



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE LA FRICCIÓN DE DISEÑO EN CURVAS
HORIZONTALES**

POR

Felipe Andrés Muñoz Matamala

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil

Profesor Guía
Dr. Tomás Echaveguren Navarro

Profesor Comisión
Dr. Víctor Aguilar Vidal

Profesor Comisión
Dr. Juan Carrasco Montagna

Junio 2025
Concepción (Chile)

© 2025 Felipe Andrés Muñoz Matamala

© 2025 Felipe Andrés Muñoz Matamala

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, Carmen y Luis, quienes desde niño me permitieron soñar con que esto era posible. Gracias por ser un ejemplo de esfuerzo y trabajo, por permitirme dedicarme exclusivamente a estudiar durante estos años de universidad, y por su amor incondicional, sus sacrificios y su apoyo constante, incluso en los momentos más difíciles.

A mi querida Andrea, por su gran paciencia y sabiduría; por escucharme en los momentos de estrés; por su consejo oportuno cuando más lo necesitaba; por acompañarme, sostenerme y demostrarme que siempre se puede amar más.

A mi hermano Luis David, por su alegría; por ser mi gran compañero desde el día en que nació; por estar siempre dispuesto a ayudarme y por regalarme siempre sus buenos deseos.

A mi abuela Hortensia, por todo el amor y la ternura que me ha brindado, incluso desde antes de que yo naciera.

A Víctor, Estela y Mariana, por haberme hecho parte de su familia desde el primer momento, por las fiestas, los paseos y las vacaciones en Queule y Pemehue.

A todos los amigos y amigas que hice, y a mi familia ampliada.

Agradecimientos

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mi profesor guía, Dr. Tomás Echaveguren Navarro, por su constante apoyo, dedicación y compromiso durante el desarrollo de este trabajo.

Resumen

El diseño de carreteras busca cumplir con criterios técnicos que garanticen condiciones adecuadas de seguridad y confort. Esto exige comprender la respuesta de los conductores frente a los elementos geométricos del alineamiento, considerando las características del conductor, del vehículo y del terreno. Uno de los factores más relevantes en el diseño de curvas horizontales es el coeficiente de fricción, el cual se relaciona directamente con la velocidad a la que los conductores abordan una curva. Para analizar este aspecto, se utilizó el modelo de tres zonas, representado mediante un diagrama fricción-velocidad que incorpora tres niveles de fricción: la fricción operativa, que corresponde a la fricción demandada por los conductores en condiciones normales de circulación asociado a su percepción de confort; la fricción de diseño, establecida por el proyectista según criterios normativos; y la fricción del pavimento, que representa la fricción disponible entre el neumático y la superficie.

Los márgenes de seguridad se definen como la diferencia entre estos niveles de fricción y suelen abordarse de forma determinística. Sin embargo, al estar influenciadas por variables como la velocidad de operación, la percepción de confort, las condiciones del pavimento o la decisión del proyectista, estas fricciones presentan incertidumbre en su estimación.

Con el fin de incorporar dicha incertidumbre, se aplicaron principios de confiabilidad para estimar la probabilidad de que la fricción operativa supere la fricción de diseño en distintas configuraciones geométricas. Las funciones de fricción utilizadas en las funciones de estado límite fueron generadas mediante simulación de Montecarlo, lo que permitió obtener distribuciones de probabilidad lognormal. El análisis se llevó a cabo en curvas con velocidades de diseño de 50 y 70 kilómetros por hora, seleccionando tres radios representativos para cada caso. A cada uno se le asignaron niveles de desviación estándar bajo, medio y alto, con el objetivo de incorporar la variabilidad geométrica propia del proceso de diseño.

Los resultados muestran que, las probabilidades de excedencia en curvas horizontales asociadas a velocidades de diseño de 50 km/h son cercanas al 100%, dado que la fricción de operación supera sistemáticamente a la fricción de diseño, lo que evidencia una disminución efectiva en el margen de seguridad disponible asociado al confort.

Abstract

Roadway design aims to meet technical criteria that ensure appropriate safety and comfort conditions. This requires understanding driver responses to the geometric elements of the alignment, considering driver, vehicle, and terrain characteristics. One of the most relevant factors in horizontal curve design is the coefficient of friction, which is directly related to the speed at which drivers approach a curve. To analyze this aspect, the three-zone model was used, represented through a friction–speed diagram that incorporates three levels of friction: operational friction, which corresponds to the friction demanded by drivers under normal driving conditions and is associated with their perception of comfort; design friction, established by the designer based on regulatory criteria; and pavement friction, which represents the available friction between the tire and the surface.

Safety margins are defined as the difference between these friction levels and are typically addressed in a deterministic manner. However, since they are influenced by variables such as operating speed, comfort perception, pavement conditions, or the designer's decisions, these friction values present uncertainty in their estimation.

To incorporate this uncertainty, reliability principles were applied to estimate the probability that the operational friction exceeds the design friction under different geometric configurations. The friction functions used in the limit state functions were generated using Monte Carlo simulation, which allowed for obtaining lognormal probability distributions. The analysis was carried out on curves with design speeds of 50 and 70 kilometers per hour, selecting three representative radii for each case. Each was assigned low, medium, and high standard deviation levels to incorporate the geometric variability inherent to the design process.

The results show that the probabilities of exceedance in horizontal curves associated with design speeds of 50 km/h are close to 100%, as the operational friction consistently exceeds the design friction. This indicates an effective reduction in the available safety margin associated with comfort.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	i
ÍNDICE DE TABLAS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivo general	2
1.3 Objetivos específicos	2
1.4 Plan de trabajo	2
1.5 Alcances.....	3
1.6 Principales resultados	3
1.7 Organización de la memoria.....	4
CAPÍTULO 2 MARGEN DE SEGURIDAD PROBABILISTA EN CURVAS HORIZONTALES	5
2.1 Introducción.....	5
2.2 El modelo de tres zonas	5
2.3 Demanda puntual de fricción.....	6
2.4 Fricción de diseño.....	7
2.5 Fricción de operación	8
2.6 Fricción del pavimento	11
2.7 Umbral de fricción.....	12
2.8 Márgenes de seguridad en fricción	12
2.9 Principios de confiabilidad	14
2.10 Aplicaciones de principios de confiabilidad en curvas horizontales	17
2.11 Conclusiones.....	19

CAPÍTULO 3	PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE LA FRICCIÓN DE DISEÑO	21
3.1	Introducción.....	21
3.2	Determinación de la probabilidad de excedencia	21
3.3	Definición de la función de estado límite.....	22
3.4	Descripción de la variable de entrada.....	24
3.5	Simulación de funciones de densidad de probabilidad de fricción	25
3.6	Estimación de la probabilidad de excedencia.....	28
3.7	Conclusiones.....	31
CAPÍTULO 4	CONCLUSIONES.....	33
REFERENCIAS		35
ANEXOS		40
ANEXO 1.1	Contribución a los objetivos de desarrollo sostenible.....	40
ANEXO 3.1	Análisis estadístico de datos.....	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Distribuciones de la variable de entrada	25
Tabla 3.2 Parámetros estadísticos resultantes de la simulación de Montecarlo.....	27
Tabla 3.3 Indicadores de confiabilidad del estudio	28
Tabla A.3.1 Resultados del test de Anderson – Darling.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Representación gráfica de los modelos de fricción	5
Figura 2.2 Funciones de fricción de diseño y asociadas al percentil 85 de la fricción demandada por los conductores	10
Figura 2.3 Funciones de fricción de diseño y asociadas al percentil 50 de la fricción demandada por los conductores	11
Figura 2.4 Representación de la variabilidad de las fricciones de diseño y operación	15
Figura 3.1 Metodología del cálculo de la probabilidad de excedencia	21
Figura 3.2 Representación de la variabilidad de las funciones de fricción lateral	22
Figura 3.3 Ejemplo de obtención de funciones de densidad de probabilidad de fricción	26
Figura 3.4 Probabilidad de excedencia de la fricción de diseño de la FEL 1	29
Figura 3.5 Probabilidad de excedencia de la fricción de diseño de la FEL 2	30
Figura 3.6 Probabilidad de excedencia en FEL 1 y FEL 2 para radios correspondientes a V_d de 50km/h.....	30
Figura 3.7 Probabilidad de excedencia en FEL 1 y FEL 2 para radios correspondientes a V_d de 70km/h.....	31

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

La fricción lateral es un parámetro crucial en el diseño geométrico de las curvas horizontales. Se define como la razón entre la aceleración lateral del vehículo y la aceleración gravitacional, cuantificando así las fuerzas laterales que experimentan los conductores al transitar por curvas horizontales. En general, las normas de diseño geométrico utilizan el equilibrio entre el factor de fricción lateral de diseño y la demanda de fricción, derivada del modelo de masa puntual, para determinar la velocidad de diseño, el radio y el peralte apropiado para una determinada fricción de diseño. Este factor representa el umbral de comodidad aceptable.

Una extensión del diseño en curvas horizontales es el modelo de tres zonas, el cual consiste en un diagrama fricción-velocidad que incluye la fricción demandada, la de diseño, la operativa y la fricción del pavimento. Con este modelo es posible estimar márgenes de seguridad, definidos en la literatura como la diferencia entre la fricción de diseño y la fricción operativa, o entre esta última y la fricción del pavimento.

Las especificaciones de los márgenes de seguridad descritos en la literatura para curvas horizontales suelen ser determinísticas. La fricción de operación está influenciada por la velocidad de operación, la fricción de diseño depende de la percepción subjetiva de comodidad, y la fricción límite se reduce en el tiempo y varía de pavimento a pavimento. Dado que estas fricciones están influenciadas por múltiples factores, se introduce un nivel significativo de incertidumbre en la estimación de los márgenes de seguridad. Esta variabilidad compromete la confiabilidad del diseño bajo condiciones reales de operación.

En este contexto, el propósito de esta memoria es estimar la probabilidad de que la fricción de diseño sea superada por la fricción de operación en diferentes configuraciones geométricas de curvas horizontales usando principios de confiabilidad, considerando la variabilidad inherente a las condiciones reales de operación y de las decisiones del diseño.

El Anexo 1.1 muestra la contribución de la Memoria de Título a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

1.2 Objetivo general

Estimar la probabilidad de excedencia de la fricción lateral de diseño en curvas horizontales de caminos bidireccionales pavimentados.

1.3 Objetivos específicos

Identificar las fuentes de incertidumbre presentes en las variables que describen la fricción lateral de diseño y de operación.

Formular una función de estado límite que contemple la fricción lateral de diseño y de operación.

Elaborar curvas de probabilidad de excedencia usando simulación de Montecarlo.

1.4 Plan de trabajo

La metodología de trabajo se desarrolló en dos etapas. La primera consistió en investigar el marco teórico de los márgenes de seguridad en curvas horizontales. Para ello, se realizaron los siguientes procesos: la identificación de las variables involucradas en el diseño geométrico, la caracterización de los modelos de fricción de operación y de fricción de diseño existentes, y el análisis de la variabilidad de dichas fricciones, incorporando los principios de confiabilidad como una herramienta para representarla.

La segunda etapa consistió en elaborar funciones de estado límite asociadas a la diferencia entre la fricción de operación y la fricción de diseño identificadas en la etapa anterior. Para ello, se llevaron a cabo los siguientes procesos: la identificación de las variables de entrada del modelo, la simulación de las funciones de fricción mediante el método de Montecarlo

para obtener funciones de densidad de probabilidad, y finalmente, la estimación de las probabilidades de excedencia en distintas configuraciones geométricas de curvas horizontales.

1.5 Alcances

Se acota el análisis a las curvas horizontales con velocidades de diseño menores a 70 km/h, es decir, aquellos considerados como caminos bidireccionales pavimentados en la jerarquía vial de la normativa chilena.

