de fricción ( $f_{dp}$ )

Ya definida por la Ecuación 11, la demanda puntual de fricción corresponde a la fricción requerida por el sistema conductor-vehículo, para una configuración radio-peralte ( $R, p$ ) en condiciones de seguridad y comodidad establecidas.

La curva  $f_{dp}$  variará de acuerdo a las diferentes configuraciones  $R, p$ .

b) Demanda agregada de fricción ( $f_{da}$ )

Corresponde a la demanda por fricción de todo el conjunto de conductores, la cual se obtiene de la agregación de demandas puntuales para distintas configuraciones  $R, p$ , y queda definida para un percentil específico de velocidades, por ejemplo V85.

Al conjugar estos tres conceptos se advierten dos puntos de interés:

- Punto A: Especifica el equilibrio entre la demanda puntual y la demanda agregada de fricción, determinando la velocidad demandada por los conductores para un radio y peralte conocido, y la fricción demandada en el mismo punto.
- Punto B: Corresponde a la fricción ofrecida por el pavimento a la velocidad requerida en el punto A.

De esta manera, la diferencia entre la fricción demandada y la ofrecida permitiría estimar la probabilidad de falla para los distintos puntos de equilibrio a evaluar.

### 3.2 Consideraciones de diseño para la determinación del despeje lateral

El despeje lateral de la curva queda definido por el radio de curvatura y la velocidad de verificación para distancias de visibilidad, que en el caso pertinente a curvas circulares, corresponde a la distancia de visibilidad de parada,  $D_p$  (MOP, 2012). Esto, sustentado en el análisis del caso más desfavorable, observa la situación donde el vehículo deba detenerse completamente ante un obstáculo en la vía.

La distancia de visibilidad en la curva puede quedar restringida por la localización de un objeto dentro de la ruta (Richl y Sayed, 2006), por lo que el conductor debe disponer del tiempo necesario para percibir dicho objeto y posteriormente reaccionar. Según la normativa vigente esto corresponde a 2 segundos.

El Anexo A muestra las distancias de parada según velocidades de diseño, y así también para las mismas velocidades de diseño, los radios de curvatura mínimos a proveer. Esto significa, un

modelo de diseño basado en un enfoque determinista, para el que existe un único valor de distancia de parada y por consiguiente despeje lateral, para una velocidad y radio de curvatura específico.

Por otra parte, si se suponen los valores de diseño como una oferta de despeje lateral, y se caracterizan los valores operacionales en ruta para definirlos como la demanda por despeje, se conseguiría la diferencia entre dichos valores, permitiendo estimar el margen de seguridad para los distintos puntos de equilibrio a evaluar.



## CAPÍTULO IV: PROCEDIMIENTO DE DISEÑO PROPUESTO

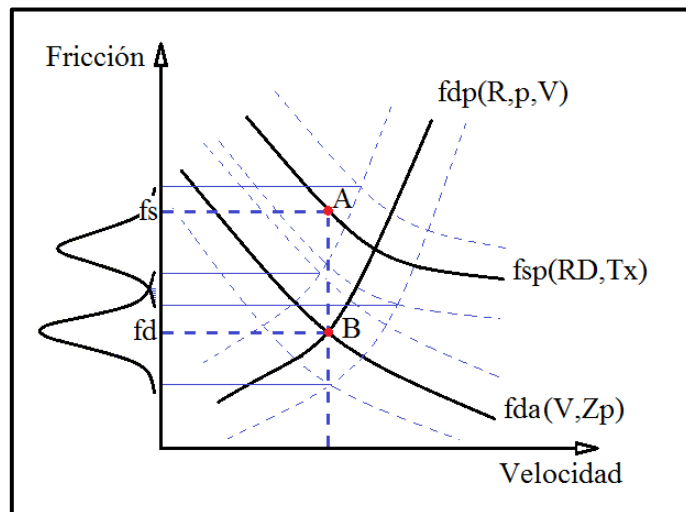
En este capítulo se propone un procedimiento de diseño para curvas horizontales aisladas, dividido en dos etapas. La primera determina la probabilidad de falla para valores de radio y peralte, y la segunda a partir del par radio-peralte seleccionado, la de despeje lateral.

Este procedimiento incorpora la naturaleza aleatoria de las variables involucradas en el proceso de diseño, incluyendo el análisis de confiabilidad en dicho proceso.

### 4.1 Procedimiento para diseño de radio y peralte

El análisis de confiabilidad aplicado a la selección de radios y peraltes, toma en cuenta la naturaleza probabilística de la oferta y la demanda de fricción, mediante distribuciones de probabilidad que las describan.

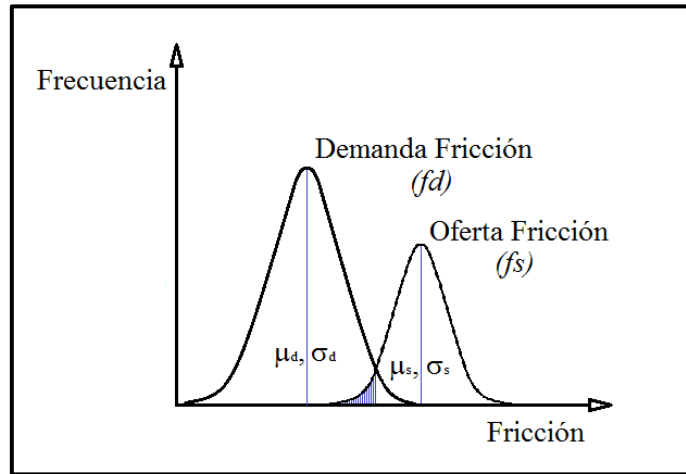
La Figura 6 muestra la variabilidad de  $f_{dp}$ ,  $f_{sp}$  y  $f_{da}$ , que hace que los puntos  $A$  y  $B$  presenten una cierta distribución de probabilidades. La  $f_{dp}$  varía respecto de la configuración  $R, p$  a seleccionar, la  $f_{sp}$  lo hace respecto de la  $RD$  en el pavimento, y la  $f_{da}$  depende del percentil de velocidad considerado.



**Figura 6. Variabilidad modelo conceptual**

Los múltiples puntos de equilibrio entre las funciones de  $f_{sp}$  y  $f_{dp}$ , y de  $f_{da}$  con  $f_{dp}$ , generan una distribución de probabilidades para valores de oferta y otra para valores de demanda de fricción,  $A$  y  $B$  respectivamente.

Como se muestra en la Figura 7, si las distribuciones tienen una media ( $\mu$ ) y una desviación estándar ( $\sigma$ ) conocida, la intersección de las curvas, donde la demanda supera la oferta, será la zona de falla.



**Figura 7. Concepto de confiabilidad para estimar radio y peralte**

En términos matemáticos, si  $f_s$  es la oferta de fricción del pavimento y  $f_d$  es la demanda por fricción para una velocidad dada, la condición de seguridad está representada por:

$$f_s - f_d > 0 \quad \text{Ec. (12)}$$

Mientras que la condición de falla, la describe la Ecuación 14.

$$f_s - f_d < 0 \quad \text{Ec. (13)}$$

Y el punto de falla y no falla, o estado límite es:

$$f_s = f_d = 0 \quad \text{Ec. (14)}$$

Entonces, el diseño de una curva horizontal aislada respecto del radio y peralte, queda definido por las distribuciones de probabilidad de la oferta y la demanda de fricción, sobre lo cual se puede calcular el mínimo valor de diseño que tenga la menor probabilidad de falla. Es decir, que en dicho diseño exista la mínima probabilidad de que la demanda por fricción del conductor, supere la oferta del pavimento, ya que si esto ocurre se producirá una condición de falla.

Además, es posible expresar el margen de seguridad del diseño mediante el concepto del índice de confiabilidad  $\beta$ . Éste representa la relación entre la distancia del valor esperado de oferta menos demanda, el valor en estado límite de la misma diferencia y su desviación estándar, por lo

que está directamente relacionado con la probabilidad de falla. El índice de confiabilidad Hasofer-Lind,  $\beta_{H-L}$  obtenido del análisis *FORM* retiene las propiedades de  $\beta$  para problemas de múltiples variables, como es el caso de esta memoria.

De esta manera se propone el siguiente procedimiento general para el cálculo de la probabilidad de falla, para distintos pares radio y peralte según confiabilidad:

- Caracterización demanda puntual de fricción, *fdp*
- Calibración modelo demanda agregada de fricción, *fda*
- Función demanda de fricción, *fd*
- Caracterización oferta de fricción del pavimento, *fsp*
- Función de estado límite para radio y peralte
- Análisis de confiabilidad radio y peralte

#### 4.1.1 Caracterización demanda puntual de fricción, *fdp*

La aleatoriedad de la demanda puntual de fricción, está dada por aspectos geométricos y operacionales en la curva. Se refiere a elementos como el radio, peralte, fricción lateral y velocidad operacional, que pueden obtenerse de la medición en numerosas curvas horizontales, con el fin de lograr una muestra que describa el comportamiento de los conductores.

#### 4.1.2 Calibración modelo demanda agregada de fricción, *fda*

A partir de la caracterización de la demanda puntual de fricción (*fdp*), dada por mediciones en terreno para distintas configuraciones  $R$ ,  $p$ , se construye un modelo que represente las condiciones reales de demanda por fricción para distintas curvas, con la finalidad de incorporar la variabilidad en la selección de radios y peraltes. Este modelo debe ser calibrado para diferentes niveles de confianza, por ejemplo, los percentiles 50, 85, 99 u otro.

#### 4.1.3 Función demanda de fricción, *fd*

La función de demanda de fricción (*fd*), corresponde al modelo de *fda* que describe la demanda por fricción en términos de velocidad y nivel de confianza.

#### 4.1.4 Caracterización oferta de fricción del pavimento, *fsp*

La oferta de fricción puede ser modelada por el tipo de pavimento, siendo determinante la observación de ellas mediante equipos que midan textura ( $T_x$ ) y resistencia al deslizamiento

(*RD*). Una opción para ello es el modelo IFI, que relaciona la *RD* y *Tx* con la velocidad de deslizamiento, la cual puede ser caracterizada por mediciones de campo.

#### 4.1.5 Función de estado límite para radio y peralte

La ecuación de estado límite, se formula a partir de la obtención de distribuciones de probabilidad, para los valores de demanda de fricción de distintos percentiles, y para los valores de oferta de fricción en distintos pavimentos. La Ecuación 15 la define como:

$$G = f_s - f_d \quad \text{Ec. (15)}$$

#### 4.1.6 Análisis de confiabilidad para radio y peralte

Se debe calcular el índice de confiabilidad Hasofer-Lind ( $\beta_{H-L}$ ), la probabilidad de falla y los valores de diseño en estado límite. Con ello se obtendrán los valores de radio y peralte según distintos niveles de confiabilidad.

### 4.2 Procedimiento para diseño de despeje lateral

El análisis de confiabilidad aplicado a la selección de despeje lateral, conjuga valores de diseño (oferta) con valores requeridos en ruta (demanda), cuyas distribuciones de probabilidad describen el comportamiento de los conductores, integrando la aleatoriedad de las variables involucradas en el proceso de diseño.

De esta manera, existiendo un despeje lateral suministrado ( $amáx_{sum}$ ) y uno demandado ( $amáx_{req}$ ), la condición segura de diseño estará definida por una diferencia positiva:

$$amáx_{sum} - amáx_{req} > 0 \quad \text{Ec. (16)}$$

Y la condición de falla, por una diferencia negativa:

$$amáx_{sum} - amáx_{req} < 0 \quad \text{Ec. (17)}$$

El cálculo de despeje lateral queda sujeto a una probabilidad de falla establecida en el diseño, mediante la diferencia entre la oferta y demanda de  $amáx$ . Se considera además, la naturaleza probabilística de la demanda de despeje lateral, dada por la velocidad operacional y las desaceleraciones de los conductores en la curva.

A continuación se propone el siguiente procedimiento general para el cálculo la probabilidad de falla, para despejes laterales según confiabilidad:

- Calibración modelo de velocidad para demanda despeje lateral,  $v_{req}$
- Función de demanda despeje lateral,  $amáx_{req}$
- Caracterización oferta despeje lateral,  $amáx_{sum}$
- Función de estado límite para despeje lateral
- Análisis de Confiabilidad despeje lateral

#### 4.2.1 Calibración modelo de velocidad para demanda despeje lateral, $v_{req}$

Se ajusta un modelo de velocidad operacional, que represente las condiciones de variabilidad para distintas curvas horizontales, respecto del radio de curvatura. Dicho modelo debe ser calibrado para distintos percentiles de demanda, tales como 50, 85 y 99.

#### 4.2.2 Función de demanda despeje lateral, $amáx_{req}$

La función de demanda de despeje lateral ( $amáx_{req}$ ), queda definida como la ecuación de diseño de  $amáx$  pero en condiciones de demanda. Es decir, se utiliza el modelo de velocidad requerida ( $v_{req}$ ) y las desaceleraciones de los conductores en la curva, con la finalidad de proporcionar variabilidad al diseño de despeje lateral.

#### 4.2.3 Caracterización oferta despeje lateral, $amáx_{sum}$

La variabilidad en la selección de despeje lateral, viene dada por los parámetros implicados en el cálculo de la distancia de parada al usar la ecuación de diseño. Estos parámetros son la velocidad operacional y la desaceleración, obtenidos de mediciones en terreno de distintas curvas horizontales, y corresponden a distribuciones de probabilidad.

El M.C.V3 indica valores establecidos de  $Dp$  para radios mínimos de curvatura, y por medio de las ecuaciones de diseño establece el cálculo respectivo para despeje lateral. De esta forma, a los valores de diseño se ajusta una función de oferta de  $amáx$  que depende del radio de curvatura.

#### 4.2.4 Función de estado límite para despeje lateral

Se define la ecuación de estado límite, para los valores de oferta de despeje lateral ajustados, y para la demanda por despeje lateral. La Ecuación 18 corresponde a la diferencia entre lo suministrado en el diseño y lo requerido en fase de operación.

$$G = a_{sum} - a_{req} \quad \text{Ec. (18)}$$

#### *4.2.5 Análisis de confiabilidad despeje lateral*

Por medio del método *FORM*, se calcula el índice de confiabilidad  $\beta_{H-L}$ , la probabilidad de falla y los valores de diseño en estado límite. Con ello se obtendrán los valores de despeje lateral según distintos niveles de confiabilidad.

#### **4.3 Síntesis de procedimiento**

A partir de los procedimientos propuestos, en el punto 4.1 se determina la velocidad de deslizamiento y la probabilidad de ocurrencia para un par radio-peralte definido. Posteriormente en el punto 4.2 se verifica la distancia de visibilidad de parada, por medio del cálculo de la probabilidad de falla asociada al despeje lateral y respecto radio analizado en el punto anterior.

## **CAPÍTULO V: CASO DE ESTUDIO**

En este capítulo se aplica el procedimiento descrito en la sección 4.1 y 4.2, calculando la probabilidad de falla para distintos pares radio-peralte y posteriormente evaluando la distancia de visibilidad de parada en el cálculo de despeje lateral según confiabilidad.

### **5.1 Radios y peraltes según confiabilidad**

#### *5.1.1 Caracterización demanda puntual de fricción, fdp*

La demanda puntual de fricción fue caracterizada, por medio de los resultados de de Solminihac (2007). En dicho estudio, se seleccionaron 55 curvas bidireccionales de calzada única entre la Región de Valparaíso y la del Maule que respondieran a requisitos exigidos de geometría, topografía, mantenimiento y tránsito.

Los resultados entregaron distribuciones de probabilidad de velocidades, fricciones demandadas y desaceleraciones en los puntos de entrada, mitad y salida de la curva. Estos posteriormente fueron utilizados para modelar la demanda agregada de fricción.

#### *5.1.2 Calibración modelo demanda agregada de fricción, fda*

Empleando las distribuciones de probabilidad de las demandas puntuales recién mencionadas, se calibró y validó un modelo de demanda agregada de fricción, que describiera el comportamiento de la fricción respecto de la velocidad. Para ello, se realizó un análisis por curva, de manera de confeccionar la base de datos a utilizar para dicho modelo.

Cada una de las 55 curvas analizadas, poseen distribuciones normales de probabilidades de velocidad y demanda de fricción, producto de las mediciones efectuadas en la entrada, punto medio y salida de la curva. A fin de obtener valores de velocidad en cada uno de esos puntos, se determinó el inverso de la distribución normal estándar acumulativa de siete percentiles de demanda llamados  $Z_p$ , para posteriormente construir un listado de percentiles, velocidad y fricción en cada punto de la curva. En el Anexo B, Tabla B1 se muestra el desarrollo de las 55 curvas mencionadas.

Posterior al análisis de cada una de las curvas se generó una única base de datos con los valores de velocidad,  $Z_p$  y fricción de las 55 curvas estudiadas (Anexo B). Con ello, y utilizando el software estadístico Infostat, se realizaron múltiples regresiones lineales con el fin de estudiar

cómo los cambios en la variable predictora (velocidad y  $Z_p$ ), afectan a las variables de respuesta (fricción), mediante el ajuste de un modelo.

Luego, se aleatorizó la base de datos y con el 70% se calibró un modelo mediante regresión lineal, validándolo posteriormente con el 30 % restante. Para ello se ensayaron distintos tipos de modelos: lineales, polinomiales y recíprocos, buscando el mejor ajuste y relación lineal entre las variables.