1.6 Principales resultados

Se observó que la distribución lognormal es la que mejor representa a la fricción de diseño y de operación, encontrando una tendencia a la asimetría, que depende de la variabilidad del radio geométrico.

Los resultados muestran que, al utilizar fricciones de operación calibradas localmente en distintos contextos, se observan diferencias significativas en las probabilidades de excedencia de la fricción de diseño. En el primer modelo, la probabilidad se aproxima a 100 % en radios pequeños, asociados a velocidades de diseño de 50 km/h, y disminuye progresivamente al 0% en radios superiores a 350 m, correspondientes a velocidades de diseño de 70 km/h. En contraste, el segundo modelo, calibrado en Chile, mantiene la probabilidad de excedencia cercana a 100 % en todo el rango de radios analizados.

Esta diferencia indica que los conductores, en ambos contextos, tienden a demandar una fricción superior a la considerada en el diseño, aunque con patrones distintos. Además, se confirma que la fricción de operación depende de variables locales, por lo que requiere calibración específica para cada entorno y no puede estimarse mediante un modelo universal.

1.7 Organización de la memoria

El documento se compone de cuatro capítulos. En el Capítulo 1 se presentan la motivación, los objetivos principal y específicos, el plan de trabajo y los resultados principales. El Capítulo 2 presenta el fenómeno de la fricción, los márgenes de seguridad asociados a las curvas horizontales, y los principios de confiabilidad, junto con una revisión del estado-del-arte en el ámbito del diseño geométrico. El Capítulo 3 describe la metodología empleada para la obtención de probabilidades de excedencia, incluyendo la formulación de las funciones de estado límite utilizadas entre la fricción de diseño y la fricción de operación, la descripción de las variables de entrada, la aplicación de simulación de Montecarlo para la obtención de funciones de densidad de probabilidad de ambas fricciones, y la comparación entre los resultados obtenidos al aplicar diferentes ecuaciones de fricción de operación. Finalmente, en el Capítulo 4, se presentan las principales conclusiones del trabajo y se proponen líneas futuras de investigación.

CAPÍTULO 2 MARGEN DE SEGURIDAD PROBABILISTA EN CURVAS HORIZONTALES

2.1 Introducción

En este capítulo se aborda el concepto físico de la fricción lateral y su relación con los parámetros geométricos de las curvas horizontales. Se definen y presentan los modelos existentes en el estado-del-arte sobre los márgenes de seguridad entre la fricción de diseño y la fricción de operación. Se introducen las aplicaciones de principios de confiabilidad en el diseño geométrico.

2.2 El modelo de tres zonas

El modelo de tres zonas explica bajo un concepto unificado de relaciones fricción – velocidad – radio en el cual se superponen funciones de fricción de operación, de fricción de diseño, umbral por normativa de fricción y fricción del pavimento (de Solminihaç *et al.*, 2007). Este concepto se muestra en la Figura 2.1, la cual presenta, en un sólo gráfico, el comportamiento de los niveles de fricción, respecto de la velocidad de circulación.

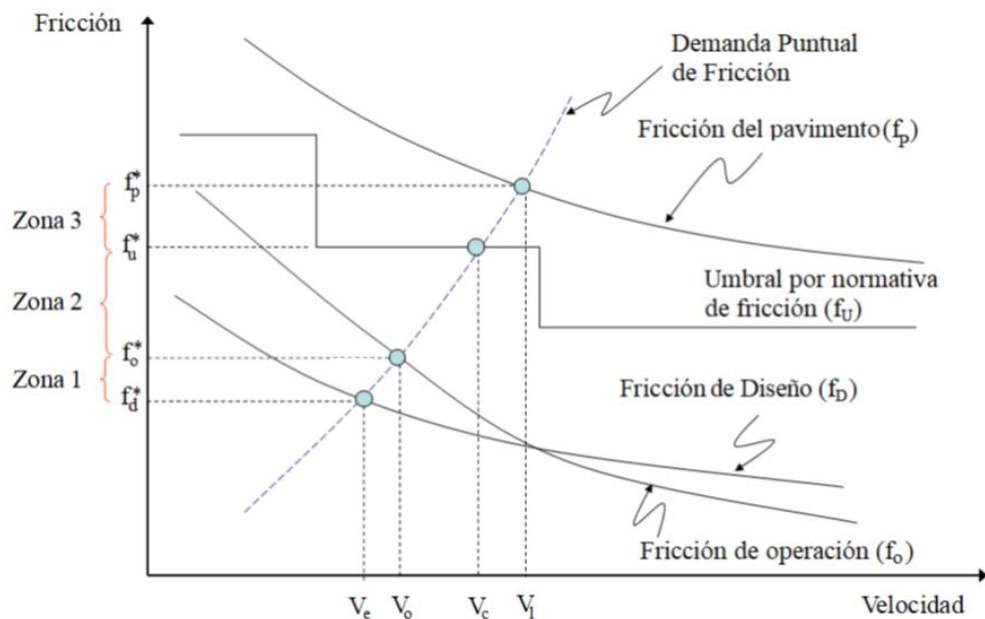


Figura 2.1 Representación gráfica de los modelos de fricción (adaptado desde de Solminihaç *et al.*, 2007)

La fricción de operación (f_o) corresponde a la demanda de fricción de todos los conductores y refleja la relación de compensación de velocidad que aplican los conductores antes diferentes radios, peraltes y valores de fricción en un sentido espacial en la red vial. La fricción de diseño (f_d) corresponde a valores de fricción lateral obtenidos mediante mediciones de terreno basadas en el equipo Ball Bank y se asocia al umbral a partir del cual los ocupantes del vehículo comienzan a experimentar incomodidad debido a la aceleración lateral. En cuanto a la fricción del pavimento (f_p) representa el coeficiente de fricción más alto que se puede alcanzar entre un neumático y la superficie del pavimento. Está influenciado mayormente por la macrotextura del pavimento, la microtextura de los agregados y la resistencia al deslizamiento. El umbral por normativa de fricción (f_u) es el valor límite admisible de fricción que determina la normativa en el diseño e indica cuándo es necesario intervenir para restituir las condiciones de fricción del pavimento. (Wambold *et al.*, 1995; Asociación Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transporte [AASHTO], 2001; de Solminihac *et al.*, 2008; Echaveguren y Vargas-Tejeda, 2011).

La demanda puntual de fricción está determinada por la condición de estabilidad dinámica del vehículo al transitar por una curva con un radio y peralte específicos. La intersección entre esta función de demanda y las distintas funciones de fricción genera un conjunto característico de valores de fricción (f^*) y velocidades asociados a la configuración geométrica particular, incluyendo la velocidad específica (V_e), la velocidad de operación (V_o), la velocidad límite de control y construcción (V_c), y la velocidad límite última (V_l) (de Solminihac *et al.*, 2007).

A partir de este modelo unificado, de Solminihac *et al.* (2007) definieron 3 zonas de diseño: una zona de consistencia operacional (Zona 1), una de consistencia constructiva (Zona 2) y otra de consistencia de umbrales de fricción (Zona 3).

2.3 Demanda puntual de fricción

El diseño de curvas horizontales utiliza el modelo de masa puntual, el cual representa al vehículo como una masa concentrada en su centro de gravedad donde actúan las fuerzas

externas. Este modelo permite analizar las fuerzas laterales generadas por la interacción entre el radio de la curva y la velocidad seleccionada por el conductor, las cuales son contrarrestadas por la fricción lateral disponible y el efecto del peralte aplicado. A partir del equilibrio dinámico se obtiene la Ecuación (2.1), que expresa la fricción lateral demandada (f) por un vehículo al transitar por una curva horizontal de radio (R , en m), peralte (decimal) y velocidad de circulación (V , en km/h) (Ministerio de Obras Públicas [MOP], 2024a).

$$f = \frac{V^2}{127 \cdot R} - e \quad (2.1)$$

El modelo de masa puntual asume una distribución uniforme de la fuerza de fricción en todas las ruedas del vehículo, velocidad constante a lo largo de la curva y una trayectoria ajustada al centro de la pista.

2.4 Fricción de diseño

La fricción de diseño corresponde a un modelo de demanda de fricción en condiciones de frenado (de Solminihac *et al.*, 2008). Delimita la frontera entre condiciones de conducción cómodas y potencialmente peligrosas (Bonneson, 2001). Se cuantifica a partir de la tolerancia a la fricción lateral experimentada por los conductores a una velocidad determinada (Herrin y Heuhardt, 1974).

En los modelos tradicionales, la fricción de diseño se representa mediante una función dependiente de la velocidad específica (V_e , en km/h) de la curva. Una expresión funcional ampliamente utilizada se muestra en la Ecuación (2.2), donde f_d corresponde a la fricción de diseño, y a , b y n son coeficientes cuyo valor depende de criterios adoptados en cada país (AASHTO, 2001; Ministerio de Fomento, 2016; MOP, 2024a).

$$f_d = a - \frac{V_e^n}{b} \quad (2.2)$$

Al elegir el radio y el peralte de una curva horizontal, el diseñador define implícitamente la fricción de diseño asociada. En consecuencia, el factor de fricción lateral incorpora la incertidumbre propia de esas decisiones de proyecto, de modo que resulta razonable modelarlo mediante una función de densidad de probabilidad que refleje adecuadamente su variabilidad.

2.5 Fricción de operación

Durante la conducción, las personas seleccionan su velocidad según su disposición a soportar un determinado nivel de aceleración lateral (o fricción lateral), lo cual está influenciado por la geometría de la curva horizontal. En consecuencia, la fricción lateral ocurre como resultado de este proceso de toma de decisiones.

Lamm *et al.* (1991) desarrollaron un modelo de fricción de operación basado en el modelo de masa puntual. Propusieron estimar la fricción de operación (f_o) empleando el percentil 85 de la distribución de velocidades medido en Alemania (V_{85} , en km/h), del radio de la curva (R , en m) y del peralte (e , decimal), correspondiendo dicho percentil 85 de velocidades al percentil 85 de la distribución de fricciones.

$$f_o = \frac{V_{85}^2}{127 \cdot R} - e \quad (2.3)$$

Xu *et al.* (2015) desarrollaron modelos para predecir la fricción lateral en vehículos livianos en función del radio de curva (R , en m) y, de forma implícita, de la velocidad. Para ello emplearon un registrador GPS que recopiló datos de geometría, velocidad y aceleración, y ajustaron a los valores de fricción lateral una densidad de probabilidad normal. Sin embargo, sus histogramas revelaron una distribución asimétrica. Las Ecuaciones (2.4) y (2.5) muestran las expresiones calibradas para los percentiles 50 (f_{50}) y 85 (f_o) de la fricción demandada, ambas con un ajuste de $R^2 = 0.67$.

$$f_o = 2.907 \cdot R^{-0.43} - 0.0714 \quad (2.4)$$

$$f_{50} = 2.090 \cdot R^{-0.46} - 0.0357 \quad (2.5)$$

Jiménez (2016) calibró modelos de fricción lateral para los percentiles 50 (f_{50}) y 85 (f_o) de la distribución de fricciones demandadas por los conductores a partir de 518 registros en 23 curvas horizontales en Chile, considerando el radio de curva (R , en m) y la velocidad de operación (V_{85} , en km/h), y observó un ajuste asimétrico de la distribución de fricción. Ecuaciones (2.6) y (2.7) presentan los modelos de percentil 85 y 50, con R^2 de 0.97 y 0.98, respectivamente.

$$f_o = \frac{\left(1 + 0.97 \cdot \left(\frac{322.29}{R} + 9.28 \times 10^{-5} \cdot V_{85}^2 - 1\right)\right)^{1.016}}{9.81} \quad (2.6)$$

$$f_{50} = \frac{\left(1 + 0.37 \cdot \left(\frac{238.35}{R} + 6.99 \times 10^{-5} \cdot V_{85}^2 - 1\right)\right)^{2.151}}{9.81} \quad (2.7)$$

Malaghan y Pawar (2022) calibraron un modelo que cuantifica el percentil 85 de la fricción demandada (f_o) a partir de 2310 mediciones en seis curvas horizontales, identificaron el radio de la curva (R , en m) como la variable explicativa de mejor ajuste. Ecuación (2.8) presenta el modelo con $R^2 = 0.80$.

$$f_o = 0.881 - 0.123 \cdot \ln(R) \quad (2.8)$$

Las principales variables que influyen en la fricción lateral son la velocidad dentro de la curva y su radio. Lamm *et al.* (1991) y Xu *et al.* (2015) estiman el percentil 85 de la fricción lateral bajo el supuesto de una función de densidad de probabilidad normal. Sin embargo, investigadores como Hugemann y Nickel (2003) y Jiménez (2016) han identificado una función de densidad de probabilidad asimétrica. De manera similar, los histogramas de aceleración lateral obtenidos por Xu *et al.* (2015) también sugieren una distribución asimétrica.

En la Figura 2.2 se representan las funciones de fricción de diseño y de operación (Lamm *et al.*, 1991; Xu *et al.*, 2015; Jiménez, 2016; Malaghan y Pawar, 2022; MOP, 2024a). Como las funciones propuestas por Lamm *et al.* (1991) y Jiménez (2016) están expresadas en función de la velocidad de operación en el centro de la curva (V_{85} , en km/h), se utiliza el modelo de Echaveguren y Sáez (2001) que relaciona esta velocidad con el radio de la curva (R , en m), descrito en la Ecuación (2.9).

$$V_{85} = 95.08 - \frac{1879.93}{R} \quad (2.9)$$

La fricción de operación obtenida con el modelo de Lamm *et al.* (1991) presenta valores bajos para radios mayores a 200 m. En cambio, los demás modelos de fricción de operación incluidos entregan valores superiores a los de fricción de diseño (MOP, 2024a), independientemente del radio, con la excepción del modelo de Malaghan y Pawar (2022), cuyos valores se sitúan por debajo de la fricción de diseño cuando el radio supera los 550 m.

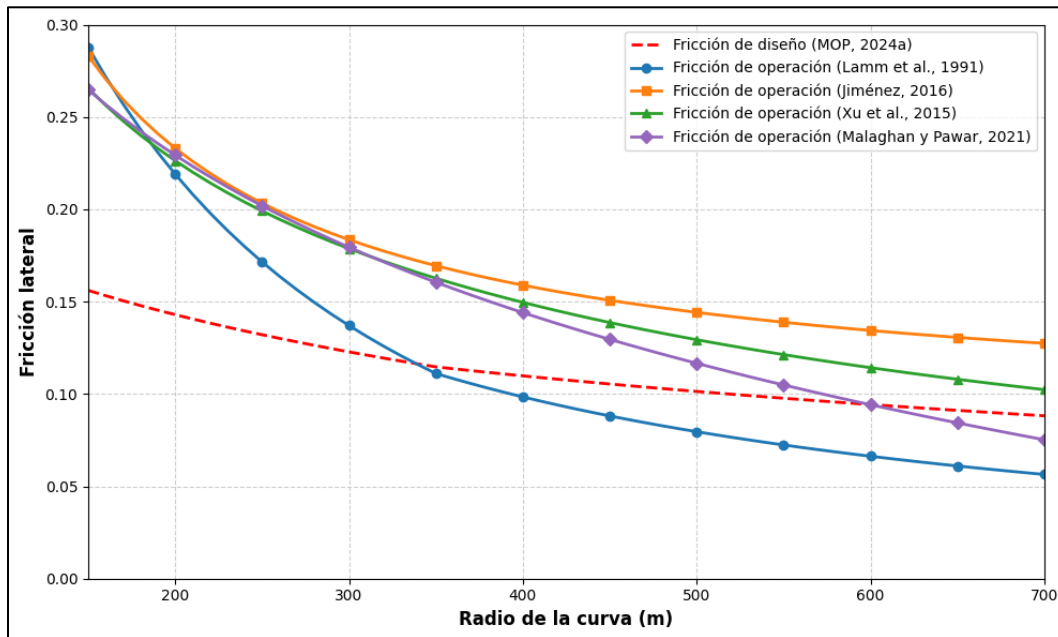


Figura 2.2 Funciones de fricción de diseño y asociadas al percentil 85 de la fricción demandada por los conductores

En la Figura 2.3 se presentan las funciones de fricción de operación asociadas al percentil 50 de los conductores (Xu *et al.*, 2015; Jiménez, 2016). Se observa que estas funciones muestran valores similares al de la fricción de diseño en el rango de radios analizado.

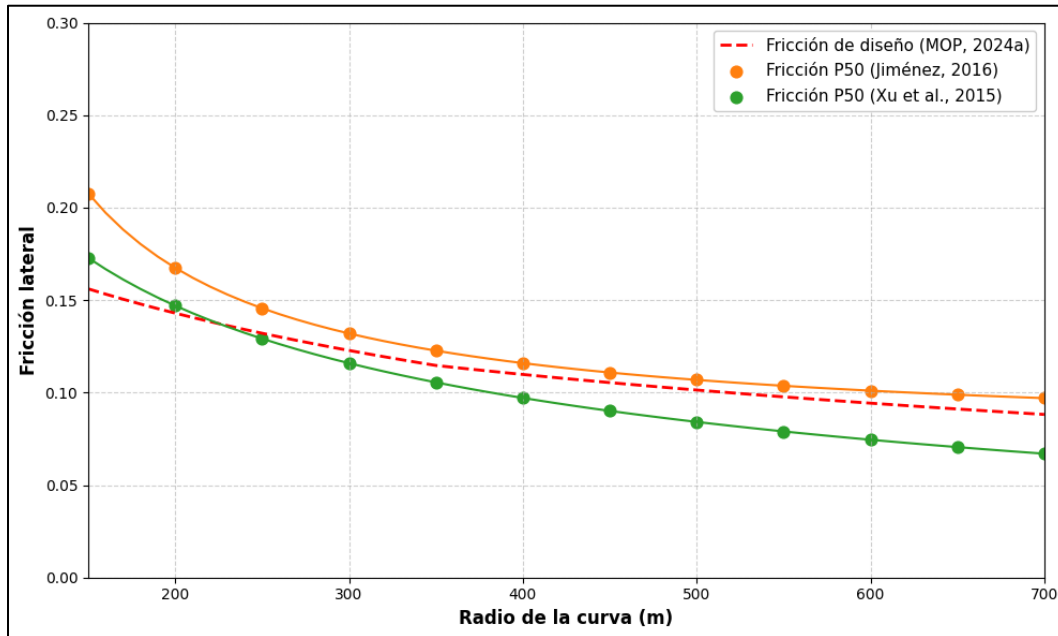


Figura 2.3 Funciones de fricción de diseño y asociadas al percentil 50 de la fricción demandada por los conductores

2.6 Fricción del pavimento

La fricción del pavimento se refiere al coeficiente de fricción más alto que se puede alcanzar entre un neumático y la superficie del pavimento bajo condiciones específicas. Este valor depende de factores como la textura del pavimento (microtextura y macrotextura), el tipo de neumático, la velocidad de deslizamiento, las condiciones ambientales (seca, húmeda, con nieve, etc.) y el deslizamiento del neumático (Wambold *et al.*, 1995).

La fricción del pavimento varía a lo largo del tiempo. El volumen de tránsito y las variaciones estacionales interactúan con la superficie y los agregados del pavimento, generando una oscilación de la fricción en torno a un valor de tendencia (de Solminihac *et al.*, 2006).

El modelo universal utilizado para representar la fricción última provista por el pavimento en función de la velocidad es el Índice Internacional de Fricción (IFI). Este índice depende del equipo utilizado para medir la resistencia al deslizamiento y la macrotextura. Wambold *et al.* (1995) ajustaron los coeficientes de calibración del IFI para equipos típicos. de Solminihac *et al.* (2007) propusieron un modelo de fricción del pavimento y un modelo de umbral de fricción calibrados para Chile.

2.7 Umbral de fricción

El umbral mínimo de resistencia al deslizamiento se define según la geometría de la curva, sin considerar la velocidad de diseño. Este umbral indica cuándo es necesario intervenir para restituir las condiciones de fricción del pavimento. En curvas con radios menores a 250 m se utiliza un valor de 0.55, y en radios mayores a 250 m, un valor de 0.50. (MOP, 2024b)

2.8 Márgenes de seguridad en fricción

El margen de seguridad en fricción es la diferencia entre la fricción disponible en la vía y la fricción requerida por el sistema vehículo-conductor para transitar con seguridad y comodidad. Se construye comparando una medida de fricción de referencia (capacidad, resistencia u oferta)—ya sea la fricción del pavimento o la fricción de diseño—con la fricción de operación (demanda). Cuanto mayor sea esa diferencia, mayor será la holgura—o margen de seguridad—frente al deslizamiento.

Navin (1990) introdujo un margen de seguridad utilizando principios de confiabilidad. Definió el margen de seguridad como la diferencia entre el radio de la curva (R_h) y el radio crítico mínimo que el sistema vehículo-conductor necesita para no deslizarse (R_c), asumiendo que la fricción lateral sigue una distribución normal. La probabilidad de falla se calcula dividiendo la diferencia ($R_h - R_c$) por la desviación estándar de R_c . La propuesta de Navin (1990) constituye el primer enfoque probabilístico para estimar el margen de seguridad.

Lamm *et al.* (1991) definieron un margen de seguridad en curvas horizontales como la diferencia entre el factor de fricción de diseño y el percentil 85 de la fricción demandada. Demostraron que, al aumentar esta brecha, también aumentan las tasas de accidentes por deslizamiento. Sobre esa base, establecieron tres niveles de consistencia del margen de seguridad: bueno, aceptable y pobre.

Morral y Talarico (1994) propusieron un margen de seguridad sobre la diferencia entre la fricción de operación y la fricción del pavimento. Los autores señalaron que el margen de seguridad varía dependiendo de si el pavimento está seco, húmedo o con hielo.

Reymond *et al.* (2001) propusieron un modelo para calcular un margen de seguridad en la fricción lateral, con el fin de explicar por qué esta disminuye al aumentar la velocidad. Según el modelo, los conductores eligen una fricción lateral menor que la máxima disponible antes del deslizamiento, manteniendo así un margen de seguridad definido por la diferencia entre ambos. Dicho margen está asociado a la incertidumbre del conductor sobre la percepción del radio de la curva.

Vaiana *et al.* (2018) midieron el margen de seguridad como la diferencia entre la fricción de operación (f_o) y la fricción de diseño (f_d) usando voluntarios. Comprobaron que todos los conductores superaban la fricción de diseño, lo que revela que la velocidad de diseño original no refleja el comportamiento real en curvas horizontales.

Rahmani *et al.* (2025) definieron el margen de seguridad como el producto de un factor de severidad, estimado a partir de la diferencia entre la fricción demandada y la fricción de diseño, y un factor de probabilidad basado en la frecuencia empírica de excedencias de fricción de diseño en rampas curvas de acceso de autopistas.

A medida que la fricción del pavimento disminuye con el tiempo debido al pulimento del pavimento, el margen de seguridad también disminuye y varía estacionalmente, lo que introduce aún más incertidumbre (Echaveguren y de Solminihac, 2011; Echaveguren *et al.*, 2015). En cuanto a la fricción de operación, esta presenta variabilidad, ya que depende de las

condiciones específicas del entorno o socioculturales (Lamm *et al.*, 1991; Echaveguren y Sáez, 2001; Xu *et al.*, 2015; Jiménez, 2016).