El modelo obtenido, fue calibrado para los percentiles de demanda 50, 85 y 99 y quedó representado por la Ecuación 19.

$$fda = 0,35 + 0,09 * Z_p - 0,000035 * V^2 \quad \text{Ec. (19)}$$

Donde  $fda$  es la demanda agregada de fricción,  $Z_p$  es el inverso de la distribución normal estándar acumulativa de los percentiles de demandas y  $V$  es la velocidad. Además, el modelo presenta un  $R^2 = 0,73$ .

Los valores p y t de cada una de las variables y la validación del modelo, se encuentran en el Anexo C, Tabla C1 y Figura C1, respectivamente.

### 5.1.3 Función de demanda de fricción, $fd$

La función de demanda de fricción ( $fd$ ), corresponde al modelo de  $fda$  del punto anterior, que describe la demanda por fricción en términos de velocidad y nivel de confianza.

$$fd = 0,35 + 0,09 * Z_p - 0,000035 * V^2 \quad \text{Ec. (20)}$$

En la Ecuación 20  $fd$  es la demanda de fricción,  $Z_p$  es el inverso de la distribución normal estándar acumulativa de los percentiles de velocidades demandadas y  $V$  es la velocidad.

### 5.1.4 Caracterización de la oferta de fricción del pavimento, $fsp$

Se utilizó el modelo definido por la Asociación Mundial de Carreteras (PIARC, 1995), que caracteriza la oferta de fricción por medio de mediciones in situ de RD y Tx, como:

$$F(S) = F60 * e^{\frac{60-s}{Sp}} \quad \text{Ec. (21)}$$

En donde  $F(S)$  es la fricción estandarizada para una velocidad  $S$ ,  $F60$  es la fricción estandarizada a 60 Km/h y  $Sp$  es la constante de velocidad de la Ecuación 22.



$$Sp = a + b * Tx \quad \text{Ec. (22)}$$

Con  $a=25,8322$  y  $b=139,6801$ , constantes de la mancha de arena para la medición de textura.

Por otro lado, la fricción estandarizada a 60 Km/h se determina a partir de la Ecuación 23:

$$F60 = (A + B * FR60) \quad \text{Ec. (23)}$$

Donde  $A=0,08209$  y  $B=0,9104$ , constantes de calibración del equipo Griptester usado para medir RD, y donde además el  $FR60$  corresponderá al valor obtenido de la Ecuación 24:

$$FR60 = \frac{FR(S)}{e^{\left(\frac{60-s}{Sp}\right)}} \quad \text{Ec. (24)}$$

Donde  $FR60$  es la fricción a 60 Km/h,  $FR(S)$  la resistencia al deslizamiento RD medida a una velocidad  $S$ ,  $S$  la velocidad del equipo y  $Sp$  la constante de velocidad dependiente de la textura definida previamente.

Resumiendo, la oferta de fricción quedó definida como:

$$F(S) = \left[ A + B * \left( \frac{FR(S)}{e^{\left(\frac{60-s}{(a+b*Tx)}\right)}} \right) \right] * e^{\left[\frac{(60-s)}{(a+b*Tx)}\right]} \quad \text{Ec. (25)}$$

Los valores de  $RD$  y  $Tx$  utilizados en la Ecuación 25, fueron obtenidos de Vargas (2008). Dichos valores corresponden a medias y desviaciones estándar de ofertas de fricción en pavimentos asfálticos, de hormigón y DTS en verano, otoño, invierno y primavera. A cada tipo de pavimento, se le calculó la media y desviación estándar del grupo de mediciones de RD y Tx del año completo, lo que diferencia la oferta de fricción sólo por tipo de pavimento.

En el Anexo B, punto 2 se encuentran los valores recién mencionados.

#### 5.1.5 Función de estado límite para cálculo de probabilidad de falla

La función de estado límite  $G$  para la obtención de radios y peraltes, se construye a partir de la diferencia entre la oferta y demanda de fricción, ambas previamente modeladas. Luego,  $G$  queda definida por la Ecuación 26 y 27:

$$G = fs - fd \quad \text{Ec. (26)}$$

$$G = \left( \left[ A + B * \left( \frac{FR(S)}{e^{\left[ \frac{(60-s)}{(a+b*Tx)} \right]}} \right) \right] * e^{\left[ \frac{(60-s)}{(a+b*Tx)} \right]} \right) - (0,35 + 0,09 * Z_p - 0,000035 * V^2) \quad \text{Ec. (27)}$$

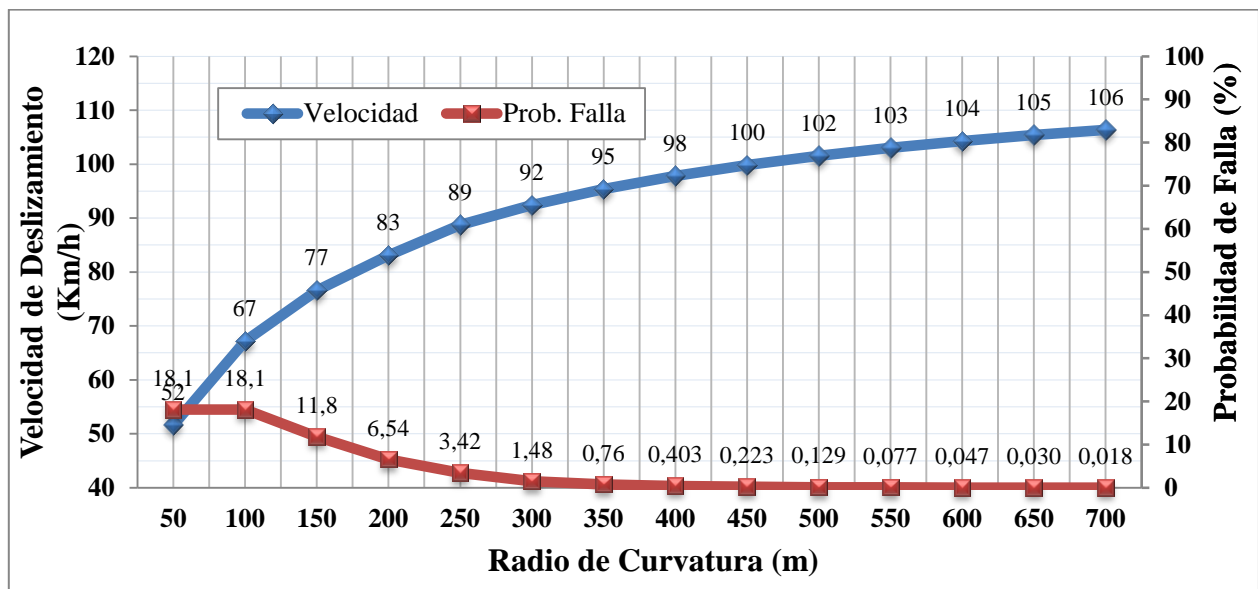
### 5.1.6 Análisis de confiabilidad para diseño de radio y peralte

Utilizando el software Vap 1.6, se resolvió la ecuación de estado límite, mediante el método FORM (*First Order Reliability Method*). Este análisis entregó la probabilidad de falla, el índice de confiabilidad Hasofer-Lind y los valores para los cuales existe dicha probabilidad de falla. Además, utilizando el modelo de demanda agregada de fricción se determinó la velocidad a la cual se produciría la falla (deslizamiento) en la condición más desfavorable, o punto de diseño.

#### a) Resultados

Del análisis FORM se obtuvo para cada par radio-peralte la velocidad estimada de deslizamiento, la probabilidad de falla y los valores de RD y textura para el punto de diseño, además del índice Hasofer-Lind y el margen de seguridad. Dicha Información se resumió en tablas y posteriormente se graficaron los valores de radio versus velocidad de deslizamiento y probabilidad de falla.

A modo de ejemplo, la Figura 8 grafica las condiciones de radio, velocidad de deslizamiento y probabilidad de falla para los pares radio- peraltes consultados para el percentil 50 de velocidades. Los demás parámetros se pueden encontrar en el Anexo C, Tabla C2.



**Figura 8. Velocidad y probabilidad de falla para radios de curvatura en asfalto y para V85.**

Los resultados para los restantes percentiles y tipo de pavimento, se encuentran en el Anexo C.

## b) Análisis de resultados

De acuerdo a los resultados de asfalto para percentil 50 mostrados, se obtuvo que la probabilidad de falla aumenta para radios menores a 350 metros. Como bien demuestra la evidencia empírica de velocidades, los conductores tienden a sobrepasar las velocidades de diseño cuando estas son menores que 90-100 Km/h, por lo que aumentan sus demandas elevando así las probabilidades de falla.

Respecto de los cálculos restantes, se tiene que las probabilidades de falla disminuyen al aumentar los radios de curvatura en cada pavimento, ya que conforme existan radios más grandes se cumplirá que la  $fd < fs$ . Así también, la probabilidad de falla disminuye al cambiar de tipo de pavimento, puesto que las RD y textura que alcanzan éstos, en orden decreciente, es  $DTS > Ho > Asf$ .

Por otro lado, ocurre que mientras mayor sea el percentil de demanda seleccionado la probabilidad de falla también aumentará.

## 5.2 Despeje lateral según confiabilidad

### 5.2.1 Calibración modelo de velocidad para demanda de despeje lateral, $V_{req}$

Utilizando las distribuciones de probabilidad de velocidad operacional, se calibró y validó un modelo descriptivo respecto del radio de curvatura, a implementar en la función de despeje lateral.

El modelo obtenido fue:

$$V_{req} = 94,52 - 5174,96 * \frac{1}{R} + 182238,93 * \frac{1}{R^2} + 8,64 * Z_p \quad \text{Ec. (28)}$$

Para el modelo el valor de  $R^2$  es 0,91 y fue calibrado para los percentiles 50, 85 y 99. Los estadísticos del modelo se encuentran en el Anexo D, Tabla 1 y la validación del modelo en la Figura D1.

### 5.2.2 Función de demanda por despeje lateral, $amáx_{req}$

La función de demanda de despeje lateral ( $amáx_{req}$ ), queda definida por la ecuación de diseño de  $amáx$  pero en condiciones de demanda., como lo muestra la Ecuación 29 y 30.

$$am\acute{a}x_{req} = \frac{Dp_{req}^2}{8 * R} \quad \text{Ec. (29)}$$

$$am\acute{a}x_{req} = \left( \frac{V_{req} * tp}{3,6} + \frac{V_{req}^2}{254 * ((a/g) \pm i)} \right)^2 / (8 * R) \quad \text{Ec. (30)}$$

La  $V_{req}$  corresponde al modelo de velocidad operacional de la Ecuación 27,  $tp$  es el tiempo de percepción-reacción en segundos,  $a$  es la desaceleración en la curva obtenida de Vargas (2008) e  $i$  es la pendiente longitudinal.

El  $tp$  considerado fue 2 (s) (MOP, 2012),  $a$  tuvo una distribución normal con media de 0,33 y desviación estándar de 0,058, además  $i=0$  ya que no se consideró pendiente longitudinal.

### 5.2.3 Caracterización oferta despeje lateral, $am\acute{a}x_{sum}$

Del Anexo B punto 3, se extraen los valores de despeje lateral para diferentes radios de curvatura, según M.C.V3. Con ellos, se ajusta una función representativa que describa los valores de diseño para formar la oferta de despeje lateral.

El ajuste entrega la Ecuación 30.

$$am\acute{a}x_{sum} = 3,72 + 0,01 * R \quad \text{Ec. (30)}$$

Donde  $R$  es el radio medido en metros, el  $R^2$  es 0,99 y los estadísticos del ajuste realizado como valores  $p$  y  $t$  se encuentran en el Anexo D, Tabla D2.

### 5.2.4 Función de estado límite para despeje lateral

La función de estado límite  $G$  para la obtención de despejes laterales según confiabilidad, corresponde a la diferencia entre los valores de diseño (oferta) y los determinados por los requerimientos de los usuarios (demanda), quedando definida como:

$$G = am\acute{a}x_{sum} - am\acute{a}x_{req} \quad \text{Ec. (31)}$$

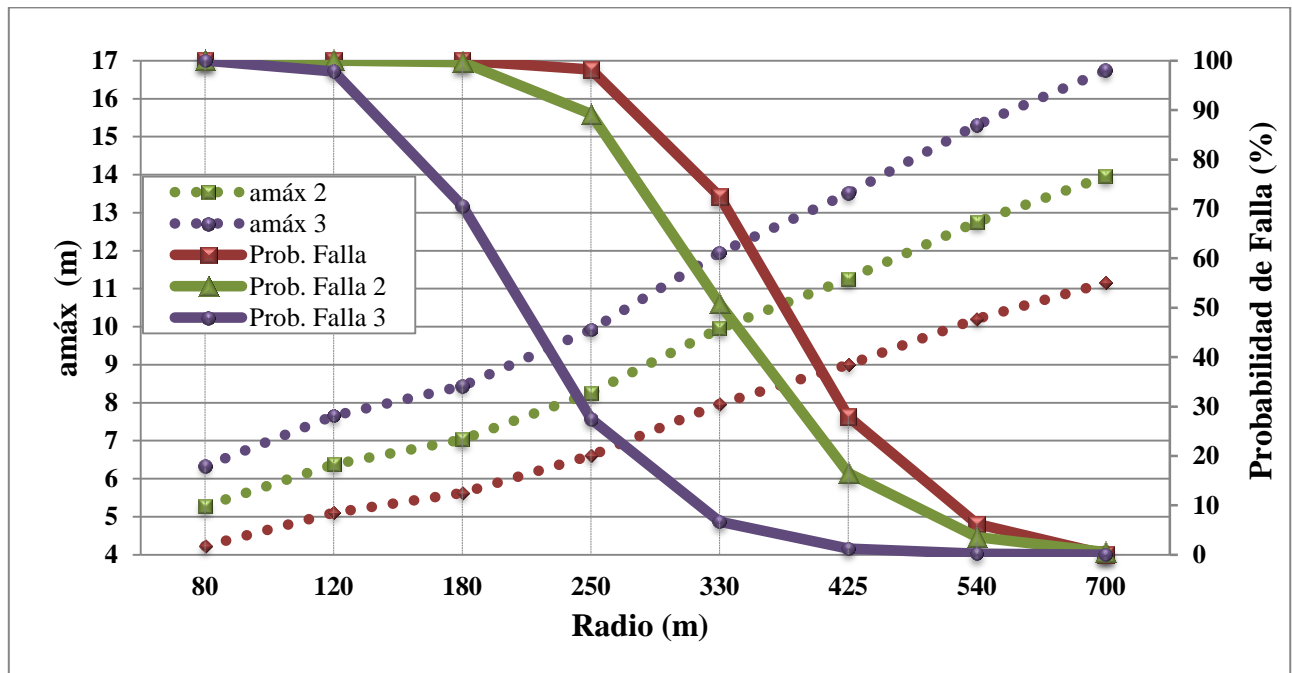
$$G = (3,72 + 0,001 * R) - \left( \frac{\left( \frac{2 * V_{req}}{3,6} \right) + \left( \frac{V_{req}^2}{254 * \frac{a}{g}} \right)^2}{8R} \right) \quad \text{Ec. (32)}$$

### 5.2.5 Análisis de confiabilidad para diseño de despeje lateral

Mediante el método FORM se resuelve la ecuación de estado límite para la selección de despeje lateral. Este análisis entrega la probabilidad de falla, el índice de confiabilidad Hasofer-Lind, el  $amáx_{req}$  y la desaceleración para los puntos de diseño.

#### a) Resultados

La Figura 9 muestra a modo de ejemplo para un mismo radio, distintos  $amáx$  con diferentes probabilidades de falla, respecto del percentil 85 de velocidades demandas. Los restantes parámetros se encuentran en el Anexo D, Tabla D3.



**Figura 9. Probabilidad de falla de amáx para V85.**

#### b) Análisis de resultados

Los resultados conseguidos, muestran al igual que para el cálculo de radio-peralte, que la probabilidad de falla para despeje lateral, aumenta conforme se selecciona un percentil mayor de

demanda, y que en contraste con los valores expuestos por el M.C, las velocidades demandadas en curva son superiores a las de proyecto bajo los 90-100 Km/h.

Por esta razón la demanda por despeje lateral, tiende a ser superior a la ofrecida por los diseños del M.C bajo los 90-100 Km/h de diseño. Y como los conductores demandan velocidades menores a las de proyecto por sobre los 100 Km/h, sus requerimientos de  $a_{m\acute{a}x}$  también serán inferiores.

## **CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En esta memoria, se desarrolló e implementó un procedimiento de diseño, que incorpora distribuciones de probabilidad de velocidades y fricciones demandadas por los conductores en curvas horizontales, a fin de establecer un modelo de comportamiento del mismo. Para ello se introdujo el concepto de confiabilidad, a través de la función de falla aplicable al “sistema” curva horizontal, obteniéndose curvas de diseño para distintos tipos de pavimento y percentiles de demanda.

A continuación, se describen las principales conclusiones de esta memoria, respecto de los objetivos planteados. Además, se incluyen recomendaciones para futuras investigaciones.

### **6.1 Conclusiones**

Se propuso un procedimiento de diseño para la obtención de radios y peraltes, y despeje lateral según niveles de confiabilidad, incorporando la variabilidad de la demanda y oferta de fricción y la demanda y oferta por distancia de visibilidad respectivamente. Este procedimiento, al margen de los estudios hechos a nivel nacional, es original y está basado en la diferencia directa entre la fricción suministrada por el pavimento y lo que demandan los conductores, de acuerdo al análisis radio-peralte. Mientras que para el diseño de despeje lateral, considera la diferencia entre el suministro y requerimiento por distancia de visibilidad, que a su vez depende directamente de las velocidades operacionales de los conductores. De esta manera, se obtiene un método de diseño estocástico, que caracteriza e integra al conductor como un factor variable.

El procedimiento de diseño propuesto permite determinar el margen de seguridad de un diseño, considerando la aleatoriedad de la demanda y oferta de fricción, y de las velocidades operacionales. Cada diseño está asociado a la probabilidad de falla que presente, respecto de las diferencias entre ofertas y demandas, lo cual determina el nivel de confianza y permite asociar el margen de seguridad al índice de confiabilidad  $\beta$ .

La ventaja del procedimiento es permitir el diseño de radio y peraltes, y despeje lateral según la probabilidad de falla asociada. Además el modelo conceptual empleado es aplicable a cualquier zona del país, permitiendo desarrollar el procedimiento propuesto, siempre y cuando las bases de datos de oferta de fricción, se actualicen a las regiones restantes no consideradas en esta memoria. Por ello, la principal desventaja para este procedimiento es la base de datos requerida para calibrar los modelos.

La aplicación del procedimiento en Chile, indica que mientras mayor sea el percentil de velocidades seleccionado para el cálculo de la probabilidad de falla de los diseños, mayor será dicha probabilidad, y que por el contrario, mientras mayores sean los valores de textura y RD que mejoren la oferta de fricción de los pavimentos, esta irá en descenso. También es correcto precisar que mientras mayores sean los radios elegidos, menor será la probabilidad de falla del diseño, ya que la fricción demandada será inferior a la suministrada.

Según los casos de aplicación, se tiene que para un mismo valor de radio de curvatura, la probabilidad de falla disminuye según sea, en orden descendente, un pavimento asfáltico, de hormigón o DTS. Esto, porque las distribuciones de probabilidad de RD y textura, mejoran en cada pavimento y por lo tanto aumenta su oferta de fricción. Por otro lado, las probabilidades de falla serán mayores para un mismo radio de curvatura, si aumenta el percentil de velocidades operacionales seleccionado  $V50 < V85 < V99$ .

El fenómeno es similar para el despeje lateral, donde para una mismo *amáx*, la probabilidad de falla es mayor si se selecciona una mayor demanda por distancia de visibilidad de parada, y menor al aumentar el radio de curvatura. Así, la comparación entre el diseño del M.C y el análisis FORM del presente estudio, permite entrever los márgenes de seguridad.

Los conductores tienden a superar las velocidades de diseño cuando estas están bajo los 90-100 Km/h, lo que se condice con probabilidades de falla mayores para radios menores a 300 m, y por el contrario, para radios sobre 300 m las probabilidades de falla están bajo el 1 %, de acuerdo a los resultados obtenidos para los distintos tipos de pavimento y percentil de velocidades.

En lo que respecta a radios sobre 600 m, se cumple en todos los casos que las probabilidades de falla están bajo el 0,001 %.

El despeje lateral para un radio bajo los 300 m tiene una probabilidad de falla cercana al 100% en todos los casos estudiados y se cumple en radios de 425 m para V50, 540 m para V85 y 700 m para V99 que las probabilidades de falla son menores al 10%.

A diferencia del M.C, el procedimiento propuesto tiene la ventaja de permitir la selección de un radio y peralte, respecto del tipo de pavimento y percentil de velocidades seleccionado, además de considerar la probabilidad de falla asociada a dicho diseño. También, a partir del radio de



diseño, se evalúa el despeje lateral respecto de la probabilidad de falla que presente en función de la distancia de visibilidad de parada y por lo tanto de las velocidades de operación.

## **6.2 Recomendaciones**

- A partir de esta memoria, se recomienda primeramente ampliar la base de datos de RD y Tx a otras regiones del país no consideradas, para evaluar la confiabilidad de manera más precisa. Por esto se entiende, que las condiciones climáticas, modos y especificaciones técnicas de construcción de pavimento son distintas a medida que se recorre el país de norte a sur, y de cordillera a mar.
- Se recomienda también, a partir de esta memoria, proponer una metodología que incorpore la confiabilidad en el diseño de curvas de transición, que permite el desarrollo e incremento gradual, del peralte al interior de la curva y de la aceleración transversal no compensada por el peralte.
- También, y para incorporar enteramente la confiabilidad al diseño geométrico de curvas horizontales, se recomienda evaluar aspectos técnicos y económicos relativos a costos de construcción, operación y mantenimiento en relación a la categoría de la vía. Así, se puede escoger el nivel de confiabilidad, o seguridad, del diseño en relación a los costos asociados a cada alternativa, los que dependerán de la categoría y los niveles de tránsito.

## BIBLIOGRAFÍA

AASHTO, (2004). A policy on geometric design of highways and streets. American association of state highway and transportation officials. Washington DC, USA.

Agudelo O. (2002). Diseño Geométrico de Vías, Universidad nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

Barnett, J. (1938). Transition Curves Highways. United States government printing, Washington DC, USA.

Cárdenas, G. J. (2002). *Diseño geométrico de carreteras*. ECOE Ediciones, Bogotá, Colombia.

Clemente G. (1982). Nueva definición de importancia de fiabilidad de una componente. Cataluña, España. *Revistas y congresos UPC*.

De Solminihac, H; Vargas, S y T. Echaveguren. (2007). Modelación de la demanda de fricción lateral en curvas horizontales, en carreteras chilenas, Santiago, Chile. *Ingeniería de transporte*, Vol. 3, N°1, 25-30.

De Solminihac, H; Echaveguren, T y S. Vargas. (2007). Friction reliability criteria applied to horizontal curve design of low-volume roads, Washington DC, USA. *Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1, N°1989, 138-147.

DG. (2001). Manual de diseño geométrico de carreteras. Dirección general de caminos, Lima, Perú.

Echaveguren, T. (2012). Análisis de consistencia de caminos bidireccionales usando mediciones continuas de velocidad de operación con GPS, Santiago, Chile. *Revista Ingeniería de Construcción*. Vol. 27, N°2, 55-70.

Echaveguren, T; Altamira, L; Vargas, S y D. Riveros. (2009). Criterios para el análisis de consistencia del diseño geométrico: velocidad, aceleración, visibilidad y confiabilidad. Presentado en el XV Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, Buenos Aires, Argentina.

Echaveguren, T; De Solminihac, H; Bustos, M; Chamorro, A y S. Vargas. (2009). Análisis de la oferta de fricción en el tiempo en vías pavimentadas de Chile. Presentado en el XV Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, Buenos Aires, Argentina.

Echaveguren, T; Vargas, S y H. De Solminihac. (2009). Confiabilidad en el diseño geométrico de curvas horizontales. Presentado en el XIV Congreso de Ingeniería de Transporte, Concepción, Chile.

Echaveguren, T; Bustos, M y H. De Solminihac. (2005). Assessment of horizontal curves of an existing road using reliability concepts, Santiago, Chile. *Canadian Journal of Civil Engineering*. Vol. 32, N°6, 1030-1038.

Echaveguren, T y Vargas, S. (2011). Diseño geométrico seguro de curvas horizontales en base a criterios de confiabilidad, Concepción, Chile. *Revista Carreteras*. N° 179, 63-69.

Escobar, L; Villa, E y S. Yáñez. (2003). Confiabilidad: Historia, estado del arte y desafíos futuros, Medellín, Colombia. *Revista Dyna*. N° 140, 5-21.

Felizia, E. (1996). Centrales nucleares: La evaluación probabilística de su seguridad. *Revista Ciencia Hoy*. Vol. 5, N°35.

Haldar, A y Mahadevan, S. (2000). *Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design*. Design John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.

Ibrahim, S y Sayed, T. (2011). Developing safety performance functions incorporating reliability-based risk measures, Amsterdam, Países bajos. *Journal Elsevier, Accident Analysis & Prevention* Vol. 43 N°6, 2153-2159.

INVIAS, (2008). Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. Instituto Nacional de Vías. Colombia.

MOP, (2012). Manual de Carreteras Volumen 3: Instrucciones y Criterios de Diseño. Dirección de Vialidad. Ministerio de Obras Públicas. Chile.

MOP, (2012). Manual de Carreteras Volumen 6: Seguridad Vial. Dirección de Vialidad. Ministerio de Obras Públicas. Chile.

Powers, R; Hall, J; Hall, L y D. Turner. (1998). The Forgiven Roadside Design of Roadside Elements, Washington DC, USA. *U.S National Academy of Sciences Transportation Research Board*.

Richl, L y Sayed, T. (2006). Evaluating the safety risk of narrow medians using reliability analysis, American Society of Civil Engineers. *Journal of transportation engineering*. Vol. 132, 366-375.

Stamatiadis, N. (2005). Context-Sensitive Design: Issues with design elements. *American society of civil engineers*. Vol. 131, 374-378.

Vargas, S. (2008). Definición de umbrales mínimos de resistencia al deslizamiento en pavimentos, en base a un enfoque de demanda y oferta. Tesis doctoral, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Zhimei, R. (1997). Application of reliability theory to highway geometric design. Ph. D thesis, Department of Civil Engineering, University of British Columbia.

## ÍNDICE ANEXOS

Anexo A: Tablas utilizadas del manual de carreteras.....	36
Anexo B: Bases de datos utilizadas para modelar.....	39
Anexo C: Resultados radio de curvatura .....	56
Anexo D: Resultados despeje lateral.....	67

**ANEXO A**

Tablas utilizadas del Manual de Carreteras

## 1. Tablas utilizadas del Manual de Carreteras.

**Tabla A1. Distancias de parada según velocidades de diseño**

V [Km/h]	tp [s]	r	dtp [m]	df [m]	Dp [m]		V [Km/h]
					dtp+df	Adoptada	
<b>30</b>	2	0,420	16,7	8,4	25,1	<b>25</b>	30
<b>35</b>						31	35
<b>40</b>	2	0,415	22,2	15,2	37,4	<b>38</b>	40
<b>45</b>						44	45
<b>50</b>	2	0,410	27,8	24,0	51,8	<b>52</b>	50
<b>55</b>						60	55
<b>60</b>	2	0,400	33,3	35,5	68,8	<b>70</b>	60
<b>65</b>						80	65
<b>70</b>	2	0,380	38,9	50,8	89,7	<b>90</b>	70
<b>75</b>						102	75
<b>80</b>	2	0,360	44,4	70,0	114,4	<b>115</b>	80
<b>85</b>						130	85
<b>90</b>	2	0,340	50,0	93,9	143,9	<b>145</b>	90
<b>95</b>						160	95
<b>100</b>	2	0,330	55,5	119,4	174,9	<b>175</b>	100
<b>105</b>						192	105
<b>110</b>	2	0,320	61,1	149,0	210,1	<b>210</b>	110
<b>115</b>						230	115
<b>120</b>	2	0,310	66,6	183,0	249,6	<b>250</b>	120
<b>125</b>						275	125
<b>130</b>	2	0,295	72,2	225,7	297,9	<b>300</b>	130

Fuente: (MOP, 2012).

**Tabla A2. Radios mínimos absolutos en curvas horizontales**

<b>Caminos Colectores - Locales - Desarrollo</b>			
Vp (km/h)	p máx. (%)	t máx.	Rm (m)
<b>30</b>	7	0,215	25
<b>40</b>	7	0,198	50
<b>50</b>	7	0,182	80
<b>60</b>	7	0,165	120
<b>70</b>	7	0,149	180
<b>80</b>	7	0,132	250

**Tabla A3. Radios mínimos absolutos en curvas horizontales**

<b>Carreteras - Autopistas Autorrutas - Primarios</b>			
<b>V<sub>p</sub> (km/h)</b>	<b>p máx. (%)</b>	<b>t máx.</b>	<b>R<sub>m</sub> (m)</b>
<b>80</b>	8	0,122	250
<b>90</b>	8	0,114	330
<b>100</b>	8	0,105	425
<b>110</b>	8	0,096	540
<b>120</b>	8	0,087	700

Fuente: (MOP, 2012)



**ANEXO B**  
Bases de Datos

1. Demanda de fricción,  $fd$ 

La Tabla B3 muestra el desarrollo de las 55 curvas mencionadas en el punto 5.1.2.

**Tabla B1. Datos calibración y validación modelo demanda agregada de fricción**

<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>
0,161	90,079	1,036	0,159	0,117	79,484	0	0,129	0,227	81,383	1,036	0,211
0,267	99,944	2,326	0,210	0,072	85,350	-0,385	0,060	0,115	72,210	0	0,168
0,135	77,109	0	0,142	0,113	67,780	-0,385	0,155	0,015	68,944	-2,326	-0,026
0,085	69,536	-1,036	0,087	0,025	48,511	-2,326	0,058	0,049	83,310	-0,385	0,072
0,082	88,460	0	0,076	0,296	68,391	1,036	0,280	0,087	71,537	-1,036	0,078
0,226	62,365	0	0,214	0,038	50,053	-2,326	0,053	0,015	95,220	0,385	0,067
0,083	83,218	-0,385	0,073	0,079	47,199	-2,326	0,063	0,092	91,221	0,385	0,093
0,167	102,119	2,326	0,194	0,115	75,437	-0,385	0,116	0,049	83,531	0	0,106
0,119	64,715	-1,036	0,110	0,206	78,816	0,385	0,167	0,387	71,353	1,036	0,265
0,072	69,041	-2,326	-0,026	0,060	86,487	-0,385	0,054	0,339	76,861	1,036	0,237
0,072	54,401	-2,326	0,037	0,204	115,801	2,326	0,090	0,052	63,236	-2,326	0,001
0,057	59,411	-2,326	0,017	0,241	111,878	2,326	0,121	0,198	74,350	0	0,157
0,044	60,889	-1,036	0,127	0,058	80,868	-1,036	0,028	0,094	57,457	-1,036	0,141
0,121	79,758	0	0,127	0,063	67,273	-2,326	-0,018	0,012	57,532	-2,326	0,025
0,079	84,276	0,385	0,136	0,175	108,908	2,326	0,144	0,157	55,989	-1,036	0,147
0,225	56,910	-0,385	0,202	0,141	89,576	0	0,069	0,196	58,345	0,385	0,266
0,277	70,440	0,385	0,211	0,398	88,847	2,326	0,283	0,460	89,144	2,326	0,281
0,052	74,703	-1,036	0,061	0,134	83,984	0	0,103	0,066	67,311	-0,385	0,157
0,065	49,326	-2,326	0,055	0,088	79,967	0	0,126	0,079	94,926	0,385	0,069
0,057	50,863	-2,326	0,050	0,212	76,070	0,385	0,182	0,046	79,693	-1,036	0,034
0,291	76,081	1,036	0,241	0,272	87,691	2,326	0,290	0,315	94,105	2,326	0,249
0,140	79,212	0,385	0,165	0,126	64,794	-1,036	0,110	0,211	74,091	0,385	0,193
0,156	93,100	0,385	0,081	0,077	53,014	-2,326	0,042	0,076	63,046	-1,036	0,118

<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>
0,135	83,558	0,385	0,140	0,161	54,369	-0,385	0,212	0,083	64,649	-1,036	0,110
0,090	80,651	-0,385	0,088	0,212	53,111	-0,385	0,217	0,089	87,981	0,385	0,114
0,125	78,166	-0,385	0,101	0,121	89,836	1,036	0,161	0,092	86,033	0	0,091
0,012	86,892	-0,385	0,051	0,116	41,919	-2,326	0,079	0,037	79,334	-1,036	0,036
0,245	107,609	2,326	0,154	0,043	56,294	-2,326	0,030	0,047	56,814	-2,326	0,028
0,118	49,062	-1,036	0,172	0,164	72,213	0	0,167	0,065	90,222	0,385	0,100
0,446	82,578	2,326	0,321	0,190	63,503	-1,036	0,116	0,084	76,370	-0,385	0,111
0,142	103,419	2,326	0,185	0,057	76,815	-0,385	0,109	0,281	59,083	-0,385	0,193
0,148	81,726	0	0,116	0,020	61,728	-2,326	0,007	0,126	82,646	0	0,111
0,047	61,796	-1,036	0,123	0,140	62,399	-1,036	0,120	0,167	82,768	1,036	0,204
0,246	58,959	-1,036	0,135	0,117	74,712	0	0,155	-0,003	67,749	-2,326	-0,020
0,140	79,182	0,385	0,165	0,144	86,693	0,385	0,122	0,150	70,006	-0,385	0,144
0,407	79,353	2,326	0,339	0,165	85,372	1,036	0,188	0,091	98,739	0,385	0,043
0,019	70,255	-2,326	-0,032	0,405	72,776	1,036	0,258	0,101	65,169	-0,385	0,167
0,300	60,806	0	0,221	0,054	86,902	-0,385	0,051	0,054	75,585	-0,385	0,115
0,147	87,313	1,036	0,176	0,114	61,526	-0,385	0,183	0,161	56,548	-1,036	0,145
0,297	62,114	1,036	0,308	0,134	76,135	0,385	0,182	0,094	73,763	-1,036	0,066
-0,002	71,653	-2,326	-0,039	0,079	39,610	-2,326	0,086	0,077	112,065	2,326	0,120
0,273	82,843	1,036	0,203	0,048	80,932	-1,036	0,027	0,213	79,711	1,036	0,221
0,117	73,309	-0,385	0,127	0,478	75,891	2,326	0,358	0,283	70,927	0,385	0,209
0,114	106,291	1,036	0,048	0,080	82,233	-0,385	0,079	0,061	88,429	0	0,076
0,201	96,065	2,326	0,236	0,116	72,652	-0,385	0,131	0,284	62,554	0	0,213
0,092	69,660	-1,036	0,087	0,015	60,588	-2,326	0,012	0,204	62,123	-0,385	0,180
0,137	113,153	2,326	0,111	0,069	90,508	0	0,063	0,188	72,364	0	0,167
0,235	66,200	0	0,197	0,294	91,998	2,326	0,263	0,125	63,933	0	0,207
0,055	73,768	-1,036	0,066	0,285	74,674	0,385	0,190	0,077	59,188	-1,036	0,134
0,101	74,357	-0,385	0,122	0,147	81,878	1,036	0,209	0,128	82,550	0	0,111
0,172	73,806	0	0,159	0,245	70,143	0	0,178	0,079	81,907	-0,385	0,081