2.9 Principios de confiabilidad

Para considerar la variabilidad de la fricción de diseño y de operación, y por tanto del margen de seguridad, se utilizan los principios de confiabilidad. Estos permiten incorporar las distribuciones de probabilidad de las variables operativas y geométricas involucradas. Su aplicación permite modelar la incertidumbre de las condiciones variables de la carretera y el entorno, y estimar probabilidades de excedencia como medida del margen de seguridad en fricción.

Lewis (1987) define la confiabilidad como la probabilidad de que un sistema opere correctamente bajo ciertas condiciones por un período de tiempo determinado, es decir, que la oferta no sea superada por la demanda. En términos matemáticos el índice de confiabilidad (β) es definido en función de la probabilidad de falla (P_f), como se muestra en la Ecuación (2.10).

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (2.10)$$

Donde Φ es la función de distribución acumulada de la variable normal estándar.

En el análisis de confiabilidad, el evento de falla no se refiere necesariamente a un colapso o evento catastrófico. Más bien, el término probabilidad de falla representa la probabilidad de que ocurra un evento no deseado que exceda cierto umbral. En el diseño vial, se ha propuesto el uso del término probabilidad de excedencia (Essa, 2016).

El análisis de confiabilidad considera dos componentes fundamentales: las variables aleatorias, que representan la incertidumbre inherente al sistema, y una o más funciones de estado límite (*FEL*), que definen los modos de falla. En general, la *FEL* se formula como un equilibrio entre oferta y demanda. En el diseño vial, la oferta puede entenderse como las

medidas de ingeniería destinadas a satisfacer las exigencias del conductor o del vehículo, mientras que la demanda representa dichas exigencias.

La Figura 2.4 muestra la variabilidad de las funciones de fricción de diseño (f_d) y de operación (f_o), junto con la zona de falla o excedencia, donde la demanda supera la oferta según la función de estado límite. Esta zona entrega una medida cualitativa de la probabilidad de excedencia, la cual depende de tres factores: la forma, la distancia entre medias y la dispersión de las curvas (Haldar y Mahadevan, 2000).

La forma se representa mediante las funciones de densidad de probabilidad. A mayor distancia entre las medias, menor es la zona de excedencia. En cambio, una mayor dispersión en las curvas incrementa dicha zona.

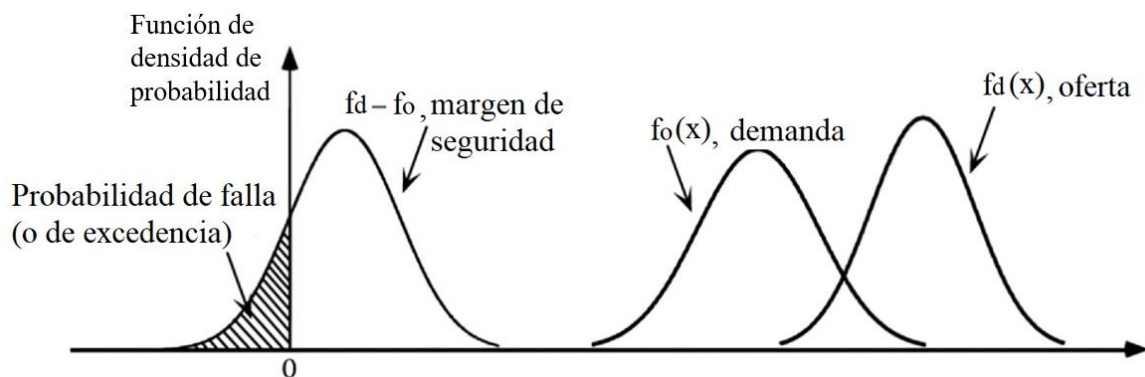


Figura 2.4 Representación de la variabilidad de las fricciones de diseño y operación (Adaptado desde Nowak y Collins, 2013)

En confiabilidad, la probabilidad de excedencia (P_f , de aquí en adelante) se obtiene a través de la Ecuación (2.12), donde $f(\vec{X})$ corresponde a la función de densidad de probabilidad conjunta de las variables aleatorias.

$$FEL(\vec{X}) \leq 0 \text{ (Falla o excedencia)} \quad (2.11)$$

$$P_f = P(FEL(\vec{X}) \leq 0) = \int_{FEL(\vec{X})} \dots \int \int f(\vec{X}) dx \quad (2.12)$$

Si la función de estado límite $FEL(\vec{X})$ es una función lineal y las variables aleatorias “ $\vec{X}$ ” poseen una distribución normal sin correlación entre ellas, el índice de confiabilidad (β) puede describirse según la Ecuación (2.13) (Haldar y Mahadevan, 2000).

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (2.13)$$

Donde, μ_R y σ_R son la media y desviación estándar de la función de oferta y μ_S y σ_S son la media y desviación estándar de la función de demanda del sistema.

Si las funciones de oferta (R) y de demanda (S) siguen una distribución lognormal, es decir, $R \sim LN(\lambda_R, \zeta_R)$ y $S \sim LN(\lambda_S, \zeta_S)$, entonces sus logaritmos naturales, $\ln(R)$ y $\ln(S)$, siguen una distribución normal.

$$FEL = \ln(R) - \ln(S) \quad (2.14)$$

De este modo, la condición de falla o de excedencia ocurre cuando $FEL < 0$, donde $FEL \sim N(\lambda_R - \lambda_S, \sqrt{\zeta_R^2 + \zeta_S^2})$. Así, el índice de confiabilidad del sistema se expresa como la Ecuación (2.15).

$$\beta = \frac{\lambda_R - \lambda_S}{\sqrt{\zeta_R^2 + \zeta_S^2}} \quad (2.15)$$

Luego, dichos parámetros de la lognormal pueden ser calculados a partir de la información de los parámetros de la distribución normal (donde μ_x y σ_x son la media y desviación estándar de X, respectivamente): $\lambda_x = E(\ln(x)) = \ln(\mu_x) - \frac{\zeta_x^2}{2}$ y $\zeta_x^2 = \text{Var}(\ln(x)) = \ln\left(1 + \left(\frac{\sigma_x}{\mu_x}\right)^2\right)$. Así, la Ecuación (2.15) se reescribe como la Ecuación (2.16).

$$\beta = \frac{\ln \left(\frac{\mu_R}{\mu_S} \cdot \frac{1 + \left(\frac{\sigma_S}{\mu_S} \right)^2}{1 + \left(\frac{\sigma_R}{\mu_R} \right)^2} \right)}{\sqrt{\ln \left(\left(1 + \left(\frac{\sigma_R}{\mu_R} \right)^2 \right) \cdot \left(1 + \left(\frac{\sigma_S}{\mu_S} \right)^2 \right) \right)}} \quad (2.16)$$

Los métodos de confiabilidad de primer orden (FORM) y segundo orden (SORM) se usan para evaluar funciones de densidad de probabilidad generalizadas que son no lineales y cuyas variables aleatorias pueden no ser normales. FORM aproxima la función de estado límite mediante una expansión lineal (primer orden), aplicable cuando la función es lineal con variables normales no correlacionadas o cuando una función no lineal se representa por una aproximación lineal con variables normales equivalentes. SORM extiende esta aproximación usando una expansión de segundo orden, que incluye la curvatura de la superficie de falla cerca del punto de diseño y permite considerar funciones lineales con variables no normales correlacionadas, mejorando la precisión en sistemas no lineales. Si la curvatura es mínima, los resultados de FORM y SORM son prácticamente iguales (Haldar y Mahadevan, 2000; Nowak y Collins, 2013).

2.10 Aplicaciones de principios de confiabilidad en curvas horizontales

El estado-del-arte ofrece diversos ejemplos de aplicación de los principios de confiabilidad en el diseño geométrico de curvas horizontales. La mayor parte de la investigación realizada utiliza análisis de confiabilidad de primer orden (FORM) y simulación de Montecarlo, asumiendo distribuciones de probabilidad normal y funciones de estado límite lineales.

Navin (1990) fue el primero en introducir el concepto de estado límite en el diseño geométrico de curvas horizontales. Investigó la posibilidad de desarrollar medidas de seguridad para la distancia de detención, curvas horizontales, distancia de decisión, distancia de adelantamiento y curvas verticales. Mediante el uso de valores promedio y desviaciones estándar, estimó distribuciones de frecuencia y del margen de seguridad, enfocándose inicialmente en la distancia de detención.

Echaveguren *et al.* (2005) utilizaron un índice de confiabilidad usando FORM como medida del margen de seguridad con respecto a la fricción del pavimento y la fricción de diseño y evaluaron un caso de estudio para vehículos livianos. Identificaron como variables de alto impacto la macrotextura, la resistencia al deslizamiento y el radio de curvatura, mientras que el peralte mostró un efecto poco significativo.

Shin y Lee (2015) utilizaron FORM para estimar la probabilidad de deslizamiento y vuelco en rampas de salida e intercambios de autopistas. Sus resultados mostraron que la probabilidad de deslizamiento disminuye significativamente al aumentar el coeficiente de fricción lateral, mientras que el riesgo de vuelco se relaciona principalmente con la velocidad y el ángulo de deflexión.

Dhahir y Hassan (2019) propusieron funciones de estado límite para evaluar el deslizamiento (como la diferencia entre la fricción del pavimento y la fricción operativa) y la comodidad (diferencia entre la aceleración lateral y un umbral de confort). Utilizando la transformada de Nataf, generaron curvas de probabilidad de excedencia en función del radio de curvatura.

Cruz-Marabolí y Echaveguren (2019) desarrollaron un modelo analítico para estimar la probabilidad de vuelco en vehículos pesados, combinando FORM con funciones logísticas de tipo Gompertz. Determinaron que los radios mínimos establecidos por la normativa chilena, aunque efectivos para evitar el deslizamiento, no garantizan la prevención del vuelco en todos los casos.

En paralelo, otros autores han utilizado simulación de Montecarlo para incorporar la variabilidad de las condiciones operativas. El-Khoury y Hobeika (2007) evaluaron la distancia de adelantamiento considerando la variabilidad del tiempo de percepción y reacción, la tasa de desaceleración y las características físicas de los vehículos. Sarhan y Hassan (2008) aplicaron esta técnica al diseño de curvas horizontales combinadas con curvas verticales, mostrando cómo la pendiente, el radio y el peralte influyen en la visibilidad de parada disponible.

2.11 Conclusiones

En este capítulo se presentó el diagrama fricción–velocidad del modelo de tres zonas, que incluye la fricción de diseño, la fricción de operación, que refleja el comportamiento real de los conductores, y la fricción del pavimento, que representa la capacidad máxima del pavimento. Se observó que la fricción de operación disminuye al aumentar el radio de la curva.

Se revisaron distintos modelos de fricción de operación disponibles en la literatura, los cuales dependen de variables geométricas y operativas. Estos modelos han sido calibrados localmente, por lo que no existe una formulación universal aplicable a todos los contextos. En cuanto al margen de seguridad, su definición varía según el autor: algunos lo consideran como la diferencia entre la fricción de diseño y la de operación, mientras que otros lo definen como la diferencia entre la fricción de operación y la fricción disponible del pavimento.

Los modelos propuestos en el estado-del-arte coinciden en que la velocidad de operación es una de las principales variables que describen la fricción lateral. Se determinó que el radio de la curva horizontal es un buen descriptor de dicha variable, lo cual se condice con el modelo de masa puntual, que relaciona la fricción lateral con las mismas variables identificadas en los modelos revisados.

Si bien estos márgenes suelen construirse con valores determinísticos, en la práctica se ven afectados por múltiples fuentes de incertidumbre. La fricción del pavimento disminuye con el tiempo debido al desgaste superficial y varía según las condiciones climáticas, reduciendo el margen de seguridad. Por su parte, la fricción de operación también presenta variabilidad, ya que depende del contexto local, incluyendo factores ambientales y socioculturales, lo que exige calibraciones locales.