<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>
0,322	75,864	2,326	0,358	0,038	76,671	-1,036	0,051	0,078	94,528	0,385	0,072
0,074	82,805	0,385	0,145	0,174	78,390	0,385	0,170	0,210	75,803	0,385	0,184
0,005	81,198	-1,036	0,026	0,034	116,600	2,326	0,084	0,258	71,646	0	0,170
0,066	105,963	2,326	0,166	0,294	63,508	1,036	0,302	0,132	75,938	0	0,148
0,162	56,905	-1,036	0,143	0,317	71,370	1,036	0,265	0,216	67,062	0	0,193
0,006	80,027	-1,036	0,033	0,043	91,743	0,385	0,090	0,029	70,977	-2,326	-0,036
0,103	69,350	-0,385	0,147	0,153	69,277	0,385	0,217	0,123	112,069	2,326	0,120
0,240	70,074	0,385	0,213	0,163	59,921	-1,036	0,131	0,130	79,853	0,385	0,162
0,040	79,988	-1,036	0,033	0,190	96,251	2,326	0,235	0,113	73,772	-1,036	0,066
0,128	79,317	0	0,130	0,076	97,807	1,036	0,108	0,241	56,091	-0,385	0,205
0,036	87,195	-0,385	0,049	0,174	74,047	0	0,158	0,125	81,862	0	0,115
0,142	81,967	0	0,115	0,130	82,892	1,036	0,203	0,009	87,619	-0,385	0,047
0,094	48,874	-2,326	0,057	0,091	73,612	0,385	0,195	0,074	65,154	-2,326	-0,008
0,174	74,136	0,385	0,192	0,217	77,186	-0,385	0,107	0,012	67,288	-2,326	-0,018
0,160	85,526	0,385	0,129	0,140	89,300	0	0,071	0,063	91,170	1,036	0,152
0,048	56,103	-2,326	0,030	0,281	59,834	0,385	0,259	0,241	95,908	2,326	0,237
0,163	56,907	-1,036	0,143	0,061	88,287	-0,385	0,043	0,155	70,793	-0,385	0,140
0,127	78,763	0,385	0,168	0,241	95,772	2,326	0,238	0,187	74,820	1,036	0,247
0,156	93,270	0,385	0,080	0,227	69,703	0,385	0,215	0,075	64,303	-1,036	0,112
0,114	61,677	-0,385	0,182	0,202	74,935	0,385	0,188	0,247	85,238	1,036	0,189
0,187	57,402	-0,385	0,200	0,077	76,297	-0,385	0,112	0,013	66,612	-2,326	-0,015
0,141	85,514	1,036	0,187	0,012	67,266	-2,326	-0,018	0,030	82,688	-1,036	0,017
0,132	102,214	2,326	0,194	0,137	76,811	0,385	0,178	0,117	80,393	-0,385	0,089
0,144	72,836	-0,385	0,130	0,015	95,578	0	0,030	0,143	44,312	-2,326	0,072
0,083	99,095	1,036	0,100	0,249	64,794	0	0,203	0,130	114,782	2,326	0,098
0,037	64,515	-1,036	0,111	0,094	101,322	1,036	0,084	0,012	91,615	-0,385	0,022
0,102	79,078	-1,036	0,038	0,308	89,267	2,326	0,280	0,196	53,889	-1,036	0,155
0,267	104,910	2,326	0,174	0,403	77,686	2,326	0,348	0,285	71,305	1,036	0,265

<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>
0,154	76,045	1,036	0,241	0,060	69,808	-1,036	0,086	0,137	67,935	-0,385	0,154
0,187	72,270	0	0,167	0,021	54,056	-2,326	0,038	0,091	72,866	-1,036	0,071
0,110	63,191	-1,036	0,117	0,271	73,831	1,036	0,252	0,161	85,766	0,385	0,127
0,123	76,787	0	0,144	0,243	112,244	2,326	0,118	0,233	55,258	0	0,243
0,175	78,534	0,385	0,169	0,114	110,158	2,326	0,135	0,153	68,821	-0,385	0,150
0,104	79,640	-1,036	0,035	0,041	66,528	-0,385	0,160	0,041	54,056	-2,326	0,038
0,115	83,831	0,385	0,139	0,297	60,557	1,036	0,315	0,032	72,927	-1,036	0,071
0,045	92,921	0,385	0,082	0,114	111,690	2,326	0,123	0,364	69,494	2,326	0,390
0,031	83,355	-1,036	0,014	0,106	66,310	-0,385	0,161	0,049	56,446	-2,326	0,029
0,143	86,150	0,385	0,125	0,070	84,660	-0,385	0,064	0,083	85,600	0	0,094
0,120	68,143	-1,036	0,094	0,032	114,363	2,326	0,102	0,041	70,254	-1,036	0,084
0,076	43,696	-2,326	0,074	0,195	65,511	0,385	0,234	0,102	84,206	0	0,102
0,062	53,793	-2,326	0,039	0,162	94,316	2,326	0,248	0,212	84,955	1,036	0,191
0,187	99,386	2,326	0,214	0,082	98,238	1,036	0,106	0,271	58,905	0	0,229
0,132	70,409	0,385	0,211	0,080	84,803	0,385	0,133	0,570	81,710	2,326	0,326
0,194	60,800	-0,385	0,186	0,089	87,865	1,036	0,173	0,048	60,152	-2,326	0,014
0,122	54,732	-1,036	0,152	0,016	61,574	-2,326	0,008	0,078	94,270	0	0,039
0,225	55,705	0	0,241	0,082	88,415	0	0,076	0,115	61,726	-0,385	0,182
0,205	75,006	0,385	0,188	0,051	97,035	1,036	0,114	0,239	54,966	-0,385	0,210
0,186	90,359	1,036	0,158	0,021	65,485	-2,326	-0,009	0,197	50,543	-1,036	0,167
-0,003	68,884	-2,326	-0,025	0,074	57,908	-2,326	0,023	0,030	60,106	-1,036	0,130
0,238	80,198	1,036	0,218	0,257	82,492	1,036	0,205	0,191	87,222	1,036	0,177
0,220	85,003	2,326	0,306	0,478	89,583	2,326	0,278	0,041	81,318	-1,036	0,025
0,092	67,101	-1,036	0,099	0,255	102,333	2,326	0,193	0,116	73,133	-0,385	0,128
0,325	71,017	2,326	0,383	0,006	48,168	-2,326	0,059	0,198	65,903	0	0,198
0,061	61,454	-2,326	0,008	0,062	62,057	-2,326	0,006	0,129	83,219	0,385	0,142
0,090	66,778	-1,036	0,101	0,103	76,417	-1,036	0,052	0,145	81,472	1,036	0,211
0,127	85,882	-0,385	0,057	0,338	93,126	2,326	0,256	0,259	86,246	2,326	0,299

<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>
0,056	87,848	-0,385	0,045	0,214	60,284	0	0,223	0,093	46,459	-2,326	0,065
0,335	65,312	1,036	0,294	0,175	61,532	-1,036	0,124	0,063	91,168	0,385	0,094
0,223	75,734	0,385	0,184	0,178	49,483	-1,036	0,171	0,114	75,517	-0,385	0,116
0,135	88,438	1,036	0,170	0,188	107,244	2,326	0,157	0,033	85,321	-0,385	0,061
0,186	95,419	2,326	0,241	0,016	76,626	-0,385	0,110	0,133	65,477	0	0,200
0,078	58,846	-2,326	0,019	0,066	67,207	-0,385	0,157	0,075	51,602	-2,326	0,047
0,247	97,143	2,326	0,229	0,139	99,678	1,036	0,096	0,206	78,304	2,326	0,345
0,085	99,777	1,036	0,095	0,161	49,295	-1,036	0,172	0,159	69,907	0,385	0,214
0,038	61,508	-2,326	0,008	0,045	118,717	2,326	0,066	0,199	103,076	1,036	0,071
0,166	71,161	0	0,173	0,329	89,971	2,326	0,276	0,141	103,490	2,326	0,185
0,069	93,511	0,385	0,079	0,094	69,168	-1,036	0,089	0,058	40,640	-2,326	0,083
0,039	76,620	-1,036	0,051	0,121	69,508	0	0,181	0,154	70,742	0	0,175
0,128	55,681	-1,036	0,148	0,165	61,216	-1,036	0,126	0,196	59,017	-0,385	0,193
0,094	86,723	0	0,087	0,258	65,713	0,385	0,234	0,219	80,968	1,036	0,214
0,002	52,367	-2,326	0,045	0,055	74,612	0,385	0,190	0,122	50,808	-2,326	0,050
0,128	86,232	-0,385	0,055	0,109	73,498	-0,385	0,126	0,131	78,529	0,385	0,169
0,119	75,769	0	0,149	0,025	46,466	-2,326	0,065	0,061	75,811	-1,036	0,056
0,205	62,444	-0,385	0,179	0,258	80,785	1,036	0,215	0,251	85,842	1,036	0,185
0,179	85,028	1,036	0,190	0,028	63,089	-2,326	0,001	0,083	98,650	1,036	0,103
0,143	86,126	0,385	0,125	0,121	112,499	2,326	0,116	0,088	67,421	-1,036	0,098
0,186	89,481	2,326	0,279	0,036	73,278	-2,326	-0,047	0,234	98,640	2,326	0,219
0,227	76,421	0,385	0,180	0,142	78,503	0,385	0,169	0,162	89,745	2,326	0,277
0,152	53,313	-0,385	0,216	0,184	95,293	2,326	0,242	0,257	82,848	0,385	0,144
0,092	55,082	-2,326	0,034	0,372	97,109	2,326	0,229	0,369	66,788	2,326	0,403
0,138	66,438	0,385	0,230	0,086	102,522	2,326	0,191	0,164	91,177	1,036	0,152
0,171	58,085	-1,036	0,139	0,063	49,448	-2,326	0,055	0,241	106,928	2,326	0,159
0,056	40,322	-2,326	0,084	0,101	69,872	-1,036	0,086	0,231	102,261	2,326	0,193
0,124	53,879	-2,326	0,039	0,153	83,632	1,036	0,198	0,268	88,335	2,326	0,286

<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>
0,169	69,343	-0,385	0,147	0,282	89,043	2,326	0,282	0,055	61,647	-2,326	0,008
0,259	92,380	2,326	0,261	0,061	49,397	-2,326	0,055	0,118	42,296	-2,326	0,078
0,025	68,210	-2,326	-0,022	0,010	88,790	-0,385	0,039	0,102	74,723	-0,385	0,120
0,492	86,209	2,326	0,299	0,069	104,879	2,326	0,174	0,031	106,137	1,036	0,049
0,015	90,692	0	0,062	0,272	67,066	0,385	0,227	0,186	81,802	1,036	0,209
0,128	62,924	-2,326	0,002	0,138	81,748	0,385	0,151	0,183	99,522	1,036	0,097
0,276	70,967	1,036	0,267	0,232	68,619	-0,385	0,151	0,161	89,980	1,036	0,160
0,222	102,801	2,326	0,189	0,129	78,040	0,385	0,172	0,412	88,803	2,326	0,283
0,078	66,270	-2,326	-0,013	0,030	85,047	0,385	0,132	0,194	92,188	1,036	0,146
0,086	72,670	-1,036	0,072	0,294	61,033	1,036	0,313	0,195	50,404	-2,326	0,052
0,207	78,470	2,326	0,344	0,106	108,717	2,326	0,146	0,203	72,746	0	0,165
0,295	97,677	2,326	0,225	0,057	77,042	-1,036	0,049	0,092	56,348	-2,326	0,029
0,148	82,590	0	0,111	0,041	50,200	-2,326	0,052	0,181	71,820	0	0,169
0,071	81,549	-0,385	0,083	0,237	79,790	1,036	0,220	0,075	44,183	-2,326	0,072
0,100	47,642	-2,326	0,061	0,143	67,000	0	0,193	0,042	91,460	1,036	0,151
0,116	80,003	-0,385	0,091	0,118	74,525	0	0,156	0,071	91,523	0	0,057
0,081	71,294	-0,385	0,137	0,115	75,045	-0,385	0,118	0,167	84,611	1,036	0,193
0,129	83,031	0	0,109	0,105	110,960	2,326	0,128	0,270	84,572	1,036	0,193
0,226	62,382	-0,385	0,179	0,080	87,746	0	0,081	0,102	94,192	1,036	0,133
0,216	102,120	2,326	0,194	0,096	92,261	0,385	0,087	0,077	43,256	-2,326	0,075
0,239	99,578	2,326	0,212	0,051	83,410	-0,385	0,072	0,061	103,195	2,326	0,187
0,464	74,979	2,326	0,363	0,200	59,465	-0,385	0,192	0,397	70,092	2,326	0,387
0,396	68,988	1,036	0,277	0,032	67,117	-2,326	-0,017	0,155	84,644	1,036	0,193
0,018	93,746	0	0,042	0,102	72,101	-1,036	0,075	0,475	93,086	2,326	0,256
0,095	68,596	-1,036	0,092	0,072	94,700	0,385	0,071	0,220	64,030	0	0,207
0,102	64,624	-0,385	0,169	0,293	75,484	1,036	0,244	0,088	90,142	0,385	0,100
0,235	63,266	0	0,210	0,020	61,140	-2,326	0,010	0,123	85,913	1,036	0,185
0,112	75,053	-0,385	0,118	0,079	60,189	-1,036	0,130	0,160	75,297	1,036	0,245

<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>
0,148	79,223	0,385	0,165	0,067	80,547	0	0,123	0,190	75,699	1,036	0,243
0,123	81,333	1,036	0,212	0,084	61,359	-1,036	0,125	0,273	67,205	0,385	0,227
0,046	69,795	-0,385	0,145	0,228	104,286	2,326	0,179	0,054	59,361	-2,326	0,017
0,098	74,597	-0,385	0,121	0,142	85,340	1,036	0,188	0,374	86,420	2,326	0,298
0,062	87,354	-0,385	0,048	0,179	88,161	1,036	0,171	0,157	81,402	0,385	0,153
0,267	59,594	0	0,226	0,110	71,071	-0,385	0,139	0,031	51,581	-2,326	0,048
0,185	75,401	0,385	0,186	0,100	70,749	-0,385	0,140	0,190	91,540	1,036	0,150
0,060	70,097	-1,036	0,085	0,294	87,632	1,036	0,175	0,090	80,391	-0,385	0,089
0,090	68,048	-1,036	0,095	0,069	81,323	1,036	0,212	0,039	89,470	0	0,070
0,134	83,657	0,385	0,140	0,059	81,300	-1,036	0,025	0,189	58,307	-1,036	0,138
0,047	70,328	0	0,177	0,068	44,953	-2,326	0,070	0,063	70,844	-1,036	0,081
0,066	90,210	0	0,065	0,113	60,939	-1,036	0,127	0,131	64,637	-1,036	0,110
0,134	79,702	-0,385	0,093	0,122	81,393	-0,385	0,083	0,123	80,310	0,385	0,159
0,051	56,374	-2,326	0,029	0,092	74,281	-1,036	0,064	0,029	57,814	-2,326	0,024
0,140	62,459	-1,036	0,120	0,154	74,733	0	0,155	0,139	102,915	2,326	0,189
0,246	66,875	0,385	0,228	0,104	59,180	-1,036	0,134	0,187	72,175	0	0,168
0,065	79,410	1,036	0,223	0,114	79,295	-0,385	0,095	0,339	80,365	1,036	0,217
0,097	71,744	-1,036	0,077	0,252	102,181	2,326	0,194	0,128	96,688	1,036	0,116
0,137	72,706	0,385	0,200	0,033	54,274	-2,326	0,038	0,026	35,226	-2,326	0,097
0,334	79,789	1,036	0,220	0,128	64,093	-0,385	0,172	0,134	70,933	-0,385	0,139
0,009	66,178	-2,326	-0,013	0,012	87,518	-0,385	0,047	0,049	95,584	1,036	0,124
0,248	79,418	1,036	0,223	0,373	97,294	2,326	0,228	0,219	102,702	2,326	0,190
0,154	80,910	0,385	0,156	0,166	72,106	0	0,168	0,073	85,609	-0,385	0,059
0,244	58,754	-0,385	0,195	0,280	70,861	1,036	0,268	0,217	63,647	0	0,208
0,339	97,960	2,326	0,224	0,062	64,747	-2,326	-0,006	0,068	80,550	1,036	0,216
0,112	77,333	0	0,141	0,145	105,356	2,326	0,171	0,329	75,541	2,326	0,360
-0,004	68,476	-2,326	-0,023	0,048	59,023	-2,326	0,019	0,074	63,873	-2,326	-0,002
0,148	73,210	0,385	0,197	0,056	87,331	0,385	0,118	0,067	61,747	-2,326	0,007