Para considerar la variabilidad de estas fricciones y del margen de seguridad, los principios de confiabilidad permiten trabajar con distribuciones de probabilidad asociadas a variables geométricas y operativas, integrando la incertidumbre propia de las condiciones reales de

circulación. Así, se puede estimar la probabilidad de excedencia como una medida cuantitativa del margen de seguridad frente al deslizamiento.

El estado-del-arte muestra diversas aplicaciones de estos principios en el diseño de curvas horizontales. Predominan los enfoques basados en el análisis de confiabilidad de primer orden (FORM) y en simulación mediante el método de Montecarlo, generalmente bajo el supuesto de distribuciones normales y funciones de estado límite lineales.

CAPÍTULO 3 PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE LA FRICCIÓN DE DISEÑO

3.1 Introducción

En este capítulo se explica el procedimiento de cálculo de la probabilidad de excedencia de la fricción de diseño considerando su variabilidad. El capítulo comienza con la descripción de la metodología utilizada y, posteriormente, la aplicación de los principios de confiabilidad.

3.2 Determinación de la probabilidad de excedencia

La metodología utilizada para el cálculo de la probabilidad de excedencia de la fricción de diseño se muestra en la Figura 3.1. La metodología sigue cuatro tareas.

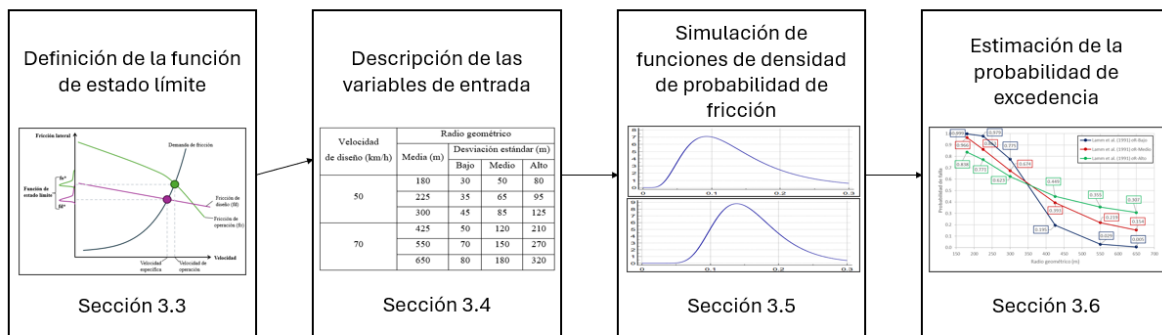


Figura 3.1 Metodología del cálculo de la probabilidad de excedencia

Definición de la función de estado límite: se establece una expresión matemática que representa la condición de falla del sistema. En este caso, cuando la fricción de operación excede la fricción de diseño.

Descripción de la(s) variable(s) de entrada: se identifican la(s) variable(s) que describe(n) la función de estado límite, discriminando entre variables no aleatorias y aleatorias. En este

último tipo de variables se definen sus parámetros estadísticos (medias, desviaciones estándar y distribuciones).

Simulación de funciones de densidad de probabilidad de fricción: se generan múltiples escenarios mediante simulación de Montecarlo, combinando valores aleatorios de las variables de entrada. Esto permite estimar la distribución probabilística de las funciones de fricción, así como de la función de estado límite.

Estimación de la probabilidad de excedencia: se calcula la probabilidad de que la fricción de operación supere la fricción de diseño en distintos diseños geométricos considerando la variabilidad en la decisión del diseñador.

3.3 Definición de la función de estado límite

La Figura 3.2 muestra el punto de intersección entre las funciones de fricción de diseño y de operación con la demanda de fricción para una configuración geométrica de curva horizontal conocida. Se incluyen las fricciones de diseño (f_d^*) y de operación (f_o^*) asociadas a dicha curva, junto con sus respectivas funciones de densidad de probabilidad, las cuales representan la variabilidad de cada una.

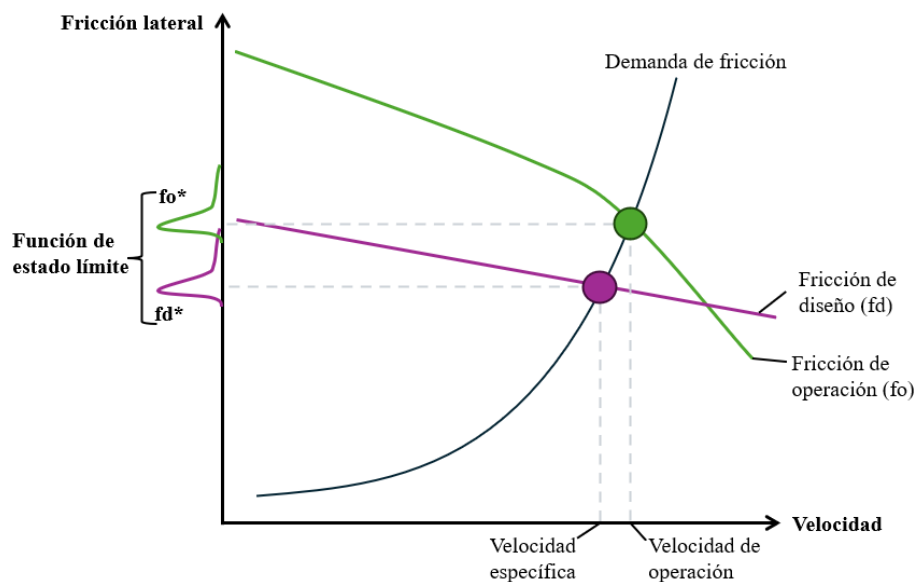


Figura 3.2 Representación de la variabilidad de las funciones de fricción lateral

La función de estado límite de una curva horizontal es descrita como la diferencia entre la fricción de diseño (f_d^*) y la fricción de operación (f_o^*). Para representar la fricción de operación se utilizan dos modelos: el propuesto por Lamm *et al.* (1991), denominado en adelante f_{o-1} , y el de Jiménez (2016), denominado en adelante f_{o-2} . Las funciones de estado límite se presentan en las Ecuaciones (3.1) y (3.2) se presentan las funciones de estado límite.

$$FEL_1 = f_d^* - f_{o-1} \quad (3.1)$$

$$FEL_2 = f_d^* - f_{o-2} \quad (3.2)$$

La Ecuación (3.3) presenta la expresión del Manual de Carreteras de Chile para la fricción de diseño (f_d), diferenciada según si la velocidad de diseño (V_d) es menor o mayor a 80 km/h (MOP, 2024a).

$$f_d = \begin{cases} 0.265 - \frac{V_e}{602.4} & ; V_d < 80 \text{ km/h} \\ 0.193 - \frac{V_e}{1134} & ; V_d \geq 80 \text{ km/h} \end{cases} \quad (3.3)$$

El peralte se define como una función a trozos del radio. En esta memoria se usa la expresión para V_d menores a 80 km/h, dada en la Ecuación (3.4) (MOP, 2024a).

$$e = \begin{cases} 0.07 & ; 25 \leq R \leq 350 \\ 0.07 - 0.0608 \cdot \left(1 - \frac{350}{R}\right)^{1.3} & ; 350 \leq R \leq 2500 \\ 0.02 & ; R > 2500 \end{cases} \quad (3.4)$$

La Ecuación (3.5) entrega la fricción de diseño de una curva horizontal (f_d^*) a partir de la intersección entre el modelo de masa puntual de la Ecuación (2.1) y la expresión del Manual de Carreteras de Chile para la fricción de diseño de la Ecuación (3.3), utilizando el peralte definido en la Ecuación (3.4). Esta expresión relaciona la fricción de diseño con el radio de la curva (R , en metros) y el peralte (e , en decimal).

$$f_d^* = \frac{(-0.211 \cdot R + \sqrt{R \cdot (0.044521 \cdot R + 508 \cdot e + 134.62)})^2}{508 \cdot R} - e \quad (3.5)$$

Para representar la fricción de operación se consideran dos modelos: el de Lamm *et al.* (1991), presentado en la Ecuación (3.6), y el de Jiménez (2016), mostrado en la Ecuación (3.7). Ambos se expresan en función del radio de la curva (R , en metros), el peralte (e , en decimal) y la velocidad de operación (V_{85} , en km/h), medida en el centro de la curva.

$$f_{o-1} = \frac{V_{85}^2}{127 \cdot R} - e \quad (3.6)$$

$$f_{o-2} = \frac{\left(1 + 0.97 \cdot \left(\frac{322.29}{R} + 9.28 \times 10^{-5} \cdot V_{85}^2 - 1\right)\right)^{1.016}}{9.81} \quad (3.7)$$

La velocidad de operación (V_{85}), medida en el centro de la curva, se estima utilizando el modelo calibrado en Chile por Echaveguren y Sáez (2001), presentado en la Ecuación (3.8). Esta expresión relaciona V_{85} con el radio de la curva (R , en metros):

$$V_{85} = 95.08 - \frac{1879.93}{R} \quad (3.8)$$

3.4 Descripción de la variable de entrada

Los modelos de fricción de diseño y de operación que conforman la función de estado límite dependen del radio de la curva.

El Manual de Carreteras de Chile establece radios mínimos de 80 m y 180 m para velocidades de 50 y 70 km/h, respectivamente. Se asumió que el radio sigue una distribución normal, dado que en la práctica los proyectistas suelen seleccionar valores cercanos al promedio entre los límites mínimo y máximo recomendados según la jerarquía vial. Además, la incorporación de la desviación estándar permite incluir en el análisis el efecto de la decisión

del diseñador sobre la configuración geométrica de la curva y su impacto en la probabilidad de excedencia.

Los valores utilizados para la variable de entrada fueron adoptados directamente de la formulación desarrollada por de Solminihac *et al.* (2007), y se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Distribuciones de la variable de entrada (de Solminihac *et al.*, 2007)

Velocidad de diseño (km/h)	Radio de la curva			
	Media (m)	Desviación estándar (m)		
		Bajo	Medio	Alto
50	180	30	50	80
	225	35	65	95
	300	45	85	125
70	425	50	120	210
	550	70	150	270
	650	80	180	320

3.5 Simulación de funciones de densidad de probabilidad de fricción

Con el propósito de obtener funciones de densidad de probabilidad tanto para la fricción de diseño como para la fricción de operación, se aplicó simulación de Montecarlo.

Como fue discutido en el subcapítulo 3.2, se presentaron las funciones de fricción en función del radio de curva, las cuales representan la entrada del modelo en ambas funciones de estado límite (FEL_1 y FEL_2). Para representar su variabilidad, se consideraron 18 combinaciones de medias y desviaciones estándar correspondientes a distribuciones normales del radio geométrico, según lo descrito en la Tabla 3.1.

Posteriormente, se generaron múltiples valores aleatorios de radio, lo que permitió simular los valores de fricción de diseño y de operación para cada una de las 18 distribuciones normales del radio.

La Figura 3.3 presenta un ejemplo del procedimiento aplicado. Se considera como variable de entrada a la distribución del radio $N \sim (550; 270)$, a partir de la cual se genera un conjunto de datos mediante simulación de Montecarlo que permite obtener la función de densidad de probabilidad resultante para la fricción de diseño (f_d) y de operación (f_{o-1} y f_{o-2}).