<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>
0,071	62,964	-2,326	0,002	0,340	81,485	2,326	0,327	0,091	69,096	-1,036	0,090
0,242	66,639	0	0,195	0,088	66,888	-1,036	0,100	0,204	78,293	1,036	0,229
0,096	100,431	1,036	0,090	0,129	71,064	0,385	0,208	0,052	57,947	-2,326	0,023
0,069	72,410	-1,036	0,073	0,050	71,773	0	0,170	0,216	92,028	2,326	0,263
0,095	79,162	0	0,131	0,137	79,390	0	0,129	0,055	74,128	0,385	0,192
0,047	82,048	0	0,114	0,169	83,116	1,036	0,201	0,188	74,962	0,385	0,188
0,266	100,053	2,326	0,209	0,068	80,475	0	0,123	0,155	83,190	0,385	0,142
0,110	74,256	-0,385	0,122	0,277	60,433	0,385	0,257	0,183	75,016	0	0,153
0,171	89,539	1,036	0,163	0,065	79,810	0	0,127	0,185	95,423	2,326	0,241
0,354	66,256	1,036	0,290	0,158	71,317	0	0,172	0,138	94,470	1,036	0,131
0,156	80,800	0,385	0,156	0,267	69,158	1,036	0,276	0,019	57,087	-2,326	0,027
0,243	96,070	2,326	0,236	0,047	56,724	-2,326	0,028	0,043	92,161	1,036	0,146
0,196	61,044	-0,385	0,185	0,076	49,677	-2,326	0,054	0,272	88,421	2,326	0,286
0,180	93,413	2,326	0,254	0,041	56,914	-2,326	0,027	0,062	65,983	-1,036	0,104
0,113	111,372	2,326	0,125	0,133	79,338	0,385	0,164	0,028	103,876	1,036	0,066
0,113	78,950	-0,385	0,097	0,158	86,551	1,036	0,181	0,129	66,462	-0,385	0,161
0,283	70,900	1,036	0,267	0,052	61,041	-2,326	0,010	0,176	108,976	2,326	0,144
0,018	63,518	-2,326	-0,001	0,051	53,352	-2,326	0,041	0,005	69,896	-1,036	0,086
0,117	67,517	0	0,190	0,364	78,875	2,326	0,342	0,216	96,293	2,326	0,235
0,112	50,110	-2,326	0,053	0,105	92,591	1,036	0,143	0,153	64,707	-1,036	0,110
0,250	100,883	2,326	0,203	0,075	64,051	-1,036	0,113	0,258	103,455	2,326	0,185
0,094	74,438	0	0,156	0,166	83,040	1,036	0,202	0,129	52,519	-2,326	0,044
0,147	83,908	1,036	0,197	0,340	73,487	1,036	0,254	0,117	63,736	-1,036	0,115
0,185	86,682	1,036	0,180	0,205	102,974	2,326	0,188	0,112	66,556	-0,385	0,160
0,178	94,206	1,036	0,133	0,239	69,968	0,385	0,213	0,067	80,194	0	0,125
0,313	65,156	0	0,201	0,204	62,400	-0,385	0,179	0,194	81,833	1,036	0,209
0,058	42,960	-2,326	0,076	0,124	80,569	0,385	0,157	0,107	75,958	-0,385	0,113
0,177	58,901	-1,036	0,135	0,089	69,015	-1,036	0,090	0,225	95,308	2,326	0,241

<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>
0,081	69,597	-1,036	0,087	0,237	80,017	0	0,126	0,220	94,381	2,326	0,248
0,101	76,585	-1,036	0,051	0,317	90,626	2,326	0,272	0,006	80,470	-1,036	0,030
0,007	84,919	-1,036	0,004	0,068	52,073	-2,326	0,046	0,134	84,339	0	0,101
0,068	93,753	1,036	0,136	-0,004	65,933	-2,326	-0,012	0,021	75,745	-2,326	-0,060
0,027	59,895	-2,326	0,015	0,015	65,517	-2,326	-0,010	0,114	49,636	-2,326	0,054
0,186	79,632	1,036	0,221	0,230	61,969	0,385	0,250	0,104	89,833	0,385	0,102
0,144	115,310	2,326	0,094	0,202	72,621	0	0,165	0,117	72,858	-0,385	0,130
0,051	82,369	-1,036	0,019	0,262	72,059	0,385	0,203	0,316	71,280	1,036	0,265
0,165	95,362	0,385	0,066	0,146	45,812	-1,036	0,183	0,101	70,724	-0,385	0,140
0,137	77,000	0	0,142	0,222	68,984	0	0,183	0,020	70,590	-2,326	-0,034
0,047	93,987	1,036	0,134	-0,005	65,186	-2,326	-0,008	0,320	62,567	0,385	0,248
0,012	47,384	-2,326	0,062	0,021	66,233	-2,326	-0,013	0,111	79,092	-0,385	0,096
0,050	78,238	-1,036	0,042	0,264	57,411	0,385	0,269	0,214	54,658	-0,385	0,211
0,056	59,999	-2,326	0,015	0,136	84,900	0,385	0,132	0,190	60,578	-0,385	0,187
0,062	42,916	-2,326	0,076	0,129	83,095	0	0,108	0,127	96,255	1,036	0,119
0,133	76,156	0	0,147	0,042	59,949	-2,326	0,015	0,182	91,942	2,326	0,264
0,135	64,128	-1,036	0,113	0,119	111,958	2,326	0,121	0,095	89,651	0,385	0,103
0,186	89,612	1,036	0,162	0,036	51,927	-2,326	0,046	0,043	71,754	-1,036	0,077
0,369	79,768	2,326	0,337	0,340	67,460	0,385	0,225	0,165	78,110	1,036	0,230
0,521	78,977	2,326	0,341	0,239	100,027	2,326	0,209	0,157	58,959	-1,036	0,135
0,028	83,766	0	0,104	0,103	51,548	-2,326	0,048	0,141	86,060	0,385	0,125
0,100	83,636	0,385	0,140	0,189	76,094	0	0,147	0,078	70,410	0	0,176
0,105	81,672	0,385	0,151	0,244	70,033	0	0,178	0,184	94,055	2,326	0,250
0,049	56,242	-2,326	0,030	0,097	74,885	-1,036	0,060	0,148	57,797	-2,326	0,024
0,096	74,911	0,385	0,188	0,049	59,693	-2,326	0,016	0,012	91,419	0	0,057
0,201	83,083	1,036	0,202	0,224	78,150	0,385	0,171	0,040	64,007	-2,326	-0,003
-0,013	56,477	-2,326	0,029	0,011	73,544	-1,036	0,067	0,032	73,309	-1,036	0,069
0,116	76,064	-0,385	0,113	0,073	42,882	-2,326	0,076	0,150	83,038	0,385	0,143

<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>
0,301	61,718	0,385	0,251	0,200	66,096	-0,385	0,162	0,188	107,395	2,326	0,156
0,285	76,752	1,036	0,237	0,113	77,646	0	0,139	0,135	55,638	-1,036	0,148
0,171	62,103	-0,385	0,180	0,268	70,000	0,385	0,213	0,113	79,024	1,036	0,225
0,053	60,478	-2,326	0,013	0,111	82,911	0,385	0,144	0,036	87,196	-0,385	0,049
0,378	68,220	2,326	0,396	0,152	74,459	0	0,156	0,174	87,304	2,326	0,293
0,143	85,508	1,036	0,187	0,050	51,790	-2,326	0,047	0,057	76,747	-0,385	0,109
0,081	69,635	-1,036	0,087	0,250	91,010	2,326	0,269	0,493	90,071	2,326	0,275
0,037	56,114	-2,326	0,030	0,062	66,171	-2,326	-0,013	0,189	87,331	1,036	0,176
0,100	78,518	-1,036	0,041	0,007	81,355	-1,036	0,025	0,181	75,001	0,385	0,188
0,060	89,556	0	0,069	0,236	106,039	2,326	0,166	0,196	92,140	2,326	0,262
0,174	93,333	1,036	0,138	0,127	69,410	0	0,181	0,172	73,549	0,385	0,195
0,142	81,966	0	0,115	0,376	85,249	2,326	0,305	0,068	66,557	-2,326	-0,014
0,146	78,671	0,385	0,168	0,195	97,322	2,326	0,228	0,067	91,447	0,385	0,092
0,051	60,814	-2,326	0,011	0,087	100,489	1,036	0,090	0,097	70,998	-1,036	0,080
0,185	72,402	-1,036	0,073	0,044	81,799	-1,036	0,023	0,115	88,252	0,385	0,112
0,111	72,821	-0,385	0,130	0,315	93,206	2,326	0,255	0,080	85,016	0	0,097
0,037	119,504	2,326	0,060	0,196	77,607	0,385	0,174	0,093	91,783	2,326	0,265
0,440	89,924	2,326	0,276	0,184	95,306	2,326	0,241	0,005	69,511	-1,036	0,088
0,144	83,118	0,385	0,143	0,085	76,652	-0,385	0,110	0,111	74,139	-0,385	0,123
0,182	89,459	1,036	0,163	0,237	62,596	1,036	0,306	0,068	52,215	-2,326	0,045
0,040	89,862	0	0,067	0,032	50,784	-2,326	0,050	0,073	106,257	2,326	0,164
0,153	88,707	1,036	0,168	0,241	66,494	0,385	0,230	0,014	51,075	-2,326	0,049
0,151	75,381	0,385	0,186	0,214	63,327	-0,385	0,175	0,084	67,718	-1,036	0,096
0,129	82,439	0,385	0,147	0,179	85,093	1,036	0,190	0,183	99,512	1,036	0,097
0,203	65,396	-0,385	0,166	0,148	53,360	-1,036	0,157	0,097	79,641	0	0,128
0,083	40,112	-2,326	0,084	0,162	49,372	-1,036	0,171	0,145	53,044	-1,036	0,158
0,014	89,139	-0,385	0,037	0,118	79,857	0	0,127	0,168	72,470	-0,385	0,132
0,121	97,892	2,326	0,224	0,113	74,822	-1,036	0,061	0,031	71,475	-2,326	-0,038

<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>
0,348	77,349	1,036	0,234	0,125	75,152	-0,385	0,118	0,207	65,859	0	0,198
0,110	91,539	0,385	0,091	0,053	85,440	0,385	0,129	0,013	92,742	0	0,049
0,248	67,127	0	0,192	0,136	78,325	0,385	0,170	0,134	78,769	-0,385	0,098
0,106	76,530	-0,385	0,110	0,128	114,097	2,326	0,104	0,104	76,057	-0,385	0,113
0,219	84,981	2,326	0,307	0,128	74,871	0	0,154	0,251	56,172	-1,036	0,146
0,173	93,317	1,036	0,138	0,108	78,374	-0,385	0,100	0,239	95,605	2,326	0,239
0,082	60,906	-1,036	0,127	0,335	90,789	2,326	0,271	0,138	71,718	-0,385	0,135
0,107	77,581	0,385	0,174	0,282	75,164	1,036	0,246	0,166	121,252	2,326	0,045
0,349	78,700	2,326	0,343	0,110	77,556	0	0,139	0,146	69,426	-0,385	0,147
0,159	75,613	0	0,150	0,248	84,552	2,326	0,309	0,057	86,550	0	0,088
0,039	76,674	-1,036	0,051	0,262	60,487	0,385	0,257	0,125	65,294	-1,036	0,108
0,280	76,125	1,036	0,240	0,079	94,954	0,385	0,069	0,146	90,797	0	0,061
0,062	49,860	-2,326	0,054	0,233	70,448	1,036	0,270	0,049	121,559	2,326	0,042
0,071	61,652	-1,036	0,124	0,039	113,636	2,326	0,107	0,131	71,581	0	0,171
0,119	63,244	-1,036	0,117	0,129	75,818	0	0,149	0,211	79,718	0,385	0,162
0,058	48,218	-2,326	0,059	0,038	54,996	-2,326	0,035	0,092	67,284	-1,036	0,098
0,577	82,537	2,326	0,321	0,045	82,249	-1,036	0,020	0,090	72,873	-1,036	0,071
0,356	95,213	2,326	0,242	0,178	68,820	-0,385	0,150	0,240	105,836	2,326	0,167
0,134	78,675	0,385	0,168	0,221	67,682	0	0,190	0,032	64,830	-2,326	-0,006
0,127	78,906	0	0,132	0,119	73,081	0	0,163	0,019	94,493	0,385	0,072
0,033	47,319	-2,326	0,062	0,319	62,529	0,385	0,248	0,327	66,354	0,385	0,231
0,121	80,514	0,385	0,158	0,118	80,184	-0,385	0,090	0,084	76,230	-0,385	0,112
0,071	82,052	-0,385	0,080	0,094	86,869	0	0,086	0,115	68,117	0	0,188
0,156	55,978	-1,036	0,147	0,146	87,284	0,385	0,118	0,018	73,761	-2,326	-0,050
0,173	70,550	-0,385	0,141	0,072	92,127	0	0,053	0,098	90,769	1,036	0,155
0,058	59,609	-2,326	0,016	0,126	64,082	0	0,206	0,161	71,216	-0,385	0,138
0,036	64,135	-1,036	0,113	0,316	80,227	2,326	0,334	0,191	70,938	0	0,174
0,181	52,332	-1,036	0,161	0,245	71,872	0,385	0,204	0,167	68,925	-0,385	0,149

<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>
0,243	58,698	0	0,229	0,073	65,923	-1,036	0,105	0,250	81,613	1,036	0,210
0,223	64,754	0	0,203	0,085	55,255	-1,036	0,150	0,105	92,990	1,036	0,141
0,125	76,016	0	0,148	0,178	84,774	1,036	0,192	0,200	53,322	-0,385	0,216
0,086	51,906	-2,326	0,046	0,160	70,410	1,036	0,270	0,242	63,166	0,385	0,245
0,307	93,692	2,326	0,252	0,082	35,823	-2,326	0,096	0,255	57,405	0,385	0,269
0,174	62,590	0	0,213	0,069	92,229	0,385	0,087	0,109	95,963	1,036	0,121
0,035	87,566	0,385	0,116	0,141	64,559	-1,036	0,111	0,175	74,063	0,385	0,193
0,162	68,705	-0,385	0,150	0,178	62,059	-0,385	0,181	0,227	68,006	-0,385	0,153
0,488	79,066	2,326	0,341	0,064	91,274	0	0,058	0,167	77,200	0,385	0,176
0,098	68,284	-0,385	0,152	0,219	80,484	1,036	0,217	0,099	54,702	-2,326	0,036
0,252	97,815	2,326	0,225	0,224	64,492	0	0,204	0,103	64,512	-1,036	0,111
0,169	92,234	1,036	0,146	0,174	93,114	1,036	0,140	0,116	63,585	-1,036	0,115
0,029	84,686	0,385	0,134	0,193	64,049	-0,385	0,172	0,041	50,322	-2,326	0,052
0,084	69,326	-1,036	0,089	0,167	71,297	0	0,172	0,138	66,341	0,385	0,231
0,206	77,957	1,036	0,231	0,126	76,164	0	0,147	0,095	106,475	2,326	0,163
0,168	92,261	1,036	0,145	0,036	48,637	-2,326	0,058	0,096	57,746	-1,036	0,140
0,270	92,353	2,326	0,261	0,107	90,519	0,385	0,098	0,032	50,556	-2,326	0,051
0,019	64,383	-2,326	-0,004	0,070	55,383	-2,326	0,033	0,175	58,541	-1,036	0,137
0,036	42,533	-2,326	0,077	0,375	95,564	2,326	0,240	0,132	79,237	0	0,130
0,079	59,736	-1,036	0,132	0,229	82,799	1,036	0,203	0,054	84,628	-0,385	0,065
0,071	74,230	-1,036	0,064	0,141	78,277	0	0,136	0,022	80,678	0	0,122
0,070	51,406	-2,326	0,048	0,312	63,394	0,385	0,244	0,050	82,878	-0,385	0,075
0,112	75,283	0	0,152	0,119	98,682	1,036	0,102	0,212	101,316	2,326	0,200
0,124	50,235	-2,326	0,052	0,023	80,836	0	0,121	0,164	68,470	-0,385	0,151
0,226	55,794	-0,385	0,206	0,063	88,120	-0,385	0,044	0,093	60,040	-1,036	0,131
0,134	66,345	-1,036	0,103	0,151	70,262	0	0,177	0,380	80,835	2,326	0,331
0,117	53,368	-2,326	0,041	0,041	78,657	-0,385	0,099	0,077	54,213	-2,326	0,038
0,021	96,385	0,385	0,060	0,194	77,301	0,385	0,176	0,074	106,709	2,326	0,161

<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>
0,090	62,127	-1,036	0,122	0,115	88,022	0,385	0,114	0,133	63,114	-1,036	0,117
0,061	66,356	-2,326	-0,013	0,070	91,154	0	0,059	0,150	87,785	0,385	0,115
0,242	67,064	0,385	0,227	0,287	62,852	-0,385	0,177	0,092	41,318	-2,326	0,081
0,019	99,541	0,385	0,038	0,166	110,060	2,326	0,135	0,168	84,746	1,036	0,192
0,126	69,177	0	0,183	0,098	71,262	-1,036	0,079	0,147	81,740	0,385	0,151
0,199	64,581	-1,036	0,111	0,142	68,499	-0,385	0,151	0,082	70,391	-1,036	0,083
0,171	51,246	-2,326	0,049	0,292	68,037	1,036	0,281	0,020	101,641	1,036	0,082
-0,007	60,822	-2,326	0,011	0,204	78,899	1,036	0,225	0,056	86,409	-0,385	0,054
0,018	63,167	-2,326	0,001	0,056	87,239	0	0,084	0,278	58,767	0	0,229
0,145	67,361	-0,385	0,157	0,128	77,939	0	0,137	0,117	96,497	1,036	0,117
0,165	84,280	1,036	0,195	0,045	68,933	-0,385	0,149	0,102	102,455	1,036	0,076
0,035	67,796	-1,036	0,096	0,171	67,786	-0,385	0,154	0,058	76,044	0,385	0,182
0,131	63,441	-1,036	0,116	0,264	94,524	2,326	0,247	0,097	93,271	2,326	0,255
0,039	89,121	0	0,072	0,067	42,152	-2,326	0,078	0,225	64,922	0,385	0,237
0,065	89,801	-0,385	0,033	0,042	78,207	-1,036	0,043	0,173	55,829	0	0,241
0,119	73,200	-0,385	0,128	0,099	80,030	0	0,126	0,275	118,357	2,326	0,069
0,037	61,168	-2,326	0,010	0,162	85,478	0,385	0,129	0,339	97,975	2,326	0,223
0,327	76,422	1,036	0,239	0,183	69,757	-0,385	0,145	0,023	98,353	0,385	0,046
0,098	90,697	1,036	0,155	0,227	88,817	2,326	0,283	0,058	36,650	-2,326	0,094
0,072	54,300	-2,326	0,037	0,103	84,452	0	0,100	0,022	103,371	1,036	0,069
0,162	84,683	0,385	0,134	0,217	63,705	0	0,208	0,142	47,902	-2,326	0,060
-0,014	55,415	-2,326	0,033	0,027	55,462	-2,326	0,033	0,204	62,110	-0,385	0,180
0,025	106,237	1,036	0,048	0,203	52,234	-0,385	0,220	0,237	65,936	0,385	0,233
0,353	65,441	1,036	0,293	0,094	101,376	1,036	0,084	0,154	59,669	-0,385	0,191
0,145	86,895	0,385	0,120	0,210	85,912	2,326	0,301	0,078	96,426	1,036	0,118
0,120	75,590	-0,385	0,115	0,166	49,778	-1,036	0,170	0,052	72,919	0	0,164
0,070	73,943	-1,036	0,065	0,107	65,610	-0,385	0,165	0,061	90,206	0	0,065
0,150	87,431	1,036	0,176	0,238	97,468	2,326	0,227	0,081	71,111	0	0,173

<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>	<b>Fricción</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Zp</b>	<b>Fricción Modelo</b>
0,140	71,799	0,385	0,204	0,127	62,048	-1,036	0,122	0,086	88,915	2,326	0,283
0,159	108,020	2,326	0,151	0,038	54,166	-2,326	0,038	0,125	85,500	-0,385	0,059
0,005	82,113	-1,036	0,021	0,015	57,645	-2,326	0,024	0,147	68,811	-0,385	0,150
0,025	78,899	-1,036	0,039	0,011	57,603	-2,326	0,024	0,126	78,407	-0,385	0,100
0,022	54,630	-2,326	0,036	0,278	73,943	0,385	0,193	0,082	95,967	0,385	0,062
0,213	66,343	-0,385	0,161	0,210	62,839	-0,385	0,177	0,245	57,545	0	0,234
0,055	99,343	1,036	0,098	0,025	100,914	1,036	0,087	0,056	33,090	-2,326	0,102
0,127	82,892	0	0,110	0,021	79,965	-0,385	0,092	0,165	76,228	1,036	0,240
0,099	72,393	-1,036	0,073	0,108	77,597	-0,385	0,105	0,581	85,497	2,326	0,304
0,043	79,731	-0,385	0,093	0,207	62,750	0	0,212	0,109	47,947	-1,036	0,176
0,085	69,784	-1,036	0,086	0,240	66,366	0,385	0,231	0,115	67,085	-1,036	0,099
0,143	90,252	1,036	0,158	0,016	91,952	0	0,054	0,118	80,797	0	0,122
0,121	77,453	0	0,140	0,251	58,088	0,385	0,267	0,179	48,545	-1,036	0,174
0,160	56,418	-1,036	0,145	0,186	89,679	1,036	0,162	0,393	69,816	1,036	0,273
0,255	68,593	1,036	0,279	0,138	94,673	1,036	0,130	0,424	71,209	2,326	0,382
0,077	94,010	0,385	0,075	0,359	82,269	2,326	0,322	0,040	70,325	-1,036	0,084
0,093	100,677	1,036	0,089	0,194	58,169	0	0,232	0,016	96,694	0,385	0,057
0,446	81,113	2,326	0,329	0,195	51,337	-1,036	0,164	0,169	111,404	2,326	0,125
0,043	82,059	-1,036	0,021	0,245	55,550	0	0,242	0,330	96,750	2,326	0,232
0,059	87,429	0	0,082	0,057	76,675	-0,385	0,110	0,069	93,356	0,385	0,080
0,097	71,803	-0,385	0,135	0,051	85,755	-0,385	0,058	0,241	56,034	0	0,240
0,238	84,028	1,036	0,196	0,044	92,528	0,385	0,085	0,064	77,050	-1,036	0,049
0,112	73,147	-0,385	0,128	0,078	84,347	0,385	0,136	0,145	52,531	-1,036	0,160
0,016	76,669	-0,385	0,110	0,356	66,472	1,036	0,289	0,226	53,689	-0,385	0,214
0,121	76,797	0	0,144	0,093	69,961	-1,036	0,085	0,160	70,418	1,036	0,270
0,150	79,455	0,385	0,164	0,236	69,660	0,385	0,215	0,181	73,773	0,385	0,194

## 2. Oferta de fricción, $f_s$

Para construir la función de oferta de fricción de acuerdo al modelo PIARC, se requiere de la RD y textura medidos en los pavimentos de asfalto, hormigón y DTS. Estos datos fueron incorporados como distribuciones de probabilidad en la función de estado límite para la obtención de radios y peraltes.

La Tabla B2 muestra las distribuciones de probabilidad de los pavimentos antes mencionados según las mediciones realizadas en las cuatro estaciones del año.

**Tabla B2. Distribuciones de probabilidad de RD por tipo de pavimento y estación del año**

Superficie	RD	2006		2007	
		Invierno	Primavera	Verano	Otoño
Asfalto	Media	58	50	48	53
	Desv. Est.	9,7	7,7	7,6	7,4
Hormigón	Media	52	51	43	53
	Desv. Est.	8,0	8,7	6,6	7,0
DTS	Media	65	56	51	56
	Desv. Est.	7,7	7,2	6,6	8,3

La Tabla B3 resume los valores de textura por tipo de pavimento, determinados por el estudio de análisis de oferta de fricción en vías pavimentadas en Chile.

**Tabla B3. Distribuciones RD y texturas según tipo de pavimento**

Tipo Pavimento	RD %		Textura [mm]	
	Media	Desv. St	Media	Desv. St
Asfalto	52,5	9,5	0,4	0,1
Hormigón	49,1	8,6	0,8	0,1
DTS	56,4	8,6	1,5	0,3



### 3. Oferta Despeje Lateral, $amáx_{sum}$

Se calcula el despeje lateral asociado a cada radio por medio de la ecuación de diseño, al que se le ajusta posteriormente una función descriptiva.

**Tabla B4.  $Amáx_{sum}$**

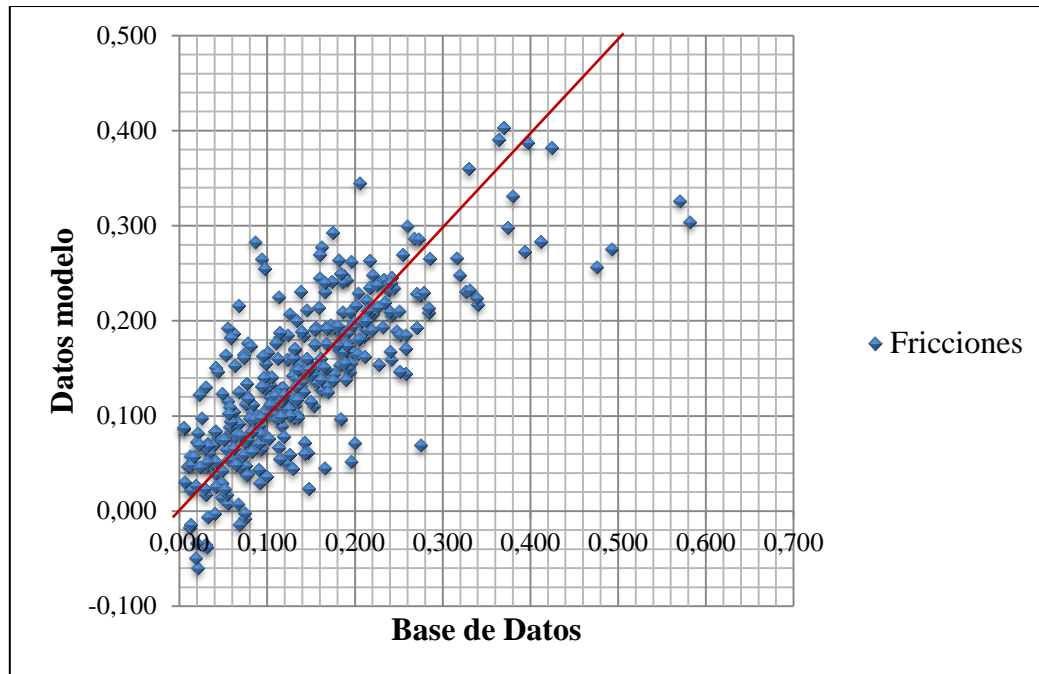
<b>Radio</b>	<b><math>Amáx</math></b>
80	4,23
120	5,10
180	5,63
250	6,61
330	7,96
425	9,01
540	10,21
700	11,16

**ANEXO C**

Resultados para radio de curvatura

1. Modelo demanda agregada de fricción, *fda***Tabla C1. Estadísticos de modelo de demanda agregada de fricción.**

	<b>T</b>	<b>P-valor</b>
<b>Constante</b>	49,78	<0,0001
<b>Zp</b>	45,85	<0,0001
<b>Velocidad</b>	-30,59	<0,0001

**Figura C1. Validación modelo de demanda agregada, *fda***

## 2. Resultados radio de curvatura

**Tabla C2. Resultados confiabilidad radio-peralte para Asfalto y P50 de demanda**

<b>Radio</b>	<b>Peralte</b>	<b>Velocidad deslizamiento</b>	<b>P (G&lt;0) %</b>	<b>HL</b>	<b>RD</b>	<b>Tx</b>	<b>Margen de Seguridad, MS</b>
50	0,07	46,712	0,525000	2,56	0,29	0,36	0,000
100	0,07	60,767	0,406000	2,65	0,29	0,30	0,000
150	0,07	69,285	0,192000	2,89	0,33	0,20	0,000
200	0,07	75,149	0,108000	3,07	0,40	0,12	0,000
250	0,07	80,415	0,064000	3,22	0,43	0	-0,055
300	0,08	83,790	0,033100	3,41	0,45	0	-0,040
350	0,08	86,479	0,019400	3,55	0,47	0	-0,030
400	0,08	88,675	0,011600	3,68	0,48	0	-0,021
450	0,08	90,503	0,007090	3,80	0,48	0	-0,013
500	0,08	92,050	0,004410	3,92	0,49	0	-0,005
550	0,08	93,377	0,002720	4,04	0,49	0	0,001
600	0,08	94,527	0,001710	4,14	0,50	0	0,007
650	0,08	95,534	0,001090	4,25	0,50	0	0,012
700	0,08	96,424	0,000651	4,36	0,51	0	0,017

**Tabla C3. Resultados confiabilidad radio-peralte para hormigón y P50 de demanda**

<b>Radio</b>	<b>Peralte</b>	<b>Velocidad deslizamiento</b>	<b>P (G&lt;0) %</b>	<b>HL</b>	<b>RD</b>	<b>Tx</b>	<b>Margen de Seguridad, MS</b>
50	0,07	46,712	0,253	2,8	0,25	0,786	0,000
100	0,07	60,767	0,056	3,26	0,212	0,772	0,000
150	0,07	69,285	0,010	3,73	0,172	0,765	0,000
200	0,07	75,149	0,002	4,16	0,135	0,763	0,000
250	0,07	80,415	2,87E-04	4,54	0,102	0,763	0,000
300	0,08	83,79	3,37E-05	4,97	0	0,767	0,000
350	0,08	86,479	6,89E-06	5,27	0	0,771	0,000
400	0,08	88,675	1,59E-06	5,53	0	0,777	0,000
450	0,08	90,503	4,20E-07	5,76	0	0,782	0,000
500	0,08	92,05	1,24E-07	5,96	0	0,788	0,000
550	0,08	93,377	4,05E-08	6,14	0	0,793	0,000
600	0,08	94,527	1,44E-08	6,31	0	0,798	0,000
650	0,08	95,534	5,55E-09	6,45	0	0,803	0,000
700	0,08	96,424	2,32E-09	6,58	0	0,808	0,000

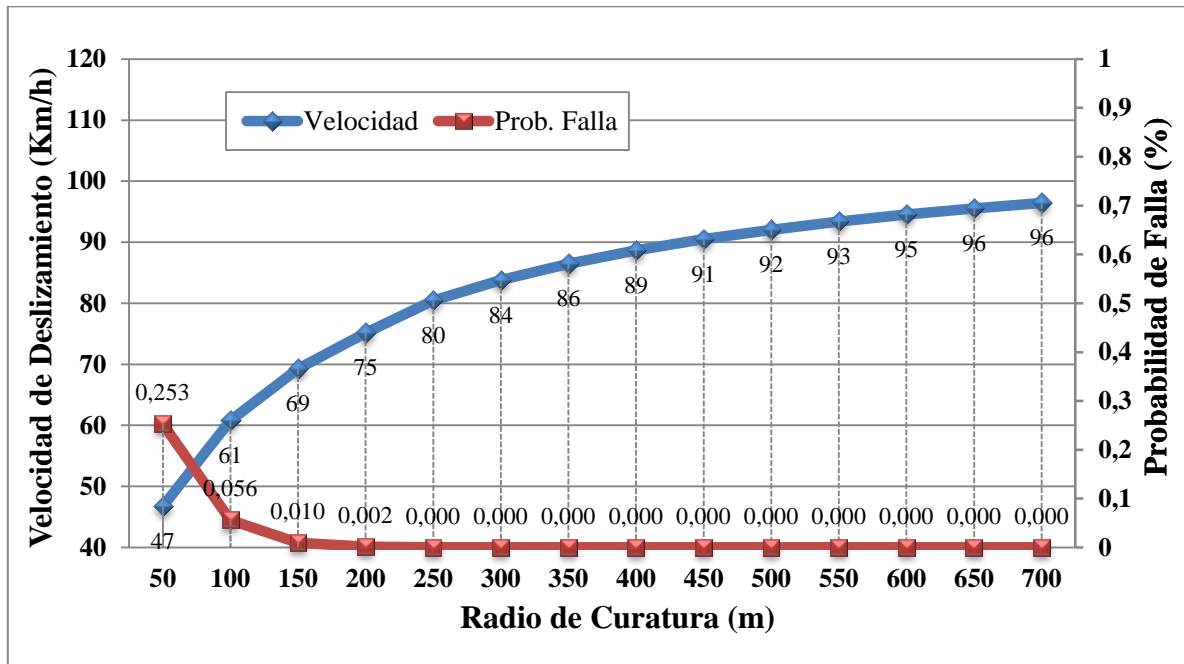


Figura C2. Velocidad y probabilidad de falla para radios de curvatura en hormigón y V50

Tabla C4. Resultados confiabilidad radio-peralte para DTS y P50 de demanda

Radio	Peralte	Velocidad deslizamiento	P (G<0) %	HL	RD	Tx	Margen de Seguridad, MS
50	0,07	46,712	0,00594	3,85	0,233	1,440	0,050
100	0,07	60,767	0,00052	4,41	0,186	1,391	-0,003
150	0,07	69,285	0,000048	4,90	0,144	1,371	-0,027
200	0,07	75,149	0,0000054	5,31	0,109	1,369	-0,039
250	0,07	80,415	7,78E-07	5,66	0,079	1,378	-0,046
300	0,08	83,79	7,66E-08	6,04	0,045	1,399	-0,049
350	0,08	86,479	1,51E-08	6,30	0,023	1,418	-0,048
400	0,08	88,675	3,55E-09	6,52	0,004	1,437	-0,046
450	0,08	90,503	9,73E-10	6,71	-0,013	1,456	-0,043
500	0,08	92,05	3,05E-10	6,88	-0,027	1,473	-0,039
550	0,08	93,377	1,07E-10	7,02	-0,04	1,490	-0,035
600	0,08	94,527	4,18E-11	7,16	-0,051	1,505	-0,030
650	0,08	95,534	1,78E-11	7,27	-0,061	1,518	-0,026
700	0,08	96,424	8,18E-12	7,38	-0,07	1,531	-0,022

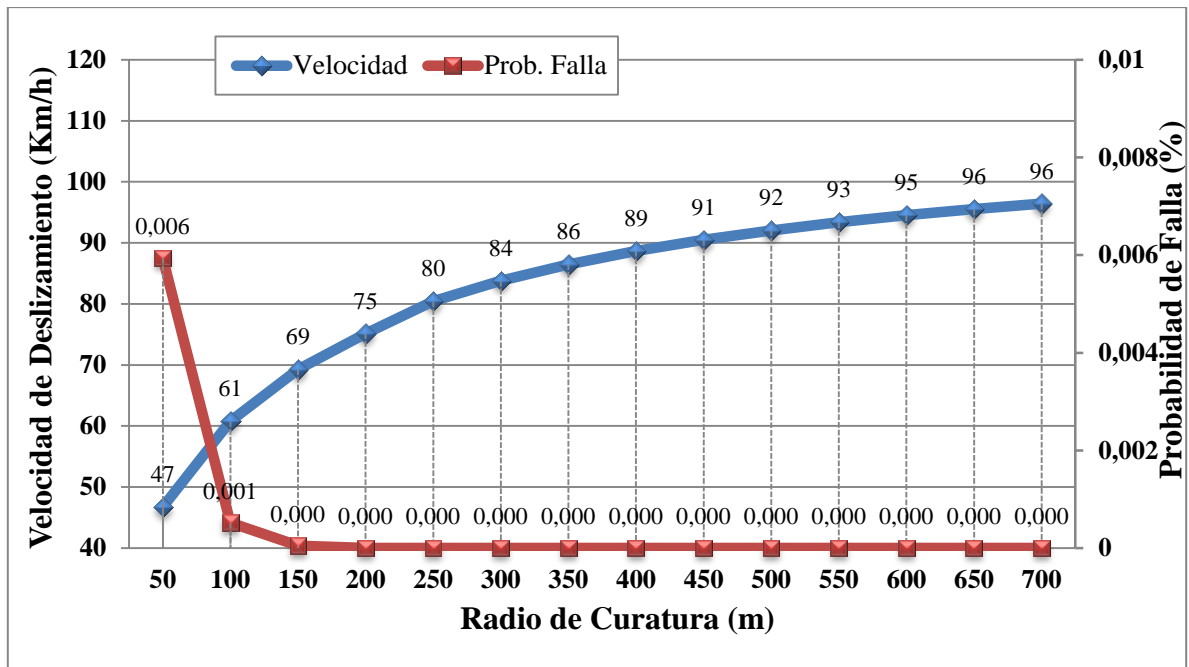


Figura C3. Velocidad y probabilidad de falla para radios de curvatura en DTS y V50.