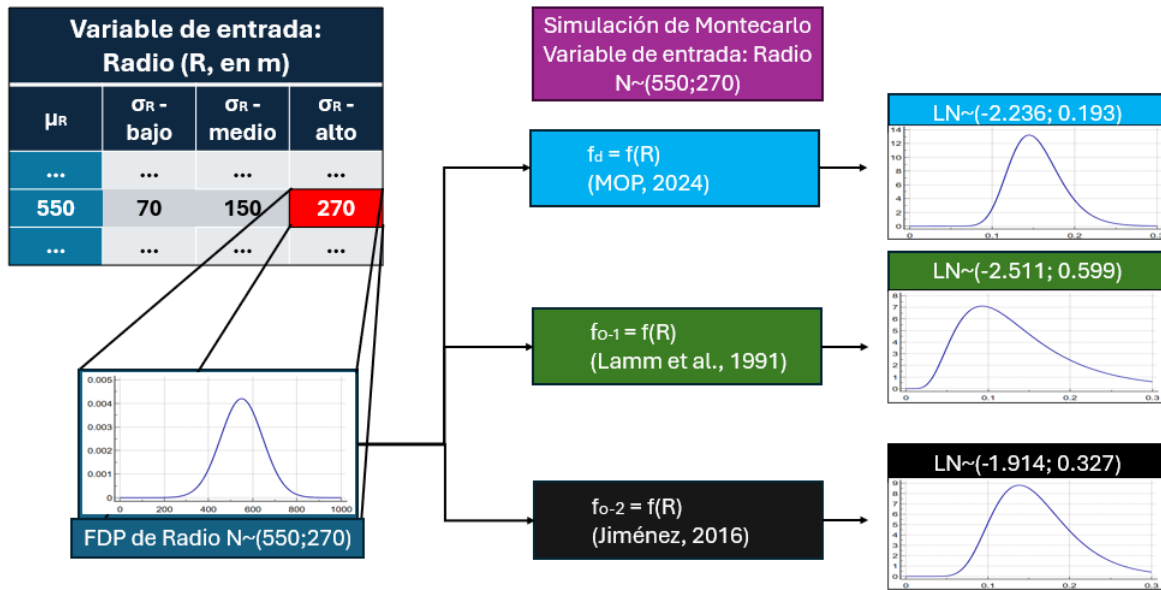


Figura 3.3 Ejemplo de obtención de funciones de densidad de probabilidad de fricción

Para realizar el análisis estadístico se utilizó el *software EasyFit® v5.5*, el cual permite ajustar distribuciones de probabilidad continuas y discretas, y evaluar la bondad de ajuste mediante pruebas estadísticas como la de *Anderson-Darling* (MathWave Technologies, 2010). Esta prueba se utiliza para evaluar si una muestra de datos proviene de una población con una distribución específica. Es una adaptación de la prueba de *Kolmogorov-Smirnov* que enfatiza las discrepancias en las colas de la distribución, lo que la hace más sensible a diferencias en los extremos (Stephens, 1974).

En el Anexo 3.1 se presentan las distribuciones normal y lognormal, junto con los resultados de sus respectivas pruebas de *Anderson-Darling*. En todas las simulaciones se observa que el valor del estadístico de *Anderson-Darling* es menor para la distribución lognormal en comparación con la normal. En función de estos resultados, se optó por seleccionar una única distribución para todas las funciones de fricción, eligiéndose la distribución lognormal.

La Tabla 3.2 presenta los parámetros estadísticos de las distintas funciones de densidad de probabilidad (FDP) obtenidas mediante simulación de Montecarlo para cada una de las 18 distribuciones del radio de curva consideradas. Se muestran los parámetros de las distribuciones lognormales ajustadas para la fricción de diseño, así como para la fricción de operación f_{o-1} y f_{o-2} .

Se observa que la media (μ) es negativa en todas las distribuciones debido a que los valores de fricción se encuentran en el rango entre 0 y 1. También, los parámetros de fd presentan valores de media más negativos y con menores desviaciones estándar que los de f_{o-1} y f_{o-2} , lo cual sugiere que la fricción de diseño está concebida como una estimación más conservadora y menos dispersa.

Tabla 3.2 Parámetros estadísticos resultantes de la simulación de Montecarlo

FDP de R (m)	FDP de f_d	FDP de f_{o-1}	FDP de f_{o-2}
N(180; 30)	LN(-1.911;0.055)	LN(-1.409;0.163)	LN(-1.342;0.152)
N(180; 50)	LN(-1.91;0.098)	LN(-1.402;0.274)	LN(-1.306;0.273)
N(180; 80)	LN(-1.902;0.157)	LN(-1.428;0.399)	LN(-1.292;0.379)
N(225; 35)	LN(-1.997;0.073)	LN(-1.637;0.174)	LN(-1.519;0.123)
N(225; 65)	LN(-1.994;0.118)	LN(-1.629;0.315)	LN(-1.483;0.256)
N(225; 95)	LN(-1.982;0.164)	LN(-1.634;0.433)	LN(-1.458;0.353)
N(300; 45)	LN(-2.122;0.060)	LN(-1.977;0.188)	LN(-1.712;0.095)
N(300; 85)	LN(-2.099;0.113)	LN(-1.944;0.341)	LN(-1.677;0.217)
N(300; 125)	LN(-2.076;0.166)	LN(-1.921;0.465)	LN(-1.642;0.327)
N(425; 50)	LN(-2.216;0.027)	LN(-2.368;0.117)	LN(-1.901;0.056)
N(425; 120)	LN(-2.201;0.093)	LN(-2.319;0.334)	LN(-1.868;0.176)
N(425; 210)	LN(-2.161;0.192)	LN(-2.250;0.568)	LN(-1.804;0.345)
N(550; 70)	LN(-2.276;0.032)	LN(-2.620;0.130)	LN(-2.006;0.050)
N(550; 150)	LN(-2.268;0.083)	LN(-2.584;0.315)	LN(-1.980;0.140)
N(550; 270)	LN(-2.236;0.193)	LN(-2.511;0.599)	LN(-1.914;0.327)
N(650; 80)	LN(-2.320;0.034)	LN(-2.791;0.130)	LN(-2.065;0.041)
N(650; 180)	LN(-2.314;0.088)	LN(-2.761;0.325)	LN(-2.042;0.126)
N(650; 320)	LN(-2.281;0.200)	LN(-2.676;0.621)	LN(-1.975;0.305)

3.6 Estimación de la probabilidad de excedencia

Como fue discutido previamente, las funciones de estado límite consideradas corresponden a la diferencia entre la fricción de diseño y la fricción de operación. Las expresiones de FEL_1 y FEL_2 se presentan en las Ecuaciones (3.1) y (3.2), respectivamente.

Para la obtención del índice de confiabilidad se utilizó la Ecuación (2.16) debido a que se asumió distribución lognormal. La probabilidad de excedencia se calculó utilizando la Ecuación (2.10).

Tabla 3.3 Indicadores de confiabilidad del estudio

Velocidad de diseño (km/h)	FDP normal del radio geométrico		Índice de confiabilidad (β)		Probabilidad de excedencia	
	μ	σ	FEL1	FEL2	FEL1	FEL2
50	180	30	-2.931	-3.533	0.998	1.000
		50	-1.745	-2.086	0.960	0.982
		80	-1.105	-1.489	0.865	0.932
	225	35	-1.904	-3.344	0.972	1.000
		65	-1.087	-1.812	0.862	0.965
		95	-0.753	-1.346	0.774	0.911
	300	45	-0.738	-3.639	0.770	1.000
		85	-0.432	-1.723	0.667	0.958
		125	-0.314	-1.183	0.623	0.882
70	425	50	1.270	-5.099	0.102	1.000
		120	0.342	-1.676	0.366	0.953
		210	0.147	-0.904	0.441	0.817
	550	70	2.571	-4.553	0.005	1.000
		150	0.969	-1.770	0.166	0.962
		270	0.438	-0.847	0.331	0.802
	650	80	3.516	-4.778	0.000	1.000
		180	1.326	-1.772	0.092	0.962
		320	0.606	-0.839	0.272	0.799

Para radios correspondientes a una velocidad de diseño de 50 km/h, la probabilidad de excedencia de FEL_1 varía entre un 62.3% y un 99.8%. En contraste, la probabilidad de excedencia de FEL_2 se mantiene consistentemente alta, oscilando entre un 88.2% y un 100%.

En radios asociados a una velocidad de diseño de 70 km/h, la probabilidad de excedencia de FEL_1 presenta una variación entre 0% y 44%, mientras que para FEL_2 se mantiene entre 80% y 100%.

La Figura 3.4 ilustra las probabilidades de excedencia correspondientes a la FEL_1 . Se observa un cambio de concavidad en la curva de probabilidad alrededor de los 350 m del radio. Además, en ese punto, la tendencia de la desviación estándar del radio se invierte, pasando de asociar σ -Bajo a las mayores probabilidades a las menores.

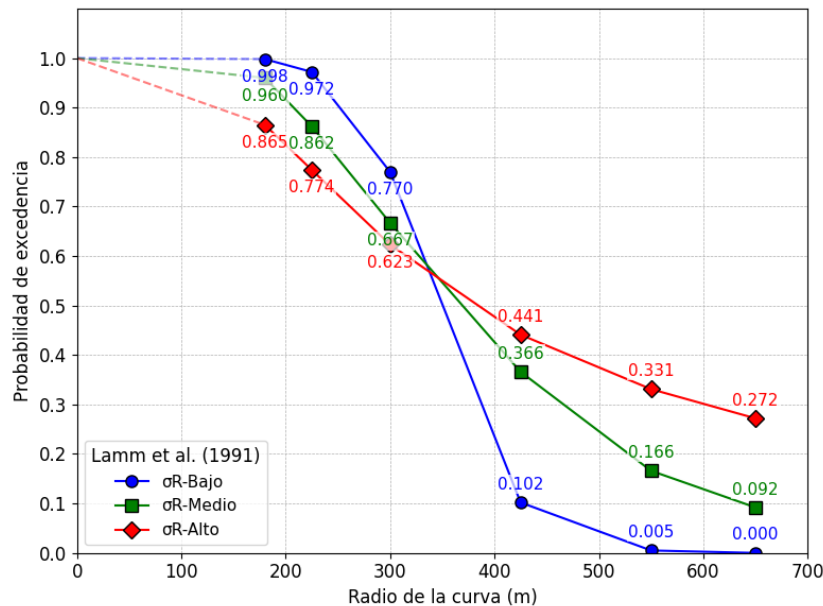


Figura 3.4 Probabilidad de excedencia de la fricción de diseño de la FEL 1

En la Figura 3.5 se presentan las probabilidades de excedencia asociadas a la FEL_2 . Se aprecia que dicha probabilidad se mantiene por sobre el 80%, independiente de la desviación estándar del radio geométrico.

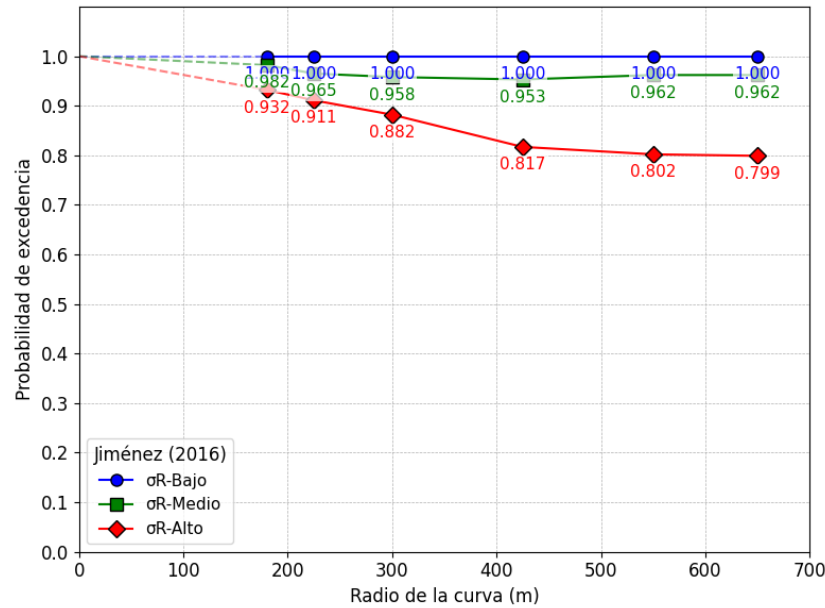


Figura 3.5 Probabilidad de excedencia de la fricción de diseño de la FEL 2

La Figura 3.6 muestra las probabilidades de excedencia para la FEL_1 y la FEL_2 en radios equivalentes a una velocidad de diseño de 50 km/h. En ambos casos, la probabilidad de excedencia supera el 50%.