Tabla C5. Resultados confiabilidad radio-peralte para asfalto y P85 de demanda

Radios	Peralte	Velocidad deslizamiento	P (G<0) %	HL	RD	Tx	Margen de Seguridad, MS
50	0,07	51,64	18,10	0,910	0,44	0,37	0,000
100	0,07	67,177	18,10	0,913	0,45	0,35	0,000
150	0,07	76,593	11,80	1,180	0,44	0,32	0,000
200	0,07	83,076	6,540	1,510	0,43	0,29	0,000
250	0,07	88,709	3,420	1,820	0,42	0,25	0,000
300	0,08	92,432	1,480	2,180	0,43	0,21	0,000
350	0,08	95,399	0,760	2,430	0,44	0,18	0,000
400	0,08	97,821	0,403	2,650	0,45	0,15	0,000
450	0,08	99,838	0,223	2,840	0,45	0,13	0,000
500	0,08	101,544	0,129	3,010	0,46	0,11	0,000
550	0,08	103,008	0,0774	3,170	0,47	0,09	0,000
600	0,08	104,277	0,0471	3,310	0,47	0,07	0,000
650	0,08	105,388	0,0296	3,440	0,48	0,06	0,000
700	0,08	106,369	0,0182	3,560	0,49	0,05	0,000

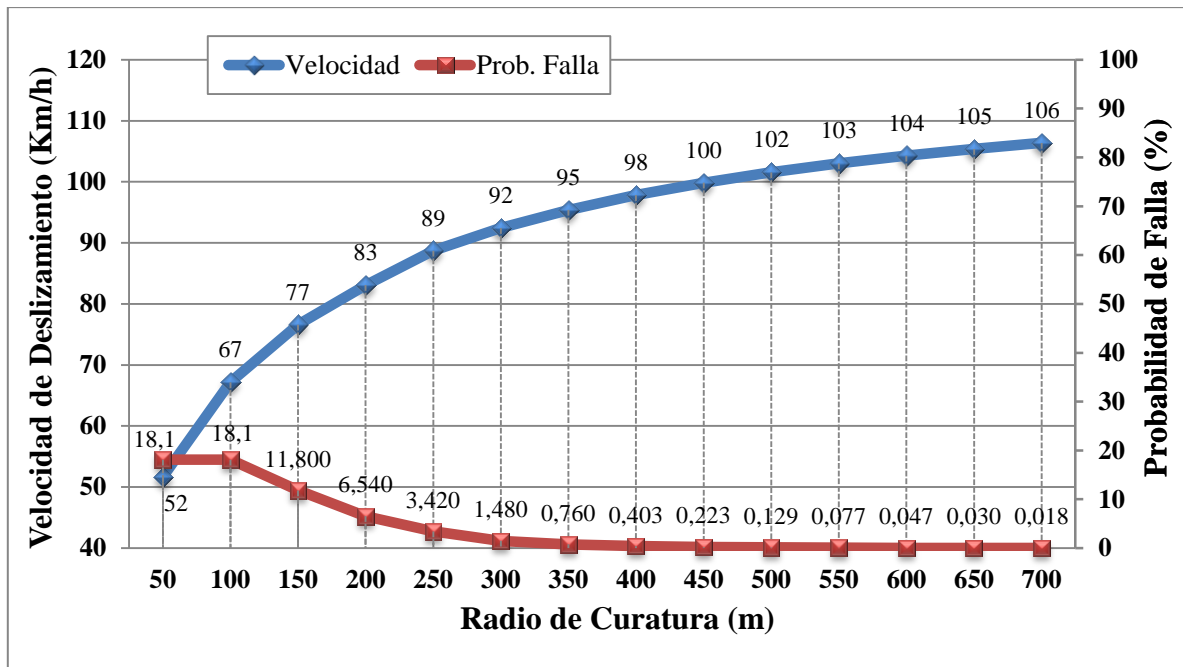


Figura C4. Velocidad y probabilidad de falla para radios de curvatura en asfalto y V85.

Tabla C6. Resultados confiabilidad radio-peralte para hormigón y P50 de demanda

Radios	Peralte	Velocidad deslizamiento	P (G<0) %	HL	RD	Tx	Margen de Seguridad, MS
50	0,07	51,64	8,240	1,39	0,37	0,79	0,000
100	0,07	67,177	3,030	1,88	0,33	0,77	0,000
150	0,07	76,593	0,766	2,42	0,29	0,76	0,000
200	0,07	83,076	0,164	2,94	0,24	0,75	0,000
250	0,07	88,709	0,03330	3,4	0,20	0,74	0,000
300	0,08	92,432	0,00447	3,92	0,16	0,74	0,000
350	0,08	95,399	8,70E-04	4,29	0,13	0,74	0,000
400	0,08	97,821	1,86E-04	4,63	0,10	0,75	0,000
450	0,08	99,838	4,30E-05	4,92	0,1	0,75	0,000
500	0,08	101,544	1,09E-05	5,18	0,0	0,76	0,000
550	0,08	103,008	3,08E-06	5,41	0,0	0,76	0,000
600	0,08	104,277	9,31E-07	5,62	0,0	0,77	0,000
650	0,08	105,388	3,08E-07	5,81	0,0	0,77	0,000
700	0,08	106,369	1,09E-07	5,98	0,0	0,78	0,000

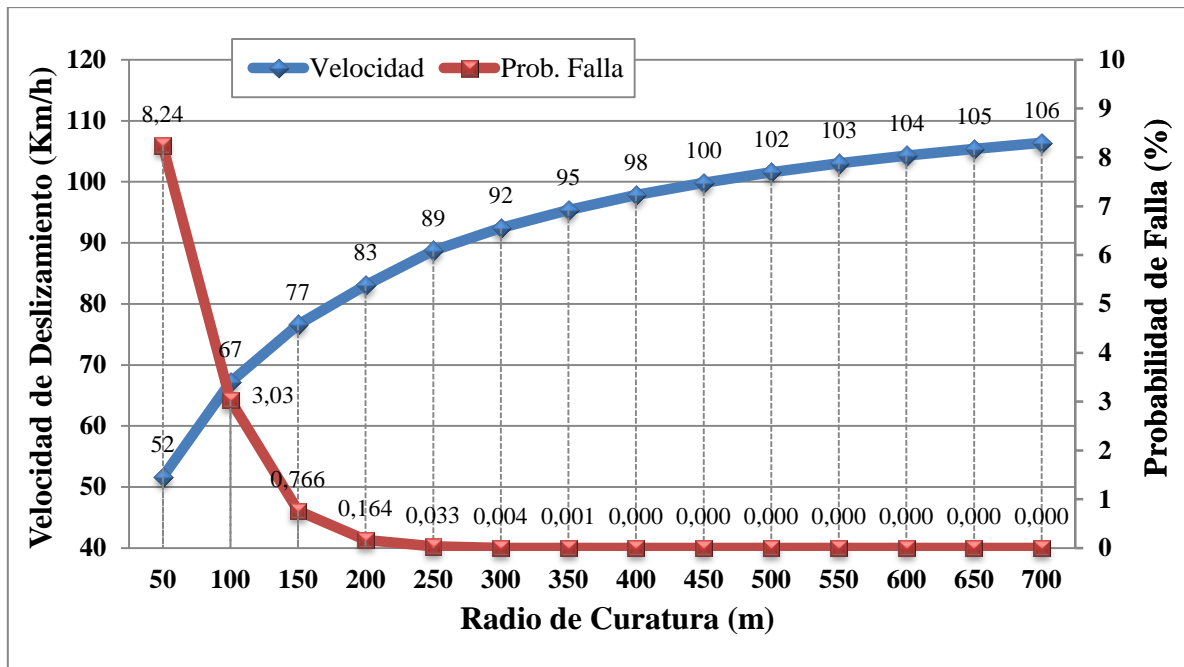


Figura C5. Velocidad y probabilidad de falla para radios de curvatura en hormigón y V85.

Tabla C7. Resultados confiabilidad radio-peralte para DTS y P50 de demanda

Radios	Peralte	Velocidad deslizamiento	P (G<0) %	HL	RD	Tx	Margen de Seguridad, MS
50	0,07	51,64	0,430	2,63	0,34	1,42	0,000
100	0,07	67,177	0,0529	3,27	0,29	1,34	0,000
150	0,07	76,593	0,00574	3,86	0,24	1,29	0,000
200	0,07	83,076	6,57E-04	4,36	0,20	1,26	0,000
250	0,07	88,709	8,63E-05	4,78	0,16	1,26	0,000
300	0,08	92,432	8,01E-06	5,24	0,12	1,27	0,000
350	0,08	95,399	1,32E-06	5,56	0,1	1,29	0,000
400	0,08	97,821	2,57E-07	5,84	0,1	1,32	0,000
450	0,08	99,838	5,80E-08	6,09	0,0	1,35	0,000
500	0,08	101,544	1,51E-08	6,30	0,0	1,37	0,000
550	0,08	103,008	4,39E-09	6,49	0,0	1,40	0,000
600	0,08	104,277	1,45E-09	6,65	0,0	1,42	0,000
650	0,08	105,388	5,17E-10	6,80	0,0	1,44	0,000
700	0,08	106,369	2,06E-10	6,93	0,0	1,46	0,000



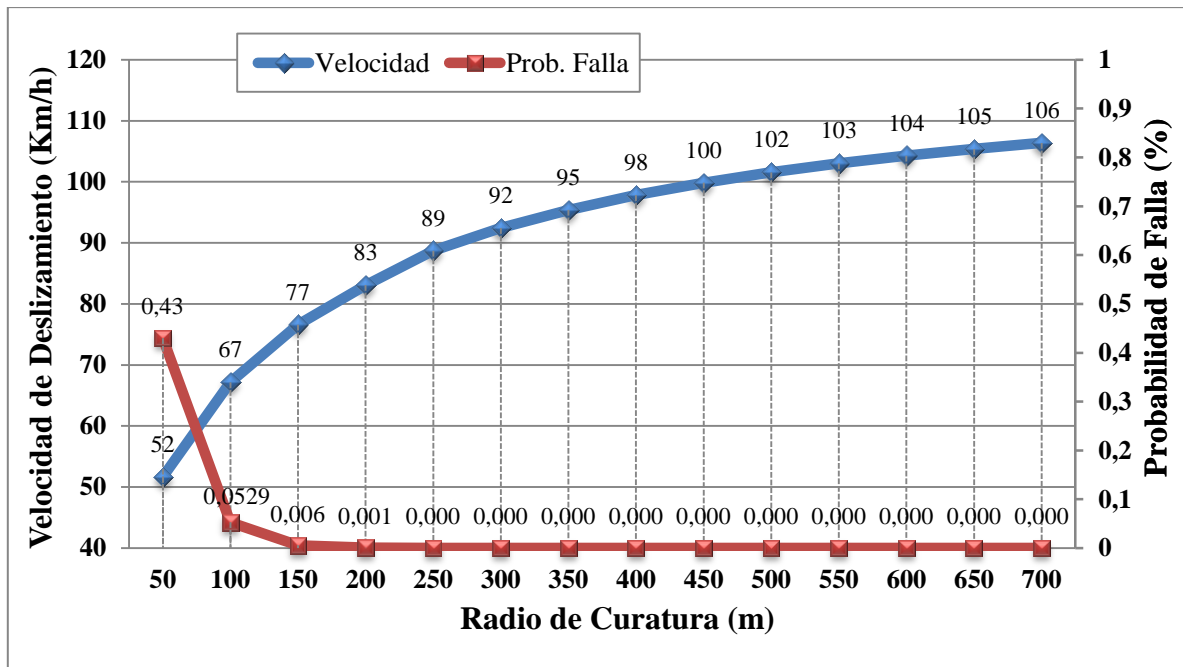


Figura C6. Velocidad y probabilidad de falla para radios de curvatura en DTS y V85.

Tabla C8. Resultados confiabilidad radio-peralte para asfalto y P99 de demanda

Radios	Peralte	Velocidad deslizamiento	P (G<0) %	HL	RD	Tx	Margen de Seguridad, MS
50	0,07	57,182	87,1	-1,13	0,623	0,448	0,000
100	0,07	74,387	86,6	-1,11	0,612	0,462	0,000
150	0,07	84,813	77,5	-0,75	0,581	0,447	0,000
200	0,07	91,993	63,3	-0,34	0,549	0,423	0,000
250	0,07	98,057	47,4	0,06	0,521	0,395	0,000
300	0,08	102,172	30,1	0,52	0,494	0,359	0,000
350	0,08	105,451	19	0,88	0,477	0,328	0,000
400	0,08	108,129	11,5	1,20	0,466	0,298	0,000
450	0,08	110,358	6,89	1,48	0,459	0,269	0,000
500	0,08	112,245	4,11	1,74	0,457	0,242	0,000
550	0,08	113,862	2,46	1,97	0,457	0,217	0,000
600	0,08	115,265	1,49	2,17	0,459	0,194	0,000
650	0,08	116,493	0,917	2,36	0,456	0,174	-0,001
700	0,08	117,578	0,573	2,53	0,465	0,155	0,000

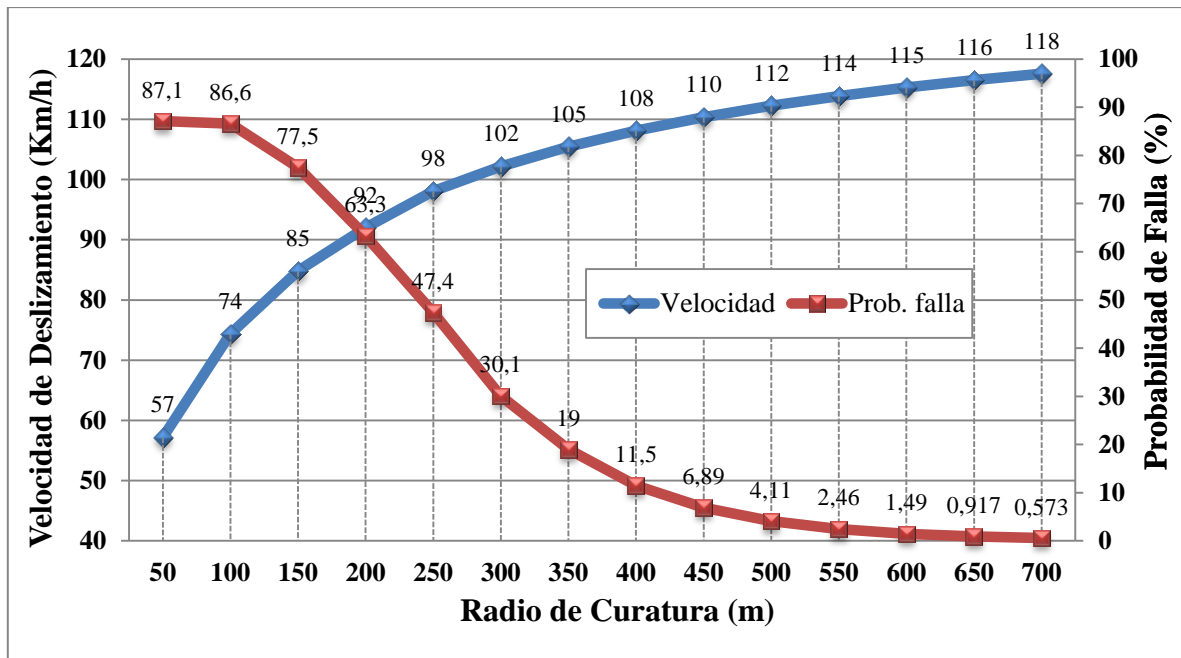


Figura C7. Velocidad y probabilidad de falla para radios de curvatura en asfalto y V99.