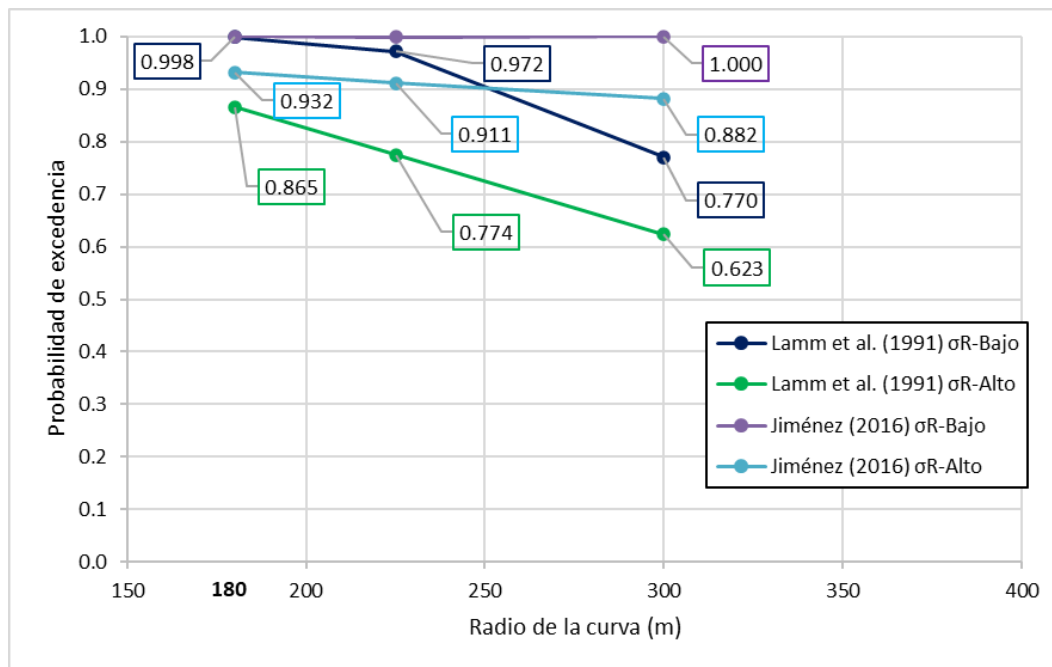


Figura 3.6 Probabilidad de excedencia en FEL 1 y FEL 2 para radios correspondientes a Vd de 50 km/h

La Figura 3.7 presenta las probabilidades de excedencia para la FEL_1 y la FEL_2 en radios correspondientes a una velocidad de diseño de 70 km/h. Se observa que, en este caso, la FEL_1 presenta probabilidades de excedencia inferiores al 50%, mientras que en la FEL_2 se mantienen por sobre 80%. Además, en la FEL_1 , las diferencias entre las probabilidades asociadas a la desviación estándar mayor y menor del radio disminuyen a medida que aumenta el radio, mientras que en la FEL_2 estas diferencias se mantienen prácticamente constantes.

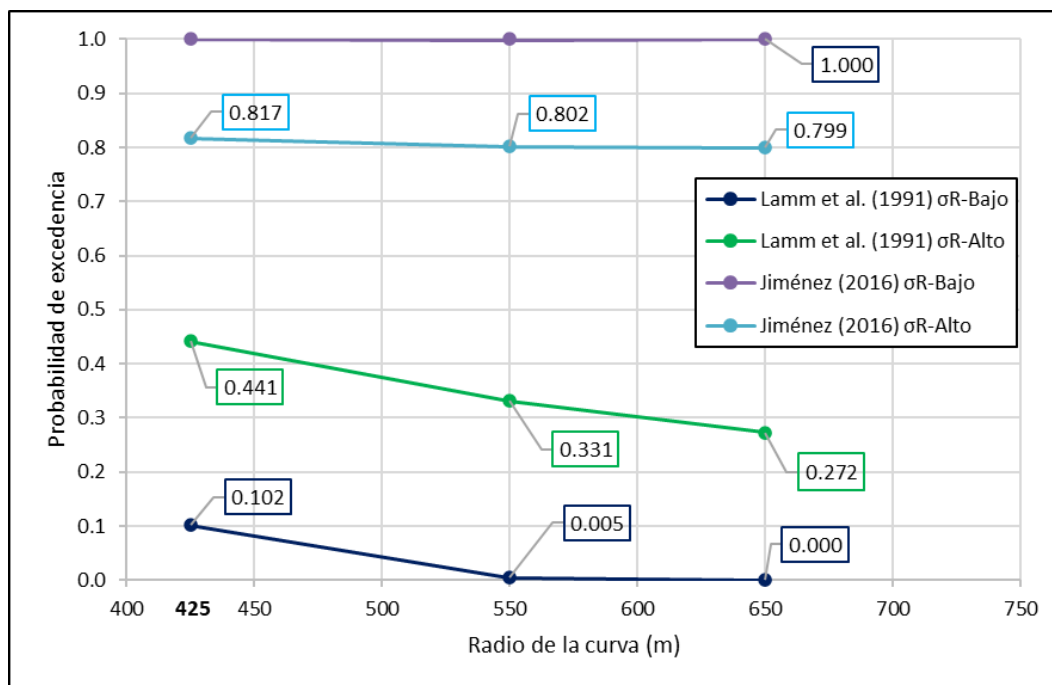


Figura 3.7 Probabilidad de excedencia en FEL 1 y FEL 2 para radios correspondientes a Vd de 70 km/h

3.7 Conclusiones

Las expresiones desarrolladas para la fricción de diseño y fricción de operación permiten definir las funciones de estado límite exclusivamente en función del radio de la curva. Esta dependencia facilita la evaluación del comportamiento de seguridad geométrica mediante simulación probabilística, considerando la variabilidad del radio como única variable de entrada.

Al asumir una distribución normal para el radio, se incorpora la variabilidad asociada a las decisiones de diseño geométrico. La caracterización del radio para distintas velocidades y niveles de desviación estándar permite representar distintas configuraciones geométricas y su efecto en la probabilidad de excedencia de la fricción disponible.

En base a los resultados expuestos, la distribución lognormal representa de manera más adecuada la variabilidad de la fricción en función del radio de curva. Esta elección se fundamenta en el coeficiente de Anderson–Darling, en comparación con los ajustes normales, tanto para la fricción de diseño como para las fricciones de operación (f_{o-1} y f_{o-2}). En la FEL_1 , las diferencias entre probabilidades asociadas a desviaciones estándar altas y bajas disminuyen a medida que aumenta el radio, lo que indica una menor influencia de la incertidumbre en radios grandes.

Para radios asociados a una velocidad de diseño de 50 km/h, ambas FEL presentan probabilidades de excedencia superiores al 50%. En los radios asociados a velocidad de diseño de 70 km/h, la FEL_1 muestra probabilidades de excedencia inferiores al 50%, mientras que en la FEL_2 se mantienen superiores al 80%.

CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES

La memoria de título tuvo como propósito estimar la probabilidad de excedencia de la fricción de diseño respecto de la fricción de operación, en caminos bidireccionales pavimentados. Se determinó que, en base a dos modelos empíricos de fricción de operación considerados, dicha probabilidad tiende a ser cercana a 100% en radios de curva asociados a velocidades de diseño de 50 km/h, dado que la fricción de operación supera sistemáticamente a la fricción de diseño, lo que evidencia una disminución efectiva en el margen de seguridad disponible asociado al confort.

Existen diversos modelos de fricción de operación en el estado-del-arte, los cuales dependen de variables como la velocidad de operación en el centro de la curva, el radio de curva y el peralte. Estos modelos suelen estar calibrados localmente, por lo que no existe una formulación universal aplicable a todos los contextos. En cuanto al margen de seguridad, su definición varía según los autores: algunos lo entienden como la diferencia entre la fricción de diseño y la fricción de operación, mientras que otros lo definen como la diferencia entre la fricción de operación y la fricción disponible en el pavimento.

Los modelos propuestos de fricción de operación en el estado-del-arte coinciden en que la velocidad de operación es una de las principales variables que describen la fricción lateral. Se determinó que el radio de la curva horizontal es un buen descriptor de la variable. Esto se condice con el modelo de masa puntual, que relaciona la fricción lateral con las mismas variables que se observan en los modelos.

Para representar la variabilidad en el proceso del diseño geométrico, se asumió una distribución normal del radio, considerando que, en la práctica, los proyectistas tienden a seleccionar valores cercanos al promedio entre los límites mínimo y máximo recomendados según la jerarquía vial. La caracterización del radio para distintas velocidades y niveles de desviación estándar permitió representar diversas configuraciones geométricas y analizar su efecto en la probabilidad de excedencia.

Dado que las funciones de estado límite presentan formulaciones no lineales, se realizó una simplificación mediante la adopción de una distribución lognormal para las funciones de fricción. Esta elección se justificó en la asimetría de los datos y en un mejor ajuste relativo con respecto al resto de distribuciones.

Los resultados obtenidos con la función de estado límite asociada a la fricción y velocidad de operación alemán (FEL_1), muestran que la probabilidad de excedencia alcanza valores cercanos al 100% para radios menores (asociados a velocidades de diseño de 50 km/h) y disminuye progresivamente por sobre los 350 m de radio, correspondientes a velocidades de diseño de 70 km/h. Por otro lado, la FEL_2 , basada en el modelo empírico chileno de fricción de operación, mantiene la probabilidad de excedencia cerca de 100% en todo el rango de radios analizados, lo que sugiere que los conductores operan con una demanda de fricción considerablemente mayor a la considerada en el diseño. Esto implica una reducción importante del margen de seguridad efectivo respecto del proyectado.

Las diferencias observadas entre FEL_1 y FEL_2 se atribuyen principalmente a las formulaciones utilizadas y a los modelos de velocidad de operación empleados. En términos generales, se confirma que no existe un modelo universal para estimar la fricción de operación, dado que estos dependen de variables locales y están calibrados para contextos específicos.

Para futuras investigaciones, se propone desarrollar modelos más sofisticados que consideren explícitamente la no linealidad de la función de estado límite. Estos modelos debieran incluir transformaciones adecuadas para aproximar la normalidad de las variables involucradas y utilizar funciones de velocidad de operación más precisas. Además, sería pertinente definir el margen de seguridad en función de las condiciones normales de conducción y la condición última del pavimento, de manera de representar de manera más precisa el modo de falla por deslizamiento.

REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO. (2001). Guidelines for geometric design of very low-volume local roads ($ADT \leq 400$). Washington, D.C.
- Bonneson, J. (2001). Controls for horizontal curve design. **Transportation Research Record**, 1751, 82–89. <https://doi.org/10.3141/1751-10>
- Cruz-Marabolí, P., y Echaveguren, T. (2019). Reliability-based estimation of heavy vehicle rollover probability on two-lane highways. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 23(11), 4898-4909.
- de Solminihac, H., Echaveguren, T. y Bustos, M. (2006). Assessment of time-dependant models of pavement skid resistance. **Revista Ingeniería de Construcción**, 21(3), 157–168.
- de Solminihac, H., Echaveguren, T. y Vargas, S. (2007). Friction reliability criteria applied to horizontal curve design of low volume roads. **Transportation Research Record**, 1989, 138–147. <https://doi.org/10.3141/1989-16>
- de Solminihac, H., Echaveguren, T., Vargas, S. y Chamorro, A. (2008). A friction management method to assess paved road networks. Seventh International Conference on Managing Pavement Assets, **Transportation Research Board**. <https://doi.org/10.3141/1989-16>
- Dhahir, B., y Hassan, Y. (2016). Reliability-based design of horizontal curves on two-lane rural highways. **Transportation Research Record**, 2588(1), 22-31.

- Echaveguren, T. y Sáez, J. (2001). Estudio de relaciones velocidad - geometría horizontal en vías de la VIII Región. **X Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**, 1–12. Sociedad Chilena de Ingeniería de Transporte.
- Echaveguren, T., Bustos, M. y de Solminihaç, H. (2005). Assessment of horizontal curves of an existing road using reliability concepts. **Canadian Journal of Civil Engineering**, **32(6)**, 1030–1038. <https://doi.org/10.1139/105-056>
- Echaveguren, T. y de Solminihaç, H. (2011). Seasonal variability of skid resistance in paved roadways. **ICE – Transport**, **164(1)**, 41–47. <https://doi.org/10.1680/tran.9.00007>
- Echaveguren, T., y Vargas-Tejeda, S. (2011). Diseño geométrico seguro de curvas horizontales en base a criterios de confiabilidad. **Carreteras: Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera**, (179), 63–70.
- Echaveguren, T., Díaz, A. y Vargas-Tejeda, S. (2015). Operating speed model for horizontal reverse curves. **ICE – Transport**, **168(6)**, 510–522. <https://doi.org/10.1680/jtran.13.00016>
- El-Khoury, J., y Hobeika, A. (2007). Assessing the risk in the design of passing sight distances. **Journal of Transportation Engineering**, **133(6)**, 370–377. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2007\)133:6\(370\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2007)133:6(370))
- Haldar, A. y Mahadevan, S. (2000). Probability, reliability and statistical methods in engineering design. (1ª ed.). **Wiley**.
- Herrin, G. y Neuhardt, J. (1974). An empirical model for automobile driver horizontal curve negotiation. **Human Factors**, **16**, 129–133. <https://doi.org/10.1177/001872087401600203>

- Hugemann, W., y Nickel, M. (2003). Longitudinal and lateral accelerations in normal day driving. **EVU-Jahrestagung, 12**. Zürich, Suiza.
- Jiménez, G. (2016). **Modelación de aceleraciones laterales medidas con GPS** [Tesis de magíster, Universidad de Concepción]. Repositorio Institucional – Universidad de Concepción.
- Lamm, R., Choueiri, E. y Mailaender, T. (1991). Side friction demand versus side friction assumed for curve design on two-lane rural highways. **Transportation Research Record, 1303**, 11–21.
- Lewis, E. (1987). Introduction to reliability engineering (1ª ed.). **Wiley**.
- MathWave Technologies (2010) **EasyFit Professional v. 5.5**. Ucrania.
- Malaghan, V. y Pawar, D. (2022). A short-term naturalistic driving study on predicting comfort thresholds for horizontal curves on two-lane rural highways. **Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 148(8)**, 04022045. <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000703>
- Ministerio de Fomento. (2016). **Norma 3.1-IC: Trazado. Instrucción de Carreteras**. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica. España.
- Ministerio de Obras Públicas, MOP. (2024a). **Instrucciones y criterios de diseño. Manual de Carreteras, Volumen 3**. Santiago, Chile.
- Ministerio de Obras Públicas, MOP. (2024b). **Seguridad Vial. Manual de Carreteras, Volumen 6**. Santiago, Chile.
- Morral, F. y Talarico, R. (1994). Side friction demanded and margin of safety on horizontal curves. **Transportation Research Record, 1435**, 145–152.

- Navin, F. (1990). Safety factors for road design: Can they be estimated? **Transportation Research Record**, **1280**, 181–189.
- Nowak, A. y Collins, K. (2013). Reliability of structures. (2^a ed.). **CRC Press**.
- Rahmani, O., Therani, H. y Aghayan, I. (2025). Enhancing highway loop safety level through proactive risk-based assessment of geometric configuration using lateral acceleration. **Traffic Injury Prevention**, **26(1)**, 128–138.
<https://doi.org/10.1080/15389588.2024.2394110>
- Reymond, G., Keneny, A., Droulez, J., y Berthoz, A. (2001). Role of lateral acceleration in curve driving: Driver model and experiments on a real vehicle and a driving simulator. **Human Factors**, **43(3)**, 483–495. <https://doi.org/10.1518/001872001775898188>
- Sarhan, M., y Hassan, Y. (2008). Three-dimensional, probabilistic highway design: Sight distance application. **Transportation Research Record**, **2060(1)**, 10-18.
- Shin, J., y Lee, I. (2015). Reliability analysis and reliability-based design optimization of roadway horizontal curves using a first-order reliability method. **Engineering Optimization**, **47(5)**, 622-641.
- Stephens, M. (1974). EDF statistics for goodness of fit and some comparisons. **Journal of the American Statistical Association**, **69(347)**, 730–737.
<https://doi.org/10.2307/2286009>
- Vaiana, R., Iuele, T., Gallelli, V., y Rogano, D. (2018). Demanded versus assumed friction along horizontal curves: An on-the-road experimental investigation. **Journal of Transportation Safety & Security**, **10(4)**, 318–344.
<https://doi.org/10.1080/19439962.2016.1277290>

- Wambold, J., Antle, C., Henry, J. y Rado, Z. (1995). International experiment to compare and harmonize skid resistance and texture measurements. **World Road Association**. Francia.
- Xu, J., Yang, K., Shao, Y. y Lu, G. (2015). An experimental study on lateral acceleration of cars in different environments in Sichuan, Southwest China. **Discrete Dynamics in Nature and Society**, 2015, 494130. <https://doi.org/10.1155/2015/494130>

ANEXOS

ANEXO 1.1 Contribución a los objetivos de desarrollo sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Seleccione a cuál o cuáles de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

- ☐ ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ☐ ODS-2 : Hambre cero.
- ☐ ODS-3 : Salud y bienestar.
- ☐ ODS-4 : Educación de calidad.
- ☐ ODS-5 : Igualdad de género.
- ☐ ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ☐ ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ☐ ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ☒ ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ☐ ODS-10 : Reducción de las desigualdades.
- ☐ ODS-11 : Ciudades y comunidades sostenibles.
- ☐ ODS-12 : Producción y consumo responsables.
- ☐ ODS-13 : Acción por el clima.
- ☐ ODS-14 : Vida Submarina.
- ☐ ODS-15 : Vida de ecosistemas terrestres.
- ☐ ODS-16 : Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ☐ ODS-17 : Alianzas para lograr los objetivos.

Vinculación
Este trabajo contribuye al Objetivo de Desarrollo Sostenible: Industria, Innovación e Infraestructura, al enfocarse en la seguridad vial en el diseño de curvas horizontales. La propuesta de revisar las diferencias entre la fricción de diseño y la de operación en carreteras bidireccionales permite evaluar el margen de seguridad efectivo, favoreciendo un diseño más confiable y adaptado a condiciones reales de circulación.

ANEXO 3.1 Análisis estadístico de datos

En esta sección se presentan las distribuciones de probabilidad evaluadas a partir de la base de datos de trabajo. El análisis se realizó mediante el software *EasyFit*, el cual aplica pruebas estadísticas para determinar la bondad de ajuste. Se utilizó el test de Anderson-Darling, que compara la función de distribución acumulada observada con la esperada.

La Tabla A.3.1 muestra los resultados del test de *Anderson-Darling* para cada función de distribución probada sobre el radio geométrico. Con base en estos resultados, se seleccionó la distribución lognormal.

Tabla A.3.1 Resultados del test de Anderson - Darling

FDP del Radio (m)	Distribución	Fricción de diseño		Fricción de operación fo-1		Fricción de operación fo-2	
		Anderson - Darling	Rango	Anderson - Darling	Rango	Anderson - Darling	Rango
N(180; 30)	Lognormal	0.21	1	2.57	1	2.56	1
	Normal	2.56	2	25.67	2	7.98	2
N(180; 50)	Lognormal	7.58	1	5.38	1	98.47	1
	Normal	28.65	2	56.38	2	238.47	2
N(180; 80)	Lognormal	19.17	1	10.40	1	105.54	1
	Normal	65.71	2	58.06	2	320.79	2
N(225; 35)	Lognormal	1.69	1	2.25	1	35.80	1
	Normal	6.77	2	27.60	2	77.33	2
N(225; 65)	Lognormal	6.78	1	5.39	1	120.24	1
	Normal	27.72	2	84.68	2	373.84	2
N(225; 95)	Lognormal	21.50	1	11.43	1	149.17	1
	Normal	72.32	2	118.34	2	403.60	2
N(300; 45)	Lognormal	7.45	1	10.14	1	32.13	1
	Normal	15.36	2	44.96	2	62.47	2
N(300; 85)	Lognormal	28.63	1	38.24	1	152.52	1
	Normal	69.21	2	175.97	2	409.15	2
N(300; 125)	Lognormal	50.67	1	49.43	1	194.21	1
	Normal	128.94	2	234.60	2	507.44	2
N(425; 50)	Lognormal	5.88	1	12.37	1	23.00	1
	Normal	11.96	2	39.76	2	36.69	2
N(425; 120)	Lognormal	51.11	1	88.36	1	203.26	1
	Normal	112.05	2	348.56	2	470.22	2
N(425; 210)	Lognormal	78.71	1	99.38	1	298.09	1
	Normal	203.83	2	415.07	2	685.93	2
N(550; 70)	Lognormal	3.30	1	7.49	1	34.47	1
	Normal	9.49	2	32.01	2	49.43	2
N(550; 150)	Lognormal	17.83	1	45.17	1	178.67	1
	Normal	61.86	2	291.66	2	393.41	2
N(550; 270)	Lognormal	70.82	1	113.27	1	402.39	1
	Normal	217.69	2	545.28	2	849.60	2
N(650; 80)	Lognormal	1.50	1	4.25	1	26.42	1
	Normal	6.30	2	24.65	2	37.52	2
N(650; 180)	Lognormal	14.57	1	39.90	1	203.98	1
	Normal	58.50	2	289.74	2	366.58	2
N(650; 320)	Lognormal	59.08	1	97.98	1	410.77	1
	Normal	221.09	2	558.90	2	851.37	2

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Felipe Andrés Muñoz Matamala
Título de la memoria : Probabilidad de excedencia de la fricción de diseño en curvas horizontales

Fecha de la presentación oral :

Profesor(es) Guía : Tomás Echaveguren Navarro
Profesor(es) Revisor(es) : Víctor Aguilar Vidal; Juan Carrasco Montagna
Concepto :
Calificación :

Resumen

Las curvas horizontales presentan alta incidencia de accidentes en carreteras bidireccionales. Su diseño se basa en un enfoque determinista que considera ecuaciones de fricción, peralte y velocidad, seleccionando un único radio y peralte bajo supuestos de homogeneidad en el comportamiento del conductor y condiciones del pavimento. Sin embargo, el coeficiente de fricción es inherentemente variable. Para incorporar esta variabilidad, se aplicaron principios de confiabilidad, estimando la probabilidad de que la fricción de operación exceda la fricción de diseño. Las funciones de fricción se generaron mediante simulación de Montecarlo, obteniéndose distribuciones asimétricas con un mejor ajuste relativo a lognormal. El análisis se realizó sobre curvas con velocidades de diseño de 50 y 70 km/h, seleccionando tres radios representativos y asignando a cada uno niveles bajo, medio y alto de desviación estándar. Los resultados indican que, sin importar la geometría de la curva, la fricción de operación supera consistentemente la fricción de diseño, con probabilidades de excedencia cercanas al 100%. Esto evidencia una disminución efectiva en el margen de seguridad disponible.