Tabla C9. Resultados confiabilidad radio-peralte para hormigón y P99 de demanda

Radio	Peralte	Velocidad deslizamiento	P (G<0) %	HL	RD	Tx	Margen de Seguridad, MS
50	0,07	57,182	67,60	-0,456	0,53	0,81	0,000
100	0,07	74,387	47,80	0,056	0,49	0,80	0,000
150	0,07	84,813	24,60	0,688	0,43	0,78	0,000
200	0,07	91,993	9,750	1,300	0,38	0,76	0,000
250	0,07	98,057	3,210	1,850	0,34	0,75	0,000
300	0,08	102,172	0,701	2,460	0,29	0,73	0,000
350	0,08	105,451	0,175	2,920	0,25	0,72	0,000
400	0,08	108,129	0,0422	3,340	0,21	0,72	0,000
450	0,08	110,358	0,0102	3,710	0,18	0,71	0,000
500	0,08	112,245	2,54E-03	4,050	0,15	0,72	0,000
550	0,08	113,862	6,60E-04	4,360	0,12	0,72	0,000
600	0,08	115,265	1,81E-04	4,630	0,10	0,72	0,000
650	0,08	116,493	5,29E-05	4,880	0,08	0,73	0,000
700	0,08	117,578	1,64E-05	5,110	0,06	0,74	0,000

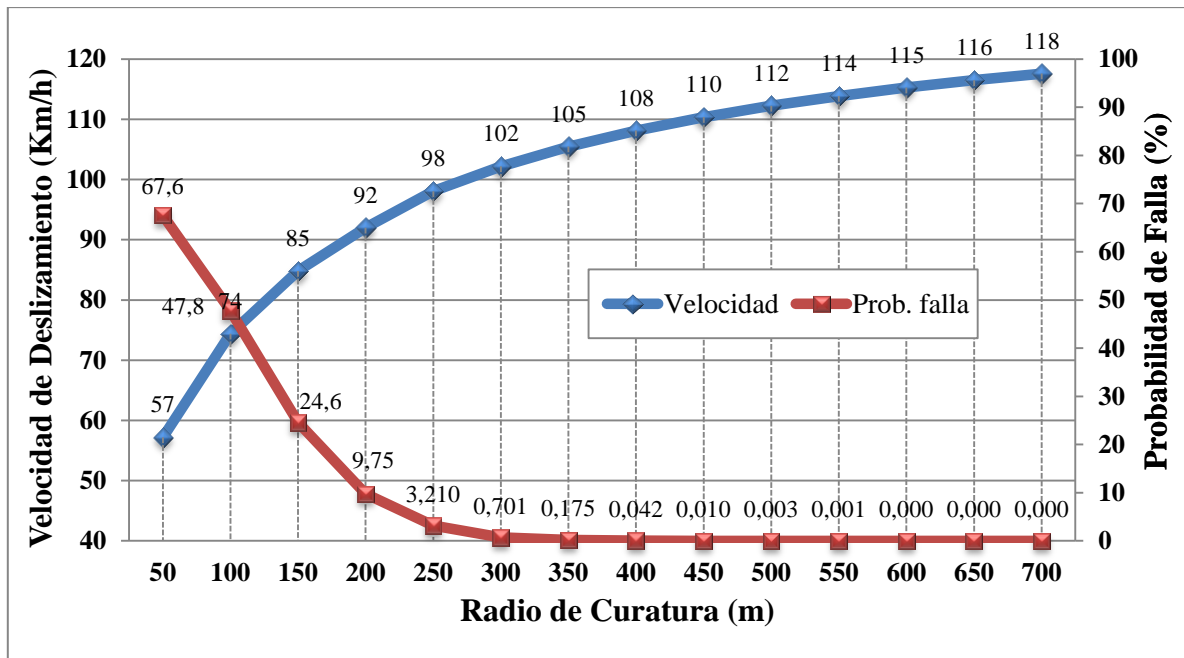


Figura C8. Velocidad y probabilidad de falla para radios de curvatura en hormigón y V99.

Tabla C10. Resultados confiabilidad radio-peralte para DTS y P99 de demanda

Radios	Peralte	Velocidad deslizamiento	P (G<0) %	HL	RD	Tx	Margen de Seguridad, MS
50	0,07	57,182	14,40	1,06	0,47	1,45	0,000
100	0,07	74,387	3,530	1,81	0,41	1,36	0,000
150	0,07	84,813	0,636	2,49	0,36	1,27	0,000
200	0,07	91,993	0,102	3,08	0,32	1,19	0,000
250	0,07	98,057	0,01640	3,59	0,28	1,10	0,000
300	0,08	102,172	0,00502	3,89	0,48	0,37	0,000
350	0,08	105,451	0,00277	4,03	0,50	0,31	0,000
400	0,08	108,129	1,69E-03	4,15	0,51	0,27	-0,001
450	0,08	110,358	1,14E-03	4,24	0,52	0,24	0,000
500	0,08	112,245	7,99E-04	4,31	0,53	0,21	0,000
550	0,08	113,862	5,80E-04	4,38	0,53	0,19	0,000
600	0,08	115,265	4,38E-04	4,45	0,54	0,17	0,000
650	0,08	116,493	3,38E-04	4,50	0,54	0,15	0,000
700	0,08	117,578	2,66E-04	4,55	0,54	0,14	0,000

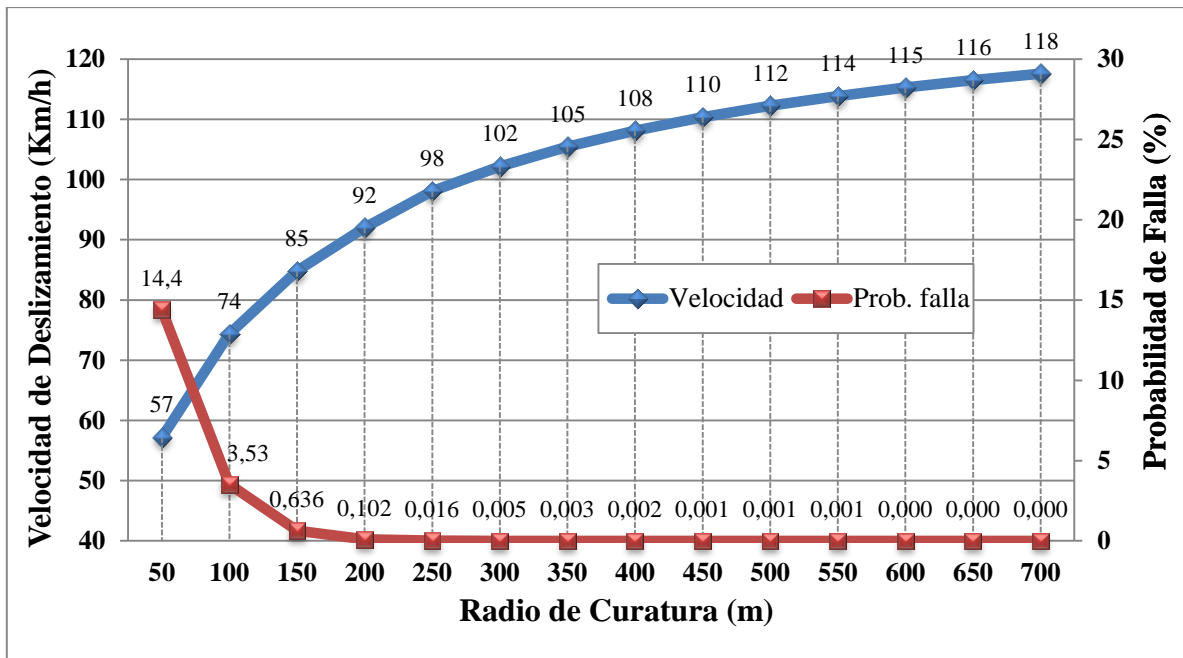


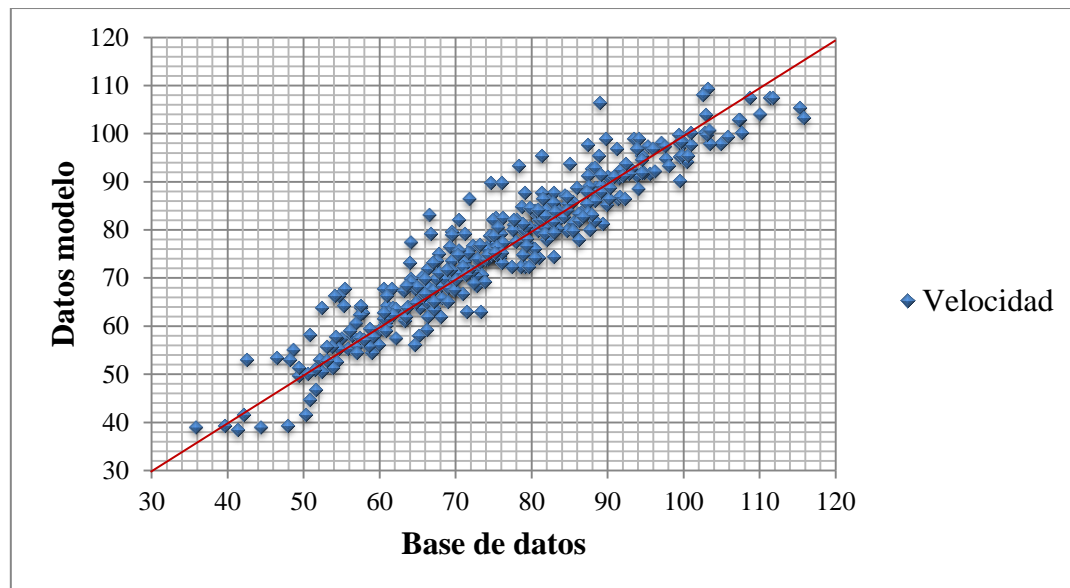
Figura C9. Velocidad y probabilidad de falla para radios de curvatura en DTS y V99.

## **ANEXO D**

Resultados despeje lateral

1. Modelo de velocidad para demanda de despeje lateral,  $V_{req}$ **Tabla D1. Estadísticos modelo de velocidad para demanda de despeje lateral ( $amáx_{req}$ )**

	<b>T</b>	<b>P-valor</b>
<b>Constante</b>	173,36	<0,0001
<b>Zp</b>	72,05	<0,0001
<b>1/R</b>	-23,79	<0,0001
<b>1/R<sup>2</sup></b>	10,45	<0,0001

**Figura D1. Validación modelo de velocidad para demanda de despeje lateral,  $V_{req}$** 2. Ajuste oferta despeje lateral,  $amáx$ **Tabla D2. Estadísticos oferta de despeje lateral.**

	<b>T</b>	<b>P-valor</b>
<b>Constante</b>	13,46	<0,0001
<b>Radio</b>	16,02	<0,0001

## 3. Resultados despeje lateral

Tabla D3. Resultados confiabilidad amáx para percentil 50 de demanda

Velocidad diseño	Radio diseño	$amáx_{sum}$	$P(G<0)\%$	HL	$amáx_{req}$	Margen de Seguridad, MS
50	80	4,23	100	-5,1	4,52	-0,293
60	120	5,10	99,70	-2,71	4,92	0,181
70	180	5,63	90,30	-1,3	5,53	0,098
80	250	6,61	54,40	-0,111	6,23	0,382
90	330	7,96	19,00	0,876	7,03	0,937
100	425	9,01	4,420	1,7	7,98	1,027
110	540	10,21	0,825	2,4	9,11	1,093
120	700	11,16	0,117	3,04	10,77	0,388

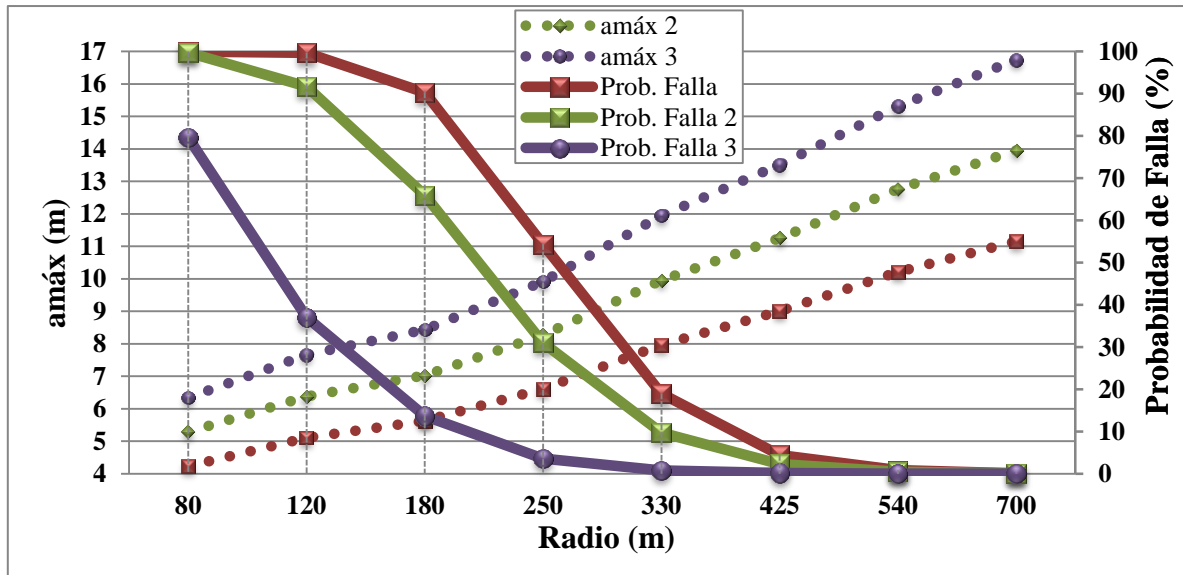


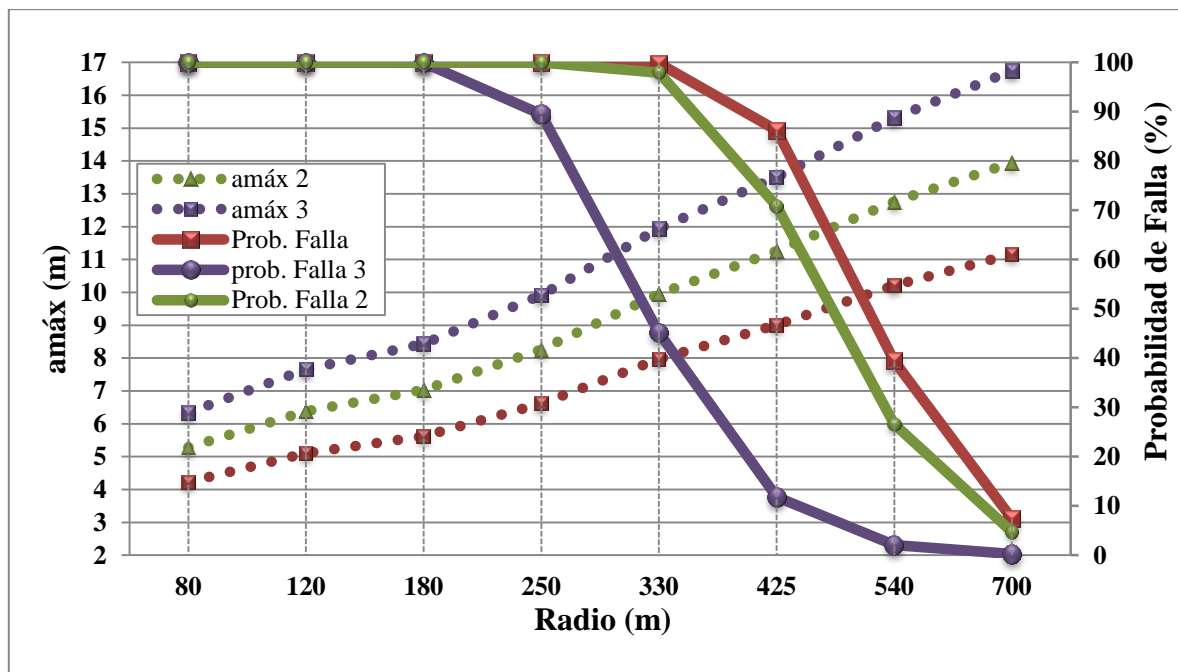
Figura D2. Velocidad y probabilidad de falla para Dp en V50

Tabla D4. Resultados confiabilidad despeje lateral para P85 de demanda

Velocidad diseño	Radio diseño	$amáx_{sum}$	$P(G<0)\%$	HL	$amáx_{req}$	Margen de Seguridad, MS
50	80	4,23	100	-13,0	4,52	-0,29
60	120	5,10	100	-7,2	11,75	-6,65
70	180	5,63	100	-4,2	10,76	-5,13
80	250	6,61	98,2	-2,110	9,58	-2,96
90	330	7,96	72,5	-0,597	8,34	-0,38
100	425	9,01	27,9	0,586	7,18	1,83
110	540	10,21	6,23	1,540	6,14	4,06
120	700	11,16	0,09	3,110	5,06	6,10

Tabla D5. Resultados confiabilidad despeje lateral para P99 de demanda

Velocidad diseño	Radio diseño	$am\acute{a}x_{sum}$	$P(G<0)\%$	HL	$am\acute{a}x_{req}$	Margen de Seguridad, $MS$
50	80	4,23	100	-35,1	4,52	-0,30
60	120	5,10	100	-16,2	18,71	-13,61
70	180	5,63	100	-9,1	16,52	-10,90
80	250	6,61	100	-5,3	14,36	-7,75
90	330	7,96	99,80	-2,9	12,38	-4,41
100	425	9,01	86,20	-1,1	10,61	-1,61
110	540	10,21	39,40	0,3	8,93	1,28
120	700	11,16	7,390	1,5	7,32	3,84

Figura D3. Velocidad y probabilidad de falla para  $D_p$  en V99